

AZ 885.8

*Sonderabdruck
aus den Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen
Mathematisch-Physikalische Klasse 1958*

VERÖFFENTLICHUNGEN
DER
UNIVERSITÄTS-STERNWART ZU GÖTTINGEN
Nr. 122

Das Turmteleskop der Göttinger Sternwarte II

(Instrumentelle Ergänzungen und Verbesserungen)

Von

Paul ten Bruggencate und Hans/Heinrich Voigt

JAN 20 1959

PHILLIPS LIBRARY
Harvard College Observatory
Cambridge 38, Mass.

Göttingen 1958

(123)

Gesamtherstellung : Hubert & Co., Göttingen

Veröffentlichungen der Universitäts-Sternwarte zu Göttingen
No. 122

The Tower Telescope of the University Observatory Göttingen
II Improvements and additional Instrumentation

by

Paul ten Bruggencate and Hans-Heinrich Voigt

Since the last report in 1951 extensive alterations have been made to the equipment installed in the solar tower, which are described in the present publication.

I. The tower telescope

After a series of experiments a diaphragm with a rotating sector attached was installed below the coelostat in order to reduce the effect of differential heating of the main paraboloid by the beam after its reflection from the Cassegrain mirror. The diaphragm is removed during the exposures. A brief description is given of a modified Gregory-Coudé telescope with a Lyot diaphragm, presently under construction.

II. The spectrograph

- 1) Electronic equipment capable of timing exposures from 0.1^s to 1000^s with high consistency has been attached behind the slit.
- 2) Two new plane gratings have been acquired: viz. a Babcock grating from Mt. Wilson and a blazed grating from Bausch and Lomb.
- 3) A Bausch and Lomb concave grating has been installed in the Runge-Paschen mounting to enable the first order spectrum from $3800 \text{ \AA} - 6800 \text{ \AA}$ or from $5800 \text{ \AA} - 8800 \text{ \AA}$ to be photographed simultaneously without moving the slit, grating or plateholder. Two cylindrical lenses are available to compensate for the effect of astigmatism.

III. Additional apparatus

- 1) Photoelectric equipment has been constructed for use in conjunction with either of the plane gratings. This comprises two photomultipliers whose output yields a direct recording of the difference or quotient of the continuum and line intensities. This arrangement eliminates the effect of scintillation.
- 2) A Lyot interference filter with $0,6 \text{ \AA}$ band width centred on the $H \alpha$ line has been installed in front of the slit, and is used for guiding prominences, filaments or chromospheric structures on the slit.
- 3) A single-prism monochromator serves as a pre-disperser for the main spectrograph.
- 4) A new standardisation grating spectrograph is used in conjunction with a Wolfram-band lamp and a neutral wedge which is placed directly in front of the plate.

Das Turmteleskop der Göttinger Sternwarte II (Instrumentelle Ergänzungen und Verbesserungen)

Von *P. ten Bruggencate* und *H. H. Voigt*

Vorgelegt in der Sitzung vom 9. Mai 1958

Einleitung

Im Jahre 1951 wurde erstmals über den Bau und die Einrichtung des Göttinger Turmteleskops für sonnenphysikalische Arbeiten berichtet [3]. In den sieben Jahren, die seither vergangen sind, ist außer dem eigentlichen Turmteleskop selbst das gesamte Instrumentarium (Spektralanlage, Zusatz- und Hilfsapparaturen) durch neue Instrumente ergänzt, bzw. verbessert worden. Da diese Arbeiten nunmehr zu einem gewissen Abschluß gekommen sind, ist es wohl gerechtfertigt, darüber zu berichten, zumal die in Göttingen gesammelten instrumentellen Erfahrungen u. U. auch für andere Sonnenstationen von Nutzen sein können. Es handelt sich dabei, neben kleineren Änderungen, vor allem um die Aufstellung zweier neuer Plangitter, eines Konkavgitters und eines Interferenzfilters, um die Entwicklung eines photoelektrischen Registriergeräts und einer elektronischen Einrichtung zur genauen Reproduktion kurzer Belichtungszeiten, sowie um den Umbau des Monochromators und des Standardisierungsspektrographen.

I. Das Turmteleskop

Die Optik des Turmteleskops ist unverändert geblieben. Wegen Einzelheiten wird auf [3] verwiesen. Es seien nur die wichtigsten Daten noch einmal kurz zusammengestellt, soweit sie für das Verständnis des Folgenden notwendig sind. Es handelt sich um ein senkrecht stehendes Teleskop vom Cassegrain-Typ, dem das Sonnenlicht von einem Zeiß-Coelostaten (zwei Planspiegel mit je 65 cm Durchmesser) zugeleitet wird. Als Hauptspiegel dient ein Parabolspiegel von 45 cm Öffnung und 3 m Brennweite. Der 40 cm vor dem Primärbrennpunkt angebrachte Cassegrain-Spiegel, ein konvexer Hyperbolspiegel von 10 cm Durchmesser, verleiht dem Fernrohr eine effektive Brennweite von 24 m¹⁾. Durch einen kurz oberhalb des Primärspiegels angebrachten 10 cm großen Coudé-Spiegel wird das Licht seitlich auf den Spalt des Spektrographen oder je nach

¹⁾ Ein wahlweise zu verwendender zweiter Cassegrain-Spiegel, der eine effektive Brennweite von 16,5 m erzielt, wurde bisher praktisch nie benutzt, da sich für alle bearbeiteten Probleme die längere Brennweite als vorteilhafter erwies.

Bedarf in irgendeine andere horizontale Richtung reflektiert. Das gesamte Fernrohr entwirft ein 22 cm großes Sonnenbild, von dem infolge der Abmessungen des Cassegrain- und des Coudé-Spiegels jedoch nur ein kleiner Ausschnitt von rund 5' Durchmesser auf der Spaltwand vignettierungsfrei abgebildet wird. Für Orientierungszwecke wird durch eine Hilfoptik neben dem Hauptfernrohr ein Übersichtsbild der gesamten Sonne von 19 cm Durchmesser entworfen. Dazu wird das Lichtbündel verwendet, das sonst durch die Halterung des Cassegrain-Spiegels ohnehin verloren gehen würde.

Die elektrische Einrichtung des Teleskops (Nachführung des Coelostaten-Hauptspiegels entsprechend der täglichen Bewegung; Höhen- und Azimutverstellung der beiden Coelostatenspiegel, um bei jedem Sonnenstand eine volle Ausleuchtung zu erreichen; Grob- und Feinbewegung der Coelostatenspiegel zur Einstellung und Nachführung bestimmter Objekte; Fokussierung) wird jetzt über einen Gleichrichter direkt aus dem Netz gespeist, kann jedoch in Fällen von Stromausfall ohne weiteres wieder auf den ursprünglichen Akkumulatorenbetrieb umgeschaltet werden.

Die Erfahrung hat gezeigt, daß bei normalen Wetterlagen nach anfänglich guter Bildqualität am frühen Morgen im Laufe des Vormittags eine zunehmende Verschlechterung eintritt. Zum größten Teil ist sie durch unbeeinflussbare Vorgänge in der Atmosphäre selbst bedingt, teils beruht sie aber auch auf instrumentellen Ursachen. Einmal bewirkt die zunehmende Erwärmung des Gebäudes und des Innenraumes der Kuppel turbulente Luftbewegungen unmittelbar vor dem Instrument und am Coelostaten. Um diesem Effekt vorzubeugen, wurde das gesamte Gebäude von außen und der Kuppelinnenraum (Fußboden, Wände und Kuppel selbst) weiß gestrichen. Die wesentliche instrumentelle Bildverschlechterung kommt jedoch durch Deformation der verschiedenen Spiegel infolge ihrer zunehmenden Erwärmung zustande. Man könnte daran denken, die Spiegel nur während der eigentlichen Belichtungszeit für die Sonnenstrahlung frei zu geben. Dies würde aber bei den meisten Beobachtungsprogrammen, die spezielle Forschungsaufgaben betreffen, eine zu starke Behinderung bedeuten. Denn erfahrungsgemäß nehmen das Aufsuchen und Einstellen bestimmter Objekte auf der Sonne sowie die Einstellung der Spektrographen und Zusatzgeräte wesentlich längere Zeit in Anspruch als die eigentliche Aufnahme.

Im Sommer 1957 wurden darum mehrere Versuchsreihen durchgeführt, um den Einfluß der verschiedenen Spiegel auf die Verschlechterung der Bildqualität zu untersuchen. Dabei ergab sich folgendes: Die weitgehend gleichmäßige Erwärmung der aus Tempax-Glas bestehenden Coelostatenspiegel bewirkt nur eine geringe Änderung des Fokus von einigen cm, die durch entsprechendes Nachfokussieren kompensiert werden kann, während die Güte der eigentlichen Abbildung kaum beeinträchtigt wird. Sehr viel empfindlicher ist der Einfluß des ebenfalls aus Tempax-Glas hergestellten Parabolspiegels. Seine allgemeine Erwärmung bewirkt Fokusänderungen bis zu einigen dm. Ferner zeigt sich eine

merkliche Verschlechterung der Bildqualität, die dadurch zustande kommt, daß nur ein Teil des vom Cassegrain-Spiegel reflektierten Sonnenlichtes, ein Bündel mit etwa 20 cm Durchmesser am Ort des Coudé-Spiegels, durch den Coudé-Spiegel seitlich abgelenkt wird, während das übrige Licht auf den Parabolspiegel zurückfällt. Dieses Lichtbündel bewirkt eine differentielle Erwärmung und damit eine lokale Deformation des Parabolspiegels. Hier wurde auf folgende Weise wirksame Abhilfe geschaffen. Unmittelbar unterhalb des Coelostaten-Hilfsspiegels im senkrechten Strahlengang wurde eine seitlich herausschwenkbare Blende mit zwei Öffnungen von je 10 cm Durchmesser angebracht. Die eine Öffnung im Zentrum der Blende gibt den Lichtweg für das Hilfssonnenbild frei, so daß auch bei geschlossener Blende das Übersichtsbild der Sonne bestehen bleibt. Durch die zweite, exzentrische Öffnung gelangt ein enges Lichtbündel auf den Parabolspiegel und entwirft über den Cassegrain- und Coudé-Spiegel ein in der Intensität stark reduziertes Bild des interessierenden Gebiets der Sonne auf der Spaltwand. Auf der Blende ist außerdem ein rotierender Sektor angebracht, der die Intensität dieses exzentrischen Lichtbündels noch einmal auf die Hälfte abschwächt. Die verbleibende Intensität reicht zur Einstellung und Vorbereitung der eigentlichen Aufnahme noch gut aus, während gleichzeitig die ungleichmäßige Erwärmung des Parabolspiegels und die Erwärmung der übrigen Teile des Fernrohrs etwa auf $1/40$ herabgesetzt wird. Die Einführung dieser Blende ist so wirksam, daß die Wasserkühlung des Cassegrain-Spiegels, die bisher wegen der starken Erhitzung dieses Spiegels erforderlich war (der Spiegel liegt in der Nähe des primären Brennpunktes), nicht mehr nötig ist, sondern im Gegenteil abgeschaltet werden muß, um ein Beschlagen des Spiegels zu verhindern. Während der Belichtungszeit wird die Blende kurzzeitig seitlich herausgeschwenkt, um die volle Öffnung des Turmteleskops frei zu geben. Diese seitliche Bewegung wird durch einfaches Aus- und Einschalten des rotierenden Sektors betätigt; der beim Abbremsen oder In-Gang-Kommen der Sektorrotation übertragene Drehimpuls bewirkt dabei automatisch das Heraus- oder Hereinschwenken der Blende.

Darüber hinaus wurden die Ränder und die Rückflächen aller Spiegel des Turmteleskops mit Leitsilber bestrichen, um einen möglichst raschen Temperaturengleich zwischen verschiedenen stark erwärmten Teilen der Glaskörper zu erzielen²⁾.

²⁾ Neben den hier erwähnten Schwierigkeiten, die bei der Verwendung eines Cassegrain-Spiegelteleskops für Sonnenbeobachtungen auftreten, ist noch das starke Streulicht am Cassegrain-Spiegel zu erwähnen, da dieser ja praktisch das gesamte Licht der Sonnenscheibe auffängt, während im Spektrographen nur Licht von einem Punkt der Scheibe und seiner nächsten Umgebung gebraucht wird. Es liegt deshalb nahe, zu überlegen, ob sich bei Sonnenbeobachtungen unter Festhalten an einem Reflektor die Nachteile eines Cassegrain-Spiegelteleskops nicht vermeiden lassen. Im Anschluß an einen Gedanken von P. ten Bruggencate sind z. Zt. Vorarbeiten im Gang, für Sonnenbeobachtungen ein Gregory-Spiegelteleskop in Kombination mit einer Art Lyot-Blende im Primärfokus nutzbar zu machen. Die nebenstehende Skizze gibt den Verlauf des Strahlengangs

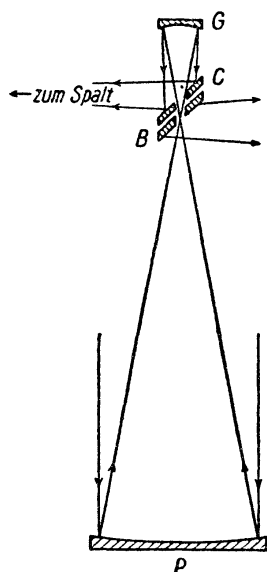
II. Die Spektralanlage

1. Spalt

Der von Mechanikermeister Duensing zu einem wesentlichen Teil neu entwickelte Präzisionsspalt, der eine Parallelität der Spaltbacken und eine Reproduzierbarkeit der Spaltbreite auf $1/1000$ mm gestattet, wurde bereits in [3] ausführlich beschrieben. Er hat sich gut bewährt und ist unverändert geblieben.

Zusätzlich wurde in den Spalttubus neben der mechanischen eine elektronisch gesteuerte Belichtungsklappe eingebaut. Die neuen lichtstarken Gitter gestatten es nämlich, Spektren mit Belichtungszeiten von wenigen Sekunden aufzunehmen. Andererseits erfordern Anschlußaufnahmen (z. B. Anschluß Fleck — Photosphäre) die Einhaltung genau gleicher Belichtungszeiten, möglichst innerhalb weniger Prozent. Das läßt sich mit einer Stoppuhr nicht mehr durchführen und auch die handelsüblichen Photoverschlüsse erreichen gerade in dem Bereich von einigen zehntel bis zu mehreren Sekunden nicht die geforderte reproduzierbare Genauigkeit. Bisher mußte in solchen Fällen die Belichtungszeit durch Vorschalten von Neutralfiltern künstlich heraufgesetzt werden. Es wurde darum ein neuer elektronischer Belichtungsschalter entworfen und gebaut, der den Bereich von 0.1 bis 1000 sek in Stufen von $1 : \sqrt[3]{10}$ überdeckt. Als Meßprinzip wurde wie üblich die Aufladung eines Kondensators über einen Widerstand benutzt, doch wurde zum Erreichen der erforderlichen Genauigkeit 1. die Ladekurve durch eine besondere Schaltung linearisiert und 2. das Schaltrelais durch einen Multivibrator ausgelöst. Der Fehler der Belichtungszeit hängt im wesentlichen von der Konstanz der benutzten Kondensatoren und Widerstände ab und bleibt im Zeitraum von einigen Stunden unter $\pm 1\%$ der Be-

wieder. Im Primärfokus des Parabolspiegels P befindet sich unter 45° zur optischen Achse eine mit zentraler Bohrung versehene, spiegelnde Fläche B mit elliptischer Umrandung



(halbe große Achse etwas größer als $\sqrt{2} \times$ Durchmesser des Sonnenbildes). Rücken an Rücken mit dieser Blende, aber mit einem geringen Luftzwischenraum, ist der ebenfalls zentral durchgebohrte Coudé-Spiegel C angebracht. Nur das Licht, das durch die zentralen Bohrungen auf den Gregory-Spiegel G fällt, wird von diesem über den Coudé-Spiegel zum Spalt des Spektrographen reflektiert. Alles übrige Licht der Sonnenscheibe wird durch die Lyot-Blende B seitlich herausgeworfen. Es ist notwendig, daß die Blende mit einer Wasserkühlung versehen wird. Durch Wahl der Brennweiten des Parabolspiegels und des Gregory-Spiegels, sowie des Abstandes des Gregory-Spiegels vom Primärfokus kann man die effektive Brennweite des Gesamtsystems in weiten Grenzen variieren. Je nach der Größe der Lochblende kann man ein mehr oder weniger großes Gebiet der Sonnenscheibe abbilden. Es ist leicht zu sehen, daß dieser Typ von Spiegelteleskop alle Schwierigkeiten vermeidet, die notwendigerweise bei einem Cassegrain-System auftreten.

lichtungszeit. (Da Anschlußaufnahmen immer unmittelbar vor oder nach der Aufnahme des eigentlichen Objekts vorgenommen werden, wird nur eine Konstanz über einen Zeitraum von etwa 20 Minuten gefordert.) Bei sehr kurzen Belichtungszeiten wird die Genauigkeit begrenzt durch die mechanische Unsicherheit der Belichtungsklappe, die bei etwa $\pm 0,03$ sek liegen dürfte. Jedoch kommen Belichtungszeiten unter 1 sek kaum vor. Besonderer Wert wurde bei der Konstruktion darauf gelegt, das Gerät weitgehend unempfindlich gegenüber Bedienungsfehlern zu machen (keine Doppelbelichtung, wenn bei sehr kurzen Zeiten der Auslöseknopf länger bedient wird, als es der Belichtungszeit entspricht u. a.).

Der Spalt kann infolge seiner Konstruktion nicht gedreht werden. Gelegentlich ist es jedoch erwünscht, ihn in verschiedene Richtungen relativ zum Sonnenbild legen zu können, etwa bei Polarisationsbeobachtungen zur Bestimmung der Polarisationsrichtung. Zu diesem Zweck kann vor den Spalt ein Dove-Prisma in den Strahlengang gerückt und mit dessen Hilfe das Sonnenbild beliebig auf der Spaltwand gedreht werden.

2. Die beiden Plangitter

1953 konnte vom Mt. Wilson-Observatory ein für photometrische Zwecke besonders geeignetes Plangitter (im Folgenden MW-Gitter genannt) beschafft werden, wofür wir den Herren Bowen und H.W. Babcock zu besonderem Dank verpflichtet sind. Es besitzt auf einem kreisförmigen Glasblock eine geteilte Fläche von $80 \times 113 \text{ mm}^2$ mit 600 Furchen/mm, die in eine aufgedampfte Aluminiumschicht eingeritzt sind. Das Gitter hat eine lichtstarke 4. Ordnung, aber keine ausgesprochene „Blaze-Eigenschaft“ und kann daher auch in den höheren Ordnungen (bei der Göttinger Aufstellung im blauen und violetten Spektralbereich bis zur 7. Ordnung) noch mit Erfolg verwendet werden.

Ein zweites Plangitter von der Firma Bausch & Lomb (im Folgenden BL-Gitter genannt) ist eine Leihgabe der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Es hat eine geteilte Fläche von $102 \times 127 \text{ mm}^2$ mit ebenfalls 600 Furchen/mm. Bei diesem Gitter handelt es sich — hervorgerufen durch eine spezielle Furchenform — um ein sogenanntes Blaze-Gitter; d.h. ein wesentlicher Teil des einfallenden Lichts (im vorliegenden Fall etwa 60%) wird in einen kleinen Winkelbereich reflektiert. Der Blaze-Winkel, der den Schwerpunkt dieses Winkelbereichs charakterisiert, beträgt 29° ; das entspricht bei Benutzung des Gitters in Autokollimation den Wellenlängen $8300 \text{ \AA}$ in der zweiten, $5500 \text{ \AA}$ in der dritten und $4200 \text{ \AA}$ in der vierten Ordnung mit den Halbwertsbreiten 2400, 1600 bzw. $1200 \text{ \AA}$. Da man immer im Blaze-Bereich des Gitters arbeiten wird, beobachtet man also den kurzwelligen Spektralbereich in höherer Ordnung als den langwelligen. Das ist für den Fall des Sonnenspektrums besonders vorteilhaft, weil der Linienreichtum zu kürzeren Wellenlängen hin immer größer wird und damit zur Untersuchung ein höheres Auflösungsvermögen

und eine größere Dispersion erfordert. Die Lichtstärke des BL-Gitters ist im Blaze-Bereich etwa doppelt so groß wie die des MW-Gitters; dafür besitzt das MW-Gitter, wie Aufnahmen der Hyperfeinstruktur von Quecksilberlinien zeigten, ein noch besseres Auflösungsvermögen. Je nachdem, ob es also auf Lichtstärke (z.B. Protuberanzen) oder auf höchste Auflösung (z.B. genaue Linienkonturen) ankommt, wird das eine oder das andere Gitter verwendet. Beim MW-Gitter wird das theoretische Auflösungsvermögen praktisch erreicht.

Die optischen Eigenschaften beider Gitter wurden von A. von Alvensleben [1] eingehend untersucht, so daß hier nur die wichtigsten Daten mitgeteilt werden sollen. Zunächst wurde mit einer Krypton- und mit einer wassergekühlten Hg^{198} -Lampe das Apparateprofil bestimmt. Es läßt sich für beide Gitter durch je ein einfaches Voigtprofil approximieren, deren Halbwertsbreiten (HWB) und Formparameter b_1 (vergl. G. Elste [5]) für die 4. Ordnung ($m = 4$) und $\lambda = 5000 \text{ \AA}$ in der folgenden Übersicht wiedergegeben sind. Daneben ist zum Vergleich die theoretische Halbwertsbreite angegeben. (Das theoretische Profil ergibt sich durch Fraunhofersche Beugung an einer Blende, deren Breite gleich der wirksamen Gitterbreite ist, überlagert mit einer von der endlichen Spaltbreite herrührenden Rechteckverteilung.) Die beobachteten Profile, die approximierenden Voigtprofile sowie die theoretischen Profile für beide Gitter sind außerdem in halblogarithmischer Darstellung in Abb. 1 und 2 wiedergegeben.

Apparateprofile für $m = 4$ und $\lambda = 5000 \text{ \AA}$

Gitter	Profil	Beob. Voigtprofil		theoret. Profil
		HWB	b_1	HWB
MW-Gitter		21 mÅ	0.20	18.3 mÅ
BL-Gitter		24 „	0.22	16.9 „

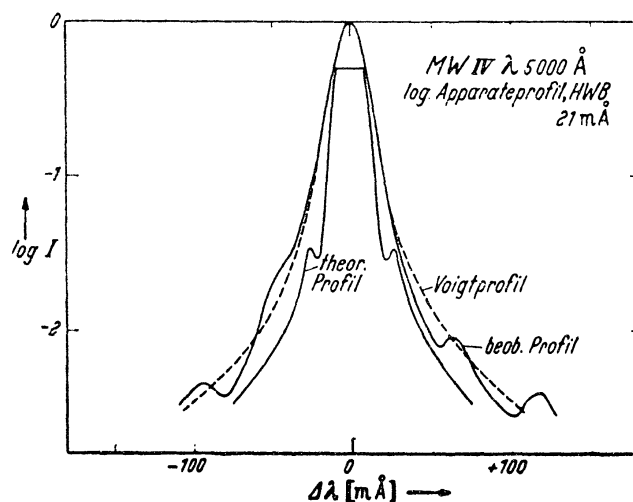


Abb. 1: Beobachtetes Apparateprofil, approximierendes Voigtprofil und theoretisches Profil des MW-Gitters

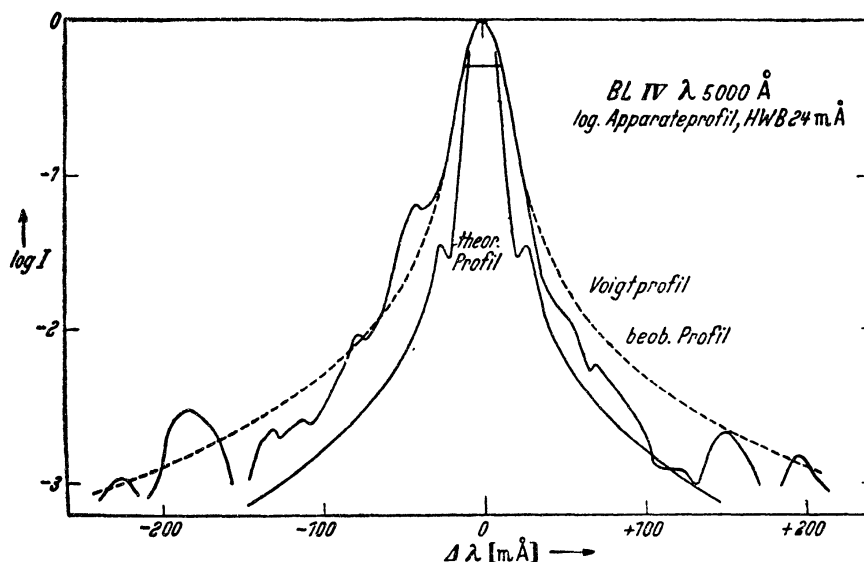


Abb. 2: Beobachtetes Apparateprofil, approximierendes Voigtprofil und theoretisches Profil des BL-Gitters

Ferner zeigt die Untersuchung, daß für jedes der beiden Gitter durch Angabe dieser *einen* Kontur das Apparateprofil für alle Wellenlängen und Ordnungen beschrieben werden kann. Der Übergang geschieht durch Multiplikation mit

$$\frac{\lambda [\text{\AA}]}{5000} \cdot \frac{4}{m}.$$

In den Flügeln besitzen die Apparateprofile beider Gitter eine geringe Asymmetrie im Sinne einer Verstärkung des violetten Flügels. Sie beträgt 2,5% (MW-Gitter) bzw. 4% (BL-Gitter), gemessen als das Verhältnis der Flächen

$$\frac{\text{violetter Flügel} - \text{roter Fl.}}{\text{violetter Flügel} + \text{roter Fl.}}$$

Das MW-Gitter zeigt auf jeder Seite Geister erster, zweiter, dritter und fünfter Ordnung, von denen der zweite Geist am stärksten ist. Die Gesamtintensität der Geister ist jedoch außerordentlich gering; sie beträgt in der zweiten Ordnung im grünen Spektralbereich 0,2%, im blauen Bereich der 6. Ordnung 1,2% der Hauptlinie. Beim BL-Gitter ist nur der erste Geist von nennenswerter Intensität und zwar 1,0% im infraroten der zweiten, 2,0% im grünen der dritten und 2,6% im violetten Bereich der vierten Ordnung.

Das Streulicht (untersucht wurde allgemeine Streuung im Spektrographen, Streulicht in Dispersionsrichtung und Streulicht senkrecht zur Dispersionsrichtung) ist so gering, daß bei Einhaltung der üblichen Vorsichtsmaßnahmen im Rahmen der photographischen Genauigkeit keine Korrekturen wegen Streulicht der Gitter erforderlich sind.

Beide Gitter stehen Rücken an Rücken auf einem Drehtisch. Sie werden in Autokollimation benutzt und können durch Drehen des Tisches auf jede gewünschte Ordnung und Wellenlänge eingestellt werden. Als Kollimator- und

Kameraobjektiv dient, wie schon beim alten Gitter, ein Zeiß-Meniskus von 8 m Brennweite und 16 cm Öffnung. Damit wird eine lineare Dispersion von $\sim 0.4 \text{ \AA/mm}$ in der vierten Ordnung erreicht. Die vom Objektiv erzeugten reellen Reflexbilder werden zur Herabsetzung des Streulichts durch kleine Blenden abgefangen. Die grobe Drehung des Gittertisches sowie die Fokussierung des Objektivs erfolgt nach wie vor durch zwei von außen zu bedienende Elektromotoren und kann durch ein Fernrohr kontrolliert werden. Für die Feineinstellung der Gitterdrehung, die ebenfalls von der Kassettenwand aus bedient wird, wurde statt der alten Kettenübertragung eine elektrische Fernbedienung mit einem Drehfeldsystem eingebaut.

Statt auf die am südlichen Ende des Thermoraums befindliche Kassettenwand mit Einsatz für Photoplatten oder Filme kann das Spektrum auch durch einen im Thermoraum in den Strahlengang hereinfahrbaren Planspiegel seitlich heraus in einen weiteren Arbeitsraum reflektiert werden, in dem sich die photoelektrische Registriereinrichtung befindet (siehe III, 1).

3. Konkavgitter

Um mit einer einzigen Exposition einen möglichst großen Spektralbereich aufnehmen zu können, wurde 1952 probeweise ein vom II. Physikalischen Institut der Universität freundlicherweise zur Verfügung gestelltes 3 m-Konkavgitter aufgestellt. Nach erfolgreichen Versuchen mit diesem Gitter wurde uns 1954 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft ein 6,65 m-Konkavgitter von Bausch & Lomb (geteilte Fläche $55 \times 138 \text{ mm}^2$; 600 Furchen/mm; Blazewinkel $10^\circ,5$ mit lichtstarker 1. Ordnung) leihweise überlassen und in der folgenden Zeit für einen möglichst vielseitigen Gebrauch eingerichtet. Da es sich um ein neues Instrument in Verbindung mit dem Göttinger Turmteleskop handelt, soll hierüber etwas eingehender berichtet werden.

Das Konkavgitter wird in der Runge-Paschen-Montierung (bezüglich der Theorie der Konkavgitter vgl. C. Runge und K. W. Meissner [9]) benutzt, bei der Spalt, Gitter und Spektrum fest auf einem Kreis, dem sog. Rowland-Kreis liegen, der in unserem Falle einen Durchmesser von 6,65 m hat. Zur Aufnahme der verschiedenen Spektralbereiche müssen dann die Platten oder Filme an die entsprechenden Stellen des Rowland-Kreises gebracht werden. Da die Größe des Spektrographenraums eine direkte Aufstellung dieser Art nicht zuläßt, wurde der Lichtweg Spalt — Gitter über drei Planspiegel geleitet. Dem Nachteil der mehrfachen Spiegelungen steht bei dieser Anordnung der Vorteil gegenüber, daß durch Verschieben und Drehen zweier dieser Planspiegel sowohl die Länge des Lichtwegs Spalt — Gitter als auch der Einfallswinkel des Lichtbündels auf das Gitter in weiten Grenzen beliebig variiert werden können. Es lassen sich also verschiedene Aufstellungen realisieren, ohne den Spalt, das Gitter oder die Kassetten-Einrichtung bewegen zu müssen. In Abb. 3 ist der Lichtweg für die beiden zur Zeit benutzten Aufstellungen skizziert, Stellung

(Vis) des zweiten und dritten Umlenkspiegels zur Beobachtung des visuellen Bereichs, Stellung (IR) für das infrarote Spektrum. Der Ausschnitt des Rowland-Kreises für die Kassettenhalterung entspricht einem Winkel von rund 10° vom Gitter aus gesehen, bzw. einer Bogenlänge von etwa 120 cm. Die Anlage ist so orientiert, daß jeweils das langwellige Ende des Spektrums etwa in der Gitternormalen liegt. In der visuellen Aufstellung (Einfallswinkel auf das Gitter $23^\circ, 2$) liegt H_α in der Gitternormalen und der Kreisausschnitt umfaßt das Spektrum von ~ 3800 bis $\sim 6800 \text{ \AA}$. In der Infrarotaufstellung (Einfallswinkel $30^\circ, 8$; $\lambda 8550$ in der Gitternormalen) wird der Bereich von ~ 5800 bis $\sim 8800 \text{ \AA}$ erfaßt.

Ein Konkavgitter besitzt einen starken Astigmatismus, durch den das Spektrum senkrecht zur Dispersionsrichtung weit auseinandergezogen wird. Auf Beseitigung dieses Astigmatismus wurde bei der Aufstellung besonderer Wert gelegt, einmal, um die Belichtungszeiten herabzusetzen, zum andern, um senkrecht zur Dispersionsrichtung eine wirkliche Abbildung der Spalthöhe zu erhalten.

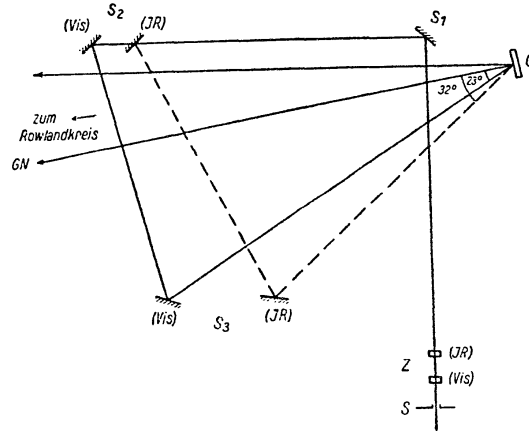
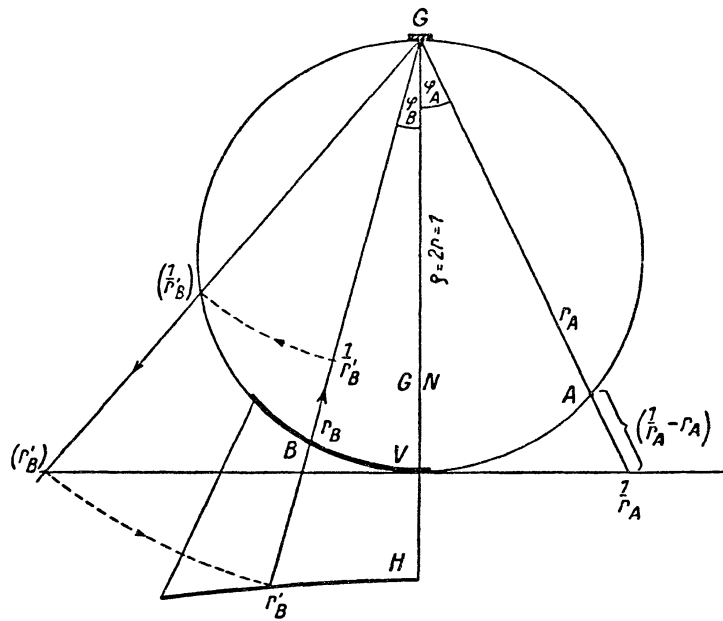


Abb. 3: Strahlengang im Konkavgitterspektrographen: (Vis) visuelle und (IR) infrarote Aufstellung. S Spalt, Z Zylinderlinse, S_1 , S_2 und S_3 Umlenkspiegel, G Gitter, GN Gitternormale

Abb. 4: Zur Konstruktion des Astigmatismus des Konkavgitters: r Radius des Rowland-Kreises, $\varrho = 2r = 1$ Krümmungsradius des Gitters = Durchmesser des Rowland-Kreises, A Spalt, G Gitter, $r_A = AG$ Abstand Spalt-Gitter, GN Gitternormale, φ_A Einfallswinkel, φ_B Austrittswinkel, B beliebige Stelle im Spektrum, $r_B = GB$ Abstand der vertikalen Brennlinie des Strahlenbündels vom Gitter, r'_B Abstand der horizontalen Brennlinie vom Gitter, H geometrischer Ort der horizontalen Brennlinien, V geometrischer Ort der vertikalen Brennlinien (Spektrum)



Setzt man den Krümmungsradius des Gitters (= Durchmesser des Rowland-Kreises) $\varrho = 1$, so gilt (vgl. C. Runge und K. W. Meissner [9]) für die Strahlen

in der Ebene des Kreises senkrecht zu den Gitterfurchen, also für die Abbildung in Dispersionsrichtung

$$r_A = \cos \varphi_A \text{ und } r_B = \cos \varphi_B \quad (1)$$

wobei r_A der Abstand des auf dem Rowland-Kreis liegenden Spaltes A vom Gitter und φ_A der Einfallswinkel auf das Gitter, r_B und φ_B die entsprechenden Werte für eine Stelle B des Spektrums bedeuten (vgl. Abb. 4). Für den dazu senkrechten Schnitt, also für die Abbildung senkrecht zur Dispersionsrichtung gilt dagegen

$$\frac{1}{r'_B} - \cos \varphi_B + \frac{1}{r_A} - \cos \varphi_A = 0 \quad (2a)$$

oder mit (1)

$$\frac{1}{r'_B} = r_B - \left(\frac{1}{r_A} - r_A \right) \quad (2b)$$

Dabei sind also r_B und r'_B die Abstände der beiden Brennpunkten des astigmatischen Strahlenbündels vom Mittelpunkt des Gitters. Aus dieser Beziehung folgt eine einfache in Abb. 4 dargestellte graphische Konstruktion des Astigmatismus. Die Verlängerung der Strecke Gitter — Spalt $= r_A$ bis zur Tangente an den Rowland-Kreis, die senkrecht auf der Gitternormalen steht, liefert den Wert $1/r_A$ (Spiegelung am Einheitskreis oder Inversion). Die Differenz $(1/r_A - r_A)$ subtrahiert man von r_B und erhält nach obiger Gleichung $1/r'_B$. Durch Schlagen eines Kreises um G legt man den Endpunkt $1/r'_B$ auf den Rowland-Kreis ($1/r'_B$), erhält daraus wieder mittels einer Inversion (r'_B) und durch Abtragen dieser Strecke auf der Richtung GB schließlich das gesuchte r'_B , d. h. den Schnittpunkt der horizontalen Brennpunktlinie mit der Richtung GB . Die Kurve H in Abb. 4 zeigt den auf diese Weise erhaltenen geometrischen Ort dieser Schnittpunkte. Ganz entsprechend ist der Bogen V des Rowland-Kreises der geometrische Ort der Schnittpunkte der vertikalen Brennpunktlinien mit den Richtungen GB , also der Ort der scharfen Abbildung der Spektrallinien. Der Abstand der beiden Kurven charakterisiert den Astigmatismus. Man sieht sofort, daß der Astigmatismus mit zunehmendem Abstand von der Gitternormalen anwächst.

Nach einem Vorschlag von C. Runge und R. Mannkopff [8] läßt sich für eine bestimmte Stelle des Spektrums der Astigmatismus durch eine konvexe Zylinderlinse mit horizontaler Achse (bei vertikal stehendem Spalt) zwischen Spalt und Gitter beseitigen. Ist r der Abstand der Zylinderlinse vom Spalt und f ihre Brennweite, so wird ein von der Spaltmitte ausgehendes Strahlenbündel derart gebrochen, daß die Strahlen sich in zwei Brennpunkten schneiden. Die eine vertikale Brennpunktlinie liegt am Ort des Spalts, die andere horizontale im Abstand a von der Linse, wo a sich aus der Gleichung

$$\frac{1}{a} = \frac{1}{f} - \frac{1}{r} \quad (3)$$

bestimmt. Ist insbesondere $f > r$, so erhält man außerhalb des Spaltes eine virtuelle horizontale Brennpunktlinie. Andererseits würde das Konkavgitter von

einer punktförmigen Lichtquelle, die sich an der Stelle des Spektrums befindet, an der der Astigmatismus beseitigt werden soll, zwei Brennnlinien erzeugen, eine vertikale am Ort des Spaltes und eine horizontale außerhalb des Spaltes. Man hat nun durch Wahl von f und r dafür zu sorgen, daß die durch die Zylinderlinse erzeugte horizontale Brennnlinie mit der eben genannten vom Konkavgitter erzeugten horizontalen Brennnlinie außerhalb des Spaltes zusammenfällt.

Wegen der zwei freien Parameter, Brennweite f und Abstand r vom Spalt, die allerdings die Nebenbedingung $f > r$ erfüllen müssen, läßt sich neben der Forderung der Beseitigung des Astigmatismus für eine bestimmte Wellenlänge auch noch das Abbildungsverhältnis in der Ebene senkrecht zur Dispersionsrichtung variieren.

Es ist aber erwünscht, den Astigmatismus nicht nur für eine Wellenlänge, sondern über einen möglichst großen Bereich des Spektrums zu beseitigen. Dies läßt sich für viele Zwecke in ausreichendem Maße verwirklichen durch Ausnutzung der chromatischen Eigenschaften einer einfachen Zylinderlinse, wenn man das langwellige Ende des Spektrums in die Gitternormale legt. Dann wird der mit dem Abstand von der Gitternormalen zunehmende Astigmatismus durch die chromatischen Eigenschaften der Zylinderlinse,*d.h. durch die Abnahme der Brennweite mit abnehmender Wellenlänge weitgehend kompensiert. Nach Gleichung (3) wächst nämlich bei festem r mit abnehmender Brennweite, d.h. also mit abnehmender Wellenlänge der Abstand der virtuellen horizontalen Brennnlinie vom Spalt. In Praxis berechnet man für verschiedene Wellenlängen die zur Beseitigung des Astigmatismus nötigen Brennweiten und wählt die Glassorte der Zylinderlinse so, daß ihre Farbkurve diesem „idealen Fokalverlauf“ möglichst nahe kommt.

Die erste mit dem Bausch & Lomb—Konkavgitter benutzte Zylinderlinse ($f_{6000} = 40$ cm) steht 31,5 cm (Vis.) bzw. 35,1 cm (IR) hinter dem Spalt und bewirkt in Verbindung mit dem Gitter eine vergrößerte Abbildung der Spalthöhe in das Spektrum von $\sim 1:4$ bzw. $1:6$. Zur Erhöhung der Lichtstärke wurde später eine zweite Zylinderlinse ($f_{6000} = 134$ cm) beschafft, die in größerem Abstand vom Spalt steht (87 bzw. 105 cm) und eine Vergrößerung von nur $\sim 1:2$ bzw. $1:3$ hervorruft. Jedoch verläuft die „ideale Fokalkurve“ um so steiler je größer der Abstand r ist. Für die zweite Zylinderlinse mußte bereits schweres Flintglas (SF 1) verwendet werden, um die Änderung des Astigmatismus durch die chromatischen Eigenschaften zu kompensieren. Da es keine beliebig schweren Gläser gibt, sind hier den Möglichkeiten gewisse Grenzen gesetzt. Bei beiden Zylinderlinsen ist die Beseitigung des Astigmatismus so gut (im Mittel etwa 0,2 mm Randunschärfe der Spektren), daß auch mit hohem Spalt gearbeitet und von einer wirklichen Abbildung des auf dem Spalt liegenden Sonnengebiets senkrecht zur Dispersionsrichtung gesprochen werden kann. Die Randunschärfe liegt jedenfalls unterhalb der durch Luftunruhe bedingten Unschärfe. Normalerweise wird eine Spalthöhe von 0,6 mm benutzt.

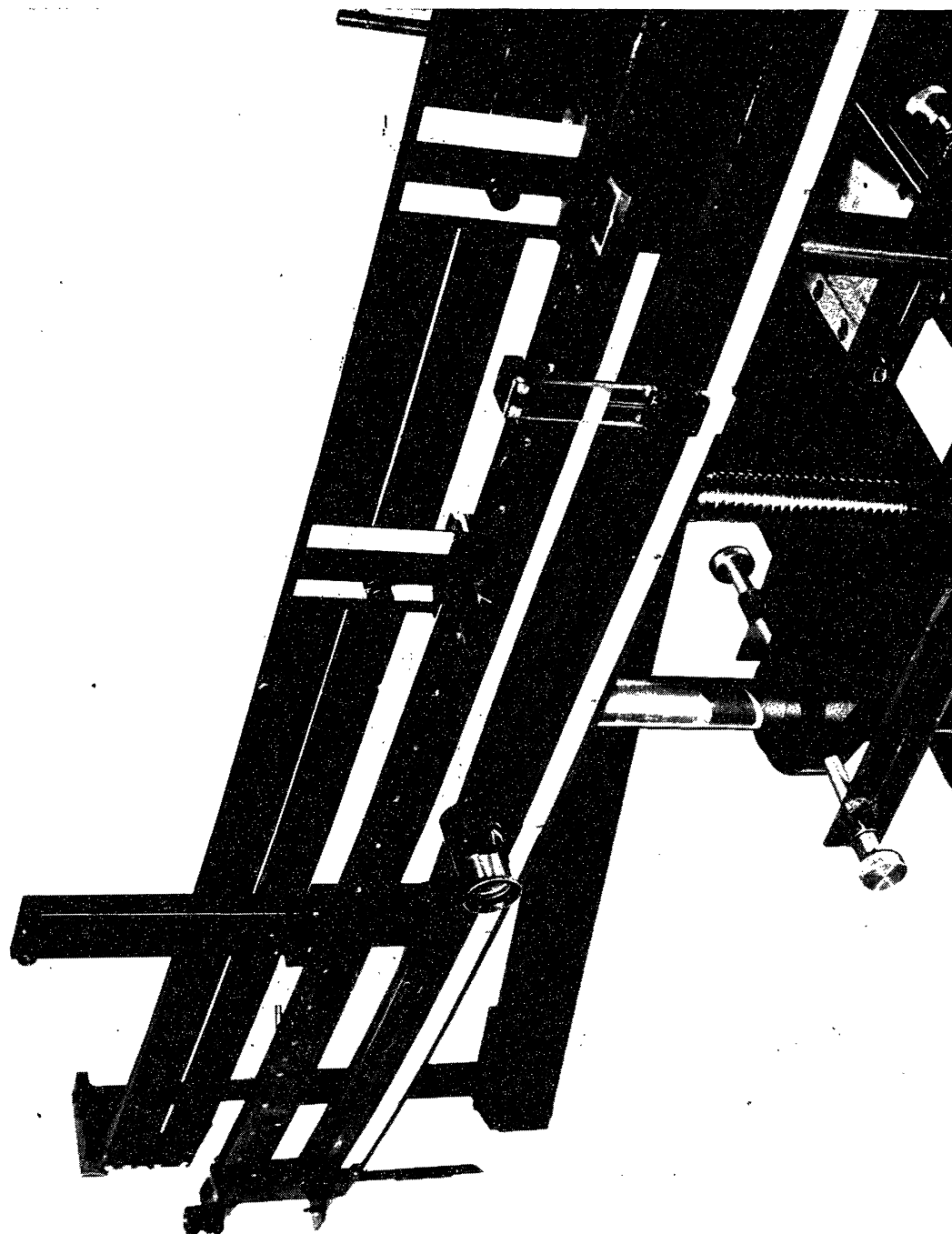
Dem infraroten Spektrum der 1. Ordnung überlagert sich das violette Spektrum der 2. Ordnung. Durch geeignete Wahl der Platten und geeignete Filter unmittelbar vor den Platten kann in beiden Ordnungen gleichzeitig beobachtet und damit in der IR-Aufstellung bis auf eine kurze Lücke (4400 bis 5800 Å) der ganze Bereich von 3800 bis 8800 Å gleichzeitig überbrückt werden.

Der für die Aufnahme benutzte und in Taf. I dargestellte Ausschnitt des Rowland-Kreises (im Folgenden kurz Rowland-Kreis oder RK genannt) ist auf einer Karusseldrehbank als 10 cm hohe Zylinderwand von 3,325 m Radius in einem Stück gearbeitet. In der Mitte befindet sich ein 25 mm hoher Längsausschnitt, in dem das Spektrum liegt. Der ganze Kreis ist in der Höhe verstellbar, einmal, um ihn ganz versenken zu können und den Lichtweg auf die Plangitter freizugeben, zum anderen, um den Kreis relativ zum raumfesten Spektrum bewegen und so mehrere Spektren auf eine Platte bzw. einen Film aufnehmen zu können. Diese Höhenverstellung erfolgt mit einem von außen zu bedienenden Motor. Mit einer Drehfeldübertragung wird die jeweilige Stellung des RK am Beobachtungsstand angezeigt. Unterhalb des Längsausschnitts besitzt der Rowland-Kreis eine Skala, mittels der — einmal geeicht — jeder Stelle die zugehörige Wellenlänge zugeordnet werden kann. Die lineare Dispersion des Spektrums beträgt in der ersten Ordnung 2,5 Å/mm. Das Auflösungsvermögen ist hervorragend. Die Apparatekontur des Konkavgitters wurde in ähnlicher Weise bestimmt wie die der Plangitter. Die gesamte Halbwertsbreite des Apparateprofils beträgt in der 1. Ordnung bei 6000 Å 122 mÅ und bei 8000 Å 138 mÅ; sie ist, unabhängig von der Wellenlänge, etwa 30% größer als der theoretische Wert. In der 2. Ordnung bei H_γ beträgt die Halbwertsbreite 55 mÅ und ist 22% größer als der theoretische Wert. Die Intensität der Gittergeister liegt nach Angabe der Firma Bausch & Lomb unterhalb 0,03%.

Längs des Ausschnitts des RK kann ein Film von 1,20 m Länge gespannt und so jeweils das ganze Spektrum auf einmal aufgenommen werden. Dies Verfahren ist vorteilhaft, wenn etwa das Verhalten des Kontinuums oder weite Bereiche des Spektrums von Flecken, Flares u.a. untersucht werden sollen. Für den visuellen Bereich hat sich dabei der Perutz-Perpantic-Film, für den infraroten Bereich der Kodak-IN-Film gut bewährt. Sie liefern weitgehend konstante Schwärzung des Sonnenspektrums über den ganzen Spektralbereich. Interessieren dagegen nur einzelne Linien, etwa im Protuberanzenspektrum, so können an den betreffenden Stellen des RK Platten aufgestellt werden. Gerade für Protuberanzen oder andere zeitlich und räumlich schnell veränderliche Gebilde ist dies der Hauptvorteil des Konkavgitters, weil so die Gewähr gegeben ist, daß alle Linien gleichzeitig und von genau derselben Stelle des Objekts aufgenommen werden. Beim Plangitter, wo die Linien nacheinander aufgenommen werden müssen, gehen stets Führungsfehler, Szintillation und zeitliche Änderungen des Objekts mit in die Messung ein.

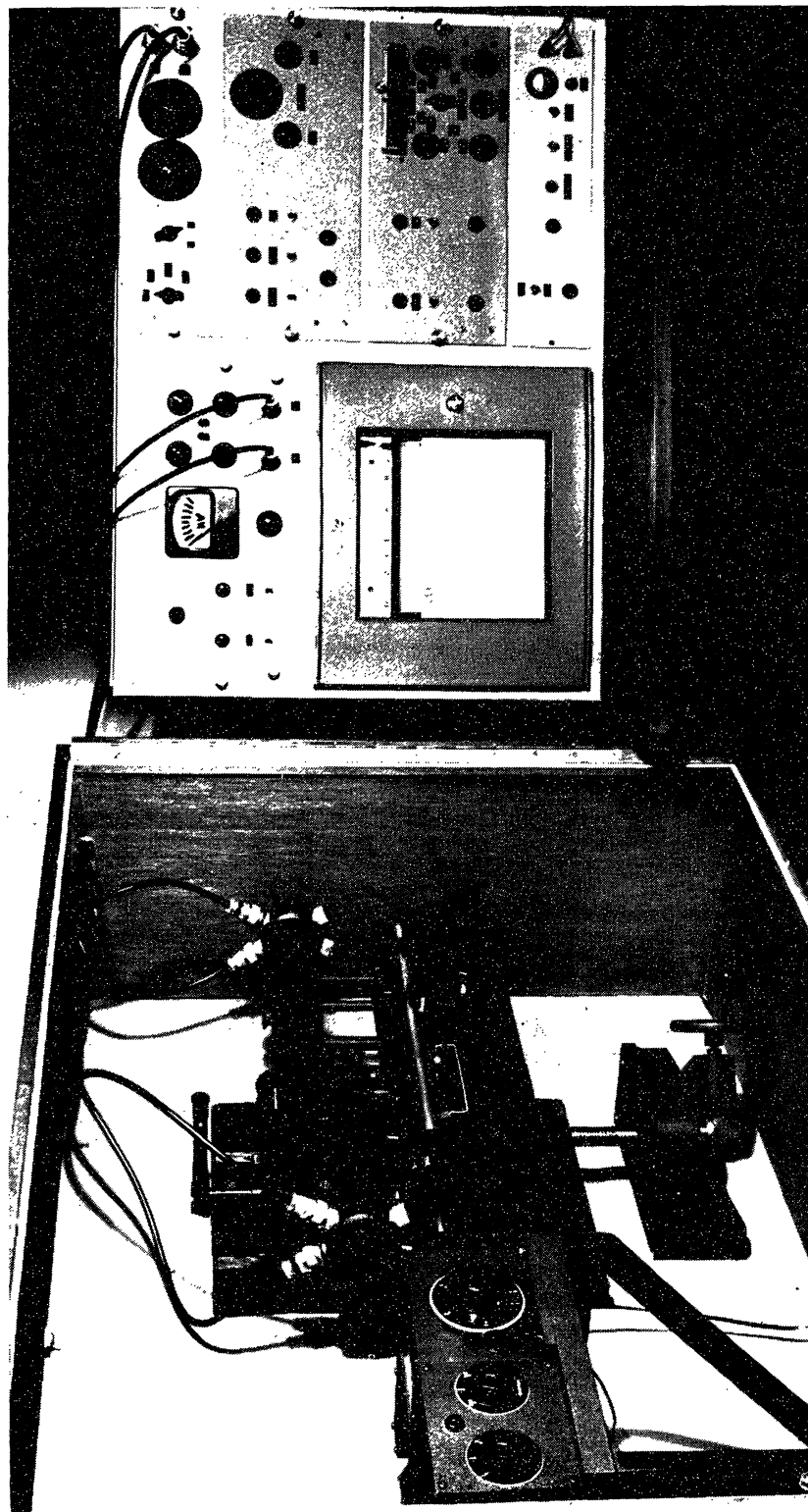
Die geringe Höhe des Längsausschnitts von 25 mm, die durch die konventionelle Filmbreite von 35 mm bedingt ist, erweist sich für Aufnahmen mit

TAFEL I



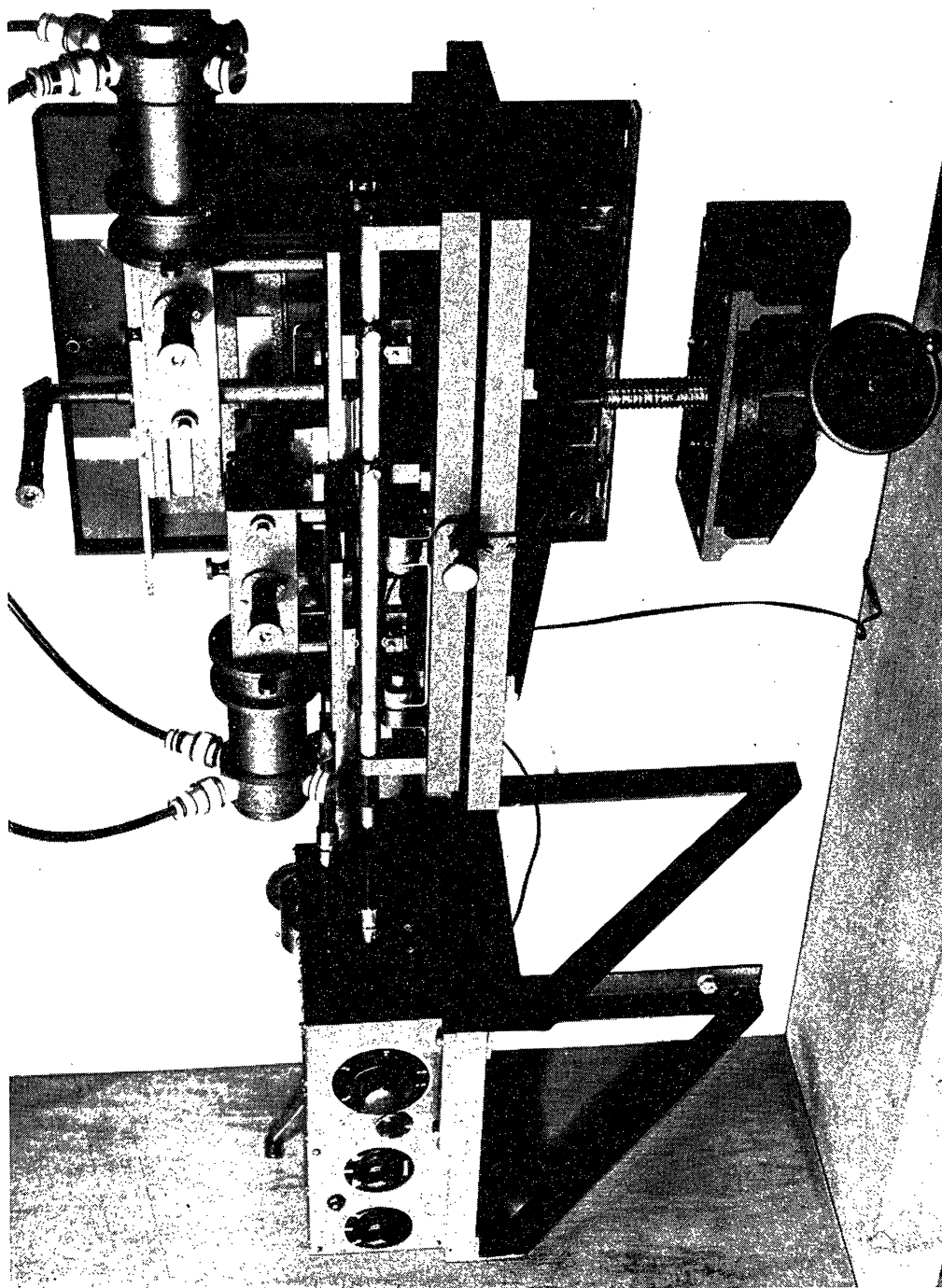
Ausschnitt des Rowland-Kreises mit Platten- und Filmhalter und raumfester Schlitzblende

TAFEL II



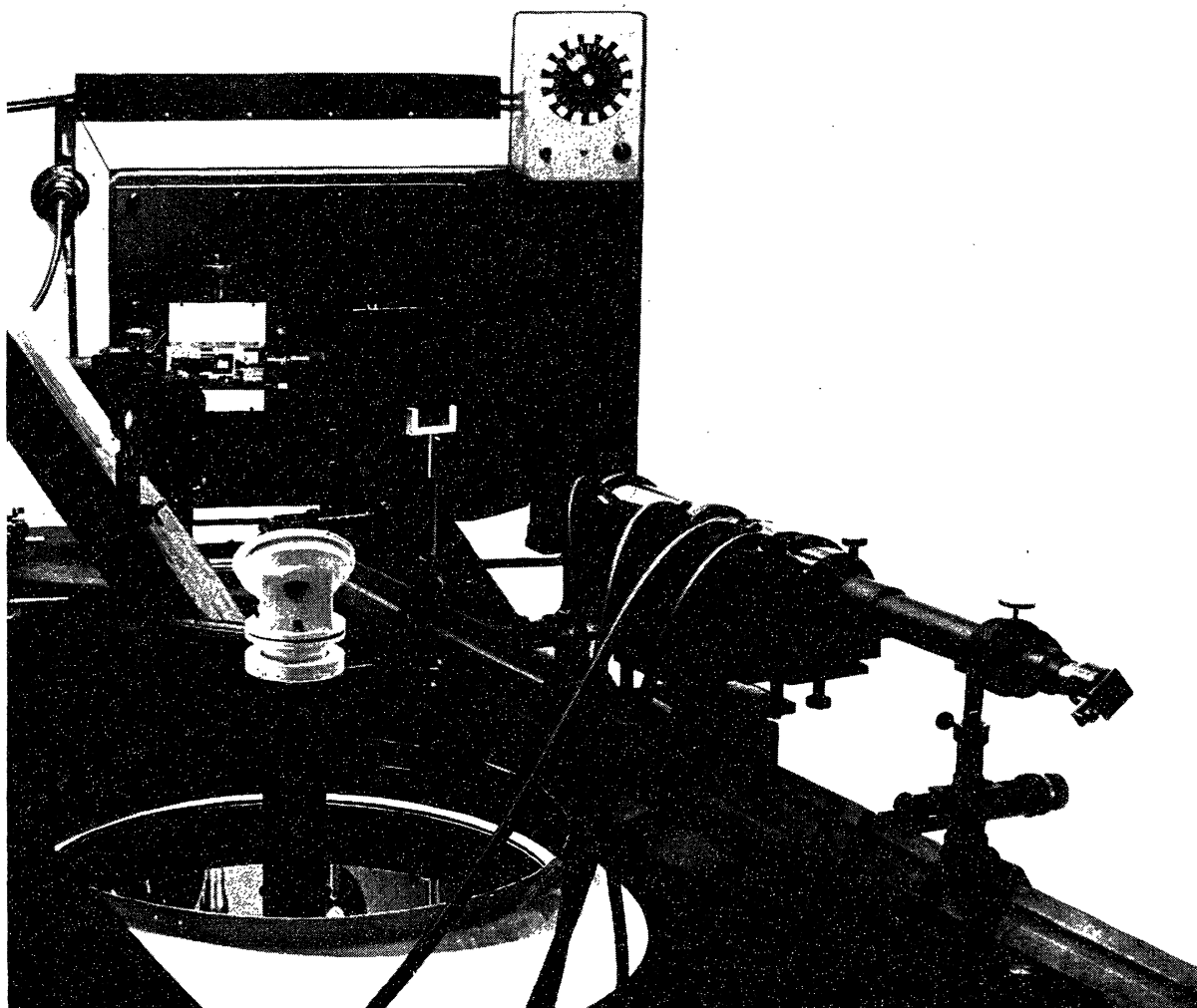
Gesamtansicht der mechanischen und elektrischen Teile der photoelektrischen Registriereinrichtung

TAFEL III



Der mechanische Teil der photoelektrischen Registriereinrichtung

TAFEL IV



Gesamtansicht der Spaltwand mit Interferenzfilter und anderen Zusatzeinrichtungen

Photoplatten unzweckmäßig. Einmal wird auf den meist größeren Platten nur ein kleiner Teil ausgenutzt, außerdem ist bei laufender Beobachtung ein häufiger Plattenwechsel notwendig. Es wurden daher mehrere Plattenhalter gebaut, die oben auf den Rowland-Kreis aufgesetzt werden können und die es gestatten, eine Plattenhöhe von 5 cm und 12 cm auszunutzen und die Zahl der Spektren pro Platte wesentlich zu erhöhen. Der Rowland-Kreis wird dazu einfach entsprechend heruntergefahren. Ähnliche Halter gestatten die Benutzung von 12 cm langen Filmstreifen senkrecht zur Dispersionsrichtung, wenn etwa mehrere Aufnahmen einzelner Linien auf Filmmaterial aufgenommen werden sollen. Zur Verminderung des Streulichts und zur Verschmälerung der Spektren, um die Zahl der pro Platte aufzunehmenden Spektren zu erhöhen, kann unmittelbar vor den Film bzw. die Platten eine ebenfalls gekrümmte, 1,20 m lange und 2 mm hohe, raumfeste Schlitzblende hereingeschwenkt werden. Taf. I zeigt einen Teil des Rowland-Kreises mit dem langen Längsschlitz zur Aufnahme ganzer Filme, mit zwei Platten- und einem Filmhalter, sowie die Schlitzblende.

Die nicht ganz einfache Justierung des Konkavgitterspektrographen wurde, soweit möglich, visuell durchgeführt. Die Feineinstellung der Zylinderlinse, der Drehung des Spaltes, der wegen des Astigmatismus genau parallel zu den Gitterstrichen stehen muß, und des Fokus erfolgte photographisch. Es ist jedoch zweckmäßig, die Justierung, insbesondere den Fokus, der trotz der langen Brennweite und des geringen Öffnungsverhältnisses auf 1 mm genau definiert ist, von Zeit zu Zeit visuell zu kontrollieren. Die bloße Beurteilung der Schärfe einer schmalen *Kr*- oder *Hg*-Emissionslinie reicht hierzu nicht aus. Sehr empfindlich ist dagegen, zumindest in der Nähe der Gitternormalen, die bekannte Messerschneidenmethode, angewandt auf möglichst scharfe Emissionslinien. Eine andere Kontrolle geschieht mittels einer Kammer mit Joddampf, die vor dem Spalt im Lichtweg einer Wolframbandlampe oder auch der Sonne steht. Die durch das ganze Spektrum laufenden außerordentlich scharfen Linien von Absorptionsbanden des Jod gestatten eine gute Kontrolle des Fokus und der anderen Justierungen, etwa durch Beurteilung, an welcher Stelle in der Nähe des Bandenkopfs die Linien in den Banden zusammenlaufen.

III. Zusatzgeräte

1. Photoelektrische Registriereinrichtung

Der Einbau der beiden lichtstarken Plangitter hohen Auflösungsvermögens ermöglichte es, neben der photographischen Photometrie auch eine direkte lichtelektrische Spektralphotometrie zu betreiben, die gegenüber der Photographie bekanntlich einige erhebliche Vorteile besitzt. Der Hauptvorteil ist die in dem interessierenden Intensitätsbereich strenge Proportionalität zwischen Lichtintensität und Photostrom gegenüber der Nichtlinearität von Intensität

und Schwärzung bei der photographischen Platte. Es entfallen also alle sonst notwendigen Standardisierungen und die zahlreichen damit verbundenen Fehlerquellen. Da das Entwickeln, Standardisieren, Registrieren und das Umwandeln der Schwärzungs- in Intensitätskurven fortfällt, ist außerdem die Reduktion der Beobachtungen sehr viel einfacher und zeitsparender. Eine vollständige Umstellung auf lichtelektrische Photometrie wäre jedoch bei dem Göttinger Klima, wo an wenigen guten Tagen des Jahres ein möglichst umfangreiches Beobachtungsmaterial gesammelt werden muß, nicht zweckmäßig. Außerdem stehen den genannten Vorteilen lichtelektrischer Photometrie andere prinzipielle Nachteile gegenüber. Vor allem entfällt die Möglichkeit, mehrere Linien gleichzeitig zu registrieren und damit die sinnvolle Bearbeitung solcher Probleme, bei denen es gerade auf diese Gleichzeitigkeit oder auf die Aufnahme größerer Spektralbereiche ankommt. In solchen Fällen wird der Konkavgitterspektrograph immer den Vorrang haben. Eine weitere Schwierigkeit ist zunächst die Tatsache, daß bei der photoelektrischen Photometrie auch die einzelne Linie zeitlich nacheinander „durchfahren“ wird. Zeitliche Intensitätsschwankungen infolge von Durchsichtsschwankungen und Szintillation würden sich also störend bemerkbar machen und in ungünstigem Klima das ganze Verfahren in Frage stellen, wenn sie nicht durch geeignete Methoden kompensiert werden. Eine solche lichtelektrische Registriereinrichtung mit weitgehender Kompensation der Durchsichtsschwankungen und Szintillation wurde von K. H. David für den Sonnenturm gebaut und genauer beschrieben [4]. Es sollen daher hier nur die wesentlichsten Punkte kurz zusammengefaßt werden.

Die Anlage arbeitet als Vergleichsphotometer zwischen der interessierenden Linie (Meßgröße) und einer festgehaltenen Stelle im benachbarten Kontinuum (Vergleichsintensität). Nach Wahl kann entweder die Differenz oder der Quotient beider Größen gemessen werden. Da Durchsichtsschwankungen innerhalb gewisser Grenzen Meßgröße und Vergleichsintensität stets im gleichen Verhältnis beeinflussen, sind diese bei der Quotientenbildung exakt ausgeglichen. Jedoch muß zuvor der Dunkelstrom der Photozellen elektrisch kompensiert werden. Sind Meßgröße und Vergleichsintensität nahe gleich groß, so empfiehlt es sich, statt des Quotienten die Differenz zu messen. Dies ist meist mit größerer Genauigkeit möglich (vgl. A. Behr [2]). Durchsichtsschwankungen werden in diesem Falle so gut wie vollständig, der Dunkelstrom aber automatisch exakt kompensiert.

Reich detaillierte Stellen im Spektrum, intensive Absorptionslinien u.ä. werden daher am besten nach dem Quotientenverfahren, einzelne schwache Linien dagegen nach dem Differenzverfahren, registriert. In beiden Fällen ist es belanglos, an welcher Stelle des benachbarten Spektrums die Vergleichsintensität gemessen wird. Stets läßt sich durch optische oder elektrische Abstimmung erreichen, daß an einer Stelle der Registrierkurve, die als Kontinuum definiert wird, die Differenz gleich null oder der Quotient gleich eins wird.

In Taf. II und III ist eine Gesamtansicht der mechanischen und elektrischen Teile des Photometers wiedergegeben. Das von einem der beiden Plan-
gitter erzeugte Spektrum wird über einen Planspiegel durch einen Mauer-
durchbruch in den süd-östlichen Arbeitsraum [3] geleitet und etwa in der Wand-
ebene abgebildet. Auf einem kurz hinter der Bildebene erschütterungsfrei ver-
ankerten Gestell sind die beiden Photozellen und die mechanische Führung
montiert. Die Vergleichszelle (in Taf. III rechts) ist mit ihrem Spalt fest ver-
bunden und kann mit einer von Hand bewegten Spindel längs eines Bereichs
von 10 cm auf die gewünschte Stelle des Spektrums eingestellt werden, wo sie
während der Registrierung fest stehen bleibt. Der Registrierspalt und die
Registrierzelle sind dagegen nicht starr miteinander verbunden. Da nämlich
wegen der lokalen Inhomogenitäten der Kathodenempfindlichkeit stets die
gleiche Stelle der Photokathode benutzt werden muß, müßten sich Registrier-
spalt und -zelle konzentrisch auf Kreisen um das Gitterobjektiv bewegen.
Wegen der mechanischen Schwierigkeiten einer solchen Konstruktion werden
Spalt und Zelle stattdessen mit verschiedenen Geschwindigkeiten parallel zu-
einander und geradlinig so bewegt, daß die Verbindungslinie Objektiv —
Spalt — Kathode eine Gerade bleibt. Erreicht wird dies durch zwei gleiche
Spindeln, deren Umdrehungszeiten sich wie 72 : 73 verhalten. Die in eigener
Werkstatt hergestellten Spindeln, an deren Genauigkeit hohe Anforderungen
gestellt werden müssen, sind 15 cm lang und besitzen bei einer Ganghöhe von
1 mm einen periodischen Fehler $< 2\mu$. Sie werden durch einen Papst-Synchron-
Motor über ein sechsstufiges Getriebe angetrieben. Der Motor, der zur Ver-
meidung von Erschütterungen auf einem gesonderten Gestell montiert ist,
besitzt Vor- und Rücklauf und zwei Drehzahlen (500 und 1000 min^{-1}). In Ver-
bindung mit dem Getriebe ergibt sich so eine hinreichend große Variation
der Registriergeschwindigkeit. An der Führungsspindel der Registrierzelle
sitzt ein Kontakt, der sich bei jeder Umdrehung einmal kurz schließt und
auf der Registrierkurve eine Marke zur Festlegung der Wellenlängenskala
und zur Kontrolle des synchronen Laufs von Zelle und Schreibpapier auf-
prägt.

Als Photozellen werden zwei Photomultiplier, Type 6094 der E.M.I.
Research Laboratories, England benutzt. Ihre mit der Wellenlänge langsam
variable Empfindlichkeit spielt bei dem hier benutzten Verfahren keine Rolle,
da die Intensität der Linien immer auf diejenige des mitregistrierten, benach-
barten Kontinuums bezogen wird (siehe oben). Der nützliche Empfindlich-
keitsbereich der Multiplier reicht fast bis H_{α} . Die Gleichspannung für die Multi-
plier wird einem elektronisch geregelten [2] Netzgerät entnommen und kann
auf eine Spannung von 1,2 bis 1,8 kV kontinuierlich eingestellt und für beide
Zellen differentiell variiert werden.

Der Verstärker für die Differenzmessung, ein gegengekoppelter Gleichstrom-
verstärker, ist eine Variante des von G. E. Kron [6] benutzten und später von
A. Behr [2] weiterentwickelten Geräts.

Bei dem Verstärker für die Quotientenmessung handelt es sich um einen 4-stufigen Gleichstromverstärker, bestehend aus zwei getrennten Zweigen mit nahezu 100prozentiger Gegenkopplung, wodurch gute Stabilität und Linearität gewährleistet ist.

Als Registriergerät dient eine Meßbrücke Type PR 2200/A 21 der Firma Philips. Der Vorschub des Papiers erfolgt über einen Synchronmotor, um ein konstantes Verhältnis zwischen Bewegung des Multipliers und Bewegung des Papiers zu gewährleisten. Da die im Schreiber ursprünglich vorgesehene Papiertransportgeschwindigkeit weit überschritten wird und wegen der Zuordnung zur Wellenlängenskala besondere Anforderungen an die Genauigkeit der Papierführung gestellt werden, mußte der Antriebsmotor durch einen stärkeren ersetzt werden³⁾. Außerdem konnte die Papierführung durch Neulagerung der Transportwelle und Neubau des Getriebes weiter verbessert werden.

Für die Differenzmessung wird die Philips-Meßbrücke in ihrer ursprünglichen Form verwendet: Durch einen Präzisionswiderstand von $1\text{ k}\Omega$ fließt ein von einer gesonderten Stromquelle gelieferter Strom. Die vom Verstärker kommende, zu messende Spannung wird zwischen das eine Ende dieses

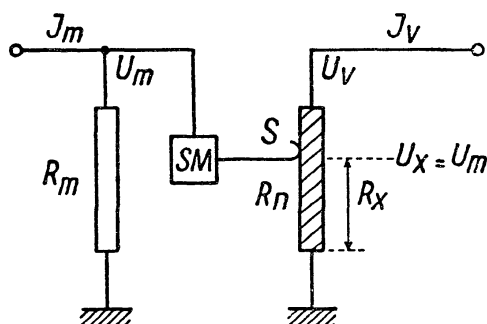


Abb. 5: Prinzipschaltung der Quotientenmessung: SM Servomechanismus, R_n Präzisionswiderstand, S Schleifkontakt

Widerstands und einen Gleitkontakt gelegt. Ein Servomechanismus bewegt diesen Gleitkontakt solange über den Widerstand hinweg, bis keine Potentialdifferenz mehr besteht. Eine mit dem Gleitkontakt verbundene Schreibfeder registriert diesen Zustand.

Beim Quotientenverfahren (Abb. 5) wird das eine Ende des Präzisionswiderstands R_n mit dem Verstärker für die Vergleichsintensität verbunden. Der Strom I_v erzeugt an R_n den Spannungsabfall U_v . Der vom Verstärker der

Meßgröße kommende Strom I_m erzeugt am Widerstand R_m den Spannungsabfall U_m . Die Meßbrücke stellt mit ihrem Servomechanismus SM den Schleifer S an die Stelle R_x des Widerstandes R_n mit dem Potential $U_x = U_m$. Dann gilt

$$U_x = U_m = I_m R_m = I_v R_x,$$

damit wird aber

$$R_x = R_m \frac{I_m}{I_v} \sim \frac{I_m}{I_v}$$

Die registrierte Größe R_x stellt also den Quotienten $\frac{I_m}{I_v}$ dar.

Der Schreiber, die Hochspannungsversorgung und die beiden Verstärker sind in Schubkastenbauweise gemeinsam in einem Aluminiumgehäuse untergebracht (vgl. Taf. II).

³⁾ Die heute von der Firma Elektro Spezial hergestellten Geräte für höchste Papiergeschwindigkeiten besitzen diesen stärkeren Motor bereits serienmäßig.

2. Interferenzfilter

Bei der Beobachtung von Protuberanzen und anderen Objekten, die im integralen Sonnenlicht nicht zu beobachten sind, entsteht die Frage ihrer Auffindung und Nachführung. Ursprünglich diente hierzu (in Verbindung mit einem Plangitter) eine spektrohelioskopische Zusatzeinrichtung [3] mit zwei synchron laufenden Anderson-Prismen, einmal vor dem Eintrittsspalt und zum anderen vor einem in der Kassettenebene angebrachten Austrittsspalt. Dieses Verfahren hatte den großen Nachteil, daß das interessierende Objekt nicht während der Aufnahme beobachtet werden konnte. Es mußte vielmehr vorher eingestellt, dann die spektrohelioskopische Zusatzeinrichtung abgebaut und schließlich das Gitter auf die gewünschte Wellenlänge umgestellt werden, ehe die Aufnahme erfolgen konnte. Für Objekte auf der Sonnenscheibe (Filamente usw.) und sehr nahe am Sonnenrand (chromosphärische Strukturen), die eine sehr genaue Nachführung erfordern, scheidet dieses Einstellverfahren von vornherein aus. Als dann zur gleichzeitigen Aufnahme des ganzen Spektrums ausgewählter Objekte das Konkavgitter in Benutzung genommen wurde, hätte es eines beträchtlichen Umbaus bedurft, um die spektrohelioskopische Zusatzeinrichtung in Verbindung mit dem Konkavgitter, oder gar wahlweise mit Plan- und Konkavgitter, zu verwenden. Es lag daher nahe, zur Nachführung einer Sonnenstelle auf dem Spalt des Spektrographen ein Lyot'sches H_α Polarisations-Interferenzfilter in der weiter unten geschilderten Anordnung zu benutzen. In dankenswerter Weise stellte die Deutsche Forschungsgemeinschaft 1953 dem einen von uns ein solches Filter zur Verfügung.

Das von der Firma Halle (Berlin-Steglitz) gelieferte Interferenzfilter besteht aus 6 Quarz- und 3 Kalkspatstufen, die in getrennten Fassungen angeordnet sind. Aus Gründen der Lichtstärke und der besseren optischen Abbildung sind als Polarisatoren keine Polaroidfolien, sondern Kalkspatprismen (siehe unten) verwendet worden. Der Quarzteil für sich besitzt eine Durchlaßbreite von $\sim 6 \text{ \AA}$, das gesamte Filter eine solche von $\sim 0.8 \text{ \AA}$ im Zentrum von H_α . Wegen der hohen Temperaturempfindlichkeit sind beide Teile des Filters mit je einem Höppler-Ultra-Thermostaten Type *N* verbunden, die eine Temperatureinstellung und Konstanthaltung auf $0^\circ,1$ gestatten. Ein Metall-Interferenzfilter der Firma Schott, Mainz, mit einer Halbwertsbreite von $\sim 70 \text{ \AA}$ und einem maximalen Durchlaßvermögen von 45%, sowie ein Schott-Glasfilter *RG 1* dienen dazu, die etwa $250 \text{ \AA}$ von H_α entfernten Nachbarmaxima auszuschalten.

Die Anordnung des Interferenzfilters am Turmteleskop ist aus Abb. 6 zu ersehen. Unmittelbar vor dem Hauptspalt *HS* des Spektrographen befindet sich ein kleiner quadratischer Planspiegel *S* mit 12 mm Kantenlänge und einer zentralen konischen Durchbohrung von 0,6 mm Durchmesser auf der Spiegel-seite. Durch diese sich zum Spalt hin erweiternde Bohrung gelangt das Licht des zu untersuchenden Gebiets in den Hauptspektrographen. Das Licht der

Umgebung wird seitlich herausreflektiert und gelangt durch die Linsen L_1 und L_2 , sowie ein Schott-*RG 1*-Filter in die beiden Teile des Interferenzfilters I_Q und I_K . Das System der Linsen L_1 ($f_1 = 70$ cm) und L_2 ($f_2 = 120$ cm) ist so berechnet, daß 1. aus gleich zu erläuternden Gründen der Parabolspiegel des Turmteleskops auf die Blende B_1 abgebildet wird, und daß 2. das Inter-

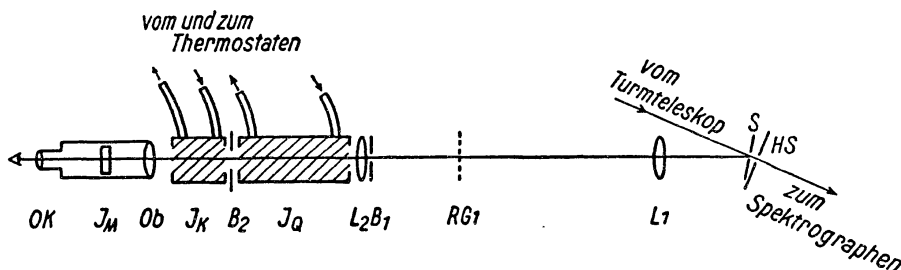


Abb. 6: Strahlengang für die Aufstellung des Interferenzfilters: *HS* Hauptschlitz, *S* zentral durchbohrter Umlenkspiegel, L_1 Linse (bildet Parabolspiegel auf B_1 ab), *RG 1* Schott-FarbfILTER, B_1 und B_2 Blenden, L_2 Linse (bewirkt parallelen Strahlengang im Interferenzfilter), I_Q und I_K Quarz- und Kalkspatteil des Interferenzfilters. *Ob* und *Ok* Objektiv und Okular eines Fernrohrs, I_M Metall-Interferenzfilter

ferenzfilter im parallelen Strahlengang steht. Das aus dem Lyot-Filter austretende Lichtbündel gelangt in ein kleines Fernrohr (Objektiv *Ob* und Okular *Ok*), in das außerdem das Metall-Interferenzfilter I_M eingebaut ist. Der Beobachter sieht nun den vom Spiegelchen *S* reflektierten Teil des auf dem Spalt liegenden Sonnenbilds, ein Ausschnitt von etwa $2' \times 2'$, im Lichte von H_α . Durch Bedienung der Feinbewegung der Coelostatenspiegel kann man leicht den Sonnenrand nach Protuberanzen oder die Sonnenscheibe nach Filamenten und anderen Objekten absuchen und während der Aufnahme nachführen. Auch die Chromosphäre ist bei guten Luftverhältnissen deutlich zu sehen. Die zentrale Bohrung im Spiegel *S* erscheint im Gesichtsfeld als schwarzer Punkt und kennzeichnet die Stelle, deren Spektrum gerade aufgenommen wird.

Bei der Benutzung zusätzlicher Optik — z. B. für Polarisationsmessungen — oder eines Monochromators unmittelbar vor dem Spalt des Spektrographen, kann das Umlenkspiegelchen *S* bis zu 12 cm vor dem Spalt angebracht werden. Gleichzeitig kann dann die Zeißschiene, die das Interferenzfilter mitsamt der Optik trägt, in ihrer Längsrichtung bewegt und seitlich geschwenkt werden. Tafel IV zeigt eine Gesamtansicht des Interferenzfilters sowie der übrigen Zusatzeinrichtungen vor der Spaltwand.

Beim Erkennen von Struktureinzelheiten auf der Sonnenscheibe mit Hilfe des H_α -Interferenzfilters traten zunächst Streulicht-Schwierigkeiten auf. Sie bestanden in folgendem: Die als Polarisatoren dienenden Kalkspatprismen im Interferenzfilter haben einen brechenden Winkel von $16^\circ 40'$. Jedes Kalkspatprisma ist mit einem Glasprisma, dessen Brechungsindex mit dem des außerordentlichen Strahls im Kalkspat übereinstimmt, derart verkittet, daß beide

zusammen für den außerordentlichen Strahl als planparallele Platte wirken. Der ordentliche Strahl dagegen, dessen Brechungsindex im Kalkspat merklich größer ist, wird um etwas mehr als 3° zur Basis des Kalkspatprismas abgelenkt. Da der Quarzteil des Filters verhältnismäßig lang ist, bilden die in den einzelnen Kalkspatprismen abgelenkten ordentlichen Strahlen durch Aufhellung der Prismenbasen eine Art „Lichtstraße“, die — wenn das Filter mit voller Öffnung benutzt wird — Kontraste auf der Sonnenscheibe völlig zudeckt. Glücklicherweise ist das Filter so lichtstark, daß es nicht mit voller Öffnung benutzt zu werden braucht⁴⁾. Unmittelbar vor der Linse L_2 und damit vor dem Filter wurde eine Blende B_1 von 4 mm Öffnung angebracht und zwar exzentrisch, so daß das Licht möglichst nahe der brechenden Kante der Kalkspatprismen in das Interferenzfilter gelangt. Dadurch wird die „Lichtstraße“ an den Prismenbasen auf ein ganz kurzes Stück am Ende des Quarzteils reduziert. Das dann noch verbleibende Streulicht wird durch eine Blende B_2 zwischen Quarz- und Kalkspatteil abgefangen. Das Streulicht könnte wahrscheinlich ganz beseitigt werden, wenn in dem Quarzteil die letzte 55,4 mm dicke Quarzstufe durch eine äquivalente, viel dünnere Kalkspatstufe ($\sim 2,9$ mm) ersetzt würde, wodurch die Länge des Filters stark reduziert würde.

Die Benutzung des durch die Blende B_1 verkleinerten Bündelquerschnitts hat zur Folge, daß nur noch ein schmales Bündel (etwa 10 cm Durchmesser) des primär einfallenden Sonnenlichts verwendet wird. Das Interferenzfilter darf also nicht zentrisch zum Turmteleskop justiert werden, weil sonst die Abschattung des Cassegrain- und Coudé-Spiegels die Lichtstärke stark reduzieren und die Abbildung verschlechtern würde. Aus diesem Grunde wurde die Optik vor dem Filter (Linse L_1) so berechnet, daß der Hauptspiegel mit dem Schatten des Cassegrain-Spiegels auf die Blende B_1 abgebildet wird. Jetzt läßt sich das Umlenkspiegelchen S leicht so justieren, daß die Eintrittsblende B_1 exzentrisch im Bild des Parabolspiegels und in einem Sektor zwischen zwei Haltestreben des Cassegrain-Spiegels sitzt und so ein unvignettiertes Bündel zur Abbildung verwendet wird. Die in I beschriebene schwenkbare, exzentrische Blende zur Herabsetzung der instrumentellen Erwärmung unterhalb des Coelostaten ist so justiert, daß sie gerade das für das Interferenzfilter benutzte Bündel durchläßt. Das Aufsuchen und Einstellen bestimmter Objekte mit dem Interferenzfilter kann also auch bei in den Strahlengang gebrachter Blende erfolgen, so daß die volle Öffnung des Turmteleskops wirklich nur für die eigentliche Aufnahme freigegeben zu werden braucht.

Zur Justierung des Filters und zur Bestimmung der Betriebstemperatur der Thermostaten (sie ergab sich zu $38^\circ, 2$) kann das aus dem Interferenzfilter kommende Licht statt in das Beobachtungsfernrohr über mehrere Spiegel in den Hauptspektrographen geleitet werden. Mit Hilfe des Sonnenspektrums

⁴⁾ Ein von der Firma B. Halle kurzzeitig überlassenes Filter mit Polaroidfolien erwies sich als zu lichtschwach.

kann dann kontrolliert werden, wann das Durchlaßmaximum des Filters genau im Zentrum von H_α liegt.

3. Monochromator

Bei Beobachtungen in hohen Ordnungen der Plangitter reichen normale Farbfilter häufig nicht mehr aus, um die überlappenden Nachbarordnungen zu eliminieren. Um für diese Zwecke eine Vorzerlegung des in den Hauptspektrographen eintretenden Lichtbündels zu erreichen, wurde ein Einprismen-Monochromator konstruiert⁵⁾. Der Monochromator entspricht einem von W. Moss angegebenen und von R.O.Redman benutzten Instrument [7]. Der Lichtweg im Monochromator ist in Abb. 7 skizziert. Das durch den Vorspalt

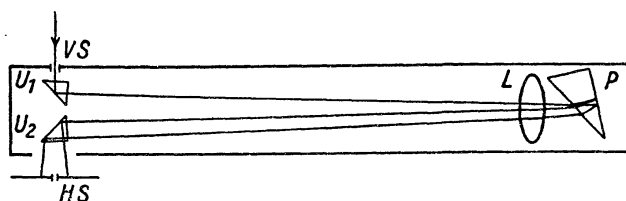


Abb. 7: Strahlengang im Monochromator: VS Vorspalt, U_1 und U_2 Umlenkprismen, L als Kollimator und Objektiv dienende Linse, P 30°-Halbprisma, HS Hauptspalt

VS gelangende Sonnenlicht wird durch ein kleines Umlenkprisma U_1 von 7,5 mm Seitenlänge und 15 mm Höhe um 90° abgelenkt und fällt auf ein in Autokollimation benutztes, auf der Rückseite verspiegeltes 30°-Halbprisma P mit einer Basis von 9 mm und einer Höhe von 25 mm. Über ein zweites Umlenkprisma U_2 wird dann ein kleines Spektrum auf dem Spalt des Hauptspektrographen HS erzeugt. Die Brennweite der abbildenden Linse L beträgt im visuellen Bereich etwa 300 mm. Die Verschiebung des Wellenlängenbereichs erfolgt durch Drehen des lichtzerlegenden Prismas. Der ganze Monochromator ist fest in einem kleinen Gehäuse montiert, das leicht von der Seite her vor den Spalt und wieder zurückgefahren werden kann. Beim Arbeiten mit Monochromator wird — durch Umfokussieren mit dem Cassegrain-Spiegel — das Sonnenbild auf dem Vorspalt scharf abgebildet und dort auch geführt.

⁵⁾ Da bei photometrischen Arbeiten mit modernen Gittern, die nur sehr geringes Streulicht und schwache Geister besitzen, eine starke spektrale Vorzerlegung nicht mehr erforderlich ist, wurde der in [3] beschriebene Doppelmonochromator aus Platzgründen abgebaut. Wenn man dafür sorgt, und das ist bei schwacher spektraler Vorzerlegung immer möglich, daß die Halbwertsbreite der Apparatekontur des Monochromators größer ist als die beim Hauptspektrographen benutzte Spaltbreite, so ist es nicht mehr notwendig, wie das bei dem früher benutzten Doppelmonochromator der Fall war, daß auf dem Hauptspalt ein monochromatisches Bild des Vorspalts entworfen wird.

4. Standardisierungsspektrograph

Der in [3] beschriebene Standardisierungsspektrograph nach der Schneidmethode von v. Hirsch und Schön hat den Vorteil eines rein geometrisch erzeugten und daher wellenlängenunabhängigen Helligkeitsabfalls am Spalt. Jedoch ist die benutzte Anordnung recht justieranfällig und empfindlich gegenüber Streulicht. Außerdem ist sie verhältnismäßig lichtschwach, so daß es bei den neuen lichtstarken Gittern nicht immer möglich ist, unter Verwendung einer Wolfram-Bandlampe im blauen Spektralbereich Standardisierungsaufnahmen mit etwa gleicher Belichtungszeit wie bei den Sonnenaufnahmen zu erhalten. Der Standardisierungsspektrograph wurde daher völlig umgebaut; der Intensitätsabfall wird jetzt durch einen Neutralkeil unmittelbar vor der Platte erzeugt. Die Anordnung des neuen Spektrographen ist in Abb. 8 skizziert. Als Lichtquelle dient eine Wolfram-Bandlampe W , die ohne abbildende

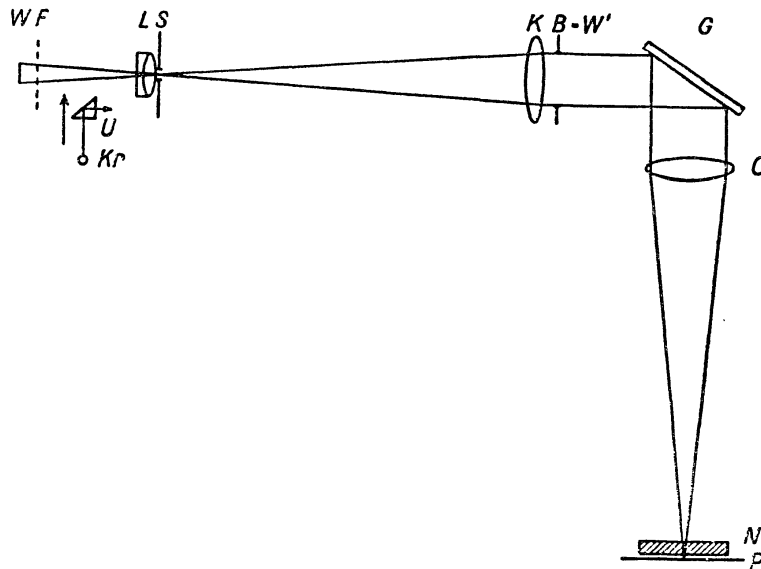


Abb. 8: Strahlengang im Standardisierungsspektrograph: W Wolfram-Bandlampe, F Farbfilter, L Feldlinse, S Spalt, K Kollimator, B Blende und Belichtungsblende, W' Bild von W , G Gitter, O Objektiv, N Neutralkeil, P Kassettenebene (Platte oder Film), U hereinschiebbares Umlenkprisma, Kr Kryptonlampe

Optik einen 1 mm breiten und 20 mm hohen Spalt S beleuchtet, der in einer Entfernung von ~ 13 cm von der Lampe steht. Der Spalt liegt in der Brennebene des Spektrographen-Kollimators K ($f = 45$ cm). Das Licht fällt so als Parallellichtbündel auf das Gitter G , welches in Verbindung mit dem Kameraobjektiv O auf der Platte P ein Spektrum entwirft. Um alles durch den Spalt gehende Licht mit dem Kollimator zu erfassen und um Vignettierungen zu vermeiden, ist unmittelbar vor dem Spalt eine Feldlinse L (Achromat, $f = 12$ cm, 41 mm Durchmesser) angebracht, die das Band der Lampe in eine Blende B unmittelbar hinter dem Kollimator abbildet (W'). Ein Achromat als Feldlinse erwies sich als notwendig, um eine Abbildung in allen Farben möglichst an

derselben Stelle zu erreichen. Die Blende B ist gleichzeitig als Belichtungs-
klappe ausgebildet, die durch eine einfache Elektronik gesteuert wird (es
kommt hier nicht auf genaue Reproduzierbarkeit der Belichtungszeiten wie
beim Hauptspektrographen [s. II, 1] an). Zwischen Lampe und Feldlinse
können Farbfilter F eingeschaltet werden, um das Streulicht im Spektro-
graphen von vornherein möglichst klein zu halten. Unmittelbar vor der Platte
befindet sich der 20 mm hohe und 50 mm breite Neutralkel N aus NG 4-Glas
mit einem Intensitätsbereich von im Mittel 1 : 50. Die Dispersion des Spektrums
beträgt $\sim 30 \text{ \AA/mm}$; der Keil gestattet also die Abbildung eines etwa 1500 $\text{\AA}$
breiten Spektralbereichs, so daß mit zwei Aufnahmen der ganze Bereich eines
mit dem Konkavgitter aufgenommenen Films überdeckt werden kann. Werden
nur Standardisierungen für eine einzelne Wellenlänge benötigt, so kann un-
mittelbar vor dem Keil eine schmale Blende eingefügt werden.

Zur Festlegung der Wellenlängenskala kann an Stelle der Bandlampe mittels
eines Umlenkprismas U das Licht einer seitlich montierten Kryptonlampe Kr
verwendet werden.

Um Randunschärfen und eine Verschmierung des Intensitätsabfalls zu ver-
meiden, ist es notwendig, den Keil möglichst nahe an die Platte zu bringen.
Mit einem fest montierten Keil war dies nicht möglich, weil schon der Abstand
vom Kassettenschieber zur photographischen Schicht ziemlich groß ist. Der
Keil K (vgl. Abb. 9) wurde darum auf einer gleitenden Fassung so montiert, daß

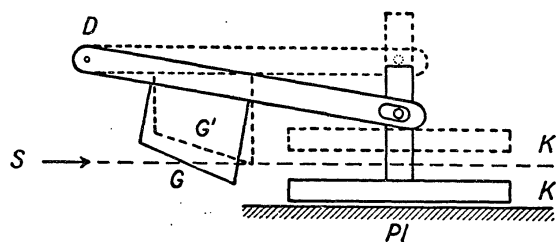


Abb. 9: Zur Halterung des Neutralkells:
ausgezogen in Stellung während der Auf-
nahme, gestrichelt in Ruhestellung. D
Drehpunkt, G bzw. G' Gleitfläche, K bzw.
 K' Keil, Pl Plattenebene, S Kassettens-
chieber

er beim Öffnen des Kassettenschiebers S bis auf knapp 1 mm an die photo-
graphische Schicht heranrückt. Beim Schließen drückt der Schieber gegen
eine Gleitfläche G und schiebt damit durch eine Hebelübertragung auch den
Keil wieder entsprechend zurück. Der Keil wurde über den ganzen Wellen-
längenbereich photoelektrisch geeicht.

Ohne die großzügige und dankenswerte Unterstützung von seiten der Deut-
schen Forschungsgemeinschaft wäre der instrumentelle Ausbau des Göttinger
Sonnenturms seit 1953 nicht möglich gewesen.

An der Entwicklung des hier im einzelnen beschriebenen Instrumentariums
haben sich neben den Verfassern die Herren A. Behr, K. H. David, G. Elste,
Fr. W. Jäger und P. Stumpff beteiligt. Ihnen, sowie der Werkstatt der
Sternwarte, insbesondere Mechanikermeister K. H. Duensing, gebührt unser
aufrichtiger Dank.

Literatur

- [1] von Alvensleben, A.: *Z. f. Astrophysik* **43**, 63 (1957) = Veröff. d. Univ.-Sternwarte Göttingen, Nr. 118.
- [2] Behr, A.: *Nachr. d. Akad. d. Wiss. Göttingen, math.-phys. Klasse* 1956, Nr. 10 = Veröff. d. Univ.-Sternwarte Göttingen, Nr. 114.
- [3] ten Bruggencate, P. und F. W. Jäger: *Nachr. d. Akad. d. Wiss. Göttingen, math.-phys. Klasse* 1951, Nr. 5 = Veröff. d. Univ.-Sternwarte Göttingen, Nr. 101.
- [4] David, K. H.: *Z. f. Astrophysik* **45**, 192 (1958) = Veröff. d. Univ.-Sternwarte Göttingen, Nr. 120.
- [5] Elste, G.: *Z. f. Astrophysik* **33**, 39 (1953) = Veröff. d. Univ.-Sternwarte Göttingen, Nr. 107.
- [6] Kron, G. E.: *Astrophys. Journal* **115**, 1 (1952).
- [7] Redman, R. O.: *Monthly Notices R. A. S.* **97**, 552 (1937).
- [8] Runge, C. und R. Mannkopff: *Z. f. Physik* **45**, 13 (1927).
- [9] Runge, C. und K. W. Meissner: *Handbuch d. Astrophysik* Band I, 1 S. 214 (1933) und Bd. VII S. 1 (1936).