

# Über das optische System des Koronographen 200/3000/4000

Von

Walter Kühn

Mit 5 Bildern und 3 Tabellen im Text

Herrn Dr. A. SONNEFELD zum 75. Geburtstag gewidmet

Erstmalig, im Jahre 1931, gelang es B. LYOT auf dem Pic du Midi die Korona außerhalb einer totalen Sonnenfinsternis zu photographieren. Wie gut sein Instrument optisch durchdacht war, beweist die Tatsache, daß alle Koronographen bis heute den gleichen grundsätzlichen Aufbau besitzen (Bild 1). Das Objektiv, eine Linse günstigster Form hinsichtlich Öffnungsfehler, entwirft ein Bild der Sonne und ihrer Umgebung; dieses Primärbild wird durch ein Umkehrsystem in die Bildebene eines Okulars bzw. auf die photographische Platte abgebildet. Durch eine kegelförmige Zentrallinde in der Bildebene des Objektivs wird das Licht der Sonnenscheibe abgedeckt und zur Seite reflektiert. Das instrumentelle Streulicht, das durch Beugung des Sonnenlichtes am Objektivrand entsteht, wird mit Hilfe der Zwischenabbildung beseitigt. Die Feldlinse, dicht hinter der Primärbildebene, bildet das Objektiv in die Blende ab, die soweit zugezogen wird, daß das genannte Streulicht vollkommen abgefangen wird. Dem in der Erdatmosphäre und im atmosphärischen Dunst entstehenden Streulicht entgeht man weitestgehend, wenn man das Instrument auf hohen Bergen aufstellt und wenn man die Korona im Lichte einer starken Emissionslinie beobachtet.

Als Filter zur Aussonderung eines mehr oder weniger schmalen Wellenlängenbereiches werden im allgemeinen die von B. LYOT und Y. ÖHMAN entwickelten Polarisations-Interferenzfilter verwendet, deren Aufbau hinreichend bekannt sein dürfte. Für die Beobachtung der Protuberanzen und der inneren Korona benutzt man Filter mit Halbwertsbreiten zwischen 20 und 0,5 Å. Ihre wichtigsten Eigenschaften müssen beim Bau eines Koronographen unbedingt berücksichtigt werden. Hier ist zu erwähnen, daß die Wellenlänge maximaler Durchlässigkeit sich mit der Neigung des Lichtstrahles zur Achse des Filters ändert. Zulässig sind höchstens Verschiebungen dieser Wellenlänge von etwa einem Fünftel des Durchlaßbereiches. Außerdem enthalten diese Filter mehrere Polarisationsfolien, die optisch niemals einwandfrei hergestellt werden können, so daß sie stets etwas Streulicht verursachen.

Beide Eigenschaften haben uns veranlaßt, den in Bild 2 dargestellten Aufbau des Umkehrsystemes zu wählen. Das Filter ist, um das Streulicht der Polarisationsfolien möglichst klein zu halten, soweit wie möglich an die Bildebene herangerückt worden. Darüber hinaus verlaufen die Hauptstrahlen im Bildraum telezentrisch. Damit wird erreicht, daß der Strahlenkegel jedes beliebigen Bildpunktes das Filter mit den gleichen Neigungen wie der Strahlenkegel des Achsenpunktes durchsetzt. Das Umkehrsystem besitzt eine Vergrößerung  $\beta' \approx -1,33$ , so daß der größte

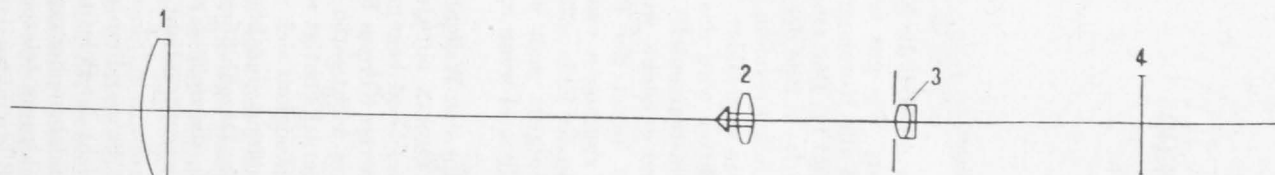


Bild 1. Koronograph nach B. LYOT (Schema des optischen Aufbaues)

1 Objektiv

2 Feldlinse mit Zentralblende

3 Zwischenabbildungssystem mit Irisblende

4 Bildebene

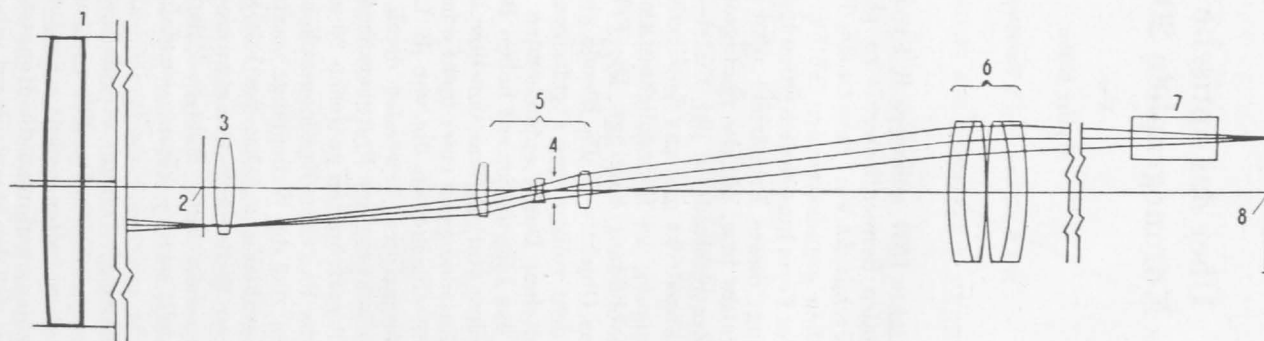


Bild 2. Aufbau des Koronographen 200/3000/4000

1 Objektiv

2 Primärbildebene

3 Feldlinse

4 Aperturblende

5 Vordere Gruppe des Umkehrsystems

6 Hintere Gruppe des Umkehrsystems

7 Filter

8 Bildebene

Winkel, mit dem die Strahlen in das Filter eintreten, etwa  $1^{\circ}26'$  beträgt. Sollte diese Neigung für gewisse spezielle Filter unzulässig groß sein, so kann die Objektivöffnung verringert werden. Das optische System wurde für ein  $65'$  großes Gesichtsfeld gerechnet, dies ergibt einen Bilddurchmesser von etwa 75 mm. Die Filter können zur Zeit jedoch nur bis zu einem Durchmesser von etwa 40 mm gefertigt werden. Aus diesem Grunde werden Okular bzw. Kamera und Filter außeraxial gestellt und um die Systemachse gedreht.

Die wichtigsten Linien für die Beobachtung der Korona liegen im Ultraroten bei 10798 und 10747 Å, im Roten bei 6374 Å und im Grünen bei 5303 Å. Die Protuberanzen werden im Lichte der C-Linie (6563 Å) beobachtet. Darüber hinaus soll der Koronograph zugleich die Untersuchung der Sonne selbst im Lichte der H- und K-Linien bei etwa 3930 Å gestatten. Es bestand also die Aufgabe — und das ist die eigentliche Schwierigkeit — das Umkehrsystem für den gesamten Farbbereich von 10800 bis 3900 Å — wenn auch nur monochromatisch für jede Wellenlänge dieses Bereiches — zu korrigieren. Das optische System besteht aus zwei Gruppen: Die vordere Gruppe mit der Blende ist aus einem Triplet hervorgegangen. Der Ausgangspunkt für die hintere Gruppe war ein Achromat. Zwischen beiden Gruppen verlaufen die Strahlen des Achsenpunktes nahezu achsparallel. Es durften nur Gläser verwendet werden, die im UV gut durchlässig sind. Eine weitere Erschwernis der Aufgabe bedeutet die Tatsache, daß das Objektiv eine Linse günstigster Form ist mit verhältnismäßig großem Öffnungsfehler, der im Umkehrsystem bei sehr kleinem Bündeldurchmesser korrigiert werden muß. Eine Asphäre ist nicht ratsam, da die Gefahr zu groß ist, daß bei der Retusche in der Linsenoberfläche ein kleiner Riß zurückbleibt, der soviel Streulicht hervorruft, daß eine Beobachtung der Korona unmöglich wird.

Betrachten wir zunächst die Ergebnisse der SEIDELschen Durchrechnung des Systems! In Tabelle 1 sind die Flächenkoeffizienten der Bildfehler 3. Ordnung für die Wellenlänge 5461 Å zusammengestellt.  $\nu$  bezeichnet die Flächennummer. Die

Tabelle 1. Flächenkoeffizienten der Bildfehler für die Wellenlänge 546,1 nm

$\nu$	$\frac{h_{\nu}}{h_1}$	$\frac{h_{B\nu}}{h_1}$	$I_{\nu}$	$II_{\nu}$	$III_{av}$	$P_{\nu}$	$V_{\nu}$
1	+1,000	-0,052	+ 2,933	+ 1,652	+ 0,931	+ 0,804	+ 1,0
2	+ 0,995	-0,053	+ 2,013	- 0,995	+ 0,492	+ 0,081	- 0,3
3	-0,002	-0,281	+ 0,003	- 0,033	+ 0,378	+ 6,888	- 83,5
4	-0,004	-0,276	- 0,005	- 0,072	- 1,059	+ 3,523	+ 36,3
5	-0,058	-0,105	+ 3,574	- 6,433	+ 11,580	+ 29,214	- 73,4
6	-0,057	-0,099	+ 0,113	- 1,853	+ 30,479	0,000	- 501,2
7	-0,043	-0,012	- 4,237	+ 17,698	- 73,924	- 48,562	+ 511,6
8	-0,044	-0,010	-12,180	- 25,310	- 52,593	- 35,353	- 182,8
9	-0,073	+ 0,038	+ 4,066	+ 18,088	+ 80,478	- 1,109	+ 353,1
10	-0,077	+ 0,043	+ 5,679	- 2,200	+ 0,852	+ 36,178	- 14,3
11	-0,093	+ 0,352	+ 0,044	+ 0,866	+ 16,887	+ 3,511	+ 397,9
12	-0,093	+ 0,357	- 1,090	- 14,796	- 200,883	- 8,736	- 2845,9
13	-0,093	+ 0,357	+ 1,023	+ 13,877	+ 188,277	+ 7,801	+ 2660,3
14	-0,093	+ 0,367	+ 0,033	- 0,007	+ 0,002	+ 2,335	- 0,5
15	-0,093	+ 0,367	- 0,000	- 0,022	- 1,129	+ 2,335	+ 61,3
16	-0,091	+ 0,370	+ 2,017	+ 15,988	+ 126,756	+ 7,801	+ 1066,8
17	-0,091	+ 0,370	- 2,173	- 17,229	- 136,582	- 8,768	- 1152,3
18	-0,090	+ 0,373	+ 0,248	+ 1,219	+ 5,986	+ 3,529	+ 46,7

Tabelle 2. SEIDELsche Summen der Bildfehler für die Wellenlänge 546,1 nm

	<i>I</i>	<i>II</i>	<i>III<sub>a</sub></i>	<i>P</i>	<i>V</i>
$\sum_{v=1}^2$ (Objektiv)	+ 4,946	+ 0,657	+ 1,423	+ 0,885	+ 0,7
$\sum_{v=3}^4$ (Feldlinse)	— 0,002	— 0,105	— 0,681	+ 10,411	— 47,2
$\sum_{v=5}^{10}$ (vord. Gruppe)	— 2,985	— 0,010	— 3,128	— 19,632	+ 93,0
$\sum_{v=11}^{16}$ (hint. Gruppe)	+ 0,102	— 0,104	— 0,686	+ 9,808	+ 234,3
$\sum_{v=1}^{16}$ (Gesamtsystem)	+ 2,061	+ 0,438	— 3,072	+ 1,472	+ 280,8

zweite Spalte enthält das Verhältnis der Durchstoßhöhe  $h_v$  des Aperturrandstrahls an der  $v$ . Fläche zur Durchstoßhöhe  $h_1$  an der 1. Fläche. Aus der dritten Spalte ersieht man in gleicher Weise die Durchstoßhöhen  $h_{Bv}$  des Randhauptstrahles. Die weiteren Spalten enthalten nacheinander die auf die Brennweite  $f' = -1$  bezogenen Flächenkoeffizienten für Öffnungsfehler (*I*), Asymmetriefehler (*II*), Zweischalenfehler (*III<sub>a</sub>*), Petzvalkrümmung (*P*) und Verzeichnung (*V*). Neben den Beiträgen der einzelnen Flächen zu den Bildfehlern interessieren vor allem auch die der einzelnen Teile des optischen Systems. Zu diesem Zweck sind in Tabelle 2 die SEIDELschen Summen des Objektivs, der Feldlinse und der vorderen bzw. hinteren Gruppe des Umkehrsystems aus den Flächenkoeffizienten der Tabelle 1 gebildet worden. Die letzte Reihe enthält dann die SEIDELschen Summen des gesamten Systems. Zum Öffnungsfehler ist zu sagen, daß die vordere Gruppe praktisch allein die Unterkorrektur des Objektivs vermindert. Nach Tabelle 1 liefert die Negativlinse dieser Gruppe die einzigen wesentlich negativen Werte. Der Asymmetriefehler ist in erster Linie durch den Beitrag des Objektivs bestimmt. Die Petzvalsumme der Feldlinse und der hinteren Gruppe sind sehr stark positiv, wogegen die Negativlinse der vorderen Gruppe den zur Korrektur notwendigen negativen Anteil liefert. Die großen Werte für die Verzeichnung bringt insbesondere die hintere Gruppe des Umkehrsystems. Aus Tabelle 3 sind schließlich die SEIDELschen Summen des gesamten Systems für verschiedene Wellenlängen zu ersehen; ergänzend sind hier  $\Sigma III$  und  $\Sigma IV$  für die meridionale bzw. sagittale Bildfeldwölbung aufgenommen worden.

Tabelle 3. SEIDELsche Summen für verschiedene Wellenlängen

$\lambda$ [nm]	$\Sigma I$	$\Sigma II$	$\Sigma III_a$	$\Sigma P$	$\Sigma III$	$\Sigma IV$	$\Sigma V$
1014,0	+ 2,222	+ 1,703	— 3,366	+ 2,306	— 7,792	— 1,060	+ 320,4
656,3	+ 2,128	+ 0,902	— 3,294	+ 1,867	— 8,015	— 1,427	+ 296,6
546,1	+ 2,061	+ 0,438	— 3,072	+ 1,472	— 7,744	— 1,600	+ 280,8
393,4	+ 1,832	— 0,847	— 1,632	+ 0,014	— 4,882	— 1,618	+ 232,6
365,0	+ 1,743	— 1,221	— 0,957	— 0,595	— 3,466	— 1,552	+ 215,3

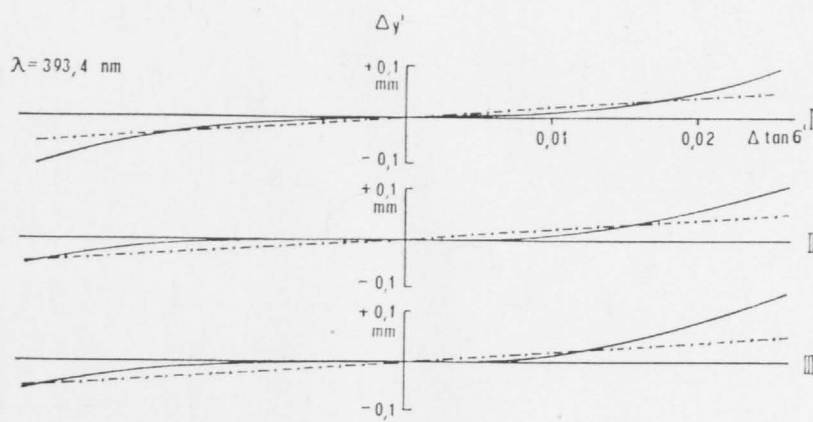
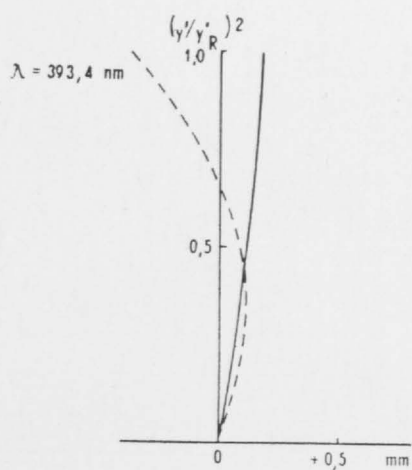
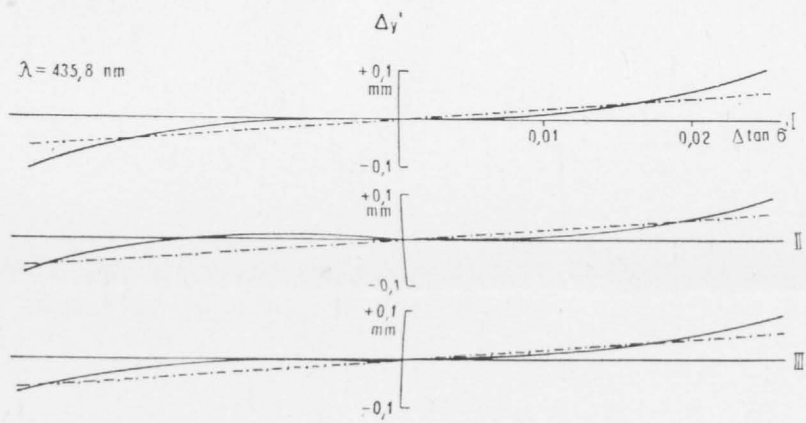
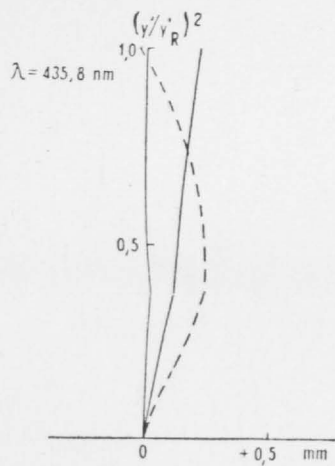
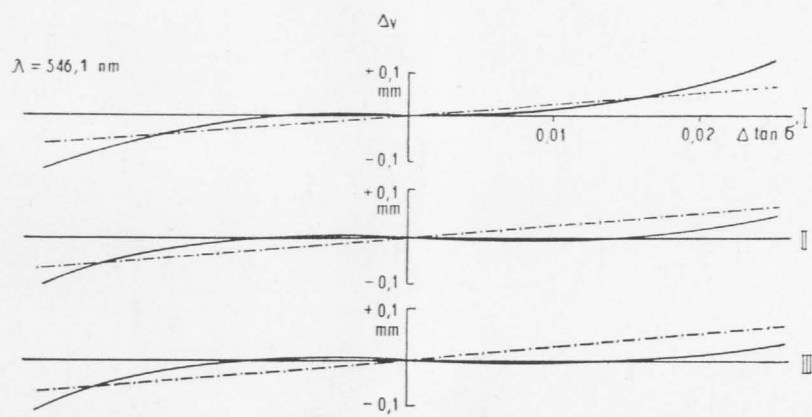
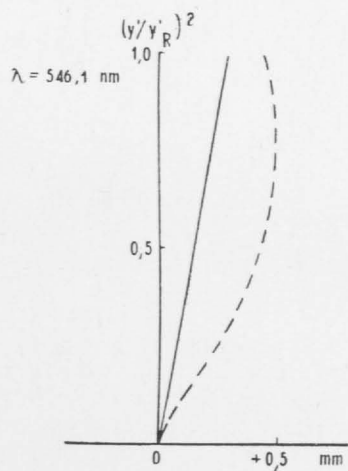
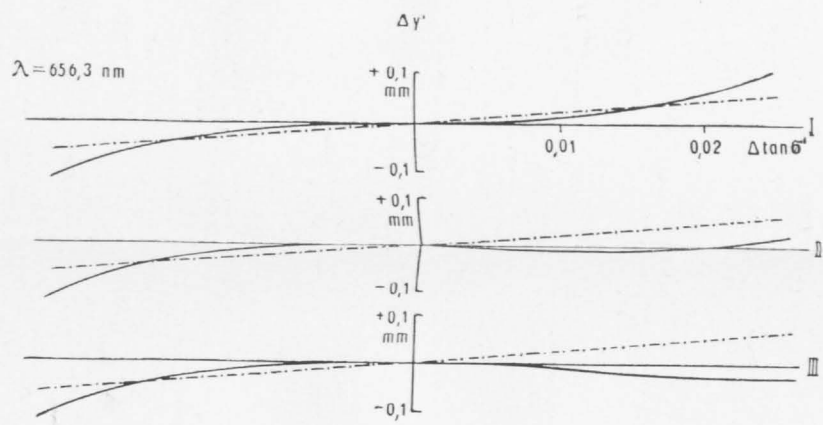
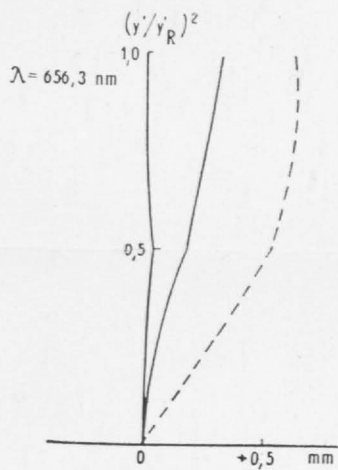
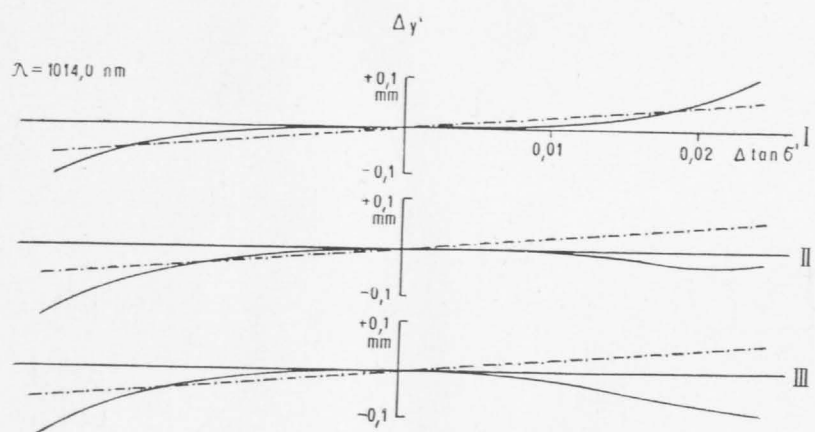
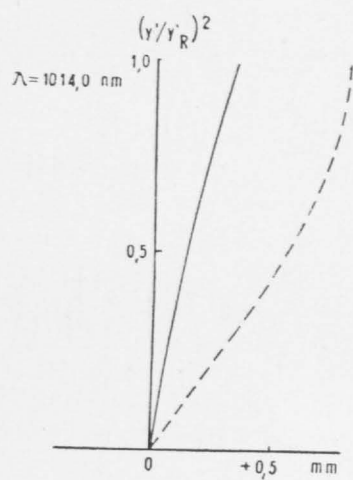


Bild 3

Bild 4

Bild 3. Meridionale und sagittale Bildfeldwölbung  $b'_m$  bzw.  $b'_s$  in Abhängigkeit vom Quadrat des Verhältnisses der jeweiligen Bildhöhe  $y'$  zur Bildhöhe  $y_R$  des Feldrandes

$b'_m$  —————  $b'_s$  - - - - -

Bild 4. Querabweichung  $\Delta y'$  in Abhängigkeit von  $\Delta \tan \sigma'$  für den Achsenpunkt (I  $\sigma = 0'$ ), die Feldzone (II  $\sigma = -23', 0$ ) und den Feldrand (III  $\sigma' = -32', 3$ ). Die eingezeichneten Geraden bedeuten die günstigste Einstellebene

Welche Bildfehler in Wirklichkeit vorliegen, zeigt die trigonometrische Durchrechnung des Systems. In Bild 3 sind die meridionale und die sagittale Bildfeldwölbung in Abhängigkeit von  $\left(\frac{y'}{y_R}\right)^2$  dargestellt;  $y'$  ist die jeweilige Bildhöhe,  $y_R$  ist die Bildhöhe des Feldrandes. In Bild 4 sind die Queraberrationen  $\Delta y'$  in der GAUSSschen Bildebene für den Achsenpunkt, die Bildfeldzone und den Bildfeldrand über  $\Delta \tan \sigma'$  aufgetragen. Die Abstände der Kurven von den strichpunktierten Geraden ergeben die Querfehler, wenn auf den wellentheoretisch günstigsten Achsfokus der einzelnen Farben eingestellt wird.

Als Maß für die erreichte Bildgüte möge hier die Definitionshelligkeit in der folgenden Form gelten, bei der Fehler höherer als dritter Ordnung wegen ihres geringen Einflusses vernachlässigt sind:<sup>1)</sup>

$$D. I. = \left\{ 1 - 0,1 \left[ \left( \frac{\text{Öffnungsfehler}}{T_1} \right)^2 + \left( \frac{\text{Zweischalenfehler}}{T_2} \right)^2 + \left( \frac{\text{Mittlere Bildfeldwölbung}}{T_3} \right)^2 + \left( \frac{\text{Asymmetriefehler}}{T_4} \right)^2 \right] \right\}^2.$$

$T_1 \dots T_4$  sind die zugehörigen Toleranzen für 80 % Definitionshelligkeit. Es gilt

$$T_1 = \frac{4\lambda}{\sin^2 \sigma_R'}$$

$$T_2 = \frac{0,7\lambda}{\sin^2 \sigma_R'}$$

$$T_3 = \frac{0,5\lambda}{\sin^2 \sigma_R'}$$

$$T_4 = \frac{1,83\lambda}{\sin \sigma_R'}.$$

Öffnungsfehler, Zweischalenfehler und mittlere Bildfeldwölbung sind als Längsaberrationen, der Asymmetriefehler ist als Queraberration einzusetzen. Selbstverständlich ist die Beurteilung der Bildfehler mit Hilfe der Definitionshelligkeit nicht im gesamten Wellenlängenbereich zweckmäßig. Am langwelligen Ende ist das Beugungsscheibchen 0,053 mm groß, am kurzwelligen Ende dagegen nur 0,018 mm. Es wäre also richtiger, im kurzwelligen Bereich die Bildgüte nach den Queraberrationen im Vergleich zur Auflösungsgrenze der Photoschicht zu bewerten.

Bild 5 zeigt den Verlauf der Definitionshelligkeit nach obiger Formel in Abhängigkeit von der reziproken Wellenlänge für Achsenpunkt, Feldzone und Feldrand. Es wurde nur der Bereich von 1014 nm bis 393 nm berücksichtigt. Man erkennt, daß die Definitionshelligkeit für den Achsenpunkt von 98 % im Langwelligen bis auf 88 % im Kurzwelligen fast gleichmäßig abfällt. Die Definitionshelligkeit der Feldzone beträgt mindestens 75 %, die des Feldrandes sinkt erst im Kurzwelligen — von etwa 405 nm ab — unter 70 %, eine Folge des verhältnismäßig großen Zweischalenfehlers. Dies ist aber von geringerer Bedeutung, da, wie schon oben erläutert, die Auflösung der Photoschicht hier begrenzend wirkt. All dies gilt für den Fall, daß die Bildebene durch den günstigsten Achsfokus der

1) Siehe z. B.: Hdb. d. Phys. Bd. XXIV Grundlagen der Optik, herausgegeben von S. FLÜGGE, 1956, S. 159.



jeweiligen Farbe gelegt wird. Man kann annehmen, daß die Definitionshelligkeit für die den verschiedenen Bildausschnitten angepaßte Einstellebene höher ist als oben angegeben. Chromatisch ist das System so korrigiert, daß die Schnittweiten für 1014 und 393 nm nahezu gleich sind, der Durchhang der Farbkurve — 13 mm groß — ist unschädlich, da stets mit sehr kleinem Spektralbereich gearbeitet wird.

Das optische System umfaßt neun freistehende Linsen, was durch die Schwierigkeit der Aufgabe völlig gerechtfertigt ist. Außer Objektiv und Feldlinse ist die gesamte Optik mit T-Belag versehen, um alle gegebenenfalls auftretenden Reflexe, die die Beobachtung von Korona und Protuberanzen stören können, weitestgehend abzuschwächen.

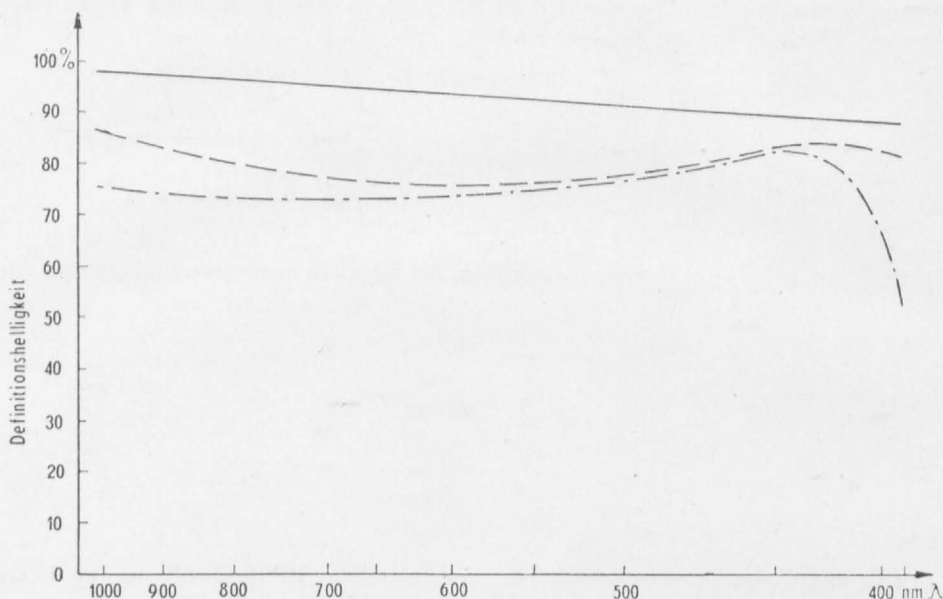


Bild 5. Definitionshelligkeit für Achsenpunkt, Feldlinse und Feldrand in Abhängigkeit von der Wellenlänge

—  $\sigma = 0$       - - -  $\sigma = -23', 0$       - · - · -  $\sigma = -32', 3$

Erste visuelle Beobachtungen von Protuberanzen mit dem Koronographen auf der Lomnitz-Spitze (CSSR) bestätigten völlig die an das Gerät gestellten Erwartungen, sowohl hinsichtlich der Bildgüte als auch hinsichtlich des Fehlens störender Reflexe. Selbst in verhältnismäßig kleinen Protuberanzen, die man in der Zeit der geringen Sonnenaktivität nur vorfindet, konnten feinste Verästelungen in überzeugender Deutlichkeit und Brillanz beobachtet werden. Sie hoben sich dabei in gutem Kontrast ohne Verwischung durch irgendwelches Streulicht vom dunklen Hintergrund ab. Ebenso waren keinerlei Andeutungen von störenden Reflexbildern zu finden. Nach diesen ersten positiven Ergebnissen ist auch zu erwarten, daß die Güte des Gerätes durch die nun folgenden Koronabeobachtungen bestätigt wird.