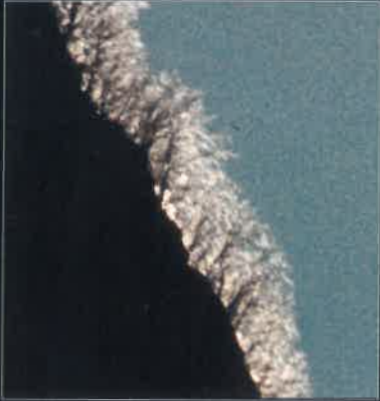


Die Beobachtung der Sonne

mit Geräten und Zubehör von Baader Planetarium



baader[®]
planetarium

Zum Titelbild: Diese Aufnahmeserie gelang dem Japaner I. Tsukamoto am 27. Oktober 1987 auf einem Hochplateau 2000 m über Meereshöhe bei optimalen atmosphärischen Bedingungen. Während die Sonne noch durch eine nahe Hügelkette abgedeckt ist, wird eine eruptive Sonnenprotuberanz von enormer Größe sichtbar, die sich immer weiter über den Horizont erhebt, bis sie im Licht der aufgehenden Sonne verblaßt. Herr Tsukamoto benutzte für diese Aufnahmen ein 300 mm Teleobjektiv mit einem 1.4 × Teleextender ($f_{\text{eff}}=420 \text{ mm}$) ohne jeden Rotfilter.

Die Beobachtung der Sonne

»Sie sind an einem frühen Wintermorgen zu einer Wanderung in die Berge aufgebrochen. Die Sonne versteckt sich noch hinter einem Bergrücken, Bäume und Sträucher sind mit Schnee und Raureif bedeckt. Der Himmel ist tiefblau und die Luft erstaunlich klar, es verspricht ein schöner Tag zu werden. Es ist kalt, und Sie schauen in Richtung Osten, um zu sehen, wie lange es noch dauern wird, bis die Sonne endlich aufgeht. Doch bis jetzt ist nur ein Kranz aus Streulicht in den Bäumen an dem fernen Berghang und winzig klein die Spitze einer langgezogenen Zirruswolke zu sehen. Irgendetwas an dieser Wolke ist ungewöhnlich: Eigentlich müsste sie bei diesem Blickwinkel zur Sonne hellweiß leuchten, doch sie glimmt in einer tiefroten Farbe.

Diese Wolke gibt Ihnen zu denken. Immer wieder schauen Sie zu dem Bergrücken im Osten. Der Streulichtkranz um die Bäume wird stärker und kündigt das

nahe Aufgehen der Sonne an. Mit der gleichen Geschwindigkeit schiebt sich auch die rote Wolke hinter dem Berg hervor, so als würde sie dem Lauf der Sonne folgen. Und plötzlich wird Ihnen klar, was Sie da vor sich sehen.

Sie haben von roten pulsierenden Riesensternen mit hunderten von Sonnendurchmessern gelesen, von jungen O-Sternen mit Tausenden von Sonnenleuchtkräften, von Novaausbrüchen in kataklysmischen Doppelsternsystemen und Supernova-Explosionen, so hell wie eine ganze Galaxie. Doch die Sonne hatten Sie immer für einen friedlichen, ja (Gott sei Dank) für einen eher langweiligen Stern gehalten, und nun sehen Sie, wie sich eine eruptive Protuberanz von enormer Größe in den Himmel erhebt. Ohne jedes Zusatzinstrument und ohne Filter erkennen Sie zahlreiche Strukturen, ein erschreckender Anblick.«

Auch erfahrene Sonnenbeobachter werden diese Geschichte im ersten Moment für sehr unwahrscheinlich halten, doch die Aufnahme des japanischen Amateurastronomen I. Tsukamoto (Titelbild), aufgenommen am 27. Oktober 1987 mit einem 300mm Teleobjektiv ohne jedes Rotfilter, beweist, daß derartige Beobachtungen möglich sind (vgl. auch SuW 12/98 S.1088 ff). Die Aufnahme entstand auf einem Hochplateau 2000 m über Meereshöhe bei optimalen atmosphärischen Bedingungen: Wie ein riesiger Vorrat an Trockenmittel hatten die Äste und Zweige der Bäume und Sträucher auf den umliegenden Berghängen jede Feuchtigkeit aus der Atmosphäre abgesaugt, die Luft war glasklar. Noch am selben Tag konnte die gleiche Protuberanz auch mit engbandigen H α -Filtern aufgenommen werden, ein Irrtum ist daher ausgeschlossen (vgl. auch SuW 12/98, S.1088 ff).

Berichte, nach denen noch vor einigen Jahrzehnten mit Koronographen auf hochgelegenen Observatorien Protuberanzen mit einfachen Rotfiltern und sogar die Korona beobachtet werden konnten, sind heute nur noch schwer zu glauben. Zunehmende Luftverschmutzung haben mittlerweile solche Beobachtungen fast unmöglich gemacht. Dieser Entwicklung müssen sich auch professionelle Astronomen stellen: So wurde z.B. der Wendelstein-Koronograph demontiert, von unserer Firma komplett zerlegt, von Grund auf restauriert und funktionsfähig gemacht, um in den Kordillieren Argentiniens seine Arbeit wieder aufzunehmen – unter einer Kuppel aus unserer Fertigung.

Die Titelaufnahme macht verständlich, warum vergangene Kulturen die Sonne als Gottheit verehrten. Zu jenen Zeiten achteten die Menschen genauer auf die Erscheinungen am Himmel, hingen doch Erfolg und Mißerfolg der Ernten von der richtigen Bestimmung der Jahreszeit ab. Derartige Phänomene

werden ihnen nicht verborgen geblieben sein. Welche tiefgreifenden gesellschaftlichen Folgen mögen solche Eruptionen auf der Sonnenoberfläche ausgelöst haben, wurden sie von den Priestern dieser Völker entdeckt?

Die Beobachtung der Sonne ist auch heutzutage alles andere als langweilig, sie bietet dem Amateur im Gegenteil viele interessante und spannende Arbeitsfelder, angefangen bei der Dokumentation der Sonnenaktivität bis hin zur Fotografie der Granulation und der extrem detailreichen und sich schnell ändernden Sonnenflecken und Protuberanzen. Gerade auch kleine, hochwertige Instrumente können hier ihre Leistungsfähigkeit voll unter Beweis stellen. So mancher Amateurastronom hat aus diesem Grund die Beobachtung der Sonne zu seinem Hauptarbeitsgebiet gemacht.

Dem Amateur stehen heute die verschiedensten Instrumente zur Sonnenbeobachtung zur Verfügung, angefangen bei Okularen zur Sonnenprojektion bis hin zu Protuberanzenansätzen und Interferenzfiltern zur Beobachtung der Chromosphäre. Hinzu kommt ein großes Angebot an Teleskopen von den verschiedensten Herstellern. Sich vor dem Kauf genau zu informieren tut daher Not, um spätere Enttäuschungen zu vermeiden. Dieser Prospekt möchte Ihnen dabei helfen. Er soll Ihnen zum einen eine Zusammenfassung der von uns angebotenen Geräte zur Sonnenbeobachtung geben, enthält aber darüber hinaus eine Vielzahl von Tips und Informationen, die Sie mit den Feinheiten der Sonnenbeobachtung vertraut machen sollen. Zahlreiche Abbildungen erläutern die im Text behandelten Themen, wobei sich die in einigen Bildtexten dargestellten formalen Ableitungen an jene Leser richten, welche sich auch mit den theoretischen Grundlagen vertraut machen wollen.

Das Teleskop für die Sonnenbeobachtung

4

Im Prinzip ist mit jedem Teleskop die Beobachtung der Sonne möglich, sofern die Hinweise der Teleskophersteller beachtet werden. Neben handelsüblichen Geräten, wie sie auch für die nächtlichen Beobachtungen zum Einsatz kommen, setzen einige Amateure spezielle Sonnentelkope ein, etwa langbrennweitige Newton-Reflektoren mit unbelegten Hauptspiegeln [5] oder Refraktoren mit einer einzelnen asphärischen Linse, deren Farbfehler mit Hilfe von Interferenzfiltern eliminiert wird [8] (siehe auch Abbildung 4). Derartige Instrumente sind jedoch ausschließlich für die Sonnenbeobachtung einsetzbar, sie bleiben denjenigen Amateurastronomen vorbehalten, die sich auf die Beobachtung der Sonne spezialisieren, und sind entsprechend wenig verbreitet.

Das bevorzugte Standardinstrument für die Sonnenbeobachtung ist und bleibt der Refraktor. Bei der enormen Lichtfülle der Sonne spielt die lichtsammelnde Wirkung der Optik keine Rolle, so daß der größte Vorteil lichtstarker Spiegelteleskope – die große Öffnung – nicht zum Tragen kommt. Dagegen verhilft das Fehlen eines Fangspiegels im Strahlengang dem Refraktor zu einer besseren Kontrastleistung bei gleicher Objektöffnung. Das sekundäre Spektrum normaler Achromate kann bei dem Überangebot an Licht durch Farbfilter unterdrückt werden. Die langen Brennweiten solcher Refraktoren ($n \approx 10 \dots 15$) sind dabei kein Nachteil, da bei der Sonnenbeobachtung mittlere bis starke Vergrößerungen ($\geq 50\times$) gefragt sind. Neben den Apochromaten können daher gerade die Achromaten und Halbapochromaten ihre Leistungsfähigkeit bei der Sonnenbeobachtung voll unter Beweis stellen.

Luftunruhe und Bildschärfe

Da das Lichtsammelvermögen des Objektivs bei der Lichtfülle der Sonne ohne Bedeutung ist, wird der maximal sinnvolle Objektivdurchmesser durch die atmosphärischen Bedingungen (Luftunruhe) am Beobachtungsort definiert.

Der Effekt der »Luftunruhe« wird verursacht durch Luftzellen unterschiedlicher Temperatur und Dichte und somit unterschiedlicher Brechungsindizes in der Atmosphäre. Das Licht, das uns von astronomischen, also sehr weit entfernten Objekten erreicht, hat beim Eintritt in die Atmosphäre die Form ebener Wellen. Die einzelnen Abschnitte einer solchen Welle werden beim Durchqueren der Atmosphäre von den einzelnen Luftzellen unterschiedlich gebrochen und abgelenkt, die Wellenfront wird deformiert. In Abbildung 1 ist dies schematisch dargestellt. Da die einzelnen Luftzellen sich bewegen (auch Dichte und Temperatur ändern sich mit der Zeit), wechselt die Deformation der Wellenfront ständig und man beobachtet im Okular das bekannte Flimmern und Wabern des Bildes. Obwohl wir dieses Phänomen aufgrund des optischen Eindrucks »Luftunruhe« nennen, ist das eigentliche Problem nicht die Bewegung der Luftschichten, sondern ihr inhomogener Brechungsindex.

Auch das beste Objektiv wird bei einer derart deformierten Wellenfront kein scharfes Bild liefern. Erst in Momenten bester »Luftunruhe«, wenn die Objektöffnung einen (nahezu) ebenen Abschnitt aus der Wellenfront ausschneidet, sehen wir ein scharfes Bild. Diese ebenen Abschnitte, die das Teleskopobjektiv sieht, besitzen allerdings unterschiedliche Einfallswinkel, d.h. der Bildpunkt bewegt

sich, er »tanzt« um seine wahre Position. Aufgrund der sehr kurzen Belichtungszeiten ($< 1/500$ Sek.) lassen sich diese Bewegungen bei der Sonnenfotografie einfrieren. Auf diese Weise kann eine Bildschärfe erreicht werden, die sich in Bruchteilen von Bogensekunden mißt und die bei der nächtlichen Astronomie, wo längere Belichtungszeiten erforderlich sind, nur in Ausnahmefällen oder mit speziellen Techniken möglich ist (Stichwort: Adaptive Optik).

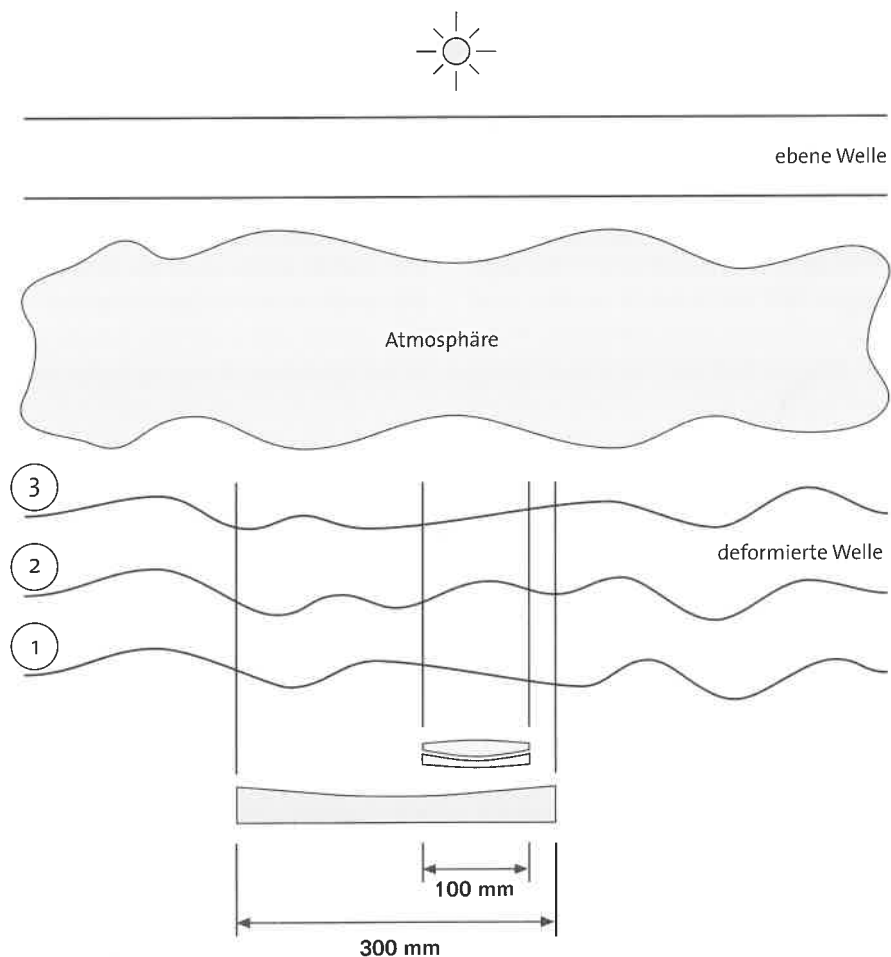
Die Wahrscheinlichkeit für das Ausschneiden ebener Wellenfrontabschnitte sinkt mit wachsendem Objektivdurchmesser. Aus diesem Grund lassen sich Teleskope mit Objektivöffnungen über 200 mm für die Sonnenbeobachtung nur an Beobachtungsstandorten mit sehr guten atmosphärischen Bedingungen sinnvoll einsetzen. Ausnahme: Sitzfleisch! Immer wieder beweisen gerade Amateure, daß man mit Geduld und Hartnäckigkeit geradezu unglaublich gute Aufnahmen auch mit großen Instrumenten machen kann. Allerdings

wartet man eventuell stundenlang auf gerade den Augenblick, wo eine laminare (geschichtete) Luftströmung das »Seeing« um den entscheidenden Bruchteil verbessert. Schauen Sie die Aufnahme auf Seite 11 ganz genau an. Sie können bei genauem Hinsehen sehr gut die unscharfen Zonen erkennen wo Turbulenzen in der *Erdatmosphäre* die Granulation verschmieren!

Objektivfehler und Bildkontrast

Die Oberflächenformen und Materialeigenschaften der Elemente eines optischen Systems (Linsen und Spiegel) werden so gewählt, daß die Abbildungsfehler möglichst klein bleiben [7]. Bei Teleskopen sind dies insbesondere sphärische Aberration und Koma, bei Refraktoren außerdem der Farbblänsfehler [4]. Neben der sorgfältigen Berechnung des optischen Systems gibt es noch eine ganze Reihe weiterer Kriterien, die beim Bau von Teleskopobjektiven zu beachten

Abbildung 1: Aufgrund der großen Entfernung erreicht uns das Licht astronomischer Objekte in Form ebener Wellen. Beim Durchqueren der einzelnen Luftzellen der Erdatmosphäre werden die Wellenfronten dieser Wellen deformiert. Da sich die Temperatur und die Lage der Luftzellen ändert, wechselt auch der Verlauf der Wellenfronten ständig. Als Folge hiervon beobachten wir im Teleskop ein unscharfes, waberndes Bild. Die Größe der Luftzellen reicht von wenigen Millimetern bis hin zu hundert Metern. Bei kleineren Objektiven ist die Wahrscheinlichkeit groß, für einen kleinen Bildausschnitt aus der deformierten Wellenfront einen nahezu ebenen Abschnitt auszuscheiden, im Bild oben ist dies bei den Wellenfronten (1) und (3) der Fall. Das Bild ist nun scharf, der entsprechende Bildpunkt liegt allerdings aufgrund des unterschiedlichen Einfallswinkels an verschiedenen Orten der Bildebene. Das größere Teleskop sieht dagegen fast immer eine deformierte Wellenfront, es kann sein volles Auflösungsvermögen nur selten erreichen [15].



sind. Linsenobjektive mit großen Linsenabständen neigen oft zu großen Fokusverschiebungen bei Temperaturschwankungen. Wurde kein entsprechend hoher Aufwand bei der Objektivfassung betrieben, so besteht bei einem solchen Objektiv die Gefahr einer Dezentrierung der Linsen, Achskoma ist dann die Folge. Große Linsenabstände findet man daher eher bei fotografischen Objektiven, wo es auf eine gute Feldkorrektur und weniger auf eine beugungsbegrenzte Abbildung nahe der optischen Achse ankommt. Die Außenlinsen eines Refraktorobjektivs sollten aus beständigen Gläsern hergestellt sein. Bei Reflektoren ist auf spannungsfreies Spiegelmaterial mit möglichst geringer Temperatúrausdehnung (z.B. Zerodur, Pyrex) und auf die richtige Konstruktion der Spiegelzelle zu achten. Ganz wesentlich auf die Abbildungsgüte wirken sich natürlich die Toleranzen bei der Herstellung der Linsen und Spiegel aus. All diese Faktoren machen deutlich, daß Teleskope, auch wenn sie gleiche optische Daten wie Objektivtyp, Objektivöffnung und -brennweite besitzen, durchaus sehr unterschiedliche Abbildungsleistungen aufweisen können.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die optische Leistungsfähigkeit eines Objektivs zu beschreiben. Oft wird das Trennvermögen von Doppelsternen zur Prüfung von Teleskopobjektiven herangezogen, dies reicht jedoch zu einer voll-

ständigen Beurteilung der Bildfehler nicht aus. Ein Vergleich der intra- und extrafokalen Abbildung eines Sterns ist hier wesentlich empfindlicher (siehe Kasten »Ein einfacher Objektivtest«). Eine sehr genaue, aber aufwendige Methode zur Bestimmung der optischen Abbildungsgüte eines Objektivs ist die Messung der *Wellenfrontdeformation*. Aus ihr läßt sich dann die *Modulations-Übertragungsfunktion* (MTF = modulation transfer function) des Objektivs ermitteln. Die MTF beschreibt, wie stark sich der Objektkontrast durch die Abbildung mit einem Objektiv reduziert. Diese Kontrastschwächung hängt natürlich von der Größe der beobachteten Strukturen, von der Objektivöffnung (Beugung), aber auch ganz wesentlich von der Abbildungsgüte der Optik ab. In Abbildung 2 wird dies am Beispiel der sphärischen Aberration kurz beschrieben. Für beliebig ausgedehnte Strukturen (normierte Ortsfrequenz $q = 0$) ist der Bildkontrast maximal (MTF = 1). Mit zunehmender Feinheit der Details sinkt der Kontrast langsam ab. Erreicht man den Wert, der nach dem Rayleigh-Kriterium dem Trennvermögen des Teleskops für gleichhelle Doppelsterne entspricht ($q = 0.82$), so liegt der Kontrast nur noch bei etwa 9% (MTF = 0.09). Bei Erreichen der Grenzfrequenz ($q = 1$) sind keine Kontrastunterschiede mehr erkennbar (MTF = 0) und die entsprechenden Strukturen können nicht mehr aufgelöst werden¹.

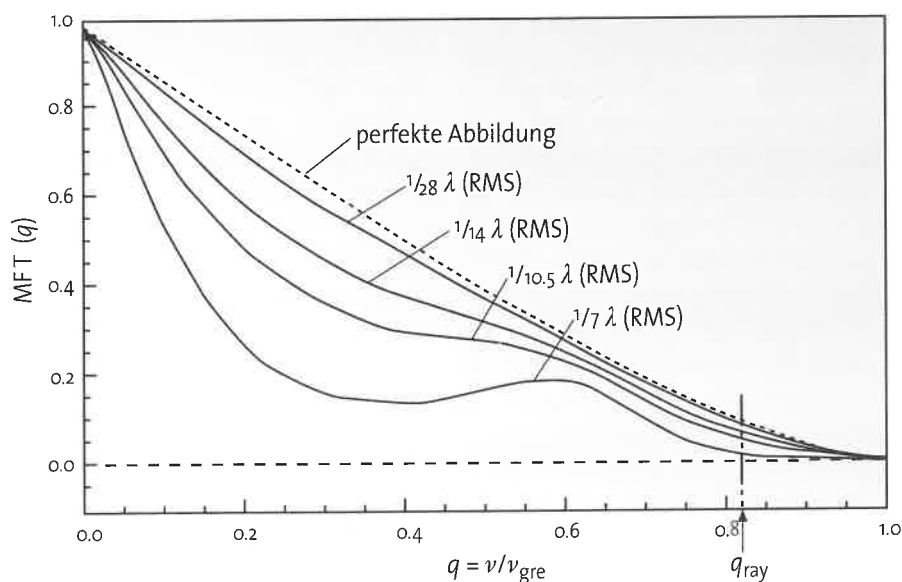


Abbildung 2: Die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) ist neben der Wellenfrontdeformation die geeignetste Methode, die Leistungsfähigkeit eines Objektivs darzustellen. Die MTF beschreibt das Verhältnis von Bild- zu Objektkontrast in Abhängigkeit von der Größe der Objektstrukturen [13]. Als Testbild wird hierbei ein Linienmuster benutzt, dessen Intensität sinusförmig mit der Ortsfrequenz v variiert. Bildet man dieses Muster mit einem Objektiv ab, so wird das Bild ebenfalls eine sinusförmige Helligkeitsverteilung aufweisen, allerdings wird der Kontrast $K_{opt}(v)$ des Bildes kleiner sein als der Kontrast $K_o(v)$ des Objekts. Er kann mit Hilfe der MTF $g_{opt}(v)$ wie folgt berechnet werden:

$$K_{opt}(v) = g_{opt}(v) \times K_o(v)$$

Die MTF kann im Fokus Werte zwischen 0 und 1 annehmen und hängt von der Ortsfrequenz v , d. h. von der Ausdehnung der beobachteten Strukturen, und natürlich vom Durchmesser, der Vignettierung (Fangspiegel!) und der Abbildungsgüte des Objektivs ab. Um den Einfluß des Objektivdurchmessers zu eliminieren, normiert man die Ortsfrequenz v auf die Grenzfrequenz $v_{gre} = d/\lambda$. Die normierte Ortsfrequenz $q = v/v_{gre}$ hängt nur noch von der Abbildungsgüte und der Vignettierung ab, und hat den Vorteil, dimensionslos zu sein. Sie wird 0 für beliebig ausgedehnte Objektstrukturen und erreicht den Wert 1 bei Strukturen der Ausdehnung $1/v_{gre}$. Die links dargestellte Abbildung zeigt die MTF für Objektive (ohne zentrale Abschattung) mit unterschiedlichen sphärischen Aberrationen [13]. Gekennzeichnet ist die Ortsfrequenz q_{ray} , deren Kehrwert $1/q_{ray}$ dem Durchmesser des Airy-Scheibchens und somit dem »Rayleigh-Kriterium« für die Auflösung eines Teleskops entspricht. Objektive mit einer Gesamtwellenfrontdeformation von $\lambda/28$ gelten bereits als hervorragend. Die Grenze für ein als »beugungsbegrenzt« bezeichnetes Objektiv liegt bei $\lambda/14$. (Beachte: Eine Wellenfrontdeformation von $\lambda/14$ RMS entspricht etwa einer maximalen Wellenfrontdeformation (= peak to valley) von $\lambda/4$ oder $\pm \lambda/8$ [13].)

Ein einfacher Objektivtest

In den Werbeschriften preisen die unterschiedlichen Teleskophersteller die Leistungsfähigkeit ihrer Teleskope oft in den schönsten Worten. Doch wie lassen sich diese Aussagen überprüfen? Kaum ein Amateurastronom wird ein Interferometer zur Verfügung haben oder beurteilen können, ob das vorgelegte Interferogramm wirklich das angebotene Objektiv beschreibt oder nur der Phantasie eines Computers entsprungen ist. Das oft benutzte Kriterium der Trennung von Doppelsternen reicht zur Prüfung nicht aus, da sphärische Aberration oder Zonenfehler bis zu einem gewissen Grad das Trennungsvermögen eines Objektivs kaum verschlechtern: Nach dem Rayleigh-Kriterium ist die Grenzauflösung eines Objektivs aber erreicht, wenn ein Partner eines Doppelsterns im ersten Beugungsminimum des anderen liegt. Nun ändert aber die sphärische Aberration nichts an der kreisrunden Form oder am Durchmesser der Beugungsringe, sie schiebt lediglich Intensität vom zentralen Maximum der Beugungsfigur in die Beugungsringe. Beide Sterne liegen also nach wie vor im Beugungsminimum des anderen und können trotz des Abbildungsfehlers problemlos getrennt werden, sie erscheinen lediglich etwas »weicher« im Kontrast. Erst bei der Be-

obachtung kontrastarmer, flächiger Objekte bei hohen Vergrößerungen (z. B. Planeten) wird dann im Vergleich mit einem fehlerfreien Objektiv der Kontrastverlust deutlich. Auch eine rotationssymmetrische Form der fokalen Beugungsfigur eines Sterns ist nur ein notwendiges, aber kein hinreichendes Kriterium für ein gutes Objektiv.

Ein empfindlicher und zugleich einfacher Test ist dagegen der Vergleich des intra- und extrafokalen Sternbildes bei *hohen Vergrößerungen* ($v \geq d_{\text{Ob}} [\text{mm}]$) und *kleinen Fokusabständen*. Um den Einfluß der Atmosphäre möglichst gering zu halten, wählen Sie für dieses Verfahren einen hellen Stern in Zenitnähe. Vermeiden sie unbedingt bei jedem Objektivtest horizontnahe Objekte, nicht nur wegen der Luftunruhe. Die Dispersion der Erdatmosphäre (d. h. die Abhängigkeit des Brechungsindex von der Wellenlänge des Lichtes) führt sonst zu Farbfehlern (das Sternbild wird zu einem kleinen, sehr schmalen Spektrum aufgeweitet), die nichts mit der Abbildungsleistung Ihres Objektivs zu tun haben. Eine Unterscheidung der objektiveigenen und atmosphärisch bedingten Bildfehler wird dann sehr schwierig.

Bei gleichem Abstand von der Fokalebene müssen bei einem fehlerfreien Ob-

jektiv die Beugungsfiguren die gleiche Form aufweisen (lediglich um 180° gedreht). Beim Verschieben des Okulars zeigt das Zentrum der Beugungsfigur abwechselnd eine maximale und minimale Intensität. Bei achromatischen Fraunhofer-Refraktoren führt der Restfarbfehler dazu, daß diese Maxima und Minima für verschiedene Farben an verschiedenen Orten liegen, ohne jedoch die Beugungsfigur einer Farbe zu verschmieren (die Forderung gleicher intra- oder extrafokaler Beugungsfiguren gilt dann jeweils für eine Farbe, es empfiehlt sich daher beim Testen von Achromaten der Einsatz von Farbfiltern). Der blaue und der gelbe Fokus sind deutlich unterscheidbar. Zeigen sich jedoch intra- und extrafokal die Beugungsringe mit stark unterschiedlichem Kontrast oder denaturieren gar als Farbkleckse, die eine Unterscheidung der verschiedenen Farb-Brennpunkte nicht zulassen, so hat dies nichts mit dem Restfarbfehler zu tun, sondern ist ein Zeichen für eine fehlerhafte Optik! Bei einem Apochromaten müssen der blaue und gelbe Fokus aufeinanderliegen und sich zu einem weißen Fokalbild aufaddieren. Intra- und extrafokales Sternbild dürfen, je nach Objektivtyp, keine, oder nur geringe Farbabweichungen zeigen, müssen aber ansonsten gleich aussehen.

7

Eine genaue Einführung in das interessante Gebiet der Modulationsübertragungsfunktionen würde viele Seiten füllen und den Rahmen dieses Kataloges bei weitem sprengen. Der interessierte Leser sei hier auf die weiterführende Literatur verwiesen (z. B. [13]).

Abbildung 2 führt drastisch vor Augen, wie groß der Einfluß z. B. der sphärischen Aberration auf den Bildkontrast sein kann. Ein Beispiel soll dies erläutern: Nehmen wir an, Sie wollen die Sonnengranulation fotografieren. Als Instrument steht Ihnen ein 100 mm Refraktor zur Verfügung. Die Grenzauflösung liegt somit bei $1.13''$. Der Durchmesser einer Granule liegt bei etwa $1.13''$, die normierte Ortsfrequenz beträgt also etwa $q = 0.87$.

Die MTF erreicht bei dieser Ortsfrequenz im Falle eines fehlerfreien Objektivs einen Wert von 5% (siehe Abbildung 2). Dieser Kontrast reicht aus, um

die Struktur der Granulation zu photographieren. Für ein Objektiv mit einer sphärischen Aberration, die einer Wellenfrontdeformation von $\lambda/28$ RMS entspricht, reduziert sich dieser Wert nur geringfügig², bei $\lambda/14$ RMS beträgt er noch etwa 75% des Bildkontrastes der fehlerfreien Optik, bei $\lambda/10.5$ RMS nur noch etwa 60%. Viele der billigen Importobjektive erreichen nicht einmal diesen Wert, wie man sich an Hand entsprechend verzerrter Sternbilder schnell klarmachen kann. In den meisten Fällen kommen noch weitere Abbildungsfehler hinzu, die den Bildkontrast abermals reduzieren. Die Fotografie der Granulation wird mit einem solchen Objektiv unmöglich.

Theoretisch ließe sich durch eine größere Objektivöffnung jederzeit eine höhere Kontrastleistung erzielen. Wie man anhand von Abbildung 2 erkennt, ist

1 Nach dem Rayleigh-Kriterium liegt die Grenze für die Trennung von Doppelsternen bei einem Teleskop mit Objektivdurchmesser d für die Wellenlänge λ bei $\alpha_{\text{ray}} = 1.22 \lambda/d$. Die sogenannte Grenzauflösung ist definiert als $\alpha_{\text{gre}} = \lambda/d$. Die diesen Winkelauflösungen entsprechenden Ortsfrequenzen betragen somit $\nu_{\text{ray}} = 0.82 \lambda/d$ und $\nu_{\text{gre}} = \lambda/d$.

2 Dies ist in etwa die Spezifikation, die APQ-Objektive von Zeiss oder EDT- und EDF-Objektive von Astro-Physics übertreffen müssen.

dies allerdings eine ziemlich ineffektive Lösung, da der Kontrastverlust durch Bildfehler im Bereich großer Ortsfrequenzen ($q \approx 0.7 \dots 1.0$), d.h. bei feinen Objektdetails wie der Granulation, am größten ist. Hinzu kommt, daß eine größere Objektivöffnung wesentlich anfälliger gegen Luftunruhe ist und sich auch die optischen Elemente nahe dem Brennpunkt stärker erwärmen. Gerade bei der Beobachtung und der Fotografie der Sonne mit ihren kurzen Belichtungszeiten lohnt sich daher der Einsatz auch kleinerer, dafür aber sehr hochwertiger Objektive. Dies beweisen viele der von Amateuren veröffentlichten Sonnenaufnahmen.

Der Einstieg in die Sonnenbeobachtung: Die C-Objektive von Zeiss

Der Wunsch nach lichtstarken Optiken führte in den letzten Jahren zu einer Flut von preisgünstigen Teleskopen mit immer größeren Öffnungen. Obwohl sich die niedrigen Kosten dieser Geräte nur durch Kompromisse in der optischen und mechanischen Qualität erreichen lassen, sind aufgrund dieser Preisentwicklung kleine, hochwertige Instrumente nicht mehr konkurrenzfähig. Dies führt dazu, daß heute bei den kleinen Instrumenten der Amateurateleskopmarkt zu einem wesentlichen Teil von den »Kaufhausteleskopen« beherrscht wird. Der sehr niedrige Preis verlockt viele angehende Amateurastronomen zum Kauf eines solchen Gerätes, dessen katastrophale optische und mechanische Qualität die erste Beobachtung zwangsläufig zu einer großen Enttäuschung werden läßt: Die Sterne sind farbige Kleckse, die Planetenbilder wirken flau und unscharf, und das Instrument zittert bei der kleinsten Berührung. In besonders schlimmen Fällen ist die Optik derart dejustiert, daß eine Fokussierung unmöglich ist. Falsch berechnete Blenden im Tubus oder am Okularstutzen wirken mitunter als Aperturbenden und reduzieren vom Kunden unbemerkt die effektive Objektivöffnung oder führen zumindest zu einer starken Vignettierung am Rand des ohnehin viel zu klei-

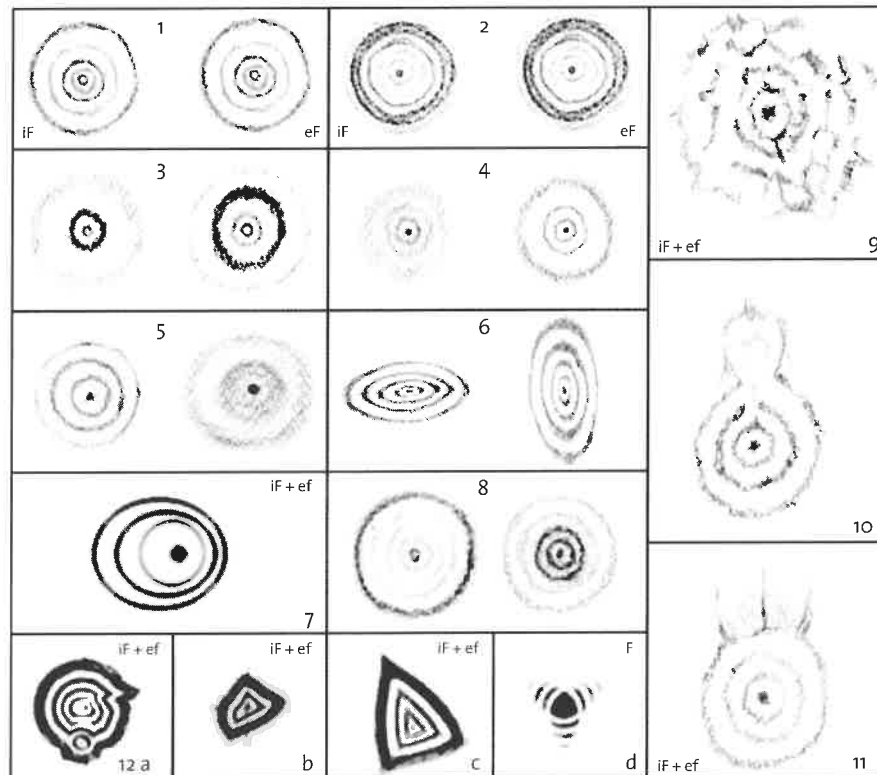
nen Bildfeldes. Während die mechanischen Mängel sofort offensichtlich werden, wird der Grund für die mangelnde Abbildungsgüte oft auf das »zu kleine« Objektiv geschoben.

Daß diese Schlußfolgerung schlichtweg falsch ist, beweist der Vergleich mit hochwertigen Objektiven wie den C-Achromaten C63/840 und C50/540 von Carl Zeiss Jena. Diese verkitteten Achromaten wurden aus sehr hochwertigen, schlieren- und spannungsfreien Flint- und Krongläsern hergestellt und einzeln geprüft, was ihre hervorragende Abbildungsgüte erklärt. Das C63/840 bildete ursprünglich das Objektiv für das bekannte Telemator-Schulteleskop, das C50/540 war Teil eines Optiksatzes für den Eigenbau eines kleinen Refraktors. Beide Objektive werden nicht mehr hergestellt. Bei aller Abbildungsgüte ist ihre Fertigung in der von Zeiss geforderten Qualität heute einfach zu teuer. Die Lagerbestände wurden von uns übernommen, so daß wir diese Achromaten zu einem ausgesprochen günstigen Preis für den Eigenbau eines Refraktors anbieten können.

Mit beiden Objektiven lassen sich hervorragende Sonnentelkope bauen. Das C50/540 besitzt aufgrund seiner kleinen Öffnung eine vergleichsweise geringe Anfälligkeit gegen Luftunruhe und eignet sich damit sehr gut für die Überwachung der Sonnenaktivität, da hierbei konstante Beobachtungsbedingungen wichtiger sind als eine sehr hohe Auflösung. Mit dem längerbrennweitigen Objektiv C63/840 lassen sich die Sonnenflecken im Detail beobachten und photographieren, seine Kontrastleistung stellt dabei so manches größere Gerät in den Schatten. Bei kontrastreichen Objekten (wie dem Mond) sind Vergrößerungen bis $168\times$ ohne weiteres möglich (ausreichend gute Luftunruhe vorausgesetzt). Der Farbfehler ist bei diesen kleinen Öffnungen und Öffnungsverhältnissen praktisch ohne Bedeutung, er kann aber durch ein Grünfilter vollständig unterdrückt werden (wenn z. B. beim Fotografieren mit langen Effektivbrennweiten das letzte aus dem Objektiv herausgeholt werden soll). Da diese Objek-

Abbildung 3: Das intra- und extrafokale Sternbild eines Teleskops ermöglicht eine recht genaue Beurteilung eines Fernrohrobjektivs. Während bei einer fehlerfreien Optik das intra- und extrafokale Beugungsbild gleich aussehen muß, führen die unterschiedlichen optischen Fehler zu typischen Änderungen der Intensitätsverteilung, die oft direkt Aufschluß über die Art des Abbildungsfehlers geben. So führt sphärische Aberration zu einer Umverteilung von Intensität in den einzelnen Beugungsringen, die intra- und extrafokal nicht gleich ist. Astigmatismus verursacht eine elliptische Verzerrung der Beugungsfigur, die von intra- zu extrafokal um 90° gedreht ist. Eine genaue Zuordnung der optischen Fehler zu den einzelnen Bildbeispielen enthält die folgende Tabelle:

- | | |
|-------|---|
| 1 | Fehlerfreie Optik ohne Obstruktion (z.B. Refraktor) |
| 2 | Fehlerfreie Optik mit zentraler Obstruktion (z.B. Schmidt-Cassegrain) |
| 3 | Zonenfehler |
| 4 | Abfallende Kante |
| 5 | links sauber auspoliert, rechts dagegen nicht ! |
| 6 | Astigmatismus |
| 7 | Koma |
| 8 | Sphärische Aberration |
| 9 | Luftunruhe (bewegtes Bild!) |
| 10/11 | Luftturbulenzen im Tubus |
| 12a | große Luftblase, Schliere |
| 12b-d | Verspannungen, Verbiegungen |



tive nur zwei Luft-Glas-Flächen besitzen, sind sie sehr streulichtarm und eignen sich daher hervorragend für die Beobachtung der Protuberanzen im Licht der roten H α -Linie (Kapitel »Die Beobachtung der Chromosphäre«).

Vergleichen Sie unsere C-Objektive mit der Optik eines Kaufhausteleskops mit Hilfe des im Kasten »Ein einfacher Objektivtest« beschriebenen Sterntests oder bei der Planetenbeobachtung mit hohen Vergrößerungen, der Unterschied wird Ihnen sofort auffallen (siehe auch Abbildung 3). Ein selbstgebauter Refraktor mit einem C-Achromaten von Zeiss wird Ihnen ein Leben lang Freude machen, auch wenn Ihnen längst größere Instrumente zur Verfügung stehen (z.B. als kleiner Reiserefraktor).

Die neuen ALLSTAR®-Teleskope

Die fertige Alternative zum Selbstbau sind unsere neuen Eigenkonstruktionen, die ALLSTAR®-Refraktoren 80/480 und 100/680. Letztgenanntes Objektiv für diese Teleskope wurde von Herrn Dr. Pudenz (einem der Konstrukteure des

Zeiss APQ-Objektivs) für uns gerechnet. Beide Objektive entsprechen in ihrer Charakteristik den kurzbrennweitigen Zeiss C-Objektiven C80/500 und C110/750. In Verbindung mit einer unserer neuen Barlowlinsen wird ein Öffnungsverhältnis erreicht, das in etwa dem der klassischen Fraunhofer-Refraktoren entspricht. In dieser Kombination eignen sich die ALLSTAR®-Refraktoren ebenfalls ganz hervorragend für die Sonnenbeobachtung.

Kennzeichnend für die ALLSTAR®-Teleskope ist neben der optischen Leistung eine solide mechanische Ausstattung. Ein genau gearbeiteter zweistufiger Okularauszug mit Schiebetubus und Mikro-Fokussierschnecke (nachempfunden dem Zeiss-Okularauszug zum AS 100/1000 Semi-Apochromaten) erlaubt die Nutzung der vollen Teleskopöffnung bis zum Bildfeldrand, auch wenn ein T-2 Zenitprisma vor das Okular gesetzt wird. Der Anschluß an das Stativ oder eine astronomische Montierung erfolgt über eine Montageschiene, die zusätzlich über ein Standard-1/4"-Photogewinde verfügt. Die kurze Baulänge macht diese Geräte zum idealen Reiseinstrument.

Beobachtungen der Photosphäre

10

Von den drei »Atmosphärenschichten« der Sonne (Photosphäre, Chromosphäre und Korona) ist die Photosphäre die mit Abstand intensivste und lichtstärkste. Bei einer Temperatur von etwa 5800 K liegt ihr Intensitätsmaximum im grünen Spektralbereich. Im Teleskop fällt sofort die körnige Struktur der Photosphäre auf: Granulen, aufsteigende Plasmablasen mit einem Durchmesser von etwa 1000 km (dies entspricht einem Winkeldurchmesser von etwa 1,3"), liegen wabenartig dicht an dicht und bilden die Feinstruktur der Photosphäre. An Orten lokaler Magnetfeldstörungen treten Sonnenflecken auf, deren Temperatur etwa 1000 K unter der der ungestörten Umgebung liegen und die daher durch das Sonnenfilter dunkel erscheinen. Die Formenvielfalt von Sonnenflecken reicht von einfachen, nur etwa 1" großen Poren bis zu komplexen Fleckengruppen mit bis zu hundert, zum Teil sehr großen und stark strukturierten Einzelflecken. Die schnelle Änderung ihrer Form macht die Sonnenbeobachtung zu einem der interessantesten Arbeitsgebiete, stets zeigt sich ein neues, zuvor nie dagewesenes Bild.

Eine Besonderheit der Sonnenbeobachtung ergibt sich aus der enormen Lichtfülle unseres Tagesgestirns. Während man es bei den nächtlichen Beobachtungen meist mit sehr lichtschwachen Objekten zu tun hat, muß bei der Sonnenbeobachtung unbedingt der wesentliche Anteil der einfallenden Strahlung ausgefiltert werden, sonst drohen bleibende Augenschäden.

Das Problem der Lichtdämpfung

Ein Satz, den Sie sicher schon oft gelesen haben, soll auch am Anfang dieses Kapitels stehen:

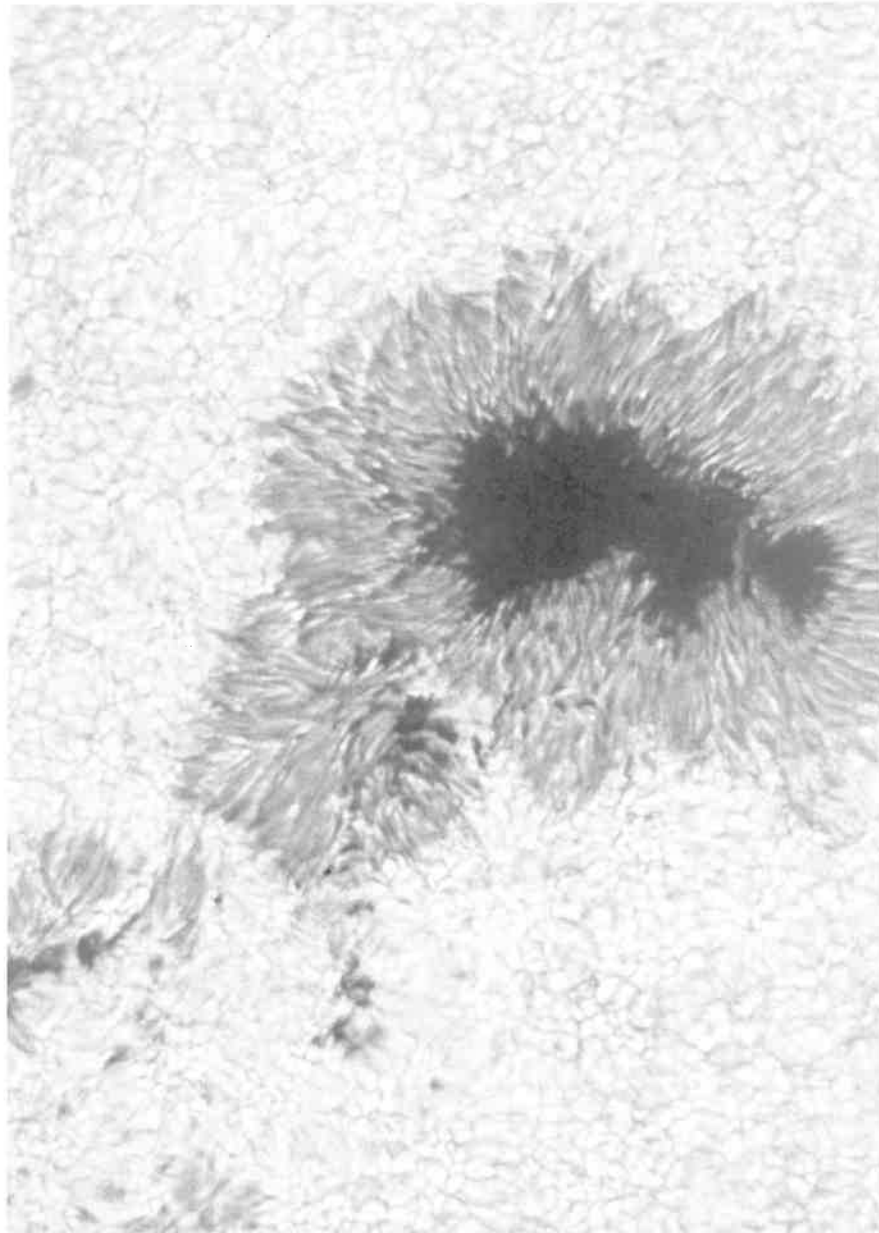
Beobachten Sie nie die Sonne ohne die notwendigen lichtabschwächenden Zusatzgeräte im Strahlengang Ihres Teleskops. Irreparable Augenschäden könnten sonst die Folge sein. Die Lichtabschwächung sollte im UV- und IR-Bereich mindestens so groß sein wie im visuellen Spektralbereich. Anders als im sichtbaren Spektralbereich können Sie ein zuviel an UV- und IR-Strahlung nicht durch ihre blendende Wirkung erkennen, dies macht sie so tückisch!

Lassen Sie ein auf die Sonne gerichtetes Instrument nie unbeaufsichtigt. Unvorsichtige oder allzu neugierige »Besucher« könnten im falschen Augenblick einen Blick durch das Gerät werfen, sich vielleicht gar am Objektivfilter zu schaffen machen. Insbesondere Kinder sollten eindringlich auf die Gefahren aufmerksam gemacht werden!

Beachten Sie unbedingt die Auflagen der Teleskophersteller. So dürfen z.B. Schmidt-Cassegrain- und kurzbrennweitige Newton-Reflektoren nur mit Objektivfiltern zur Sonnenbeobachtung verwendet werden. Die kurzen Brennweiten der Primärspiegel können sonst zur Beschädigung der Sekundärspiegel und zum Platzen der Schmidt-Platte führen.

Optische Elemente, die nahe der Fokalebene im Strahlengang des Teleskops eingebaut werden und die einen großen Teil des einfallenden Lichts absorbieren (z. B. Farbfilter), werden sich während der Beobachtung stark erwärmen, und das umso mehr, je größer der Objektivdurchmesser ist. Diese Erwärmung überträgt

Abbildung 4: Die Auflösung dieser Sonnenfleckenaufnahme stößt sicher an die Grenze des für Amateure machbaren. Sie zeigt den Hauptfleck einer Fleckengruppe in all seinen Einzelheiten. Der Maßstab liegt bei etwa $0.3''/\text{mm}$, der Sonnendurchmesser beträgt bei dieser Vergrößerung etwa 6 m ! Bei dieser Auflösung werden bereits feine Unterteilungen in den großen Granulen sichtbar. Die Aufnahme gelang Wolfgang Lille am 22.5.1992 an seinem 12"-Chromaten. Das Objektiv dieses speziell für die Sonnenbeobachtung ausgelegten Refraktors besitzt nur eine einzelne asphärisch geschliffene Linse (hergestellt von Dany Cardoen), deren Farbfehler mit Hilfe eines engbandigen Interferenzfilters ($\lambda = 590\text{ nm}$ / HWB $\Delta\lambda = 5\text{ \AA}$) unterdrückt wird. Herr Lille belichtete die Aufnahme $1/1000$ Sekunden auf Agfaortho 25 bei einer effektiven Brennweite von 45 m und benutzte hierzu unseren Herschelkeil!



11

sich auf die Luftsäule im Teleskoptubus und es kommt zur Bildung von »Luftschlieren« im Strahlengang, die wie die einzelnen Luftzellen in der Erdatmosphäre »Luftunruhe« zur Folge haben. Bei Linsen, Spiegeln oder Prismen ist die Erwärmung sehr gering, da sie nur extrem wenig Licht absorbieren. Dunkle Grau- oder Farbfilter dagegen absorbieren vergleichsweise viel Licht und erwärmen sich entsprechend stark, sofern sie mit der vollen Lichtleistung der Sonne belastet werden. Ein extremer Fall sind die »stockdusteren« Okularsonnenfilter, wie sie oft im Lieferumfang von Billigteleskopen enthalten sind. Sie sollten nur bei kleinen

Fernrohröffnungen zum Einsatz kommen (kleiner als 60 mm), sonst besteht die Gefahr, daß der Filter während der Beobachtung platzt und das Auge durch den plötzlichen Lichtblitz zumindest für einige Tage »irritiert« ist. Scharfe Bilder bei hohen Vergrößerungen lassen sich mit diesen Filtern trotzdem kaum erreichen.

Wesentlich besser ist es, die Lichtmenge nicht durch *Absorption*, sondern durch *Reflexion* zu reduzieren. Dies geschieht entweder durch verspiegelte Filter geringer Transmission oder durch Prismen, deren unvergütete Flächen nur einen kleinen Teil des Sonnenlichts zum Fokus reflektieren. Ist auf diese Weise

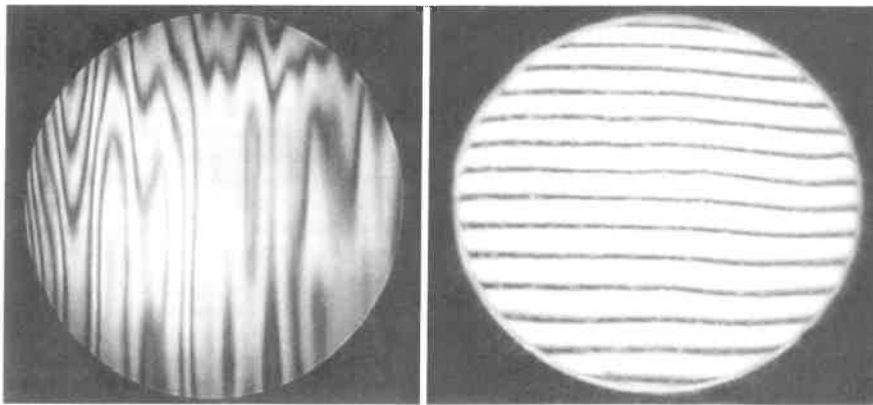


Abbildung 5: Diese beiden interferometrischen Prüfbilder zeigen den Vergleich eines aus den USA bezogenen Glasobjektivfilters (links) mit einem Baader- $\lambda/4$ -Planglas. Beide Messungen erfolgten in Transmission über die gesamte Wellenfront. Während bei dem amerikanischen Filter die Interferenzfigur vollkommen zerrissen ist, zeigt das Bild der $\lambda/4$ -Planglascheibe ein vollkommen regelmäßiges Interferenzmuster.

die Lichtmenge auf wenige Prozent reduziert, so lassen sich auch Farb- oder Graufilter in den Strahlengang einbringen und gefahrlos und ohne Einbußen an Bildqualität für die genaue Abstimmung der Lichtintensität nutzen (siehe z. B. das Herschelprisma).

Eine andere Methode der gefahrlosen Sonnenbeobachtung ist die Sonnenprojektion. Ohne die Lichtmenge zu reduzieren wird das Sonnenbild auf einen hinter dem Okular angebrachten Schirm projiziert, das dann gefahrlos betrachtet werden kann. Diese Methode eignet sich ganz besonders für Vorführungen, bei der größeren Gruppen von Beobachtern die Erscheinungen der Sonnenoberfläche gezeigt und erklärt werden sollen. Probleme bei der Bedienung des Instruments, wie sie bei Laien immer wieder auftreten (z. B. beim Fokussieren), können so umgangen werden, und der Vortragende hat die Möglichkeit, viel gezielter auf bestimmte Phänomene hinzuweisen.

Wie oben bereits erwähnt, eignen sich Schmidt-Cassegrain- oder kurzbreitweitige Newton-Teleskope nicht für die Projektionsmethode. Auch dürfen keine Okulare mit verkitteten Linsen zum Einsatz kommen, die optischen Kleber würden sich zu stark erhitzen. Bei der Sonnenprojektion werden daher meist die aus nur zwei Einzellinsen aufgebauten Huygens-Okulare verwendet. Dieser Okulartyp wurde bereits im 17. Jahrhundert von dem bekannten Optiker Christian Huygens berechnet und stellte seinerzeit einen großen Fortschritt in der Entwicklung der Okulare dar.

Die Baader-Objektivfilter

Die einzige Möglichkeit, jede Wärmequelle aus dem Strahlengang des Teleskops zu bannen (und damit der einzig gangbare Weg für eine gefahrlose Sonnenbeobachtung mit Schmidt-Cassegrain- oder Newton-Teleskopen) bilden Objektivfilter. Ein Glasträger oder eine dünne Folie wird hierzu mit einer speziellen Reflexionsschicht bedampft. Diese hat üblicherweise eine Durchlässigkeit (Transmission) zwischen 10^{-5} (ein Hunderttausendstel) bzw. 10^{-3} (ein Tausendstel). Auf diese Weise wird das überschüssige Licht reflektiert, so daß sich das Filter nicht erwärmen kann. Manche Hersteller bieten (grüne) Wärmeschutzgläser oder schwarz eingefärbte Kunststoffolien als Objektivfilter an, die das Sonnenlicht absorbieren und sich so stark erwärmen können, daß Turbulenzen direkt vor dem Objektiv die Bildqualität beeinträchtigen; ganz abgesehen von der mittelmäßigen optischen Qualität solcher Filter³.

Da ein Objektivfilter direkt vor dem Objektiv montiert wird, wirken sich Fehler im Material oder in der Bearbeitung genauso gravierend auf die Abbildungsleistung aus wie entsprechende Fehler des Objektivs selbst. Um die Abbildungsgüte des Objektivs voll zu erhalten, kommen daher nur Filter aus hochwertigem optischen Glas mit minimalem Keilfehler und sehr genau gearbeiteten Oberflächen in Frage, solche Filter sind allerdings entsprechend teuer. Gewarnt sei an dieser Stelle vor erstaunlich preisgünstigen Glasfiltern. Der scheinbar »günstige«

³ Wie stark sich eine dunkle, stark lichtabsorbierende Fläche bei direkter Sonneneinstrahlung erwärmen kann wird jedem sofort klar, der bei brennender Sonne in ein schwarz lackiertes Auto einsteigt.

Preis dieser Filter steht in direktem Verhältnis zur Qualität von Material und Bearbeitung: Diese Filter besitzen eine »Oberflächengüte« von etwa $3-10 \lambda$, sie degradieren jedes Hochleistungsobjektiv im wahrsten Sinne des Wortes zu einer »Fensterscheibe«!

Die Substrate der von uns angebotenen Filter bestehen aus getempertem, schlierenfreiem optischen Glas. Die feinoptisch polierten Flächen garantieren eine Wellenfrontdeformation von $\leq \lambda/10$ (peak to valley). Die Glasplatten werden in einer der modernsten Beschichtungsanlagen Deutschlands mit einer speziellen Metallschicht (Dichte 5 oder 3,5) bedampft. Sie ist farbneutral,

ohne den üblichen Blau- oder Rotstich und dabei sehr hart und kratzfest! Das fotografische Filter mit der Dichte 3,5 bietet ausreichende Lichtreserven für die Fotografie der Sonne mit kurzen Belichtungszeiten. Für die visuelle Beobachtung mit diesem Filter ist eine weitere Lichtabschwächung notwendig, die ohne Einbuße an Bildqualität mit Okularfiltern erfolgen kann. Zur Reduzierung der Lichtmenge auf die notwendige Dichte von ca. ND = 5 liefern wir ein $1\frac{1}{4}$ " Einschraubfilter mit der optischen Dichte ND = 2. Dieses Filter (#2459289) ist *planoptisch poliert* und beidseitig antireflexvergütet. Ein 2" Filter mit 48 mm Einschraubgewinde und neutra-

Ein einfacher Schlierentest

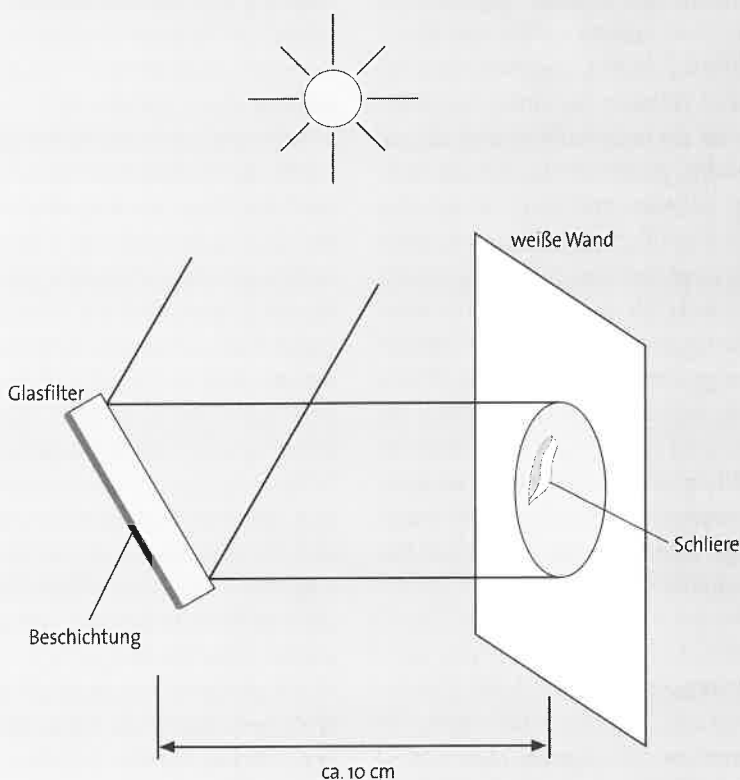
Grundvoraussetzung für die Herstellung hochwertiger Plangläser oder Linsen sind ausgesuchte Gläser hoher Qualität. Von Amateurastronomen wird oft das Vorhandensein von kleinen Luftblasen im Glaskörper als Mangel angesehen. Zu Unrecht, denn die winzig kleine Menge an Streulicht, die eine solche Luftblase verursacht, kann die Bilddefinition nicht beeinflussen. Geringe Mengen an Luftblasen sind niemals ein Grund, ein ansonsten fehlerfreies Glas zu verwerfen!

Viel wesentlicher für die Abbildungsgüte einer Linse ist die Homogenität des Glases. Inhomogenitäten führen zu einer unregelmäßigen Variation des Brechungsindex im Glas, die bei richtiger Betrachtung als Schlieren im Glaskörper sichtbar werden. Es ist nahezu unmöglich, derartige Inhomogenitäten durch eine entsprechende optische Politur des Glases (lokale Retusche der Flächen) zu kompensieren. Eine Linse oder ein Planglas aus nicht schlierenfreiem Glas wird immer eine fehlerhafte Abbildung aufweisen. Trotzdem verwenden viele Hersteller von Teleskopen aus Kostengründen derartige Gläser für Ihre Objektive und Planfilter, mit entsprechend negativen Folgen für die Abbildungsgüte.

Für Glassonnenfilter gibt es einen einfachen Test, mit dem die Glasscheibe auf Schlieren untersucht werden kann. Halten Sie die Scheibe so gegen die Sonne,

daß die reflektierende Seite von der Sonne weg (nach unten) zeigt und das Sonnenlicht auf eine weiße Wand fällt. Der Abstand zur Wand sollte ungefähr 10 cm betragen. Ist das Glas schlierenfrei, so zeigt sich an der Wand eine gleichmäßig beleuchtete helle Fläche. Ist das

Glas von Schlieren durchsetzt, so werden in dem runden Lichtreflex hellere und dunklere Stellen sichtbar. An diesen Stellen wird das Licht durch den inhomogenen Verlauf des Brechungsindex stärker gebündelt oder zerstreut, auch wenn die Oberfläche einwandfrei poliert wurde.



ler Dichte $ND = 1.8$ liefern wir unter der Best.-Nr. 2458330 für alle 2" Okulare und für unser Reduzierstück von 2" auf 1 1/4".

Wir bieten unsere Glasfilter (ungefaßt) in sechs verschiedenen Durchmessern von 90 mm bis 205 mm an. Bei der großen Anzahl an Teleskopen auf dem Markt ist die Herstellung von Standardfassungen leider nicht möglich. Gegen Aufpreis fertigen wir Ihnen aber eine für Ihr Teleskop angepaßte Filterfassung (allerdings mit recht langen Lieferzeiten – wir bitten um Entschuldigung!). Wesentlich schneller geht es, wenn Sie unsere genaue Bauanleitung anfordern, wie man eine stabile Filterfassung einfach aus Wellpappe selber macht (Infoblatt: Die »Sparfassung« für Objektivfilter – aus Wellpappe). Das macht sogar Spaß, besonders wenn man an das für die Fassung eingesparte Geld denkt.

Der Vergleich mit entsprechenden »Fensterglasfiltern« am Interferometer zeigt eindrucksvoll die Unterschiede in der optischen Leistung (Abbildung 5). Während bei dem billigen Filter aus Fensterglas die Wellenfront bis zur Unkenntlichkeit deformiert ist, zeigt die planparallele Platte so gut wie keinen Einfluß auf die Abbildungsgüte. Dies macht sich besonders bei der Beobachtung mit hohen Vergrößerungen bemerkbar: Während bei einem rohpolierten Filter die Bildschärfe schnell zusammenbricht, garantiert das optisch sorgfältig polierte Planglas die gleiche Kontrastleistung, die Sie auch von Ihren nächtlichen Beobachtungen gewohnt sind. Sollten Sie bereits im Besitz eines billigen Objektivfilters sein, mit dessen Leistung Sie nicht zufrieden sind, so können Sie mit einem einfachen Schlierentest schnell und einfach überprüfen, ob das Filterglas den Anforderungen eines hochwertigen Objektivfilters überhaupt genügt (siehe Kasten »Ein einfacher Schlierentest«)

Das 2"-Herschelprisma

Eine weitere sehr elegante Methode zur Lichtabschwächung ist das Auskoppeln des größten Lichtanteils aus dem

Strahlengang des Teleskops etwa 100 mm bis 250 mm vor dem heißen Brennpunkt, mit Hilfe einer hochgenau polierten Glasfläche: In einem Winkel von 45° im Strahlengang des Teleskops montiert, reflektiert sie nur etwa 4.6 % der auftreffenden Lichtmenge zum Okular. Dies reicht aus, um auch bei extrem langen Brennweiten mit kurzen Belichtungszeiten photographieren zu können. Die weitere Lichtabschwächung kann nun mit Farb- oder Graufiltern erfolgen ohne die Gefahr einer zu starken Erwärmung und der damit verbundenen Nachteile für die Bilddefinition⁴. Der größte Teil des Lichtes passiert den Glaskörper ungehindert und kann durch eine Öffnung aus dem Tubus austreten. Da die Absorption im Glas klein bleibt (< 1%), kann sich auch der Glaskörper nur unwesentlich erwärmen. Das unter 90° reflektierte Licht ist linear polarisiert. Daher bietet diese Methode den zusätzlichen Vorteil, daß mit einem einzelnen Polarisationsfilter vor dem Okular die Lichtmenge stufenlos über einen weiten Bereich reguliert werden kann. Damit entfällt die Filteranpassung beim Wechsel der Vergrößerung. Eine kurze Drehung des Okulars mit dem eingeschraubten Polarisationsfilter sorgt stets für einen angenehmen Helligkeitseindruck des Sonnenbildes.

Während beim normalen Zenitprisma für die nächtlichen Beobachtungen das Licht durch die Kathetenflächen in den Glaskörper eindringt und es somit an der 45° Glas-Luft-Fläche zur Totalreflexion kommt, muß ein Prisma für die Sonnenbeobachtung so hergestellt werden, daß das Licht allein auf die um 45° geneigte Glasfläche trifft. Auf diese Weise wird nur 4.6% des auftreffenden Lichts in einem 90°-Winkel zum Okular bzw. zur Kamera reflektiert, der Rest passiert den Prismenkörper. An der multivergüteten rückseitigen Kathetenfläche unseres Herschelprismas werden nur etwa 0.2% reflektiert⁵.

Oft werden Sonnenzenitprismen aus Kostengründen ohne diese Vergütung der Austrittsflächen angeboten. Dies kann jedoch zu starken Reflexen und »Geisterbildern« führen. Besonders

4 Bei sehr großen Objektivöffnungen kann die Erwärmung stark absorbierender Filter auch nach dem Herschelkeil zu einer gewissen Beeinträchtigung der Luftruhe führen. In solchen Fällen sollte das Objektiv etwa alle 20 Minuten kurz abgedeckt werden, um das Filter nicht zu stark zu erwärmen. Die Gefahr eines Filterbruchs besteht allerdings nicht!

5 Aus diesem Grund sind planparallele Glasplatten nicht geeignet: Das an der rückseitigen Glasfläche reflektierte Licht wird in diesem Fall, seitlich etwas versetzt, ebenfalls genau in Richtung Okular gelenkt und kann zu »Geisterbildern« führen, die den Bildkontrast erheblich herabsetzen. Deshalb ist es wichtig Form und Position des Prismas so zu gestalten, daß diese Reflexe auf ein Minimum beschränkt bleiben.

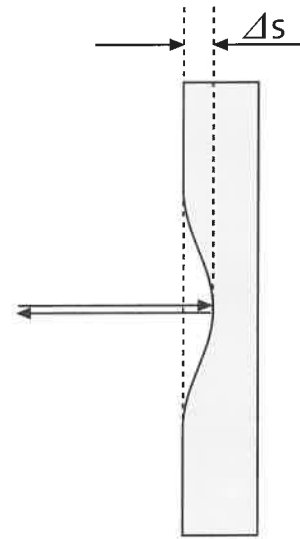
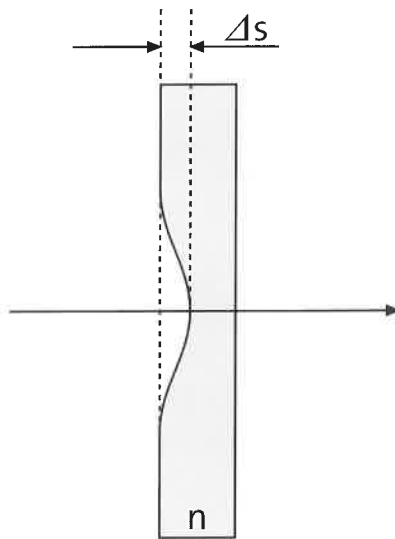
Abbildung 6: Die Anforderungen an die Oberflächengüte optischer Elemente hängt von der Position im Strahlengang ab. Allgemein gilt, daß die Genauigkeit umso höher sein muß, je weiter das Element (Linsen, Spiegel, Filter, ...) vom Fokus entfernt ist. Daher werden an die optische Güte von Okularfiltern vergleichsweise geringe Anforderungen gestellt. Ganz wesentlich geht auch die Art der Abbildung ein: An brechende Flächen werden im allgemeinen geringere Anforderungen gestellt als an spiegelnde Flächen. Die obige Abbildung macht dies an Hand einer planparallelen Glasplatte mit Brechungsindex n (links) und eines Planspiegels (rechts) deutlich. Beide weisen einen Oberflächenfehler der Tiefe Δs auf. Zur Beurteilung des hierdurch verursachten Abbildungsfehlers betrachten wir den abgebildeten Lichtstrahl als Welle der Wellenlänge λ . Innerhalb der Strecke Δs beträgt die Phasenverschiebung der Welle $\phi' = 2\pi \times \Delta s / \lambda$. Im Glas verkürzt sich diese Wellenlänge auf den Wert λ/n . Bei einer fehlerfreien Oberfläche betrüge die Phasenverschiebung innerhalb von Δs daher $\phi' = 2\pi \times \Delta s \times n / \lambda$. Die Differenz beider Werte liefert die Wellefrontdeformation für die betrachtete Strahlrichtung:

$$\Delta\lambda = \lambda \times \Delta\phi / 2\pi = (n-1) \times \Delta s$$

Beim fehlerhaften Spiegel muß der Strahl die Strecke Δs zweimal durchlaufen, einmal vor, und einmal nach der Reflexion. Die gesamte Phasendifferenz beträgt daher $\phi' = 4\pi \times \Delta s / \lambda$. Bei einem fehlerfreien Spiegel fällt Δs aus dem optischen Weg heraus, d.h. $\phi = 0$. Somit erhält man für die Wellefrontdeformation:

$$\Delta\lambda = \lambda \times \Delta\phi / 2\pi = 2 \times \Delta s$$

Setzt man für den Brechungsindex n den ungefähren Wert von 1.5 ein, so erkennt man, daß bei gleichem Oberflächenfehler Δs die resultierende Wellefrontdeformation bei einem Spiegel $4 \times$ so groß ist wie bei einer Linse. Dies ist der Grund für die hohen Anforderungen an die Oberflächengenauigkeit bei Spiegeln. Dieses Ergebnis wird allerdings relativiert, da Linsobjektive meistens mehr optische Flächen besitzen als reine Spiegelobjektive. Hinzu kommt, daß die beiden Flächen einer Linse oder eines Prismas sehr genau zueinander ausgerichtet sein müssen.



15

intensive Streulichtreflexe stellen sich ein, wenn zu kleine Prismenkörper (bei zu langbrennweitigen Instrumenten) verwendet werden, so daß das Sonnenlicht auf die Prismenkanten trifft und hier gestreut wird.

Wichtiger aber als die geometrische Form des Prismas ist seine Oberflächengüte! Zwar befindet sich die abbildende Fläche wesentlich näher am Fokus als etwa ein Objektivfilter, aber es handelt sich im Gegensatz zum Objektivfilter nicht um eine brechende, sondern um eine reflektierende Fläche mit wesentlich höheren Anforderungen an die Genauigkeit der optischen Politur, wenn die Deformation vernachlässigbar klein bleiben soll. Hinzu kommt, daß die reflektierende Prismenfläche um 45° geneigt ist, was die Anforderung an die Oberflächenplanität nochmals um den Faktor 1.4 erhöht. Der optisch interessierte Leser findet in Abbildung 6 eine genaue formale Beschreibung dieses Sachverhalts.

Um Streulichtanteile auch bei Teleskopen mit längeren Brennweiten so gering wie möglich zu halten und um die optische Abbildungsgüte des Objektivs auch bei hochwertigen Instrumenten voll ausnutzen zu können, verwenden wir für unsere Herschelprismen Prismenkeile mit 23° Flächenwinkel, mit einem maximalen Abbildungsfehler von unter $\lambda/10$ (unter 45° !) und einer multi-

vergüteten Lichtaustrittsfläche. Dies erklärt die kompromißlose Abbildungsgüte dieser Sonnenprismen, wie sie immer wieder durch die Aufnahmen erfahrener Sonnenphotographen bestätigt wird. So gehören die Bilder von Herrn Lille zu den besten, die je von Amateuren gemacht wurden, sie brauchen nicht einmal den Vergleich mit Aufnahmen professioneller Sternwarten zu scheuen (Abbildungen 4 und 9). Wir montieren die Prismen in sehr stabile Ganzmetallgehäuse, die ohne jede Einschränkung auch dem Gewicht schwerer Aufsätze zur Okularprojektion für die Sonnenphotographie gewachsen sind. Im Lieferumfang enthalten sind vier hochwertige Graufilter ($4\times$, $8\times$, $64\times$ und $1000\times$) zur genauen Anpassung der benötigten Lichtmenge. Optional bieten wir zusätzlich ein $2''$ -Polarisationsfilter an, mit dem eine stufenlose Regulierung der Lichtmenge möglich ist (siehe Abbildung 8)

Herschelprismen werden manchmal abqualifiziert mit der Begründung Turbulenzen im Tubus würden das Bild verschlechtern. Dies ist jedoch nicht der Fall: Da sich im Strahlengang vor dem Prisma keine stark absorbierenden Flächen befinden, kann sich auch die Luftsäule im Teleskop nicht erwärmen. Um dies zu belegen, wurden von uns stundenlange Testbeobachtungen durchgeführt, ohne daß eine Bildverschlechterung festzu-



Abbildung 7: Kein Sonnenbeobachter, der einmal eines unserer Herschelprismen benutzt hat, wird es je wieder missen wollen: Ausgestattet mit einem hochwertigen Prisma, dessen Austrittsflächen zur Reflexminimierung vergütet sind, erreichen Sie mit diesem Zubehör einen nicht mehr zu überbietenden Bildkontrast. Die Sonne erscheint neutral weiß vor einem pechschwarzen Himmel. Bereits mit einem guten 4"-Refraktor können Sie das Netzwerk der Granulation beobachten und fotografieren!

Zur Restlichtdämpfung (das Herschelprisma leitet etwa 5% des Sonnenlichts zum Okular, genug um auch bei sehr langen Brennweiten mit kurzen Belichtungszeiten fotografieren zu können) sind im Lieferumfang 4 Neutralfilter der Dichten 0.6 bis 3.0 enthalten. Optional ist ein 2"-Polarisationsfilter erhältlich, das in Verbindung mit dem Herschelprisma die stufenlose Regulierung der Bildhelligkeit ermöglicht.

stellen war. Gerade weil keine Erwärmung stattfindet, sind die hervorragenden Sonnenaufnahmen zahlreicher Amateure möglich, die unser Herschelprisma verwenden. Wenn jemand ein Herschelprisma als wärmeanfällig bezeichnet, so hat er meistens noch nicht hindurchgesehen.

Die doppelseitig beschichtete 12µm-Filterfolie – BAADER AstroSolar™

Einsteiger in die Sonnenbeobachtung scheuen verständlicherweise oft die hohen Kosten für ein hochwertiges Objektivfilter oder ein Zeiss-Sonnenprisma. Eine kostengünstige Alternative sind

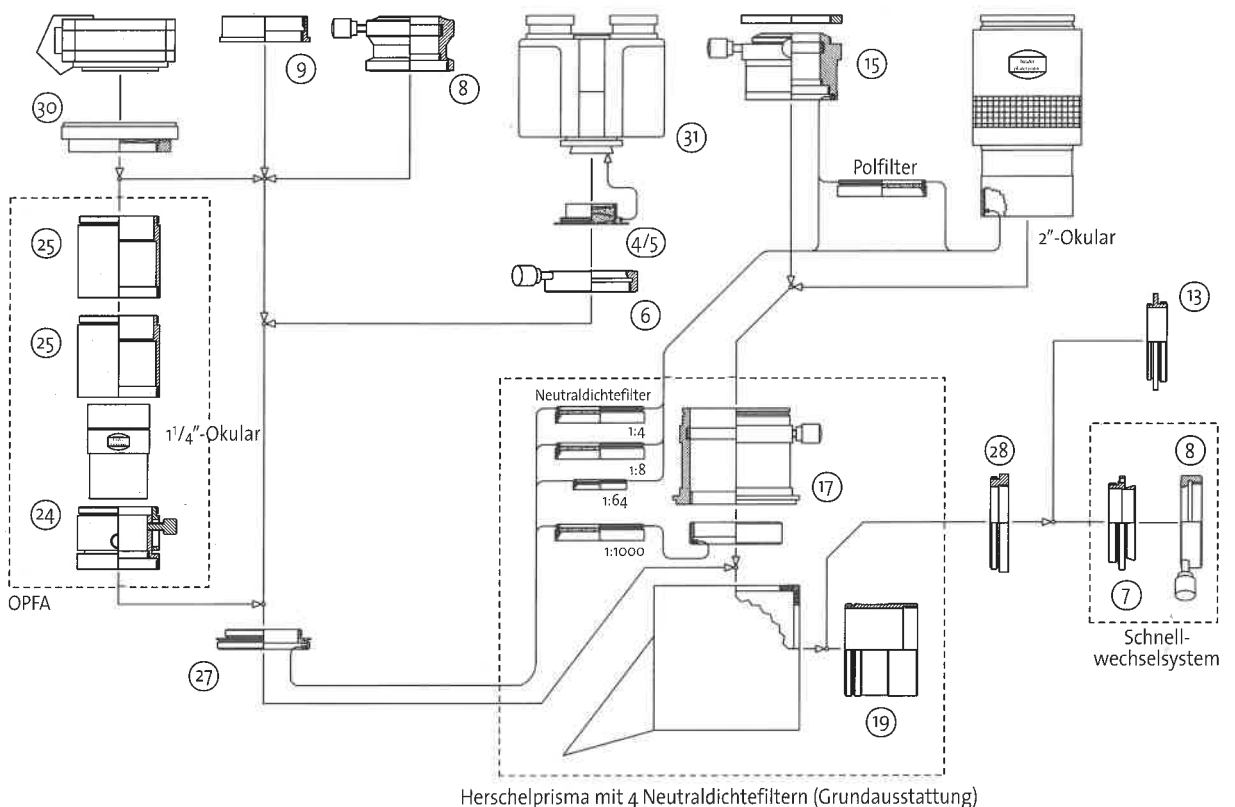
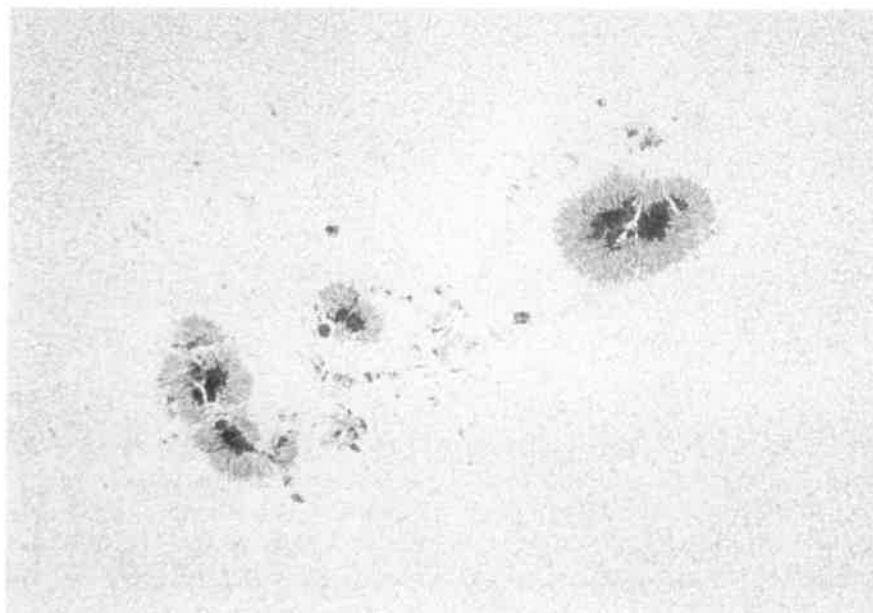


Abbildung 9: Diese Aufnahme liegt bereits im Bereich vieler Amateure, sofern sie über ein hochwertiges Objektiv und das entsprechende Zubehör verfügen. Eckard Slawik benutzte seinen 6" Starfire-Apochromaten von Astro-Physics und den Baader Herschelkeil. Durch die Okularprojektion mit einem 15mm Eudiaskopischen Okular erreichte er eine effektive Brennweite von etwa 30 m. Aufnahmedatum war der 3. Juli 1992, belichtet wurde auf Agfaortho 25. Die Bildschärfe wurde beim Positivabzug im Fotolabor mit Hilfe einer unscharfen Maske nochmals verbessert.



17

Abbildung 8: Die Abbildung zeigt das 2"-Herschelprisma mit seinen verschiedenen Anschlußmöglichkeiten. Im Lieferumfang enthalten sind eine 2"-Steckhülse und eine 2"-Steckfassung sowie ein Filtersatz aus 4 Neutralschichtfiltern ($3 \times 2'' \text{Ø} / 1 \times 1\frac{1}{4}'' \text{Ø}$). Über den 2"/T-2 Gewindeadapter (Nr. 27/28) können z. B. Zeiss-Gewindeadapter (Nr. 9/13), das T-2 Schnellwechselsystem (Nr. 6/7), eine $1\frac{1}{4}''$ -Okularsteckhülse (Nr. 8) oder ein Projektionssystem für die Photographie mit Okularprojektion (OPFA-4) angeschlossen werden. Weitere Adapter stehen im Rahmen des Astro T-2 Systems® zur Verfügung (siehe auch Prospektblatt »Astro T-2 System«). In Verbindung mit dem Glaswegkorrektor 1.7× oder 2.6× gelingt bei vielen Refraktoren sogar der Anschluß des Großfeldbinokulars (Nr. 31). Optional ist ein 2"-Polfilter erhältlich, das in jedes 2"-Okular oder in den 2"/ $1\frac{1}{4}''$ -Adapter (Nr. 15) eingeschraubt werden kann. Eine einfache Drehung des Okulars oder des Reduzierstücks reicht dann aus, um die Lichtmenge stufenlos zu regulieren.

Objektivfilter aus einer dünnen, mit Aluminium bedampften »Mylar«-Folie.

Bei Glasobjektivfiltern erreicht man die gewünschte Filterdichte durch mehrere Beschichtungen, wobei nach jeder neuen Bedampfung die Transmission der Metallschicht bestimmt wird. Nach einer aufwendigen Reinigung der Oberfläche wird dann die nächste Schicht aufgebracht. Dagegen werden die sogenannten Mylarfolien aus den USA als Meterware hergestellt und aus diesem Grund nur einmal durch die Beschichtungsanlage gezogen. Die maximal erreichbare Dichte einer solchen einfachen Beschichtung liegt etwa bei $ND = 2.5$. Beim Bau eines Objektivfilters sind daher zwei Lagen einer solchen Folie notwendig, um eine ausreichende Lichtabschwächung zu erreichen. Bei den meisten derart hergestellten Folienfiltern wird dieser Weg beschritten. Da die Kunststoffolien nicht die hohe Abbildungsgüte eines feinoptisch polierten Glasfilters haben können, tritt durch das Aufeinanderlegen zweier Lagen ein merklicher Verlust an Bildkontrast auf, der sich bereits bei mittleren Vergrößerungen stark bemerkbar macht.

Für die Herstellung unserer Filter verwenden wir kein »Mylar«, sondern einen extrem reißfesten, klaren Kunststoff, beidseitig mit hochglänzender Oberfläche, wie er ähnlich in der Kern- und

Elementarteilchenphysik beim Bau von Teilchendetektoren eingesetzt wird. Um den Nachteil zu umgehen, mehrere Filterlagen aufeinander stapeln zu müssen, haben wir einen Hersteller dazu bewegt, unsere bereits beschichtete, nur $12 \mu\text{m}$ dicke Folie, ein zweites Mal durch die Beschichtungsanlage zu ziehen und auch auf der noch unbelegten Seite eine weitere Aluminiumschicht aufzutragen. Dieses Verfahren ist mit erheblichen Verlusten verbunden. Die Folie wird während des Bedampfungsvorgangs sehr stark erhitzt, bei den mit Hochgeschwindigkeit laufenden Folienwalzen geht bereits die Hälfte des Materials (manchmal alles) beim erneuten Aufrollen wegen Faltenbildung verloren. Den Anteil, der diese Prozedur unbeschadet übersteht, bieten wir in Einheiten von $100\text{cm} \times 50\text{cm}$ und $20\text{cm} \times 30\text{cm}$ zum Eigenbau von Objektivfiltern an.

Eine einzige Lage dieser hochfesten AstroSolar™ Folie reicht aus, um ein qualitativ hochwertiges und sicheres Sonnenfilter herstellen zu können.

Unsere Folie wurde durch eine DIN-Bundesprüfstelle auf Augensicherheit getestet. Sie darf das CE-Zeichen für geprüfte Sicherheit tragen.

Auf keinen Fall sollten Sie unser Folienfilter mit den einfachen Rettungsfolien



Abbildung 10: Diese Aufnahme zweier großer Sonnenfleckengruppen am Sonnenrand wurde von Herrn Dr. Poersch am 15. 4. 1991 mit seinem 130/1200-mm-Selbstbau-Newton-Teleskop aufgenommen. Herr Poersch benutzte hierzu ein Objektivfilter aus unserer photographischen Sonnenfilterfolie. In der gesamten Umgebung der Fleckengruppen werden die hellen Fackelgebiete sichtbar, die aufgrund der Mitte-Rand-Abdunklung am Rand der Sonnenscheibe besonders gut zu erkennen sind.

verwechseln, wie sie z.B. im Bergsporthandel angeboten werden. Der wesentlich billigere Kunststoffträger weist eine Vielzahl von Streifen und Schlieren auf. Er ist nur einseitig beschichtet und in vielen Fällen zu allem Überfluß gelb eingefärbt, um eine Goldbeschichtung vorzutäuschen. Solche Folien müssen für visuelle Zwecke mindestens dreilagig verwendet werden, so daß der Bildkontrast erheblich leidet.

Immer wieder erreichen uns Zuschriften von Kunden, die überrascht festgestellt haben, daß ein mit unserer Sonnenfolie selbstgebautes Objektivfilter bessere Bilder liefert als ihr noch immer einige hundert DM teures USA-Glasfilter. Uns überrascht dies keineswegs: Die Homogenität unserer neuen AstroSolar™ Folie übertrifft alles, was wir in den vergangenen 13 Jahren an Folien geprüft haben. Zwar kann unsere Folie keine bessere Oberflächenplanität aufweisen als ein feinpoliertes Glasfilter, ist also auch nicht für sehr hohe Vergrößerungen geeignet, aber die geringe Dicke von nur 12 µm (= 12/1000 µm) schließt jeden Keilfehler aus. Keilfehler, d.h. schräg zueinanderstehende Glasflächen, können das Bild erheblich verschlechtern (Doppelbilder!). Da nur eine Filterlage benötigt wird, ist außerdem der Kontrastverlust erheblich geringer als bei zweilagigen Folienfiltern. Der enorme Vorteil unserer Filterfolie liegt allerdings im Preis: Ein Objektivfilter für ein 20-cm-Teleskop kann ohne großen Aufwand für anteilig unter 10,- DM selbst gebaut werden. Es ist die sicher-

ste und einfachste Möglichkeit, um ohne große Kosten festzustellen, ob Sie sich für die Sonnenbeobachtung begeistern möchten.

Wir bieten unsere Filterfolien in zwei verschiedenen Versionen an: Die Standardfolie besitzt eine Dichte von ND = 5, sie ermöglicht die sichere Beobachtung der Sonne ohne zusätzliche Filter, stellt also eine besonders sichere und kostengünstige Lösung dar. Sie ist insbesondere für den Einsatz an Volkssternwarten und Schulen gedacht. Auf die wiederholte Bitte von Kunden die einen Folienfilter auch für die Sonnenphotographie verwenden wollten, haben wir mittlerweile auch Folienfilter der Dichte ND = 3,5 in unserem Lieferprogramm. Sie erlauben auch bei langen effektiven Brennweiten Belichtungszeiten von $1/500$ s bis $1/1000$ s (Abbildung 10). Sollen visuelle Beobachtungen mit dieser »Photofolie« durchgeführt werden, so ist eine weitere Lichtdämpfung unbedingt erforderlich. Für diesen Zweck bieten wir ein planoptisch poliertes $1\frac{1}{4}$ " Okularfilter der Dichte ND=2 an (Bestell-Nr. 245 9289), welches aus Ihrem fotografischen Folienfilter ein visuelles Filter macht (siehe Preisliste).

Okulare nach Huygens für die Sonnenprojektion

Die ersten Fernrohre, die Astronomen auf den Himmel richteten, waren sehr einfache Instrumente: Das Objektiv bestand aus einer einzelnen Sammellinse langer Brennweite, als Okular wurde

ebenfalls eine einzelne Sammel- (Keplersches Fernrohr) oder Zerstreuungslinse (Galileisches Fernrohr) kurzer Brennweite verwendet. Diese sehr einfachen »Okulare« besaßen einen ausgeprägten Farbfehler und ein sehr kleines Gesichtsfeld, insbesondere beim Galileischen Fernrohr. Cassini konnte 1668 das Gesichtsfeld wesentlich vergrößern, indem er die einzelne bikonvexe Okularlinse des Keplerschen Teleskops durch zwei plankonvexe Linsen ersetzte, deren konvexe Flächen einander zugewandt waren. Huygens, ein Zeitgenosse Cassinis, erreichte abermals eine wesentliche Verbesserung, als er durch optische Berechnungen zeigen konnte, daß bei einem zweilinsigen Okular die achsnahe Farbvergrößerungs-Differenz korrigiert werden kann, wenn bei Verwendung gleicher Gläser der Abstand d der beiden Linsen gleich dem Mittel ihrer Brennweiten f_1 und f_2 ist. Das von Huygens eingeführte Okular bestand aus zwei Plankonvex-Linsen, deren konvexe Flächen zum Teleskopobjektiv weisen (Abbildung 11). Es erreichte eine für die damalige Zeit (um 1680) hervorragende Bildgüte.

Huygens-Okulare sind noch heute oft Teil der Grundausstattung von Billigteleskopen. Die optische Qualität ist dementsprechend bescheiden und hat sicher viel zum ungerechtfertigt schlechten Ruf dieses Okulartyps beigetragen. Eine wesentlich bessere Abbildungsgüte weisen die Huygens-Okulare von Carl Zeiss Jena

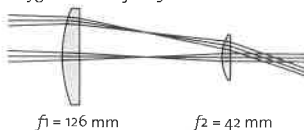
auf, die wir für die Sonnenprojektion uneingeschränkt empfehlen. Leider werden auch diese Okulare nicht mehr hergestellt. Der Lagerbestand an Huygens-Okularen, den wir von Carl Zeiss Jena übernommen haben, umfaßt die drei Brennweiten 63 mm, 25 mm und 16 mm. Alle drei Okulare besitzen ein scheinbares Gesichtsfeld von $\alpha_{ok}=43^\circ$. Das langbrennweitige Okular besitzt eine Steckhülse mit 2" Durchmesser. Nach Abschrauben dieser Steckhülse kann auch wahlweise das 2" Innengewinde der Okularfassung zur Montage an das Teleskop benutzt werden (z.B. wenn ein Zeiss Projektionschirm zum Einsatz kommen soll). Die beiden kurzbrennweitigen Okulare haben Steckfassungen mit einem Durchmesser von 24,5 mm. Selbstverständlich verfügen wir über die entsprechenden Adapter für den Anschluß an 1 1/4"- und 2"-Okularstutzen (siehe Astro T-2 System® und Astro-Preisliste).

Da Huygensokulare keine verkitteten Achromate, sondern nur zwei freistehende Linsen enthalten, eignen sie sich hervorragend für die Okularprojektion. Mit einigen einfachen Formeln ist es möglich, die Vergrößerung, das Bildfeld oder auch den Durchmesser der Sonnenscheibe auf dem Projektionschirm zu berechnen. Die folgenden Gleichungen sollen am Beispiel eines 100/1000 mm Refraktors durchgerechnet werden. Mit einem H25 mm Okular soll das Bild der Sonne auf einen Projektionschirm abge-

Abbildung 11: Das Huygens-Okular besteht aus zwei plankonvexen Linsen aus gleichen Gläsern, deren Abstand gleich der gemittelten Brennweite der beiden Linsen ist. Huygens wählte seinerzeit die Brennweitenverhältnisse $f = f_1/2 = 3/2 \times f_2$, der Abstand der einander zugewandten Hauptebenen der Linsen beträgt somit $d = 4/3 \times f$. Die Feldblende liegt zwischen diesen beiden Linsen.

Die Huygens-Okulare von Carl Zeiss Jena sind aufgrund ihrer hohen Qualität mit den gleichnamigen Okularen aus dem Lieferumfang von Billigteleskopen nicht zu vergleichen. Sie werden heute leider nicht mehr hergestellt und sind nur noch in den Brennweiten 16 mm, 25 mm und 63 mm in kleinen Stückzahlen lieferbar (rechtes Bild). Diese Okulare eignen sich aufgrund der fehlenden Kittflächen hervorragend für die Sonnenprojektion.

Huygens-Okular: $f = 63$ mm



bildet werden, der in einem Abstand von 40 cm zum Okular montiert ist.

Um die Größe des Sonnenbildes berechnen zu können, benötigen wir als erstes den wahren Bildfelddurchmesser d_{ok} , den das Okular aufgrund seines Feldblendendurchmessers abbildet. Man erhält ihn aus der Okularbrennweite f_{ok} in guter Näherung mit Hilfe der folgenden Gleichung:

$$d_{ok} = 2 \times f_{ok} \times \tan(\alpha_{ok}/2)$$

Beispiel:

$$d_{H25} = 2 \times 25 \text{ mm} \times \tan(43^\circ/2) = 19.7 \text{ mm}$$

Das im Teleskop sichtbare Feld α_{ob} ist zusätzlich von der Brennweite f_{ob} des Teleskops abhängig:

$$\alpha_{ob} = 2 \times \arctan(d_{ob}/f_{ob}/2)$$

Beispiel:

$$\alpha_{1000} = 2 \times \arctan(19.7 \text{ mm}/1000 \text{ mm}/2) = 1.13^\circ$$

Projiziert man nun das Sonnenbild auf einen weißen Schirm, der in einem Abstand b (40 cm) hinter dem Okular angebracht ist, so errechnet sich die effektive Brennweite f_{eff} in der gleichen Weise wie bei der fotografischen Okularprojektion, wie sie in der Astrophotographie oft angewandt wird:

$$f_{eff} = f_{ob} \times (b/f_{ok} - 1)$$

Beispiel:

$$f_{eff} = 1000 \text{ mm} \times (400 \text{ mm}/25 \text{ mm} - 1) = 15.0 \text{ m}$$

Das Verhältnis f_{eff}/f_{ob} gibt die Nachvergrößerung an. Das vom Okular abgebildete Feld d_{ok} hat auf dem Projektionsschirm also den Durchmesser D_{ok} :

$$D_{ok} = d_{ok} \times (b/f_{ok} - 1)$$

Beispiel:

$$D_{ok} = 19.7 \text{ mm} \times (400 \text{ mm}/25 \text{ mm} - 1) = 295.5 \text{ mm}$$

Bleibt noch die Frage, welchen Durchmesser die projizierte Sonnenscheibe aufweist. Dieser hängt natürlich von dem aktuellen Winkeldurchmesser $\phi_{\odot}$ der Sonne ab, der sich mit den Jahreszeiten ändert: Anfang Januar liegt er bei

32'32", Anfang Juli bei 31'28" (Sie finden diese Werte in den entsprechenden Tabellen Ihres astronomischen Jahrbuches). Für unser Rechenbeispiel soll ein mittlerer Sonnendurchmesser von 0.53° angenommen werden. Der Sonnendurchmesser $d_{\odot}$ im Brennpunkt des Teleskops beträgt dann:

$$d_{\odot} = 2 \times f_{ob} \times \tan(\phi_{\odot}/2)$$

Beispiel:

$$d_{\odot} = 2 \times 1000 \text{ mm} \times \tan(0.53^\circ/2) = 9.30 \text{ mm}$$

Dieses Bild wird nun um den Faktor f_{eff}/f_{ob} vergrößert, so daß der Sonnenbilddurchmesser $D_{\odot}$ auf dem Projektionsschirm folgenden Wert annimmt:

$$D_{\odot} = d_{\odot} \times (b/f_{ok} - 1)$$

Beispiel:

$$D_{\odot} = d_{\odot} \times (400 \text{ mm}/25 \text{ mm} - 1) = 139.5 \text{ mm}$$

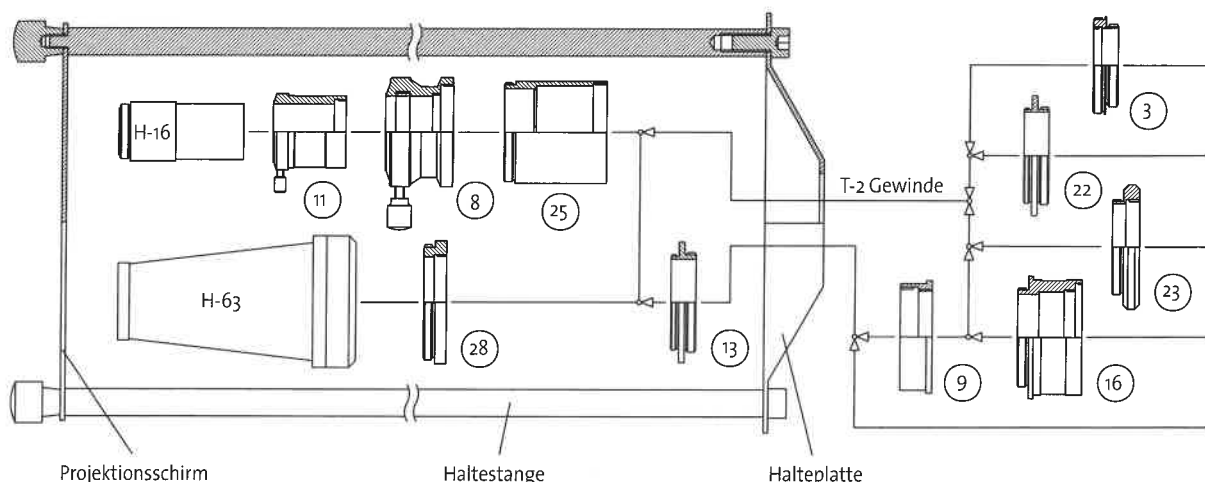
Der Durchmesser der Sonne auf dem Projektionsschirm mißt in unserem Beispiel also etwa 140 mm, er ändert sich mit der Jahreszeit um ± 2.4 mm.

Viele Details auf der Photosphäre, wie die Struktur der Sonnenflecken und Fakelgebiete, werden bei einer solchen Gesamtübersicht bereits deutlich sichtbar. Stärkere Vergrößerungen zeigen dann Fleckengruppen mit all ihren Feinheiten.

Projektionsschirme können mit einfachen Mitteln selbst gebaut werden. Zu kleine Abstände vom Okular sollten hierbei vermieden werden, um das Sonnenbild bequem betrachten zu können. Wert gelegt werden sollte auch auf eine ausreichend stabile Befestigung des Schirms am Teleskop, damit der Schirm nicht zu einem »Pendel« degradiert wird.

Der Sonnenprojektionsschirm von Zeiss

Sonnenprojektionsschirme stellen nicht nur eine sehr kostengünstige Alternative zur Beobachtung der Sonne dar, ihr Vorteil besteht in der Möglichkeit, Positionen von Sonnenflecken direkt auf eine vorbereitete Zeichenschablone zu über-



21

Abbildung 12: Mit Hilfe der Gewindeadapter des Astro T-2 Systems läßt sich der Zeiss-Sonnenprojektionsschirm an (nahezu) jedes Teleskop anbringen, indem er entweder in ein T-2 oder M44-Gewindepaar eingeklemmt wird. Die gebogene Form der Haltescheibe und zwei Haltestangen für den Projektionsschirm verleihen diesem formschönen Zubehör seine hohe Stabilität. Dabei wirkt die Haltescheibe zusätzlich als Lichtschutz (gleich einem »Sonnenschirm«) für den eigentlichen Projektionsschirm.

Die Abbildung zeigt einige der vielen Adaptionenmöglichkeiten: Mit den Gewindeadaptern Nr. 3 und Nr. 22 erfolgt der Anschluß an die Gewinde M36,4×1 und M43×1 von Vixen- und Lichtenknecker-Okularstutzen, der Gewindeadapter Nr. 23 steht für das Gewinde M42×1 vieler osteuropäischer Geräte zur Verfügung. Die 2"-Steckhülse Nr. 16 ermöglicht den Anschluß an jeden 2"-Okularstutzen. (Alle in der Abbildung eingetragenen Teilenummern entsprechen den Nummern des Astro T-2 Systems®.)

tragen. An Hand der Bewegungsrichtung der Sonne kann mit Hilfe von astronomischen Jahrbüchern der Sonnenäquator bestimmt und die Längen- und Breitengradpositionen der Flecken berechnet werden, ohne den wesentlich aufwendigeren Weg über die Fotografie gehen zu müssen. Die Dokumentation von Sonnenfleckenspositionen ist gerade bei der Überwachung der Sonnenaktivität wichtig und wird oft vernachlässigt.

Der größte Vorteil der Projektionsmethode ist jedoch die Möglichkeit, daß mehrere Beobachter gleichzeitig das Sonnenbild betrachten können. Dies ist insbesondere bei der Öffentlichkeitsarbeit wichtig, wenn den Besuchern der Sternwarte die Phänomene der Sonnenfleckens erst erklärt werden müssen. Das »Live-Bild« auf dem Projektionsschirm, das neben den Details auf der Sonne auch Phänomene wie die Luftunruhe deutlich vor Augen führt, ist hierzu wesentlich besser geeignet als jede fertige Fotografie. Auch so einfache Probleme wie das Fokussieren können dem Neuling bei dieser Gelegenheit auf einfache Weise erklärt werden. Bei der anschließenden Betrachtung durch das Okular weiß der Beobachter dann genau, worauf er zu achten hat. Geradezu ideal eignet sich die Projektionsmethode für die Verfolgung einer Sonnenfinsternis, wenn sich der Mond zunehmend vor die Sonne schiebt.

Obwohl es sich um ein vermeintlich sehr einfaches Zubehörteil handelt, besteht der Sonnenprojektionsschirm von Zeiss wiederum durch sein durchdachtes Design. Er besteht aus einer Halteplatte, dem eigentlichen Projektionsschirm und zwei Haltestangen, welche Halteplatte und Schirm stabil miteinander verbinden. Das spezielle Profil der Halteplatte verhindert ein Durchbiegen, so daß der Projektionsschirm sicher mittig zur optischen Achse gehalten wird. Eine zentrale Bohrung mit einem Durchmesser von 44 mm ermöglicht das Einklemmen der Halteplatte in jede M44 oder M42 (z. B. T-2) Gewindeverbindung. Mit Hilfe der Adapter des Astro T-2 Systems (siehe separates Prospektblatt) ist die Montage an (fast) jedem beliebigen Okularstutzen möglich (Abbildung 12). Bei einem Durchmesser des Projektionsschirms von 175 mm können Bildfelddurchmesser von bis zu 150 mm Durchmesser projiziert werden. Die runde Halteplatte (Durchmesser 185 mm) dient dabei als Lichtschutz, so daß seitlich am Teleskop vorbeistreichendes Sonnenlicht nicht auf den Projektionsschirm treffen kann und der Bildkontrast voll erhalten bleibt. Ihr spezielles Profil verleiht der Halteplatte ihre hohe Stabilität, da daß der Projektionsschirm in jeder Teleskoplage zentrisch zur optischen Achse gehalten wird.

Beobachtungen der Chromosphäre

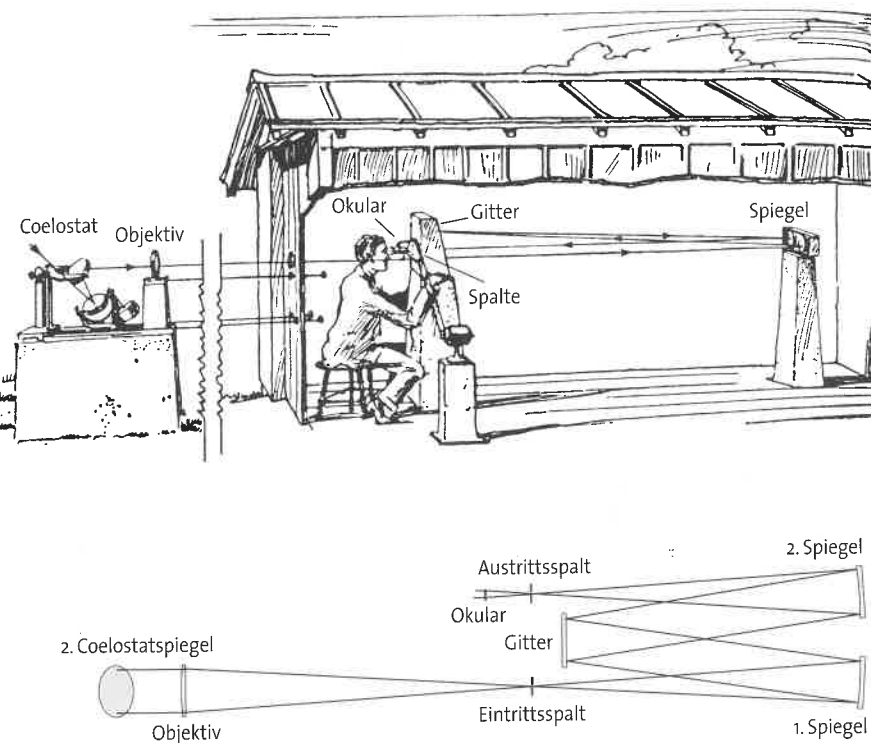
22

Während die Erscheinungen der Photosphäre seit der Erfindung des Fernrohrs eingehend studiert wurden, war die Beobachtung der darüber liegenden Chromosphäre oder gar der Korona lange Zeit nur während der wenigen Minuten einer totalen Sonnenfinsternis möglich. Zu groß war die dominante Strahlungsintensität der Photosphäre. Als J. Janssen während einer totalen Sonnenfinsternis entdeckte, daß Spektren der Protuberanzen bei den Wellenlängen der Fraunhofer-Linien Emissionslinien aufweisen, kam ihm der Gedanke, daß in diesen engen Spektralbereichen, bei denen die Intensität der Photosphäre minimal, die der Protuberanzen dagegen maximal ist, die Chromosphäre vielleicht auch ohne Sonnenfinsternis beobachtet werden kann [11].

Diese Überlegungen führten bald darauf zur Entwicklung der ersten Spektroheliographen. Diese Geräte ermöglichten zum ersten Mal eine systematische Beobachtung der Chromosphäre. In Abbildung 13 wird der Aufbau und die Funktionsweise eines solchen Spektroheliographen im Detail dargestellt. Trotz des hohen instrumentellen Aufwands (Bau eines Spektroheliographen-Hauses) und der umständlichen Beobachtungsweise scheuten auch Amateurastronomen nicht vor dem Bau solcher Instrumente zurück.

Einen weiteren großen Fortschritt brachte die Entwicklung der ersten Polarisations-interferenzfilter, die B. Lyot und Y. Öhmann unabhängig voneinander gelang [11]. Abgestimmt auf die Wellenlänge der H α -Linie wurden diese

Abbildung 13: Zu Zeiten, als den Astronomen noch keine engbandigen Interferenzfilter zur Isolierung einzelner Wellenlängen zur Verfügung standen, war der Bau eines Spektroheliographen der einzige Weg, die im Vergleich zur Photosphäre sehr lichtschwache Chromosphäre zu beobachten. Auch von Amateuren wurde der Bau solch aufwendiger Geräte nicht gescheut, die Abbildung zeigt die Skizze eines solchen Instruments: Das Sonnenlicht wird über einen Coelostaten auf ein Linsenobjektiv langer Brennweite gelenkt, in dessen Brennebene mit einem engen Spalt ein schmaler Streifen aus dem Sonnenbild ausgeschnitten wird. Ein Parabolspiegel langer Brennweite, dessen Brennpunkt ebenfalls am Spaltort liegt, wirft das Licht zurück auf ein Gitter. Das so entstehende Spektrum wird von einem weiteren Parabolspiegel auf einen weiteren Spalt abgebildet. Dieser Spalt wird so justiert, daß er genau das Licht einer Fraunhoferlinie passieren läßt, bevorzugt das der H α -Linie. Auf diese Weise erreicht man eine monochromatische Abbildung des ersten Spaltes, dessen Bild mit einem Okular betrachtet werden kann. In dem kleinen Ausschnitt, den der erste Spalt aus dem Sonnenbild ausschneidet, werden nun die Erscheinungen der Chromosphäre sichtbar. Läßt man das Sonnenbild langsam über den ersten Spalt wandern, kann nach und nach die gesamte Sonnenoberfläche beobachtet werden (Abbildung oben aus [6]).



Reflexe und Streulicht im optischen Strahlengang

Reflexe, verursacht im Strahlengang des Teleskops, stellen immer wieder ein Problem dar. Ihr Spektrum reicht von schwachen Streulichtreflexen, die, 1000mal schwächer als das eigentliche Bild, erst bei langbelichteten CCD-Aufnahmen zum Problem werden, bis hin zu Spiegelungen an blanken Metallteilen im Strahlengang, die »Geisterbilder« verursachen, deren Helligkeit mit der des Objekts durchaus konkurrieren können. Auf jeden Fall führen derartige Reflexe zu einem Streulichtuntergrund und damit zur Verminderung des Bildkontrastes. Dies ist besonders dann störend, wenn die beobachteten Objekte selbst sehr kontrastarm sind. Dies gilt insbesondere für die Beobachtung der Chromosphäre, da mit der Photosphäre in unmittelbarer Nachbarschaft eine ungleich stärkere Lichtquelle vorhanden ist. Die Verhältnisse sind hier ähnlich extrem, so als würde man eine Galaxie neben dem Vollmond beobachten wollen.

Der sorgfältigen Beseitigung aller Reflexe und Streulichtquellen im Tubus, im Okularstutzen, an den Okularen und anderem Zubehör sollte daher große Aufmerksamkeit geschenkt werden. Zeigen sich auf Ihren Astroaufnahmen störende Aufhellungen oder gar »Geisterbilder«, so öffnen sie die Rückwand der Kamera (nachdem sie den Film zurückgespult haben) und untersuchen den gesamten

Strahlengang, angefangen beim Objektiv bis hin zum Kameragehäuse, auf blanke Metallflächen. Decken sie diese Stellen mit mattschwarzer Farbe oder schwarzem Filz ab. Sollte die Ursache nicht sofort erkennbar sein, versuchen Sie durch systematisches Ab- und Anbauen der Zubehörteile und durch Drehen der Kamera die Streulichtquelle zu lokalisieren. Bei der visuellen Beobachtung können z. B. ungenügend geschwärzte Okularfassungen zu starken Streulichtquellen werden. In der Regel gilt: Je konzentrierter ein Reflex im Bild sichtbar ist, desto kürzer ist der Abstand der reflektierenden Fläche zur Bildebene.

Ein Fehler, der beim Einsatz von Protuberanzenansätzen oft gemacht wird und der ebenfalls zu störenden Bildreflexen führt, ist die Verwendung zu kleiner Kegelblenden. Während bei den früher oft benutzten breitbandigen H α -Filtern (HWB 10–100 Å) die Protuberanzen schlagartig im Streulicht der Photosphäre ertrinken, wenn der Kegel zu klein gewählt wird, ist dies bei den neuen engbandigen H α -Filtern (HWB 1,5–10 Å) nicht mehr der Fall. Dieser Umstand verleitet oft zum Einbau zu kleiner Kegel, um die Protuberanzen möglichst bis zur Photosphäre verfolgen zu können. Kleine Randabschnitte der Photosphäre können dann den Kegel passieren. Sie werden durch Re-

flexion an den inneren Grenzflächen der aus mehreren Lagen bestehenden Interferenzfilter reflektiert und erzeugen im Bild schalenförmige Lichtbögen um den Sonnenrand. Sie sind fast nicht zu erkennen, wenn das Filter gerade im Strahlengang gehalten wird. Wird das Filter zum Abgleich der zentralen Wellenlänge aber geneigt, so werden diese Nebengebilde sichtbar und überdecken die zarten Protuberanzen. Die Position und der Abstand dieser Reflexe vom Sonnenrand variiert mit der Neigung des Filters. Treten solche Reflexe bei der Beobachtung oder beim Photographieren auf, sollten Sie unbedingt auf den nächstgrößeren Kegel wechseln und gegebenenfalls den Protuberanzenansatz um 180° drehen (z. B. unter Zuhilfenahme des T-2 Schnellwechselsystems als Drehvorrichtung).

Leichte Toleranzen der Brennweiten einer Teleskopserie können dazu führen, daß Sie mitunter den jeweils nächstgrößeren Kegel verwenden müssen als eigentlich vorgesehen. Aus diesem Grund enthält ein Kegelsatz unseres Protuberanzenansatzes neben den 6 Standardkegeln einen weiteren Kegel mit etwas größerem Durchmesser. Es wird empfohlen, vor der Bestellung eines Kegelsatzes die Brennweite des Teleskops, z. B. durch Probeaufnahmen der Sonne, genau zu überprüfen.

23

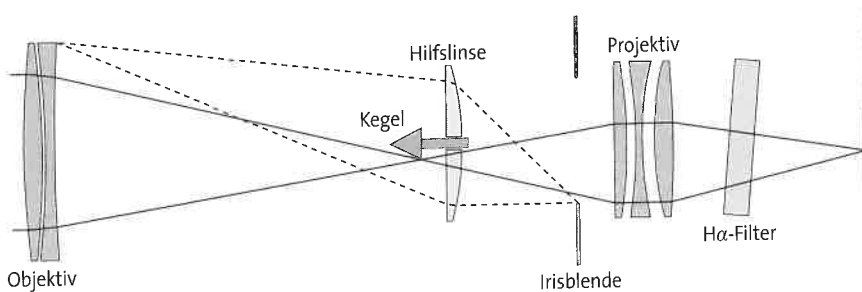
sehr engbandigen Filter in Verbindung mit dem Koronographen zu einem sehr wichtigen Hilfsmittel zur Beobachtung der Sonnenprotuberanzen. Auch in Amateurreisen wurde dieses Instrument nachgebaut und als Protuberanzenfernrohr eingesetzt [9].

Heute stehen Amateurastronomen eine Vielzahl engbandiger H α -Interferenzfilter zur Beobachtung der Chromosphäre zur Verfügung⁶. Die Halbwertsbreiten reichen von 10 Å bis 0,5 Å. Die breitbandigen Filter ($1\text{ Å} \leq \Delta\lambda \leq 10\text{ Å}$) ermöglichen in Verbindung mit einem Protuberanzenfernrohr oder einem Protuberanzenansatz die Beobachtung der Sonnenprotuberanzen. Mit den engbandigen Filtern ($\lambda < 1\text{ Å}$) wird die Chromosphäre sogar auf der Sonnenscheibe sichtbar [10].

Der Protuberanzenansatz nach W. Lille

Protuberanzenfernrohre zur Beobachtung der Sonnenprotuberanzen sind im wesentlichen dem Prinzip des Lyot'schen Koronographen nachempfunden (Abbildung 14): Das durch das Objektiv erzeugte Sonnenbild wird mit einer Kegelblende abgedeckt, die in Abhängigkeit von der Jahreszeit und der Objektivbrennweite sehr genau auf den Durchmesser der Sonnenscheibe abgestimmt ist. Die Kegelblende wird durch eine Feldlinse gehalten, mit deren Hilfe der Objektivrand auf eine Ringblende abgebildet wird. Das an der Objektivfassung gestreute Licht kann auf diese Weise abgeblendet werden, wodurch der Bildkontrast verbessert wird. Die durch die

6 Allgemein müssen Filter zur Beobachtung der Chromosphäre auf die Wellenlänge einer Fraunhoferlinie abgestimmt sein. Die stärkste dieser Linien ist die H α -Linie, weshalb sie in Amateurreisen bevorzugt wird. Professionelle Astronomen beobachten darüber hinaus im Licht anderer Fraunhoferlinien, z. B. Absorptionslinie von CaII bei 396,3 und 393,4 nm (Kalzium H- und K-Linien).



Kegelblende erzeugte »künstliche Sonnenfinsternis« wird dann mit Hilfe eines Projektivs in die endgültige Bildebene projiziert.

Das Abdecken der Sonnenscheibe allein reicht jedoch nicht aus, um Protuberanzen beobachten zu können, zu stark ist das Streulicht, das von der Atmosphäre in der direkten Sonnenumgebung erzeugt wird. Erst durch ein H α -Filter, welches nur einen schmalen Bereich des Lichtspektrums um 656,28 nm (der Wellenlänge der roten H α -Linie) passieren läßt, wird dieser Streulichtuntergrund so stark unterdrückt, daß Protuberanzen (die »Materiefackeln« entlang der Magnetfeldlinien am Sonnenrand) sichtbar werden.

Protuberanzenfernrohre sind vergleichsweise aufwendige Geräte, die nur zur Beobachtung der Protuberanzen geeignet sind. Sie waren daher Amateuren vorbehalten, die sich auf dieses Gebiet der Sonnenbeobachtung spezialisierten. Dies hat sich erst geändert, als es W. Lille gelang, die komplette Optik zu einem Protuberanzen-Ansatz von nur 20 cm Länge zusammenzufassen, wel-

cher jeden normalen Refraktor geeigneter Brennweite mit wenigen Handgriffen zu einem echten Protuberanzenfernrohr macht. Der Ansatz wurde über die Jahre immer weiter verbessert und stellt trotz der kompakten Bauform keinerlei Kompromiß in bezug auf Streulichtunterdrückung oder Bildqualität dar, wie zahlreiche Amateuraufnahmen immer wieder beweisen (Abbildung 15).

Seit 10 Jahren bauen wir einen solchen Protuberanzenansatz nach den Vorgaben (und mit Hilfe) von Herrn Lille. Das Gerät enthält die komplette Optik: Eine für H α -Transmission vergütete(!), asymmetrische Hilfslinse mit wärmeisolierter Kegelblendenfassung, eine von außen einstellbare Irisblende, die ohne jeden Umbau eine kontinuierliche Anpassung an den jeweiligen Objektivdurchmesser erlaubt, und ein dreilinsiges, MC-vergütetes Projektiv (kein einfacher Achromat!). Im Lieferumfang sind nicht weniger als 7 Kegelblenden aus V2A-Stahl enthalten, die eine feine Anpassung an die jahreszeitliche Variation des scheinbaren Sonnendurchmessers ermöglichen. Wichtig hierbei ist, daß der Kegel nie zu klein

Abbildung 14: Der Aufbau eines Protuberanzenfernrohrs geht auf den von Lyot eingeführten Koronographen zurück: Die vom Objektiv abgebildete Sonnenscheibe wird durch eine Kegelblende, deren Durchmesser genau dem Durchmesser der projizierten Sonnenscheibe entspricht, vollständig abgedeckt. Die sich anschließende Hilfslinse bildet den inneren Objektivrand auf eine Irisblende ab, deren Durchmesser gerade so klein ist, daß der Objektivrand abgedeckt wird. Streulicht, das an den inneren Fassungskanten des Objektivs entsteht, wird so unterdrückt. Mit Hilfe eines Projektivs wird das von der Kegelblende abgedeckte Sonnenbild in die Bildebene projiziert. Ein in den Strahlengang eingesetztes H α -Filter, das nur das Licht der roten Wasserstofflinie bei 656,28 nm passieren läßt, kann das Streulicht der viel intensiveren Photosphäre so weit unterdrücken, daß am Rand der abgedeckten Sonnenscheibe die Protuberanzen sichtbar werden. Das H α -Filter muß sich an einer Stelle des Strahlengangs befinden, an der die Lichtstrahlen möglichst parallel zur optischen Achse verlaufen. Sein Einbau erfolgt je nach optischer Konstruktion hinter dem Projektiv oder zwischen den Linsengruppen des Projektivs.

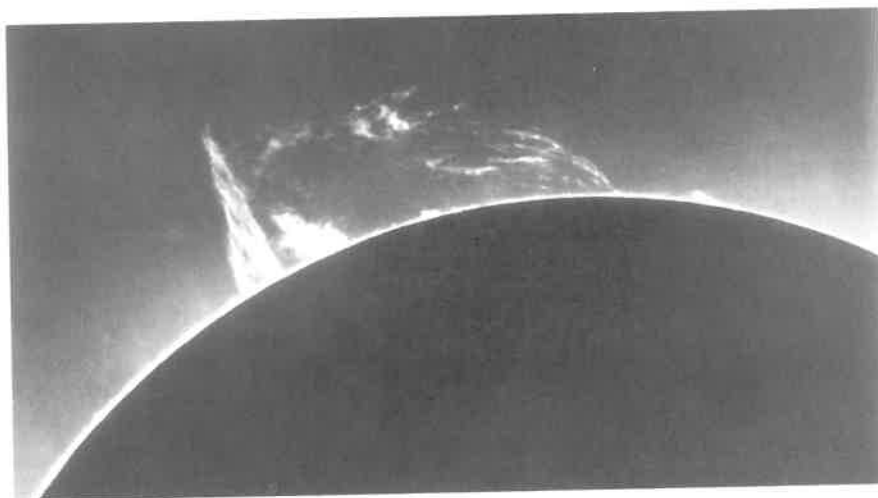


Abbildung 15: Die Protuberanzen der Sonne zeigen eine ungeheure Vielfalt an Formen, die sich oft schon innerhalb weniger Minuten sichtbar verändern können. Dies macht ihre Beobachtung so interessant. Diese Aufnahme gelang Herrn Lille am 21. 6. 1998 an einem AS 100/1000 Zeiss-Refraktor mit dem von ihm entwickelten Protuberanzenansatz und einem Baader 1,5A H α -Filter. Am Rand des Kegels wird die dünne Schicht der Chromosphäre sichtbar, aus der riesige Protuberanzen aufsteigen.

gewählt wird, sonst kommt es zu Reflexbildern, die den Bildkontrast erheblich herabsetzen können. Der Standard-Kegelblendsatz ist auf eine Teleskopbrennweite von 910 mm abgestimmt, gegen Aufpreis können einzeln gefertigte Kegelsätze für Teleskopbrennweiten zwischen 750 mm und 1300 mm geliefert werden (siehe Preisliste). Der Wechsel der Kegel erfolgt mit wenigen Handgriffen. Jeder Kegel trägt eine eigene Ringmarke, so daß die richtige Auswahl des Kegeldurchmessers ohne langwieriges Probieren möglich ist. Alles liegt säuberlich in einem Koffer mit passend gefrästen Fächern, inkl. Kegelkästchen, Pinzette für die Kegel und ein Paar Handschuhen, um ein Verschmutzen der Kegel beim Wechseln zu verhindern.

Wir rüsten diesen Protuberanzenansatz mit unserem 1.5 Å H α -Interferenzfilter aus. Die schmale Halbwertsbreite dieses Filters garantiert auch bei leicht dunstigem Himmel, wie er z.B. in der Stadt fast immer vorherrscht, ein kontrastreiches Bild. Eine Kippfassung, mit der das Filter im Strahlengang geneigt werden kann, erlaubt die genaue Abstimmung der Transmission auf die H α -Linie (warum dies so ist, wird in Abbildung 16 erklärt). Der Protuberanzenansatz ist teleskopseitig mit einem T-2 Innengewinde, okularseitig mit einem T-2 Außengewinde ausgerüstet, so daß sämtliche Adapter unseres Astro T-2 Systems® verwendet werden können. Er kann teleskopseitig wahlweise mit einer 1 1/4" oder einer 2"-Steckfassung bestückt werden. Okularseitig empfehlen wir unsere T-2 Schiebefokussierhülse. Sie ermöglicht auch nach dem Anbau des Protuberanzenansatzes an das Teleskop ein Nachfokussieren auf die Kegelblende und verfügt sowohl über eine 1 1/4" Steckfassung für Okulare als auch über ein T-2 Gewinde zum Anschrauben eines T-Adapters für eine Kleinbildkamera. Um auch Detailbeobachtungen einzelner Protuberanzen mit hohen Vergrößerungen machen zu können, sollte unser VIP-Exzenteransatz direkt zwischen Protuberanzenansatz und Schiebefokussierhülse eingeschraubt werden. Der Exzenteransatz verfügt über einen seitli-

chen Verstellweg von ± 10 mm in jede Richtung, so daß auch große Protuberanzen formatfüllend oder kleinste Details am Sonnenrand mit hoher Vergrößerung beobachtet werden können (ohne Exzenter wäre ja sonst bei hoher Vergrößerung nur die Rückseite der Kegelblende zu sehen). Selbstverständlich kann der Exzenteransatz auch in Verbindung mit einer Kleinbildkamera benutzt werden um mit Hilfe der Okularprojektion eine einzelne Protuberanz am Sonnenrand formatfüllend aufzunehmen. Sogar das Baader-Binokular kann an den VIP-Exzenter angeschlossen werden, allerdings ist für diese »binokulare« Protuberanzenbeobachtungen ein Glasweg-Korrektor 1:1.7 notwendig, um die lange optische Weglänge des Binokulars auszugleichen.

Das Baader 1.5 Å H α -Interferenzfilter

Streulichtunterdrückung ist ein ganz wesentlicher Punkt bei der Beobachtung der Chromosphäre der Sonne, deren Strukturen im allgemeinen nicht sehr kontrastreich sind. Streulicht, das im Teleskop (z.B. am Objektivrand) entsteht, läßt sich durch geeignete Streulichtblenden minimieren. Streulicht aus der Erdatmosphäre kann dagegen nur mit Hilfe eines H α -Filters unterdrückt werden. Das Verhältnis von weißem Streulicht zu rotem H α -Licht der Chromosphäre und Protuberanzen wird dabei umso günstiger, je schmaler die Halbwertsbreite des verwendeten Filters ist.

Während bei der Entwicklung der ersten Protuberanzenfernrohre und Koronographen vor etwa 160 Jahren oft dichte Farb-Rotfilter ausreichten, um die Protuberanzen sichtbar werden zu lassen, so erfordert die zunehmende Luftverschmutzung heute den Einsatz von Interferenzfiltern mit immer engeren Halbwertsbreiten. Mittlerweile liefern sogar mit 10 Å-Filtern ausgerüstete Protuberanzenfernrohre in Städten nur noch an wenigen Tagen im Jahr einen ausreichenden Bildkontrast. Aus diesem Grund haben wir uns entschlossen, eine Filterserie mit einer wesentlich kleineren

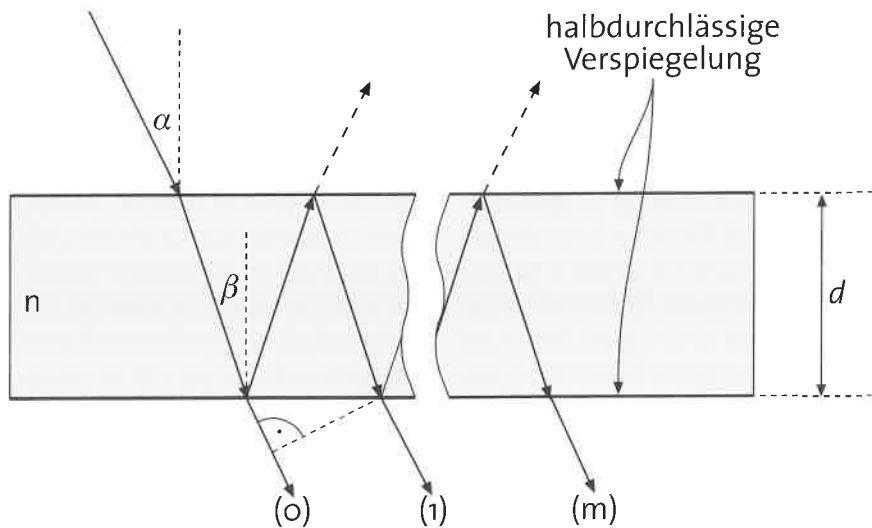


Abbildung 16: Die Abbildung verdeutlicht die Funktionsweise eines Interferenzfilters: Trifft ein Lichtstrahl auf eine planparallele Platte mit Brechungsindex n , so wird er durch die teilweise Reflexion an den Oberflächen der planparallelen Platte in mehrere »Teilstrahlen« zerlegt. Der Gangunterschied $\Delta\lambda$ zweier »benachbarter«, an der Rückseite der Platte austretender Teilstrahlen lässt sich leicht berechnen, er hängt vom Einfallswinkel α , vom Brechungsindex n und von der Dicke d der Platte ab:

$$\Delta\lambda = 2 \times d \times \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}$$

Die maximale Transmission erhält man, wenn die einzelnen Teilstrahlen konstruktiv interferieren, wenn also der Gangunterschied ein vielfaches der Wellenlänge λ ist:

$$\Delta\lambda = k \times \lambda \quad \text{mit } k = 1, 2, 3, \dots$$

$\Rightarrow$ konstruktive Interferenz

Berechnet man die Lage der Maxima für verschiedene k , so wird deutlich, daß ein ausreichender Abstand nur erreicht wird, wenn die Dicke d der Platte in der Größenordnung der Wellenlänge λ liegt [3]. Bei transparenten Materialien (z. B. Glas) fällt die Intensität der Teilstrahlen schnell mit der Ordnung m ab, da die Reflektivität sehr gering ist (wenige %). Die Halbwertsbreite eines solchen Filters ist sehr groß und die Maxima sind nur schwach ausgeprägt. Aus diesem Grund werden die Oberflächen der Platte verspiegelt (Reflektivität $\approx 90\%$), so daß auch Teilstrahlen hoher Ordnung über ausreichende Intensität verfügen. Derartige Metallinterferenzfilter lassen sich mit Halbwertsbreiten von bis zu 1 nm herstellen, wobei gute Filter eine Transmission von etwa 50% erreichen.

Planparallele Glaspatten in der gewünschten Dicke von einigen 100 nm lassen sich durch optisches Polieren nicht mehr herstellen. Man benutzt daher als Interferenzmedium eine dielektrische Schicht (z. B. Kryolit Na_3AlF_6), die auf eine Glasplatte gedampft wird, welche zuvor mit einer Metallschicht belegt wurde. Eine weitere metallbeschichtete Glasplatte wird dagegen gelegt. Um die unerwünschten Transmissionslinien zu unterdrücken, werden

Bandbreite aufzulegen. Unsere neuen Filter besitzen eine Halbwertsbreite von etwa $1,5\text{ \AA}$. Sie werden mit einer Standard $1\frac{1}{4}$ "-Filterfassung geliefert, der freie Filterdurchmesser beträgt 26 mm (!). Jedes Filter wird am Spektrographen vermessen, ein Ausdruck dieser Transmissionsmessung ist im Lieferumfang enthalten.

Die sehr kleine Halbwertsbreite unserer $\text{H}\alpha$ -Filter garantiert auch bei leicht verzerrtem Stadthimmel eine Kontrastleistung, die mit einem $10\text{ \AA}$ -Filter nur bei sehr guten atmosphärischen Bedingungen möglich ist. Sie sind schmalbandig genug, um sogar ohne Kegelblende (sogar an Spiegelteleskopen) helle Protuberanzen sichtbar zu machen. Allerdings muß bei Spiegelteleskopen unbedingt ein ERF-Objektivfilter verwendet werden, um die Erhitzung des $\text{H}\alpha$ -Filters möglichst klein zu halten.

ERF-Objektivfilter

Soll die Sonne ohne Kegelblende im $\text{H}\alpha$ -Licht beobachtet werden, so müssen die nahe der Fokalebene im Strahlengang des Teleskops liegenden $\text{H}\alpha$ -Filter unbedingt vor der hohen Wärmebelastung geschützt werden. Insbesondere der UV-Anteil des Sonnenlichtes würde sonst zu einer schnellen Zerstörung der empfindlichen Interferenzfilter führen. Erreicht wird die erforderliche Lichtdämpfung durch ein Schutzfilter mit einer hohen Transmission im roten Spektralbereich

und einer möglichst hohen Absorption (Auslöschung) von allen anderen Wellenlängen. Gut geeignet sind Rotgläser mit einer Absorptionskante kurz vor der $\text{H}\alpha$ -Linie.

Solche Energieschutzfilter (kurz ERF-Filter) würden sich, direkt vor dem $\text{H}\alpha$ -Filter nahe am Fokus angebracht, ebenfalls stark erwärmen (mit entsprechend negativen Folgen für die Abbildungsleistung). Aus diesem Grund sollten sie nur als Objektivfilter eingesetzt werden, wobei entsprechende Anforderungen an die Oberflächengüte zu erfüllen sind. Da Rotfilter schnell altern, wenn sie starker Sonnenstrahlung (d. h. UV-Strahlung) ausgesetzt sind, und die sehr weichen Gläser sehr kratzempfindliche Oberflächen besitzen (Rotgläser sind ähnlich weich wie Calcium-Fluorid), sollten ERF-Filter zumindest auf der bewitterten Seite mit einer Hartvergütung beschichtet werden. Diese schützt das Filter nicht nur vor Alterung und Verkratzen, sondern verhindert außerdem einen Kontrastabfall durch Reflexe und Doppelbilder.

Aufgrund der geringen Härte des Rotglases muß die Vergütung sehr aufwendig aufgebracht werden, damit sich die Platte nicht durch die Erwärmung beim Vergüten verformt oder beim Abkühlen nach der Vergütung platzt. Die teuersten plasmaunterstützten Beschichtungstechniken sind dazu erforderlich, deshalb wird bei den amerikanischen Rotgläsern darauf verzichtet.

wie beim Lyotfilter zusätzlich Farbfilter an die zweite Glasplatte gekittet.

Die Abhängigkeit der Transmission vom Einfallswinkel kann dazu benutzt werden, durch Verkippen des Filters die Wellenlänge maximaler Transmission (die sogenannte zentrale Wellenlänge) zu variieren und dem gewünschten Wert genau anzupassen. Diese Winkelabhängigkeit bedeutet aber gleichzeitig, daß bei einem nicht parallelen Strahlengang aus den unterschiedlichen Teilstrahlen verschiedene Wellenlängen ausgefiltert werden, was zu einer scheinbaren Verbreiterung der Halbwertsbreite und/oder zu einer Abhängigkeit der zentralen Wellenlänge vom Bildort führt. Auch die Temperatur hat bei Interferenzfiltern aufgrund der Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex der Interferenzschicht und deren Dicke (Wärmeausdehnung!) einen wesentlichen Einfluß auf die zentrale Wellenlänge.

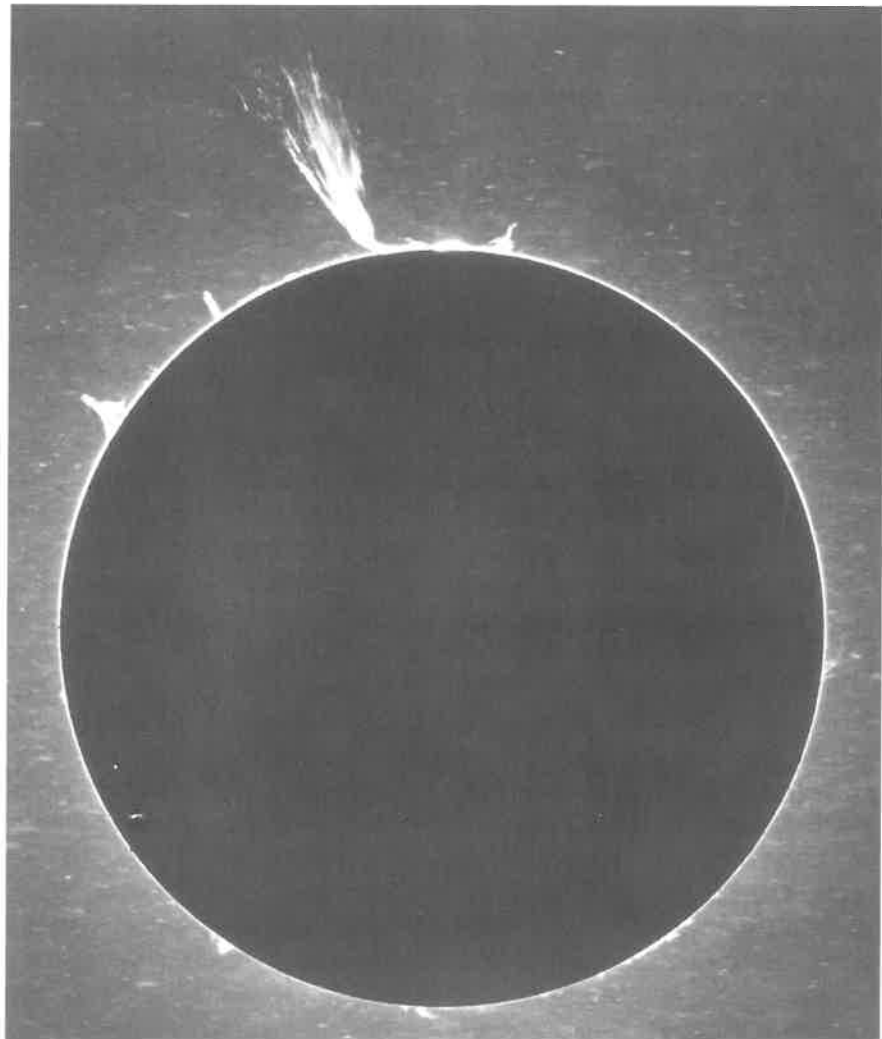
Unsere ERF-Filter werden aus RG610-Gläsern der Firma Schott hergestellt. Feinoptisch polierte Oberflächen mit einer Oberflächenplanität von $\lambda/10$ garantieren höchste Abbildungsleistung. Jedes Filter wird auf unserer optischen Bank in Autokollimation auf einwandfreie Abbildung geprüft. Ein Vergleich mit US-Rotglasfiltern zeigt hierbei oft einen ähnlichen Qualitätsunterschied wie bei unseren Objektivsonnenfiltern (siehe Abbildung 5).

Die oben genannten Rotgläser absorbieren den gesamten höherfrequenten Spektralbereich von Ultraviolett bis Gelb, nur im Rot- und Infrarotbereich sind sie transparent. Bei großen Instrumenten kann der Infrarotanteil noch immer zu einer starken Erwärmung des H α -Filters führen. Für solche Fälle bieten wir optional eine *IR-Sperrschichtvergütung* für unsere ERF-Filter an. Diese Mehrschicht-

vergütung entspricht in ihrem Aufbau den Interferenzschichten eines modernen Nebelfilters, nur daß im Fall unserer IR-Vergütungen die Filterflächen bis zu hundertmal größer sind. Entsprechend hoch ist der Prozessaufwand bei der Herstellung. Die IR-Vergütung wird auf die Rückseite des Filters aufgedampft und reflektiert den Infrarotanteil des Sonnenlichts oberhalb von 700 nm. Das ERF-Filter wird so zu einem breitbandigen H α -Filter. Diese Vergütung ist sehr teuer und nicht immer verfügbar. Gegebenenfalls müssen wir Sie bitten einer Lieferung ohne Vergütung zuzustimmen und zu warten, bis eine größere Anzahl von ERF-Scheiben gemeinsam beschichtet werden kann. Wir würden dann die Platte für diese nachträgliche IR-Vergütung von Ihnen zurückerbitten.

Wir bieten unser ERF-Filter in sechs verschiedenen Durchmessern zwischen

Abbildung 17: Diese Protuberanzenaufnahme der Sonne demonstriert eindrucksvoll, wie sehr eine verschmutzte Atmosphäre den Kontrast bei der Sonnenbeobachtung im H α -Licht beeinträchtigen kann. Als Herr Jungbluth die herrlichen Protuberanzen mit unserem Protuberanzenansatz auf Film bannen wollte, herrschte gerade sehr starker Pollenflug, der als feines Streulichtmuster im Bild sichtbar wird. Nichtsdestotrotz zeigen die Protuberanzen eine Vielzahl an Details und geben die Dynamik der Chromosphäre eindrucksvoll wieder. Herr Jungbluth benutzte für diese Aufnahme den »Standard-Refraktor« 80/910 mm von Vixen, wobei der Protuberanzenansatz noch den alten 10 Å H α -Filter enthielt. Die hohe Streulichtempfindlichkeit dieses Filters aufgrund der vergleichsweise großen Halbwertsbreite war die Motivation, einen wesentlich engbandigeren Filter zu entwickeln und anzubieten. Mit dem heute erhältliche 1,5 Å H α -Filter sind sogar mit Spiegelteleskopen kontrastreiche Aufnahmen der Protuberanzen möglich.



80 mm und 205 mm an (siehe Preisliste). Auf Wunsch können wir Ihnen auch eine auf Ihr Teleskop abgestimmte Filterfassung anfertigen (allerdings mit zum Teil recht langen Lieferzeiten – wir bitten um Entschuldigung!).

H α -Interferenzfilter von Daystar

28

Beim Einsatz von H α -Filtern mit Halbwertsbreiten unter 1 Å kann man die Chromosphäre sogar auf der Sonnenscheibe selbst beobachten; auf eine Kegelblende kann verzichtet werden. Für den Beobachter stellt sich ein völlig anderes Bild dar als der gewohnte Anblick der Photosphäre mit den Sonnenflecken und der leicht körnigen Struktur der Granulation. In einem Meer zarter Filamente werden die hellen H α -Flares sichtbar, über den Sonnenrand erheben sich Spikulen und Protuberanzen. Die oft sehr kurzlebigen Details der Chromosphäre vermitteln ein sehr belebtes Bild unserer Sonne und führen dem Beobachter die ungeheuren Energien vor Augen, die in Sternatmosphären freigesetzt werden. Auf diese Weise erschließen die sehr engbandigen Interferenzfilter dem Sonnenbeobachter eine ganz neue Sicht auf unser Tagesgestirn.

Allerdings muß klar gesagt werden, daß die Sonnenoberfläche im H α -Licht nur sehr zart sichtbar ist, denn ein derart schmalbandiges H α -Filter hat bei der zentralen Wellenlänge eine sehr geringe Lichtdurchlässigkeit (nur 6–8% gegenüber 30–50% beim Protuberanzenansatz). Erst bei fotografischer Anwendung lassen sich alle Details der Chromosphäre auch wirklich so kontrastreich dokumentieren, wie man sie in den veröffentlichten Photos sieht.

Die Firma Daystar ist seit Jahrzehnten der führende Hersteller von engbandigen H α -Filtern für den Bereich der Schul- und Amateurastronomie. Daystar-Filter werden heute in unzähligen Volkssternwarten, Schulen, Universitäten und von engagierten Amateurastronomen in der ganzen Welt erfolgreich eingesetzt. Die geringe Halbwertsbreite bringt es mit sich, daß diese Filter ein Öffnungsverhältnis von 1:30 oder kleiner verlangen.

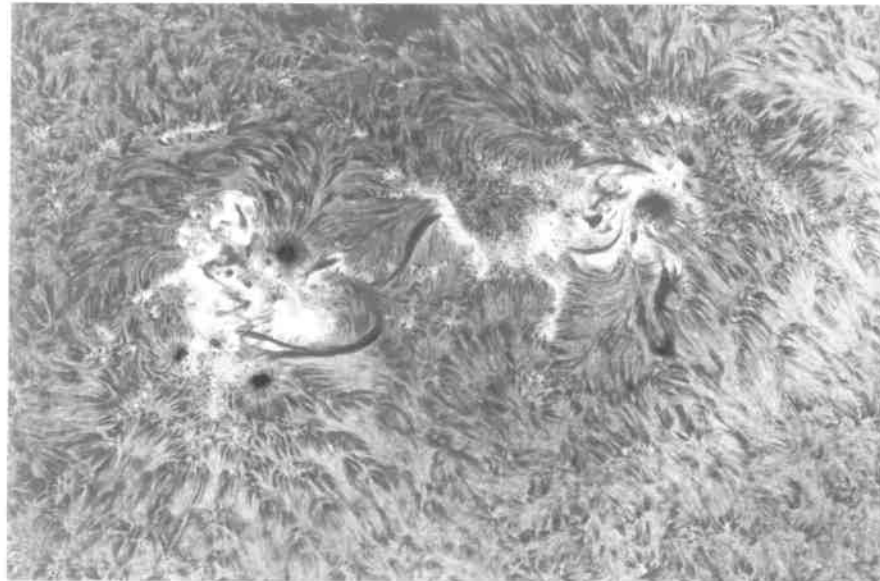
Vorteilhaft ist die Verwendung eines telezentrischen Projektionssystems (siehe das folgende Kapitel »Das telezentrische System von Astro-Physics«). Unbedingt erforderlich ist ein ERF-Objektivfilter! Ohne ein solches Schutzfilter würde die extreme Wärmebelastung die empfindlichen und viele tausend Mark teuren Interferenzfilter schnell zerstören.

Die Herstellung derart hochwertiger Interferenzfilter erfordert einen hohen technologischen Aufwand: Computergesteuerte und mit Lasern überwachte Beschichtungsverfahren garantieren eine gleichbleibend hohe Qualität der Daystar-Filter. Wesentliche Qualitätsmerkmale sind neben der Halbwertsbreite eine gleichmäßig hohe Transmission im Bereich der zentralen Wellenlänge (der Wellenlänge maximaler Transmission) und eine geringe Variation der zentralen Wellenlänge über die gesamte Filterfläche. Diese »spektrale Gleichförmigkeit« eines Interferenzfilters hängt wesentlich von der Homogenität der Interferenzschichten und von der Oberflächenqualität des Substrats ab, auf das die einzelnen Interferenzschichten aufgedampft werden. Gewisse Unterschiede in der Helligkeit der H α -Details müssen dabei hingenommen werden. Immerhin kostet ein solches Filter »nur« 6–12tausend Mark. Die einzigen anderen Anbieter sind professionelle Firmen wie Zeiss/Oberkochen oder Halle/Berlin. Dort kostet ein solches Filter dann aber über Hunderttausend Mark (bzw. 50 000 Euro).

Die genaue Lage der zentralen Wellenlänge bei Interferenzfiltern hängt empfindlich von der Filtertemperatur ab. Die beste, aber zugleich aufwendigste Methode, ein Driften der zentralen Wellenlänge zu verhindern, ist der Einbau der bis zu 32 Filter- und Polarisations scheiben in eine Filterheizung. Geregelt über einen Thermostaten wird so, unabhängig von der Umgebungstemperatur, der Filter konstant auf einer bestimmten Temperatur gehalten. Dieses Verfahren wird bei der ATM- und University-Serie von Daystar eingesetzt.

Die *University-Serie* wurde für den professionellen Einsatz an Instituten

Abbildung 18: Diese einmalig schöne Aufnahme der Chromosphäre zeigt die stark aufgewühlte Struktur der $H\alpha$ -Filamente im Bereich einer Fleckengruppe. Wolfgang Lille belichtete diese Aufnahme am 11. 5. 1993 in einem Augenblick ungewöhnlich guter Luftruhe an einem 8"-Refraktor, der mit einem AS 200/3000 Objektiv von Carl Zeiss Jena und einem $0.5 \text{ \AA}$ $H\alpha$ -Filter von Daystar ausgestattet war. Mit Hilfe einer Negativlinse wurde eine Äquivalentbrennweite von 7,5 m erreicht. Die Belichtungszeit betrug $1/60 \text{ s}$ auf Kodak TP 2415.



29

entwickelt. Diese Filter werden aus hochwertigsten optischen Komponenten hergestellt, dies garantiert eine hervorragende spektrale Gleichförmigkeit nahezu über die gesamte Filteröffnung von 32 mm. Eine genaue Temperaturregelung mit Hilfe eines kalibrierten Filterofens erlaubt eine sehr sensible Abstimmung der zentralen Wellenlänge, so daß auch in den Flügeln der $H\alpha$ -Linie gezielt beobachtet werden kann. Die gezielte Einstellung kleinster Wellenlängenverschiebungen ermöglicht sogar Geschwindigkeitsstudien mit Hilfe des Dopplereffekts. Die Filter der University-Serie können mit Halbwertsbreiten von $0.8 \text{ \AA}$ bis $0.5 \text{ \AA}$ geliefert werden.

Die Filter der ATM-Serie sind die Standard- $H\alpha$ -Filter für den engagierten Amateur sowie für Schulen und Volkssternwarten. Im wesentlichen baugleich mit den University-Modellen erreicht die kostengünstigere ATM-Serie die hohe spektrale Gleichförmigkeit für die zentralen 19 mm der Filterscheibe (bei einem Gesamtdurchmesser von ebenfalls 32 mm), so daß mit Teleskopen bis zu 2 m Brennweite die ganze Sonnenscheibe im $H\alpha$ -Licht abgebildet werden kann. Der Filterofen garantiert auch bei den ATM-Modellen eine stabile Lage der zentralen Wellenlänge, unabhängig von äußeren Temperaturschwankungen. Die ATM-Filter sind mit Halbwertsbreiten zwischen $0.95 \text{ \AA}$ und $0.5 \text{ \AA}$ lieferbar.

Bei den sogenannten T-Scannern von Daystar wird die genaue Abstimmung der Wellenlänge durch eine Kippvorrichtung erreicht, mit der die Filterscheibe im Strahlengang des Teleskops geneigt werden kann, während der Beobachter durch das Teleskop schaut. Der Bildkontrast der $H\alpha$ -Strukturen zeigt sofort, wann die optimale Neigung erreicht ist. Da durch das Neigen eines Interferenzfilters nur eine Verkürzung der zentralen Wellenlänge möglich ist (siehe Abbildung 16), wird bei der Herstellung der T-Scanner die zentrale Wellenlänge für den senkrechten Einfall um einige Zehntel $\text{\AA}$ oberhalb der $H\alpha$ -Linie ($6562.8 \text{ \AA}$) eingestellt. Der Filterdurchmesser der T-Scanner liegt bei 30 mm, sie sind mit Halbwertsbreiten von $0.8 \text{ \AA}$ bis $0.5 \text{ \AA}$ lieferbar.

Der T-Scanner kommt somit ohne Stromversorgung aus, ein Vorteil für alle Sonnenbeobachter, die ihr Filter auch auf Exkursionen benutzen wollen. Allerdings sollte die Neigung des Filters regelmäßig kontrolliert werden, da kleine Temperaturschwankungen des Filterglases sonst zu einem Kontrastverlust des Bildes führen würden. Der aufgrund der fehlenden Heizung vergleichsweise niedrige Preis macht den T-Scanner vor allem für Einsteiger in die engbandige $H\alpha$ -Beobachtung interessant. Allerdings ist anzumerken, daß je nach optischem Strahlengang bei starker Kippung des Filters (d.h. bei niedrigen Außentem-

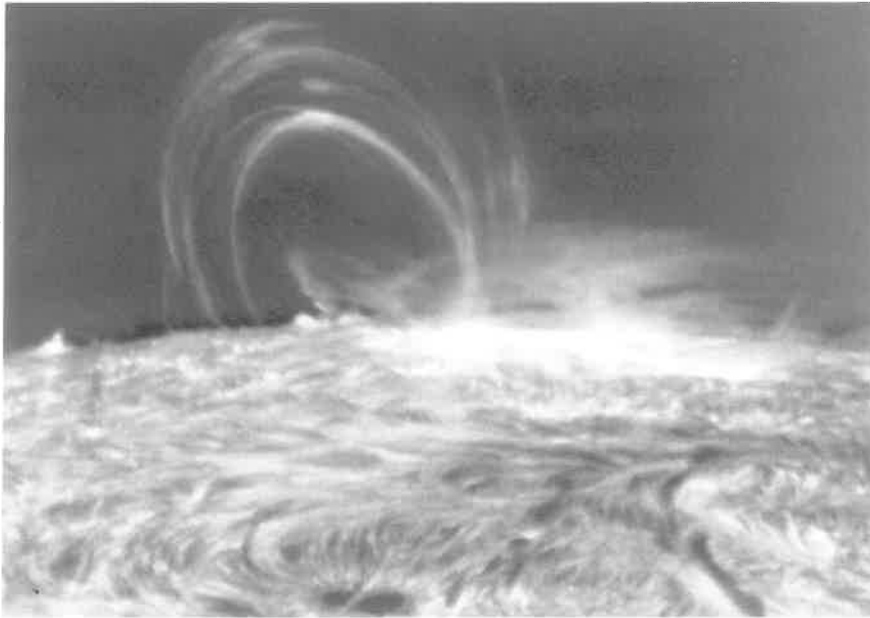


Abbildung 19: Dieses Bild einer zarten, ringförmigen Protuberanz stammt ebenfalls von Wolfgang Lille, aufgenommen mit einem 7"-Chromaten und einem 0.5 Å Daystar H α -Filter, wobei ein 6"-ERF-Objektivfilter zum Einsatz kam. Bei einer effektiven Brennweite von 4.5 m (Öffnungsverhältnis 1:30!) belichtete er etwa 1/8 s. auf Kodak TP 2415. Beim Herstellen des Abzugs im Fotolabor mußte der überbelichtete Sonnenrand partiell stark nachbelichtet werden, um die Strukturen der Chromosphäre und die viel lichtschwächeren Protuberanzen mit der gleichen Dichte darstellen zu können.

peraturen) eventuell nur streifenförmige Ausschnitte des Bildes exakt auf die H α -Wellenlänge abgestimmt sind. Aus diesem Grund empfiehlt sich gerade auch beim T-Scanner der Einsatz eines telezentrischen Systems, mit dessen Hilfe dieser Effekt vollständig vermieden wird.

Die Frage nach der richtigen Wahl der Halbwertsbreite richtet sich nach der Art der Anwendung. Allgemein gilt, daß der Bildkontrast im H α -Licht mit kleiner werdender Halbwertsbreite steigt. Dafür steht bei den breitbandigeren Filtern naturgemäß mehr Licht zur Verfügung⁷, ein Vorteil, wenn in erster Linie auf die Beobachtung der Protuberanzen Wert gelegt wird. Auf keinen Fall sollte die HWB eines H α -Filter, der zur Beobachtung der Chromosphäre eingesetzt werden soll, kleiner sein als die natürliche Linienbreite der H α -Linie der Sonne (diese beträgt knapp 1 Å). Nur so ist die optimale Unterdrückung des atmosphärischen Streulichts gewährleistet.

Das Telezentrische System von Astro-Physics

Die zentrale Wellenlänge eines Interferenzfilters, also die Wellenlänge maximaler Transmission, hängt vom Einfallswinkel des Lichtes ab (siehe Abbildung 16). Die Herstellerangaben beziehen sich

in der Regel auf einen Einfallswinkel von 0° (senkrechter Einfall). Bei den Daystar T-Scannern und bei unserem 1.5 Å H α -Filter wird diese Winkelabhängigkeit mit Hilfe einer Kippfassung zur Abstimmung der zentralen Wellenlänge genutzt.

Über die Winkelabhängigkeit der zentralen Wellenlänge sollte man sich im Klaren sein, wenn ein H α -Filter zur Beobachtung der Chromosphäre in den Strahlengang des Teleskops eingesetzt wird. Sie kann dazu führen, daß sich die Halbwertsbreite des Filters scheinbar vergrößert und die Wellenlänge von der Bildmitte zum Bildrand hin variiert. Um diesen Sachverhalt genauer zu studieren, wollen wir uns den Strahlengang eines Teleskops im Bereich der Fokalebene etwas genauer anschauen und überlegen, welchen Einfluß zusätzliche Linsengruppen oder Projektive kurz vor der Bildebene auf den Strahlengang haben.

In Abbildung 20a sehen wir den Strahlengang ohne jede zusätzliche Optik. Zu jedem *Objektpunkt* gehört ein einzelnes *Strahlenbüschel*, das in der Fokalebene im *Bildpunkt* konvergiert. Der *Öffnungswinkel* α eines solchen Strahlenbüschels hängt für kleine Bildfelder (in 1. Ordnung) allein vom Öffnungsverhältnis n des Objektivs ab:

$$\tan(\alpha/2) = 1/n$$

⁷ Die Lichtmenge, die ein Interferenzfilter passieren läßt, ist proportional zur Transmission bei der zentralen Wellenlänge und zur Halbwertszeit. Setzt man gleichbleibende Transmission bei der zentralen Wellenlänge voraus, so steigt die Lichtmenge mit zunehmender Halbwertszeit.

Abbildung 20: Diese Abbildung macht den unterschiedlichen Strahlengang in einem Teleskop deutlich, wenn nahe der Fokalebene zusätzliche Linsengruppen zur Brennweitenverlängerung benutzt werden. Bild (a) zeigt den Strahlengang ohne zusätzliche Optik. Wird eine Barlowlinse vor die Bildebene gesetzt, wie in Bild (b) dargestellt, verkleinert sich mit dem Öffnungswinkel α (dieser hängt für kleine Bildfelder allein vom Öffnungsverhältnis ab), gleichzeitig wird aber der Winkel β zwischen den Hauptstrahlen der einzelnen Strahlenbündel größer. Für den Einsatz engbandiger Interferenzfilter ist dieses Anwachsen von β sehr ungünstig. Ganz anders verläuft der Strahlengang, wenn zusätzlich zur Barlowlinse ein speziell berechnetes Projektiv zur Brennweitenverlängerung eingesetzt wird, wie in Bild (c) dargestellt. Fällt die objektseitige Brennebene des Projektivs mit der virtuellen Bildebene des Teleskops zusammen, so verlaufen die Hauptstrahlen der einzelnen Strahlenbündel parallel zueinander. Ein solcher telezentrischer Strahlengang ist ideal für die Verwendung von Interferenzfiltern, da für jeden Bildpunkt die gleiche zentrale Wellenlänge erreicht wird. Das oben dargestellte System entspricht im Prinzip dem telezentrischen System von Astro-Physics. (Bemerkung: Die in der Abbildung dargestellten Linsengruppen entsprechen nicht den tatsächlichen optischen Systemen, sie sollen allein die Strahlengänge veranschaulichen.)

Die einzelnen Teilstrahlen eines solchen Strahlenbündels treffen also nicht unter dem gleichen Einfallswinkel auf das Filter, sie werden daher nach Durchlaufen des Filters unterschiedliche Wellenlängen aufweisen. Effektiv führt dies zu einer scheinbaren Verbreiterung der Halbwertsbreite des Filters, da sich in einem Bildpunkt Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge mischen. Aus diesem Grund dürfen die engbandigen Daystarfilter nur bei Öffnungsverhältnissen von $\leq 1:30$ betrieben werden (dies entspricht einem Öffnungswinkel von $\alpha \leq 0.95^\circ$), wenn die Variation der zentralen Wellenlänge innerhalb des Strahlenbündels wesentlich kleiner bleiben soll als die Halbwertsbreite der Filter. Bei einem zu großen Öffnungsverhältnis passiert zunehmend auch Licht jenseits der H α -Linie das Filter und die Strukturen der Chromosphäre verblassen im zunehmendem Lichtuntergrund der Photosphäre.

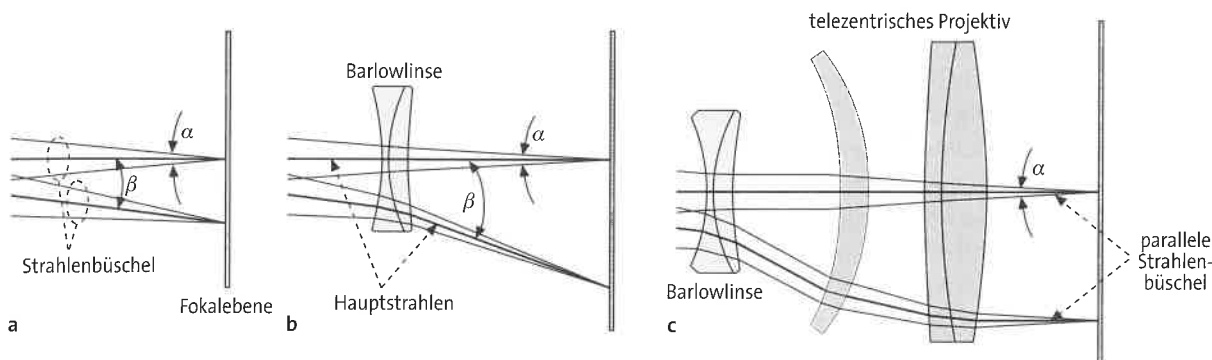
Anders als der Öffnungswinkel α hängt der Winkel β zwischen den Hauptstrahlen der einzelnen Strahlenbündel erheblich von der Art des Objektivs ab. Bei einem Kompaktobjektiv, dessen Linsenfassung gleichzeitig die Eintrittsblende darstellt (wie es bei den allermeisten Refraktoren der Fall ist) ist er gleich dem Winkelabstand des Objektpunktes von der optischen Achse.

Die einfachste Art, das Öffnungsverhältnis des Teleskops auf den geforderten Wert von $n \leq 30$ zu reduzieren, ist das Abblenden des Objektivs, wobei allerdings auch das Auflösungsvermögen entsprechend abnimmt. Will man dies vermeiden, so muß die Brennweite ent-

sprechend vergrößert werden. Oft werden zu diesem Zweck Barlowlinsen eingesetzt. Daß diese Lösung nicht optimal ist, zeigt Abbildung 20 b: Da das Öffnungsverhältnis sinkt, verkleinert sich auch der Öffnungswinkel α der Strahlbündel entsprechend. Obwohl die Fokalebene weiter nach hinten wandert, wird aber gleichzeitig auch der Winkel β zwischen den Hauptstrahlen größer. Die meisten handelsüblichen $1\frac{1}{4}''$ $2''$ -Barlowlinsen besitzen so kurze Brennweiten, daß die Vergrößerung von β die Verkleinerung von α übertrifft.

Ein Rechenbeispiel soll dies verdeutlichen: Bei einem Refraktor von 100 mm Öffnung und 1000 mm Brennweite, also einem Öffnungsverhältnis von 1:10, beträgt der Öffnungswinkel $\alpha = \pm 2.9^\circ$. Der Abbildungswinkel β des Sonnenrandes relativ zum Sonnenzentrum beträgt im Perihel $\beta = 0.27^\circ$ (maximaler Sonnendurchmesser). Handelsübliche $1\frac{1}{4}''$ $2''$ -Barlowlinsen besitzen eine Brennweite von etwa -66 mm. Eine solche Linse müßte 44 mm vor dem primären Brennpunkt des Teleskops eingesetzt werden, um die geforderte Brennweite von 3 m zu erhalten (Öffnungsverhältnis 1:30). Der Abstand von der Barlowlinse zur Bildebene würde in diesem Fall 132 mm betragen. Der Öffnungswinkel α würde nun, wie oben gefordert, unter 1° liegen, der Winkel β aber würde am Sonnenrand auf 4.2° ansteigen (vergleiche Abbildung 20)!

Obwohl effektiv ein Öffnungsverhältnis von 1:30 erreicht wird, würde die zentrale Wellenlänge von der Bildfeldmitte zum Rand hin stark variieren. Noch drastischer wird dieser Effekt, wenn das



Kippen des Filters zur Abstimmung der zentralen Wellenlänge genutzt wird (wie z.B. beim T-Scanner von Daystar): Der Einfallswinkel würde beim Kippen zur einen Seite hin um den Kippwinkel vergrößert, zur anderen Seite hin verkleinern. Da sich die zentrale Wellenlänge quadratisch mit dem Einfallswinkel ändert (siehe Abbildung 16), kann bei ausreichend großem Kippwinkel nur noch ein streifenförmiger Ausschnitt des Bildfeldes auf die $H\alpha$ -Wellenlänge abgestimmt werden.

Würde man mit einem langbrennweitigen Okular das gesamte Sonnenbild betrachten (der Durchmesser des Sonnenbildes würde etwa 26 mm betragen), so wäre in diesem Fall nur in einem schmalen Streifen der Sonnenoberfläche die Chromosphäre sichtbar, der Rest der Sonnenbildes würde vom Licht der Photosphäre dominiert.

Während der Öffnungswinkel α bei kleinen Bildfeldern nur vom Öffnungsverhältnis des Objektivs abhängt, kann durch geeignete Projektive erreicht werden, daß die Hauptstrahlen der einzelnen Strahlenbüschel für jeden Bildpunkt parallel verlaufen und senkrecht auf die Fokalebene treffen ($\beta = 0^\circ$). Dieser Fall ist in Abbildung 20 c dargestellt. Ein solches optisches System wird *telezentrisch* genannt. Für die Beobachtung mit Interferenzfiltern stellt es das ideale optische System zur Brennweitenverlängerung dar, insbesondere wenn die zentrale Wellenlänge wie beim T-Scanner über die Kippung des Filters abgeglichen wird, da es für jeden Bildpunkt, unabhängig vom Kippwinkel, die gleiche zentrale Wellenlänge garantiert.

Genau diese Forderung erfüllt das telezentrische System von Astro-Physics. Bestehend aus einer 2"-Barlowlinse und einem speziell gerechneten Projektiv wird mit diesem optischen System eine dreifache Verlängerung der Teleskopbrennweite erreicht. Aufgrund der hohen optischen Güte von Projektiv und Barlowlinse bleibt die Abbildungsleistung des Teleskops voll erhalten, denn man beobachtet ja nach wie vor mit der vollen Objektivöffnung. Klemmfassung

mit Spannring und Steckadapter aus massivem, eloxierten Aluminium ermöglichen den Einsatz auch schwerer Kameras. Das telezentrische System kann über eine 2"-Steckhülse an jeden 2"-Okularstutzen angesetzt werden. Der Anschluß des Daystar $H\alpha$ -Filters erfolgt am okularseitigen Ende ebenfalls über einen 2" Steckanschluß.

Der parallele Verlauf der Hauptstrahlen wird dadurch erreicht, daß die Aperturblende des optischen Gesamtsystems (in unserem Fall die Teleskopöffnung) in die objektseitige Brennebene des telezentrischen Projektivs abgebildet wird. Dies geschieht beim telezentrischen Systems von Astro-Physics durch die 2"-Barlowlinse vor dem Projektiv. Die hierdurch erreichte virtuelle Abbildung der Teleskopöffnung verhilft dem System zu einer kurzen, kompakten Bauform. Allerdings kann aufgrund der virtuellen Abbildung das am Objektivrand gestreute Licht nicht durch eine Irisblende eliminiert werden, was die Streulichtanfälligkeit des Systems etwas vergrößert. Daher sollte auf eine gute Schwärzung der Objektivfassung geachtet werden.

Der Vorteil eines telezentrischen Systems macht das folgende Beispiel nochmals deutlich: Soll ein 8"-SC-Teleskop für $H\alpha$ -Beobachtungen eingesetzt werden, so muß ein Wärmeschutzfilter von 63 mm Durchmesser vor das Objektiv gesetzt werden, um das geforderte Öffnungsverhältnis von 1:30 zu erhalten und um vor allem den Fangspiegel vor zu großer Hitze zu schützen (bei einem Wärmeschutzfilter mit voller Öffnung wäre dessen Erwärmung wegen der extrem kurzen Brennweite des Hauptspiegels immer noch zu groß). Die gleiche Öffnung und das gleiche Öffnungsverhältnis wird mit dem Zeiss C-Objektiv C63/840 in Verbindung mit einem geeigneten System erreicht. Es muß nicht groß betont werden, daß aufgrund des hohen Streulichtanteils von aluminisierten Spiegeln und der hervorragenden Abbildungsgüte der Zeiss-Objektive der kleine Refraktor dem eigentlich viel größeren Spiegelteleskop weit überlegen wäre.

Literaturverzeichnis

- [1] W. Baumann: *Protuberanzenaufnahmen*. Sterne und Weltraum **31**, 261 (1992)
- [2] R. Beck, H. Hilbrecht, K. Reinsch, P. Völker: *Handbuch für Sonnenbeobachter*. Veröffentlichung der Vereinigung der Sternfreunde e.V. (1982)
- [3] Bergmann-Schaefer: *Optik – Lehrbuch der Experimentalphysik (Band 3/7. Auflage)*. Walter de Gruyter (1978)
- [4] H. Haferkorn: *Optik*. Verlag Johann Ambrosius Barth (1994)
- [5] P. Hüchel: *Photographie der Granulation von Sonnenflecken-Umbren*. Sterne und Weltraum **19**, 106 (1980)
- [6] A. G. Ingalls: *Amateur Telescope Making (Band 3)*. Willman-Bell, Inc. (1996)
- [7] U. Laux: *Astrooptik*. Verlag Sterne und Weltraum / Taschenbuch Nr.11 (1993)
- [8] T. Neckel: Ein großer Sonnenfleck am 21. 5. 1992 (W. Lille). Sterne und Weltraum **21**, 711/712 (1992)
- [9] G. Nemec: *Das Protuberanzenfernrohr als Hochleistungsinstrument I-IX*. Sterne und Weltraum **10**, 171, 197, 234, 276, 305, 330 (1971) und **11**, 17, 50, 109 (1972)
- [10] W. Paech: *Die rote Sonne*. Baader Planetarium (1992)
- [11] R. Rieker: *Fernrohre und ihre Meister*. VEB Verlag Technik (1990)
- [12] H. Scheffler, H. Elsässer: *Physik der Sterne und der Sonne*. Bibliographisches Institut (1974)
- [13] H. R. Suiter: *Star Testing Astronomical Telescopes*. Willman-Bell, Inc. (1995)
- [14] P. Rucks: *Prüfung astronomischer Optik mit Laserinterferometrie*. Sterne und Weltraum **35**, 860 (1996)
- [15] A. T. Young: *Seeing and Scintillation*. Sky & Telescope **42**, 139 (1971/II)

Zum Bild auf der Rückseite: Immer wieder hatte sich Herr Martin Rietze abends auf die Lauer gelegt, um dieses seltene Phänomen zu fotografieren: Der grüne Blitz ist eine atmosphärische Erscheinung, die meistens über dem Meer beobachtet wird. Wenn sich die Luftschichten in der Atmosphäre in günstiger Weise ausgebildet haben, wird ein Teil des grünen Sonnenlichts unmittelbar nach Sonnenuntergang so zur Erdoberfläche reflektiert, daß für Sekundenbruchteile am Horizont ein grüner Lichtstrahl, der »Grüne Blitz«, sichtbar wird. Diese Aufnahme gelang Herrn Rietze im Dezember 1997 auf der Kanareninsel Gomera. Die Belichtungszeit betrug $\frac{1}{30}$ Sekunden auf Agfa RS 200 Diafilm (Format 6×7). Er verwendete für dieses Bild ein umgebautes Siberia 150 Newton-Teleskop: Statt der parallaktischen Montierung kam ein selbstgebautes Stativ zum Einsatz, das speziell für Aufnahmen im Horizontbereich konstruiert worden war. Der Original-Okularstutzen war durch eine Eigenbau-Kamerahalterung ersetzt worden. Durch Vorschalten einer Astro-Physics 2"-Barlowlinse wurde eine effektive Brennweite von 3 m erreicht. Der optische Aufbau dieses Teleskops erlaubt sogar den Einsatz von Mittelformatkameras. Das Horizontalteleskop von Herrn Rietze ist ein gutes Beispiel für den Ideenreichtum von Amateurastronomen, wenn es darum geht, sich neuen Herausforderungen zu stellen.



– Ein Glückszeichen zum Abschied ! –

Diesen einmalig schönen grünen Strahl hat Herr Rietze im entscheidenden Moment auf Film gebannt. Wer ihn sieht, hat Glück fürderhin. Wir wünschen Ihnen ebenfalls Glück und Freude bei der Beobachtung der Sonne und wir freuen uns, wenn wir Ihnen mit unseren Geräten zur Sonnenbeobachtung weiterhelfen können.