

Kritik am „Öffnungsdenken“

WOLFRAM FISCHER

Anmerkung der Redaktion: Der Artikel von Herrn Fischer wurde nur unwesentlich verändert und gekürzt. Der Autor behandelt das Problem der fotografischen Grenzreichweite für Sterne in sehr vereinfachter Form. Wie aus der Fachliteratur zu entnehmen ist, unterliegen nicht nur Amateur-astronomen dem von Herrn Fischer kritisierten „Öffnungsdenken“. Jeder fotografisch tätige Astronom sollte deshalb die Formeln (1) und (2) beachten, aus denen sofort auch die Gleichung (3) folgt. An verschiedenen Literaturstellen wird z. B. auf die Beziehung „Grenzreichweite proportional f^2 “ – bei Fischer Gleichung (3) – unter den entsprechenden Randbedingungen hingewiesen [8], [9]. (RZ)

Brennweite und fotografische Grenzgröße

Die Frage nach der, auf fotografischem Wege, maximal erreichbaren Grenzgröße verschiedener Teleskope ist für jeden Himmelfotografen interessant. Es geht um die Helligkeit der schwächsten Sterne, die unter optimalsten Bedingungen, bei maximaler Belichtungszeit und punktscharfer Abbildung gerade noch aus dem chemischen Schleier und der Hintergrundschwärzung eines Negativs hervortreten.

Der Verbreitung eines tieferen Verständnisses der optischen Abbildungsgesetze in der Astrofotografie, die beim Vergleich unterschiedlicher Instrumente dominieren, wurde in der Amateur-Literatur nur wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Eine komplizierte Formel, nach der sich die Grenzgröße, neben Instrumentendaten, aus zahlreichen äußeren Parametern ableitet [1], gibt dem in mathematischen Dingen unversierten Sternfreund schwerlich Anhalt.

In anderen Darstellungen wird das Grenzgrößenproblem, im Hinblick auf den Instrumentenvergleich, entweder elegant „umschifft“, indem zu einigen Objektivöffnungen, bei gleichen Belichtungszeiten, die Grenzgrößen angegeben werden [2], oder es sind zu den Öffnungen die maximalen Grenzgrößen einiger verschiedener Öffnungs-

verhältnisse gegeben [3]. In erster Linie wird also das fotografische Grenzgrößenproblem mit der Teleskopöffnung in Verbindung gebracht. Dies ist durchaus möglich und auch richtig, verkompliziert und verschleiert jedoch den Sachverhalt, machte ihn in seinen Nuancen schwer durchschaubar und wurde, für manchen Amateur, Ursache für Fehleinschätzungen.

Im traditionellen Verständnis resultiert die Abbildungsintensität der Sterne in der Fotografie im wesentlichen aus der Objektivöffnung. Das Bild eines Sterns, das Beugungsscheibchen, besitzt im optisch idealen Fernrohr einen linearen Durchmesser, der durch das Öffnungsverhältnis und die Wellenlänge des Lichtes gegeben ist. Der Einfluß dieser Bildgröße auf die Abbildungsintensität von Sternen (auf der Fotoschicht) liegt aber, im Bereich gängiger Öffnungsverhältnisse, unterhalb einer praktischen Relevanz. Selbst bei einem Öffnungsverhältnis von 1:15 beträgt der lineare Durchmesser von Beugungsscheibchen lediglich 0,018 mm (bei $\lambda = 500$ nm). Lichtstarke Astroobjektive, auch Schmidt-Kameras, erreichen korrekturbedingte keine beugungsbegrenzte Abbildungsschärfe. Sie sind aber so berechnet, daß die Durchmesser der abgebildeten Sternzerstreuungskreise noch unter (oder gleich) der fotografischen Auflösung herkömmlicher Emulsionen liegen. Bei längeren Brennweiten dominiert das Seeing. So ergibt 1" bei $f = 4$ m ein Scheibchen von 0,02 mm.

Die Sternhelligkeiten, Korngröße der Fotoschicht, Diffusion, Belichtungszeit, Entwicklung und seeing sind somit allein für die Abbildungsgröße verantwortlich (selten unter 0,03 mm \varnothing). Der Einfluß der lichtsammelnden Objektivfläche auf die Abbildungsintensität der Sterne ist so gesehen dominierend. Die Abbildungsintensität der Sterne, oft in unmittelbarem Zusammenhang mit der erzielbaren Grenzgröße gesehen, erklärt den Nimbus, der den Begriff der Öffnung bei Instrumentenvergleichen umgibt. Dieser Nimbus ist im Bezug zur fotografischen Grenzgrößenproblematik kurios zu nennen, da bei dem Gedanken an eine vorrangige Bedeutung der Öffnung der simple Umstand ignoriert bleibt, daß sich eine geringere Abbildungsintensität (sprich kleinere Öffnung) prinzipiell durch eine längere Belichtungszeit kompensieren lassen müßte.

Würde der nächtliche Himmel absolut dunkel sein, wäre die maximale Grenzgröße, auch der kleinsten Kamera, unendlich, da man beliebig

lang belichten könnte. Bekanntlich setzt aber die Resthelligkeit des Nachthimmels den Belichtungszeiten eine Grenze, da diese schließlich zu einer Verschleierung des Negativs führt. Die Abbildungsintensität des flächenhaften Restlichtes des Nachthimmels wird durch das Öffnungsverhältnis (n) des Teleskopes ($D/f = n$, f = Brennweite, D = Öffnungsdurchmesser des Teleskopes) bestimmt und ist unabhängig von der Öffnung und damit von der Abbildungsintensität der Sterne. Das Intensitätsverhältnis (I) bei der Abbildung von Flächenhelligkeiten (FH) zweier Objekte verhält sich:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right) FH = \frac{n_1^2}{n_2^2} \quad (1)$$

Das Verhältnis bei der Abbildung von Sternen (Punkthelligkeiten - PH) zweier Objektive verhält sich dagegen:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right) PH = \frac{D_1^2}{D_2^2} \quad (2)$$

Wie sich diese Gesetzmäßigkeiten in extremen Fällen praktisch auswirken, sei an zwei Beispielen dargestellt.

Betrachten wir zwei Optiken:

$\varnothing = 20$ cm, $f = 20$ cm ($n = 1:1$)
 und $\varnothing = 20$ cm, $f = 200$ cm ($n = 1:10$)

Beide Objektive können auf der Fotoschicht Sterne mit gleicher Intensität abbilden, jedoch ist beim Langbrennweitigen die Helligkeit des Nachtlichtes 100fach geringer. Setzen wir den Schwarzschildexponenten (p) des Filmmaterials = 1, wie es bei modernen Astrospzialemulsionen annähernd der Fall ist, könnte das Objektiv 20/200 cm (bei gleicher Abbildungsintensität bei Punkthelligkeiten) 100 mal länger belichten. Die lichtstärkere Optik würde auf ORWO ZU 21 bereits nach 3,5 min die maximale Grenzgröße 14^m7 erreichen. Mit der Optik 20/200 cm wären hingegen 5,5 h Belichtung möglich. Daraus resultierte ein Reichweitengewinn von 5 Größenklassen, Grenzgröße 19^m7 (diese Angaben seien erst einmal in den Raum gestellt). Das sind schwächere Sterne als die 50/70 cm Schmidt-Kamera der Sternwarte Sonneberg abbildet. Ja, das 20 cm Objektiv bliebe in der Grenzgröße nur 1,5 Größenklassen hinter dem Tautenburger Schmidt-Spiegel zurück und dieser hat bekanntlich 1,34 m Öffnung.

Als zweites Beispiel betrachten wir Optiken gleicher Brennweite, jedoch unterschiedlicher Apertur. Wir wählen die Abmessungen 50/100 cm ($n = 1:2$) und 10/100 cm ($n = 1:10$). Vom gewohnten „Öffnungsdenken“ ausgehend, ist man geneigt, der 50/100 cm Optik eine viel größere Reichweite zu bescheinigen. In der Tat, würden mit diesen Instrumenten zwei gleichlang belichtete Aufnahmen durchgeführt, hätte die 50 cm Optik, entsprechend dem Objektivflächenverhältnis, die 25fache Reichweite, würde 3,5 Größenklassen schwächere Sterne abbilden. Es geht uns hier natürlich um etwas anderes. Vergleicht man die Öffnungsverhältnisse nach der obigen Formel (1), wird ersichtlich, daß der Intensitätsunterschied bei der Abbildung von Flächenhelligkeiten ebenfalls das 25fache beträgt. Also genau der Betrag, um den das eine Objektiv Sterne heller abbildet, gibt das andere den Himmels Hintergrund schwächer wieder und vermag dadurch den Intensitätsmangel bei Punkthelligkeiten durch Belichtungsverlängerung genau zu kompensieren. Die maximalen Grenzgrößen beider Optiken sind demnach gleich!

Hieraus wird ersichtlich, daß beim speziellen Problem der maximalen fotografischen Grenzgröße die wirksame Objektivöffnung, für sich gesehen, kein vorrangiges Kriterium ist. Für jede Objektivöffnung gibt es, je nach Öffnungsverhältnis, eine Vielzahl von Grenzgrößen und es bedeutet einen zehlfachen Aufwand, auf dieser Grundlage, einen Überblick über die Reichweiten der verschiedenen Instrumententypen und Abmessungen auszuarbeiten. Da dieser nicht vorliegt, ist hier, speziell im Amateurbereich, ein Nährboden für ungenaue Vorstellungen gegeben.

Worauf der Verfasser abzielt, sei an einem letzten Beispiel erklärt. Jedes handelsübliche Fotoobjektiv läßt sich abbilden. Unabhängig davon, wie dies geschieht, stets geht die Verringerung der Abbildungsintensität bei Punkthelligkeiten mit der Verringerung Intensität bei Flächenhelligkeiten konform. Dies bedeutet, wie im zweiten Beispiel, daß durch die mögliche Belichtungsverlängerung ein Objektiv bei jeder Blende die gleiche maximale Grenzgröße behält. Verschiedene Filmempfindlichkeiten schlagen sich ebenso nur im Belichtungsfaktor nieder.

Wir kommen verallgemeinernd zu folgendem Schluß: Die maximal erzielbaren Fixsterngrenzgrößen sind für eine bestimmte Brennweite stets

konstant, egal um welche Objektivöffnung, instrumentelle Lichtverluste oder Filmeempfindlichkeiten es sich handelt! Das Intensitätsverhältnis der maximal zu erreichenden Grenzgrößen zweier Objektive (I_{\max}) verhält sich demnach:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{\max} = \frac{f_1^2}{f_2^2} \quad (3)$$

Diese Betrachtungsweise setzt jedoch eine einheitliche Abbildungsgröße schwächster Sterne voraus. Nur bei kürzeren Brennweiten ist dies mit herkömmlichen hochempfindlichen Emulsionen, Sternabbildungen von 0,03–0,02 mm, annähernd gegeben. Weitere Ausnahmebedingungen sind dem nächsten Abschnitt zu entnehmen.

Differenzierte Lichtbündelungen auf der Fotoschicht und ihre astrofotografische Relevanz

Differenzierte Lichtbündelungen des Sternlichtes resultieren in der Fotografie aus ungenauer Fokussierung und Justierung, Nachführungsmängeln, der Qualität der Optik, dem Öffnungsverhältnis, seing-Einfluß und der Auflösungsfähigkeit der Emulsion. All diese Faktoren wirken auf die erzielbare Fixsterngrenzgröße ein. Der Konzentrationsgrad der Lichtbündelung, bzw. die Größe der vom Sternlicht beleuchteten und zu schwärzenden Emulsionsfläche, kann einen Reichweitengewinn oder eine Einbuße bewirken, da die Abbildungsintensität des flächenhaften Nachtlichtes davon ausgeschlossen bleibt. Aus der Sicht differenzierter Lichtbündelungen wirkt die Brennweite, als Kriterium für den Vergleich maximal erzielbarer Grenzgrößen unterschiedlicher Instrumente, als ein unzuverlässiges Hilfsmittel. Der zutreffendste Schlüsselparameter in der Grenzgrößenproblematik ist die fotografische Auflösung.

Zunächst einmal verbergen nach Formel (3) die Quadrate der Brennweiten im Zahlenverhältnis genau den Faktor, der das fotografische Flächenauflösungsvermögen (A) zweier Optiken unterscheidet. (A) bestimmt sich aus dem Winkeldurchmesser kleinster Sternabbildungen. Über die Kreisflächenformel $A = \pi \cdot r^2$ wird deren Fläche in \square ermittelt. Berechnet man nach Formel (3) beispielsweise das Intensitätsverhältnis der maximal erreichbaren Grenzgrößen zweier Optiken mit $f = 6,2$ m und $f = 356$ mm, so ergibt sich ein Verhältnis von etwa 1 : 302 (= 6^m2 Grenz-

größendifferenz). Schwächste Sterne, 0,03 mm im Durchmesser, besitzen bei 6,2 m bzw. 356 mm Brennweite 1" $\square = 0,785 \square$ und 17"38 $\square = 237 \square$. 237 : 0,785 = 302

Der Faktor um den sich das fotografische Flächenauflösungsvermögen beider Optiken unterscheidet, entspricht dem Intensitätsverhältnis der maximal erreichbaren Grenzgrößen.

Abweichungen von den für Formel (3) gültigen Randbedingungen, hervorgerufen durch andersgeartete Lichtbündelungen im Bereich der Bildfläche, finden automatischen Niederschlag im Rechenergebnis, wenn wir in die Formel statt der Brennweite den Wert der fotografischen Flächenauflösung (A) in folgender Form einsetzen:

$$\left(\frac{I_1}{I_2}\right)_{\max} = \frac{A_1}{A_2} \quad (4)$$

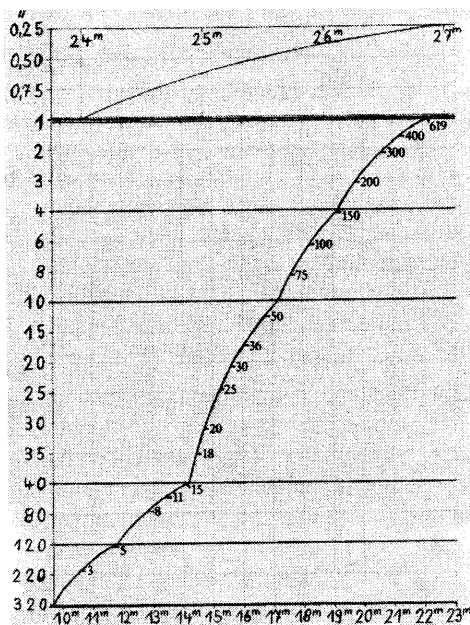
Obwohl die maximal erzielbaren Grenzgrößen im wesentlichen dem kausalen Wechselspiel von Öffnung, Öffnungsverhältnis und Hintergrundhelligkeit entspringen, was sich im Instrumentenvergleich auf das einheitliche Unterscheidungsmerkmal „Brennweite“ reduzieren läßt, impliziert Formel (4) zusätzlich den Einfluß differenzierter Lichtbündelungen. Der Grenzgrößenvergleich fotografischer Systeme (konkrete Kamera-Film-Kombinationen) läßt sich demnach direkt und unabhängig von der Brennweite aus der fotografischen Auflösung ableiten.

Hieraus können folgende Schlüsse gezogen werden:

1. Normalerweise gelingt es kaum, die durch die Luftunruhe bedingte fotografische Auflösungsgrenze von 1" zu unterschreiten. Bei einer Brennweite von etwa 6,2 m beträgt der Abbildungsmaßstab 1" = 0,03 mm. Die durch die Beobachtungsbedingungen gesetzte Auflösungsgrenze und die Auflösung herkömmlicher Astroemulsionen fallen hier gerade zusammen. Für die erdgebundene Astronomie stellt diese Brennweite, in Bezug auf die Auflösung und die erzielbare Grenzgröße bei Sternfeldaufnahmen, ein Optimum dar. Noch längere Brennweiten, für astrometrische Messungen günstig, bedeuten aber vom Standpunkt fotografischer Detailauflösung eine nutzlose Übervergrößerung des Abbildungsmaßstabes. Beim 6 m-Spiegel mit 24 m Brennweite werden die schwächsten Sterne auch 1" groß, d. h. mit 0,116 mm Durchmesser abgebildet. Gegenüber der Auflösungsgrenze von 0,03 mm Durchmesser muß hier das Licht

schwächster Sterne eine 15fach größere Fläche schwärzen, wodurch eine Reichweitereinbuße von ca. 2,9 Größenklassen eintritt! Sollten nach Formel (3) bei 24 m Brennweite Sterne bis 25^m erreichbar sein, so werden unter mitteleuropäischen Bedingungen (und herkömmlichen Filmen) nach Formel (4) nur 22^m2 erreicht! Der Grenzgrößengewinn wird also durch die Übervergrößerung der Seeingscheibchen völlig eliminiert. Der Nutzen so großer Teleskope liegt nicht in der Sternfeldfotografie sondern in der Spektroskopie.

2. Die Benutzung hochauflösender Filme (gegebenfalls im FAH-Verfahren [4] oder durch Wasserstoffbehandlung [5] hypersensibilisiert) macht es möglich, bei gegebener Abbildungsgüte, Sterne noch erheblich schärfer abzubilden. (Sofern das seeing dies nicht verhindert.) Derartige Aufnahmen „täuschen“ eine viel längere Brennweite in Auflösung und Grenzgröße vor (s. Bild-S. 1). Der Grund ist, die auf den Film auftreffende Lichtmenge der Sterne muß eine viel kleinere Fläche schwärzen, wodurch sich der Schwärzungsvorgang beschleunigt. Gelänge es mit kurzbreitweitigen Teleskopen, mittels superfeinkörniger Astroemulsionen, extrem winzige Sternabbildungen zu erzielen, wäre mit einem spektakulären Grenzgrößengewinn zu rechnen. Theoretisch erzeugt ein 2 m-Spiegel mit $f = 6,2$ m (fotografische Winkelauflösung 1") auf der Fotoschicht die gleiche Abbildungsintensität (mit gleicher Grenzgröße) wie ein 20 cm-Spiegel mit $f = 62$ cm, der ebenfalls eine Winkelauflösung von 1" erreichte! Dieser 20 cm-Spiegel könnte prinzipiell Sterne bis 24^m erreichen, unter mitteleuropäischen Bedingungen mindestens 22^m. Die beugungstheoretische Auflösungsgrenze eines 20 cm-Spiegels liegt bei 0".6. Um fotografisch 1" Auflösung zu erzielen, müßten die schwächsten Sterne 10 mal kleiner (0,003 mm Ø) als bei $f = 6,2$ m wiedergegeben werden. Das bedeutete einen 100fachen Anstieg der Abbildungsintensität, den der 2 m-Spiegel mit der Öffnung leistet. Bedenkt man, daß der gegenwärtige Spitzfilm in der Amateurpraxis (im Bereich der H_α-Fotografie) der hypersensibilisierte Kodak TP 2415, in Technidol entwickelt, 320 Linien/mm Auflösung besitzt, scheint die Erzielbarkeit derartiger winziger Sternabbildungen fast schon im Bereich des Möglichen zu liegen. Ein anderes Problem ist die Frage nach Optiken, die derartige Schärfleistungen erzielen. In Frage kämen hier Parabol-



Abhängigkeit der maximal erzielbaren Fixsterngrenzgrößen (Blauhelligkeiten) von der fotografischen Auflösung. Am linken Rand sind die Winkeldurchmesser schwächster Sternabbildungen in Bogensekunden, unten die Größenklassen gegeben. Der Kurvenverlauf gilt für herkömmliche hochempfindliche Emulsionen und günstige mitteleuropäische Beobachtungsbedingungen. Die Zahlenangaben neben den Kurven bedeuten Objektivbrennweiten in cm und markieren deren Auflösung und Grenzgröße bei kleinsten Sternabbildungen von 0,03 mm Durchmesser. Die obere Kurve gibt Einblick über den Grenzgrößenverlauf, der bei Erzielung von Seeingscheibchen < 1" entstünde.

Voraussetzung dazu ist die Verwendung von Emulsionen mit bestem Signal/Rausch-Verhältnis (bzw. CCD-Kameras) unter idealsten planetaren Bedingungen.

spiegel mit Öffnungsverhältnissen zwischen 1:2,5 und 1:3,5. Das brauchbare Bildfeld wäre allerdings außerordentlich winzig. Die Anforderungen an Justierung und Fokussierung lägen im Bereich von tausendstel Millimetern. Hier besteht wohl in erster Linie eine Herausforderung an den Amateurastronomen. Die Meisterung der den Großteleskopen analogen extrem geringen Nachführungstoleranzen ist ein Hauptproblem.

Aber auch im professionellen Bereich könnte die Frage gestellt werden, ob in Zukunft zum Nachweis schwacher Objekte in jedem Fall der Einsatz der wenigen, ohnehin ausgelasteten Großteleskope unbedingt notwendig sein muß.

Das Diagramm (Seite 45) gibt einen Überblick über den Zusammenhang zwischen fotografischer Auflösung und maximal erzielbaren Fixsterngrößen. Ausgehend von Formel (4) wurden die berechneten Flächenauflösungsverhältnisse in Größenklassen übertragen. Der Ausgangswert basiert, ebenso wie in Tabelle 1, auf praktischer Erfahrung und befindet sich weitgehendst im Einklang mit Angaben anderer Quellen.

Es gelten mehrere Ausnahmebedingungen:

1. Neuere Untersuchungen über den fotografischen Nachweis schwächster Quellen führten zur Anwendung der Signal/Rausch-Theorie auf die fotografische Emulsion. Die ersten auf dieser Grundlage entwickelten extrem feinkörnigen Hochkontrast-Emulsionen waren die IIIa-J und IIIa-F Spektralplatten von Kodak. Diese zeigen unter sonst gleichen Bedingungen bis zu 2 Größenklassen schwächere Sterne als ältere Emulsionen [6]. Es wird dadurch verständlich, wieso vor 20 Jahren noch die Reichweite der größten Teleskope mit $22^m - 23^m$ angegeben wurde. Diese Grenzhelligkeit erreicht heute eine CCD-Kamera hinter einem 40 cm-Spiegel ($n = 1:15,5$). Diese Barriere sprengten die modernen Emulsionen vom Typ der Kodak IIIa-Platten. Seither erreichen Riesenspiegel (und nicht nur der 6 m-Spiegel) die natürliche Grenze erdgebundener Fotografie. Diese liegt bei etwa 24 Größenklassen. Genau diese Helligkeit ($24^m/\square''$) weist unter idealen Bedingungen der Himmelshintergrund auf. Diese Grenze ist deshalb auch durch den Bau noch größerer Teleskope nicht zu überwinden. Es sei denn, die fotografische Winkelauflösung ließe sich noch irgendwie steigern. Dies gelang erstmals mit dem NTT des ESO in La Silla dank extremer Abbildungsschärfe und atmosphärischer Superlativbedingungen. Hier wurden Seeingscheibchen von $0,33''$ erreicht [7], was einer erzielbaren Grenzgröße (nach Diagramm 1) von $26,4$ gleichkommt.

2. Beim Einsatz von Öffnungsverhältnissen $> 1:1$ werden die im Diagramm 1 zugeordneten Grenzhelligkeiten nicht erreicht. Flächenhelligkeiten kommen mit größerer Intensität zur Abbildung als Punkthelligkeiten, wodurch Aufnah-

men „vorzeitig“ verschleiern. Kurioserweise ist hier in gewissem Sinne die „Größe der Öffnung“ sogar Ursache einer geringeren Fixsterngrößen.

Der Reichweitenverlust gegenüber Diagramm 1 beträgt:

n	m	n	m	n	m
1:0,9	= 0,2	1:0,7	= 0,8	1:0,5	= 1,5
1:0,8	= 0,5	1:0,6	= 1,1		

3. Weitere Ausnahmebedingungen sind durch unterschiedliche atmosphärische Transmissionen und Fremdlichtbelastungen gegeben. So werden z. B. unter den Beobachtungsbedingungen hier zu Lande bei Seeingscheibchen von $1''$ kaum die zu erwartenden hohen Grenzgrößenwerte erreicht, da ruhige Luft oft mit dunstigem Hochdruckhimmel gepaart ist.

4. Auch entwicklungsbedingte fotografische Effekte nehmen Einfluß auf den Kurvenverlauf im Diagramm.

Warnung

Allen Sternfreunden, denen dieser Beitrag „Wasser auf die Mühlen ihrer langbrennweitigen Träume“ ist, sei gesagt, daß es hier um eine vereinfachte Beschreibung eines theoretischen Sachverhaltes ging. Die praktische Ausführbarkeit maximal belichteter Himmelsaufnahmen ist entscheidend mit großen Öffnungsverhältnissen und großen Öffnungen verknüpft. Auch wenn prinzipiell ein 40 cm-Spiegel die Grenzgröße des 6 m-Spiegels aufweisen kann, bleibt die praktisch fotografische Realisierung dieser Grenzgröße im

Tabelle 1: Maximale Belichtungszeiten zweier Filmmaterialien, in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis (n). Gültig für günstige mitteleuropäische Beobachtungsbedingungen.

ORWO NP 27		ORWO ZU 21
n	$p \approx 0,75$	$p \approx 1$
1: 1	= 3,7 min	3,5 min
1: 1,5	= 11 min	7,5 min
1: 2	= 24 min	13,5 min
1: 2,8	= 58 min	26 min
1: 3,5	= 1 h 45 min	41 min
1: 4,5	= 3 h 25 min	1 h 10 min
1: 5	= 4 h 30 min	1 h 25 min
1: 5,6	= 6 h 10 min	1 h 45 min
1: 6	= 7 h 20 min	2 h --
1: 7	= 11 h 5 min	2 h 45 min
1: 8	= 15 h 50 min	3 h 35 min
1: 10	= 28 h 45 min	5 h 30 min
1: 15	= 84 h 45 min	12 h 30 min
1: 20	= 182,5 h	22 h 15 min

wesentlichen den Riesenteleskopen vorbehalten. Besonders in der Nebelfotografie kommt es auf die Ausbelichtung der Aufnahmen an, was bei Öffnungsverhältnissen $< 1:6$, selbst mit den empfindlichsten Filmen, zu einem zeitraubenden mühseligen Unterfangen wird. Hinzu kommen extreme Anforderungen an die Nachführungsge nauigkeit, die lange Brennweiten, besonders für den Amateur, nur schwer beherrschbar machen. Wer die Grenzen des Machbaren in der Nebelfotografie erstrebt, mittels strenger Filter die Hel ligkeit des Himmelshintergrundes herabzusetzen gedenkt, benötigt extrem große Öffnungsver hältnisse (möglichst $> 1:2$) und muß selbst dann unter Umständen lange Belichtungszeiten in Kauf nehmen. Hier wachsen für lichtschwächere Objektive die Belichtungszeiten schnell ins „Un- ermeßliche“.

Wie die Realisierbarkeit maximal belichteter Himmelsaufnahmen vom Öffnungsverhältnis und dem Filmmaterial abhängen, zeigt Tabelle 1. Die Gegenüberstellung der beiden Materialien macht die Bedeutung des Schwarzschildexponen- ten (p) deutlich. Die Belichtungswerte für OR- WO NP 27 basieren auf einem Erfahrungswert des Verfassers. Von diesem ausgehend wurde die Tabelle nach folgender Formel berechnet:

Verhältnis der Belichtungs-
zeiten (t) zweier Öffnungs-
verhältnisse (unter Berück-
sichtigung des Schwarz-
schildexponenten)

$$\frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{n_1}{n_2} \right)^{\frac{2}{p}} \quad (5)$$

Der Ausgangswert für die Angaben zur ORWO ZU 21-Platte stammt von Dr. Börngen (Tauten- burg).

Literatur: [1] Paul Ahnert, „Kalender für Sternfreunde“ 1981: S. 140, Johann Ambrosius Barth, Leipzig. – [2] „Brockhaus abc Astronomie“; VEB Brockhaus Verlag Leipzig, 1976, S. 108. – [3] „Astroamateur“, Schriften der Schweizerischen Astronomi- schen Gesellschaft, 1962, S. 95. – [4] W. Högner, Zur Optimie- rung astronomischer Photogramme durch das FAH-Verfahren; „Die Sterne“ 1971/4. – [5] Staettemeyer, Gashypersensibilisie- rung von Filmmaterial, „Sterne und Weltraum“ 1982/12. – [6] Roger Leifert und Thomas Mihatsch, der Kodachrome 64 als Astrofilm für die Langzeitfotografie, „Sterne und Welt- raum“ 1988/1, S. 42. – [7] J. Gürtler und J. Dorschner, Erste Aufnahmen mit dem New Technology Teleskope der ESO: Er- wartungen der Astronomen voll erfüllt. „Die Sterne“ 1989/5. – [8] W. A. Baum, The detection and measurement of faint astro- nomical sources; Astronomical Techniques, S. 10, The University of Chicago press, 1960. – [9] B. D. Wallis and R. W. Provin, A manual of advanced celestial photography; S. 98, Cambridge University press, 1988.