

II.1. Refraktor I (Fernrohr-Achromate)

Mit der Erfindung des Teleskops 1609 durch *Lippershey* (1570-1619) und den ersten gezielten astronomischen Beobachtungen 1609 durch *Galilei* (1564-1642) begann das Zeitalter der teleskopischen Astronomie. Durch die bahnbrechenden Entdeckungen dieser Zeit kam ein Weltbild zu Fall. Den Beobachtern brachte es aber nicht selten Kerker und Tod.

Die Abbildungsleistung der ersten Teleskope war aus heutiger Sicht noch sehr mangelhaft, da ihre Objektive nur aus unvollkommenen Einzellinsen bestanden. Die Bearbeitungs- und Glasschmelztechnologie stand erst am Beginn ihrer Entwicklung. Ein erster Fortschritt war die Veröffentlichung des Brechungsgesetzes durch *Rene Descartes* (1596-1650) im Jahre 1637, welches bereits im Jahre 1597 von *Harriot* (1560-1621) angewandt worden war und 1621 von *Snell van Royen* (1581-1626) formuliert wurde. Ein großer praktischer Fortschritt war der Bau einer Poliermaschine (1655) durch *Christiaan Huygens* (1629-1695) und Bruder. Sie brachte eine spürbare Verbesserung der Linsenflächen. Diese Poliertechnologie wurde dann auch bei der Fertigung der Metallspiegel eingesetzt, wo die Anforderungen an die Oberflächengüte noch höher sind. Im Laufe der Zeit wurde sie immer weiter verbessert. Von den weiteren Arbeiten *Huygens* sind die Wellentheorie des Lichtes, die Pendeluhr (1656) und die „Unruh“ (1674) von wesentlicher Bedeutung.

Nun war das theoretische und praktische Wissen vorhanden, aber die „optischen“ Gläser gab es noch lange nicht. Die Herstellung von großen homogenen Kronglasscheiben war vielfach vom Zufall abhängig und die Herstellung eines brauchbaren Flint-Glases stand noch aus. Ein solches wurde erst von *Fraunhofer* (1787-1826) gezielt erschmolzen.

Durch die Einzellinsenfernrohre (*Hevelius* 1641 max. 45 m!) wurden viele grundlegende Entdeckungen gemacht. Von den ersten Beobachtungen durch *Galilei* bis zur Vorstellung des Spiegelteleskops durch *Newton* vergingen 63 Jahre. In dieser Zeit wurde durch *Huygens* der Saturnmond Titan (1655) mit einem 3.5 m langen Fernrohr entdeckt, später mit einem 7 m langen Fernrohr die Natur des Saturnringes (1659) erkannt und mit einem 37 m langen Fernrohr (1686) endgültig bestätigt. In diese Zeit fällt auch die Erstellung des ersten teleskopischen Sternkataloges durch *Flamsteed* (1646-1719), der die Veröffentlichung nicht mehr erlebte. Der Katalog wurde erst 1725 mit der Position von über 3000 Sternen herausgegeben. Auch der Beginn der Arbeiten von *Ole Römer* (1644-1710), der u.a. den Meridiankreis entwickelte und erstmals die Endlichkeit der Lichtgeschwindigkeit mit 227000 km/s (SI: 299792.458 km/s) ermittelte, fällt in diese Zeit.

Diese Einzellinsenfernrohre mit ihren extremen Baulängen stellten notwendige, aber unhandliche Geräte dar, mit denen Beobachtungen von bisher unerreichbarer Genauigkeit gemacht wurden. Ihre Leistungsgrenze war allerdings bereits nach 60 Jahren erreicht. Für Präzisionsmessungen blieb der Refraktor noch lange Zeit unangefochten. Alle diese Geräte waren Einzelstücke, deren mechanisch-optische Ausführung und Leistungsfähigkeit vom Erbauer geprägt war. Es begann der wissenschaftliche Gerätebau. Im Gegensatz dazu stand die Aussage von *Newton* (1643-1727) aus dem Jahre 1672 „Die Verbesserung des Fernrohres, das auf der Lichtbrechung beruht, ist aussichtslos“ [146, 324]. Diese Aussage bewirkte, dass lange Zeit keine gezielte Suche nach der „achromatischen“ Linse erfolgte. Die Spiegelteleskope von *Gregory* (1663), *Newton* (1671) und *Cassegrain* (1672) führten zur Entwicklung der großen Spiegelteleskope mit Metallspiegeln.

Chester Moor Hall (1703-1771), Rechtsanwalt, war Liebhaberoptiker und fand auf Grund von Experimenten und ersten einfachen Berechnungen eine Lösung für einen Achromaten, den er 1733 von Optikern fertigen ließ. Im Jahre 1755 erfuhr *John Dollond* (1706-1761) durch diese Optiker davon. *Dollond* bekam das Patent zugesprochen. Das geschah, obwohl die Priorität *Halls* ausdrücklich bestätigt wurde, weil *Hall* die Erfindung des Achromaten der Allgemeinheit nicht zugänglich machte. Der Bau von achromatischen Linsenfernrohren begann somit relativ spät, diese 83 Jahre Verzögerung sind der Autorität *Newtons* und *Halls* Stillschweigen geschuldet.

Aber erst *Fraunhofer*, der im Jahre 1807 von *Guinand* (1748-1824) in die Herstellung des optischen Glases eingeweiht worden war, stellte die Fertigung eines Achromaten auf eine wis-

senschaftliche Basis. Dazu trug seine Entdeckung der Spektrallinien, aber auch seine Arbeiten an neuen Gläsern und optischen Messgeräten bei. Somit hatte **Fraunhofer** die Möglichkeit geschaffen, die Brechzahlen (auf 4 – 5 Dezimalen) und damit die Dispersion der Gläser zu messen und diese Ergebnisse in die trigonometrische Strahlrechnung umzusetzen. Damit, und durch die Einführung des Probeglasses verließ er den Stil der alten Präzisionsoptik. **Fraunhofer** fertigte Achromate mit Luftspalt, bei denen die Koma korrigierbar war. Seine Objektive wiesen aber teilweise noch eine Restkoma auf. Die Sinusbedingung oder Isoplanasie war nicht vollständig erfüllt, ihre theoretische Herleitung erfolgte erst 1873 durch **Abbe** (1840-1905). Siehe auch Gl. I.1.27, Seite 29.

Bereits **Fraunhofer** machte Versuche, neue Gläser zu erschmelzen, um das sekundäre Spektrum (Farblängsfehler) zu vermindern. Diese Versuche führten aber nicht zum Erfolg. Die optischen Parameter waren gut, aber die Oberfläche der Gläser war chemisch zu unbeständig. Sie beschlugen schnell und **Fraunhofer** war nicht bereit, eine schlechte Optik zu verkaufen. **Fraunhofers** größtes Objektiv war der **Dorpat-24 cm-Refraktor**.

Die mit **Fraunhofer** beginnende Zeit der großen Refraktoren endete Anfang des 20. Jahrhunderts mit dem **Lick-Refraktor** (1888; Clark-Achromat 910/17630) und dem **Yerkes-Refraktor** (1897; Clark-Achromat 1002/19360). Mit diesen beiden Geräten war die technische Grenze erreicht [153, 454, 513]. Diese schnelle Entwicklung ist auch den Stiftern **James Lick** (1796-1876), **Charles Tyson Yerkes** (1837-1905) und dem handwerklichen Können des großen Linsenschleifers **Alvan Clark** (1804-1887) zu verdanken. Der gelernte Kupferstecher baute seit 1860 mit seinen Söhnen Refraktoren und entdeckte 1862 **Sirius B**.

In der Folge zielte die Entwicklung jetzt auf große Teleskope mit versilberten und später auch mit Aluminium bedampften Glasspiegeln (siehe ab Abs. III.1, Seite 210) und auf eine Verbesserung der Achromate hin. Obwohl die Großgeräte des 20. Jahrhunderts fast alle Spiegelteleskope sind, wurden auch noch Refraktoren gebaut, z.B. die Achromate von **Potsdam** 1903: ein Doppelrefraktor 800/12000 (VIS) und 500/12000 (foto-visuell; von **Repsold**) und der **Pittsburgh-Refraktor** 1912: ein 760/14120 (von **Brashear**). Alles in allem kann gesagt werden, dass in den letzten 40 Jahren des 19. Jahrhunderts der große Refraktor das dominierende Beobachtungsgerät war und die Spiegelteleskope eine nur untergeordnete Rolle spielten. Die großen Refraktoren sind alle mehr oder weniger Fraunhofer-Objektive (Abs. II.1.2, Seite 72f. und Abs. II.2.1, Seite 78). Als Fernrohr-Achromate werden heute Linsenobjektive bezeichnet, die primär für visuelle Beobachtungen vorgesehen sind und sich durch bestimmte Abbildungseigenschaften auszeichnen. Es sind dies:

Korrigierter Öffnungsfehler für eine Farbe und Achromasie (gleiche Schnittweite) der Bildpunkte für 2 weitere Farben. Der verkittete Achromat verfügt über drei Radien und zwei Gläser, der Fraunhofer-Achromat und das AS-Objektiv über vier Radien und zwei Gläser, mit denen die Korrektur erfolgt. Die vier Radien der letzten beiden Typen ermöglichen zusätzlich noch eine eindeutige Korrektur des Isoplanasie-Fehlers. Die Verbesserung des Zeiss E-Typen zum Fraunhofer-Achromaten besteht im Flintglas F2 statt eines „SF10“-ähnlichen Glases und den verbesserten Korrekturmethode(n) (vollständige Isoplanasie). Deshalb sind sie zusammengefasst

Auch analytische Berechnungen sind möglich (Formelsätze und Beispiele für *dünne Linsen* siehe Abs. I.1.6, Seite 28f.). Ein *reales* Objektiv mit *realen* Linsendicken ist mit diesen Formeln nur eingeschränkt zu berechnen, bei hohen Ansprüchen bzw. extremen Lichtstärken ist eine Optimierung (Abs. I.1.8, Seite 38) unverzichtbar, aber dieser analytische Ansatz ergibt ein gutes Startsystem für die Optimierung.

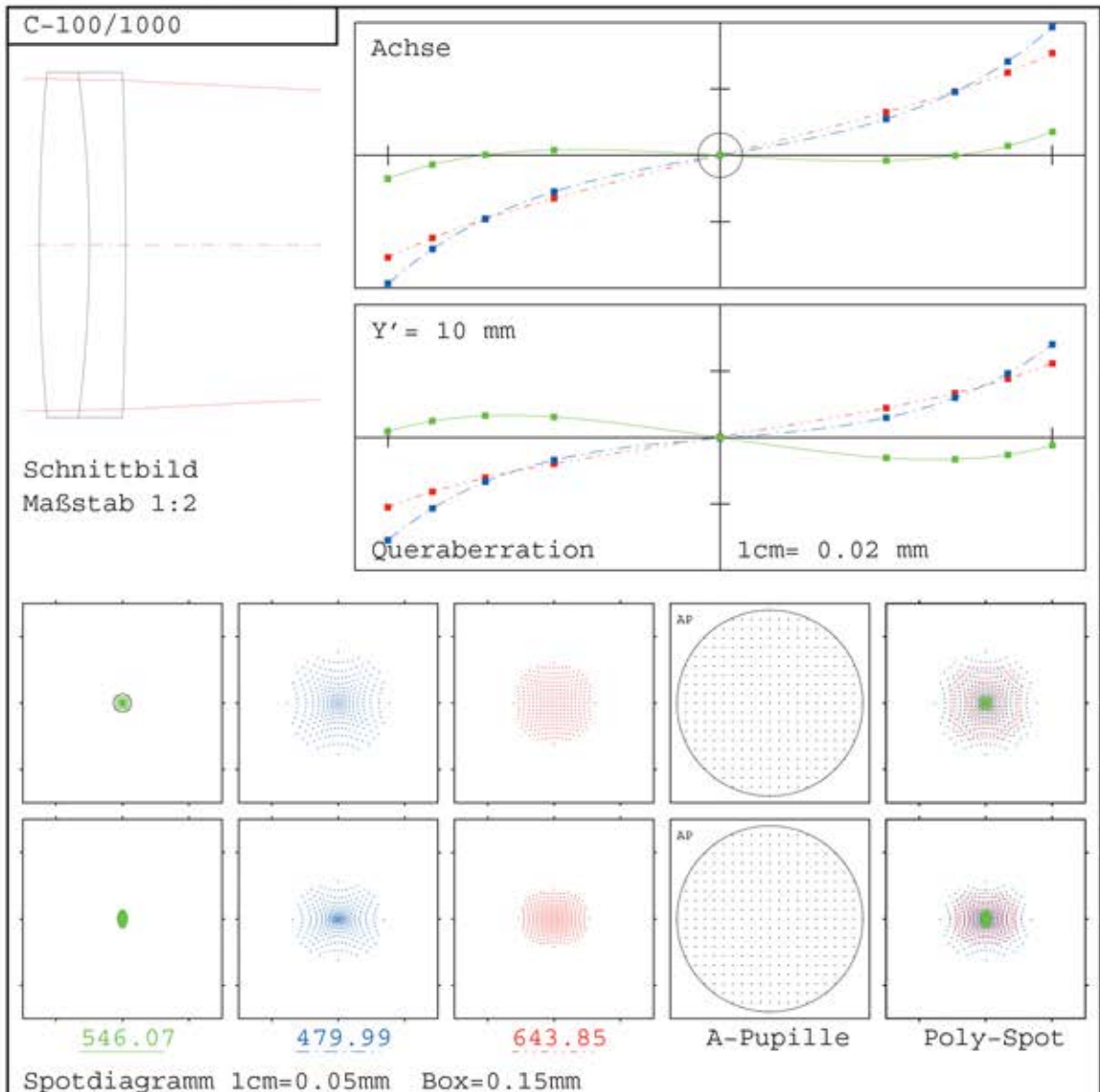
Das E- und besonders das AS-Objektiv waren als 100/1000 (Öffnungsverhältnis F:10) jahrelang (bis 1995) Standardtyp für die *Jena^{er}* Amateurfernrohre. Es waren sehr hochwertige, aber auch preiswerte Objektive, sie repräsentieren einen optisch/mechanischen *Handwerks-Standard*, der heute kaum mehr erreicht wird. Der Luftspalt vom E- und AS-Objektiv ist sehr schmal (0.01 – 0.2 mm) und ist deshalb bei den maßstäblichen Schnittbildern nicht erkennbar. Auch ist zu beachten, dass Queraberration und Spotdiagramm in verschiedenen Maßstäben dargestellt sind (Vergleiche Airy-Scheibchendurchmesser in den Diagrammen; siehe Gl. I.1.5, Seite 5).

II.1.1. Ur-Achromat

Dieser Urtyp eines Achromaten hat sich seit *Halls* und *Dollonds* Zeiten nur durch den Einsatz besserer Bearbeitungsmethoden und neuer Gläser verbessert. Es ist heute ein Universalobjektiv, das in kleinen Refraktoren seinen Einsatz findet. Der Isoplanasie-Fehler (Koma), wird durch die Auswahl der Gläser minimiert und ist somit wenig störend, hier sind allerdings durch die größer werdenden Linsenbrechkräfte Grenzen gesetzt. Diese erschweren besonders die Korrektur des Öffnungsfehlers. Der kleine Rest ist unbedeutend für die Deh. (96.7 %). Das sekundäre Spektrum macht sich deutlich bemerkbar, bei kleineren Öffnungen ist es aber für die meisten Beobachtungen wenig störend. Der Typ ist für kleine und mittlere Refraktorsysteme gut geeignet. Der Farbblänsfehler schränkt die Anwendung ein. Optimiertes System (analog Abs. I.1.8, Seite 38). [139] S. 132

Tab. II.1.1. & Abb. II.1.1. C-100/1000 (mBK7 / mSF2)

Gruppe	n_e	V_{ne}	ΔV_{ne}	ϑ_{ne}	f'_L	f'_L/f'_{sys}	rezi	Typ
mBK7	1.51872	63.96		0.5068	477.11	0.4771	2.0960	Sph
mSF2	1.65222	33.60	30.36	0.5234	-910.50	-0.9105	-1.0983	Sph

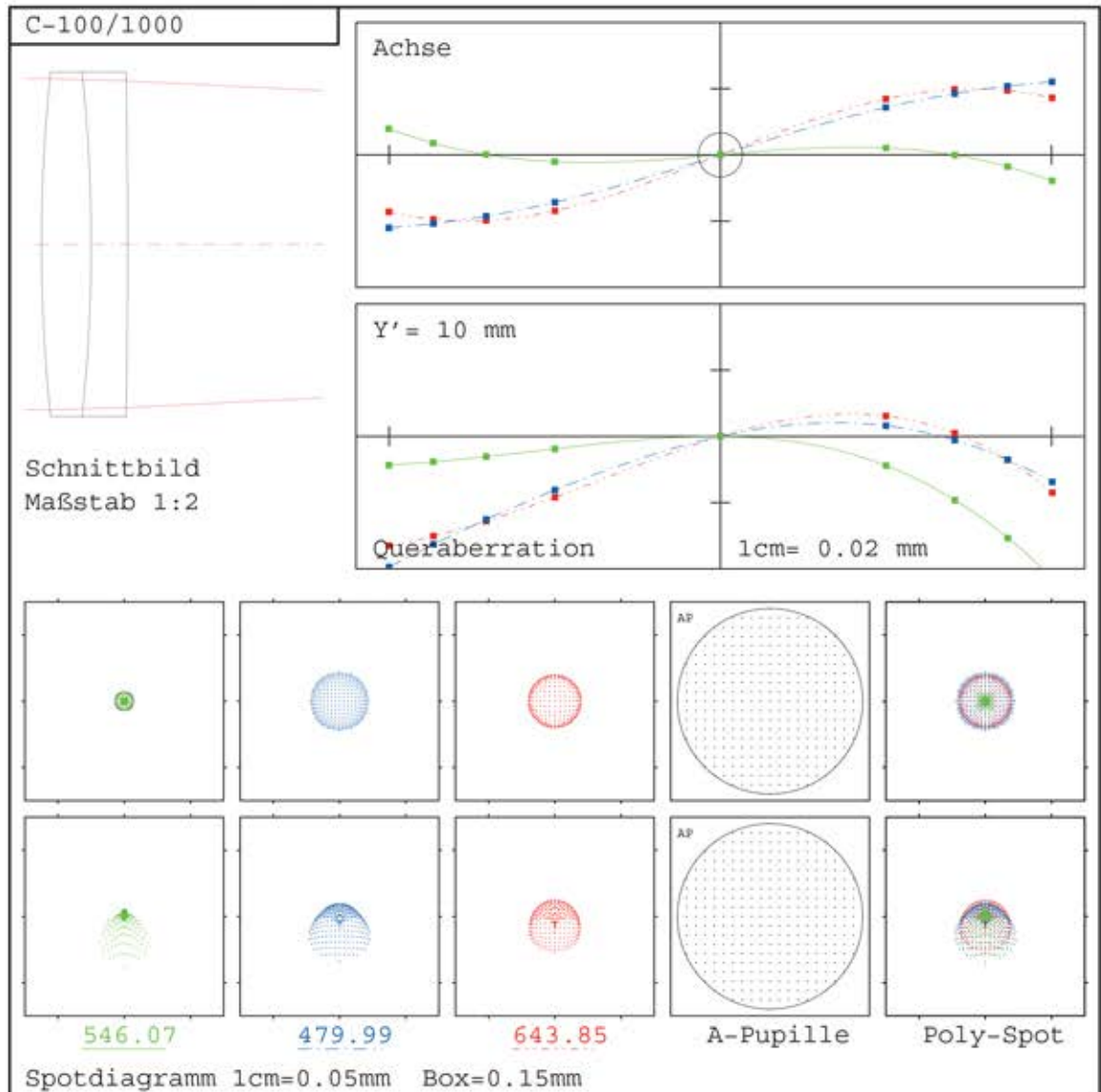


C-100/1000 (anal.)

Analytisches System nach Gl. I.1.26, Seite 29, gleicher Grundaufbau wie auf Seite 70, nur die Radien sind analytisch bestimmt. Durch die Vorgabe $R1 = -R2$ (oder $R3 = \text{Plan}$) ist der Öffnungsfehler für den Achspunkt näherungsweise minimiert (Öffnungsverhältnis, Gläser usw.), doch die Koma ist beträchtlich. Die Achromasie ist eingestellt.

Tab. II.1.2. & Abb. II.1.2. C-100/1000 (mBK7 / mSF2) anal.

Radius	Dis	n_e	A (v)	T (ϑ)	Glastyp			
492.4112								
-492.4112	15.00	1.518720	69.96	0.5068	mBK7			
-2996.1448	11.00	1.652220	33.60	0.5234	mSF2			
Gruppe	n_e	v_{ne}	Δv_{ne}	ϑ_{ne}	f'_L	f'_L/f'_{sys}	rezi	Typ
mBK7	1.51872	63.96		0.5068	477.12	0.4771	2.0959	Sph
mSF2	1.65222	33.60	30.36	0.5234	-905.03	-0.9050	-1.1049	Sph

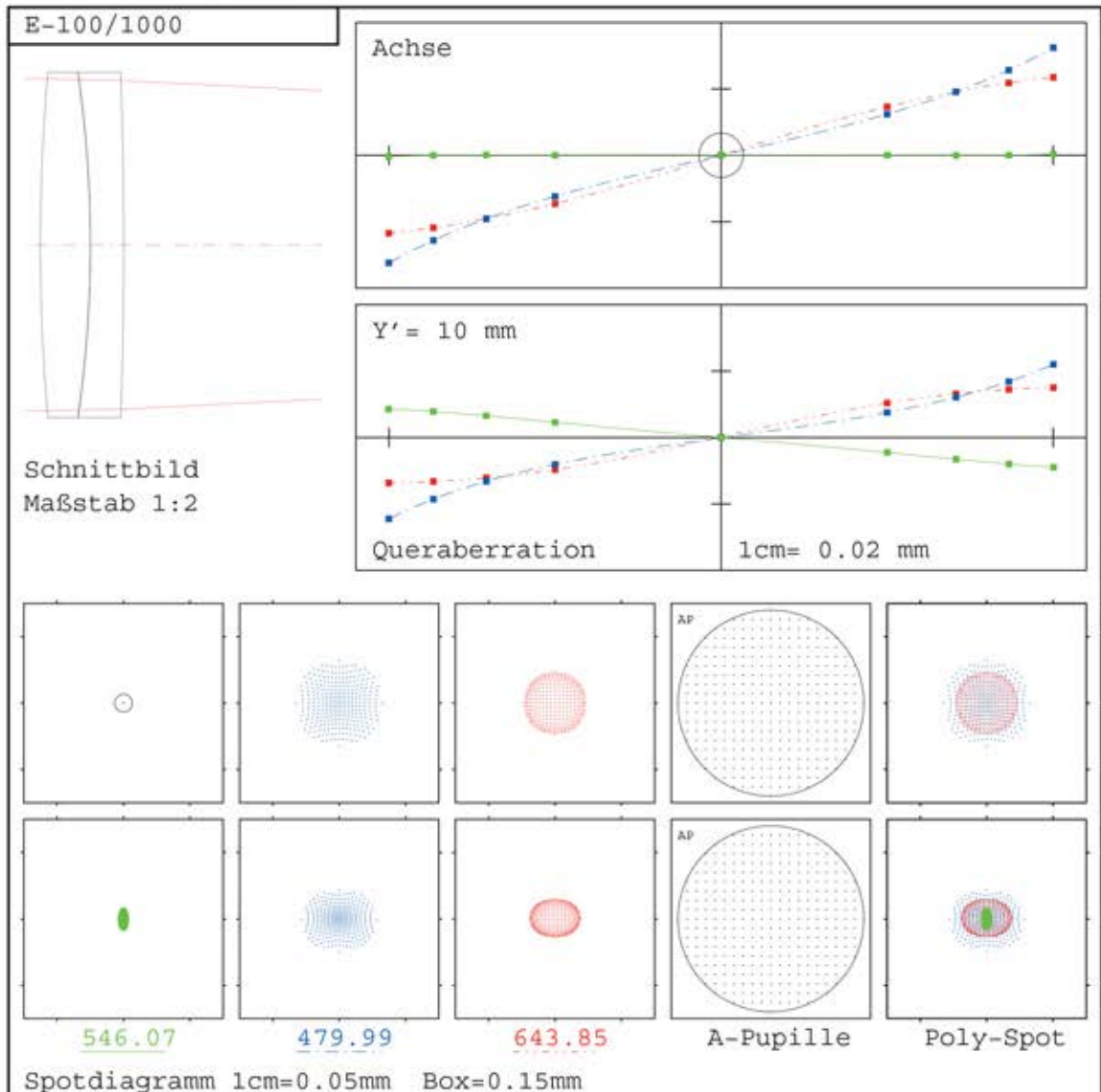


II.1.2. Fraunhofer-Achromat

Der E-Typ hat sich aus dem Ur-Achromaten entwickelt, die Grundform geht auf *Dollond* zurück. Der Luftspalt zwischen den Linsen verbessert die Korrekturmöglichkeiten (Bildgüte), nachteilig sind Reflexbilder und Lichtverluste. Bei unvorsichtigem Umgang können Dezentrierungsfehler (Achskoma) durch Linsenverkipfung auftreten. Die Glasauswahl ist weniger kritisch als bei C-Achromaten. Der Luftspalt ermöglicht völlige Öffnungsfehler- und Komakorrektur. Sinnvoll realisierbar sind Öffnungsverhältnisse von F:10 bis F:20. Bei größeren Objektiven wird das Öffnungsverhältnis, wegen des Farbfehlers, meist auf F:15 bis F:20 beschränkt. Optimiertes System (siehe Abs. I.1.8, Seite 38). [129] S. 169 und [139] S. 132

Tab. II.1.3. & Abb. II.1.3. E-100/1000 (mBK7 + mF2)

Gruppe	n_e	V_{ne}	ΔV_{ne}	ϑ_{ne}	f'_L	f'_L/f'_{sys}	rezi	Typ
mBK7	1.51872	63.96		0.5068	437.84	0.4378	2.2839	Sph
mF2	1.62408	36.12	27.84	0.5220	-775.70	-0.7757	-1.2892	Sph

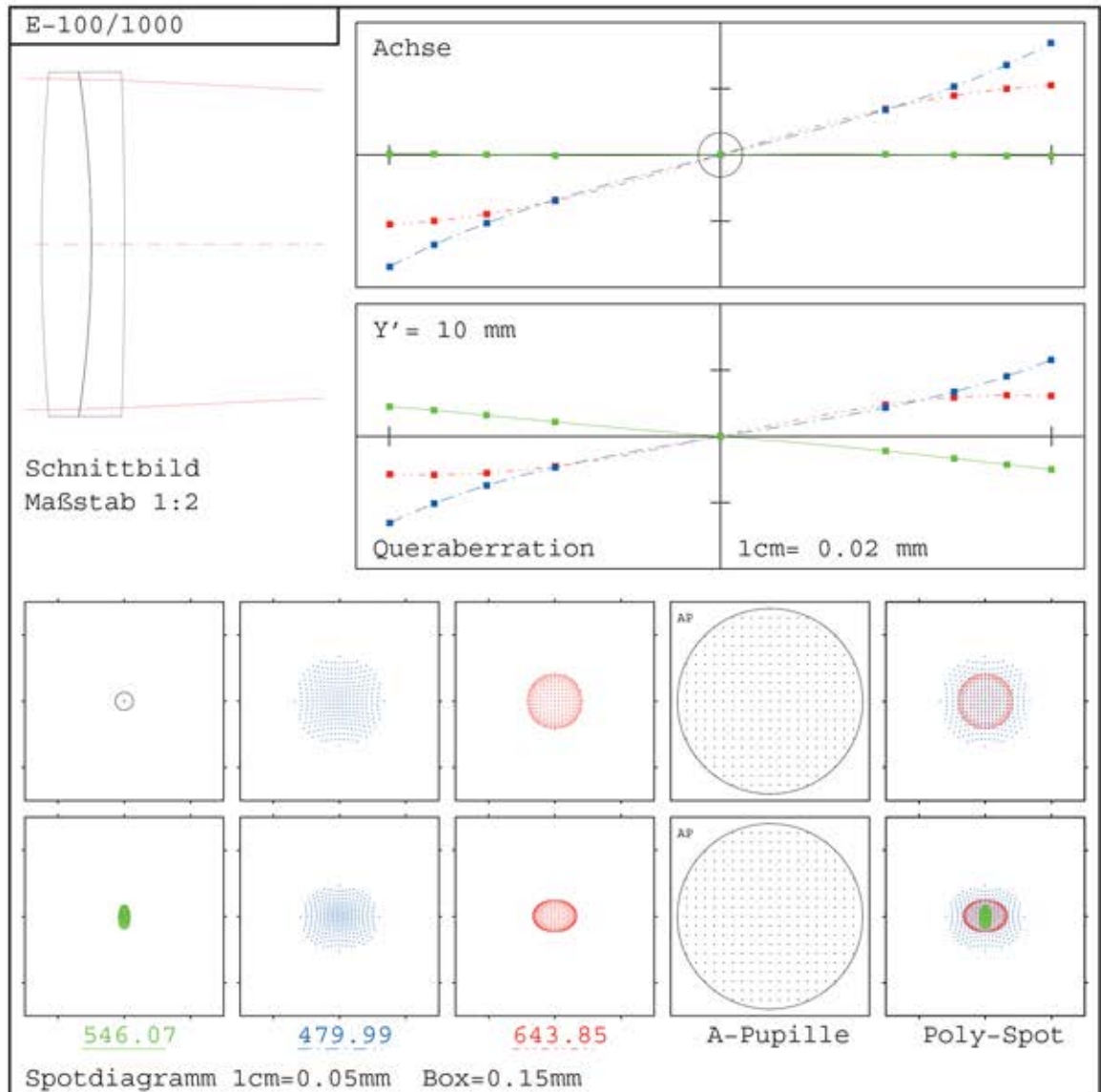


E-100/1000 (anal.)

Analytisches System nach Gl. I.1.27, Seite 29, gleicher Grundaufbau wie auf Seite 72, nur die Radien sind analytisch bestimmt. Der Öffnungsfehler ist für den Achspunkt behoben, die Restkoma ist unbedeutend. Auch die Achromasie ist nahezu eingestellt, eine Optimierung ist nicht unbedingt nötig. Die Dickeneinführung „verschlechtert“ das System nur unbedeutend. Hier zeigt sich die Güte des analytischen Formelsatzes von [451].

Tab. II.1.4. & Abb. II.1.4. E-100/1000 (mBK7 + mF2) anal.

Radius	Dis	n_e	A (v)	T (ϑ)	Glastyp			
607.4743	15.00	1.518720	63.96	0.5068	mBK7			
-359.4382								
-363.7034	0.10	Luftspalt						
-1489.9252	10.00	1.624080	36.12	0.5220	mF2			
Gruppe	n_e	v_{ne}	Δv_{ne}	ϑ_{ne}	f'_L	f'_L/f'_{sys}	rezi	Typ
mBK7	1.51872	63.96		0.5068	437.66	0.4377	2.2849	Sph
mF2	1.62408	36.12	27.84	0.5220	-773.63	-0.7736	-1.2926	Sph

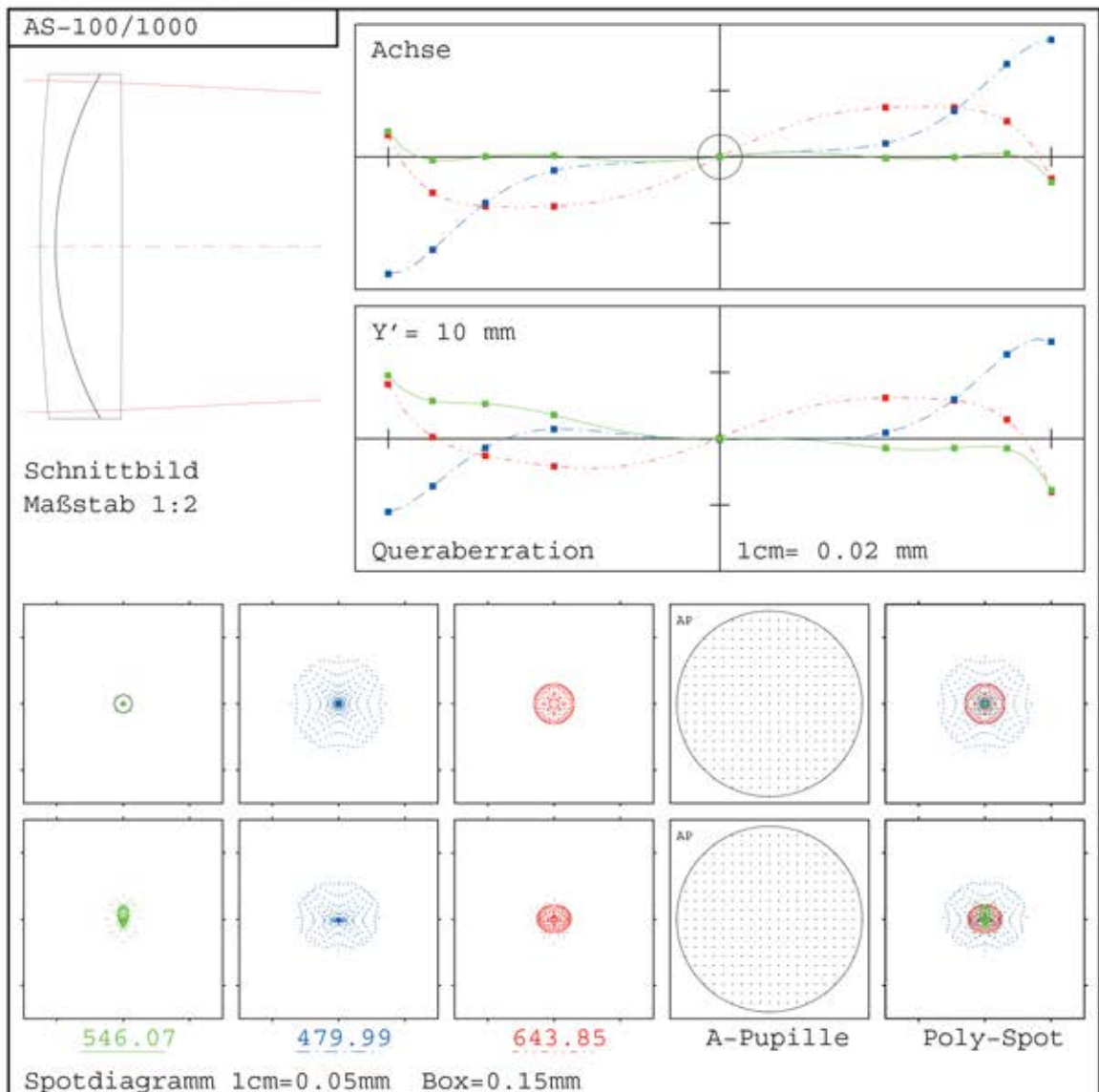


II.1.3. Verbessertes Achromat (Sonnefeld)

Das Objektiv besteht aus zwei Linsen, diese sind ebenfalls durch einen Luftspalt getrennt. Das sekundäre Spektrum wird durch den Einsatz des KzF2 im Vergleich zum Fraunhofer-Objektiv vermindert. Die Differenz der rel. Teildispersionen zeigt dies, aber die deutlich geringere Differenz der Abbe-Zahlen bedingt eine wesentlich höhere Anspannung der Linsengeometrie. Der dadurch auftretende Zonenfehler (Öffnungsfehler höherer Ordnung) erfordert die Deformation einer Fläche. Der AS-Typ ist für mittlere und große Refraktorsysteme gut geeignet. Der Farblängsfehler ist im Vergleich zum C- oder E-Objektiv weniger störend. Das AS wird bis Durchmesser 200 mm ausgeführt mit einem Öffnungsverhältnis von F:10 bis F:20, wobei F:10 bis F:15 auf kleinere Öffnungen begrenzt ist. [129] S. 174 und [139] S. 133

Tab. II.1.5. & Abb. II.1.5. AS-100/1000 (jKzF2 + jBK7)

Gruppe	n_e	v_{ne}	Δv_{ne}	ϑ_{ne}	f'_L	f'_L/f'_{sys}	rezi	Typ
jKzF2	1.53187	51.54		0.5117	-252.38	-0.2524	-3.9623	Sph
jBK7	1.51859	63.87	12.33	0.5067	201.27	0.2013	4.9684	Sph,SC,B2,B3



Zusammenfassung / Bemerkungen

Das AS-Objektiv wurde 1926 von *August Sonnefeld* aus dem A-Objektiv (Abs. II.2.1, Seite 77f.) abgeleitet. Durch eine Vergrößerung der Abbe-Zahl-Differenz, werden höhere Lichtstärken erreicht, aber keine Apochromasie. mehr. Das KzF2 ist eines der Gläser, das durch die Arbeiten von *Otto Schott* (1851-1935) und *Ernst Abbe* gezielt für die Minimierung des sekundären Spektrums entwickelt wurde. Diese Zusammenarbeit begann 1879 und führte 1881 zu den ersten neuen Gläsern mit anormaler Teildispersion. Diese Gläser, vorerst nur in kleinen Abmessungen verfügbar, bildeten mit CaF_2 aus natürlichen Vorkommen die Grundlage für die Mikroskop-Apochromate, welche erstmals 1886 angeboten wurden. Mit der steigenden Schmelzmasse und dem Einstieg des *Zeiss-Werkes* in die Astrooptik wurden sie auch gezielt für die Verbesserung der Astrooptik eingesetzt. Das KzF2 ist in seiner Beständigkeit noch mit den Kron-Gläsern vergleichbar, da es kein extremes Sonderglas ist. Die Transmission ist im blauen Bereich des Spektrums schon leicht beschränkt.

Die durch vier Glas-Luft-Flächen auftretenden Lichtverluste und besonders der von den beiden nahezu gleichen Luftspaltradien erzeugte Reflex führen in der Bildebene zu Streulicht. Eine Kontrastminderung ist die Folge. Diese Nachteile treten auch beim Fraunhofer-Achromaten auf und können durch den Einsatz von T-Belägen (seit 1935) gemindert werden. Diese Beläge verbessern, wenn sie klimabeständig aufgedampft werden, die chemische Beständigkeit der Frontlinsen. Beim AS kommt hinzu, dass die beiden Innenradien sehr angespannt sind. Dies hat große Brechungswinkel zur Folge, welche für den erwähnten Zonenfehler verantwortlich sind.

Die Bildfeldwölbung dieser drei Systeme (100/1000) liegt bei ca. -365 mm . Durch den relativ großen Farbfehler (sekundäres Spektrum) hat die Bildfeldwölbung nur einen untergeordneten Einfluss. In der Feldabbildung dominiert ebenfalls der Farbfehler.

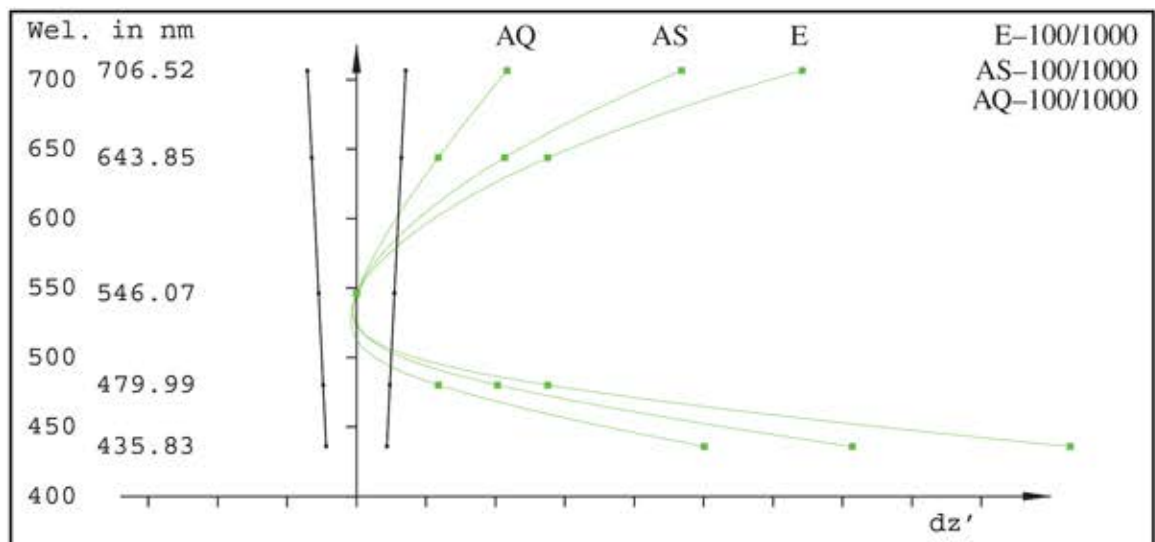


Abb. II.1.6. zeigt den Farblängsfehler eines AS- und eines E- im Vergleich zum (AQ-100/1000 Abs. II.2.3, Seite 88). Eine Einheit in der Abszisse (dz') beträgt 0.2 mm . Für die 100/1000 Systeme sind dies zwei wellenoptische Schärfentiefen ($T_{0,8} = 0.1092\text{ mm}$; V-Linien).

Lit.: [101, 102, 103, 104, 105, 112, 119, 122, 127, 128, 129, 136, 139, 146, 151, 153, 154, 161, 162, 163, 170, 172, 173, 175, 192, 195, 202, 323, 324, 402, 411, 451, 454, 469, 493, 513, 535, 722, 723, 724, 725]