

50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau
von Makro bis Nano /
Mechanical Engineering
from Macro to Nano**

Proceedings

Fakultät für Maschinenbau /
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel
Dipl.-Ing. Helge Drumm
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)
Postfach 10 05 65
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.
Werner-von-Siemens-Str. 16
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

V. Tautz

Zur Glasauswahl bei Objektiven mit reduziertem sekundären Spektrum für Spektive und Ferngläser

Abstract

Abbe [2] erkannte im vorletzten Jahrhundert, welche Gläser bzw. Werkstoffe man zur Korrektur des sekundären Spektrums bräuchte. Bei Prof. Haferkorn hat der Autor fast hundert Jahre später die notwendige Theorie gehört. ZEISS hat jetzt neben den Spektiven auch bei Ferngläsern mit einer Vergrößerung bis 10x das sekundäre Spektrum durch Objektive mit speziellen Gläsern reduziert.

Einleitung

Das von Abbe entwickelte binokulare Prismenfernglas [1], das 1894 bei Carl Zeiss Jena in Serienproduktion ging, hatte ein aus einer positiven Kronlinse und einer negativen Flintlinse verkittetes Objektiv. Dieser Objektivtyp wird auch als Achromat bezeichnet, was vom Wort her farbfehlerfrei bedeutet. Aber ein Achromat ist nicht farbfehlerfrei, sondern nur die Schnittweite für rotes und blaues Licht ist gleich und die Schnittweite für gelbes/grünes Licht ist etwas kürzer. Diese Differenz wird als sekundäres Spektrum bezeichnet und äußert sich als Farbsaum. Bereits 1878 schrieb Abbe [2]: *"Die fernere Vervollkommnung des Mikroskops im Punkte der dioptrischen Wirkung des Mikroskops erscheint demnach hauptsächlich auf die Fortschritte der Glasschmelzkunst gestellt und im Besonderen davon abhängig, dass letztere optisch verwendbare Glasarten herstellt, bei denen der Gang der Farbenzerstreuung einer Aufhebung des sogenannten secundären Spektrums günstiger ist und bei welchen Dispersion und mittlerer Brechungsindex ein anderes Verhältnis zu einander, als bei den jetzigen Glasarten, zeigen."* Und er bemerkte: *"Leider scheint, so wie die Verhältnisse gegenwärtig liegen, wenig Hoffnung, dass schon die nächste Zukunft nennenswerthe Fortschritte in dieser Richtung bringen werde."*

In der danach einsetzenden Zusammenarbeit mit Otto Schott gelang es Schott, auch einige Gläser mit abweichenden Teildispersionen, insbesondere Kurzflinte, zu entwickeln. Carl Zeiss Jena entwickelte mit diesen neuen Gläsern ab der Wende zum 20. Jahrhundert zweilinsige (A-Objektiv, AS-Objektiv) und dreilinsige (B-Objektiv, F-Objektiv) Objektive mit reduziertem sekundären Spektrum, sogenannte Halbapochromate und Apochromate für die Astronomie mit einem Öffnungsver-

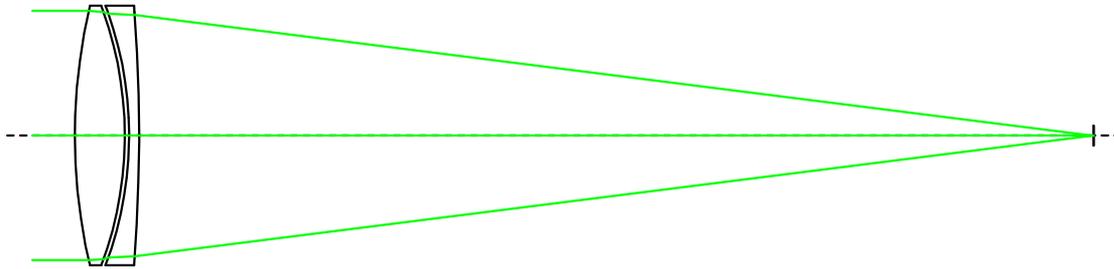
hältnis von etwa 1:15 bis 1:10 [3]. Dieses Öffnungsverhältnis reicht für Ferngläser nicht aus. Die weitere Entwicklung der Objektive für die Astronomie führte Jahrzehnte später zu den APQ-Objektiven [4].

Bei Ferngläsern wurden jahrzehntelang Achromate als Objektiv eingesetzt. Das sekundäre Spektrum war für diese Anwendung nicht störend. Ein Problem war eher die Fokussierung und die Einstellung auf die Fehlsichtigkeit des Auges, bei der der Abstand zwischen Objektiv und Okular längs der optischen Achse verändert wird und damit eine Luftpumpenwirkung auftritt. Die Abdichtung erfordert erheblichen Aufwand. Einfacher wird es, wenn sich bei der Fokussierung die Baulänge nicht ändert, also eine Innenfokussierung realisiert wird. Dazu wird in einem größeren Abstand nach dem ursprünglichen Objektiv eine verschiebbare Negativlinse angeordnet. Um wieder auf die ursprüngliche Objektivbrennweite zu kommen, muß das Frontglied eine stärkere Brechkraft erhalten, ist somit angespannter und wird dreilinsig ausgeführt. Das gesamte Objektiv hat nun vier Linsen. ZEISS hat dieses Konzept bei Ferngläsern 1992 umgesetzt [5]. Dieser Objektivtyp mit Innenfokussierung hat eine Telewirkung und die Baulänge der Ferngläser verkürzte sich.

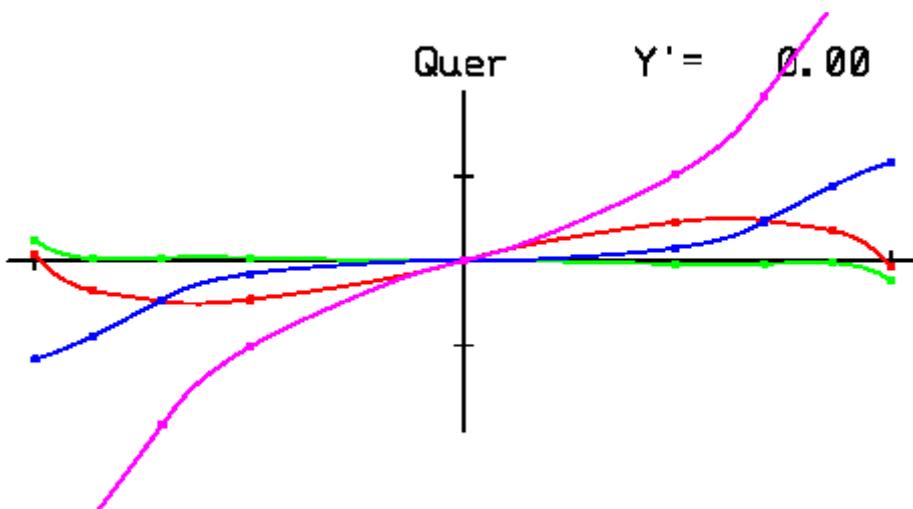
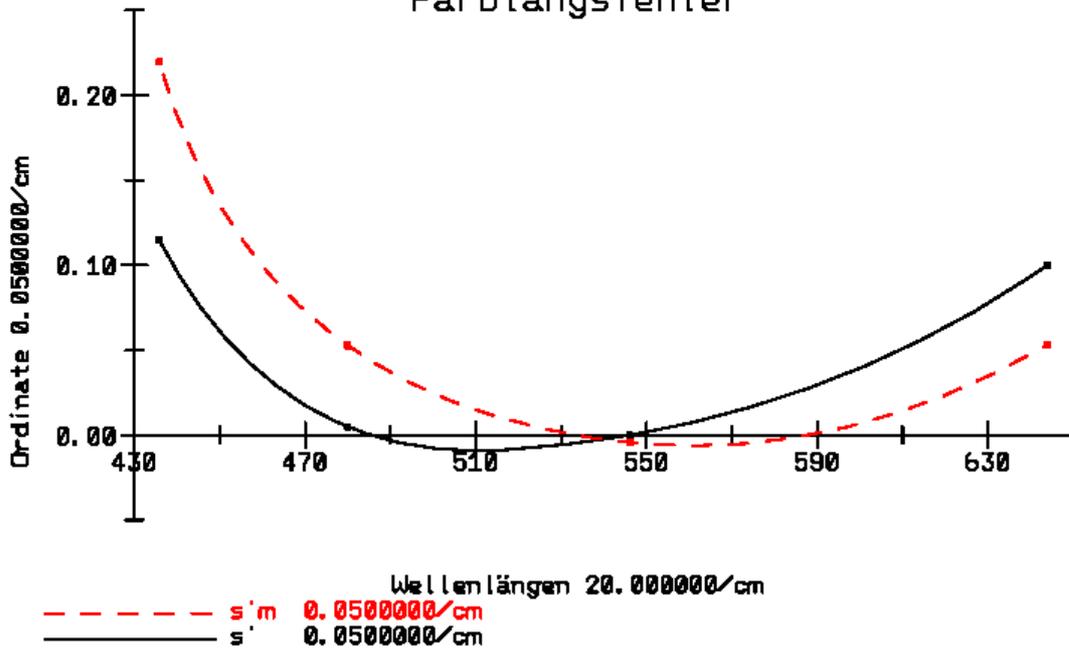
Ende der 90-iger Jahre bestand die Aufgabe, die Optik für Spektive neu zu entwickeln. Die Objektive sollten Innenfokussierung besitzen und kein störendes sekundäres Spektrum haben.

Achromatische und apochromatische Korrektion

Bevor ich auf die Korrektion des sekundären Spektrums eingehe, zeige ich als Vergleichsbasis ein Achromat aus den Standardgläsern N-BK7/N-F2. Er und alle folgenden gezeigten Objektive sind auf eine Brennweite von 100 mm normiert, um die Ergebnisse besser vergleichen zu können. Bild 1 zeigt das Schnittbild, die Kurven des Farblängsfehlers (paraxial s' und für die beste Auffangebene $s'm$) sowie die Kurven der sphärischen Aberration. Neben dem Farblängsfehler ist auch noch der Öffnungsfehler von der Wellenlänge abhängig. Für grün/gelb ist der Öffnungsfehler sehr gut korrigiert, für rot ist er unterkorrigiert und für blau ist er überkorrigiert. Dies wird auch als Sphärochromasie oder Gaußfehler bezeichnet. Neben dem paraxialen sekundären Spektrum sollte auch der Gaußfehler verringert oder beseitigt werden.



Farblängsfehler



WEL [nm]: 546.07 643.85 479.99 435.83
 Maßstäbe: Quer: 0.010/cm Längs: 0.091/cm Öffnung: 0.025/cm

Bild 1: achromatisch korrigiertes Dublet (Achromat - Dichromat) 4/100 aus N-BK7 / N-F2

Die Grundlagen zur Korrektur von Farbfehlern und des sekundären Spektrums, die Ansatzbedingungen, hat der Autor bereits im Studium bei Prof. Haferkorn gehört. Haferkorn bezeichnet die Bedingungen nach der Anzahl der Wellenlängen mit gleicher Schnittweite [6].

$$\sum_{i=1}^1 \omega_i F_i' = F' \quad \text{Maßstabsbedingung} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^1 \omega_i^2 \frac{F_i'}{v_i} = 0 \quad \text{Dichromasiebedingung (Achromasiebedingung)} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^1 \omega_i^2 \frac{J_i F_i'}{v_i} = 0 \quad \text{Trichromasiebedingung (Apochromasiebedingung)} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^1 \omega_i^2 \frac{\bar{J}_i F_i'}{v_i} = 0 \quad \text{Polychromasiebedingung} \quad (4)$$

Bei einem Achromat, der ein Dichromat ist, sind das die Maßstabsbedingung (1) und die Dichromasiebedingung (2). In die Dichromasiebedingung (2) gehen die Brechkräfte F_i' , Höhenverhältnisse ω_i und die Abbezahl v_i , also die Dispersion, der Linsen ein. Soll die Schnittweite für drei Wellenlängen gleich sein, muß noch die Trichromasiebedingung (3) erfüllt werden. In sie gehen zusätzlich die relativen Teildispersionen J_i für einen anderen Spektralbereich ein. Soll die Schnittweite für mindestens vier Wellenlängen gleich sein, muß zusätzlich die Polychromasiebedingung (4) erfüllt werden, in die die relativen Teildispersionen \bar{J}_i für einen weiteren Spektralbereich eingehen.

Trägt man die relative Teildispersion J_i als Funktion der Abbezahl v_i in ein Diagramm ein, liegen viele optische Gläser in der Nähe der sogenannten "Normalgeraden", die durch die Werte der Gläser K7 und F2 gebildet wird [7], siehe Bild 2. Zur Korrektur des sekundären Spektrums sind die Gläser interessant, die weit weg von der "Normalgeraden" liegen, also eine abweichende Teildispersion besitzen. Dies ergibt sich aus den Ansatzbedingungen (1) bis (4). Für ein zweilinsiges Objektiv aus dünnen Linsen werden die Ansatzbedingungen übersichtlicher.

$$F_1' + F_2' = F' \quad \text{Maßstabsbedingung} \quad (1a)$$

$$\frac{F_1'}{n_1} + \frac{F_2'}{n_2} = 0 \quad \text{Dichromasiebedingung (Achromasiebedingung)} \quad (2a)$$

Diese beiden Bedingungen lassen sich mit "normalen" Gläsern erfüllen und es ergibt sich ein Achromat – Dichromat, wie z. B. in Bild 1 gezeigt.

Soll bei einem zweilinsigen Objektiv die Schnittweite für drei Wellenlängen gleich sein, muß zusätzlich zu (1a), (2a) noch folgende Bedingung erfüllt sein.

$$J_1 \frac{F_1'}{n_1} + J_2 \frac{F_2'}{n_2} = 0 \quad \text{Trichromasiebedingung (Achromasiebedingung)(3a)}$$

Die drei Gleichungen (1a), (2a), (3a) mit den zwei Variablen F_1' , F_2' sind nur lösbar, wenn die relativen Teildispersionen beider Linsen J_1 , J_2 gleich sind. Im $J - v -$ Diagramm müssen beide Gläser auf einer Waagerechten liegen, was die Glasauswahl stark einschränkt.

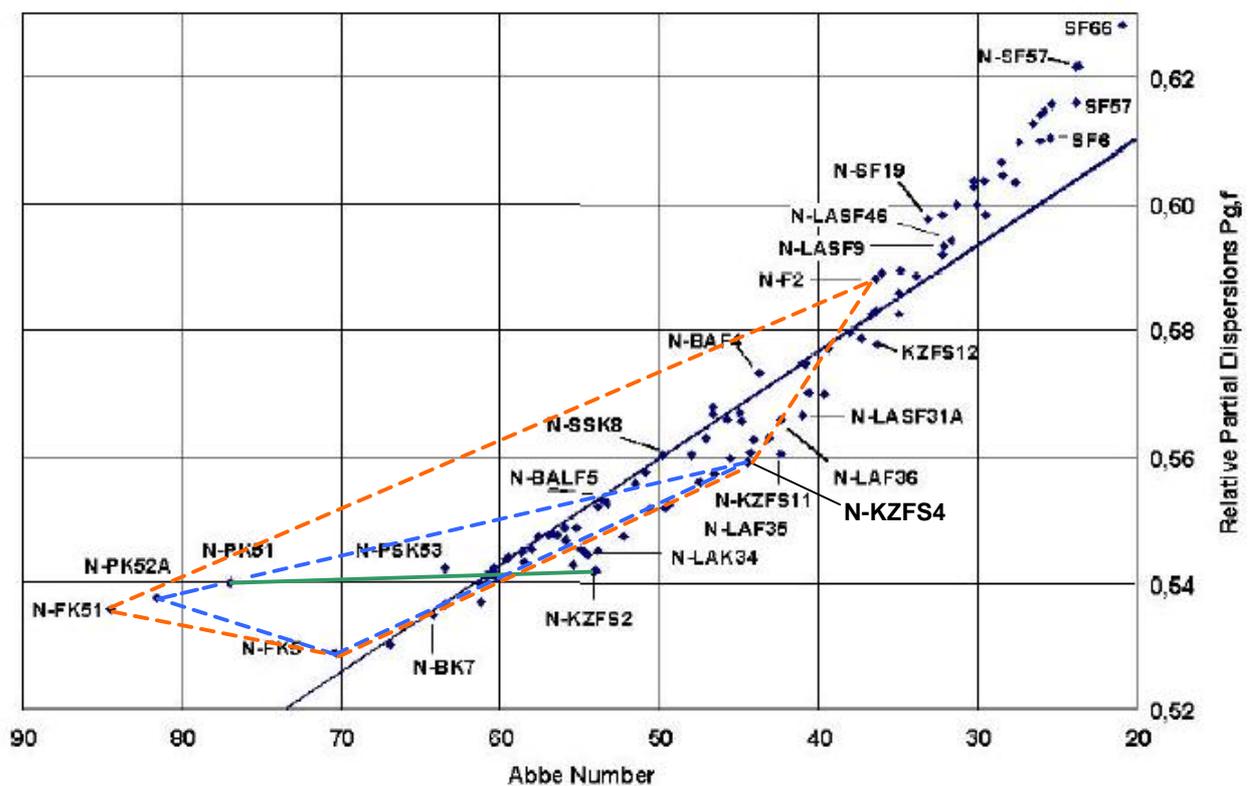


Bild 2: $J - v -$ Diagramm: — Beispiel zweilinsiger Apochromat, siehe Bild 3
 - - - Halbapochromat mit Innenfokussierung, siehe Bild 4
 - - - Apochromat mit Innenfokussierung, siehe Bild 5

Bild 3 zeigt als Beispiel ein zweilinsiges Objektiv mit den Gläsern N-PK51 / N-KzFS2, mit denen die Trichromasiebedingung erfüllt werden kann. Die Optimierung erfolgte aber so, daß nicht der paraxiale Farbblängsfehler s' korrigiert ist, sondern der Farbblängsfehler für die beste Auffangebene $s'm$ minimal wird und somit der Anwendung angepaßt ist. Die Schnittweite $s'm$ ist für drei Wellenlängen gleich, wir haben einen Apochromat – Trichromat. Der Gaußfehler ist kaum noch vorhanden. Nachteilig ist, das das Objektiv nur noch für eine kleinere relative Öffnung korrigiert werden

kann, im Beispiel 1:8. Für Ferngläser reicht das nicht aus. Zweilinsige Apochromate können aber z. B. als Objektive für die Astronomie verwendet werden.

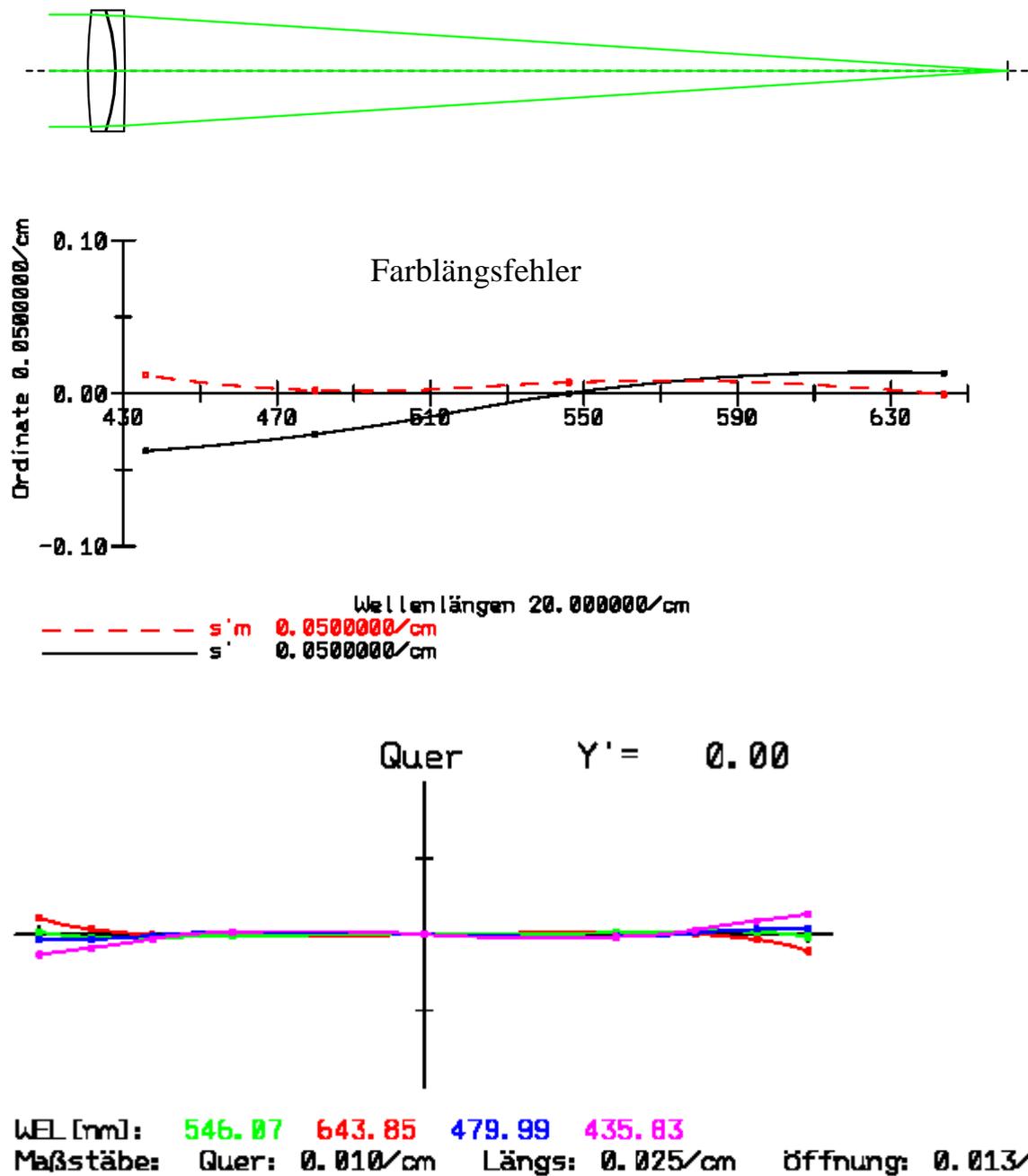
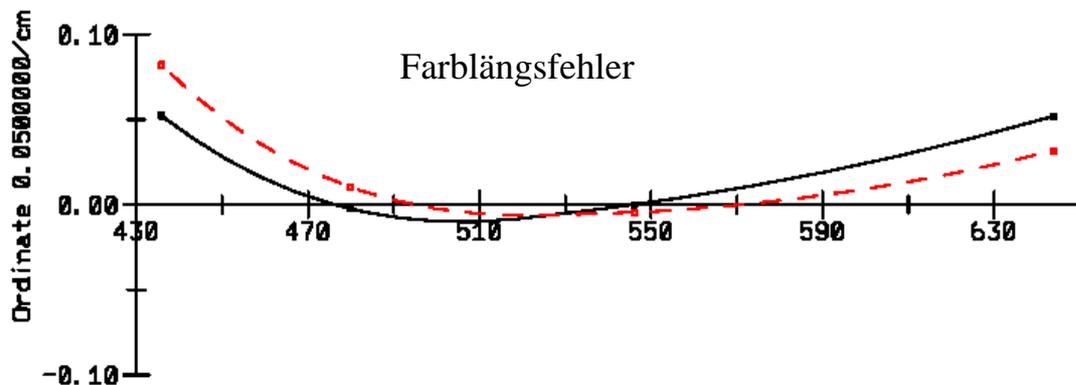
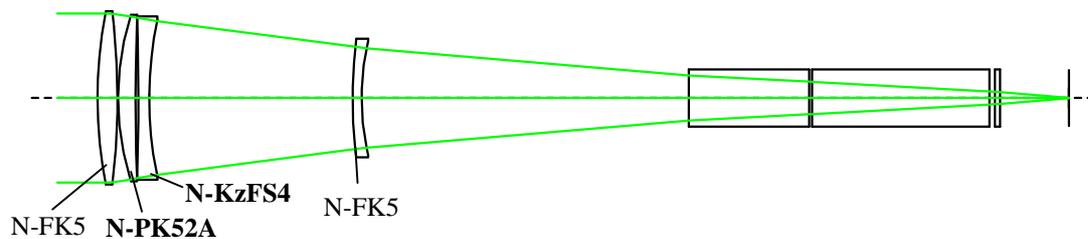


Bild 3: apochromatisch korrigiertes Dublet (Apochromat - Trichromat) 8/100 aus N-PK51/N-KzFS2

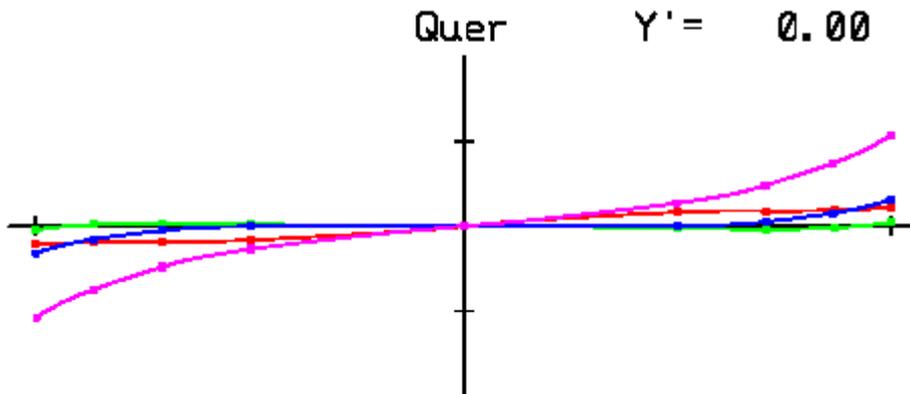
Bei einem Apochromat aus drei Linsen ist die Glasauswahl etwas einfacher. Die Gläser sollten im $J - v -$ Diagramm nicht auf einer Geraden liegen und eine möglichst große Fläche aufspannen. Die Methodik der Glasauswahl und Beispiele zu dreilinsigen Trichromaten werden in [6] diskutiert.

Objektive für Spektive und Ferngläser

Der vierlinsige achromatische Objektivtyp mit Innenfokussierung, der bei Ferngläsern verwendet wird, sollte durch eine geschickte Glasauswahl ein deutlich reduziertes sekundäres Spektrum bekommen. Es zeigte sich, dass auf Grund der notwendigen relativen Öffnung eine trichromatische Korrektur nicht zu erreichen ist, aber der Farblängsfehler im Vergleich zu einem Achromat aus "normalen" Gläsern deutlich reduziert ist. Die Glasauswahl erfolgte nicht durch Lösen der Ansatzbedingungen, sondern nach der sich aus ihnen ergebenden Regel, daß bei Nichterfüllbarkeit der



Wellenlängen 20.000000/cm
 --- s'm 0.0500000/cm
 ——— s' 0.0500000/cm



WEL [nm]: 546.07 643.85 479.99 435.83
 Maßstäbe: Quer: 0.010/cm Längs: 0.039/cm Öffnung: 0.017/cm

Bild 4: halbpochromatisch korrigiertes Objektiv mit Innenfokussierung 6/100

Trichromasiebedingung die Gläser möglichst weit weg von der "Normalgeraden" liegen sollten, bei einem sammelnden Glied für Positivlinsen oberhalb und für Negativlinsen unterhalb der "Normalgeraden", siehe Bild 2. Bild 4 zeigt ein mögliches Ausführungsbeispiel. Dieser vierlinsige Objektivtyp wird im Spektiv 65 [8] und in den neuen Ferngläsern Victory FL [9] verwendet.

Für das Spektiv 85 mit einem EP-Durchmesser von 85 mm und 500 mm Brennweite waren das verbleibende sekundäre Spektrum und der Gaußfehler noch zu groß. Die vierte Linse für die Innen-

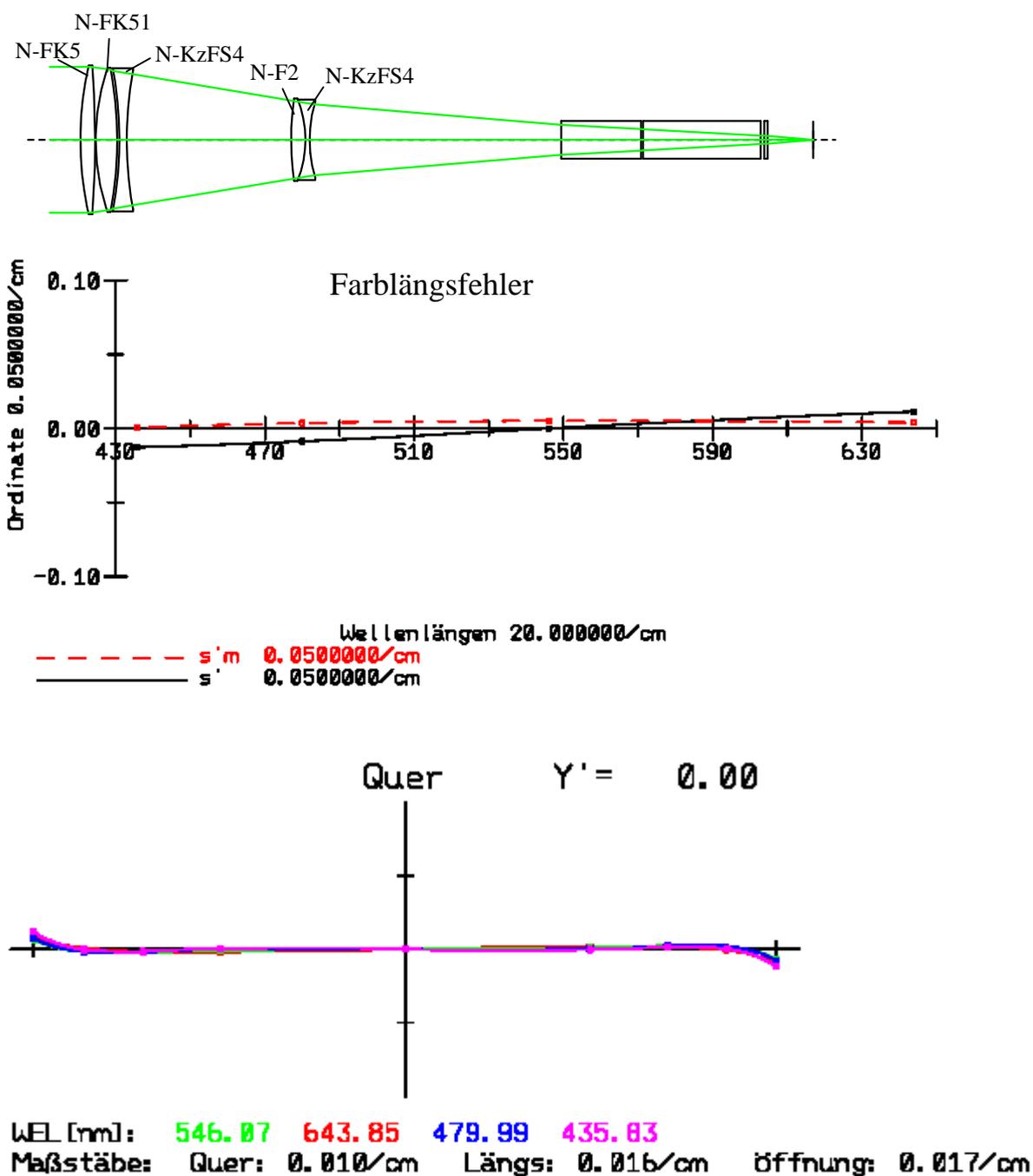


Bild 5: apochromatisch korrigiertes Objektiv mit Innenfokussierung 6/100

fokussierung wurde in ein Kittglied mit z. B. den Gläsern N-F2 und N-KzFS4 abgewandelt. Nun ist die Trichromasiebedingung erfüllbar. Das sekundäre Spektrum, bezogen auf den spektral besten Fokus $s'm$, sowie der Gaußfehler sind nur noch sehr gering. Bild 5 zeigt ein mögliches Ausführungsbeispiel. Dieses Objektiv mit einem Öffnungsverhältnis von 1:6 ist für die Achspunktabbildung über den gesamten sichtbaren Spektralbereich beugungsbegrenzt. Der fünfлинsige Objektivtyp wird im Spektiv 85 verwendet [10].

Neben den beschriebenen Gesichtspunkten der Glasauswahl zur Korrektur des sekundären Spektrums ist außerdem die Lage der Gläser im $n - v -$ Diagramm und ihr sich daraus ergebender Einfluß auf die monochromatischen Abbildungsfehler zu berücksichtigen. An eine Glasauswahl muß sich eine Optimierung anschließen. Sie zeigt, ob die ausgewählten Gläser geeignet sind und die Aberrationen korrigiert werden können oder ob andere Gläser gewählt werden sollten.

An einem Beispiel wurde gezeigt, wie mit 5 Linsen ein apochromatisches Objektiv für Spektive aufgebaut werden kann.

Literatur- bzw. Quellenhinweise:

- [1] Doppelfernrohr mit vergrößertem Objektivabstand, Patentschrift Nr. 77086, Firma CARL ZEISS in JENA
- [2] Abbe, E.: Die optischen Hilfsmittel der Mikroskopie, 1878, in: Gesammelte Abhandlungen, Bd. 1, Jena 1904, S. 159 f.
- [3] König, A.: Die Fernrohre und Entfernungsmesser, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1959, S. 129 ff.
Köhler, H.
- [4] Laux, U.: Astrooptik, München 1993
- [5] Besenmatter, W.: Recent Progress in Binocular Design: The 8x56, Optics & Photonics News / November 2000, S. 30 – 33
- [6] Haferkorn, H.: Synthese optischer Systeme
Richter, W. Berlin 1984
- [7] TIE-29: Refractive Index and Dispersion
http://www.schott.com/optics_devices/german/download/tie-29_refractive_index.pdf
- [8] http://www.baader-planetarium.de/neue_produkte/zeiss/diascope-start.htm
- [9] <http://www.zeiss.de/C12567A80033D63E/ContentsWWWIntern/A41700C378C012F7C1256F2C0044C5E5>
- [10] Remmert, E.: Das Zeiss-Diascope 85 T* FL
http://www.baader-planetarium.de/suw_artikel/htm/zeiss_diascope/diascope.htm

Autorenangabe:

Dr.-Ing. Volker Tautz
Carl Zeiss Sports Optics
Gloelstraße 3-5
35576 Wetzlar
Tel.: 06441-404336
Fax: 06441-404349
E-mail: tautz@zeiss.de