

## 20. Das 2-m-Universal-Spiegelteleskop des Karl-Schwarzschild-Observatoriums und seine Jenaer Nachfolger

In den ersten Jahrzehnten unseres Jahrhunderts verlagerte sich das Schwergewicht der astronomischen Forschung nach Nordamerika. Mit den großen Spiegelteleskopen auf ausgewählten Standorten konnten wichtige neue Erkenntnisse, z. B. zur Problematik der extragalaktischen Systeme und ihrer Entfernung, gewonnen werden. Deutsche Astronomen, die noch um die Jahrhundertwende wesentliche Beiträge auf dem Gebiet der Astrophysik geleistet hatten, verfügten nicht über vergleichbar leistungsstarke Teleskope.

Um mit der internationalen Entwicklung Schritt halten zu können, wurde in den dreißiger Jahren auch von deutschen Astronomen ein 2-m-Spiegelteleskop geplant. Man wollte dieses Instrument in Südafrika bei Windhuk, im heutigen Namibia, aufstellen. In Jena gab es bei der Firma Zeiss bereits erste Entwürfe und ein Modell des geplanten Teleskops, als der Ausbruch des zweiten Weltkriegs das Projekt stoppte.

Nach dem Kriegsende wurde Anfang 1948 durch Prof. *Hans Kienle* (1895-1975), damals Direktor des Astrophysikalischen Observatoriums Potsdam, das Projekt eines 2-m-Spiegel-Teleskops wieder aufgegriffen. Erste Studien 1948 in Jena hatten ein klassisches Spiegelteleskop mit Parabolspiegel und mit Newton-, Cassegrain- und Cassegrain-Coudé-Fokus zum Ziel. Aber über den künftigen Einsatz bestand 1948 verständlicherweise eine gewisse Unsicherheit. *Kienle* war sich der großen Verantwortung bewußt, wenn er sagte: „Es sollte ja nicht einfach die Astronomie von gestern wieder aufgenommen, sondern die Pflege der Astronomie von morgen vorbereitet werden.“

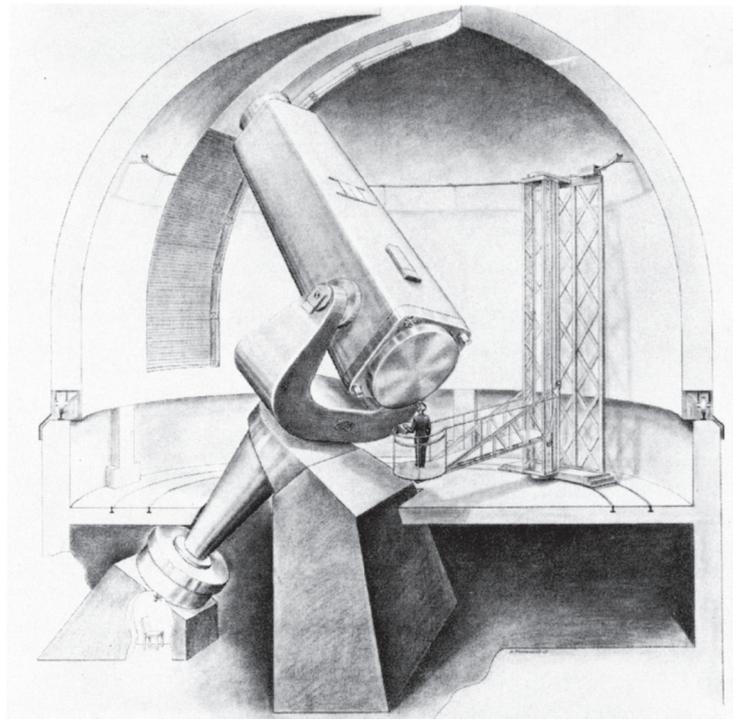
Wurde in Zukunft ein klassisches Spiegelteleskop für die Untersuchung von Einzelobjekten benötigt, oder war ein Instrument erforderlich, um größere Himmelsfelder nach interessanten oder verdächtigen Objekten zu durchmustern? Auf dem Mount Palomar wurde 1949 neben dem 5-m-Teleskop für diese Aufgaben der „Big-Schmidt“ fertiggestellt, ein lichtstarker Schmidt-Spiegel für die Aufnahme von Himmelsfeldern von  $6^\circ \times 6^\circ$ . Beide Richtungen waren hochaktuell; aber *Kienle* und alle Beteiligten waren sich darüber im klaren, daß bereits die Realisierung nur eines Großinstruments in der schwierigen Nachkriegssituation höchste Anstrengungen erforderte. Projektierung und Bau zweier großer Teleskope war damals völlig ausgeschlossen.

Bei *Kienle* entstand so der Wunsch nach einem Teleskop, das möglichst die Eigenschaften eines Schmidt-Teleskops mit denen eines klassischen Teleskops verbinden sollte. Auch ein Variantenteleskop, bei dem die optimale Variante so spät wie möglich festzulegen wäre, wurde diskutiert. Weitere Lösungen, z. B. ein Sunnefeld-System mit asphärischem Hauptspiegel und 2-linsigem Primärfokuskorrektor für ein Feld von etwa  $4^\circ$ , wurden untersucht.

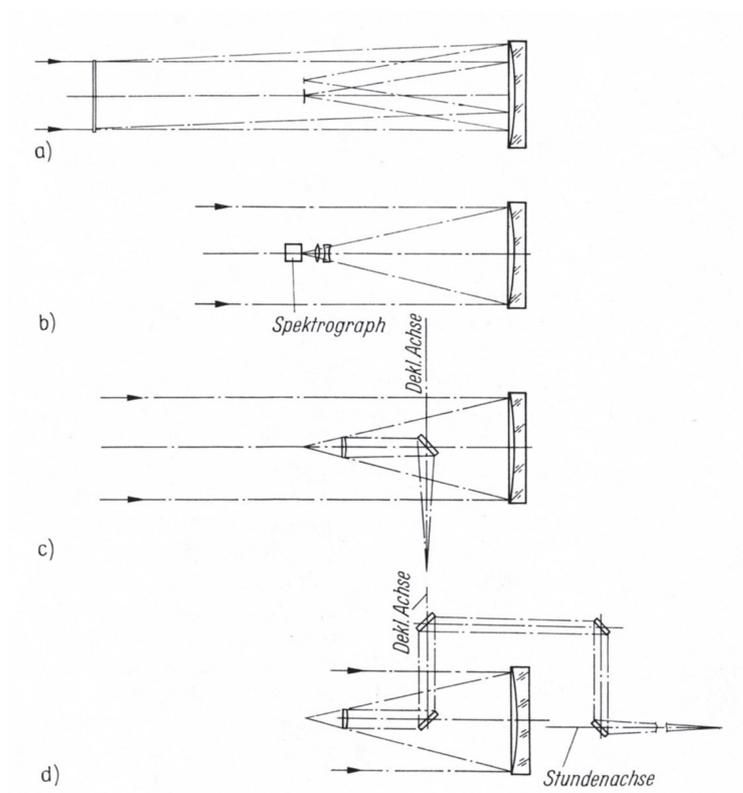
Schließlich entschied man sich für ein 2-m-Universal-Spiegelteleskop, das sowohl als Schmidt-Teleskop für die Aufnahme großer Felder wie auch als Cassegrain- und Coudé-Teleskop für die Untersuchung von Einzelobjekten eingerichtet ist. Der optische Aufbau wurde durch ein Schmidt-System mit einem sphärischen Hauptspiegel von 2 m Durchmesser bei 4 m Brennweite und mit einer Korrektionsplatte von 1,34 m freiem Durchmesser festgelegt. Für die Beobachtung von Einzelobjekten sollte ohne Korrektionsplatte gearbeitet werden. In Verbindung mit entsprechenden Gegenspiegeln sollte dann der sphärische Hauptspiegel bei 2 m Öffnung ein Cassegrain-System von 22 m Brennweite bzw. ein Coudé-System von 92 m Brennweite bilden.

Ein derartiges 2-m-Universal-Spiegelteleskop ist - wie *Kienle* selbst gesteht - „kein Normaltyp, der als Vorbild dienen soll, sondern ein Kompromiß, geboren aus einer einmaligen Gesamtsituation“. Er wolle „universal“ auch nicht in dem Sinne verstanden wissen, daß man beliebig rasch, z. B. in einer Nacht, zwischen beiden Hauptvarianten wechseln soll, sondern daß man je nach zu behandelnden Problemen epochenweise umschalten kann (Bilder 20.1, 20.2).

Im April 1949 hat *H. Kienle* in einer Denkschrift die Konzeption des 2-m-Universal-Spiegelteleskops vorgestellt und den Bau des Instruments sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus wirtschaftlicher Sicht begründet. Die Frage des künftigen Standorts wurde noch offengelassen.



**Bild 20.1** Projekt des 2-m-Spiegelteleskops



**Bild 20.2** Schema der geplanten vier optischen Systeme des 2-m-Universal-Spiegelteleskops a) Schmidt-System ( $f = 4 \text{ m}$ ) b) Quasi-Newton-System ( $f = 4 \text{ m}$ ) (wurde nicht realisiert) c) Quasi-Cassegrain-System ( $f = 22 \text{ m}$ ) d) Coudé-System ( $f = 92 \text{ m}$ )

Der Auftrag für dieses Teleskop vom Juni 1949 bedeutete für die Carl Zeiss in Jena einen Neubeginn des Astrogerätebaus. Das Profil der Astroabteilung, die 1947 ihr 50jähriges Jubiläum beging, wurde auf lange Zeit vorgezeichnet. Auch die Schrittmacherrolle von Astrooptik und Teleskopbau für den übrigen wissenschaftlichen Gerätebau wurde richtig eingeschätzt.

Der Auftrag war eine Herausforderung, jedoch auch ein großes Wagnis: Für die optische Konzeption gab es kein Vorbild, ebenfalls nicht für den austauschbaren Einbau der sehr unterschiedlichen optischen Varianten in nur eine Teleskopmontierung. Und nicht zuletzt fehlten auch - nur wenige Jahre nach Kriegsende - wesentliche materielle und personelle Voraussetzungen für die Realisierung des großen Projekts. Die Folgen von Krieg und Reparationsleistungen waren tiefgreifend, und es gab viele lebenswichtigere Probleme, jedoch diese schwierige Situation förderte auch neue Ideen und Initiativen.

Die wissenschaftliche Führung der Sternwartenkonzeption erfolgte unter Leitung von *H. Kienle* durch die sogenannte „2-m-Kommission“, der namhafte Astronomen aus Ost und West angehörten. In der Realisierungsphase ging daraus das „2-m-Direktorium“ hervor mit Prof. *Paul Görlich* (1905-1986) als wissenschaftlichem Leiter des Herstellerwerks und Prof. *Nikolaus Richter* (1910-1980) als Leiter des aufzubauenden Observatoriums.

Die technischen Einrichtungen zum Bau großer Teleskope mußten in Jena neu geschaffen werden: eine Fertigungsstätte für große Astrooptik mit den notwendigen Maschinen, eine Hochvakuumverpiegelungsanlage, einem großen Optikprüfraum; für die mechanische Bearbeitung von Großteilen wurde eine 4-m-Karusselldrehmaschine aufgestellt und eine hochpräzise Maschine zur Verzahnung von Schneckenrädern bis über 2 m Durchmesser entwickelt und gebaut; eine Montagehalle mit leistungsfähigen Spezialhebezeugen zur Montage großer Teleskope wurde errichtet.



**Bild 20.3** *Alfred Jensch*

Mit dem Fortschreiten der Arbeiten vergrößerte sich der Kreis von Wissenschaftlern, Ingenieuren und qualifizierten Facharbeitern an der neuen Aufgabe. Von Anfang an wurde die konstruktive Gestaltung des Teleskops in starkem Maße durch Ideen von *Alfred Jensch* (Hirschberg/Schlesien 19. Juni 1912 - Jena, 6. Oktober 2001, Bild 20.3) geprägt. *Jensch* war in seiner Jugend begeisterter Amateurastronom gewesen und hatte einige Jahre als Beobachter und Gerätebauer an der Sonneberger Sternwarte gearbeitet, bevor er 1938 als Entwurfsingenieur in die Firma Carl Zeiss eintrat. Bis 1977 hat er als Chefkonstrukteur für Astrogeräte die neuere Entwicklung der Jenaer Teleskope in starkem Maße mitbestimmt.

Die Optik wurde von *Georg Pradel*, einem Mitarbeiter von Dr. *Sonnefeld*, berechnet. Die Zieldaten für das Schmidt-System und für das Cassegrain- und das Cassegrain-Coudé-System wurden schon genannt. Auf die Realisierung eines noch berechneten Quasi-Newton-Systems (sphärischer Hauptspiegel und Primärfokuskorrektur) wurde später verzichtet. Durch die Vorgabe des Schmidt-Systems war nicht nur der sphärische Hauptspiegel mit seinem großen Öffnungsverhältnis von 1:2 festgelegt, sondern auch die Dimensionierung des Teleskoprohrs, sein Schwerpunkt und die Lage der Deklinationssachse waren weitgehend vorbestimmt und mußten bei dem Strahlengang der weiteren optischen Systeme berücksichtigt werden. Die Gegenspiegel für das Cassegrain- und das Coudé-System wurden an die gleiche Stelle gebracht, was den Austausch der Spiegel erleichtert. Beide Spiegel haben 400 mm Durchmesser und sind stark asphärisch deformiert. Dadurch sind sie schwierig herstellbar, und ihre richtige Stellung im Gerät muß mit extrem hoher Genauigkeit eingehalten werden.

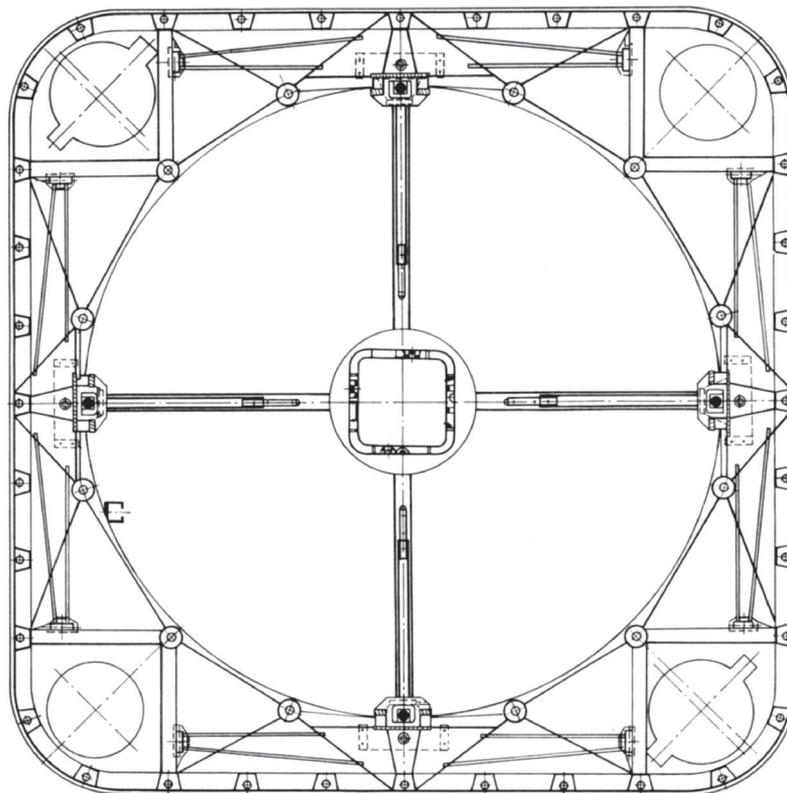
Frühzeitig mußten Entscheidungen zum Hauptspiegel getroffen werden. Als Spiegelwerkstoff wurde zunächst das pyrexähnliche Tempaxglas ( $\alpha = 36 \cdot 10^{-7}$ ) geplant, aber zur Vermeidung eines Risikos entschied man sich damals für das Zink-Kron-Glas ZK 7 ( $\alpha = 46 \cdot 10^{-7}$ ). Eine wabenförmige Spiegelgestalt wie beim 5-m-Teleskop wurde erwogen. Berechnungen ergaben jedoch, daß bei 2 m Spiegeldurchmesser eine Massivspiegelscheibe mit einem Durchmesser-Dicken-Verhältnis 6:1, in Verbindung mit sorgfältiger axialer und radialer Entlastung, vorteilhafter ist.

Der erste Probeguß einer 2-m-Spiegelscheibe erfolgte im Herbst 1949 bei Schott in Jena. Nach einigen Fehlschlägen wurden bis Ende 1952 vier 2-m-Rohlinge bereitgestellt. Der beste wurde für den Hauptspiegel, der zweite für einen 2-m-Planprüfspiegel verwendet.

Die Optikbearbeitung wurde 1953 von *Walter Pfaff* (1907-1984) in Angriff genommen. Seine langjährigen Erfahrungen als Astrooptiker waren von großem Wert. Mit seinen Mitarbeitern *Schwinge* und *Schmidt* hat er zunächst den sphärischen Hauptspiegel bearbeitet. Die Prüfung erfolgte wie üblich aus dem Krümmungsmittelpunkt. Der Arbeitstisch der Poliermaschine konnte hierzu - wie schon bei *Ritchey* - gekippt werden. Danach wurde der 2-m-Planprüfspiegel fertiggestellt und unter Verwendung des sphärischen Hauptspiegels nach der Ritchey-Common-Methode geprüft. Nach Fertigstellung dieser beiden großen Spiegel waren auch die Voraussetzungen für die Prüfung der Korrekptionsplatte und der Gegen Spiegel gegeben.

Die Bearbeitung der Korrekptionsplatte erfolgte nach dem Original-Schmidt-Verfahren mittels Vakuumtopfs. Mit 1400 mm Gesamtdurchmesser (1340 mm freie Öffnung, 40 mm Dicke, Glas UBK 7) ist es bis heute die größte Schmidt-Platte, die jemals angefertigt wurde. Die Schwierigkeiten, die zunächst auftraten und die im wesentlichen mit der Problematik der Randauflage zusammenhängen, konnte *Pfaff* durch eine völlige Neukonstruktion des Vakuumtopfs überwinden. Nach demselben Verfahren und auf demselben Vakuumtopf wurde später die prismatische Schmidt-Platte von 1340 mm freier Öffnung und  $0,5^\circ$  Prismenwinkel gefertigt.

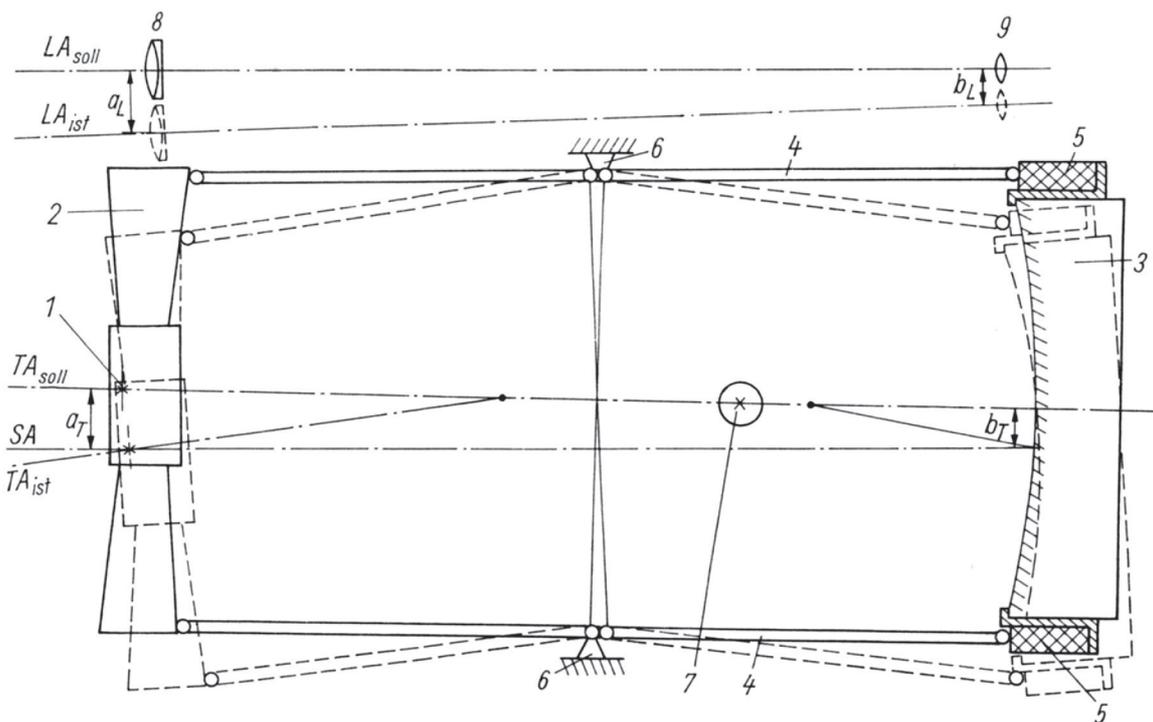
Schwierig war die Fertigung der beiden Gegenspiegel, weil bei beiden Deformationen in der Größe von etwa  $50\ \mu\text{m}$  erreicht werden mußten. Das Deformieren wurde durch zonenweise Schnittweitenmessungen überwacht, aus denen das Profil und die Profiländerungen berechnet und die Strategie für die weitere Bearbeitung abgeleitet wurden. Erst als das Profil der Asphäre annähernd erreicht war, konnte die Prüfung mit der Foucaultschen Schneide erfolgen. Für das gute erzielte Ergebnis spricht, daß im Coudé-Fokus eine Spotkonzentration von 0,6 für 80% erreicht wurde. (In den Jahren 1984-1986 wurde die gesamte Spiegeloptik des 2-m-Universal-Spiegelteleskops gegen neue Spiegel aus Glaskeramik „Sitall“ ausgetauscht.)



**Bild 20.4** Querschnitt des Rohrkörpers des 2-m-Universal-Spiegelteleskops am Ort des Haltekreuzes des Kassettenträgers

Als Ergebnis der Optikrechnung wurden auch die erforderlichen Toleranzangaben für die einzelnen optischen Elemente und für die Einhaltung ihrer Lage zueinander im Gerät gewonnen. Die Forderungen an die Abbildungsgüte des Schmidt-Systems und die hohe Justierempfindlichkeit, die sich aus der Kombination des sphärischen Hauptspiegels mit den stark deformierten Gegenspiegeln beim Cassegrain- und Coudé-System ergab, sowie das Ziel, in einem Tubus austauschbar das Schmidt-System mit 8 m Abstand zwischen Korrekionsplatte und Hauptspiegel und die wesentlich kürzeren Cassegrain- und Coudé-Systeme unterzubringen, stellten die Konstrukteure vor fundamentale Probleme. Die bisher im Astrogeräteebau üblichen Konstruktionsprinzipien waren nur begrenzt anwendbar. Gestützt auf umfangreiche mathematische Untersuchungen zu allen Bauelementen - wir würden heute den Begriff CAD/CAE gebrauchen -, hat *Jensch* Konstruktionslösungen unter Anwendung ideenreicher Entlastungs- und Kompensationssysteme gefunden. Temperatureinflüsse sowie Verbiegungen durch Schwerkraft in den verschiedenen Fernrohrlagen konnten so weitgehend unwirksam gemacht werden, um eine zuverlässige und überwachungs-freie Beobachtungsarbeit zu gewährleisten.

Als Teleskoprohr wurde ein möglichst steifer geschlossener, doppelwandiger Rohrkörper gewählt. Er hat außen einen quadratischen Querschnitt von etwa 2,7 m x 2,7 m und besteht aus fünf Rohrsektionen und der Spiegelfassungssektion. Die Länge beträgt etwa 10 m. In zwei gegenüberliegenden Ecken ist Raum für zwei Leitfernrohre von je 300 mm Öffnung und 4750 mm Brennweite (Bild 20.4).



**Bild 20.5** Schema der Wirkung des Kompensationssystems nach Jensch Ziele: Leitrohrachse parallel zur Sichtachse des Teleskops; Temperaturkompensation, Fokus Konstanz von +20 bis -30 °C; 1. Primärfokus; 2. Haltekreuz für Kassette; 3. 2-m-Hauptspiegel; 4. Invar-Distanzstangen; 5. Gegenkompensationskörper; 6. Befestigungsstellen am Tubus; 7. Deklinationsachse; 8. Leitrohrobjektiv; 9. Leitrohrkular;  $a_L$ ,  $b_L$  vorderer und hinterer Absinkbetrag des Leitrohrs;  $a_T$ ,  $b_T$  vorderer und hinterer Absinkbetrag des Teleskops;  $TA_{soll}$  Tubusachse Soll;  $TA_{ist}$  Tubusachse Ist;  $LA_{soll}$  Leitrohrachse Soll;  $LA_{ist}$  Leitrohrachse Ist;  $SA$  Sichtachse des Teleskops

Um unabhängig von verbleibenden Verbiegungen und Temperaturänderungen die geforderte gegenseitige Stellung der optischen Bauteile zueinander zu gewährleisten, wurde ein vierfach wirkendes Kompensationssystem entwickelt. Dieses System hat zum Ziel, daß:

1. Durchbiegungen des Rohrkörpers keine Dezentrierungen der optischen Bauteile bewirken,
2. die optischen Achsen der Leitfernrohre stets parallel zur optischen Achse des Hauptsystems bleiben,
3. die thermische Längenausdehnung des Rohrkörpers so kompensiert wird, daß der Abstand zwischen Hauptspiegel und Fotoplatte bzw. Gegenspigel konstant bleibt,
4. die thermische Brennweitenveränderung des Hauptspiegels durch eine entsprechend gleich langsam verlaufende Verschiebung des entlasteten Hauptspiegels unwirksam gemacht wird.

Der Hauptspiegel (Masse 2,35 t) ist in seiner Spiegelfassung auf 18 Entlastungssystemen gelagert, die von der Rückseite der Spiegelscheibe in 18 Bohrungen (Durchmesser 130 mm, Tiefe 175 mm) hineinragen, so daß sie in der neutralen Faser der Spiegelscheibe angreifen. Eine zusätzliche zentrale Bohrung dient der Mittenzentrierung. Durch Kreuzfedergelenke arbeiten die 18 Hebelsysteme zur Entlastung sehr reibungsarm und zuverlässig. Der Spiegel ist so praktisch in allen Fernrohrlagen verbiegungsfrei und schwimmend gelagert.

Das genannte vierfach wirkende Kompensationssystem besteht aus Invarstangen in Verbindung mit entsprechenden Gegenkompensationskörpern, die zwischen dem Haltekreuz der Kassette und dem Rand des schwimmend gelagerten Hauptspiegels angeordnet sind. Sie schließen temperaturbedingte Abstandsänderungen aus (Ziel 3). Die Befestigungsstellen der Invardistanzstangen im Fernrohrtube wurden so gewählt, daß bei Lageänderungen des Fernrohrs die oben genannten Ziele 1. und 2. erreicht werden. Das Ziel 4 wird durch Kompensationskörper spezieller Dimensionierung und Werkstoffwahl erreicht, die sich an Justierklammern am Rand des Hauptspiegels befinden und die, der Zeitkonstante des Spiegels folgend, diesen um den Betrag seiner temperaturabhängigen Brennweitenänderung verschieben (Bild 20.5).

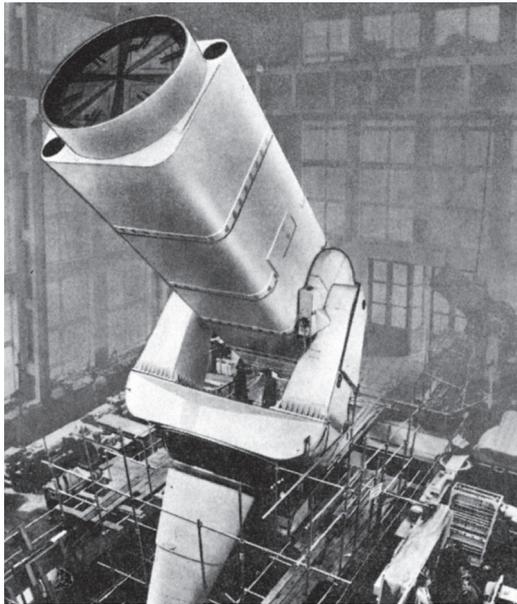
Im Teleskoprohr befindet sich im Schnittpunkt von optischer Achse und Deklinationsachse der unter 45° stehende Planumlenkspiegel für den Cassegrain- und den Coudé-Strahlengang. Die Kassetten für die Fotoplatten 24 cm x 24 cm der Schmidt-Kamera werden an der Seitenwand des Teleskoprohrs eingelegt und über zwei mechanisch-elektrische Vorrichtungen automatisch in die richtige Position eingeschwenkt und durch Fernbedienung geöffnet.

Das 2-m-Universal-Spiegelteleskop hat eine Gabelmontierung. Das Teleskoprohr von etwa 26 t Masse wird in der Gabel von zwei Pendelkugellagern getragen, die als Sonderfertigung mit ausgezeichnet kalibrierten Kugeln gefüllt und so stark vorgespannt sind, daß in jeder Lage des Geräts alle vier Kugelreihen unter Belastung bleiben. Der Antrieb zur Drehung des Teleskoprohrs um die Deklinationsachse erfolgt über ein Präzisionsschneckenrad.

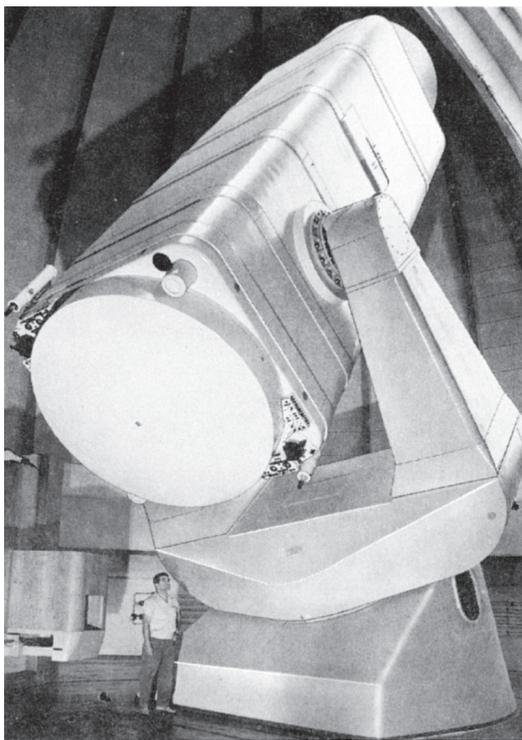
Bei der Konstruktion der Gabelmontierung wurden das obere Lager und seine Umgebung besonders stabil gestaltet, weil dort die stärksten Biegebeanspruchungen auftreten. Die obere Lagerstelle der Stundenachse wurde als Kugelzone gestaltet, deren Mittelpunkt gleichzeitig mit dem Schwerpunkt des gesamten drehbaren Geräteteils zusammenfällt. Diese Kugelzone ist hydrostatisch gelagert. Zwei kardatisch gelagerte Gußstahlkissen mit je vier Druckölkammern tragen bei einem Lagerspeisedruck von 1,96 MPa die gesamten bewegten Teleskopteile mit ihrer Masse von etwa 65 t auf einem Ölfilm von etwa 50 µm Lagerspalt. Das untere Lager der Stundenachse ist praktisch unbelastet. Es besitzt eine Vorrichtung zur Polhöhen- und Azimutjustierung der Stundenachse.

Der Antrieb der Stundenachse erfolgt über einen Differentialdoppelschneckenantrieb an einem Präzisionsschneckenrad von 2160 mm Durchmesser, dessen durchschnittlicher Einzelteilungsfehler  $< 1''$  ist. Die Geschwindigkeit der Fein- und Feinstantriebe zum Positionieren ist den unterschiedlichen Brennweiten angepaßt. Beim Arbeiten im Coudé-Fokus ist die geringste Geschwindigkeit beispielsweise 0,3/s.

*Jensch* übertrug auch seine Erfahrungen als Beobachter auf die Gestaltung der Bedieneinrichtungen, damit die nächtliche Arbeit effektiv und sicher ist. So kann das Teleskop vom Coudé-Fokus aus bedient werden, ohne daß ein Techniker im Kuppelraum sein muß. Die Position des Instruments wird durch Drehmelder angezeigt und kann an den Schalterpulten abgelesen werden. Sicherheitsschaltungen schließen Fehlbedienungen aus. Die Stellung der Kuppel wird durch IR-Lichtschranken automatisch mit der Teleskopstellung synchronisiert. Bemerkenswert an der Steuereinrichtung ist ihre nahezu absolute Zuverlässigkeit über mehrere Jahrzehnte und daß sie noch in ihrer Originalausführung arbeitet: quasi unmodern, ohne digitale Steuerungs- und Rechentechnik, aber praktisch wartungsfrei. Prinzipiell ließe sie sich heute leicht umstellen, weil die Antriebe direkt arbeiten.



**Bild 20.6** 2-m-Universal-Spiegelteleskop nach der Werksmontage



**Bild 20.7** 2-m-Universal-Spiegelteleskop des Karl-Schwarzschild-Observatoriums in Tautenburg

Bild 20.6 zeigt das Teleskop nach der Werksmontage. Als Aufstellungsort für das 2-m-Universal-Spiegelteleskop wurde 1956 ein Waldgebiet bei Tautenburg, etwa 20 km nordöstlich von Jena, festgelegt. Eine 20-m-Kuppel mit sehr guter thermischer Isolierung wurde errichtet. Das Kuppelgebäude enthält im Kellergeschoß Räume für spektroskopische Arbeiten im Coudé-Fokus sowie weitere Arbeitsräume.

Am 19. Oktober 1960 wurden Instrument und Observatorium eingeweiht. Das Observatorium trägt den Namen „Karl-Schwarzschild-Observatorium“ zu Ehren des großen Astrophysikers. 1992 wurde aus dem Bestand des Observatoriums die Thüringer Landessternwarte (TLS) gegründet (Bilder 20.7, 20.8, 20.9).

In den sechziger Jahren wurde die Ausrüstung des Teleskops durch einen Cassegrain- und einen Coudé-Spektrographen ergänzt. Der Cassegrain-Spektrograph ist an einem Gabelholm angesetzt. Es ist ein Plangitterspektrograph mit Dispersionen von 75 bis 10 Å/mm. Der temperaturkonstant im Kellergeschoß aufgestellte Coudé-Spektrograph wurde 1968 in Betrieb genommen. Er ist mit einem Gitter von 180 mm x 150 mm (600 Linien/mm) und vier Kameras ausgerüstet, von denen die größte einen Spiegel von 1300 mm Durchmesser hat. Die reziproke Dispersion liegt zwischen 24 und 2 Å/mm.

Eine wichtige Ergänzung der Weitwinkelanordnung wurde die prismatische Korrekptionsplatte von 1340 mm Durchmesser von 0,5° brechendem Winkel. Objektivprismen sind einfache Mittel, um größere Himmelsfelder spektrographisch zu durchmustern, vor allem in Verbindung mit Schmidt-Teleskopen. So wurde auch das große Hamburger Spiegelteleskop mit Objektivprismen ausgerüstet, mit denen frühe O- und B-Sterne entdeckt werden sollten. Für die extragalaktische Forschung wurden Spektren geringer Dispersion ( $\approx 1500$  Å/mm bei  $H_\gamma$ ) interessant, weil man aus der Form der Spektrenbilder Rückschlüsse auf die Art der Objekte ziehen konnte, z. B. auf Quasare, bei denen durch eine starke Rotverschiebung das Strahlungsmaximum in das von der Erde aus beobachtbare Spektralgebiet verlagert sein kann. Für das Tautenburger Teleskop war ein zusätzliches Objektivprisma nicht vorgesehen, und zusammen mit seiner Fassung sowie seinem Gegengewicht an der Hauptspiegelfassung wäre das Rohr unzulässig belastet worden. Es wurde daher erwogen, Objektivprisma und Korrekptionsplatte in einem optischen Element zu kombinieren. Es wurde für möglich gehalten, erst die Korrekptionsplatte aus einer planparallelen

Scheibe im Vakuumverfahren herzustellen und anschließend den Keilwinkel von 0,5° anzuarbeiten, was bei einem Durchmesser von etwa 1400 mm einer Dickendifferenz von 12,2 mm entsprach. Um das Risiko besser einschätzen zu können, wurde zunächst eine prismatische Korrekptionsplatte von 600 mm Durchmesser für das Jenaer Schmidt-Spiegelteleskop 600/900/1500 gefertigt. Dieser Versuch ging positiv aus, was auch astronomisch überprüft wurde. Es gab dann bei der Fertigung der größeren prismatischen Korrekptionsplatte keine Probleme, und eine Hartmann-Prüfung bestätigte die gute optische Quali-

tät. Im Einsatz wird die prismatische Korrekptionsplatte gegen die normale in deren Fassung ohne Balancierungs- bzw. Belastungsprobleme ausgetauscht. In der Praxis hat sich die Objektivprismenkombination bewährt, z. B. bei der Entdeckung bzw. Bestätigung von Quasaren.

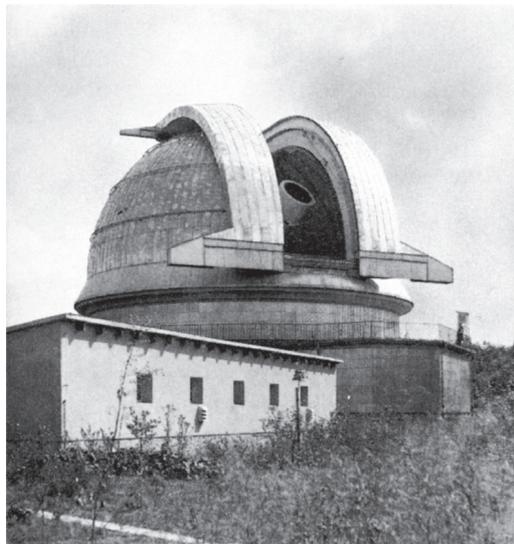
Das 2-m-Universal-Spiegelteleskop in Tautenburg wurde zu einem Zeitpunkt in Betrieb genommen, als international das Interesse an der extragalaktischen Forschung ganz in den Vordergrund trat. Es hat, besonders in seiner Variante als leistungsstärkste Schmidt-Kamera, zu den verschiedensten Problemkreisen Ergebnisse geliefert. Die Entdeckung und Untersuchung von Assoziationen von Sternen früherer Spektraltypen im Andromedanebel, die Suche nach Kompaktgalaxien und Galaxien mit aktivem Kern, die Identifizierung von extragalaktischen Radioquellen im optischen Bereich und insbesondere die Auffindung und Untersuchung von „Quasaren“ (quasi stellar radio-sources), die mit ihren extremen Rotverschiebungen und den daraus resultierenden außerordentlichen Strahlungsleistungen und mit ihrer Variabilität den Astronomen Rätsel aufgeben, sind nur einige der Einsatzgebiete des Tautenburger Teleskops.

Zur Informationsausschöpfung der photographischen Platten in Tautenburg wurden durch *N. Richter* spezielle photographische Techniken eingeführt und durch *W. Högner* zu hoher Perfektion gebracht: Mit der 1952 von *Wolfgang Krug* (geb. 1910) und *Ernst Lau* (1893-1978) im Institut für Optik und Feinmechanik (heute Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie MBI) entwickelten Methode der „Äquidensitometrie“ werden Kurven gleicher Schwärzung hergestellt, die eine zweidimensionale Photometrie flächenhafter Objekte ermöglichen. In ihrem „Isophotometrischen Atlas der Kometen“ (1969) haben *W. Högner* und *N. Richter* schöne Beispiele gegeben.

Weitere in Tautenburg angewendete photographische Techniken, die auf *E. Lau* zurückgehen, sind die Methoden der Kontraststeuerung sowie das Detailfilterverfahren, bei dem von nebelhaften Objekten, z. B. dem Orionnebel, sehr feine Strukturen erkennbar werden.

Das 2-m-Universal-Spiegelteleskop in Tautenburg ist ein vorzügliches Instrument und hat alle Erwartungen erfüllt. Trotzdem ist es ein Unikat geblieben. Der Grund ist nicht in irgendwelchen Nachteilen zu sehen, sondern in der „einmaligen Gesamtsituation“, aus der heraus das Instrument kurz nach Kriegsende konzipiert wurde. Diese Situation hat sich - glücklicherweise nicht wiederholt. Bei seinen Nachfolgern stand nicht die Notwendigkeit, zwei völlig unterschiedliche Teleskopvarianten in einem Instrument zu vereinigen. Die Astronomen konnten ihre Zielstellungen klarer fixieren.

Als am 19. Oktober 1960 das Karl-Schwarzschild-Observatorium mit seinem 2-m-Universal-Spiegelteleskop in Betrieb genommen wurde, gab es in Jena bereits eine Reihe Aktivitäten zum Bau von zwei weiteren 2-m-Spiegelteleskopen.



**Bild 20.8** Karl-Schwarzschild-Observatorium in Tautenburg Kuppel des 2-m-Universal-Spiegelteleskops



**Bild 20.9** *N. Richter*, erster Direktor des Karl-Schwarzschild-Observatoriums, und *B. Ioanissiani* aus Leningrad, Konstrukteur des 6-m-Spiegelteleskops am Leitrohr des 2-m-Universal-Spiegelteleskops

Das eine wurde am 21. September 1966 im Süden der Sowjetunion auf dem Berg Pirkuli bei Schemacha, etwa 160 km westlich von Baku im heutigen Aserbaidschan in Betrieb genommen.

Das andere 2-m-Spiegelteleskop konnte am 23. August 1967 in der ČSSR im Observatorium Ondřejov anlässlich der XIII. Generalversammlung der IAU feierlich eingeweiht werden. In Ondřejov, etwa 30 km südöstlich von Prag, gab es auf dem Pecny (546 m ü. M.) ein kleines privates Observatorium, das *Josef Fric* (1861-1945) 1928 der Prager Universität zum Geschenk gemacht hatte. Als 1956 Astronomen der ČSSR über ihre langfristigen Zielstellungen und die dazu notwendige instrumentelle Ausrüstung berieten, wurde als wichtigstes Instrument ein 2-m-Spiegelteleskop geplant, dessen Aufstellung in einem Nationalobservatorium der Akademie der Wissenschaften der ČSSR in Ondřejov erfolgen sollte. 1959 stimmte die Regierung der ČSSR diesem Projekt zu.

Als Ende der fünfziger Jahre die Teleskope für Ondřejov und Schemacha geplant wurden, zählte ein 2-m-Teleskop noch zu den „großen“ Teleskopen, denn nur vier Teleskope mit Spiegeln über 2 m Durchmesser waren 1960 in Betrieb (5 m - Mount Palomar, 2,5 m - Mount Wilson, 2,08 m - McDonald und das 1959 fertiggestellte 3-m-Lick-Teleskop). Und es gab damals auch nur wenige Hersteller von Teleskopen, die den Auftrag für ein komplettes 2-m-Teleskop übernehmen konnten. Eines dieser Werke war der VEB Carl Zeiss in Jena, wo 1957 das 2-m-Universal-Spiegelteleskop in die Werks-Endmontage ging und nun die Basis für die weitere Entwicklung und Fertigung von Teleskopen dieser Größe gegeben war. Sowohl die technischen Einrichtungen als auch ein Mitarbeiterstamm von erfahrenen Wissenschaftlern, Konstrukteuren und Facharbeitern waren mit der Aufgabe gewachsen.

Die Vorstellungen für die geplanten Teleskope wurden frühzeitig zwischen Astronomen und Spezialisten in Jena beraten. Zu ihren Erfahrungen mit großen Spiegelteleskopen wurden anlässlich der X. Versammlung der IAU in Moskau 1958 auch amerikanische Astronomen, unter anderem *R. Minkowski*, konsultiert. Berater der Astronomen der UdSSR aus Aserbaidschan war *N.N. Michelson*, ein Astronom aus Pulkowo, der sich mit der Astrogerätetechnik intensiv vertraut gemacht hat. Seine Kenntnisse sind später in die Konzeption des 6-m-Spiegelteleskops eingeflossen und auch in seinem 1976 in Moskau erschienenen Buch „Optische Teleskope“ zusammengefaßt.

Im Laufe der Beratungen ergab sich, daß von beiden Anwendern ein Spiegelteleskop mit Cassegrain- und Coudé-Fokus gewünscht wurde, wobei besonderer Wert auf die Nutzung für spektroskopische Arbeiten im Coudé-Fokus gelegt wurde. Die ursprünglich nicht vorgesehene Anwendung im Primärfokus wurde nach der Konsultation mit den amerikanischen Astronomen doch noch geplant. Die Kombination eines Schmidt-Teleskops mit einem Cassegrain- und Coudé-Teleskop wurde nicht erforderlich, da für beide Observatorien gesonderte Schmidt-Spiegel geplant wurden.

Für den optischen Aufbau ergab sich so ein klassisches Primär-Cassegrain-Coudé-Teleskop mit Parabolspiegel in Anlehnung an die Vorbilder von *Ritchys* 1,5-m- und 2,5-m-Spiegelteleskopen auf dem Mount Wilson. Für den 2-m-Parabolspiegel wurde eine Brennweite von 9 m gewählt, und die Brennweiten als Cassegrain- bzw. als Coudé-Teleskop wurden mit 29,5 bzw. 72 m festgelegt.

Als Teleskopmontierung wurde zunächst eine englische Achsenmontierung entworfen, weil sie gegenüber einer Gabelmontierung für den Coudé-Strahlengang nur zwei statt vier Planumlenkspiegel erfordert. (Bei Lösungen mit drei Umlenkspiegeln wird einer der Spiegel relativ groß und steht unter ungünstigem Winkel.) Außerdem bietet die englische Achsenmontierung im Cassegrain-Fokus mehr Raum für die Benutzung von Spektrographen, wenn der Strahlengang ohne Umlenkspiegel durch den durchbohrten Hauptspiegel geführt wird.

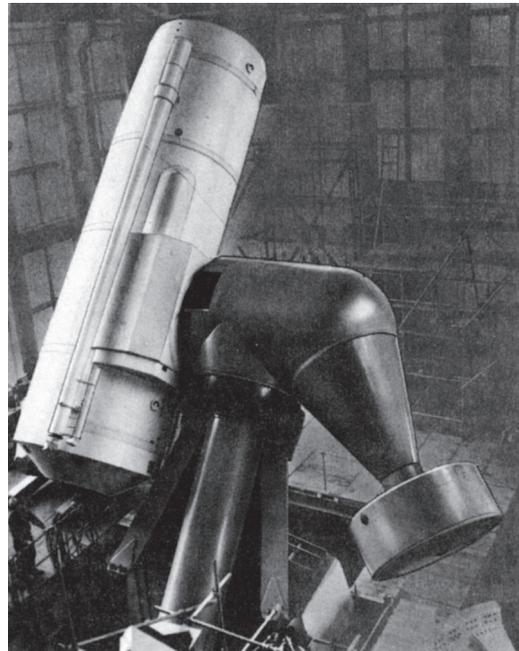
Nachteilig bei der englischen Achsenmontierung sind der große Nordpfeiler, insbesondere bei größeren Polhöhen, und das Problem des Übergangs von der Fernrohrlage Ost in die Fernrohrlage West. Dieses letztere Problem wurde damals im Zusammenhang mit der automatischen Ansteuerung als besonders störend betrachtet. Es sollte nicht nur eine Koordinatenvorwahl, sondern auch die Verfolgung kosmischer Stationen auf ihrem Flug möglich sein. Der Start des ersten „Sputnik“ am 4. Oktober 1957 erfolgte unmittelbar vor dieser Konzeption.

In dieser Zeit entwickelte sich auch die digitale Rechentechnik, aber sie wurde noch sehr zögernd in der Astrotechnik angenommen, weil sich die Koordinatenübertragung mit Drehmeldern bewährt hatte und weil die klassischen Fernrohrantriebe einen hohen technischen Stand erreicht hatten. Auch die damals noch relativ hohen Kosten eines Rechners waren ein Hemmnis; man hatte einen Aufwand von 30 % bis 50 % der Teleskopkosten abgeschätzt.

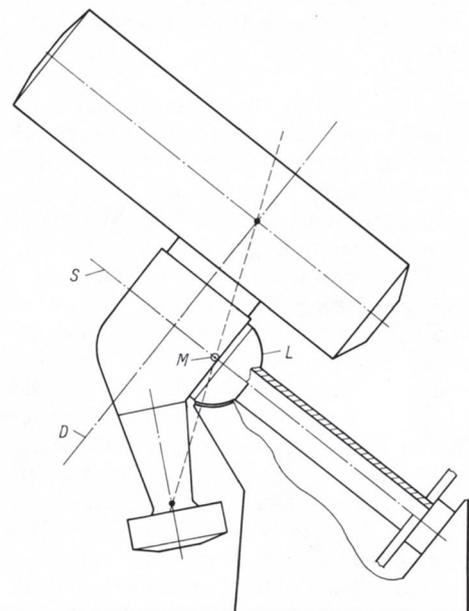
Für die Montierung wurde deshalb nach einer Lösung gesucht, die die Vorteile der Gabelmontierung (freie Beweglichkeit) mit den Vorteilen der englischen Montierung (nur zwei Umlenkspiegel im Coudé-Strahlengang) verbindet, ohne die Nachteile der genannten Montierungen zu übernehmen. Eine Knie-montierung, wie sie für kleinere Instrumente, z.B. Astrographen, vorteilhaft ist, schied wegen der Größe des Instruments (Teleskoprohr: Länge etwa 10 m, Masse etwa 28 t) aus.

Alfred Jensch löste die Probleme in genialer Weise durch Entwicklung eines neuen Montierungstyps, der als „Stützmontierung“ bezeichnet wird (Bild 20.10). Die 2-Spiegelteleskope in Schemacha und in Ondřejov und auch die später nachfolgenden zwei 2-m-Spiegelteleskope, die in Jena für Observatorien in den bulgarischen Rhodopen und in Terskol im Kaukasus gebaut wurden, sind mit einer Stützmontierung ausgerüstet. Sie gibt diesen Teleskopen ein neues, unverwechselbares Aussehen.

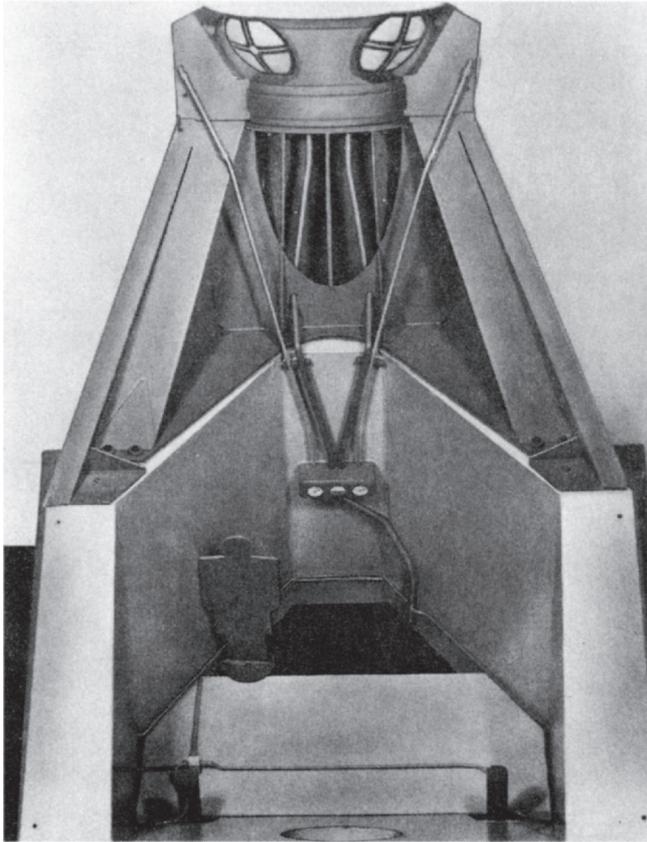
Die Stützmontierung (Bild 20.11) besitzt einen großen Stützkörper, der in seinem oberen ausladenden Teil die Lagerkissen für die Öldrucklagerung der Stundenachse trägt (Bild 20.12). Die obere Lagerfläche der Stundenachse ist wieder als Kugelzone ausgebildet, jedoch mit kleinerem Radius als beim Tautenburger 2-m-Universal-Spiegelteleskop. Oben auf dieser Kugelzone befindet sich das sehr kompakte und steife Deklinationsachsengehäuse. Es trägt auf der einen Seite das um die Deklinationsachse drehbare Teleskoprohr (Masse etwa 28 t). Auf der anderen Seite besitzt es einen schräg liegenden Anschlußflansch für ein großes Gegengewicht (Masse etwa 25 t). Durch diese abgewinkelte Anbringung des Gegengewichts wird der Schwerpunkt der um die Stundenachse bewegten Teleskopteile (Masse etwa 85 t), der normalerweise in den Schnittpunkt von Deklinations- und Stundenachse fällt, so auf der Stundenachse nach unten verlagert, daß er in das Zentrum der Kugelzone des oberen Stundenachsenlagers fällt (Bild 20.11). Der Schnittpunkt von Deklinationsachse und Stundenachse ist dadurch frei für den Coudé-Umlenkspiegel. Der Stützkörper ist so weit vorgezogen, daß das Gegengewicht frei durchgeschwenkt werden kann. Das bedarf natürlich einer sicheren Verbindung des Stützkörpers mit dem Teleskopfeiler. Die kurze durchbohrte Deklinationsachse ist in zwei großen Präzisionswälzlagern aufgenommen. Zwischen ihnen befindet sich ein Stirnrad für die Grobbewegung und eine Kugelspindleinrichtung für die Feinbewegung in Deklination. Das untere, praktisch unbelastete Ende der Stundenachse sowie deren Antriebssystem und die Pol- und Azimutjustierung sind Weiterentwicklungen der entsprechenden Baugruppen des 2-m-Universal-Spiegelteleskops. Das Teleskoprohr ist als doppelwandiger geschlossener runder Tubus aus fünf Abschnitten aufgebaut und mit den Entlastungs- und Kompensationssystemen für die optischen Elemente ausgerüstet. Die oberen Tubusabschnitte für den Primärfokus bzw. für das Cassegrain-Coudé-Haltekreuz sind austauschbar, um das Teleskop schnell umrüsten zu können.



**Bild 20.10** 2-m-Primär-Cassegrain-Coudé-Spiegelteleskop auf Stützmontierung nach Jensch



**Bild 20.11** Prinzip der Stützmontierung: *M* Lage des Schwerpunktes der bewegten Teleskopteile; *S* Stundenachse; *D* Deklinationsachse; *L* sphärische Lagerzone der Stundenachse



**Bild 20.12** Modell des Stützkörpers mit den beiden sphärischen Lagerkissen der Drucköllagerung der Stundenachse

Anwendern gründlich untersucht. *I. A. Aslanov*, der Leiter der 2-m-Teleskop-Abteilung in Schemacha, kam nach achtjähriger Arbeit mit dem Teleskop zu dem Ergebnis, daß das Gerät über eine ausgezeichnete optische und mechanische Leistung verfügt, daß der Hauptspiegel den weltbekannten Teleskopspiegeln nicht nachsteht und daß die Leistung des Coudé-Spektrographen andere moderne Spektrographen in verschiedener Hinsicht übertrifft. Auch in Ondřejov wurde die ausgezeichnete mechanische und optische Qualität des Teleskops bestätigt. Bei dem raschen Fortschritt auf dem Gebiet der Elektronik wurde nach zwölfjähriger Benutzung eine Modernisierung der elektronischen Steuerung des Instruments beschlossen.

Als anlässlich der IAU-Generalversammlung 1967 das 2-m-Spiegelteleskop in Ondřejov eingeweiht wurde, fanden erste Gespräche mit bulgarischen Astronomen über ein neues 2-m-Spiegelteleskop statt. In den folgenden Jahren wurde der Aufbau eines bulgarischen Nationalobservatoriums in den Rhodopen in 1700 m Höhe auf dem Roshen-Massiv geplant und realisiert. Das Hauptinstrument ist wieder ein 2-m-Spiegelteleskop aus Jena, bei dem jedoch neue Erkenntnisse und Anwenderwünsche berücksichtigt wurden. Instrument und Observatorium wurden 1979 in Betrieb genommen. Ein weiteres gleichartiges 2-m-Spiegelteleskop wurde danach für ein neues Observatorium in der UdSSR in Terskol im Kaukasus gebaut. Die Inbetriebnahme erfolgt nach 1990.

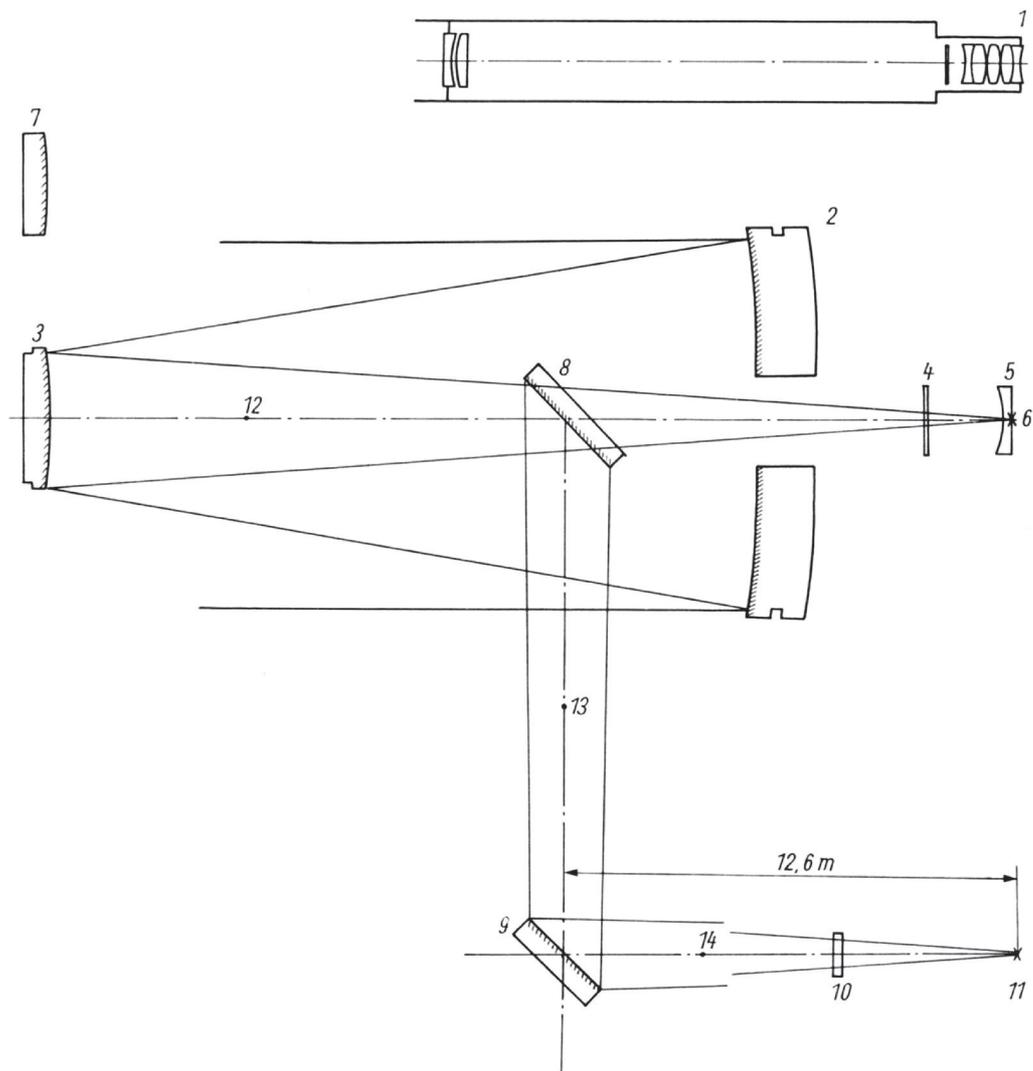
Beide Teleskope sind wieder mit der bewährten Stützmontierung nach *Jensch* ausgerüstet. Gegenüber den 2-m-Spiegelteleskopen in Schemacha und Ondřejov weisen sie jedoch zwei wesentliche Unterschiede auf:

- Das optische System der Teleskope ist als Ritchey-Chrétien-System ausgebildet.
- Die Teleskope sind zwecks Rationalisierung der Beobachtungsarbeit mit einer modernen Steueranlage mit integriertem Rechner ausgerüstet.

Der Primärfokus ist zusätzlich mit einem 3-linsigen Primärfokuskorrektor ausgerüstet, um ein Feld von 23' x 23', entsprechend einer Bildgröße von 60 mm x 60 mm, aufnehmen zu können. Die Nachführung kann durch Pointierung nach Sternen am Rande des Feldes korrigiert werden mit Hilfe eines Beobachtungsfernrohrs am Teleskoprohrumfang. Es zeigte sich, daß bei den Einrichtungen im Primärfokus ein relativ hoher Aufwand getrieben werden muß, um eine effektive Arbeit zu ermöglichen. Gegenüber einem 1-m-Teleskop ist ein 2-m-Teleskop einerseits „zu groß“, um z. B. vom Tubusrand einen Kassettenwechsel vornehmen zu können; andererseits ist es gegenüber einem 3-m-Teleskop „zu klein“ für eine Beobachterkabine im Primärfokus.

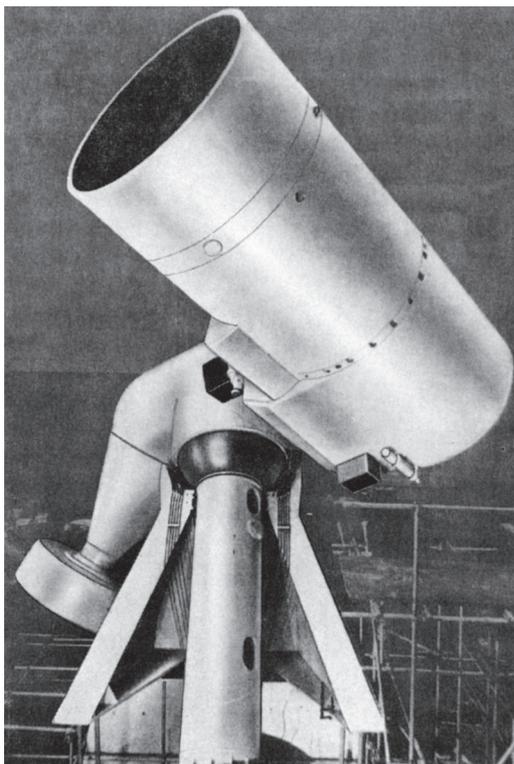
Eine Vielzahl von Zusatzgeräten, wie Spektrographen für den Primär-, den Cassegrain- und den Coudé-Fokus, Fokal-Reduktoren mit Schmidt-Kameras, Photometer, spezielle Kassetteneinrichtungen und photoelektrische Nachführeinrichtungen gehören zu der Gesamtausrüstung der Teleskope.

In den zwei Jahrzehnten seit ihrer Fertigstellung haben beide Teleskope interessante Forschungsergebnisse besonders auf spektroskopischem Gebiet geliefert. Die Leistung der Teleskope und der Spektrographen wurde von ihren



**Bild 20.13** Optisches System des 2-m-Ritchey-Chrétien-Spiegelteleskops: 1 Großsucher 200/3050; 2 hyperbolischer 2-m-Spiegel; 3 Cassegrain-Spiegel; 4 Korrektionsplatte; 5 Ebnungslinse; 6 R-C-Fokus; 7 Coudé-Spiegel, austauschbar; 8 Ablenkspiegel 1 für Coudé-Strahlengang; 9 Ablenkspiegel 2 für Coudé-Strahlengang; 10 Abschlussscheibe; 11 Coudé-Fokus; 12 Teleskopachse; 13 Deklinationsachse; 14 Stundenachse

Während bei den vorhergehenden 2-m-Spiegelteleskopen mit parabolischem Hauptspiegel der Cassegrain-Fokus nur ein Feld von etwa 10' Durchmesser hatte, bildet das Ritchey-Chrétien-System (Bild 20.13) der neuen Teleskope bei 16 m Brennweite ein Feld von 1° Durchmesser auf Platten von 30 cm x 30 cm scharf und geebnet ab. Vor der Bildebene befinden sich eine dünne asphärische Korrektionsplatte und eine Quarz-Bildebnungslinse. Das Öffnungsverhältnis 1:8 wurde gewählt, um in Verbindung mit speziellen photographischen Schichten mit geringem Schwarzschild-Exponenten eine maximale photographische Reichweite zu erzielen. Es bedingte einen relativ kurzbrennweitigen Hauptspiegel ( $f = 5,6$  m) und einen relativ großen Gegenspiegel von 730 mm Durchmesser. Durch Austausch gegen einen zweiten kleineren Gegenspiegel (Durchmesser 524 mm) und Einschwenken eines Planumlenkspiegels wird das Teleskop im Coudé-Fokus bei einer Brennweite von 72 m genutzt. Beide Gegenspiegel sind an einem sogenannten Flipflop-Haltekreuz angebracht, mit dem sie durch Umschwenken ausgetauscht werden. Der Systemwechsel kann in etwa 20 min vollzogen werden. Durch die kürzere Brennweite des Hauptspiegels und durch den Verzicht auf die Einrichtungen des Primärfokus wurde das Teleskoprohr wesentlich kürzer. Es ist aus nur zwei Rohrabschnitten zusammengesetzt (Bild 20.14).



**Bild 20.14** 2-m-Ritchey-Chrétien-Spiegelteleskop nach der Werksmontage

Die Nachführung während der Aufnahmen erfolgt durch Kontrolle an Sternen außerhalb des Bildfelds mit einer Offset-Einrichtung entweder visuell oder lichtelektrisch. Die weitere optische Ausrüstung für den Cassegrain-Fokus besteht aus einem Universal-Astrogitterspektrographen, einem lichtelektrischen Photometer und aus einem Transformationssystem nach *Meinel* mit Schmidt-Kamera, um bei kleinstem Bildmaßstab bei höchster Lichtstärke Aufnahmen zu machen.

Der große Coudé-Spektrograph ist wie bei den anderen 2-m-Spiegelteleskopen horizontal fest aufgestellt. Zur Erhöhung der Reichweite bei spektroskopischen Arbeiten wurde der Kollimatordurchmesser so vergrößert, daß die Anwendung von Gittern von 200 mm x 300 mm bzw. 300 mm x 350 mm möglich ist. Mit drei Kameras werden Dispersionen zwischen 3 und 18 Å/mm erzielt.

Die Steueranlage der neuen 2-m-Spiegelteleskope wurde nach modernen Gesichtspunkten mit integriertem Rechner aufgebaut und voll von Analog- auf Digitalsysteme umgestellt. Die Teleskopantriebe sind für den Grob- und Feintrieb mit je einem Gleichstromstellmotor mit großem Regelbereich ausgestattet. Die Rückmeldung der Position wird durch inkrementelle Geber, die über Präzisionsreibradgetriebe mit den Achsen gekoppelt sind, auf 0,1 durchgeführt. Durch das Mikrorechnersystem werden die Einflüsse durch Refraktion, durch Aufstellungs- und Gerä-

tefehler berücksichtigt. Zur Bedienung stehen wahlweise drei Schaltpulte mit Video-Terminal zur Verfügung. Der Automatisierungsgrad aller wichtigen Gerätefunktionen, auch der Zusatzgeräte wie Spektrographen usw., wurde durch Mikrorechnereinsatz gesteigert. Es erfolgt eine automatische Positionierung nach Himmelskoordinaten und auch eine automatische Nachführungskontrolle, wobei auch Eigenbewegungen gegenüber dem Fixsternhimmel berücksichtigt werden. Durch Scanning ist es möglich, ein vorgegebenes Himmelfeld durch entsprechende Teleskopbewegungen abzurastern.

Als neuer Werkstoff für den Hauptspiegel und die Zusatzspiegel wurde die Glaskeramik „Sitall“ aus dem Glaswerk Rubin in Litkarino/UdSSR (heute JSC Lytkarino Optical Glass Factory / Russland) verwendet. „Sitall“ zeichnet sich durch einen außerordentlich kleinen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ( $0 \pm 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ) aus und weist auch eine gute optische Bearbeitbarkeit auf.<sup>15</sup>

Der Vorteil der extrem geringen thermischen Ausdehnung wirkt sich nicht nur bei der Benutzung des Teleskops aus, sondern auch bereits bei der Bearbeitung der Spiegel, da die langen Wartezeiten, die bisher zum Austemperieren zwischen Politur und Prüfung erforderlich waren, praktisch fortfallen.

Für die Optikprüfung der 2-m-Spiegel wurde in Jena 1981/82 ein 25 m hoher Prüfturm mit Vakuumtank gebaut. Der Vakuumtank hat einen freien Durchmesser von 2,4 m. Seine Höhe wird durch Zusammenbau aus Rohrabschnitten abgestufter Länge dem zu prüfenden Spiegel angepaßt. Der Turm hat im Innern Galerien, von denen aus die verstellbaren Arbeitsplattformen betreten werden können. Prüfturm und Bearbeitungsmaschine sind voneinander getrennt. Der Spiegel wird auf einer speziellen Bearbeitungsfassung gelagert, die sowohl die statischen als auch die dynamischen Kräfte während der Bearbeitung gleichmäßig aufnimmt. Zur Prüfung wird der Spiegel einschließlich seiner Bearbeitungsfassung von der Maschine in den schwingungsgedämpft aufgestellten Vakuumtank übernommen. Einschließlich der Zeit zum Evakuieren vergehen nur etwa 45 min, bis mit der Prüfung begonnen werden kann.

Die Prüfung erfolgt aus dem Krümmungsmittelpunkt mit verschiedenen Prüfanordnungen und -ausrüstungen. Es werden u.a. die Foucaultsche Schneidmethode, die Hartmann-Methode und eine spezielle Meßmethode zur Bestimmung von Queraberrationen angewendet. Bei der Vorfertigung der Sphäre wird direkt, bei den asphärischen Hauptspiegeln der Ritchey-Chrétien-Systeme in Verbindung mit einem Öff-

ner-System geprüft, welches so berechnet ist, daß es die im Krümmungsmittelpunkt der Asphäre auftretenden Aberrationen kompensiert. Mit einer sogenannten Kaustikkamera kann in Verbindung mit einer kalibrierten Hartmannblende direkt im Vakuum ohne zusätzliche optische Elemente geprüft werden. Die Auswertung erfolgt durch den Vergleich der gemessenen mit der theoretisch vorgegebenen Kaustik und gibt Information über alle Qualitätsparameter. Wichtig ist hierbei die Bestimmung der Deformationskonstanten zur Optimierung der Systemparameter.

Für schnelle Kontrollen der Spiegelform auf der Maschine hat sich die Messung mit einem „Linearsphärometer“ bewährt. Dieses besteht aus einem brückenförmigen Körper aus Glaskeramik in Verbindung mit einem hochempfindlichen elektronischen Feinzeiger (Anzeigegegenauigkeit  $\pm 0,03 \mu\text{m}$ ). Die Messung erfolgt durch Vergleich von theoretischen und gemessenen Pfeilhöhendifferenzen, wobei der Spiegel selbst an geeigneter Stelle als Referenz dient. Bei Verschiebung in kleinen Schritten, z.B. 0,1 der Basislänge, lassen sich sogar Zonenfehler erfassen und Korrekturmaßnahmen ableiten. Das Verfahren ist besonders für stark deformierte Asphären geeignet, deren Fertigungsablauf sich dadurch bis in die Endphase sehr beschleunigen läßt.

Als „Arbeitspferde der Astronomen“ werden die Spiegelteleskope mit Öffnungen um 2 bis 2,5 m bezeichnet. Sie leisten bei einem günstigen Verhältnis von Aufwand und Nutzen effektive Arbeit und tragen einen erheblichen Teil des Materials zusammen, das wir für eine Gesamtschau unseres Kosmos benötigen. Durch technische Perfektionierung und durch die Anwendung moderner Empfängertechniken konnte die Leistung dieser Teleskope in den vergangenen Jahrzehnten beträchtlich gesteigert werden. Sie entlasten die Teleskope der 3,5 bis 10-m-Klasse, deren Einsatz wegen der wesentlich höheren Kosten nur dort gerechtfertigt ist, wo Teleskope mit kleineren Öffnungen versagen. Auch bei der Erprobung neuer Techniken können sie wichtige Vorarbeit leisten. Die abgestimmte Arbeitsteilung zwischen einem 2-m-Teleskop und einem Teleskop der 3,5 bis 10-m-Klasse hat sich schon heute bewährt.

Es ist nicht auszuschließen, daß bei der direkten Verbindung einer Anzahl von Teleskopen in der Art eines Arrays, wie wir sie in einem späteren Abschnitt besprechen, Teleskope mit Öffnungen um 2 bis 2,5 m sich als vorteilhaft erweisen.

Abschließend sei noch bemerkt, daß anlässlich des 80. Geburtstags von Alfred Jensch im Juni 1992 das 2-m-Universalspiegel-Teleskop der damals neugegründeten Thüringer Landessternwarte feierlich in „Alfred-Jensch-Teleskop“ umbenannt wurde. Und am 5. April 2005 gelang die Entdeckung eines Exoplaneten um den Stern HD 13189, wodurch die internationale die Bedeutung dieses Teleskops bestätigt wurde.

## Literatur zum Abschnitt 20

- Artus, H.*: Ein Plangitterspektrograph im Cassegrain-Fokus des 2-m-Universalspiegel-Teleskops, Jenaer Rundschau 14. Jg. (1969) S. 346-352
- Artus, H.*: 1-m-Spiegelteleskope mit RITCHEY-CHRÉTIEN- und Coudé-System des VEB Carl Zeiss JENA in Indien. Jenaer Rundschau 20. Jg. (1975) H. 1, S. 3-9
- Aslanov, I. A.*: Acht Jahre Arbeitserfahrungen mit dem 2-m-Spiegelteleskop des VEB Carl Zeiss JENA. Jenaer Rundschau 20. Jg. (1975) H. 1, S. 13-17
- Bartl, E.*: Der Coudé-Spektrograph des 2-m-Universal-Spiegelteleskops in Tautenburg. Jenaer Rundschau Jg. 15 (1970) S. 335-339
- Bartl, E.*: Fünf Jahre Spektroskopie am KARL-SCHWARZSCHILD-Observatorium Tautenburg. Jenaer Rundschau Jg. 17 (1972) H. 7, S. 327-330
- Bartl, E.*: Aufgaben der Optimierung der Tautenburger Spektrographen. Jenaer Rundschau Jg. 26 (1981) H. 1, S. 14-15
- Bauer, W.*: Wärmespannungen in konischen Scheiben. Jenaer Jahrbuch 1951, S. 264-280
- Beck, H.-G.*: Bemerkungen zur Prüfung astronomischer Optiken. Jenaer Jahrbuch 1962, S. 75-85
- Beck, H.-G.*: Prismatische Korrektionsplatte der Schmidt-Kamera 1340/2000/4000. Jenaer Rundschau 18. Jg. (1973) H. 6, S. 322-323
- Beck, H.-G.*: Stand und Entwicklungstendenzen im Astrogerätebau des VEB Carl Zeiss JENA. Jenaer Rundschau Jg. 21 (1976) H. 3, S. 127-137

- Beck, H.-G.*: Alfred Jensch - 70 Jahre. Jenaer Rundschau 27. Jg. (1982) S. 145-146
- Beck, H.-G.*: Die indischen Zwillinge - 1-m-Teleskope aus Jena in Indien. Jenaer Rundschau 29. Jg. (1984) H. 3, S. 113
- Börnngen, F.*: Der Andromedanebel auf Tautenburger SCHMIDT-Aufnahmen. Jenaer Rundschau 14. Jg. (1969) S. 330-332
- Börnngen, F.*: Die Reichweite der Tautenburger Objektivprismenaufnahmen. Jenaer Rundschau 18. Jg., Heft 6/1973 Beilage
- Börnngen, F., u. a.*: Erste Erfahrungen mit der prismatischen Schmidt-Platte des Tautenburger 2-m-Spiegelteleskops, Jenaer Rundschau 20. Jg. (1975) H. 1, S. 18-25
- Das Fernrohr von Schemacha in Betrieb. Jenaer Rundschau (1967) H. 6, S. 361-362
- Friedrich, W.*: Das vierte Großteleskop aus Jena - ein Bericht. Jenaer Rundschau 24. Jg. (1979) H. 1, S. 30-31
- Gert, H.*: Der uns den Himmel näher brachte, zu Besuch bei Walter Pfaff. Spektrum 9. Jg. (1978) H. 9, S. 20-22
- Gillmor, C. S.*: New Soviet Observatory at Shemakha, Azerbaijan. Sky and Telescope Vol. 34 (1967) No. 4, pp.215
- Gutcke, D.*: Astrospektrographen aus Jena. Jenaer Rundschau 12. Jg. (1967) H. 3, S. 187-189
- Gutcke, D.*: Zeiss-Jena-Universal-Astro-Gitterspektrograph UAGS. Jenaer Rundschau 14. Jg. (1969) Messe-Sonderheft, S. 101-103
- Gutcke, D.*: 2-m-Ritchey-Chrétien-Coudé-Spiegelteleskop für die VR Bulgarien. Jenaer Rundschau 24. Jg. (1979) H. 1, S. 26-29
- Gutcke, D.*: Technischer Fortschritt im Teleskopbau - das neue 1-m-Spiegelteleskop. Jenaer Rundschau 29. Jg. (1984) H. 3, S. 116-119
- Gutcke, D.; Teske, H. J.*: Das zweite 2-m-Spiegelteleskop aus Jena für die Sowjetunion. Jenaer Rundschau 31. Jg. (1986) H. 3 S. 135-136
- Hasselmeier, H.*: Geräte-Entwicklung im Geiste von Zeiss und Abbe, erläutert an einer modernen Entwicklung. Jenaer Rundschau 1. Jg. (1956) Nr. 2, S. 31-55
- Högner, W.*: Über die Herstellungstechnik photographischer Äquidensiten. Jenaer Rundschau 14. Jg. (1969) S. 340-345
- Jensch, A.*: Moderne Technik im Dienste der astrophysikalischen Forschung. Urania Jg. 24, April 1961, S. 123-126
- Jensch, A.*: Angewandte Mathematik als unentbehrlicher Helfer bei der Konstruktion astronomischer Großgeräte. In Band IV Mathematik und Technik, über Wissenschaftliche Grundlagen der modernen Technik. Berlin: Akademie-Verlag 1962
- Jensch, A.*: Das 2-m-Universal-Spiegelteleskop und seine Ausrüstung. Jenaer Rundschau 11. Jg. (1966) Beilage zu Heft 5, S. 8-15
- Jensch, A.*: Eine neue 2-m-Spiegelteleskop-Anlage aus Jena. Jenaer Rundschau 11. Jg. (1966) H. 3, S. 198-200
- Jensch, A.*: 70 Jahre Abteilung für Astrogeräte, 2. Teil: 1947 bis 1967 Der neue Start. Jenaer Rundschau 12. Jg. (1967) H. 3, S. 171-176
- Jensch, A.*: Uhrgesteuerte Antriebe für Astro-Geräte. Jenaer Rundschau 12. Jg. (1967) H. 3, S. 182-186
- Jensch, A.*: 2-m-Primär-CASSEGRAIN-COUDÉ-Spiegelteleskop, Jenaer Rundschau 12. Jg. (1967) H. 3, S. 190-199
- Jensch, A.; Steinbach, M.*: Kuppelsteuerung in den 2-Meter-PCC-Teleskopanlagen. Jenaer Rundschau 13. Jg. (1968) H. 6, S. 341-344 Karl-Schwarzschild-Observatorium der Deutschen Akademie der Wissenschaften zu Berlin mit dem 2-m-Universalspiegelteleskop in Tautenburg bei Jena feierlich seiner Bestimmung übergeben. Jenaer Rundschau 6. Jg. (1961) H. 1, S. 20-23
- Kienle, H.*: Ein 2-m-Universal-Spiegelteleskop. Miscellanea Academica Berolinensia Berlin: Akademie-Verlag 1950
- Kneschke, A.*: Die zeitlich veränderliche Abkühlung von ebenen Kreisplatten. Jenaer Jahrbuch 1951, S. 254-263
- Köhler, P.; Steinbach, M.*: Tendenzen im astronomischen Gerätebau. Jenaer Rundschau 31. Jg. (1986) H. 3, S. 108-110

- Köhler, P.; Gutcke, D.; Teste, H.-J.*: 90 Jahre Teleskopbau in Jena. Jenaer Rundschau 32. Jg. (1987) H. 4, S. 189-192
- Koubsky, R.; Rajsky, V.; Zicha, J.*: 15 Jahre astronomische Forschungen mit dem 2-m-Spiegelteleskop am Observatorium Ondrejov (ČSSR). Jenaer Rundschau 27. Jg. (1982) H. 3, S. 110-115
- Kovacev, B. Z.*: Das Nationalobservatorium der Volksrepublik Bulgarien. Jenaer Rundschau 27. Jg. (1982) H. 3, S. 118-120
- Lau, E.; Krug, W.*: Die Äquidensitometrie. Berlin: Akademie Verlag 1957. Equidensitometry, Focal Press, London, New York 1968
- Mann, G.; Sonnefeld, A.*: 70 Jahre Abteilung für Astrogeräte I. Teil: 1897 bis 1946. Jenaer Rundschau 12. Jg. (1967) H. 3, S. 159-170
- Marx, S.; Pfau, W.; Richter, N.*: Objektivprismenaufnahmen mit prismatischer Schmidtplatte. Jenaer Rundschau 16. Jg. (1971) H. 6, S. 354-358
- Marx, S.*: 20 Jahre Erfahrungen mit Geräten des VEB Carl Zeiss JENA im Karl-Schwarzschild-Observatorium Tautenburg. Jenaer Rundschau Jg. 26 (1981) H. 1, S. 4-9
- Marx, S.*: Jenaer 2-m-Spiegelteleskop in Tautenburg erhielt neuen Spiegel. Jenaer Rundschau Jg. 31 (1986) H. 3, S. 132-133
- Pfaff, W.*: Betrachtungen zur Herstellung optischer Bauteile für astronomische Geräte. Jenaer Rundschau Jg. 17 (1972) H. 7, S. 345-348
- Richter, N.; Högner, W.*: Zur Anwendung der Äquidensitometrie auf astronomische Probleme: Morphologische und photometrische Untersuchungen an M 31, M 32 und NGC 205. Astronomische Nachr. Bd. 287 (1964) Heft 5/6, S.261-275
- Richter, N.*: Kuppelklima und thermisches Verhalten des 2-Meter-Universal-Spiegelteleskops am Karl-Schwarzschild-Observatorium Tautenburg. VEB Carl Zeiss JENA Nachrichten 9. Folge, Heft 7, Juli 1964
- Richter, N.*: Zehn Jahre Karl-Schwarzschild-Observatorium Tautenburg. Jenaer Rundschau 15. Jg. (1970) H. 6., S. 321-325
- Richter, N.*: Optimization of Information in Astronomical Photography. Vistas in Astronomy Vol. 19, Pt. 2, pp. 215-223, Pergamon Press, Great Britain
- Richter, N.*: Acht Jahre Erfahrungen mit der SCHMIDT-Kamera des 2-m-Universal-Spiegelteleskops in Tautenburg. Jenaer Rundschau 13. Jg. (1968) H. 6, S. 315-321
- Richter, N.*: Kompakte Galaxien - eine bemerkenswerte neue Kategorie von Sternsystemen. Jenaer Rundschau 14. Jg. (1969) H. 6, S. 324-329
- Richter, N.*: Die blauen Objekte. Jenaer Rundschau Jg. 17 (1972) H. 7, S. 322-326
- Rudolph, H.; Wrobel, D.*: Zwilling am Pirkuli. Wissenschaft und Fortschritt 33. Jg. (1983) H. 6, S. 216-220
- Seifen, E.*: Sternwartenkuppel für das Observatorium Tautenburg. Jenaer Rundschau 1966 Beilage zu Heft 5, S. 16-21
- Van den Bergh, S.*: Visiting Germany's Largest Telescope. Sky and Telescope Vol. 27 (1964) pp. 268-272

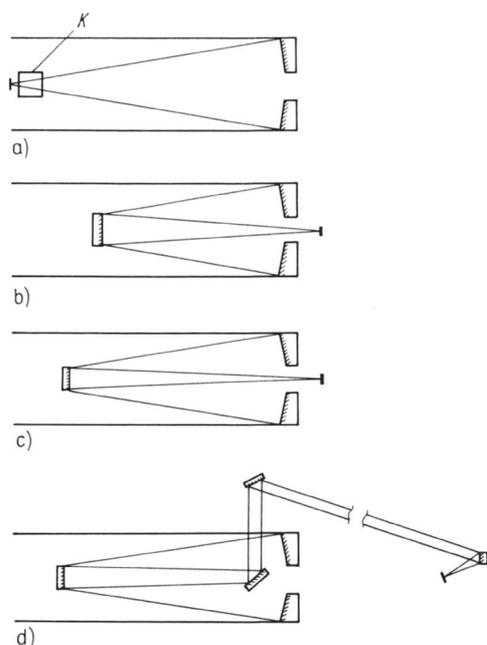
## 21. Die Spiegelteleskope der 3,5- bis 4-m-Klasse

In rund einem Jahrzehnt, zwischen 1973 und 1984, wurden sieben große Teleskope mit Spiegeldurchmessern zwischen 3,5 und 4 m fertiggestellt. Sechs dieser Teleskope weisen gemeinsame Züge auf und können ihre Verwandtschaft mit dem 5-m-Hale-Teleskop auf dem Mount Palomar nicht verleugnen. Die Ähnlichkeiten erstrecken sich sowohl auf die optische Anlage als auch auf die Gestaltung der Montierung.

Die optischen Systeme dieser Teleskope sind entweder als klassische Primär-Cassegrain-Coudé-Teleskope mit parabolischem Hauptspiegel ausgelegt, oder es sind Ritchey-Chrétien-Systeme mit Korrektor in Primärfokus. Alle diese Teleskope sind im Primärfokus (Brennweite 11 bis 14 m), im Cassegrain-Fokus (Brennweite 29 bis 35 m) und im Coudé-Fokus (Brennweite 108 m bis 140 m) benutzbar (Bild 21.1).

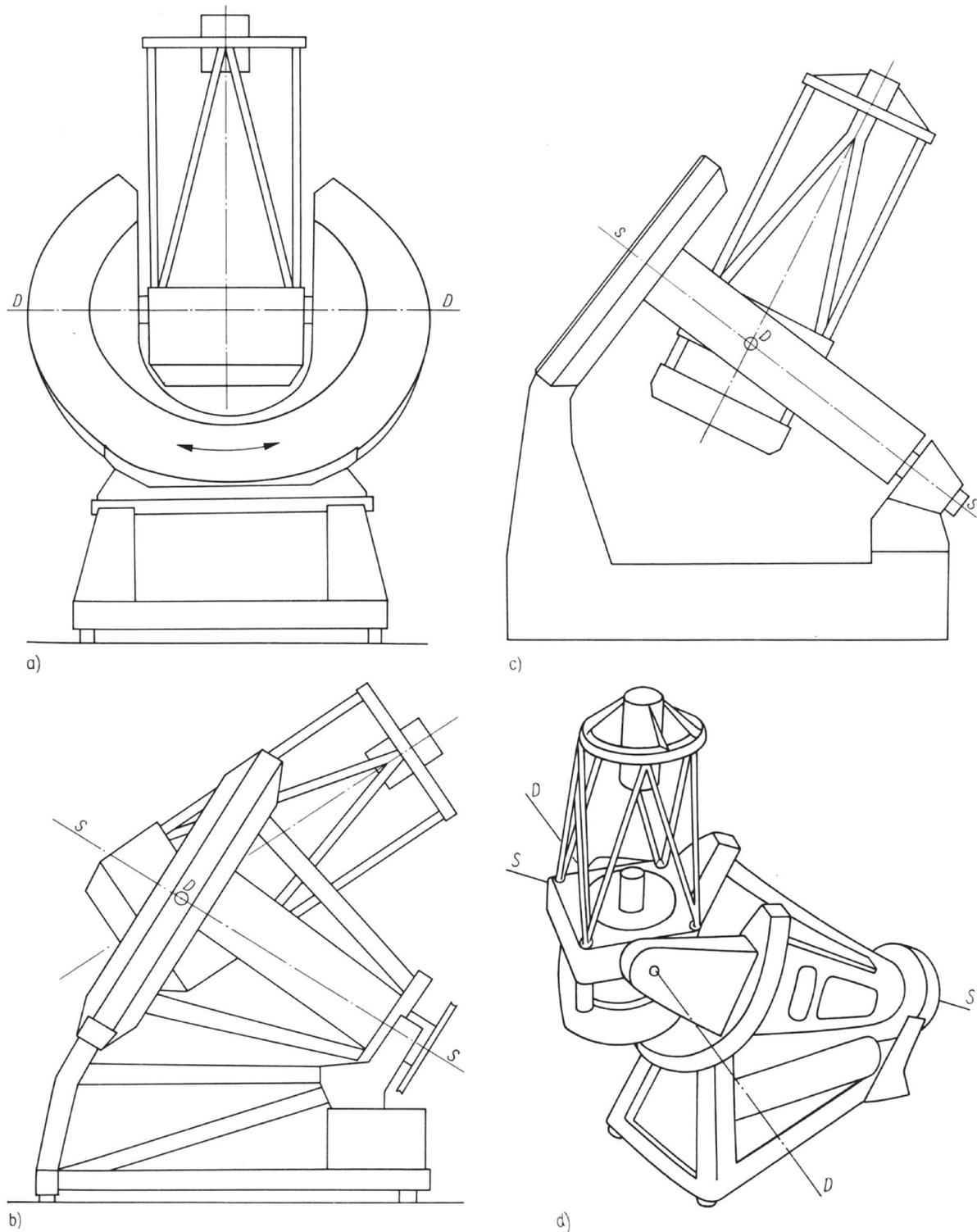
Jedes der sieben Teleskope ist parallaktisch montiert. Als gemeinsames Merkmal der Montierung können wir bei sechs Teleskopen die Anlehnung an die Split-Ring-Montierung *Russel W. Porters* nennen mit ihrem großen hufeisenförmigen rotierenden Element im oberen Lager der Stundenachse (Bild 21.2). Die Deklinationsachse fällt entweder in die Ebene des hufeisenförmigen Split-Ring (Bild 21.2 b), wie z. B. bei dem 4-m-Mayall-Teleskop des Kitt-Peak-Observatoriums und dem gleichartigen 4-m-Teleskop des Inter-American-Observatory auf dem Cerro Tololo in Chile, oder das Hufeisen ist über einen Rahmen mit dem Südlager in analoger Weise wie bei dem Hale-Teleskop verbunden (Bild 21.2c). Diese Lösung wurde beim 3,6-m-Spiegelteleskop des Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA) der Bundesrepublik Deutschland in Spanien gewählt. Eine weitere Variante ist in der Kombination von Hufeisen mit Gabel zu sehen, indem zwei kurze steife Gabelholme auf der Oberseite des Hufeisens aufgesetzt sind (Bild 21.2d). Das 3,6-m-Teleskop der Europäischen Süd-Sternwarte (ESO) in La Silla in Chile verkörpert diesen Montierungstyp.

Bei zwei Teleskopen (4-m-Mayall-Teleskop und 3,6-m-ESO-Teleskop) ist der Hauptspiegel aus Quarzglas hergestellt. Bei den fünf weiteren wurde Glaskeramik als Spiegelwerkstoff eingesetzt. Für die Herstellung großer Teleskopspiegel brachte Glaskeramik einen bedeutsamen Fortschritt, weil bei äußerlich glasähnlicher Beschaffenheit und Bearbeitbarkeit die Wärmeausdehnung in dem für Teleskope interessanten Temperaturbereich vernachlässigbar klein ist. Die Entwicklung glaskeramischer Werkstoffe (Vitrakerame, Pyroceram) wurde in den fünfziger Jahren besonders durch *S. D. Stookey* in den Corning-Glaswerken zum Erfolg geführt. Gläser spezieller Zusammensetzung (z. B.  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{MgO}-\text{ZnO}$ ) werden zunächst in normaler Weise geschmolzen und in die gewünschte Rohform gebracht. Durch eine weitere thermische Behandlung nach einem sorgfältig abgestimmten Temperaturregime wird bei diesem Glas dann eine gesteuerte Kristallisation ausgelöst. Dabei entstehen, gleichmäßig in eine Restglasphase eingebettet, zahllose Mikrokristallite. Die bei der Glasherstellung sonst als Fehler gefürchtete „Entglasung“ wird hier in gezielter Weise zur Erzeugung eines Werkstoffs mit neuen, besonderen Eigenschaften genutzt. Art und Größe der Mikrokristallite und ihr Anteil in der Restglasphase bestimmen die Eigenschaften. Der thermische Ausdehnungskoeffizient kann gezielt zwischen sehr kleinen positiven und negativen Werten eingestellt werden. Als Kristallphasen treten  $\beta$ -Eukryptit  $\text{LiAl}(\text{SiO}_4)$  und  $\beta$ -Spodumen  $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$  auf, aber auch andere Mischkristalle spielen eine Rolle. Sind die Kristallite kleiner als die Lichtwellenlänge und stimmen die Brechzahl von Kristallit und Restglasphase gut überein, so ist das Material transparent. Gegenüber Keramiken unterscheiden sich die Vitrakerame durch völlige Porenlosigkeit. Als wichtige



**Bild 21.1** Die optischen Systeme des 3,9-m-Anglo-Australian-Teleskops a) Primärsystem  $f/3.3$  mit Korrektor (K); b) Cassegrain-System  $f/8$ ; c) Cassegrain-System  $f/15$ ; d) Coudé-System  $f/36$

Die Entwicklung glaskeramischer Werkstoffe (Vitrakerame, Pyroceram) wurde in den fünfziger Jahren besonders durch *S. D. Stookey* in den Corning-Glaswerken zum Erfolg geführt. Gläser spezieller Zusammensetzung (z. B.  $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{TiO}_2-\text{MgO}-\text{ZnO}$ ) werden zunächst in normaler Weise geschmolzen und in die gewünschte Rohform gebracht. Durch eine weitere thermische Behandlung nach einem sorgfältig abgestimmten Temperaturregime wird bei diesem Glas dann eine gesteuerte Kristallisation ausgelöst. Dabei entstehen, gleichmäßig in eine Restglasphase eingebettet, zahllose Mikrokristallite. Die bei der Glasherstellung sonst als Fehler gefürchtete „Entglasung“ wird hier in gezielter Weise zur Erzeugung eines Werkstoffs mit neuen, besonderen Eigenschaften genutzt. Art und Größe der Mikrokristallite und ihr Anteil in der Restglasphase bestimmen die Eigenschaften. Der thermische Ausdehnungskoeffizient kann gezielt zwischen sehr kleinen positiven und negativen Werten eingestellt werden. Als Kristallphasen treten  $\beta$ -Eukryptit  $\text{LiAl}(\text{SiO}_4)$  und  $\beta$ -Spodumen  $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$  auf, aber auch andere Mischkristalle spielen eine Rolle. Sind die Kristallite kleiner als die Lichtwellenlänge und stimmen die Brechzahl von Kristallit und Restglasphase gut überein, so ist das Material transparent. Gegenüber Keramiken unterscheiden sich die Vitrakerame durch völlige Porenlosigkeit. Als wichtige



**Bild 21.2** Drei Varianten der Split-Ringmontierung bei den Teleskopen der 3,5 bis 4-m-Klasse a) Ansicht von Variante I in Nord-Südrichtung, Teleskop in Zenitstellung; gemeinsames Merkmal der drei Varianten ist der große hufeisenförmige Ring im oberen Stundenachsenlager; b) Variante I: Deklinationsachse in der Ebene des Split-Rings: 4-m-Mayall-Teleskop, Kitt Peak, Arizona / 4-m-Teleskop des Inter-American Observatory Cerro Tololo, Chile / 3,9-m-Anglo-Australian-Teleskop, Siding Spring, Australien; c) Variante II: Deklinationsachse durch Rahmen zwischen Split-Ring und unterem Stundenachsenlager: 3,6-m-Teleskop des Max-Planck-Instituts, Almeria, Spanien; d) Variante III: Deklinationsachse durch Lager der auf den Split-Ring aufgesetzten Gabelholme: 3,6-m-Teleskop des European Southern Observatory, La Silla, Chile

Hersteller großer Scheiben für Teleskopspiegel aus Glaskeramik nennen wir die Firmen Owens Illinois/USA (CER-VIT), Schott Mainz/Bundesrepublik Deutschland (ZERODUR) und das Glaswerk Litkarino/UdSSR (SITALL).

Jedes der sieben großen Teleskope ist mit moderner Steuerungs- und Rechentechnik ausgerüstet und je nach Zielstellung mit umfangreichen Zusatzeinrichtungen, Spektrographen u.a. ausgestattet.

Für jedes Teleskop erfolgte eine sorgfältige Standortwahl unter Berücksichtigung des atmosphärischen seeing und der ausgewogenen Verteilung auf die Nord- und Südhalbkugel der Erde.

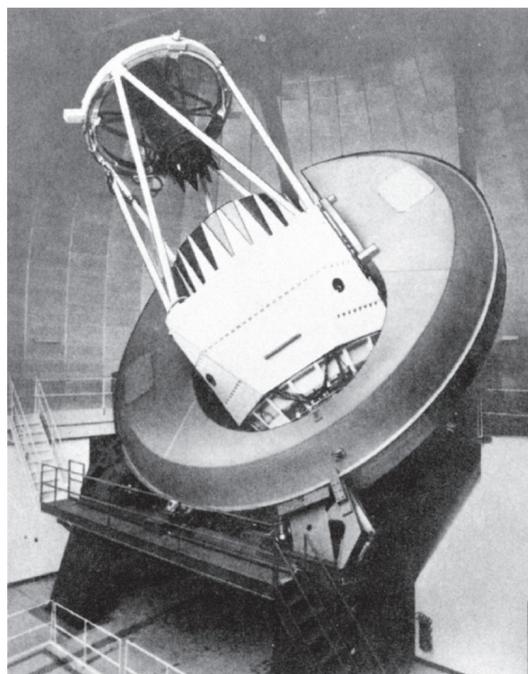
Wie kam es rund 25 Jahre nach dem 5-m-Hale-Teleskop zu diesem sprunghaften Anstieg der Anzahl moderner Großteleskope? Wir nennen folgende Gründe:

- Mit dem Einstieg in das Raumfahrtzeitalter war das Interesse an astronomischer Forschung - auch mit erdgebundenen Teleskopen - stark angestiegen.
- Mit den wenigen um 1960 vorhandenen Großteleskopen war zwar eine Fülle von Ergebnissen gewonnen worden, aber auch viele neue Probleme waren entstanden. Auch die sprunghafte Entwicklung der Radioastronomie forderte zur Klärung der Natur der Radioquellen Untersuchungen im optischen Bereich mit großen Teleskopen.
- Nach den Erfahrungen mit dem 5-m-Hale-Teleskop und dem 1959 fertiggestellten 3-m-Lick-Teleskop war der Bau eines 3,5 bis 4-m-Teleskops ohne großes technisches Risiko möglich. Man befand sich auf technisch sicher beherrschbarem Boden.
- In wenigen modernen Industrienationen wurden für Vorhaben der Raumfahrt, für Kernforschungsanlagen, aber noch stärker für die Rüstung Unsummen ausgegeben. Die ein bis zwei Dutzend Millionen Dollar, die ein Großteleskop kostete, waren im Vergleich dazu geradezu bescheiden.
- Das Interesse der Industrie an Objekten, die Spitzentechnologien erforderten, war gewachsen. Großteleskope mit ihren fast unvorstellbaren Präzisionsforderungen waren früher schon und sind heute in noch stärkerem Maße Musterbeispiele für Objekte, die den wissenschaftlich-technischen Fortschritt bestimmen und die auch die Leistungsfähigkeit ihrer Hersteller dokumentieren.

Die Planung der ersten Teleskope der 3,5 bis 4-m-Gruppe begann Anfang der sechziger Jahre. Jedes dieser sieben großen Teleskope hat seine Besonderheiten und auch seine eigene Geschichte.

Als erstes Instrument dieser Gruppe wurde das 4-m-Mayall-Teleskop des Kitt Peak National Observatoriums (KPNO) fertiggestellt (Bild 21.3). Im März 1973 wurde es probeweise in Betrieb genommen, am 20. Juni 1973 offiziell eingeweiht. Es wurde nach seinem Initiator *Nicholas U. Mayall* benannt, der von 1960 bis 1971 Direktor des KPNO war. *Er* hatte im September 1961 den Beschluß zu diesem Teleskop im Komitee durchgesetzt und die Ziele fixiert, aber bis zum Beginn der Realisierung vergingen noch einige Jahre.

Das Kitt-Peak-Observatorium (Bild 21.4) liegt etwa 75 km südwestlich von Tucson in Arizona, unweit der mexikanischen Grenze. Die Standortsuche für ein großes Nationalobservatorium wurde 1955 begonnen, das Observatorium auf dem 2100 m hohen Kitt Peak - mit Basiseinrichtungen in Tucson - 1958 gegründet. Neben kleineren und mittelgroßen Teleskopen wurden auf dem Kitt Peak das große Sonnenteloskop und das 4-m-Spiegelteleskop als Hauptinstrument aufgebaut.



**Bild 21.3** 4-m-Mayall-Teleskop im Kitt Peak National Observatorium

Die Spiegelscheibe wurde bei der General Electric Comp. in Euclid, Ohio, aus Quarzglas hergestellt. Unter Leitung von *Richardson* wurden mehrere hundert hexagonale Quarzglaskörper in spezieller Packung bei einer Temperatur von etwa 1800°C miteinander zu einer großen Scheibe verschmolzen. Bei der Vorbearbeitung der Scheibe, wobei auch der Radius angearbeitet wurde, wurden 6 t Material abgetragen. Die vorbearbeitete Scheibe hatte 4 m Durchmesser, 0,6 m Randdicke, eine Bohrung von 1,3 m und wog 15 t. Ende Oktober 1967 wurde sie nach Tucson transportiert. Hier waren Maschinen und ein Prüfturm aufgestellt worden. Der Hauptspiegel und alle kleineren Spiegel wurden hier bis zur Endprüfung fertig bearbeitet. Die Optikbearbeitung dauerte etwa 3 Jahre. Parallel zur Optikherstellung wurde an der Konstruktion der Montierung und des Kuppelgebäudes gearbeitet, nach Entwürfen von *Skidmore, Owings* und *Merill*. Die Zusammenarbeit der Kitt-Peak-Ingenieure mit der Westinghouse Electric Corp, spielte eine wichtige Rolle, aber auch andere Unternehmen waren einbezogen. Die Projektleitung hatte Dr. *David Crawford*. Konstruktion und Bau der Montierung stützten sich auf Erfahrungen mit dem Hale-Teleskop, insbesondere in bezug auf das große Hufeisen.

Ein wesentlicher Unterschied ist jedoch darin zu sehen, daß die Deklinationsachse direkt in die Ebene des Hufeisens verlegt ist. Der Rahmen, der Hufeisen und Südlager verbindet, ist dadurch wesentlich ver-



**Bild 21.4** Kitt Peak National Observatorium, Arizona

kürzt. Er gibt nur freien Raum für das Durchschwenken des Spiegellendes der Montierung. Die Tubuskonstruktion stützt sich auf die bewährte Form von *Mark Serurier*, die er für das Palomar-Teleskop entwickelt hatte und die sich beim 3-m-Lick-Teleskop und seither bei vielen anderen Instrumenten bewährt hat.

Das 4-m-Mayall-Teleskop wurde Vorbild für zwei fast gleichartige Teleskope. Das Schwesterinstrument zum Mayall-Teleskop wurde auf dem 2200 m hohen Cerro Tololo in der Nähe von La Serena-Vicuna in den Chilenischen Anden aufgestellt und 1976 in Betrieb genommen.

Anstelle eines 4-m-Quarzglas spiegels wurde hier ein 4-m-Spiegel aus der neuen Glaskeramik CER-VIT von Owens, Illinois, eingesetzt, weil die thermische Ausdehnung bei diesem Material gegenüber dem schon sehr günstigen Quarzglas noch einmal wesentlich verringert ist.

Das 4-m-Cerro-Tololo-Teleskop ist das Hauptinstrument des Inter-Amerikanischen Observatoriums, welches - wie auch das Kitt-Peak-Observatorium - von der Association of Universities for Research in Astronomy (AURA) im Auftrag der National Science Foundation verwaltet wird. Durch die zwei gleichartigen Teleskope mit besonders günstigen Standortbedingungen auf der Nord- und der Südhalbkugel wurde die Möglichkeit geschaffen, vergleichbare Ergebnisse der gesamten Himmelskugel zu gewinnen.

Auch in Großbritannien wurde um 1960 der Plan für ein großes Teleskop auf der Südhalbkugel gefaßt. Aus dem Zusammenschluß anglo-australischer Interessen entstand das Projekt eines 3,9-m-Spiegelteleskops, das in Australien im Observatorium Siding Spring in New South Wales errichtet wurde. Vereinbarungen zwischen der Royal Society und der Australischen Akademie der Wissenschaften ab 1964 führten 1967 zu der Entscheidung, das Projekt unter Zugrundelegung der Konzeption des 4-m-Teleskops des Kitt-Peak-Observatoriums zu realisieren. So ist die große Ähnlichkeit des Anglo-Australischen 3,9-m-Teleskops (AAT) mit dem Kitt-Peak-Teleskop und dem Cerro-Tololo-Teleskop zu verstehen.

Der Hauptspiegel des AAT von 3,9 m Durchmesser aus CER-VIT hat eine Brennweite von 12,8 m. Die Optik ist als Ritchey-Cretien-System ausgebildet. Für den Primärfokus sind von *C. G. Wynne* berechnete Korrektoren vorhanden: ein Triplet für ein Feld von 60', ein Duplett für 25' - speziell für Ultra-

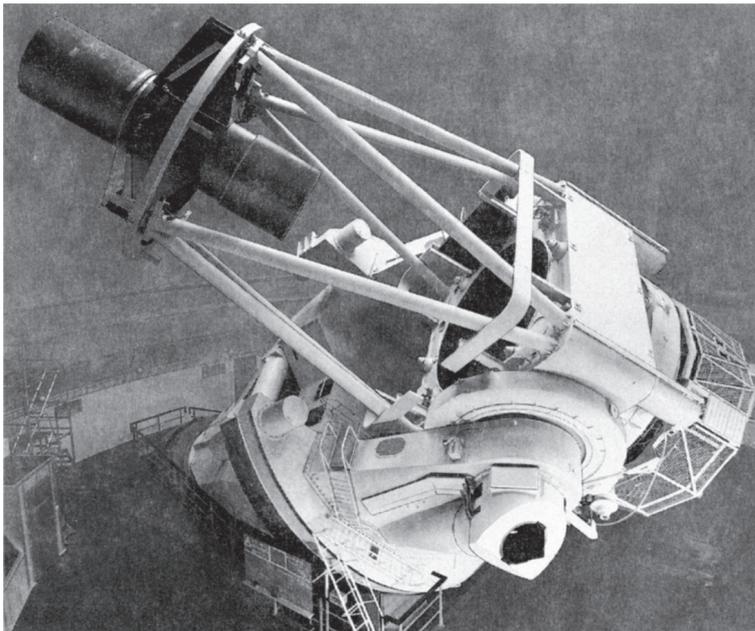
violett-Beobachtungen - sowie eine asphärische dünne Korrektionsplatte für spektroskopische Arbeiten im Primärfokus bei geringsten Verlusten. Es sind zwei Cassegrain-Spiegel für Brennweiten von 31 m und 58 m vorhanden. In der Benutzung als Coudé-System hat das Teleskop eine Brennweite von 140 m.

Die Optik, einschließlich der Bearbeitung des 3,9-m-Spiegels, die Montierung des Teleskoprohrs (nach *Serrurier*), die Spiegelfassung mit pneumatischer axialer Spiegellagerung und radialer Entlastung durch 24 Zug-Druck-Hebel, die Entlastungsfassungen der Gegenspiegel (durch Unterdruck) und das System zum Gegenspiegelaustausch wurden von Grubb/Parsons in England gefertigt. Durch die Firma Mitsubishi in Japan wurden der Stützkörper, der Stundenachsenkörper, Getriebe, Hydraulik usw. gefertigt. Das Hufeisen hat einen Außendurchmesser von 12 m. Es wird von zwei hydrostatischen Lagern getragen. Drei weitere hydrostatische Lager tragen die Kugelzone am unteren Ende der Stundenachse (im Fall der südlichen Hemisphäre das Nordlager). Der Antrieb erfolgt über Stirnräder von 3,6 m Durchmesser. Absolute und inkrementale optische Winkelsignalgeber mit 1" und 0",05 Auflösung dienen der Positionsanzeige.

Das AAT wurde 1974 in Betrieb genommen. Das Interesse europäischer Astronomen führte zu vier weiteren Teleskopen der 3,5 bis 4-m-Klasse. Als erstes dieser Objekte wurde das 3,6-m-Teleskop der „Europäischen Südsternwarte“ (European Southern Observatory, ESO) begonnen. Die Aufstellung erfolgte in Chile auf dem Cerro La Silla. Der Spiegel wurde bereits 1965 in den USA aus Quarzglas bestellt. Aber das ganze Projekt kam sehr zögernd in Gang, weil fünf europäische Staaten beteiligt waren. 1970 wurde eine Projektgruppe beim Europäischen Kernforschungsinstitut CERN in Genf gebildet. An der Realisierung waren Firmen in Dänemark, in der Bundesrepublik Deutschland, Frankreich, Holland und der Schweiz beteiligt. Die Fertigstellung erfolgte 1976. Bei diesem Teleskop ist die Split-Ring-Montierung in der Weise modifiziert, daß auf dem Hufeisen zwei steife kurze Gabelholme aufgesetzt sind. Es stellt also den Übergang zur Gabelmontierung dar (Bilder 21.5., 21.6, 21.7).

Ein fast gleich großes Teleskop mit einem Spiegel aus CER-VIT von 3,67 m Durchmesser (Bild 21.8) entstand durch französisch-kanadische Zusammenarbeit auf dem Mauna Kea (Hawaii). In enger Nachbarschaft befindet sich dort auch ein englisches 3,8-m-Spiegelteleskop mit einem Leichtgewichtsspiegel und einer leichten englischen Rahmenmontierung, speziell für IR-Untersuchungen (Bild 21.9). Es ist unter der Bezeichnung United-Kingdom-Infrared-Teleskop (UKIRT) bekannt. Beide Teleskope auf Hawaii wurden 1979 fertiggestellt.

Auch für ein italienisches Projekt gibt es Bestrebungen; eine Spiegelscheibe wurde hergestellt und Untersuchungen über Antriebssysteme durchgeführt.



**Bild 21.5** 3,6-m-Spiegelteleskop des European Southern Observatory Foto: ESO

Als letztes großes Objekt dieser Gruppe nennen wir das seit 1985 im Einsatz befindliche 3,5-m-Spiegelteleskop des Max-Planck-Instituts für Astronomie. Es ist auf dem Calar Alto bei Almeria im Süden Spaniens aufgestellt. Auch seine Geschichte reicht weit zurück.

In einer Denkschrift der Astronomischen Gesellschaft wurde auf das Defizit an leistungsfähigen Beobachtungsgeräten in der Bundesrepublik Deutschland hingewiesen, und in der Folge konnten Prof. *H. Elsässer* und seine Mitarbeiter in dem 1969 gegründeten Max-Planck-Institut für Astronomie ein umfassendes Aufbauprogramm beginnen, dessen Schwerpunkt das Observatorium auf dem Calar Alto bildete. Als erstes Teleskop wurde ein bei Carl Zeiss in Oberkochen hergestelltes 1,2-m-Spiegelteleskop in Be-

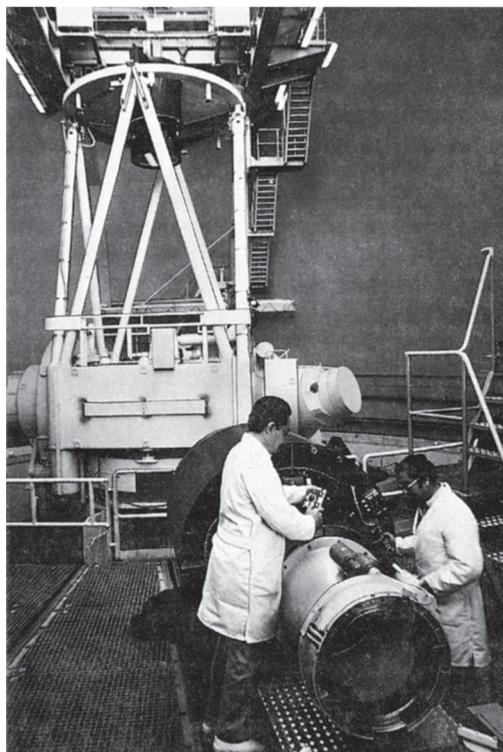
trieb genommen, dessen Besonderheit eine poluniversale sogenannte Kugelmontierung ist; 1979 folgte ein 2,2-m-Spiegelteleskop mit Gabelmontierung. Ein gleiches Instrument wurde 1984 in Chile aufgestellt. Das Ziel war es aber, ein Teleskop zu schaffen, das dem 3,6-m-ESO-Teleskop gleichwertig ist. Das ESO-Teleskop war als Gemeinschaftsteleskop mehrerer europäischer Länder geschaffen worden, als kaum Aussichten bestanden, in einem einzelnen Land ein solches Projekt zu finanzieren. Der Nachteil eines solchen Projekts, das Teleskop nur anteilig nutzen zu können, wirkt vor allem dann, wenn neue Beobachtungstechniken konzipiert und erprobt werden.

Die „optischen“ Astronomen der Bundesrepublik Deutschland hatten die Möglichkeit, von dem Durchsetzungsvermögen der Radioastronomen zu profitieren. Projekte wie das 100-m-Radioteleskop in Effelsberg waren finanziert worden, weil man meinte, nur so bestünden Aussichten, in der Forschung mit an der Weltspitze arbeiten zu können. Nicht unwesentlich war jedoch das Argument, daß durch solche Großprojekte die optische Industrie die Möglichkeit bekommt, eine internationale Spitzenstellung einzunehmen. Das Projekt wurde durch erhebliche Mittel des Bundesministeriums für Forschung und Technik unterstützt, mit deren Hilfe bei Carl Zeiss in Oberkochen und Schott in Mainz neue Produktionsstätten entstanden und die Entwicklung gefördert wurde.

Die Konzeption des 3,5-m-Spiegelteleskops wurde von 1972 bis 1975 festgelegt. Von den sieben Teleskopen dieser Klasse steht es dem 5-m-Spiegelteleskop auf dem Mount Palomar wegen der Ähnlichkeit der Montierung am nächsten, aber es enthält diesem gegenüber doch viele Neuerungen. Vom Max-Planck-Institut hat Dr. K. Bahner mit seinen Mitarbeitern die wissenschaftliche Konzeption maßgeblich beeinflusst. Es wurde zunächst ein Auftrag für einen Entwurf erteilt, um das Entwicklungs- und Kostenrisiko zu vermindern. Die Realisierung erfolgte durch Zeiss/Oberkochen in Kooperation mit anderen Unternehmen.

Die Optik des 3,5-m-Spiegelteleskops ist als Ritchey-Chrétien-System ausgebildet. Bei einer Brennweite von 35 m ist in einem Feld von  $0^{\circ},5$  (Durchmesser 300 mm) der Astigmatismus kleiner als  $0^{\circ},6$ . Der Hauptspiegel stellt ein Rotationshyperboloid höherer Ordnung dar. Die Nutzung im Primärfokus bei einer Brennweite von 12,25 m ist mit einem zweilinsigen Korrektor nach Wynne in einem Feld von  $28'$  möglich. Ein weiterer in Oberkochen entwickelter 3linsiger Korrektor bildet ein Feld von  $1^{\circ}08'$  (Durchmesser 240 mm) ab. Mit einem zweiten, kleineren Gegenspiegel, der als „Chopper“ moduliert wird, kann das Teleskop im Cassegrain-Fokus bei einer Brennweite von fast 160 m für Arbeiten im infraroten Spektralbereich genutzt werden. Als Coudé-Teleskop beträgt die Brennweite 122,5 m.

Für die Herstellung des Spiegelrohlings aus ZERODUR wurde bei Schott/Mainz ein Schmelzofen mit einer Kapazität von 40 t errichtet. Der Guß erfolgte im Dezember 1973. Abkühlung, Bearbeitung des Rohlings und die nochmalige thermische Behandlung zur Keramisierung nahmen etwa 20 Monate in Anspruch.



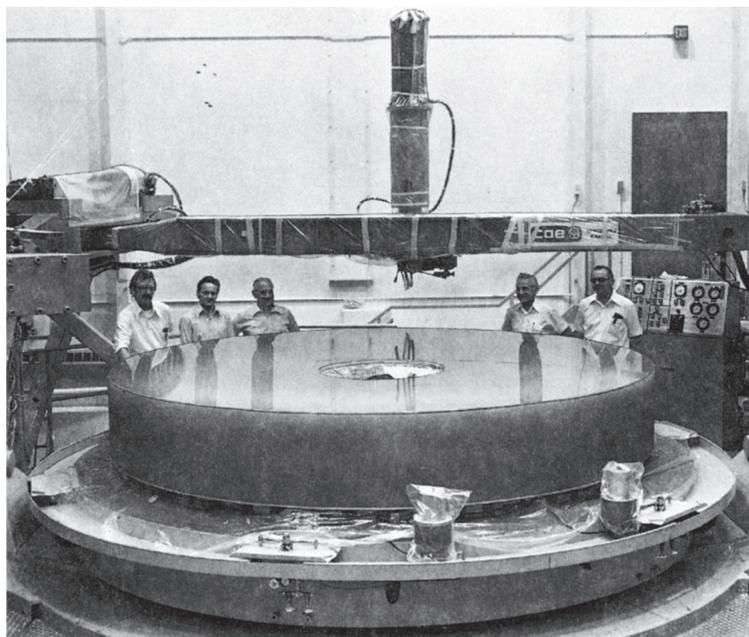
**Bild 21.6** 3,6-m-ESO-Teleskop - Vorbereitung zum Austausch der Primärfokuseinrichtungen. Foto: ESO



**Bild 21.7** Beobachterkabine im Primärfokus des 3,6-m-ESO-Teleskops. Foto: ESO

Zur optischen Bearbeitung des Spiegels war bei Carl Zeiss in Oberkochen in Zusammenarbeit mit der Firma Froriep in Mönchengladbach-Rheydt eine 4-m-Schleif- und Poliermaschine erstellt worden.

Geprüft wurde bei liegendem Spiegel in einem im Gebäude stehenden etwa 25 m hohen Prüfturm. Zur Prüfung wurde ein Twyman-Interferometer mit He-Ne-Laser, in Verbindung mit einem Kompensations-



**Bild 21.8** 3,67-m-Spiegel des französisch-kanadischen-Teleskops Hawaii

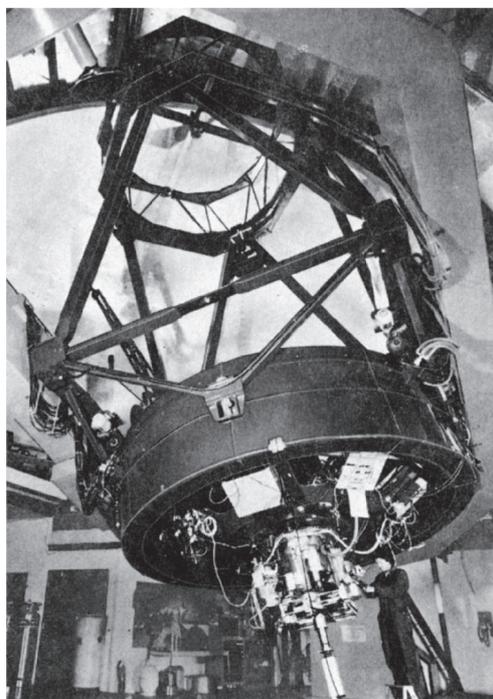
system, eingesetzt. Die Gegenkontrolle erfolgte mittels einer hologramm-interferometrischen Methode, bei der die Wellenfront des Vergleichsstrahlengangs durch ein synthetisches Hologramm der vom asphärischen Spiegel reflektierten Wellenfront angepaßt wird. Zur Ausschaltung der durch seismische Erschütterungen und durch Luftschlieren im Prüfstrahlengang verursachten Störungen wurden jeweils eine größere Anzahl von Interferogrammen ausgewertet. Die Bearbeitungszeit betrug etwa 4 Jahre. Das angegebene Ergebnis der Endprüfung des asphärischen Hauptspiegels (mittlere Abweichung  $0,013 \mu\text{m}$ , maximale Abweichung  $0,065 \mu\text{m}$ , Astigmatismanteil  $\pm 0,016 \mu\text{m}$ ) läßt eine hohe Güte erkennen.

Der Hauptspiegel ist in seiner Teleskopfassung auf 27 Stützstellern gelagert, die von doppelten hydraulischen Kammern getragen werden. Je neun in einem  $120^\circ$  Sektor liegende Druckkammern sind über Leitungen zusammen-

gefaßt. Dadurch werden eine gleichmäßige Lastverteilung und die Rückführung auf eine passive Dreipunktlagerung erreicht. Die radiale Lagerung bzw. Entlastung erfolgt durch Hebelsysteme.

Die Montierung ist eine Hufeisen-Rahmen-Montierung nach dem Vorbild des 5-m-Palomar-Teleskops. Die Vorteile dieser Lösung, beispielsweise gegenüber dem 3,6-m-ESO-Teleskop, liegen darin, daß die Hauptspiegelfassung in Zenitstellung vom Kuppelfußboden aus frei zugänglich ist und die Deklinationslager günstig angeordnet sind. Sowohl für die Stundenachse als auch für die Deklinationsachse sind hydrostatische Lager eingesetzt. Die Masse der bewegten Teile beträgt etwa 230 t; davon entfallen etwa 90 t auf den Tubus.

Der Stundenantrieb erfolgt nicht über ein Schneckenrad, sondern über einen Stirnzahnkranz von etwa 9,5 m Durchmesser, der am Rand des Hufeisens angesetzt ist. Acht kleine Torque-Motoren treiben mit ihren Ritzeln in nur einer Getriebestufe 200:1 diesen Zahnkranz direkt an. Sie sind in zwei Gruppen zu je vier Motoren in der Nähe der beiden hydrostatischen Lager des Hufeisens angeordnet. Sie werden so angesteuert, daß alle gleichzeitig unter Last stehen, jedoch paarweise an entgegengesetzten Flanken im Eingriff sind. So kann kein Spiel auftreten; die Kraft verteilt sich auf mehrere Zähne, weshalb die Teilung feiner sein konnte, und Verzahnungsfehler werden durch Mittelung reduziert.



**Bild 21.9** 3,8-m-United-Kingdom-Infrared-Teleskop (UKIRT) Mauna Kea, Hawaii mit Leichtgewichtsspiegel und leichter englischer Rahmenmontierung

Die Nachführung wird durch inkrementale Geber kontrolliert, die mittels Reibrad mit der Hufeisenlagerfläche gekoppelt sind. Die Auflösung beträgt  $0'',05$ . Da es in größeren Bewegungsbereichen zu Schlupf oder anderen fortschreitenden Fehlern kommen kann, wurden absolute Geber mit einer Auflösung von 22 bit ( $360^\circ * 60' / 2^{22}$ ) - etwa  $0'',308$  - mittels Rechnersteuerung parallelgeschaltet.

Jeder einzelne Motor hat einen individuellen Torque-Steuerkreis, der über den Ankerstrom wirkt. Wegen der niedrigen Induktivität der Torque-Motoren arbeiten diese Steuersysteme außerordentlich schnell und garantieren eine sehr gleichmäßige Übertragung des Antriebsmoments. Jeder Motor ist mit einem Tachogenerator verbunden. Die Signale von je vier Motoren werden kombiniert und liefern ein Steuersignal für eine analoge Geschwindigkeitskontrolle. Aus einer Kombination zwischen analogem und digitalem Signal wird ein digitaler Wert abgeleitet, der in eine Frequenz verwandelt und mit den Geberimpulsen von jeweils  $0'',05$  verglichen wird. Dabei wird der absolute Geber mit einbezogen.

Die Steuerung besorgt ein zentraler Prozeßrechner, der auch die Kuppelsteuerung und die Systemwechselsteuerung übernimmt.

Neben den Bequemlichkeiten für den Beobachter und der Sicherheit beim Betrieb wirkt die Rechnersteuerung vor allem bei der Einstellung und Nachführung des Teleskops. Die Verknüpfung zwischen den idealen Koordinaten und den an den Achsen gemessenen Winkeln besorgt ein Pointierungsmodell mit bisher 15 Koeffizienten, das aus Beobachtungen an Fundamentalsternen gewonnen wurde. Die Einstellung eines Objekts nach Koordinaten erfolgt mit einer mittleren Abweichung von  $2'',5$ . Diese hohe Genauigkeit nützt vor allem bei der Nachführung, bei der es ohne Nachführkontrolle am Himmel möglich ist, bei mäßigen Zenitdistanzen länger belichtete Aufnahmen in einwandfreier Qualität zu erhalten.

Interessant ist der Wechsel der optischen Systeme. Er erfolgt vollautomatisch in der Zenitstellung des Teleskops, weil nur in dieser Lage das unvollständige Teleskop keine Unwucht zeigt. Die vier Tubusfrontringe mit der Primärfokuseinrichtung bzw. mit den Gegenspiegeln für das Ritchey-Chrétien-System, das IR-System und das Coudé-System werden mit einem in der Kuppel befindlichen Hebezeug aus ihrer Magazinposition am Rand des Kuppelraums zu ihrer Arbeitsposition am Tubus geführt und mit den Tubusstreben verbunden. Die Kuppeldrehung wird für diese automatisch gesteuerte Montage mit genutzt; sie muß deshalb auch eine höhere Genauigkeit aufweisen. Die Kuppel selbst hat einen Laufkranzdurchmesser von 31,5 m und eine Masse von etwa 500 t.

Im Sommer 1985 konnte der Beobachtungsbetrieb aufgenommen werden. Prof. *Elsässer* hat als Schwerpunktaufgaben die Erforschung der Probleme der Sternentstehung im interstellaren Raum und die Untersuchung von aktiven Galaxien genannt. Erste Ergebnisse des 3,5-m-Teleskops auf dem Calar Alto liegen vor. Als Beispiel nennen wir die Aufnahme von Spektren des engen Kernpaares (Abstand  $1'',8$ ) der zwei wahrscheinlich in Kollision befindlichen Galaxien NGC 6240. Die Spektren geben eine Aussage über die Relativbewegung der beiden Kerne (Differenz der Radialgeschwindigkeiten 150 km/s) - Sie ergänzen in ausgezeichneter Weise die Ergebnisse, die vorher ebenfalls auf dem Calar Alto mit einer CCD-Kamera am 2,2-m-Teleskop von diesem bemerkenswerten Objekt gewonnen wurden.

Wie wertvoll die Verteilung der leistungsstarken Teleskope der 3,5 bis 4-m-Klasse auf die Nord- und Südhalbkugel der Erde ist, zeigte sich bei dem Jahrhundertereignis der Supernova SN 1987A in der großen Magellanschen Wolke am Südhimmel. Mit den großen Teleskopen auf der Südhalbkugel versucht man möglichst viel Information über den Zustand und die schnelle Veränderung dieses Ereignisses festzuhalten. Mit dem 4-m-Teleskop auf dem Cerro Tololo konnte z. B. unter Benutzung der Methode der Speckle-Interferometrie auf Aufnahmen vom 25. März und vom 2. April ein merkwürdiger Begleiter des Objekts nachgewiesen werden. Auch das 3,6-m-ESO-Teleskop und das 3,9-m-Anglo-Australische Teleskop sind an der Untersuchung der Supernova SN 1987A beteiligt.

Das konservative Festhalten an der Konzeption des 2,5-m-Mount Wilson- und des 5-m-Mount Palomar-Teleskops bei den Teleskopen der 3,5 bis 4-m-Klasse wurde kritisiert; denn diese Konzeptionen wurden vor mehr als einem halben Jahrhundert unter anderen Voraussetzungen und mit anderen Zielen erarbeitet. Aber kann man es den Astronomen und den Fernrohrbauern verübeln, wenn sie bei so teuren Geräten sicher gehen wollten? Die sieben Teleskope der 3,5 bis 4-m-Klasse sind Realität; sie liefern aktuelle Ergebnisse. Mit moderner Ausrüstung, mit neuen Detektoren, mit CCD-Kameras sowie neuer Auswertetechnik bei hohem Automatisierungsgrad werden ihre Leistung und Einsatzmöglichkeiten ständig verbessert.

Wenn wir von dem UKIRT, dem IR-Teleskop auf Hawaii, absehen, so können wir die sechs in diesem Abschnitt angeführten Teleskope der 3,5 bis 4-m-Klasse als echte Nachfahren des 5-m-Palomar-Teleskops betrachten. Bis 1990 werden zwei weitere Teleskope dieser Größe ihren Betrieb aufnehmen, die beide gegenüber den Nachfahren des 5-m-Palomar-Teleskops wesentliche neue Züge aufweisen. Das auffallendste Unterscheidungsmerkmal der beiden neuen Teleskope ist die alt-azimutale Montierung. In dieser Beziehung kann man sie als Nachfolger des 6-m-Spiegelteleskops im Kaukasus betrachten, über das im folgenden Abschnitt ausführlich berichtet wird.

Das eine der neuen Teleskope wird im European Southern Observatory La Silla in Chile aufgebaut und als 3,5-m-New-Technology-Telescope (NTT) des ESO bezeichnet. Außer der alt-azimutalen Montierung besitzt es als Neuerung eine „aktive Optik“, mit der es in der Lage ist, während der Beobachtungstätigkeit automatisch den optimalen Zustand seiner Optik herzustellen. Das 3,5-m-NTT ist als Pilotobjekt eines sehr großen Teleskops des ESO zu betrachten und wird deshalb im Abschnitt 25 behandelt.

Mit dem Namen des zweiten neuen Teleskops wird ein großer Astronom und Teleskopbauer geehrt; das 4,2-m-William-Herschel-Teleskop wird auf den Kanarischen Inseln im Observatorio del Roque de los Muchachos in 2400 m Höhe auf La Palma aufgestellt. Die Errichtung dieses großen Northern-Hemisphere-Teleskops erfolgt auf Beschluß des Science and Engineering Research Council von Großbritannien. Die Herstellung übernahm die Fa. Grubb Parsons. Nach dem 2,5-m-Isaac-Newton-Teleskop (heute ebenfalls auf La Palma) und der Optik für das 3,9-m-AAT bildet es den Höhepunkt und zugleich auch tragischerweise das Ende einer 60jährigen Firmengeschichte (Auflösung 1985) und der berühmten Tradition im Teleskopbau, die 150 Jahre vorher *Thomas Grubb* begann.

Die optische Konzeption des 4,2-m-William-Herschel-Teleskops ist klassisch; ein Parabolspiegel ( $f^*/2.5$ ) wird im Primärfokus mit einem dreilinsigen Korrektor nach *Wynne-Bingham* (Feld 30') kombiniert oder mittels entsprechender Gegenpiegel im Cassegrain- bzw. Nasmyth-Fokus ( $f^*/11$  bzw.  $f^*/35$ ) genutzt. Der 4,2-m-Spiegel aus der Glaskeramik Cer-Vit (Masse 16 t) ist auf 60 pneumatischen Zylindern bei gleicher Lastverteilung gelagert. Die radiale Spiegellagerung erfolgt über 24 Hebelsysteme. Der 1-m-Gegenpiegel ist von der Rückseite durch eine angeklebte axiale Sechspunktlagerung über Hebel entlastet.

Neu an dem 4,2-m-William-Herschel-Teleskop ist gegenüber den vorher beschriebenen Teleskopen der 3,5 bis 4-m-Klasse die alt-azimutale Montierung. Hier sind die Erbauer dem Vorbild des 6-m-Spiegelteleskops im Kaukasus gefolgt. Eine große Gabel mit vertikal stehender Achse ist auf einer Ringschiene von 5 m Durchmesser mittels sechs hydrostatischer Lager drehbar und wird radial durch sechs gleichfalls hydrostatische Lager zentriert. Auch die horizontale Achse für die Höheneinstellung des Teleskops ist hydrostatisch gelagert. Das Teleskop hat identische Stirnradantriebe von 3,6 m Durchmesser für beide Achsen mit je zwei Torque-Motoren. Die maximale Geschwindigkeit beträgt  $1^\circ/\text{s}$ , die maximale Beschleunigung  $0,3^\circ/\text{s}^2$ . Das Servokontrollsystem hat eine maximale Auflösung von  $0'',05$ . Absolute Geber (mit  $0'',5$  Auflösung) und inkrementale Geber (mit  $0'',03$  Auflösung) sind doppelt - sowohl über ein Stirnrad als auch über ein Reibrad - gekoppelt. Das Steuersystem besitzt eine CAMAC-Kopplung, mit Anschluß an das Starlink-System, mit dem eine Fernbedienung von Großbritannien aus möglich ist.

Die Bedeutung alt-azimutaler Montierungen für die Realisierung großer Teleskope steht heute außer Frage. Den Durchbruch zu dieser Erkenntnis verdanken wir den Erbauern des 6-m-Spiegelteleskops im Kaukasus.

### Literatur zum Abschnitt 21

AURA The First Twenty-Five Years 1957-1982. Tuscon: The Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., 1983

*Bahner, K.*: Tendenzen beim Bau optischer Teleskope. Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft Nr. 25 (1968), S. 93 bis 104

*Bahner, K.*: Das 3,5-m-Teleskop auf dem Calar Alto. Sterne und Weltraum 25. Jg. (1986) Nr. 6, S. 310-315

*Ball, W. F.; Haag, A. A.*: Kitt Peak's New Photoelectric Guider. Sky and Telescope Vol. 35 (1968) Jan., pp. 22-24

- Blanco, V. M.:* The Inter-American Observatory in Chile. *Sky and Telescope* Vol. 35 (1968) Feb., pp. 72-76
- Bowen, E. G.; Gascoigne, S. C. B.; Wehner, H.:* The Anglo-Australian 150-inch Telescope. *Proc. ASA* 1 (3) Feb. 1968, pp. 74-75
- Crawford, D. L.:* The Kitt Peak 150-inch Telescope. *Sky and Telescope* (1965) May, pp. 268-273
- 3,6-m-Teleskop der Europäischen Süd-Sternwarte in Chile. *Sterne und Weltraum* 14 (1975) Nr. 1, S. 20
- Elsässer, H.:* Arbeitsmittel der optischen Astronomie. *Zeiss Information* (Oberkochen, Bundesrepublik Deutschland) 24, 4 (1978/79). *Sterne und Weltraum* (1979) H. 11, S. 368-376
- Elsässer, H.:* Astronomie auf neuen Wegen - Forschungsergebnisse des Max-Planck-Instituts für Astronomie. *Die Sterne* 63 Bd. (1987) H. 3, S. 131-144
- European Southern Observatory. *Sky and Telescope* Vol. 28 (1964) Nov., p. 259 u. 271
- Gascoigne, S. C. B.:* The Anglo-Australian telescope. *Endeavour*, Vol. XXXIV, No. 123 (1975) pp. 131-135
- Jefferies, J. T.; Sinton, W. M.:* Progress at Mauna Kea Observatory. *Sky and Telescope* Vol. 36 (1968) Sep., pp. 140-145
- Kitt Peak, Mirror Blank. *Sky and Telescope* Vol. 34 (1967) Dez., p. 380
- Kühne, C.:* The Zeiss 3,5 m Astronomical Telescope - Another Technological Breakthrough. *Zeiss Information Oberkochen/West Germany* Vol.27 (1983) pp. 4-13
- Laustsen, S.; Madsen, C.; West, R.:* Entdeckungen am Südhimmel. Übers. v. *H. M. Hahn*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag 1987
- Lorenzen, S.:* The Control System of the ESO 3,6-metre Telescope. *The ESO-Messenger* No. 9 (1977) pp. 18-19
- Meinel, A. B.:* The National Observatory at Kitt Peak. *Sky and Telescope* Vol. 17 (1958) pp. 492-499
- Reiche, J.; Teske, H.-J.:* Große optische Teleskope. *Die Sterne* 56. Bd. (1980) H. 4, S. 203-219
- Schielicke, R.:* Stand und Entwicklungstendenzen beim Bau großer optischer Teleskope. *Die Sterne* 58. Bd. (1982) H. 2, S. 93-103
- Schielicke, R.:* Steuerung großer optischer Teleskope. *Die Sterne* Bd. 59 (1983) H. 1, S. 13-19 374

## 22. Das 6-m-Spiegelteleskop im Kaukasus

### 22.1. Der Teleskopbau in der UdSSR nach 1945

Durch die Kriegsereignisse war der Astronomie in der UdSSR schwerer Schaden zugefügt worden. Bei der Verteidigung von Leningrad (heute Sankt Petersburg) lag die Sternwarte Pulkowo vom Juli 1941 an über zwei Jahre im Kampfgebiet und wurde vollständig zerstört. Auch die Außenstelle des Observatoriums Pulkowo in Simeis auf der Krim blieb vom Krieg nicht verschont. Das 1-m-Spiegelteleskop - von *Grubb* 1925 geliefert - wurde demontiert und abtransportiert. Ein ähnliches Schicksal traf weitere Beobachtungseinrichtungen. Bereits im März 1945 wurde in Pulkowo mit dem Wiederaufbau des Astronomischen Hauptobservatoriums der Akademie der Wissenschaften begonnen. Im Mai 1954 konnte diese traditionsreiche Sternwarte feierlich, unter internationaler Beteiligung, wieder ihrer Bestimmung übergeben werden. Das Hauptgebäude hatte man historisch getreu wiedererrichtet (Bild 22.1).

Mit Reparationsleistungen aus der damaligen sowjetischen Besatzungszone wurden erste instrumentelle Lücken geschlossen. Das Babelsberger 1,25-m-Spiegelteleskop kam auf die Krim; ein in Jena für Rom in Bau befindlicher 65-cm-Refraktor wurde 1946 nach Pulkowo geliefert. Jenaer Spezialisten halfen beim Wiederaufbau einer Astrogeräteentwicklung und -fertigung in Leningrad.

Obwohl die Beobachtungsbedingungen in Pulkowo kaum den inzwischen gesteigerten Ansprüchen genügten, gingen von diesem Observatorium nach 1945 starke Impulse für die Astronomie und vor allem für den Teleskopbau in der UdSSR aus.

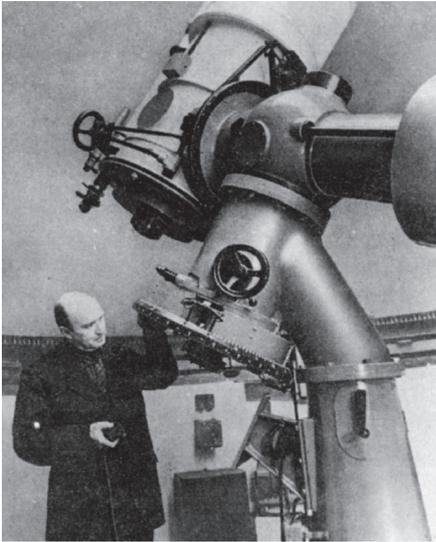
Gleichzeitig mit dem Wiederaufbau von Pulkowo wurde im Staatlichen Optischen Institut (GOI) in Leningrad mit der Neuentwicklung von Astrogeräten begonnen, *D. D. Maksutov* (Bild 22.2) hatte hier schon um 1930 ein Laboratorium für astronomische Optik aufgebaut. Er war nicht nur ein wichtiger Erfahrungsträger, sondern genöß auch großes Ansehen, nicht zuletzt durch seine Entwicklung der Meniskussysteme. Ebenfalls in Leningrad wurden unmittelbar nach Kriegsende die Voraussetzungen für den Bau größerer Teleskope im Staatlichen Optisch-Mechanischen Werk (GOMS), heute LOMO, geschaffen.

Zu den ersten nach 1945 in der UdSSR gebauten Teleskopen gehören drei Meniskusteleskope mit 50 cm Öffnung, die in den Observatorien in Pulkowo, auf der Krim sowie in Alma-Ata eingesetzt wurden. 1956 wurde für das Observatorium in Abastumani ein Meniskusteleskop mit 700 mm Öffnung fertiggestellt, und als besondere Leistung ist ein 1965 fertiggestelltes Meniskusteleskop von 700 mm Öffnung



**Bild 22.1** Astronomisches Observatorium Pulkowo Hauptgebäude nach dem Wiederaufbau 1954

mit einem Öffnungsverhältnis von 1:2,95 zu nennen. Durch die Verwendung von zwei Menisken weist es einen ausgezeichneten Korrektionszustand auf.

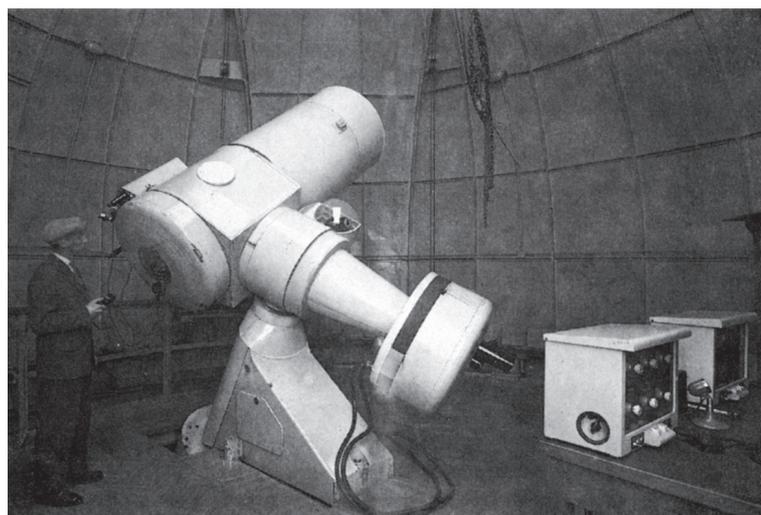


**Bild 22.2** Dimitri D. Maksutov am 50-cm-Meniskusteleoskop

Das Interesse der Astronomen an Instrumenten für die Abbildung größerer Himmelsfelder war zu dieser Zeit sehr groß, wie wir z. B. auch bei der Entwicklung des Tautenburger Teleskops gesehen haben. Daß unter *Maksutovs* Einfluß Meniskustelekope bevorzugt wurden, ist verständlich, aber auch Schmidt-Teleskope wurden gebaut. 1960 konnte der bekannte armenische Astronom *V. A. Ambarzumjan* (1908 - 1996) in dem von ihm geleiteten Observatorium in Bjurakan in Armenien einen Schmidt-Spiegel von 1 m Öffnung und 1,25 m Spiegeldurchmesser mit einem Öffnungsverhältnis von 1:2,1 in Betrieb nehmen. Zur Ausrüstung gehören drei Objektivprismen von je 1 m Durchmesser mit unterschiedlicher Dispersion (28,5 nm/mm; 90 nm/mm; 170 nm/mm im blauen Spektralbereich). Die Entdeckung von Galaxien mit anomal intensiver UV-Strahlung durch *B. E. Markarian* anhand von Objektivprismenaufnahmen mit diesem Schmidt-Spiegel war ein wichtiger Beitrag zur Erforschung aktiver Galaxien. Die *Markarian-Galaxien* stützten *Ambarzumjans* Thesen der Entwicklung von Galaxien und lösten viele Folgeuntersuchungen aus.

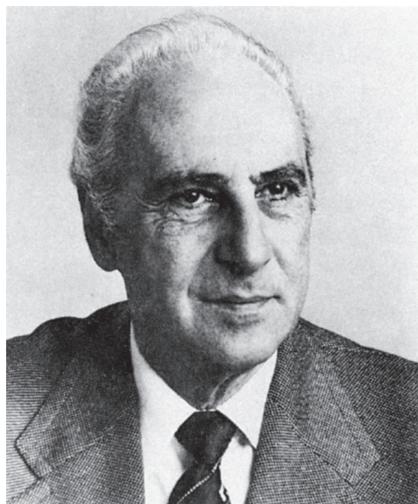
Parallel zu den genannten Meniskus- und Schmidt-Teleskopen wurden in der UdSSR nach 1945 auch normale Spiegelteleskope gebaut. Zahlreiche Observatorien wurden ab 1954 mit Spiegelteleskopen von 0,7 m Öffnung ausgerüstet, die in der Regel als Primär-, Cassegrain- oder Coudé-Teleskope ausgestattet waren. Eines dieser 0,7-m-Teleskope verdient unser Interesse (Bild 22.3). Es wurde im Observatorium Pulkowo gebaut und diente der Untersuchung spezieller Fragen des Teleskopbaus; es hat einen Metallspiegel, und es ist mit einer digitalen Steuerung ausgerüstet. *Maksutov* und Mitarbeiter haben sich seit den dreißiger Jahren mit Metallspiegeln, ihren Vorteilen - insbesondere der schnellen thermischen Anpassung -, aber auch mit den Problemen der Herstellung befaßt. *Maksutov* war zu der Überzeugung gelangt, „daß man ein hochqualifiziertes großes Spiegelteleskop unmöglich mit einer Glasoptik versehen kann und daß die Zukunft nur den Metallspiegeln gehört“. Die vergeblichen Versuche, in den dreißiger Jahren für das Palomar-Teleskop in den USA einen Quarzspiegel herzustellen, hatten ihn damals in dieser Ansicht bestärkt, aber einen Durchbruch konnte er nicht erzielen. Auch in bezug auf die Steuerungstechnik diente das Pulkower 0,7-m-Spiegelteleskop als Versuchsobjekt zum Studium digitaler Steuerungstechniken für größere Teleskope; denn Rechnersteuerungen waren damals Neuland.

Durch die Zusammenarbeit der drei Institutionen im Leningrader Raum und durch die Einbeziehung einer Anzahl guter Optik-, Astronomie- und Gerätebau fachleute war es möglich, in kurzer Zeit den Rückstand aufzuholen und große Projekte in Angriff zu nehmen. Parallel zu einem 1,25-m-Spiegelteleskop für das Staatliche Astronomische Sternberg-Institut und zu dem schon genannten Bjurakaner 1-m-Schmidt-Spiegel wurde in den fünfziger Jahren ein 2,6-m-Spiegelteleskop für das Observatorium auf der Krim gebaut. Es wurde 1961, kurz nach dem Tautenburger 2-m-Teleskop, in Betrieb genommen und war



**Bild 22.3** Spiegelteleskop mit 0,7-m-Metallspiegel und digitaler Steuerung

zu dieser Zeit das größte Teleskop in Europa. Rein äußerlich ähnelt es hinsichtlich seiner Rohrmontierung vom Serrurier-Typ dem 3-m-Lick-Teleskop und hinsichtlich der Gabelmontierung dem 2,5-m-Isaac-Newton-Teleskop von Herstmonceux<sup>16</sup>. Es besitzt eine hydrostatische Stundenachsenlagerung.

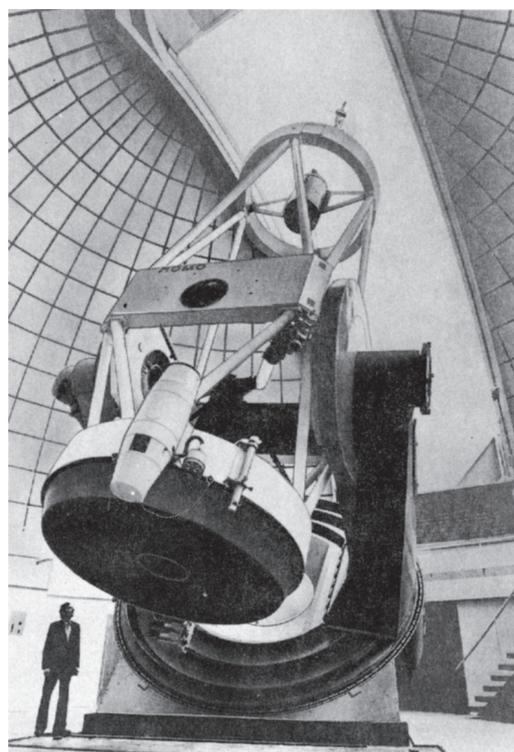


**Bild 22.4** Bagrat K. Ioannisiani

Die bewegten Teile haben eine Masse von etwa 65 t. Der parabolische Hauptspiegel hat ein Öffnungsverhältnis von 1:3,8. Das Teleskop kann im Primärfokus direkt oder in Verbindung mit drei unterschiedlichen Korrektionsystemen genutzt werden. Als Cassegrain-Teleskop besitzt es ein Öffnungsverhältnis von 1:16,3. Der Strahlengang wird dann entweder durch den durchbohrten Hauptspiegel oder nach *Nasmyth* über einen Planspiegel in die Deklinationsachse geführt. Als Coudé-Teleskop beträgt das Öffnungsverhältnis 1:40. Bei geringer Deklination wird der Strahlengang über einen Planspiegel direkt, bei großer Deklination über drei Planspiegel durch die Gabel und die durchbohrte Polachse in einen Spektrographenraum geführt. Der Coudé-Spektrograph, ebenfalls in der UdSSR gebaut und realisiert, besitzt ein Beugungsgitter von 300 mm x 300 mm Größe. Das Teleskop trägt zu Ehren von *G. A. Schain* (1892-1956) dessen Namen; er hatte als Astronom und ab 1945 als Direktor im Krim-Observatorium gewirkt.

Als Chefkonstrukteur hat *Bagrat K. Ioannisiani* (Bild 22.4) großen Anteil an der Konstruktion und Realisierung dieses Teleskops, von dem noch ein gleichartiges Schwesterinstrument für das Observatorium in Bjurakan gebaut und 1976 in Betrieb genommen wurde (Bild 22.5). Auch in der Persönlichkeit von *Ioannisiani* spiegelt sich die enge Verbundenheit der drei Leningrader Institutionen wider: er war leitender Konstrukteur für Astrogeräte im Staatlichen optischen Institut, Berater im Astronomischen Hauptobservatorium in Pulkowo sowie Sektionsleiter für den Bau von Astrogeräten in den LOMO-Werken. Seine Fähigkeiten und die enge kollektive Zusammenarbeit der Spezialisten unterschiedlicher Fachrichtungen waren eine ausgezeichnete Basis für die Inangriffnahme größter Projekte.

Als Chefkonstrukteur hat *Bagrat K. Ioannisiani* (Bild 22.4) großen Anteil an der Konstruktion und Realisierung dieses Teleskops, von dem noch ein gleichartiges Schwesterinstrument für das Observatorium in Bjurakan gebaut und 1976 in Betrieb genommen wurde (Bild 22.5). Auch in der Persönlichkeit von *Ioannisiani* spiegelt sich die enge Verbundenheit der drei Leningrader Institutionen wider: er war leitender Konstrukteur für Astrogeräte im Staatlichen optischen Institut, Berater im Astronomischen Hauptobservatorium in Pulkowo sowie Sektionsleiter für den Bau von Astrogeräten in den LOMO-Werken. Seine Fähigkeiten und die enge kollektive Zusammenarbeit der Spezialisten unterschiedlicher Fachrichtungen waren eine ausgezeichnete Basis für die Inangriffnahme größter Projekte.



**Bild 22.5** 2,6-m-Spiegelteleskop des Observatoriums Bjurakan (1976); Schwesterinstrument des 2,6-m-Teleskops von 1961 auf der Krim

## 22.2. Der Weg zum 6-m-Spiegelteleskop

Die Pläne für ein wesentlich größeres Teleskop hatte *D. D. Maksutov* initiiert. Bereits 1952 ließ er im Hauptobservatorium der Akademie in Pulkowo, wo er die Leitung einer Abteilung für astronomischen Gerätebau übernommen hatte, die ersten Berechnungen der Optik durchführen. Er nahm damit maßgeblichen Einfluß auf Zielstellung und Dimensionierung des Teleskops, für das ein Spiegeldurchmesser von 6 m geplant wurde.

Der Hauptspiegel wurde als Parabolspiegel mit einem Öffnungsverhältnis von 1:4 vorgesehen. Die Wahl einer Brennweite von 24 m war ein Kompromiß zwischen einer mit vertretbarem Aufwand realisierbaren Tubuslänge einerseits und einer technisch noch beherrschbaren Abweichung der Asphäre von einer Kugelfläche andererseits.

<sup>16</sup> ab 1982 auf den Kanarischen Inseln

Für Arbeiten im Primärfokus wurde ein zweilinsiger afokaler Korrektor mit Ebnungslinse zur Abbildung eines Feldes von 10' Durchmesser berechnet. In Verbindung mit einem konvexen Gegenspiegel wird ein Cassegrain-System mit einer Brennweite von 184,4 m gebildet (Öffnungsverhältnis 1:30,7).

Die zahlreichen Probleme, die mit der Entwicklung und Realisierung eines solchen Teleskopgiganten verbunden sind, wurden durch eine große Arbeitsgemeinschaft von Wissenschaftlern und Technikern untersucht und gelöst. Wir betrachten im folgenden die wichtigsten dieser Problemkreise: Hauptspiegel und optisches System, Montierung und Steuerungssystem, Standort und Gebäude sowie die Ausrüstung des Teleskops mit Hilfseinrichtungen.

Zur Koordinierung der Arbeiten wurde Anfang der fünfziger Jahre ein wissenschaftlicher Rat gebildet, dessen Leitung zuerst *W. P. Linnik* (geb. 1889) als angesehener Optikfachmann, dann *A. A. Michailov* (1888-1983) als Direktor des Astronomischen Hauptobservatoriums Pulkowo der Akademie übernahm. *Maksutov* plädierte, wie wir gesehen haben, mit Argumenten und der Kraft seiner Persönlichkeit für die Verwendung von Metallspiegeln. Untersuchungen zu Stahl- und Aluminiumspiegeln wurden erneut von *I. M. Lorezjan* durchgeführt und sogar Beryllium mit seinen hervorragenden Eigenschaften - heute aktuell z. B. für Spiegel für Weltraumteleskope - wurde diskutiert.

Parallel dazu wurden u. a. Quarzspiegel in verrippter Ausführung und zellenartig aufgebaute Glasspiegel untersucht. Aber damals blieb, unter den gegebenen Verhältnissen, nur die Wahl, für einen 6-m-Spiegel das pyrexähnliche Glas 316 des Glaswerks „Rubin“ in Litkarino (heute JSC Lytkarino Optical Glass Factory) bei Moskau zu verwenden. Der Guß eines Rohlings für einen 6-m-Spiegel war für die Mitarbeiter dieses Werkes eine Herausforderung bisher nicht dagewesener Dimension, Bisher war dort als größtes Objekt die 2,6-m-Spiegelscheibe für das Krimobservatorium hergestellt worden.

Aufgrund eingehender Untersuchungen und Rechnungen wurde für den Hauptspiegel (Bild 22.6) eine Meniskusform mit Radien von 48 m und einer Dicke von 650 mm festgelegt. Die Scheibe wurde als unverrippte Massivscheibe hergestellt. Sie erhielt eine zentrale Bohrung von 360 mm Durchmesser sowie von der Rückseite 60 Bohrungen von 350 mm Durchmesser und 430 mm Tiefe zur Aufnahme der Entlastungssysteme. Diese Bohrungen sind auf vier konzentrischen Kreisen angeordnet. Die Herstellung der 6-m-Scheibe als unverrippte Massivscheibe ersparte zwar die beim Gießen der 5-m-Palomar-Spiegelscheibe in den Corning-Glaswerken aufgetretenen Probleme mit den Kernen der Gußform, aber sie erforderte mehr als das 3fache Glasvolumen der Palomar-Spiegelscheibe sowie eine längere Kühlzeit.

Anfang 1963 wurde in Litkarino eine Werkhalle für die Herstellung des Spiegelrohlings errichtet, fünfzehn Jahre später - am 4. September 1968 - konnte der vorbearbeitete Spiegelrohling mit einer Masse von 42,7 t an die Vertreter der Akademie der Wissenschaften und der LOMO-Werke zum Schleifen und Polieren der optischen Fläche übergeben werden. Das ist eine beachtenswerte Leistung, wenn man berücksichtigt, daß der erste Guß ein Fehlschlag war, daß die Zeit für die Abkühlung der Scheibe nach einem Temperprogramm 2 Jahre und 6 Tage erforderte und daß in einer Zeit von knapp eineinhalb Jahren etwa 23 t Glas zerspannt wurden, um dem Rohling die vorgegebene Form einschließlich aller Bohrungen zu geben.

Ein Spezialofen war erforderlich, um die über 60 t Glas zu schmelzen, die durch platinverkleidete Kanäle in die Form geleitet wurden, in der sie abgekühlt wurden.

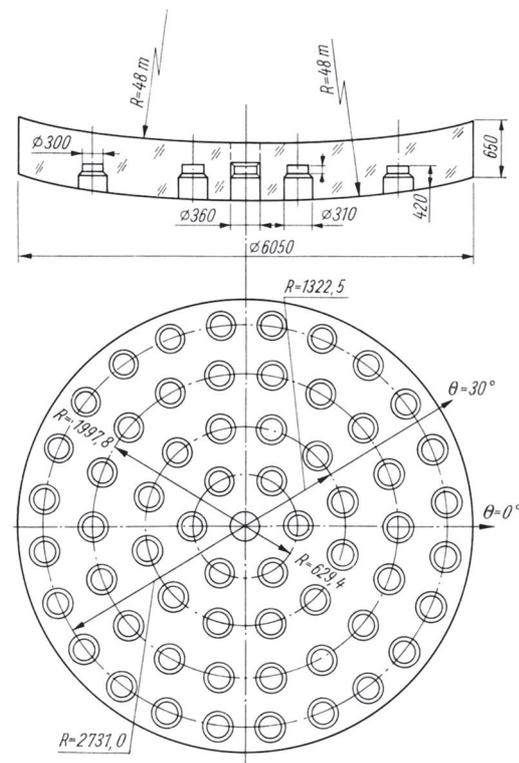
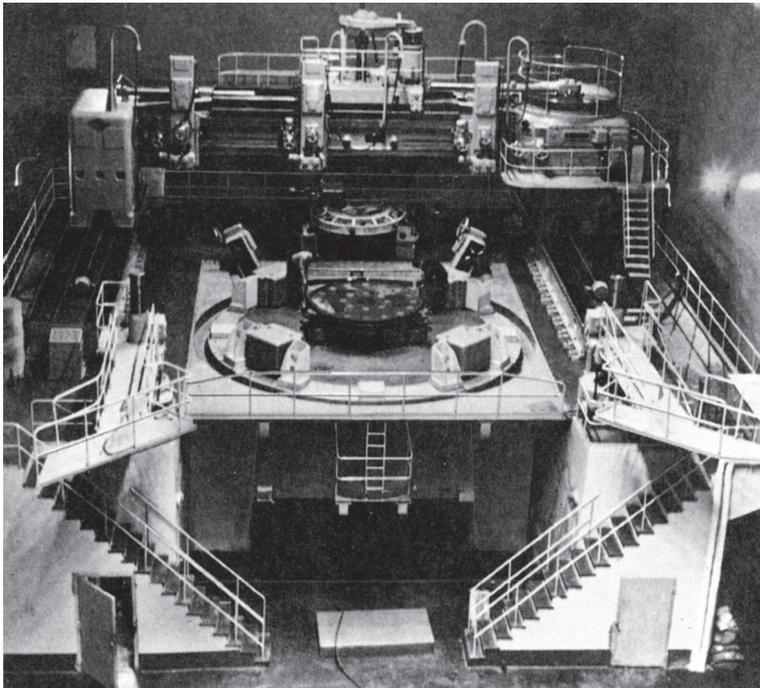


Bild 22.6 Geometrische Form der 6-m-Spiegelscheibe

In Litkarino war in einem Saal zur Bearbeitung des Rohlings eine große umgerüstete und mit zusätzlichen Einrichtungen versehene Karusselldrehmaschine vom Typ KU-158 aufgestellt worden. Auf ihr erfolgte mittels einer Kopiervorrichtung die Anarbeitung der sphärischen Flächen, die Zylinderbearbeitung des Randes sowie auch die Herstellung sämtlicher Bohrungen. Alle Zerspanungsarbeiten wurden mit Diamantwerkzeugen durchgeführt, bei denen Diamantkorn geeigneter Korngröße in eine metallische Bindung eingesintert ist. Insgesamt wurden etwa 12000 Karat (ca. 2,4 kg) Diamant verbraucht, mit denen mehr als 23 t Glas zerspannt wurden.

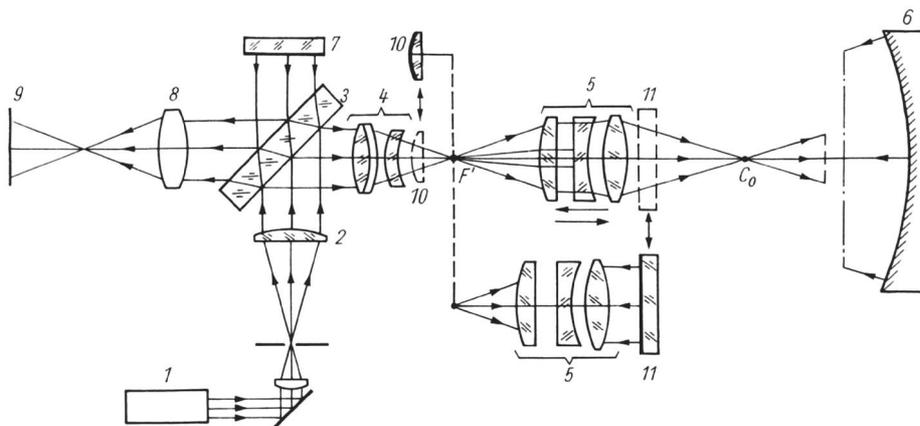


**Bild 22.7** Der 6-m-Spiegel auf der Schleif- und Poliermaschine

Nach Abschluß der Rohlingsbearbeitung wurde dieser im Oktober 1968 in einen anderen Saal übergeführt, in dem auf einer großen Optik-Schleif- und Poliermaschine (Bild 22.7) das Schleifen und Polieren der parabolischen Spiegelfläche erfolgte. Diese Arbeiten zogen sich - länger als geplant - bis 1974 hin, unterbrochen durch ständige Prüfungen und Messungen, an denen Mitarbeiter von LOMO und dem aufzubauenden Speziellen Astrophysikalischen Observatorium (SAO) sowie auch vom Staatlichen Optischen Institut in Leningrad beteiligt waren.

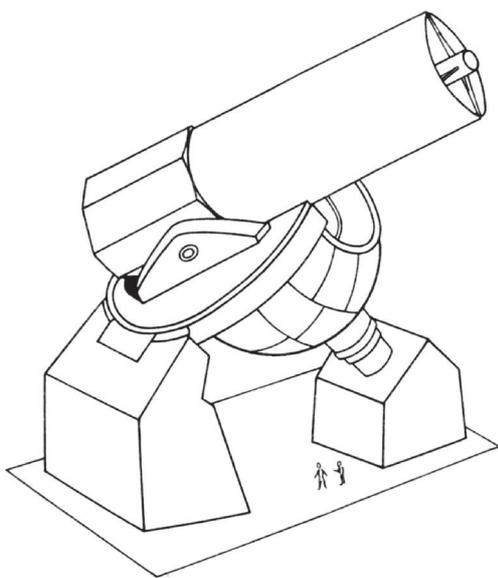
Die Prüfung des 6-m-Spiegels erfolgte nach der Hartmann-Methode sowie auch interferometrisch. *Maksutow*, *Pan Zjun-Hua* und *Sosnina* halten Kompensationsmethoden entwickelt, und *Sosnina* hatte auch einen Linsenkomparator nach *Offner* berechnet.

Ein für die interferometrische Prüfung des 6-m-Spiegels eingesetztes Laserinterferometer mit Kompensator hat *D. T. Purjaew* beschrieben (Bild 22.8). Die Ergebnisse der Endprüfung 1974 zeigten, daß 62 % der auftreffenden Strahlung in einem Zerstreuungskreis von  $0''{,}5$  und 91 % in einem von  $1''$  Durchmesser konzentriert werden. Die Güte der Strahlenvereinigung des ersten 6-m-Spiegels bleibt nur wenig hinter der des 5-m-Palomar-Spiegels zurück, für



**Bild 22.8** Schema eines Laser-Interferometers mit Kompensator zur Prüfung des 6-m-Spiegels (nach Purjaew): 1 Helium-Neon-Laser; 2 Kollimator; 3 Strahlenteiler; 4 Objektiv; 5 Universalkompensator; 6 zu prüfender Teleskopspiegel; 7 Vergleichsspiegel; 8 Aufnahmeobjektiv; 9 Fotoplatte; 10, 11 Kontrollspiegel

den die entsprechenden Werte 68 und 95 % sind. Der Spiegel wurde 1975 in das Teleskop eingebaut und für die erste Erprobungsphase des Teleskops eingesetzt. Seit der Inbetriebnahme des Palomar-Teleskops waren jedoch aufgrund der Fortschritte der Empfänger- und Beobachtungstechniken die Anforderungen an einen Teleskopspiegel gestiegen. Es wurde deshalb gleich anschließend ein zweiter Spiegel aus dem gleichen Material mit höherer Güte hergestellt und 1979/80 gegen den ersten ausgetauscht. Mit diesem Spiegel konnte das Teleskop erfolgreich arbeiten. Ein Nachteil ist in der relativ langen Anpassungszeit bei Temperaturänderungen zu sehen. Inzwischen ist es im Glaswerk in Litkarina gelungen, die Technologie zur Herstellung der Glaskeramik SITALL-SO 115 M so weiterzuentwickeln, daß größte Objekte hergestellt werden können. Es wurden 6-m-Rohlinge hergestellt, von denen einer für das Teleskop fertiggestellt wird. Da Temperaturänderungen sich auf die Form des Sitall-Spiegels praktisch nicht mehr auswirken, wird das Teleskop nach Einbau dieses Spiegels noch effektiver eingesetzt werden können.



**Bild 22.9** Entwurf einer parallaktischen Montierung mit Split-Ring für das 6-m-Spiegelteleskop Skizze nach dem Modell

Bei der Konzeption der Montierung für das 6-m-Spiegelteleskop war es naheliegend, zunächst Varianten zu betrachten, die an das 5-m-Palomar-Teleskop anschließen. Daß eine einfache vergrößerte Übernahme des konstruktiven Aufbaus des Palomar-Teleskops nicht möglich ist, wird jedoch sofort klar, wenn man bedenkt, daß der 6-m-Spiegel bereits ohne Aufnahmesystem eine Masse von 42,7 t aufweist, gegenüber den nur 15 t des Hauptspiegels des Palomar-Teleskops. Auch durch die größere Brennweite - 24 m gegenüber 15 m - ist bei der Tubuskonstruktion erheblich größeren elastischen Verbiegungen Rechnung zu tragen.

*Ioannisiani* untersuchte verschiedene Möglichkeiten parallaktischer Montierungen. Ein Beispiel zeigt die Skizze nach einem Modell aus dem Jahre 1959 (Bild 22.9). Es basiert, wie das Palomar-Teleskop, auf der Split-Ring-Montierung *Porters*. Der Rahmen des Palomar-Teleskops wurde jedoch durch eine große, äußerst steife Kugelkalotte ersetzt, und für die Deklinationsachse wurden zwei kurze steife Gabelstümpfe auf den Split-Ring aufgesetzt. Eine ähnliche Lösung finden wir später bei dem 3,6-m-ESO-Teleskop. Trotz der kompakten und steifen Ausbildung der Konstruktion kam *Ioannisiani* zu

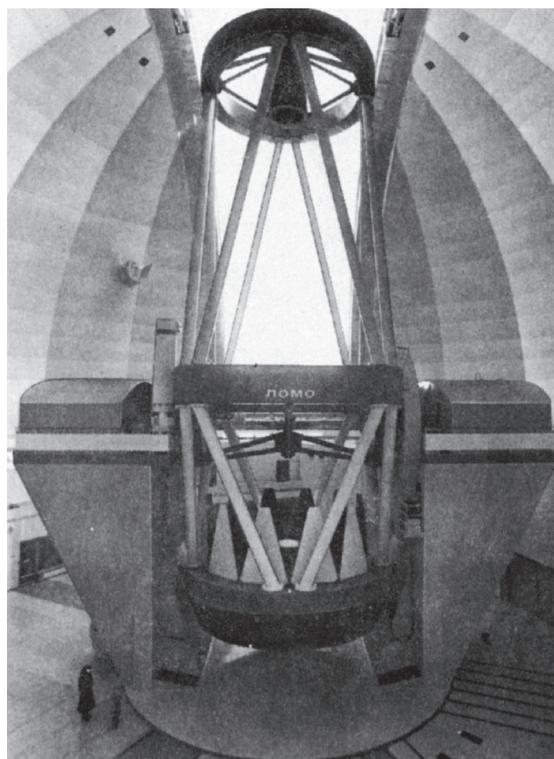
dem Ergebnis, daß die Verbiegungen zu groß werden. In Beratungen schlugen *W. P. Linnik* und *O. A. Melnikov* deshalb vor, dem 6-m-Teleskop eine alt-azimutale Montierung (AAM) zu geben, d. h. eine Montierung, bei der die Höheneinstellung (Altitude) durch eine horizontale Achse, die Ost-West-(Azimut-) Drehung um eine vertikale Achse erfolgt. Die horizontale bzw. vertikale Stellung der Achsen bringt gegenüber einer schräg stehenden Polachse und einer im Raum bewegten Deklinationsachse wesentliche konstruktive Vorteile. Das gilt nicht zuletzt für die Lagerung eines so großen, schweren Spiegels, der nun nur in einer Ebene bewegt wird.

Aber die Vorteile der AAM werden erkaufte durch die Notwendigkeit, zur Nachführung beide Achsen ungleichförmig anzutreiben. Außerdem muß die Drehung des Bildfelds, bedingt durch die Änderung des parallaktischen Winkels, ebenfalls durch eine gesteuerte Drehung der Kassette bzw. der Empfängereinrichtung kompensiert werden. Bei der Beobachtung von Objekten in Zenitnähe treten zudem gewisse Schwierigkeiten auf, da dann die Geschwindigkeit der Azimutdrehung sehr groß wird.

Der Bau eines 6-m-Teleskops mit alt-azimutaler Montierung konnte nur erfolgreich sein, wenn die Ansteuerung mit der gleichen Präzision erfolgt, wie bei großen parallaktisch montierten Teleskopen. Voraussetzung war die Entwicklung einer Steuerung, die in drei Koordinaten - Azimut  $A$ , Zenitdistanz  $Z$  und parallaktischer Winkel  $P$  - mit höchster Präzision das Teleskop positioniert und nachführt. Diese Aufgabe war damals Neuland. Die Entwicklung der digitalen Rechentechnik stand bei Aufnahme der Arbeiten erst in den Anfängen. Vor Beginn des Baus der Montierung mußte Klarheit über die Lösbarkeit aller Teilaufgaben der Entwicklung der Steuerung bestehen.

*Ioannisian* wurde der eifrigste Verfechter der altazimutalen Montierung. Seine Konstruktion des 6-m-Teleskops (Bolschoi Teleskope Azimutal - BTA) wirkt klar und einfach (Bild 22.10). Man ist beim Anblick der Bilder des Teleskops in seiner Kuppel geneigt, die Probleme zu unterschätzen; diese werden erst deutlich, wenn man Abmessungen, Massen und erreichte Genauigkeit im Zusammenhang betrachtet:

- Bei senkrecht gestellten Tubus beträgt der Abstand zwischen dem unteren Spurlager der Azimutachse und dem oberen Rand der Beobachterkabine im Primärfokus 42 m, das entspricht der Höhe eines 12- bis 14-geschossigen Gebäudes.
- Die größte Breite des Teleskops an den Beobachterplattformen der Nasmyth-Foki beträgt etwa 21,5 m.
- Die bewegten Teile mit einer Masse von über 700 t werden innerhalb von Winkelsekunden positioniert und nachgeführt.

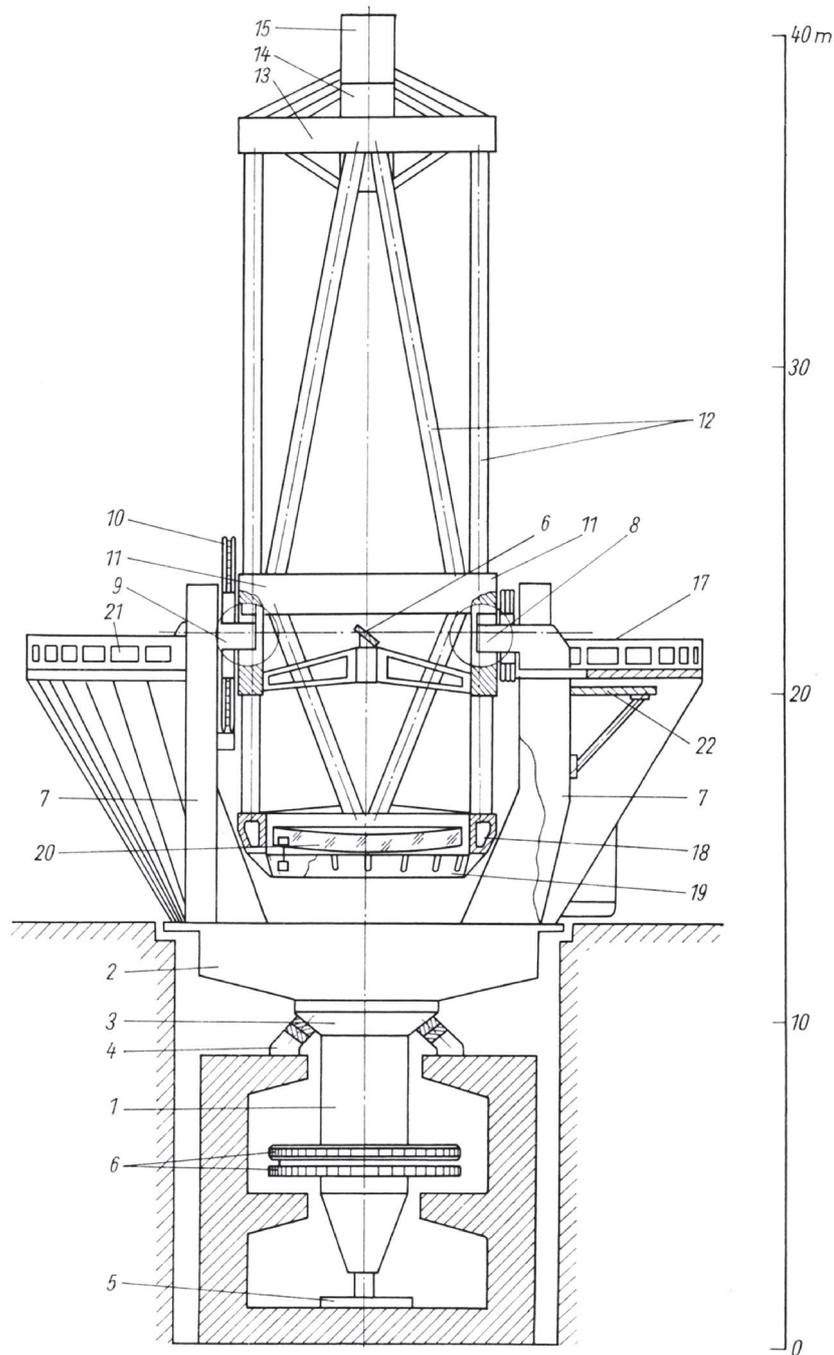


**Bild 22.10** Das 6-m-Spiegelteleskop in seiner Kuppel

Den prinzipiellen Aufbau zeigt das Schema im Bild 22.11. Die Azimutachse 1 trägt auf ihrem oberen Ende eine etwa 100 t schwere kreisförmige Plattform 2 von etwa 12 m Durchmesser. Im Observatorium liegt die Oberfläche dieser Plattform mit dem Kuppelfußboden in einer Ebene. Die Unterseite der Plattform trägt eine Kugelringzone 3 mit einer sorgfältig geschliffenen Fläche. Der Radius dieser Kugelzone von etwa 3,3 m wurde so gewählt, daß der Krümmungsmittelpunkt mit dem Schwerpunkt der gesamten bewegten Teile des Teleskops zusammenfällt. Diese Kugelringzone bildet die Lagerfläche für die Azimutdrehung. Sechs hydrostatische Lager 4 tragen auf einem Ölfilm von etwa 50 µm Dicke die gesamte Last der bewegten Teile des Teleskops. Das untere Lager 5 der Azimutachse ist ein praktisch unbelastetes Wälzlager. Vermittels einer Justiereinrichtung wird mit ihm die Senkrechtstellung der Azimutachse mit einer Genauigkeit von 1" durchgeführt.

Die Azimutachse trägt zwei große Antriebsräder 6, und zwar ein Stirnrad für den Grobantrieb und ein Schneckenrad für den Feintrieb. Auf der Oberfläche der Plattform sind zwei große schwere Ständer 7 aufgebaut, die die Teleskopgabel bilden, an deren oberen Enden sich die hydrostatische Lagerung 8 für die horizontale Achse zur Höheneinstellung des Teleskops befindet. Die Höheneinstellung erfolgt über ein großes Schneckengetriebe 10. Der Teleskoptubus entspricht der von *Mark Serrurier* für das Palomar-Teleskop vorgeschlagenen Form. Sein quadratischer Mittelrahmen 11 trägt an der Oberseite und an der Unterseite über je acht sehr starke, rohrförmige Streben 12 den oberen und den unteren Tubusabschlußring. An dem oberen Tubusabschlußring 13 sind die Einrichtungen für den Primärfokus 14, die Beobachterkabine 75 sowie die Halterung für den Cassegrain-Gegenspiegel befestigt. Der mittlere Teleskoprahmen trägt auf seiner Unterseite die Streben des Haltekreuzes für einen Planumlenkspiegel 16, der den Cassegrain-Strahlengang nach Wahl zu dem einen oder anderen der beiden Nasmyth-Foki 17 durch die durchbohrte Höhenachse hindurchführt. Die Höhenachse liegt etwas unterhalb des Mittelrahmens, so daß dieser nicht durch Durchbrüche geschwächt werden mußte. Der untere Tubusabschlußring 18 trägt die schwere Fassung 19 für den 6-m-Hauptspiegel 20. Die 60 Entlastungssysteme, die in die Bohrung des Hauptspiegels hineinragen, wirken ähnlich wie bei den Jenaer 2-m-Spiegelteleskopen. Ein wesentlicher Unterschied ist jedoch, daß dank der alt-azimutalen Montierung der Hauptspiegel nur in einer Richtung gekippt wird und die Entlastungssysteme auch nur in einer Richtung wirken müssen.

Die beiden großen Gabelholme tragen große balkonartige Arbeitsbühnen 21 sowie Konsolen 22 für die Aufstellung und Bedienung von Spektrographen und anderen Hilfs- bzw. Empfangseinrichtungen im Nasmyth-Fokus. Die Arbeitsbühnen und die quasi-stationäre und thermisch abgeschirmte Aufstellung von Spektrographen an den Gabelholmen macht einen Coudé-Raum entbehrlich. An dem einen Gabelholm ist im ersten Nasmyth-Fokus der große Hauptspektrograph fest installiert. Im zweiten Nasmyth-Fokus, am anderen Gabelholm, können kleinere Spektrographen und andere Geräte für spezielle Untersuchungen eingesetzt werden. Zu den beiden Arbeitsbühnen, die etwa 8 m über dem Kuppelfußboden liegen, führen Aufzüge.

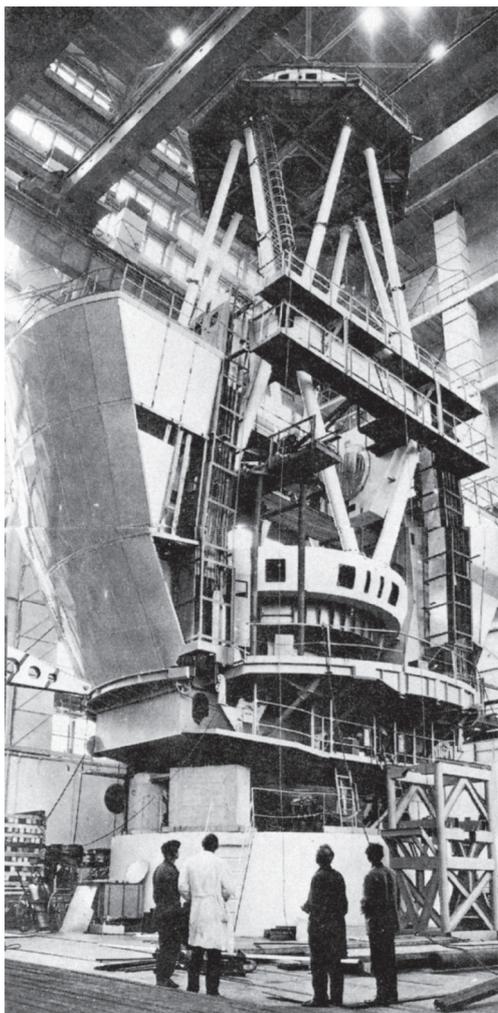


**Bild 22.11** Schema des azimutalen 6-m-Spiegelteleskops

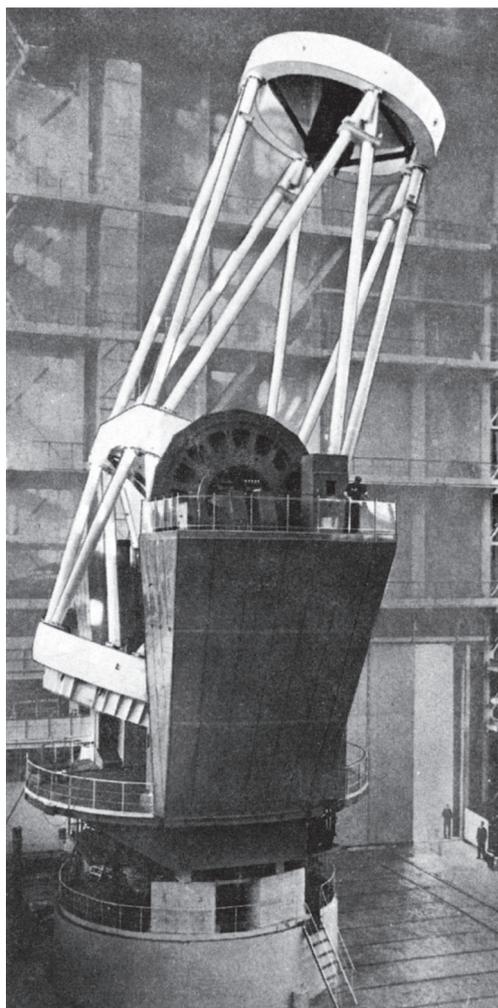
Der Bau, die Montage und die Werkserprobung des Teleskopgiganten erfolgten in den LOMO-Werken in Leningrad unter der Leitung von *Ioannisiani*. Bild 22.12 zeigt das Teleskop in der großen Montagehalle während der Werksmontage und Bild 22.13 zum Zeitpunkt des Abschlusses der Werkserprobung (1969).

Wie erwähnt, war die Realisierbarkeit einer in drei Achsen wirkenden Steuerung eine unerläßliche Voraussetzung für die Funktion eines alt-azimutal montierten Teleskops. Aus astronomischer Sicht haben sich in Pulkowo die Astronomen *N. N. Michelson* und *O.A. Melnikov* mit den Erfordernissen der Steuerung für das 6-m-Teleskop befaßt. *Melnikov* und *G. G. Lengauer* haben auch Untersuchungen zur Berücksichtigung der atmosphärischen Refraktion bei der Erstellung von Steuerprogrammen durchgeführt.

In Pulkowo wurden mit dem erwähnten 70-cm-Spiegelteleskop experimentell die technischen Mittel und Möglichkeiten einer digitalen Steuerung getestet, allerdings noch an einer parallaktischen Montierung. Um die Prinzipien einer altazimutalen Montierung näher zu untersuchen, wurde ein 600-mm-Teleskop aufgebaut, bei dessen Montierung jedoch die dynamischen Verhältnisse denen des großen Teleskops angenähert wurden. In die technische Entwicklung und Realisierung der Steuerung des 6-m-Teleskops wurde das Institut für Elektromechanik der Akademie der Wissenschaften der UdSSR einbezogen. Es war zunächst notwendig, ein Gesamtkonzept für die Steuerung aufzustellen. Dann mußten die technischen Mittel zur Realisierung der Steuerung geschaffen werden. Hierzu gehörte auch die Entwicklung eines geeigneten digitalen Rechenautomaten; denn zum Zeitpunkt der Aufnahme der Arbeiten war ein solcher noch nicht verfügbar. Entwickelt werden mußten auch Winkelmeßsysteme, um die Stellung der Teleskopachsen mit einer Auflösung besser als 1" zu signalisieren. Die zu schaffenden Antriebssysteme für



**Bild 22.12** Das 6-m-Spiegelteleskop während der Werksmontage



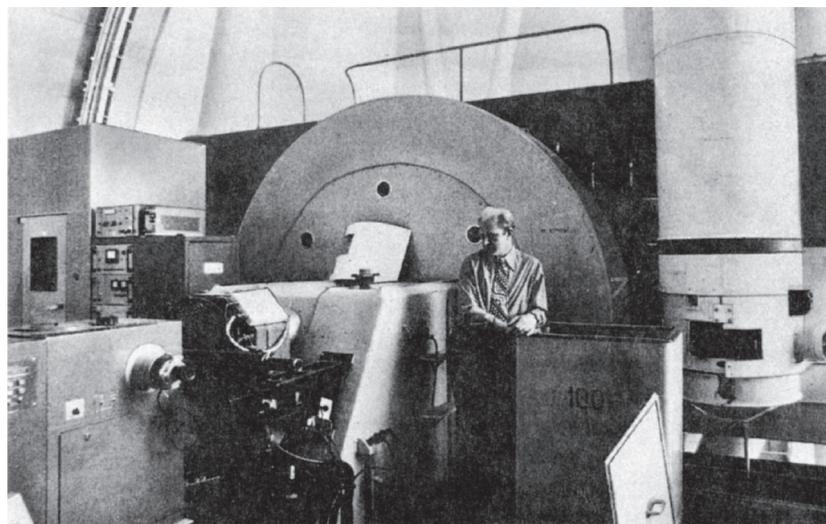
**Bild 22.13** Das fertig montierte 6-m-Spiegelteleskop in der Montagehalle

das Teleskop mußten für die Grob- und Feinbewegung beim Positionieren, für die veränderlichen Geschwindigkeiten bei der Nachführung der AAM und für Korrekturbewegungen über entsprechende Geschwindigkeitsbereiche verfügen und bei Beschleunigungen den Trägheitsmomenten der großen bewegten Massen des Teleskops Rechnung tragen. Zur automatischen Nachführung wurden für das Leitrohr und zur Benutzung an Offset-Einrichtungen im Primär- oder Sekundärfokus lichtelektrische Führungssysteme geschaffen.

Die Bedienung des Teleskops erfolgt von Steuerpulten aus, die sich im zentralen Rechnerraum, in der Beobachtungskabine im Primärfokus sowie an den beiden Nasmyth-Foki auf den Beobachterbühnen befinden (Bild 22.14). Das Leitrohr hat 50 cm Öffnung und ist mit einer Fernsehübertragungseinrichtung ausgerüstet. Die Steuerung erfolgt in unterschiedlichen Regimen:

- Positionierung des Teleskops nach Eingabe der Koordinaten eines zu beobachtenden Objekts. Vom Rechner werden Azimut-, Zenit- und parallatischer Winkel für die Positionierung des Teleskops in Abhängigkeit von der Sternzeit bestimmt. Dabei werden Präzision, Nutation, Aberration sowie, in Abhängigkeit von Temperatur und Luftdruck, auch die Refraktion berücksichtigt. Auch Instrumentenfehler, wie Tubusbiegung und dergleichen werden rechnerisch eliminiert. Bei der automatischen Ansteuerung erfolgt wegen des großen Massenträgheitsmoments des Teleskops eine stetige Geschwindigkeitsänderung beim Anfahren sowie bei Annäherung an die gewünschte Position. Für die Azimutdrehung darf die maximale Geschwindigkeit  $150''/s$  und die maximale Beschleunigung  $0,09''/s^2$  nicht überschreiten. Das bedeutet, daß eine Zone von  $5^\circ$  Durchmesser im Zenit der Steuerung nicht zugänglich ist; aber diese Einschränkung hat sich für den Einsatz des Teleskops als unbedeutend erwiesen. Eine programmierte Nachführung des Teleskops im Anschluß an die erfolgte Positionierung erfolgt nach vom digitalen Rechner gelieferten Daten unter Berücksichtigung von Änderungen der Refraktion und der Instrumentenbiegungen.
- Manuelle Korrekturen der Nachführung können durch einen Beobachter sowohl vom Primär- als auch vom Sekundärfokus aus vorgenommen werden, sofern ein visuell beobachtbares Objekt im Feld vorhanden ist. Automatische Korrekturen der Nachführung können mittels lichtelektrischer Führungssysteme durchgeführt werden. Der zur Nachführung ausgewählte Stern kann dabei sowohl zentral als auch dezentral im Feld sein. Die Suche nach einem geeigneten Leitstern kann vom Steuerpult aus auf einem Bildschirm erfolgen.
- Bei Objekten mit Eigenbewegung gegenüber Fixsternen erfolgt die Nachführung unter Benutzung lichtelektrischer Nachführsysteme, bzw. durch Berücksichtigung der differentiellen Geschwindigkeiten der Objekte im Rechner.
- Synchron mit der Ansteuerung des Teleskops erfolgt auch die Ansteuerung der Kuppel.

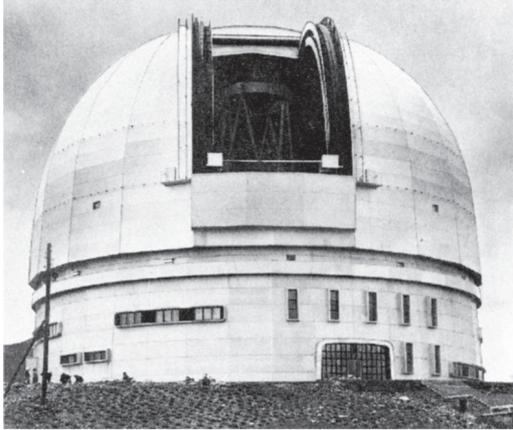
In den Jahren von 1955 bis 1962 war intensiv nach einem geeigneten Standort für das 6-m-Teleskop gesucht worden. Etwa 100 Mitarbeiter aus verschiedenen Observatorien der UdSSR hatten auf Expeditionen von der Krim bis nach Fernost Site-testing-Programme durchgeführt. Astronomische Erfordernisse waren gutes seeing, viele klare Nächte im Jahr, geringe Luftfeuchtigkeit sowie wenig störende Einflüsse durch Zivilisation, durch Wind und starke Temperaturänderungen. Darüber hinaus waren auch ökonomische Aspekte zu beachten. Der Transport-



**Bild 22.14** Am Nasmyth-Fokus des 6-m-Spiegelteleskops rechts das lichtelektrische Leitrohr

weg für die großen und schweren Lasten war ein Kernproblem. Günstige Standorte, wie zum Beispiel im Pamir und in Mittelasien, schieden wegen Unzugänglichkeit oder extrem hoher Erschließungskosten aus. Von 29 in die Wahl genommenen Standorten entschied man sich für einen etwas über 2000m hohen Berg im nördlichen Kaukasus in der Nähe der Ortschaft Selenčukskaja ( $41^{\circ}36'$  Ost,  $43^{\circ}50'$  Nord). Auch hier mußten für die Schwerlasttransporte noch Zugangsstraßen angelegt werden.

Die Kuppel, die hier errichtet wurde, hat einen Durchmesser von 45 m; die Spaltbreite beträgt 11 m. Das Gebäude ist etwa 50 m hoch (Bild 22.15). In der Kuppel sind in zwei Untergeschossen ein Vortragsraum, Arbeitsräume, eine Werkstatt für Wartungsarbeiten und Räume für die technische Versorgung des Teleskops untergebracht. Im Kuppelraum befindet sich der Raum mit der Steuerungsanlage sowie eine



**Bild 22.15** Kuppel des 6-m-Spiegelteleskops

große Vakuum-Verspiegelungsanlage, die den Hauptspiegel mit seiner Fassung aufnehmen kann. Der Aus- und Einbau des Spiegels wird dadurch sehr erleichtert. Zur Montage wurde ein großer Brückenkran eingesetzt, der an Ort und Stelle verblieb, um spätere Montage- und Servicearbeiten zu erleichtern. Nach der Werkserprobung 1969 trat das Teleskop demontiert die weite Reise an. Der Transport erfolgte auf dem Wasserweg von Leningrad nach Rostow am Don über Newa, Onegasee, Wolga-Ostsee-Kanal, Wolga, Wolga-Don-Kanal. Von Rostow ging es mit 40-t-Schwerlasttransporten 500 km über Straßen, davon etwa 50 km über steile Gebirgsstraßen, bis zum Aufstellungsort. Auch der 6-m-Spiegel wurde in einem Spezialcontainer auf dem Wasserweg bis nach Rostow transportiert. Nach der Montage des Teleskops in seiner Kuppel wurde die Teleskopmontierung in bezug auf Justierzustand, elastische

Biegungen und Ansteuerung sehr gründlich untersucht. Bei diesen Untersuchungen hatte man zunächst anstelle des Hauptspiegels eine gleich schwere Betonplatte eingesetzt. Auch bei der Untersuchung des 5-m-Mount-Palomar-Teleskops war man so verfahren.

Nach dem Einbau des Spiegels konnten im Januar 1976 erste astronomische Beobachtungen durchgeführt werden. Auch die nun folgende Phase, bis etwa zum Beginn der achtziger Jahre, diente noch in starkem Umfang der Untersuchung und Optimierung des Teleskops und seiner Ausrüstung.

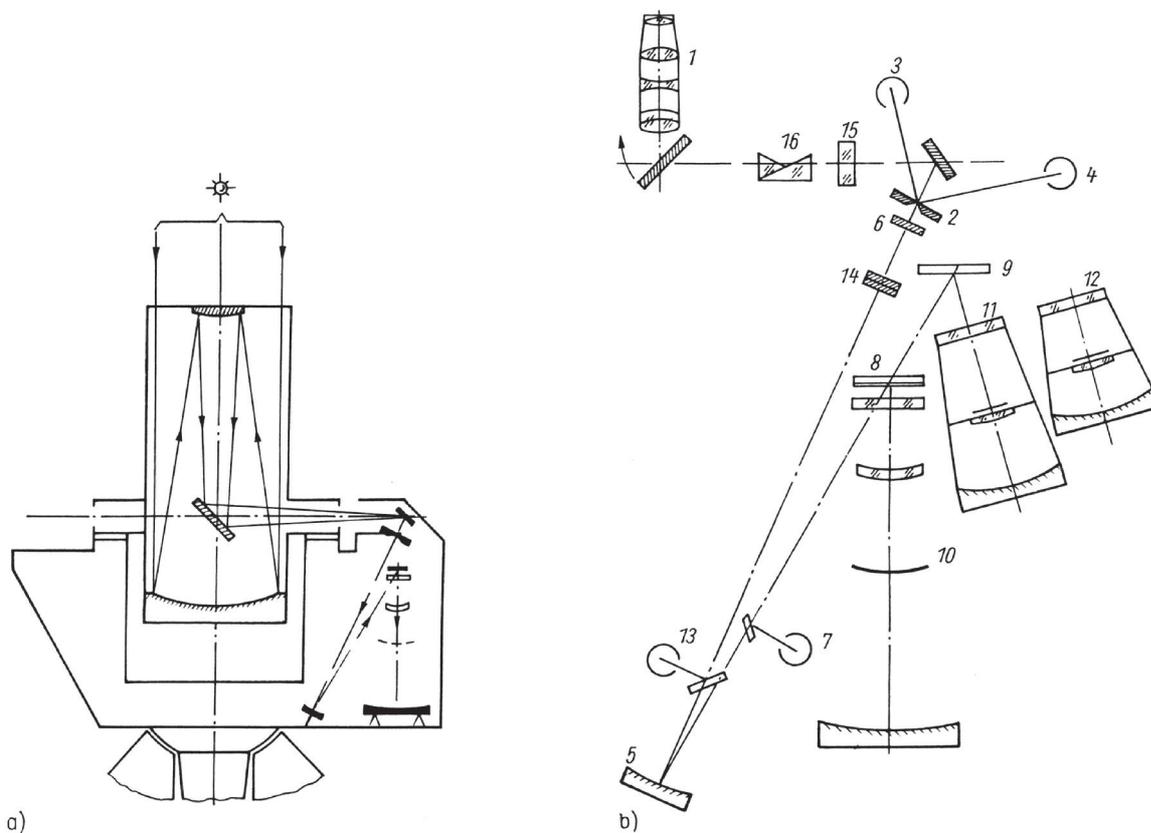
Der Austausch des ersten, nicht voll befriedigenden Spiegels gegen den zweiten, besseren, die Modernisierung der Steuerungstechnik durch Inbetriebnahme eines neuen leistungsfähigeren Rechners (SM-4), die Eliminierung von Instrumentenfehlern durch den Steuerrechner und die weitgehende Automatisierung der Beobachtungsarbeit bis hin zur Auswertetechnik sind wichtige Ergebnisse dieser Arbeiten. Während bis in die erste Hälfte der achtziger Jahre vorwiegend mit photographischen Aufnahmetechniken gearbeitet wurde, werden heute in starkem Umfang elektronische Empfangstechniken eingesetzt, die eine direkte Anzeige und Auswertung ermöglichen. Fernsystems und Fernbedienungseinrichtungen machen die Anwesenheit eines Beobachters am Instrument, z. B. in der Beobachterkabine des Primärfokus, nur noch in Ausnahmefällen erforderlich.

Umfangreich ist die Ausrüstung zur Durchführung astrophysikalischer Untersuchungen, die für das 6-m-Teleskop geschaffen wurde: Der in einem Gabelholm fest installierte Hauptspektrograph (Bild 22.16) übernimmt die Rolle des sonst bei Großteleskopen üblichen Coudé-Spektrographen. Die Anordnung im Nasmyth-Fokus bedeutet eine Verringerung der Anzahl der Umlenkspiegel, Obwohl der Spektrograph an der Azimutdrehung des Teleskops teilnimmt, kann er als quasi-stationär betrachtet werden. Vor dem Spektrographenspalt befindet sich ein Suchersystem zur Kontrolle der Einstellung des Objekts und eine lichtelektrisch wirkende Feinpositioniereinrichtung durch Verkipfung einer Planparallelplatte sowie ein Abbe-Prisma zur Kompensation der Felddrehung.

Die Kollimatoroptik besitzt einen sphärischen Hohlspiegel ( $f' = 7,9$  m), der dem Aperturwinkel im Nasmyth-Fokus angepaßt ist. Als dispergierendes Element sind mehrere Beugungsgitter verfügbar. Die Aufnahme der Spektren erfolgt nach Wahl mit einer von drei Kameras unterschiedlicher Brennweite. Die erste Kamera besitzt ein Meniskussystem nach *Maksutov* von 3 m Brennweite mit einem sphärischen Spiegel von 2 m Durchmesser. Sie wird in Verbindung mit einem Gitter von 300 mm x 200 mm mit 600

Linien/mm benutzt, das mit einem Glasprisma von  $14^\circ$  Winkel in gekreuzter Dispersion kombiniert ist. Die zweite Kamera ist eine Schmidt-Optik mit sphärischem Spiegel, Korrektionsplatte und Feldlinse zur Bildebnung. Die Brennweite der Kamera beträgt 0,6 m, das Öffnungsverhältnis 1:2,3. Die dritte Kamera hat eine Brennweite von 0,3 m und ein Öffnungsverhältnis von 1:1,2. Sie besitzt einen asphärischen Spiegel von 500 mm Durchmesser und ein Korrektionsystem. Die zweite oder die dritte Kamera wird in Verbindung mit Gittern von ebenfalls 600 Linien/mm benutzt, die für die erste, zweite oder dritte Ordnung geblazt sind. Der Hauptspektrograph arbeitet im Wellenlängenbereich von 300 bis 1100 nm; die reziproke lineare Dispersion liegt zwischen 1,3 und  $56 \text{ \AA/mm}$ . Der Einsatz erfolgt für stellarspektroskopische Aufgaben.

Eine spezielle Einrichtung zum Hauptspektrographen dient der Untersuchung magnetischer Sterne.



**Bild 22.16** Hauptspektrograph im Nasmyth-Fokus des 6-m-Spiegelteleskops: a) Schema der Anordnung im Nasmyth-Fokus des Teleskops; b) Optisches Schema des Hauptspektrographen; 1 Suchersystem im 2. Fokus; 2 Spalt; 3, 4 System zur photoelektrischen und visuellen Nachführung; 5 Kollimator; 6 Zylinderlinse; 7 System zur Spektrenkalibrierung; 8 Beugungsgitter mit Glasprisma in gekreuzter Dispersion; 9 Beugungsgitter für Kamera II und III; 10 Kamera I; 11 Kamera II; 12 Kamera III; 13 Belichtungsmesser; 14 Platte zur Spektrenverbreiterung; 15 Platte zur Spektrenachführung; 16 Abbe-Prisma

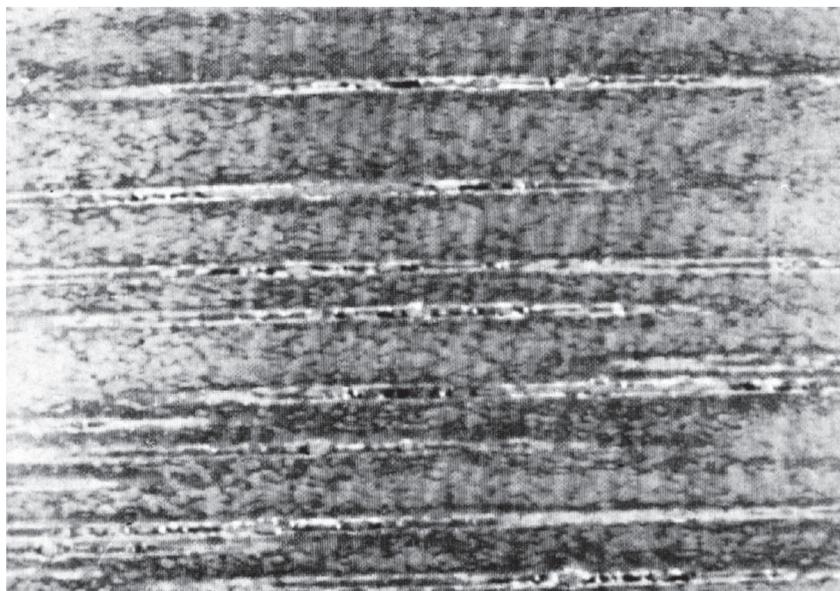
Mit diesem „Magnetometer“ lassen sich unter Benutzung eines FP-Interferometers und einer Photonen-zähleinrichtung Magnetfelder von Sternen mit einer Empfindlichkeit von 5 Gauß nachweisen.

Im zweiten Nasmyth-Fokus können, je nach Aufgabenstellung, unterschiedliche Geräte eingesetzt werden, z. B. ein „Planeten-Spektrograph“ mit Spiegelkollimator ( $f = 2400 \text{ mm}$ ) und Off-axis-Spiegelkamera ( $f = 647 \text{ mm}$ ). Mit austauschbaren Gittern wird eine Dispersion zwischen 4 und  $52 \text{ \AA/mm}$  erzielt. Weiterhin wurde für den Einsatz im zweiten Nasmyth-Fokus ein Echelle-Spektrograph entwickelt.

Der Primärfokus des 6-m-Teleskops kann für Direktaufnahmen mit und ohne Korrektionsystem genutzt werden. Der Abbildungsmaßstab beträgt  $8'',9/\text{mm}$ . Die Felddrehung wird durch gesteuerte Drehung der Aufnahmeeinrichtung kompensiert. Zur lichtelektrisch gesteuerten Nachführung dient eine Offset-Einrichtung. Für spektroskopische Arbeiten im Primärfokus ist eine vielseitige Ausrüstung vorhanden.

Ein lichtstarker Spektrograph, SP-160, wurde im Staatlichen Optischen Institut in Leningrad entwickelt und in den LOMO-Werken gebaut. Er arbeitet mit einem Off-axis-Parabolspiegel als Kollimator, mit drei austauschbaren Gittern (200, 300 und 600 Linien/mm, Größe 150 mm x 140 mm) und mit vier austauschbaren lichtstarken Kameras mit Außenfokus (Schmidt-Cassegrain-, bzw. Cassegrain-Systeme mit Meniskus-Linsen-Korrektur), an die unterschiedliche Bildröhren angesetzt werden können. Insgesamt kann ein Spektralbereich von 300 bis 1200 nm untersucht werden, bei Dispersionen zwischen 60 und 370 Å/mm. Ebenfalls für den Primärfokus steht ein Universal-Astro-Gitter-Spektrograph (UAGS) aus Jena zur Verfügung. Er wird für Long-slit-Experimente in Verbindung mit einer zweidimensionalen Photonen-Detektor-Matrix von 512 x 512 Elementen eingesetzt.

Als sehr effektive Methode der spektroskopischen Untersuchung lichtschwächster Galaxien bis 23m wird im Primärfokus des 6-m-Teleskops die „Vielspalt-Feldspektroskopie“ angewendet (Bild 22.17), Anstelle eines Spektrographenspalts wird in die Fokalebene eine Maske gebracht, die für sämtliche zu untersuchenden Objekte eines gewählten Himmelsfelds feine Bohrungen enthält. Die Herstellung der Masken und die Justierung im Teleskop erfordern hohe Präzision. (Die Bohrungen werden nach einer speziellen Technik im SAO mit einem feinen Laserstrahl hergestellt.) Durch die Anwendung der Maske wird die Himmelshintergrundstrahlung ausgeschaltet, die sonst die Gewinnung von Spektren lichtschwächster



**Bild 22.17** Aufnahme mit dem Vielspalt-Feldspektrographen im Primärfokus des 6-m-Teleskops (Ausschnitt) auf dieser Aufnahme im Selected Area SA 57 konnten sieben entfernte Quasare nachgewiesen werden, die zu den lichtschwächsten der bisher gefundenen Objekte zählen

Objekte ausschließt. Die Auswertung der Aufnahmen, die mittels der Vielspalt-Feldspektroskopie gewonnen werden, erfolgt durch automatische Bildverarbeitung. Die Platten werden mit einem Scanner abgetastet, die digitale Signalverarbeitung in einem Rechner liefert eine Klassifizierung der Spektren. Die Methode wurde durch *H. Lorenz* in Babelsberg im Zentralinstitut für Astrophysik entwickelt.

Bereits auf den ersten Aufnahmen, die nach der Technik der Vielspalt-Spektroskopie gewonnen wurden, konnten unter den lichtschwächsten Galaxien eine Vielzahl von Quasaren nachgewiesen werden.

Das 6-m-Teleskop wird als nationale Einrichtung der Akademie der Wissenschaften der

UdSSR verwaltet. Ein Programmkomitee, dem namhafte Wissenschaftler angehören, koordiniert die Arbeiten und vergibt die Beobachtungszeit. Die Wünsche übersteigen die verfügbare Zeit um ein mehrfaches. In die Zusammenarbeit und Nutzung des Teleskops sind viele Institute einbezogen, so auch das Zentralinstitut für Astrophysik der Akademie der Wissenschaften der DDR (heute Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam AIP).

Zum Speziellen Astrophysikalischen Observatorium gehört als zweites Großinstrument das Radioteleskop RATAN-600 mit einem Antennenring von 600 m Durchmesser.

In der Basisstation des Observatoriums, dessen Aufbau vor etwa 20 Jahren unter Leitung von *I. M. Kopylov* begonnen wurde, arbeitet ein großer Mitarbeiterstab nicht nur an astronomischen Problemen, sondern auch in starkem Umfang an der Vervollkommnung der Beobachtungstechnik, insbesondere an der Entwicklung elektronischer Empfangstechniken.

Der Einsatz des 6-m-Teleskops erstreckt sich auf viele Bereiche der modernen astronomischen Forschung. Untersuchungsobjekte auf dem Gebiet der Stellarastrophysik sind z.B.

- sehr enge kinematische und spektroskopische Doppelsternsysteme mittels Speckle-Interferometrie bzw. spektroskopischer Methoden
- chemisch auffallende Sterne und magnetische Sterne
- extrem kurzzeitveränderliche Sterne bis herab in den Subsekundenbereich mittels hochempfindlicher Photometer mit sehr hoher Zählrate.

Durch Reichweite und vielseitige Ausrüstung bietet das 6-m-Teleskop hervorragende Möglichkeiten für extragalaktische Forschungen: Die Photometrie von Zwerggalaxien, flächen-photometrische Untersuchungen von Einzelgalaxien und Galaxienhaufen, spektroskopische Untersuchungen an aktiven Galaxien und Galaxienhaufen, die Messung von Radialgeschwindigkeiten von Galaxien und Mehrfachsystemen und die Bestimmung von Masse-Leuchtkraftverhältnissen an Doppelsystemen sind einige der Beiträge, die das 6-m-Teleskop seit seiner Inbetriebnahme geliefert hat.

Im Primärfokus gelingt es, Rotverschiebungen bis herab zu schwächsten Helligkeiten (23 mag) mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, z. B. wurden bereits 1978 relative Rotverschiebungen an Quasaren von  $z = 2,528$  mit einem Fehler von nur  $\pm 0,008$  gemessen. Im Zeitraum von 1981 bis 1986 wurden systematisch Rotverschiebungen an Galaxienhaufen in einem Kegel von  $60^\circ$  um den galaktischen Nordpol gemessen und damit wertvolles Material über die räumliche Struktur dieses Gebietes der Metagalaxis gewonnen.

Jede große Leistung findet ihre Kritiker. Am 6-m-Teleskop wurden das Konzept eines 6-m-Spiegels aus Glas, die optische Leistung des Teleskops und die Wahl des Standorts kritisiert, Die Kritiker fühlten sich bestätigt, als nicht gleich nach Inbetriebnahme des Teleskops sensationelle Entdeckungen kamen. Tatsächlich blieb die optische Leistung des ersten Spiegels hinter den Erwartungen zurück, aber der Austausch gegen den besseren zweiten Spiegel brachte die gewünschte Verbesserung. Die bei Temperaturänderungen erforderliche relativ lange Anpassungszeit des Spiegels wird fortfallen, wenn der in Arbeit befindliche Spiegel aus der Glaskeramik Sitall zum Einsatz kommt.

Nach der Montage des Teleskops hatte zunächst dessen gründliche Untersuchung und Optimierung Vorrang. Hierzu gehörte auch die Umstellung auf eine moderne Rechentechnik sowie die Erprobung der Ausrüstungen. Heute kann man feststellen, daß sich das Teleskop in fast drei Jahrzehnten astronomischer Forschungsarbeit bewährt hat. Hauptsächlich wird das BTA heute für Spektroskopie und Speckle-Interferometrie eingesetzt (PhotonMAX-512B Kamera seit 2007)

Der Standort ist aus heutiger Sicht nicht optimal; aber die Wahl kann auch nicht als falsch bezeichnet werden. 1200 bis 1800 Nachtstunden können im Jahr für astronomische Arbeiten genutzt werden. Etwa 120 klare Nächte sind vollständig für spektroskopische Arbeiten nutzbar; davon können etwa 40 für photometrische Untersuchungen als sehr gut bezeichnet werden. Die beste Zeit ist etwa von August bis Oktober. Als 1955 mit der Suche nach einem Standort für das 6-m-Teleskop begonnen wurde, war dessen Wahl nicht nur ein astronomisches, sondern auch ein ökonomisches Problem, ja unter den gegebenen Zeitumständen eine Frage der Realisierbarkeit überhaupt. Die Forderung nach einem Standort mit unverhältnismäßig hohen Erschließungskosten hätte unter Umständen das Projekt unmöglich gemacht. Hinzu kommt aber auch, daß sich in den vergangenen Jahrzehnten die Ansichten über Standorte für Großteleskope durch neue Erkenntnisse gewandelt haben. Auch im Speziellen Astrophysikalischen Observatorium arbeitet eine Gruppe an Untersuchungen zu Problemen von Astro- und Kuppelklima.

Die Initiatoren und Schöpfer des 6-m-Teleskops hatten Mut, als sie ein Projekt dieser Größenordnung in Angriff nahmen, noch bevor das 2,6-m-Krim-Teleskop fertiggestellt war. Mit wissenschaftlicher und ingenieurtechnischer Gründlichkeit haben sie das Projekt erfolgreich verwirklicht.

In der Geschichte der Fernrohre wird dieses Teleskop einen besonderen Platz behalten - wegen der Perspektiven der alt-azimutalen Montierung für künftige Großteleskope. Zum erstenmal wurde der Nachweis erbracht, daß ein großes Teleskop mit alt-azimutaler Montierung in Verbindung mit moderner Rechentechnik mit der gleichen Präzision positioniert und nachgeführt werden kann wie große parallaktisch montierte Teleskope, denen aber hinsichtlich der Gravitationsauswirkungen und der praktischen Beobachtungsmethodik überlegen ist.

## Literatur zum Abschnitt 22

- Afanasjev, V. L., u. a.*: The Spectra of Three Newly Discovered High-Redshift Quasars. *Astron. Nachr.* Bd. 300 (1970) H, 1, pp. 31-36
- Bardin, W. P., u. a.*: Arbeiten zur Bereitstellung des Hauptspiegels des BTA. Bearbeitung des Rohlings des Hauptspiegels des BTA (russ.) OMP 1977 No. 11, S. 38-44
- Borodulja, L. P.; Bobaschov, W. W.*: Berechnung des Hauptsystems des BTA (russ.). OMP (1977) No. 8, S. 3-5
- Bujinskii, I. M.; Wilner, D. E.; Stepanov, S. E.*: Ausrüstung zur Herstellung des Spiegels des BTA. OMP (1978) No. 1, S. 23-26
- Capaccioli, M.; Lorenz, H.; Afanasjev, V. L.*: Is NGC 1023/1023A an interacting System? *Astron. Astrophys.* 169 (1986) pp. 54-62
- Dobronravín, R. P.; Steschenko, N. W.*: Krim - Astrophysikalisches Observatorium der Akademie der Wissenschaften der SSSR (russ.). Simferopol: Verlag „Krim“ 1965
- Hartl, Gerhard*: Der Refraktor der Sternwarte Pulkowa. *Sterne und Weltraum* 26. Jg. (1987) S. 397-404
- Hoffmeister, C.*: Wiedereröffnung der Sternwarte Pulkowa. *Die Sterne* 30. Jg. (1954) S. 221-224
- Idanov, A. L.; Zesnek, L. S.*: Grobschleifen der sphärischen Fläche mit Hilfe eines Ringwerkzeuges (russ.). OMP 1977, No. 4, S. 31-34
- Ioannisiani, B. K.*: The Soviet 6-m Altazimuth Reflector. *Sky and Telescope* 54 (1977) p. 356
- Ioannisiani, B. K., u. a.*: The Zelenchuk 6 M Telescope (BTA) of the USSR Academy of Sciences. C. M. Humphries (ed.): *Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes* 1982, D. Reidel, Publishing Company pp. 3-10
- Ingrao, H. C.*: News of the Soviet Six-Meter Reflecting Telescope. *Sky and Telescope* Vol. 35 (1968) May, pp. 279-281
- Izkovitsch, G. A.; Naischuli, A. C.; Schwarzman, J. B.*: Antriebssysteme zur Programmsteuerung des großen azimutalen Teleskopes (russ.). OMP (1978) No. 1, S. 17-21
- Kopylov, I. M.; Korovjakovskij, J. P.; Fomenko, A. F.*: Resultate der Werkserprobung des 6 m-Spiegels des großen azimutalen Teleskops, (russ.). OMP (1977) No. 10, S. 3-5
- Kopylov, I. M.; Fomenko, A. F.*: The 6-meter Optical Telescope of the USSR: Instrumentation and Observational Possibilities. *Proc. of the IAU Colloquium Nr. 79: „Very Large Telescopes, their Instrumentation and Programs“* Garching, April 1984
- Lauterbach, W.*: Besuch in Pulkowa. *Die Sterne* 40. Jg. (1964) S. 244-246
- Lutsky, V.*: The 236-inch Soviet Reflector. *Sky and Telescope* (1970) May
- Malarev, W. A.*: Such- und Leitsystem des großen azimutalen Teleskops, (russ.). OMP (1977) No. 7, S. 32-36
- Medvedev, A. B.; Neplochov, E. M.*: Fotoelektrische Systeme zur automatischen Steuerung des BTA. OMP (1977) No. 3, S. 27-31
- Michelson, N. N.*: Der astronomische Gerätebau in der UdSSR. *Jenaer Rundschau* 18. Jg. (1973) H. 6, S. 336-341
- Michelson, N. N.*: Anfangsetappe der Projektierung des BTA (russ.). OMP (1977) No. 5, S. 70-73
- Michelson, N. N.*: Neue Technik in der Astronomie, (russ.). *Materialien der Sitzung der Kommission des astronomischen Gerätebaus beim astronomischen Rat der Akademie der Wissenschaften der SSSR (Pulkowo)*; Leningrad: Nauka 1976
- Neplochov, E. M.*: Automatisierungssystem zur komplexen Führung des großen azimutalen Teleskops (russ.). OMP (1977) No. 8, S. 41-48
- Philip, G. D.*: Visit to the Soviet Union's 6-Meter Reflector. *Sky and Telescope* (1974) May, pp. 290-295
- Purjaev, D. T.*: Interferometrische Prüfung astronomischer Großspiegel, (russ.). 28. Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau 1983, Vortragsreihe „Entwickl. feinmechn.-opt.-elektron. Geräte“, S. 63-66
- Schestakov, V. A.*: Arbeitsorganisation der Herstellung des Hauptspiegels des BTA (russ.). OMP (1977) No. 3, S. 55-57
- Sotnova, T. A., u. a.*: TV-Spectrum Scanner of the 6-Meter Telescope. C. M. Humphries (ed.): *Instrumentation for Astronomy with Large Optical Telescopes*, pp. 283-290, 1982 D. Reidel Publishing Company

*Vyssotsky, A. N.:* Reminiscences of Pulkovo Observatory. Sky an Telescope Vol. 24 (1962) July, pp. 12-15

*Vasileev, A. C., u. a.:* Der Haupt-Sternspektrograph des BTA. (russ.) OMP (1977) No.2, S. 31-34

*Zandin, N. G., u. a.:* Der lichtstarke Spektrograph SP.-160 im Hauptfokus des BTA. (russ.). OMP (1977) No. 2, S. 34-37

*Zverev, V. A., u. a.:* Technologische Kontrolle des Hauptspiegels des BTA nach der Hartmann-Methode (russ.). OMP (1977) No. 3, S. 3-5

*Zverev, V. A., u. a.:* Mathematische Begründung der Hartmann-Prüfung des Hauptspiegels des BTA (russ.). OMP (1977) No. 2, S. 18-22

*Zverev, V. A.; Rodionov, S. A.; Sokoliskij, M. N.; Usoskij, V. V.:* Untersuchung des Hauptspiegels des BTA im Observatorium (russ.) OMP (1977) No, 4, S. 3-5

## 23. Das Multiple-Mirror-Teleskop (MMT)

Wie ein roter Faden zieht sich durch die Entwicklungsgeschichte der Fernrohre die Bemühung um die Vergrößerung der freien Öffnung der Objektive oder Spiegel, Von *Galileis* Fernrohr mit etwa 20 mm Linsendurchmesser bis zum 5-m-Spiegel auf dem Mount Palomar und dem 6-m-Spiegel im Kaukasus wurde eine kaum vorstellbare Leistungsentwicklung erreicht. Die Steigerung der lichtsammelnden Wirkung und damit das Vordringen zu immer lichtschwächeren und entfernten astronomischen Objekten einerseits und die Steigerung der Auflösung andererseits wurden errungen mit einer außerordentlichen Erhöhung des technischen und ökonomischen Aufwands. Die Kosten bei Vergrößerung der Teleskope wachsen fast mit der dritten Potenz des Objektiv- bzw. Spiegeldurchmessers.

Selbstverständlich wurden auch Wege gesucht, um mit geringerem Aufwand eine höhere Leistung zu erzielen. Zwei Wege sind interessant und wurden schon frühzeitig bei Brennsiegeln und Brennlinen beschritten. Im ersten Fall wird ein großer Brennsiegel aus einer größeren Anzahl kleiner Spiegel zusammengesetzt, die alle so zueinander ausgerichtet werden, daß sie die Sonnenstrahlen in einer kleinen Fläche konzentrieren. *Anthemios von Byzanz* hat im 6. Jahrhundert einen aus 24 Einzelsiegeln zusammengesetzten Brennsiegel beschrieben und vermutet, daß schon *Archimedes* so vorgegangen ist. Um die Mitte des 18. Jahrhunderts hat *George-Louis Leclerc*, Graf von Buffon (1707-1788) sehr erfolgreiche Brennversuche durchgeführt mit Brennsiegeln, die aus einer größeren Anzahl (bis zu 128) von Plansiegeln zusammengesetzt waren.

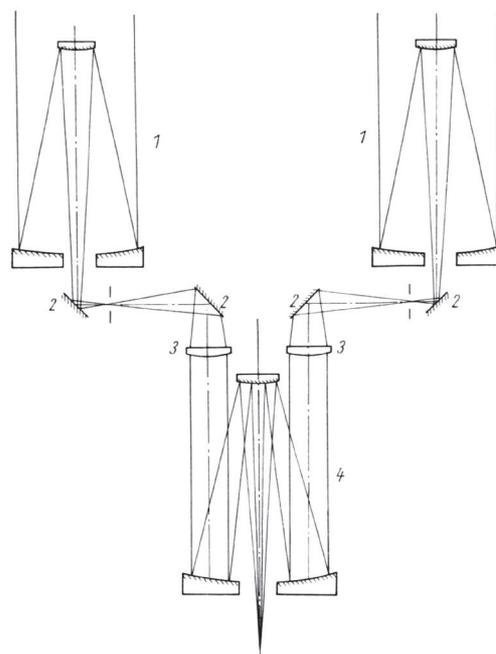
Fast gleichzeitig mit des *Grafen von Buffon* Versuchen wurde durch *Michael W. Lomonossow* (1711-1765) eine originelle Brenneinrichtung, eine Art Sonnenofen, beschrieben, bestehend aus einer Reihe von Linsen, die konzentrisch zu dem erhitzenden Objekt angeordnet sind. Die optischen Achsen aller Linsen schneiden sich in einem Punkt, in dem auch alle Brennpunkte zusammenfallen. Mit Ausnahme der der Sonne direkt zugekehrten Eintrittsöffnung ist vor jeder Linse ein Planspiegel angeordnet, der die Sonnenstrahlen in die Richtung der optischen Achse lenkt.

Im ersteren Fall haben wir eine einzige Apertur, die aus einer Mehrzahl von Teilflächen zusammengesetzt ist. Im zweiten Fall haben wir mehrere optische Eintrittsöffnungen, die zu einem Fokus zusammengeführt werden.

Beide Wege wurden auch für Fernrohre vorgeschlagen und sind heute hochaktuell; aber erst mußten neue Lösungsprinzipien gefunden und vor allem Vorurteile abgebaut werden.

Zum ersten Weg haben wir schon zwei Versuche des *Lord Oxmanton, Earl of Rosse*, in der ersten Hälfte des 18. Jahrhunderts kennengelernt. Zum einen hat er versucht, einen großen Metallspiegel aus kleinen Teilen zusammensetzen, die fest miteinander verlötet wurden und die dann gemeinsam bearbeitet wurden. Zum anderen hat er einen zentralen Spiegel mit einer ringförmigen Spiegelzone umgeben, die justiert werden konnte, in der Hoffnung, anstelle des Parabolisierens den Öffnungsfehler der sphärischen Flächen durch Justieren zu überwinden. Beide Lösungen hat der *Earl of Rosse* nicht weiter verfolgt, sondern Massivmetallspiegel bis zu 1,8 m Durchmesser hergestellt, und auch das Parabolisieren durch Polierretusche hat er beherrschen gelernt.

Etwa 100 Jahre später, in den 1930er Jahren beginnend, hat *G. Horn-d'Arturo* auf der Sternwarte Bologna Versuche mit zusammengesetzten Spiegeln begonnen. In einem Turm der alten Universitätssternwarte wurde ein



**Bild 23.1** Schema von Synges Vorschlag für ein aus mehreren Spiegelteleskopen zusammengesetztes großes Teleskop: 1 auf einem Kreis angeordnete parallelgerichtete Cassegrain-Teleskope; 2 Umlenkspiegel; 3 Kollimatorobjektive; 4 nachgeschaltetes Spiegelteleskop

Spiegel von etwa 1,8 m Durchmesser aus 61 einzelnen Teilspiegeln hexagonaler Form, alle sphärisch mit gleichem Radius von 20,82 m, zusammengesetzt. Die Spiegel wurden alle justierbar auf einer großen horizontal liegenden Marmorplatte aufgebaut. Dieser Mosaikspiegel ist fest auf das Zenit gerichtet; die Photoplatte (9 cm x 24 cm) wird nachgeführt, wie im Beispiel des großen Radioteleskops in Arecibo. In seinem Bericht 1956 konnte er gute Ergebnisse mitteilen, aber auch die Perspektiven aufzeigen. Dieser Weg wird heute für sehr große Teleskope wieder diskutiert.

1909 wurde auch die Kombination mehrerer Linsen zu einem Teleskop vorgeschlagen - daß heißt, die Lomonossowsche Idee der Brennspiegelanlage wurde wiederbelebt.

Bedeutsamer war ein Vorschlag aus dem Jahre 1930 von *E. H. Synge*, denn dieser führte zu einem der interessantesten Teleskope unserer Tage, zum Multiple-Mirror-Teleskop (MMT). *Synge* hatte Überlegungen zur Steigerung des Auflösungsvermögens des Michelsonschen Sterninterferometers angestellt. Zu diesem Zweck wollte er zwei weit auseinandergerückte Coelostatspiegel so anordnen, daß sie stets Teilstücke einer einzigen großen Fläche bilden. Das brachte ihn auf den Gedanken, daß man auch die licht-sammelnde Wirkung eines sehr großen Spiegelteleskops erreichen kann, indem man eine Anzahl kleiner Teleskopspiegel so einsetzt, daß sie im Zusammenwirken ein einziges Bild erzeugen. Im Ergebnis dieser Überlegungen schlug er vor, eine Anzahl Cassegrain-Spiegelteleskope mittlerer Größe fest miteinander so auf einem Kreis anzuordnen, daß ihre optischen Achsen parallel auf das gleiche Objekt gerichtet sind (Bild 23.1). Er fand eine originelle Lösung, um die Bilder, die jedes einzelne Teleskop erzeugt, zu einem einzigen Bild zu überlagern: Durch Umlenkung über je zwei Planspiegel werden die aus den einzelnen Teleskopen austretenden Strahlengänge in ein einziges nachgeschaltetes Teleskop geführt. Zur Anpassung der Strahlengänge fügte *Synge* eine entsprechende Anzahl Kollimatorlinsen auf einer ringförmigen Zone vor der Öffnung des nachgeschalteten Teleskops ein. Diese Kollimatorlinsen bilden das von jedem der ersten Teleskope erzeugte Bild für das nachgeschaltete Teleskop wieder ins Unendliche ab. Zu den optischen Eigenschaften macht *Synge* Abschätzungen; aber die technischen Probleme, die insbesondere mit der Justierung und der Erhaltung des Justierzustands zusammenhängen, hat er offenbar unterschätzt. Interessant ist sein Hinweis auf den ökonomischen Vorteil, den ein zusammengesetztes Teleskop gegenüber einem Einzelteleskop vergleichbarer Eintrittsöffnung bringt. Ein paar Jahrzehnte vergingen, bis *Synge*s Idee zum Tragen kam.

Das Multiple-Mirror-Telescope (MMT) auf dem Mount Hopkins ist ohne Frage in optischer und konstruktiver Hinsicht eine besonders originelle und interessante Lösung für ein modernes Großteleskop, weil wesentliche und bewährte Prinzipien der Konstruktion klassischer großer Spiegelteleskope verlassen wurden. Aber auch die Entstehungsgeschichte des MMT ist originell und interessant. Sie zeigt, daß eine neue Idee noch wenig wert ist, selbst wenn sie auf gutem Papier gedruckt in den Bibliotheken steht. Erst ihre praktische Umsetzung in eine komplexe Lösung bringt den wissenschaftlich-technischen Fortschritt. *Synge*s Vorschlag schlummerte fast vier Jahrzehnte. Zum Multiple-Mirror-Teleskop wurden viele Ideen beigesteuert, und die Zahl der Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker und auch der Organisatoren, die zur Entstehung beigetragen haben, ist groß.

Ein erster Anstoß ging Ende der sechziger Jahre von der Universität Arizona in Tucson aus, wo 1960 auf Initiative von *Gerard P. Kuiper* (1905-1973) das Lunar and Planetary Laboratory gebildet wurde. Hier befaßten sich unter anderem *Frank Low* und *H. L. Johnson* mit speziellen Infrarot-Untersuchungsmethoden. Dabei ging es nicht nur um Planetenuntersuchungen im Infraroten, sondern auch um die Auf- und Untersuchung von Sternen mit extrem ins Infrarot verschobenem Strahlungsmaximum und demzufolge entsprechend niedriger Temperatur (um 1000 K). Die Ergebnisse, die *F. Low* bei Wellenlängen bis über 10  $\mu\text{m}$  mit einem 1,5-m-Teleskop erzielte, waren vielversprechend; aber sie forderten geradezu ein Teleskop mit wesentlich größerer lichtsammelnder Fläche. *Low* dachte aus Kostengründen über zusammengesetzte Spiegel nach. Er diskutierte die verschiedenen Möglichkeiten mit *Aden B. Meinel*, der sich damals mit Spiegeln für Weltraumteleskope befaßte und sich stark für den Aufbau des Optical-Sciences-Center an der Universität Arizona einsetzte. *Low* schlug vor, ein Bündel parallel angeordneter axialsymmetrischer Spiegelteleskope zusammenzufassen; *Meinel* machte Vorschläge für die Zusammenführung der Strahlengänge zu einem Bild und untersuchte die optischen Möglichkeiten für einen Phasenabgleich. Ein erster Vorschlag sah sechs Cassegrain-Teleskope vor, die um einen zentralen 6seitigen Körper angeordnet sind, in dessen Innern sich der Beobachter befindet. Wegen der sechsschüssigen Geometrie wurde es als Projekt „Colt“ bezeichnet.

Parallel zu den Aktivitäten in Arizona wurden am Smithsonian Astrophysical Observatory in Cambridge, Massachusetts, unter Leitung von *Fred Whipple* ebenfalls Möglichkeiten zu einem kostengünstigen Großteleskop untersucht. Kontakte zwischen *Kuiper* und *Meinel* in Tucson mit *Whipple* in Cambridge führten zu einer Fusion der Interessen, in deren Folge am 23. Dezember 1971 eine Vereinbarung zwischen der Universität Arizona und dem Smithsonian Astrophysical Observatory über die gemeinsame Entwicklung und Realisierung des Teleskops abgeschlossen wurde. Der Mitarbeiterkreis vergrößerte sich schnell. An der Universität von Arizona nahmen *Ray I. Weymann* und seine Mitarbeiter vom *Steward-Observatorium* aktiv Einfluß auf das Projekt.

*Meinel* hatte die Übernahme von Leichtgewichtspiegelscheiben von 1,8 m Durchmesser, die ursprünglich für Versuche zu einem Weltraumteleskop bestimmt waren, organisiert. Die Abmessungen dieser Spiegelscheiben waren von Einfluß auf die Dimensionierung des Teleskops. Mit den vorhandenen Spiegelscheiben ging man ans Werk, obwohl die Finanzierung unklar war. Jedoch ohne dieses Herangehen wäre das Teleskop nie gebaut worden. Auch das hohe Risiko des technischen Konzepts mit seinen vielfältigen Problemen wurde beanstandet; aber der Bau eines kleineren Prototyps hätte dieses Risiko kaum mindern können. Widerstand gab es von Seiten kalifornischer Astronomen, die einen Nachbau des *Mount-Palomar-Teleskops* mit Aufstellung auf der Südhalbkugel planten, ein risikoarmer, aber auch sehr konservativer Vorschlag. Der Teamgeist war durch diese Schwierigkeiten nicht zu bremsen; das *Multiple-Mirror-Teleskop* wurde gebaut und konnte am 9. Mai 1979 seiner Bestimmung übergeben werden.

Das Ziel, ein möglichst großes Teleskop mit möglichst geringen Kosten zu schaffen, wurde beim *Multiple-Mirror-Teleskope* durch neue oder vereinfachte Prinziplösungen erreicht:

1. Anstelle eines Teleskops mit großem Hauptspiegel sind sechs separate kleinere Spiegelteleskope in einer Montierung parallel angeordnet, deren Strahlengänge zu einem einzigen Bild zusammengeführt werden (Bild 23.2).
2. Durch Verwendung von Leichtgewichtspiegeln und durch eine leichte, aber stabile Trägerstruktur für die optischen Systeme wurde die Masse des Teleskops gegenüber einem normalen Spiegelteleskop vergleichbarer Größe erheblich verringert.
3. Anstelle einer parallaktischen Montierung wurde, nach dem Vorbild des 6-m-Teleskops im Kaukasus, eine rechnergesteuerte alt-azimutale Montierung gewählt mit einer vereinfachten kostengünstigen Lagerungs- und Antriebstechnik.
4. Das Teleskop wurde nicht in konventioneller Weise in einer Kuppel aufgestellt, sondern mit einem Gebäude von rechteckigem Grundriß und Querschnitt umgeben, das mit dem Teleskop mitrotiert.

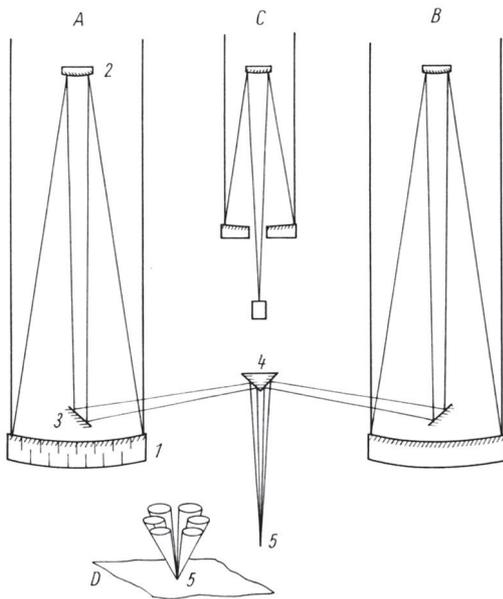
Durch diese neuen Grundlösungen konnten die Kosten gegenüber einem vergleichbaren 4,5-m-Teleskop konventioneller Bauweise auf weniger als ein Drittel gesenkt werden; sie betragen rund 8 Millionen Dollar.

Die Kombination von sechs gleichen Spiegelteleskopen zu einem kollimierten Strahlengang gehört sicher zu den mutigsten Schritten in der Geschichte der Fernrohre. Eine Verwirklichung wurde für möglich gehalten, als das System der Laserjustierungssteuerung realisierbar erschien.

Die sechs Spiegelteleskope des MMT sind Cassegrain-Teleskope mit parabolischen Hauptspiegeln von 1,818 m Durchmesser und 4,935 m Brennweite. Das Öffnungsverhältnis  $f/2,7$  hatte *Meinel* aus optischen Erwägungen vorgeschlagen. Es erwies sich auch als vorteilhaft, weil Länge und Durchmesser der hexagonalen Trägerstruktur der Teleskope etwa gleich sind, der mechanische Aufbau also sehr kompakt wurde.

Die sechs Spiegelscheiben bestehen aus Quarzglas und sind zellenartig aufgebaut mit einer Grund- und Deckplatte von je 25 mm Dicke. Die Masse eines Spiegels beträgt nur 545 kg, anstelle von etwa 1820 kg für eine massive Spiegelscheibe gleicher Größe, das heißt nur etwa 30% davon. Die Gesamtmasse der sechs Spiegel von 3270 kg beträgt weniger als 10 % der Masse eines monolithischen Spiegels von 4,5 m Durchmesser, was etwa der gleichen Spiegelfläche entspricht.

In Verbindung mit konvex-hyperbolischen Gegenspiegeln von 260 mm Durchmesser bildet jeder der sechs Hauptspiegel ein Cassegrain-System von 57,6 m Brennweite ( $f/32$ ). Planspiegel, die vor den



**Bild 23.2** Optisches System des Mount Hopkins-MMT: A, B zwei der sechs Cassegrain-Teleskope; 1 1,8-m-Hauptspiegel; 2 Sekundärspiegel; 3 Umlenkspiegel; 4 prismatischer Spiegelkörper zur Strahlenkombination; 5 gemeinsamer Fokus; C Ritchey-Chrétien-Leit- und -Justierteleskop; D Schema der sechs Aperturkegel im gemeinsamen Bildort

Hauptspiegeln angeordnet sind, lenken die Strahlenlänge der sechs Teleskope in den zentralen Teil der Trägerstruktur, wo sie auf je eine von sechs Flächen eines pyramidenförmigen Spiegelkörpers treffen. Dieser wirkt als Strahlenvereiniger (beam combiner), der die Bilder der sechs Teleskope überlagert. Hier ist also gegenüber Synges Vorschlag ein grundlegender Unterschied zu sehen, der Vor- und Nachteile mit sich bringt: Synges Linsenkollimatoren und sein nachgeschaltetes Teleskop fallen fort, aber dafür wird in Kauf genommen, daß die optischen Achsen der sechs Teleskope um kleine Winkel gegeneinander geneigt sind und damit auch die Bildebenen kleine Verkippungen zueinander aufweisen. Meinels Untersuchungen hatten ergeben, daß die dadurch entstehenden Bildverschlechterungen innerhalb eines Feldes von etwa 4' hinreichend klein bleiben.

Außer den oben genannten Gegenspiegeln wurde das MMT mit einem zweiten Satz Gegenspiegel ausgerüstet, der speziell für Arbeiten im Infraroten bestimmt ist. Diese Spiegel haben nur 230 mm Durchmesser (geringere thermische Strahlung) und können moduliert werden (wobbeln), um die Hintergrundstrahlung auszuschalten.

Im Zentrum des Sechsecks, das die sechs Teleskope bilden, befindet sich ein 750-mm-Ritchey-Chrétien-System mit einer Brennweite von 12,850 m als Leitteleskop. Mit diesem kann ein komafreies Bildfeld von

etwa  $1^\circ$  erreicht werden. Der Hauptspiegel wurde aus Cervit gefertigt. Das Leitteleskop ist für lichtelektrische Nachführung bzw. Fernsehbeobachtung ausgestattet. In Verbindung mit der Laserjustierungssteuerung dient es als Justierbasis.

Die Optik wurde unter Leitung von R. Shannon im Optical-Sciences-Center in Tucson gefertigt. Die Bearbeitung der Hauptspiegel erfolgte gleichzeitig an zwei Maschinen von 2,5 m Tischdurchmesser. Bei der Bearbeitung war besonders darauf zu achten, daß alle Paraboloiden die gleiche Brennweite bekommen. Zuerst wurden die Spiegel sphärisch bearbeitet, um eventuelle Asymmetrien zu erkennen. Bei der nachfolgenden Deformation wurde entschieden, die Spiegelrandzone nicht mit zu deformieren, weil diese für die Laserjustiertechnik benötigt wird und gleichzeitig eine verlässliche Referenzfläche für die Herstellung der Paraboloiden bildete. Zunächst wurde die Fertigung der Asphären durch die Messung von Längsaberrationen überwacht. Als die Abweichungen der Flächen nur noch etwa  $2 \mu\text{m}$  von der Soll-Asphäre betragen, wurde mit Hilfe einer Kompensationsoptik interferometrisch geprüft.

Durch dieses Verfahren wurde gewährleistet, daß die vorgegebene Asphäre erreicht wurde. Die Gegenspiegel wurden gegen eine konkav-hyperbolische Prüfplatte als Master mittels eines Fizeau-Interferometers geprüft. Die Prüfplatte selber war mittels einer Kompensationsoptik ebenfalls interferometrisch geprüft worden. So wurde gewährleistet, daß alle Gegenspiegel gleiche Parameter haben.

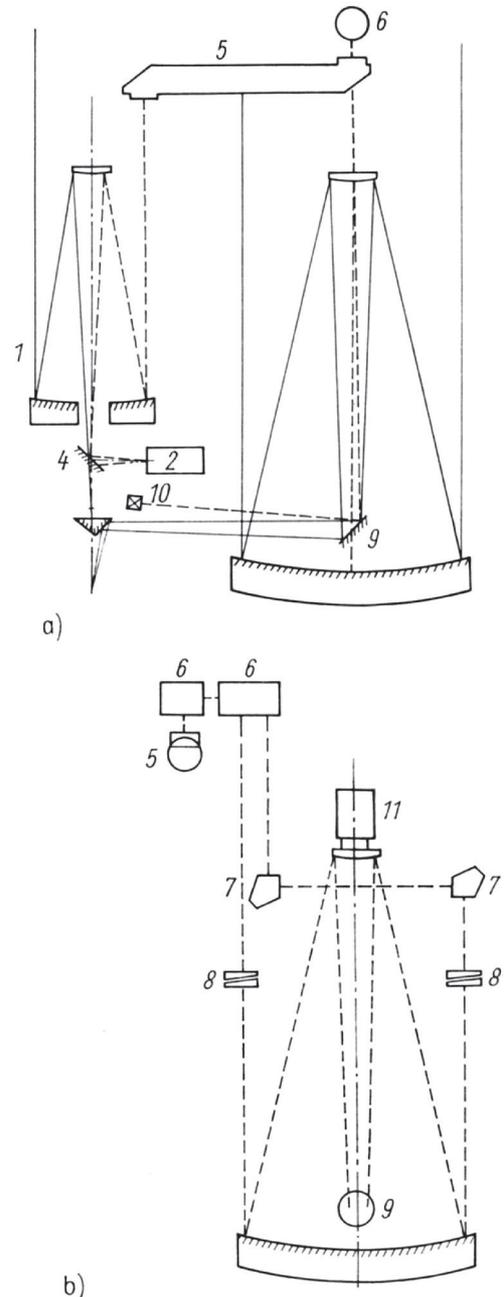
Ende 1975 war die Bearbeitung der Hauptspiegel beendet; es folgten aber ausgedehnte Prüfungen. Im Mittel lagen die Abweichungen der Spiegel bei etwa  $\lambda/10$ , und die Spot-Konzentration betrug 90% bei  $0'',6$ . Trotz guter Spot-Konzentration zeigen die Schneidenaufnahmen der Systeme relativ ausgeprägte Zonen, die offenbar von den Gegenspiegeln herrühren. Bei der Prüfung im Teleskop wurden Halbwertsdurchmesser der Sternbilder von  $0'',5$  gemessen.

Die sieben Teleskope sind mit ihren zusätzlichen Einrichtungen in einer gemeinsamen gitterartigen Optikträgerstruktur untergebracht. Bei leichter Bauweise mußte sie eine hohe Steifigkeit aufweisen, um die Lagegenauigkeit der mehr als 100 optischen Elemente zu gewährleisten. Erleichternd für die Konstruktion war die alt-azimutale Montierung; aber Probleme brachten die zahlreichen Servoantriebe der Justierungssteuerung, die keine Schwingungen durch Resonanzfrequenz verursachen dürfen. Die sechs Spiegel der Hauptteleskope sind auf je drei festen Punkten gelagert und werden durch Luftkissenlager mit höhenabhängiger Druckvariation entlastet.

Die Teleskope mit ihrer Optikträgerstruktur werden von einer Gabelmontierung aufgenommen, deren Masse etwa 90 t beträgt. Als Höhenlager dienen zwei vorgespannte Standard-Kugellager. Auch als Azimutlager wurde aus Kostengründen ein Wälzlager von 2,5 m Durchmesser verwendet. Die Steifigkeit von Gabel und Lager gegen Querbelastungen, zum Beispiel durch zeitweilige Balance oder Windkräfte, beträgt  $0,1 \cdot 3000 \text{ N/m}$ . Beide Achsen werden durch nahezu identische Systeme von Gleichstrom-Torque-Motoren in Verbindung mit geradzahnten Stirnrädern mittlerer Qualität angetrieben. Jede Achse hat zwei Antriebssysteme, um ein Spiel auszuschalten. Die Motorgeschwindigkeit wird durch Tachogeneratoren in einem Lageregelkreis variiert. Die Nachführgenauigkeit wird durch direkt mit den Achsen gekoppelte 24-bit-Induktosyngeber kontrolliert. Die Absolutgenauigkeit beträgt  $1''$ ; in kleinen Bereichen ist eine Relativgenauigkeit von  $0,08$  erreichbar.

Ein Computer bestimmt die Soll-Werte zu den gewünschten Sternkoordinaten unter Berücksichtigung von Zeit, Refraktion, Aberration, Teleskopbiegung und Aufstellungsfehlern. Die im Vergleich zu den Geberwerten ermittelte Differenz wird durch das Regelsystem ausgeglichen. Nach Korrektur systematischer Fehler wurde eine Nachführgenauigkeit von  $0,25$  innerhalb von zehn Minuten erreicht. Da die gleichen Antriebe für Grob- und Nachführbewegung benutzt werden, kann auch in Zenitnähe die Azimutdrehung mit einer Maximalgeschwindigkeit von  $1,5 \text{ }^\circ/\text{s}$  erfolgen. Die Totzone im Zenit hat dadurch nur noch einen Radius von  $0,14^\circ$ , stellt also praktisch keine Einschränkung bei der Beobachtung dar. Die Maximalgeschwindigkeit von  $1,5 \text{ }^\circ/\text{s}$  kann innerhalb von fünf Sekunden erreicht werden.

Das Hauptproblem eines Multiple-Mirror-Teleskops stellt die Erreichung und fortwährende Aufrechterhaltung des optimalen Justierzustands dar. Es ist erforderlich, die Bilder aller sechs Teleskope ständig so zur Deckung zu bringen, daß die Abweichungen kleiner sind als die durch Szintillation, Nachführfehler und Eigenschaften der Optik der einzelnen Teleskope bedingten Zerstreungsscheibchen der Sternbilder.



**Bild 23.3** Schema der Laserjustierung des MMT (eines der sechs Hauptteleskope ist im Schnitt b) gegenüber Schnitt a) um  $90^\circ$  gedreht): 1 Leitrohr und Justierkollimator; 2 Laser; gestrichelte Linie: Laserstrahlen; 4 Spiegel, teildurchlässig; 5 eines von drei Periskopen (im Schnitt A um  $30^\circ$  relativ zum Hauptteleskop aus der Zeichenebene gedreht); 6 Strahlenteil- und Umlenkprisma; 7 Pentaprismen; 8 Prismenkeile; 9 Umlenkspiegel; 10 Quadrantenempfänger; 11 Stellantrieb zur Spiegeljustierung

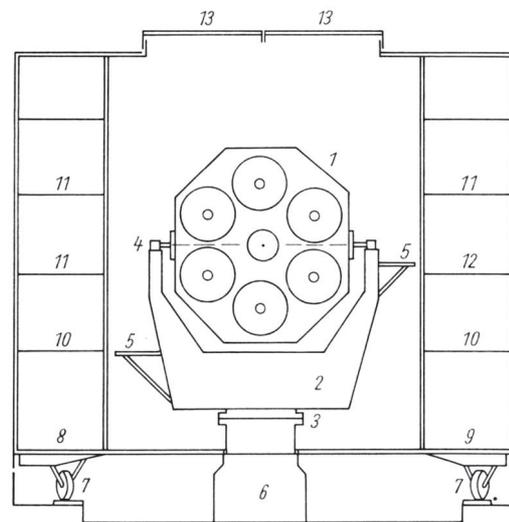
Bei der Projektierung des MMT war man von geringeren Forderungen ausgegangen; aber als sich später zeigte, daß sowohl die atmosphärischen Bedingungen des Standorts als auch die Abbildungsgüte der einzelnen Teleskope die Erwartungen übertrafen, wurden auch die Ansprüche an die Justierung erhöht und Justierabweichungen von nur etwa  $0",1$  angestrebt.

Die Feinjustierung erfolgt durch die Cassegrain-Gegenspiegel der sechs Teleskope, die durch je drei Stellmotore axial verstellt und in zwei Richtungen gekippt werden können. Durch Vorjustage und durch hinreichende Steifigkeit der Tubuskonstruktion muß gewährleistet sein, daß für alle sechs Teleskope die Abweichungen innerhalb der Justierbereiche der Feinjustierung bleiben.

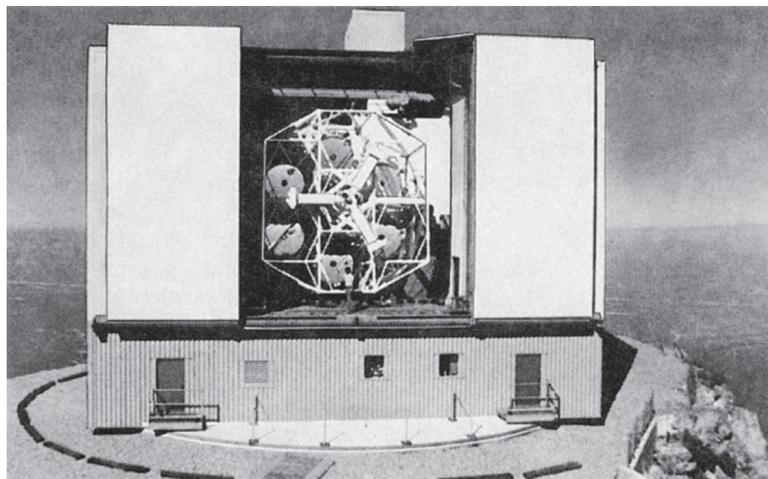
Zwei unterschiedliche Methoden für die Bestimmung des Justierzustands wurden entwickelt. Bei der ersten werden die Orte der Bilder eines Sternes in der gemeinsamen Bildebene der sechs Teleskope mit einer CID-Kamera für jedes der sechs Teleskope festgestellt und gespeichert. Ein Rechner leitet daraus die Justierbefehle für die einzelnen Teleskope ab. Die CID-Kamera besitzt ein Empfängerarray von  $128 \times 128$  Detektoren, deren kleinste Abstände in der Bildebene Winkeln von  $0",16$  entsprechen. Nachteilig ist das kleine Feld und die Notwendigkeit, innerhalb dieses Feldes einen Stern hinreichender Helligkeit ( $m_v < 10$ ) zu haben. Anstelle der CID-Kamera kann auch eine hochempfindliche Fernsehkamera eingesetzt werden (Reichweite bis  $m_v = 18$ ), die gleichzeitig auch zur automatischen Nachführung dient.

Die zweite Methode zur Bestimmung des Justierzustands ist unabhängig vom Vorhandensein von Sternen im Bildfeld des Teleskops. Sie beruht auf der Anwendung von Laserstrahlen, mit denen ein künstliches Referenzsystem geschaffen wird (Bild 23.3). Das zentrale Leitteleskop dient dabei als Justierbasis, indem es als Kollimator genutzt wird, der die Laserstrahlen achsenparallel austreten läßt. Die aus der Öffnung des Leitteleskops austretenden Laserstrahlen werden mittels langer Periskope in die Öffnungen der Hauptteleskope gelenkt. Durch die Verwendung von Dachkant- und Pentaprismen sind diese Strahlengänge gegen mechanische Verlagerungen unempfindlich. Zwei parallel auf gegenüberliegenden Seiten in ein Hauptteleskop eintretende Strahlen treffen nach Reflexion an Hauptspiegel, Gegenspiegel und Umlenkspiegel auf positionsempfindliche Siliziumdetektoren (Quadrantenempfänger), mit denen die Abweichungen vom idealen Justierzustand, und zwar Richtungs- und Fokussierungsfehler, festgestellt werden. Durch Ansteuerung der Servosysteme erfolgt eine Kompensation der Fehler.

Wie das Teleskop, so unterscheidet sich auch dessen Unterbringung vom konventionellen Bild einer Sternwarte. Die Suche nach einer kostengünstigen Lösung führte zu einem kästförmigen Gebäude, das mit dem Teleskop mitrotiert (Bilder 23.4, 23.5). Tests im Windtunnel hatten keine wesentliche Verschlechterung gegenüber den üblichen Gebäude- und Kuppel-



**Bild 23.4** MMT-Gebäude, schematischer Aufbau: 1 MMT-Struktur (in horizontaler Lage), 2 Gabel; 3 Azimut-Lager; 4 Altitude-Lager; 5 Nasmyth-Plattformen; 6 Pfeiler; 7 Räder und Laufschienen für Gebäuderotation; 8 Aufenthaltsraum; 9 Kältetechnik; 10 Rechner- und Kontrollräume; 11 Laboratorien; 12 Beobachtungsraum für Nasmythfokus; 13 Spaltschieber



**Bild 23.5** Das Multiple-Mirror-Teleskop auf dem Mount Hopkins

formen ergeben. Vorteile brachte die Kastenform durch eine gute Ausnutzung für Arbeitsräume sowie durch die offenere Bauweise, die sich auf das Kuppelklima und das seeing günstig auswirkte.

Das Gebäude ist eine Stahlstruktur, verschraubt und verschweißt und mit Wellblech und isolierenden Schaumstoffplatten verkleidet. Es ist 19,4 m breit, 13,3 m tief und 16,2 m hoch mit einer Masse von insgesamt 450 t. Es kann Wind und Böen bis zu 225 km/h ohne Schaden überstehen. In den beiden seitlich des Teleskops befindlichen Gebäudeteilen sind in fünf Ebenen Räume für Ausrüstung, Rechen- und Steuerungstechnik sowie für die verschiedensten Aufgaben untergebracht. Insgesamt stehen 900 m<sup>2</sup> Nutzfläche zur Verfügung. Der eigentliche Teleskopraum ist, auch gegenüber den Arbeitsräumen, thermisch isoliert und kann außerdem noch aktiv gekühlt werden, um das Teleskop auf die zu erwartende Nachttemperatur zu bringen. Zwei große Spaltschieber geben einen Spalt von 8,7 m Breite frei. Geöffnet ragen sie nicht über das Gebäude hinaus, sondern bedecken die seitlichen Teile mit den Arbeitsräumen.

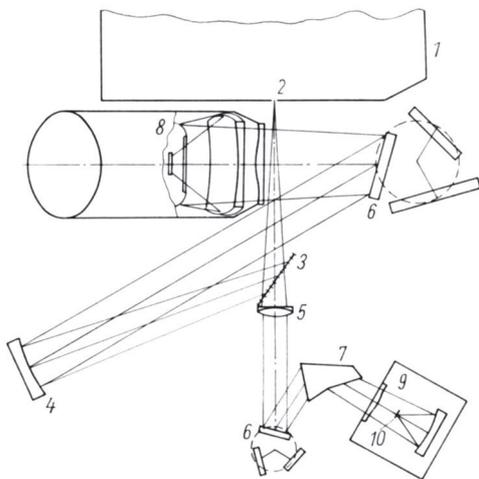
Das gesamte Gebäude wird getragen und rotiert auf vier großen Rädern auf einer Laufschiene von 17,5 m Durchmesser. Zwei gegenüberstehende Räder werden durch Motoren über Getriebe angetrieben. Vier radiale Räder zentrieren die Bewegung gegen eine weitere Schiene. Normalerweise ist die Drehbewegung des Gebäudes mit der Azimutdrehung des Teleskops gekoppelt. Eine unabhängige Relativbewegung von 15° ist möglich. Zum Gebäude gehören auch ein Brückenkran, Personen- und Lastenaufzüge und eine Holzbühne, um an den Cassegrain-Fokus gelangen zu können.

Als *Frank Low* erste Anregungen zum Bau des Multiple-Mirror-Teleskops gab, wollte er die lichtsammelnde Auffangfläche für seine IR-Untersuchungen vergrößern. Im Laufe der Entwicklung wurde aber erkannt, daß ein MMT viele weitere interessante Möglichkeiten für Untersuchungsmethoden bietet, sofern diese auf die Nutzung eines kleinen Bildfelds beschränkt sind. Die Zielstellungen wurden entsprechend erweitert und Zusatzeinrichtungen für die verschiedensten Aufgaben entwickelt. Der bildmäßigen Aufzeichnung dienen CCD-Kameras. Sie werden auch in Verbindung mit interferometrischen Aufgaben genutzt. Eine optische Speckle-Kamera dient Methoden der Speckle-Interferometrie. Mit fünf Photometern sind photometrische und spektral-photometrische Arbeiten im Bereich von 300 bis etwa 30000 nm bei hohen Empfindlichkeiten möglich. Spektroskopischen Aufgaben dient ein großer MMT-Gitterspektrograph sowie ein Echelle-Spektrograph.

Die Zusatzeinrichtungen werden im Quasi-Cassegrain-Fokus eingesetzt. Die Anbringung in einem der beiden Nasmyth-Foki, bei denen der Strahlengang durch die horizontale Teleskopachse geführt wird, wurde ebenfalls geplant.

Bei der optischen Anpassung von Zusatzeinrichtungen an das MMT muß auf die besonderen Pupillen- und Aperturverhältnisse des Teleskops Rücksicht genommen werden; die sechs Aperturkegel der einzelnen Teleskope mit einem Öffnungsverhältnis von je etwa  $f/32$  bilden nach Vereinigung durch den beam-combiner einen einhüllenden Aperturkegel, der etwa einem Öffnungsverhältnis von  $f/79$  entspricht und dessen zentraler Teil ungenutzt ist.

Spezielle optische Anpaßprobleme waren bei dem großen MMT-Spektrographen zu lösen (Bild 23.6). Mit ihm werden quantitative Spektren von Sternen und kleinen stellaren Objekten bei Subtraktion des Himmelshintergrundes im Wellenlängenbereich von 300 nm bis 1000 nm gewonnen. Zur Lösung dieser Aufgabe wurden zwei



**Bild 23.6** Der MMT-Spektrograph ( $X = 300 \dots 1000$  nm): 1 Anschlußeinheit mit Einrichtungen zur Bildkontrolle, Aperturanpassung und für Vergleichslichtquellen; 2 Eintrittsspalt; 3 dichroitischer Strahlenteiler; 4 Kollimatorspiegel (Off-axis-Paraboloid) für kurzwellige Strahlung; 5 Kollimatorobjektiv für langwellige Strahlung; 6 Gitter, austauschbar; 7 Prisma mit konstanter Ablenkung; 8 gefaltete Schmidt-Kamera  $f = 250$  mm ( $f/1$ ) mit Reticon; 9 Schmidt-Kamera, gekühlt; 10 CCD-Empfänger

moderne 2dimensionale elektronenoptische Empfänger eingesetzt - für den längerwelligen Bereich eine CCD-Matrix und für die kurzwellige Strahlung ein Reticon -, da mit einem Empfängertyp nicht der gesamte Bereich überstreichbar ist. Wegen der sehr unterschiedlichen Abmessungen der beiden Empfänger wird der Strahlengang nach Passieren des Spektrographenspalts durch einen dichroitischen Strahlenteiler

in zwei optische Kanäle aufgespalten. Jeder optische Kanal besitzt eine eigene Kollimatoroptik, drei wahlweise einschaltbare Gitter sowie als Kameraoptik ein dem Empfänger angepaßtes Schmidt-System.

Der Spektrographenspalt hat eine Höhe von 50 mm, so daß von flächenhaften Objekten Schnitte von etwa 3' Winkelausdehnung untersucht werden können. Eine originelle Möglichkeit des MMT besteht darin, durch Justierung der sechs Teleskope die sechs Bilder eines Objekts übereinander zu „stapeln“, um den Spalt optimal auszuleuchten. Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch die getrennte Abbildung der Spektren nahezu punktförmiger Objekte auf der CCD-Matrix und ihre nachträgliche elektronische Überlagerung und Auswertung.

Das MMT auf dem Mount Hopkins hat die Erwartungen seiner Schöpfer erfüllt. Beobachtungen haben inzwischen bestätigt, daß das MMT im Infraroten so arbeitet, als wäre es ein normales Infrarot-Teleskop von 4,5 m Durchmesser. Ein erstes Beispiel für die Leistungsfähigkeit war die Identifizierung der Radioquelle 0332+78 mit einer Helligkeit von  $18^m40 \pm 0,25$  bei einer Wellenlänge von 2,2  $\mu\text{m}$ . Es war die erste extragalaktische Infrarot-Strahlungsquelle, die im Visuellen nicht gefunden werden konnte.

Am interessantesten sind aber die Ergebnisse, die mit dem MMT bei Benutzung als Interferometer und durch Anwendung der Speckle-Interferometrie erzielt wurden, weil hier das Auflösungsvermögen eines Teleskops von etwa 6,9 m Öffnung erreicht wird.

Die Perspektiven der MMT-Idee sind kaum abzusehen; schon jetzt gibt es Pläne für größere Teleskope dieser Art.

### Literatur zum Abschnitt 23

*Beckers, J. M.*, u. a.: The Multiple Mirror Telescope. In: Telescopes for 1980 s. pp. 63-128 {1980} Annual Review Inc.

*Carleton, N. P.; Hoffmann, T. E.*: The MMT Observatory on Mount Hopkins, Sky and Telescope Vol. 52 (1976)

*Hege, E. K.*, u. a.: Multiple mirror telescope as a phased array telescope. Applied Optics, Vol. 24 (1985) Aug., pp. 2565-2576

*Meinel, A. B.*: Aperture Synthesis Using Independent Telescopes. Applied Optics Vol. 9 (1970) No. 11, pp. 2501-2504

*Synge, E. H.*: A Design for a very large Telescope. The London, Edinburgh and Dublin. Philosophical Magazine and Journal of Science Vol. X. Seventh Series Aug. (1930) pp. 353-360