

Wie funktionieren Achromat und Apochromat?

Teil 2: Vom Achromaten zum Apochromaten

VON VOLKER WITT

Nachdem in Teil 1 (SuW 10/2005, S. 72) die Entwicklung von der Einzellinse zum Achromaten beschrieben wurde, folgt nun der nächste Schritt, der zum hochwertig korrigierten Apochromaten führt.

Um den Farbfehler eines zweilinsigen Objektivs so gut wie möglich zu beheben, fanden wir in Teil 1 dieses Artikels die Achromasiebedingung, derzufolge die Brennweiten des Systems für zwei Wellenlängen (blaues und rotes Licht) gleich sein müssen. Ein solches System, das auch Dichromat genannt wird, besitzt dann für grünes Licht eine geringfügig kürzere Brennweite. Die Differenz ist das sekundäre Spektrum, das für den noch vorhandenen Farblängsfehler verantwortlich ist.

Der Achromat besteht also in der Regel aus einer Sammellinse mit großer Abbe-Zahl und einer hochbrechenden Zerstreuungslinse mit niedriger Abbe-Zahl.

Das sekundäre Spektrum

Die Güte eines Achromaten hängt unter anderem von der Größe des sekundären Spektrums ab. Ein Maß dafür ist die Abweichung der Farbfehlerkurve von der (idealen) Null-Linie zwischen den Farben Blau und Rot. Diese Abweichung beträgt etwa $\frac{1}{2000}$ der Brennweite, und sie lässt sich bei Verwendung üblicher Glassorten (Kron- bzw. Flintglas) nicht verringern. Um zu einer besseren Farbkorrektur zu gelangen, muss das sekundäre Spektrum unter Einsatz spezieller Gläser vermindert werden.

Eine wichtige Größe ist in diesem Zusammenhang die relative Teildispersion ϑ_e (sprich »theta-e«) einer Glasart:

$$\vartheta_e = \frac{n_{F'} - n_e}{n_{F'} - n_{C'}} \quad (1)$$

Damit wird die Dispersion zwischen der F'-Linie (480.0 nm, blau) und der e-Linie (546.1 nm, grün) relativ zur Grunddispersion $n_{F'} - n_{C'}$ bezeichnet. Trägt man die relative Teildispersion ϑ_e der Gläser über

der Abbeschen Zahl ν auf, so erhält man das ϑ - ν -Diagramm der Abb. 1.

In charakteristischer Weise liegen die Gläser (mit Ausnahme der mit »KzF« bezeichneten) auf oder nahe an der eingezeichneten Geraden, der sogenannten Normalgeraden. Das bedeutet, dass bei den meisten (»normalen«) Gläsern die relative Teildispersion eine lineare Funktion der Abbeschen Zahl ist, was man als normale Dispersion bezeichnet.

Die Größe »relative Teildispersion« ermöglicht uns nun, das sekundäre Spektrum zu berechnen. In den Lehrbüchern der Optik findet man für den Farbrestfehler

$$\Delta f = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\nu_1 - \nu_2} \quad (1)$$

Der Quotient auf der rechten Seite dieser Gleichung ist aber nichts anderes als der Steigungsfaktor m der Normalgeraden im Diagramm der Abb. 1. Er gibt den Farblängsfehler als Bruchteil der Brennweite an. Somit erhalten wir für das sekundäre Spektrum

$$\Delta f = -mf.$$

Aus der Abb. 1 entnimmt man als Steigung der Geraden $m = -0.0005$, das heißt wie oben beschrieben ist $\Delta f = \int_{2000}$. Ein Achromat mit 1000 Millimeter Brennweite hat also in typischer Weise ein sekundäres Spektrum von 0.5 Millimeter. Dieser Wert lässt sich auch durch beliebige Kombinationen von Glasarten nicht verringern, solange beide Gläser auf der Normalgeraden liegen, also normale Dispersion besitzen.

Wenn es durch Verwendung besonderer Gläser gelingt, das sekundäre Spektrum zu verringern, so spricht man von

einem Apochromaten. Grundsätzlich gelten dafür die gleichen Verhältnisse, wie wir sie schon beim Achromaten angetroffen haben.

Gläser mit anomaler Dispersion

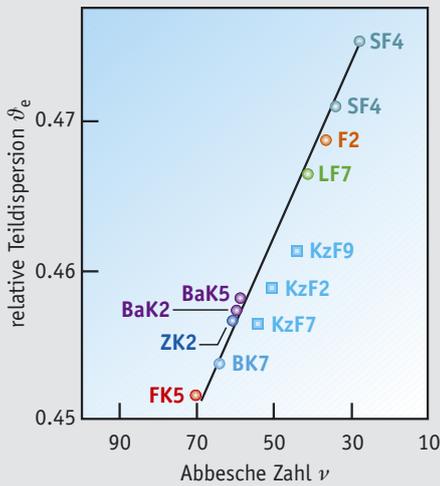
Die Gleichung (2) lehrt uns, welche Eigenschaften die Gläser haben müssten, um das sekundäre Spektrum zu vermindern:

Die Differenz $\vartheta_1 - \vartheta_2$ der relativen Teildispersionen der beiden Glasarten sollte möglichst klein sein. Die Differenz $\nu_1 - \nu_2$ der Abbeschen Zahlen sollte gleichzeitig möglichst groß sein.

Es ist klar, dass diese Forderungen nur durch Kombination von Gläsern erfüllt werden können, von denen mindestens eines nicht auf der Normalgeraden von Abb. 1 liegt. Solche Medien haben eine anomale Teildispersion.

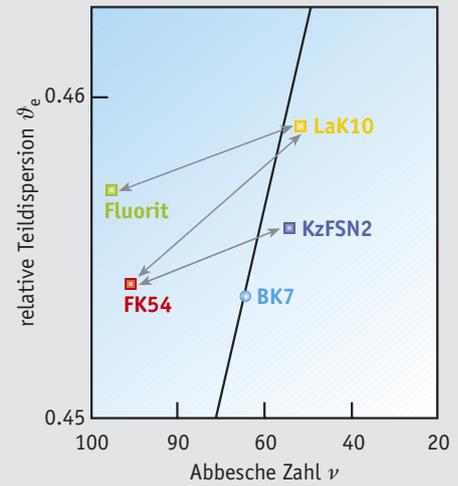
Aus der Zusammenarbeit zwischen Otto Schott (1851–1935) und Ernst Abbe (1840–1905) entstanden etwa ab dem Jahre 1886 für größere Fernrohrobjektive die ersten Sondergläser mit anomaler Teildispersion, so genannte Kurzflinte, welche bis zu 20 Prozent Antimonoxid (Sb_2O_3) enthalten und damit die Dispersion im Blauen erheblich »verkürzen«, sich also dort eher wie normales Kronglas verhalten. In der Abb. 1 sind einige der Kurzflinte (Bezeichnung »KzF«) rechts von der Normalgeraden zu finden. Besonders häufig wurde das Kurzflintglas des Typs KzF2 verwendet, beispielsweise bei dem legendären AS-Objektiv (»Astrospezialobjektiv«), welches 1926 von dem Zeiss-Mitarbeiter August Sonnefeld aus dem klassischen A-Objektiv entwickelt wurde. Es besitzt als Dichromat gegenüber dem Fraunhofer-Achromat ein deutlich vermindertes sekundäres Spektrum und wird deswegen häufig als Halb-Apochromat bezeichnet.

Schon zum Ende des 19. Jahrhunderts hatte man herausgefunden, dass sich das in der Natur als Kristall vorkommende Calciumfluorid CaF_2 (Fluorit bzw. Fluss-



◀ Abb. 1: Relative Teildispersion ϑ_e in Abhängigkeit von der Abbeschen Zahl ν .

▶ Abb. 2: Wegen ihrer geringen Dispersion eignen sich Fluorit ($\nu = 95.6$; $\vartheta_e = 0.4571$) oder ein ED-Glas wie FK54 ($\nu = 90.9$; $\vartheta_e = 0.4544$) in Kombination mit einem Glastype auf oder nahe an der Normalgeraden hervorragend zur Konstruktion apochromatischer Objektive.



spat) wegen seiner geringen Dispersion hervorragend zur Farbkorrektur bei Mikroskopobjektiven eignet. Diese Objektive (Ernst Abbe) waren als echte Apochromate anzusehen, aber die kleinen Dimensionen der damals in der Natur verfügbaren Kristalle erlaubten nicht die Herstellung größerer Teleskopobjektive. Erst um das Jahr 1950 gelang es, Fluorit-Kristalle künstlich aus der Schmelze zu ziehen (D. Stockbarger, MIT). Das Verfahren wird heute sehr gut beherrscht und liefert ausreichend große Kristalle für Fernrohrobjektive, allerdings ist das Material relativ empfindlich und wegen seiner geringen Härte etwas schwieriger zu verarbeiten als »normale« Gläser.

Inzwischen hatte man aber auch gelernt, Kronglas durch Zusätze von Fluorverbindungen in seinen optischen Eigenschaften so weit zu verändern, dass diese dem Fluorit ähnlich sind. Diese Fluorkrongläser (Fluorkrone genannt) sind je nach Hersteller unter verschiedenen Bezeichnungen erhältlich wie FK 54 (Schott), FCD 10 (Hoya) oder FPL 53 (Ohara).

Die herausragende Bedeutung von Flussspat und den Fluorkronen für die Farbkorrektur liegt in ihrer extrem geringen Dispersion begründet. Bei einer Abbeschen Zahl von etwa 90 liegen die Fluorkrone sehr weit links der Normalgeraden in Abb. 1. In Verbindung mit einem »üblichen« Kronglas lässt sich somit eine große Differenz der Abbeschen Zahlen erreichen und die zweite der oben genannten Forderungen erfüllen. Die Fluorkrongläser sind chemisch relativ stabil und sie lassen sich – da sie keine Kristalle, sondern echte Gläser sind – leichter als Flussspat verarbeiten. Aufgrund ihrer geringen Dispersion werden die Fluorkrone auch als ED-Gläser bezeichnet (»Extra-Low Dispersion«). Verschwiegen sei aber nicht der hohe Preis dieses Materials, der etwa beim Zwanzigfachen von Borkron BK7 liegt. Wenn man einen Rohling aus BK7-Glas von 6 Zoll (ca. 150 mm) Durch-

messer mit etwa 100 Euro ansetzt, dann ist es zu verstehen, warum ED- oder gar Fluorit-Apochromate so teuer sind.

Zweilinsige Apochromate

Wenn wir einen Apochromaten vorerst nur als Dichromaten mit verringertem sekundärem Spektrum verstehen, dann bilden Flussspat oder die Fluorkrongläser bestens geeignete Ausgangsmaterialien, um Objektive mit hervorragender Farbfehlerkorrektur zu konstruieren. Die Abb. 2 zeigt einen Ausschnitt der Abb. 1 und demonstriert die besondere Stellung, welche die genannten Linsenmaterialien im Diagramm der Teildispersion einnehmen.

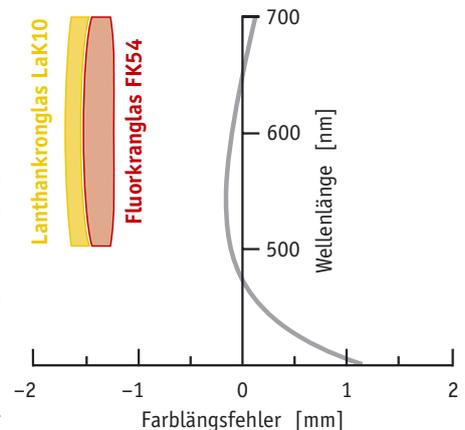
Kombiniert man eines dieser beiden Linsenmaterialien beispielsweise mit dem häufig verwendeten Lanthankronglas LaK10 ($\nu = 50.7$; $\vartheta_e = 0.4594$) zu einem Dichromaten, so beträgt der Farblängsfehler nach Gleichung (2) nur mehr $f/18000$ (bei FK54) beziehungsweise $f/20000$ (bei Fluorit). Man gewinnt also einen Faktor vier bis zehn gegenüber dem gewöhnlichen Achromaten.

Die Rollenverteilung der beiden »Gläser« ist dabei ähnlich wie beim Achromaten. Die Fluorit- oder ED-Linse ist sammelnd und entspricht der Kronglaslinse des Achromaten, während die zweite Linse zerstreuend wirkt und die Rolle der Flintglaslinse übernimmt, obwohl sie häufig aus einem Kronglastyp besteht. Allerdings entspricht der Aufbau solcher Objektive meist der Anordnung nach Steinheil, wo die (weniger empfindliche) Zerstreulinse die Frontlinse ist, während die empfindlichere Fluorit- oder Fluorkronlinse nach außen geschützt dahinter liegt. Die Farbfehlerkurve eines solchen Objektivs zeigt die Abb. 3.

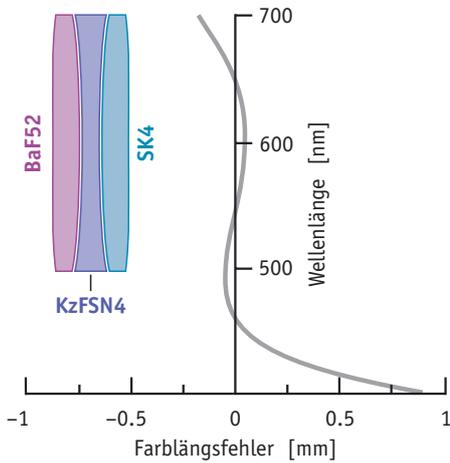
Da der Farbfehler für nur zwei Wellenlängen exakt null ist, hat die Kurve den typisch C-förmigen Verlauf wie beim Achromaten in Abb. 3 von Teil 1 dieses Beitrags. Was aber in diesem Fall die Be-

zeichnung Apochromat rechtfertigt ist, dass die Farbfehlerkurve jetzt viel näher an der Null-Linie verläuft als beim Achromaten (unterschiedlicher Maßstab in Abb. 3!). Größere Abweichungen ergeben sich allerdings für Wellenlängen kleiner als etwa 450 Nanometer, also im Violetten (400 nm bis 440 nm). Aber selbst bei 400 Nanometer hat dieser Apochromat nur einen Farblängsfehler von einem Millimeter, während er beim Achromat fünfmal so groß ist. Photographische Emulsionen und auch einige CCDs weisen allerdings unterhalb von 450 Nanometer noch eine hohe Empfindlichkeit auf, sodass der hier bestehende Farbfehler eventuell bei der Astrophotographie in Erscheinung träte, obwohl er bei visueller Beobachtung nicht stören würde.

Es sei hier noch ergänzend bemerkt, dass nach einem Ansatz von Paul N. Robb (Selection of optical glasses, Applied Optics **24**, 1864 [1985]) auch bei zweilinsigen Systemen unter Ausnutzung besonderer Dispersionsverläufe Kombina-

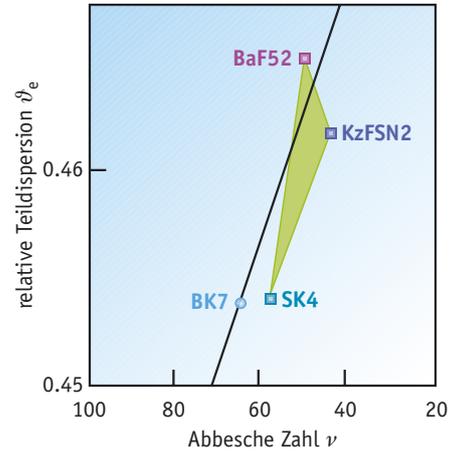


▶ Abb. 3: Farblängsfehler eines zweilinsigen Apochromaten aus FK54 und LaK10 ($f = 1000$ mm), Berechnung mit Hilfe des Programms OSLO-EDU (Lambda Research Corporation, www.lambdadares.com)



◀ Abb. 4: Der Farblängsfehler eines Apochromats aus Barytflint BaF52, Kurzflint KzFSN4 und Schwerkron SK4 ($f = 1000 \text{ mm}$), berechnet mit dem Programm OSLO-Edu.

▶ Abb. 5: Die für den Apochromaten der Abb. 4 verwendeten Gläser bilden im ϑ - ν -Diagramm ein Dreieck. Je größer die Fläche dieses Dreiecks ist, desto leichter gelingt das Design eines Objektivs.



nen von Glassorten möglich sind, die eine Korrektur des Farbfehlers für bis zu fünf verschiedene Wellenlängen erlauben. Das bedeutet aber, dass – entgegen landläufiger Meinung – nicht unbedingt ein Dreilinsler erforderlich ist, um den Farbfehler für drei oder mehr Wellenlängen zu korrigieren.

Der dreilinsige Apochromat

Der klassische Apochromat besteht aus drei Linsen, wobei häufig zwei oder alle drei Linsen miteinander verkittet sind. Durch die höhere Linsenzahl und eine größere Auswahl an Gläsertypen ergeben sich nun mehr Freiheitsgrade, die eine zufriedenstellende Korrektur nicht nur des Farbfehlers, sondern auch der monochromatischen Bildfehler zulassen.

Einer der ersten für die astronomische Beobachtung erfolgreich eingesetzten Apochromate war das von dem Zeiss-Mitarbeiter Albert König um das Jahr 1905 entwickelte B-Objektiv. Hier ist die konkave Zerstreulinse aus Kurzflint zwischen den zwei Sammellinsen mit je einem Luftspalt angeordnet. Da die drei Linsen des B-Objektivs aber nicht miteinander verkittet waren, war das Objektiv in Verbindung mit den stark gekrümmten Innenflächen der Linsen sehr empfindlich gegenüber Zentrierfehlern und Temperatureinflüssen.

Der dreilinsige Apochromat ermöglicht die Hebung des Farblängsfehlers für drei Wellenlängen (Farben). Damit lässt sich der Farbfehler über den gesamten visuellen Spektralbereich klein halten. In Erweiterung der für den Achromaten aufgestellten Achromasiebedingung müssen für den Apochromaten die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein (Trichromasiebedingung):

$$\frac{F_1}{\nu_1} + \frac{F_2}{\nu_2} + \frac{F_3}{\nu_3} = 0 \quad (3)$$

und außerdem:

$$\frac{F_1 \vartheta_1}{\nu_1} + \frac{F_2 \vartheta_2}{\nu_2} + \frac{F_3 \vartheta_3}{\nu_3} = 0 \quad (4)$$

Hierbei bedeuten F_1 , F_2 und F_3 die Einzelbrechkraften der Linsen 1 bis 3 mit der Gesamtbrechkraft $F = F_1 + F_2 + F_3$. Die ϑ -Werte für die verschiedenen Glasarten berechnen sich wieder nach Gleichung (1).

Wenn auch ein Hauptmerkmal des Achromaten und Apochromaten – wie in diesem Artikel dargestellt – die Hebung des Farbfehlers ist, soll wegen der Vollständigkeit doch erwähnt werden, dass eine Abbildung durch solche Linsensysteme auch frei von Öffnungsfehlern und Koma sein muss. Diese Forderung bedeutet die Einhaltung der Abbeschen Sinusbedingung.

Ohne auf diesen etwas komplizierten Zusammenhang im Detail einzugehen, kann man die Sinusbedingung etwa so verstehen, dass ein kleines um die optische Achse liegendes und zu ihr senkrecht stehendes Flächenelement bei allen Einfallshöhen (Objektivzonen), das heißt unabhängig von der Strahlneigung, mit dem gleichen Abbildungsmaßstab abgebildet werden muss. Eine solche Abbildung heißt aplanatisch. Im Falle eines unendlich weit entfernten Objekts (Stern) bedeutet das, dass die bildseitige Haupt-»Ebene« des Objektivs zu einer Kugelfläche mit dem Brennpunkt als Mittelpunkt wird.

Die Kunst des Optikdesigners ist es nun, aus den vielen zur Verfügung stehenden Gläsertypen die optimale Kombination von Gläsern zu finden, um dem gewünschten Ziel möglichst nahe zu kommen. Beim üblichen Aufbau eines Apochromaten befindet sich die bikonvexe Zerstreulinse als mittleres Element zwischen den beiden konvexen Sammellinsen. In dem typischen Beispiel der Abb. 4 besteht die Zerstreulinse aus dem Kurzflint-Sonderglas KzFSN4.

Die Fehlerkurve hat nun die typische Form eines gespiegelten »S«, sie schneidet die Null-Linie bei den Farben Blau, Grün und Rot und entfernt sich auch sonst nur wenig von ihr. Wir haben damit ein – zumindest für den visuellen Spektralbereich – hervorragend korrigiertes Objektiv.

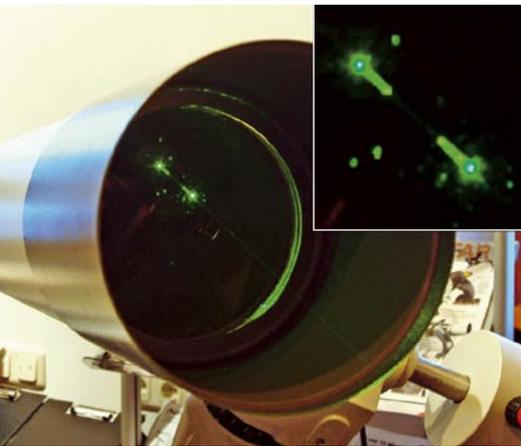
Erst unterhalb 450 Nanometer weicht die Kurve stärker ab, aber ein Farblängsfehler von nur 0,8 Millimeter bei 400 Nanometer Wellenlänge kann gut toleriert werden.

Wie aber findet man nun aus der großen Auswahl die ideale Kombination der geeigneten Gläser? Im Diagramm der Teildispersionen dürfen die Gläser nicht alle auf der Normalgeraden liegen. Nach Rutten und Venrooij (»Telescope Optics«) sind solche Gläser besonders geeignet, die entsprechend ihrer Stellung im ϑ - ν -Diagramm dort ein Dreieck mit einer möglichst großen Fläche bilden. In der Regel wird es sich dabei um ausgesuchte Sondergläser handeln.

Immersionsojektive

Auch bei den dreilinsigen Apochromaten wird zur Erzielung eines besonders guten Korrektionszustands von kristallinem Fluorit als Linsenmaterial Gebrauch gemacht. Wegen ihrer Empfindlichkeit wird die bikonvexe Fluoritlinse aber als mittleres Element zwischen den beiden äußeren Linsen angeordnet, die dann zerstreud sein müssen. Die drei Linsen bilden eine Verbundgruppe, sie sind aber wegen der bei Temperaturänderungen entstehenden Spannungen nicht miteinander verkittet, sondern durch einen hauchdünnen Ölfilm miteinander verbunden. Diese Technik der Ölimmersion wurde 1974 durch Wolfgang Busch zum ersten Mal für Amateuroptiken eingeführt.

Die Fluoritlinse ist dabei nach beiden Seiten hin gegen mechanische Beschädigungen und Umwelteinflüsse bestens geschützt, wie sie sonst als Sporenbefall und Feuchtigkeit zwischen den Linsen auftreten könnten mit der Folge, dass die Linsenflächen dadurch angegriffen würden. Die stärkere Wärmeausdehnung des Fluoritelements (Faktor 2,6 gegenüber »normalen« Gläsern) wird vom Ölfilm aufgefangen, wobei durch die Ölimmersion automatisch die richtige Linsenstellung eingenommen wird, ohne dass es zu irgendeiner Verkipfung kommt.



▲ Abb. 6: Ein dreilinsiges Zeiss 150-mm-APQ-Objektiv ($f = 1200$ mm) wurde mit einem grünen Laserstrahl bestrahlt. Die mittlere Fluoritlinse erzeugt keinerlei Streulicht. (Bild: Baader Planetarium)

Ein legendärer Vertreter dieser Bauweise ist das in den 80er Jahren von Karnapp und Pudenz entwickelte APQ-Objektiv der Firma Zeiss, das in den von der Firma Baader Planetarium vertriebenen Refraktoren noch eingesetzt wird. Da sich nur zwei Glas-Luftflächen im Strahlengang befinden, sind diese Objektive auch weitgehend frei von Reflexen und Streulicht.

In Abb. 6 wird demonstriert, dass das Fluorit-Element eines APQ-Objektivs so gut wie kein Streulicht erzeugt. Während sich der Lichtweg durch die Frontlinse und die Hinterlinse durch das übliche Streulicht in der Glasschmelze abzeichnet, ist in der mittleren Fluoritlinse dank ihrer kristallinen Eigenschaft kein gestreutes Licht zu erkennen, sodass der Lichtstrahl dort unterbrochen zu sein scheint (Inset der Abb. 6). Hierin ist ein wichtiger Unterschied gegenüber den ED-Optiken zu sehen, da das ED-Element (z.B. Fluorkron) als typisches Glas eben nicht frei von Streulicht ist.

Die hellen Reflexpunkte entstehen beim Ein- und Austritt des hochenerge-

tischen Laserstrahls an der Vorder- bzw. Rückfläche des Objektivs. Ohne die aufwändige Entspiegelung des Objektivs wären diese Reflexe wesentlich heller. Man sieht auch sehr schön, dass dank der Öl-immersion beim Übergang zwischen den drei Linsen keine weiteren Reflexe auftreten.

Ergänzend sei gesagt, dass die Öl-immersion bei Objektiven natürlich nicht auf das Material Fluorit beschränkt ist, wobei nur wenige Hersteller diese komplexe Technik – vor allem im Hinblick auf die Langzeitstabilität der Ölfügung – tatsächlich beherrschen.

In diesem Streifzug durch die nicht ganz simple Welt der Optik mussten zwangsläufig viele weiterführende Zusammenhänge unberücksichtigt bleiben. So wären neben dem Farblängsfehler auch der Farbquerfehler (Farbfehler des Hauptstrahls) und die Sphärochromasie (farbabhängiger Öffnungsfehler, Gauß-Fehler) zu untersuchen. Und schließlich würde ein noch so gut farbkorrigiertes Objektiv nichts taugen, wenn man sich nicht auch um Öffnungsfehler und Koma gekümmert hätte. Wer sich mit diesen Problemen intensiver beschäftigen will, kann entsprechende Linsensysteme mit dem Freeware-Programm OSLO-EDU berechnen und nach verschiedenen Gesichtspunkten optimieren, wozu auch die angegebene Literatur als Quelle dienen mag. □



Volker Witt hat nach dem Studium der Physik auf dem Gebiet der Elektronenmikroskopie promoviert. Seit vielen Jahren unterrichtet er als Dozent angehende Augenoptiker an der Münchner Fach-

akademie für Augenoptik in den Fächern Optik und Optometrie. Seit etwa 20 Jahren ist er in der Amateurastronomie aktiv und hat in dieser Zeit zahlreiche Beiträge in SuW veröffentlicht.

Weitere Informationen

Albert König, Horst Köhler: Die Fernrohre und Entfernungsmesser, 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1959.

Uwe Laux: Astrooptik, 2. Auflage, Elsevier – Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1999.

Harrie G. J. Rutton and Martin A. M. van Venrooij: Telescope Optics, Evaluation and Design, Willmann-Bell, Richmond, 1988. (Sehr empfehlenswert)

Gregory Hallock Smith: Practical Computer-Aided Lens Design, Willmann-Bell, Richmond, 1998.

Roger Ceragioli unter <http://www.atmsite.org/contrib/Ceragioli/newrefractor/> (Sehr empfehlenswert)

Steve Fejes unter <http://www.atmsite.org/author.html>

Astronomie.de

der Treffpunkt für Astronomie

über 6000 Besucher täglich!

größter Gebrauchtmart mit über 100 Anzeigen pro Tag.

mehr als 150 Einträge in den 19 Diskussionsforen

astronomische Bildergalerie mit 1300 Amateuraufnahmen.

täglich Neuigkeiten und Artikel aus der Welt der Astronomie.

Buchbesprechungen, Deep Sky Datenbank, Fernsehvorschau, Himmelsvorschau, Astroteisen...

Machen Sie mit: [Http://www.Astronomie.de](http://www.Astronomie.de)