

---

# Synthese eines Mikroskopobjektivs nach dem Lister - Theorem

Witold Hackemer\*

Im Jahre 2018 startete bei Qioptiq Photonics in Göttingen die Entwicklung eines Schulungsprogramms zum Thema der theoretischen und praktischen Aspekte der Synthese optischer Systeme im klassischen und im wissenschaftlichen Instrumentenbau. Das ausgewählte und hier vorgestellte Submodul aus dem Bereich der Grundformen der Mikroskopobjektive könnte dem Leser interessant erscheinen. Die verwendeten Symbole und Terme bzw. ihre Definitionen entsprechen jenen der Beiträge des Autors in JOF 2017, 2015, 2014, 2012.

Die meisten mikroskopischen "Lister"- Objektive sind heute tatsächlich keine Systeme, die nach dem *Listerschen* Theorem errechnet wurden. Es gab Gründe, warum man im Zuge der Weiterentwicklung zweigliedriger Mikroskopobjektive mit  $A_{\max} \sim 0.25$  mittels neuerer Rechenmethoden [z.B. nach dem *Matching-Principle* (Conrady S.662; Johnson S.150; Boutry, S.145 & 415; Kingslake S.178) mit der Zuhilfenahme eines *Double-Graphen* (Kingslake), und noch später durch die möglich gewordene simultane Beeinflussung vieler Systemvariablen in den Optikrechenprogrammen] nach bezüglich ihrer Leistung im Achsbild und im Feld verbesserten Lösungen gesucht hat.

Bevor wir zu den moderneren Methoden der Synthese schreiten müssen wir uns mit der *Listerschen* Methode bekannt machen. Sie ist

---

\* Witold Hackemer, Senior Optical Designer, Qioptiq Photonics GmbH &Co. KG, D-37081 Göttingen

von fundamentaler theoretischer Bedeutung, deswegen didaktisch sehr wichtig aber auch interessant.

In dem Beitrag „75 Jahre Planachromate“ im JOF 2014, S.1 – 44, lesen wir:

<sup>2)</sup> Mit den einzigen Glastypen der damaligen Zeit konnten achromatisierte Verbundgruppen hergestellt werden, die im Bereich kleiner Dimensionen eine handwerklich bedingt (*H.v.Deyl*) plankonvexe, der *Littrowschen* ähnliche Außenform hatten. Solche Linsenformen waren seit 1807 die ersten achromatischen Mikroskopobjektive, die bei dem Versuch ihre Apertur übermäßig ansteigen zu lassen, mit einem verheerenden Sph - Zonenfehler reagierten. Es ist *Joseph Jackson Listers* Verdienst gezeigt zu haben, dass solche Formen über zwei konjugierte Punktepaare eingestellter sphärischer Aberration verfügen, was im Aufbau zu einem zusammengesetzten Objektiv quasi planmäßig korrigierten Öffnungsfehlers zu höherer numerischer Apertur geführt hat (Nutzung eines reellen und eines virtuellen Punktepaars). Es soll erwähnt werden, dass seit 1795 Methoden trigonometrischer Strahlendurchrechnung zentrierter optischer Systeme Einzug in die Materie der Instrumentenoptik gefunden haben (*G.S.Klügel*). Ebenfalls die der Theorie von *Karl Weierstrass* (1856) (7) zu Grunde liegende zeichnerische Methode konzentrischer, dem Brechzahl sprung proportionaler Kugelflächen (*Th.Young*, 1807).

Da dem Autor keine bekannte Literaturstelle mit einer didaktisch ausreichend guten Ausarbeitung der Methode nach *Lister* bekannt ist (einiges kann man bei *Boutry* nachlesen), sollte hier der Weg einer praktischen Rechenetüde mit Erklärungen gewählt werden.

In der rechnenden Optik ist es üblich von der langen zu der kurzen Konjugierten zu rechnen, womit im Folgenden die Bezeichnungen objektseitig/bildseitig für die Rechnungsrichtung RR gelten sollen.

1. Wir suchen nach einer achromatischen Verbundgruppe, die wie oben angedeutet über zwei konjugierte Punktepaare (Objekt- und Bildpunkt) eingestellter sphärischer Aberration  $Sph_{h=1} = 0$  für die Hauptfarbe  $e = 546.074\text{nm}$  verfügt. Für die Einstellung des

Farbortsfehlers  $CHL = ds'_{F,C} = 0$  wählen wir a priori die relative Pupillenzone  $h_z = 0.7071$ . Die objektseitige Schnittweite der Abbildung zum reellen Bildpunkt soll  $s_o = 150$  mm und die objektseitige sowie bildseitige numerische Apertur entsprechend  $A = 0.0275$  und  $A' = 0.110$  betragen. Nach der *Abbeschen* Sinusbedingung hätten wir damit einen Abbildungsmaßstab von  $\beta' = -0.25$ .

Unter Nutzung von Standardgläsern N-BaK2 und N-F2 ergibt sich eine folgende Systemstruktur der Brennweite  $f_c = 30$  bei dem Eintrittspupillendurchmesser  $D_{EP} = 8.25$  an der ersten Linsenfläche. Der Bildpunkt liegt in der *Gaußschen* Bildebene GBE für die Linie „e“ (Schnittweite  $s'_k = 35.191378$ ).

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	150.000000		0.000000
1	Standard		Infinity	0.000000		4.126561
STO	Standard		Infinity	0.000000	P	4.126561
3	Standard	G1 --->	15.504404	V	2.500000	N-BAK2
4	Standard		-10.857427	V	1.200000	N-F2
5	Standard		-105.087934	V	35.191378	M
6	Standard		Infinity	0.000000		0.008043
IMA	Standard		Infinity	-		0.008043

Bild 1. Systemdaten SphaCorr-Achr-8x30\_for-Lister\_s150\_Pu.zmx (Config. No.1)

Dieses System besitzt eine zweite virtuelle Objektlage  $s_o = -29.151301$ , bei welcher der Öffnungsfehler der Linie "e" ebenfalls korrigiert ist  $Sph_{h=1} = 0$ . Die bildseitige Schnittweite liegt hier bei  $s'_k = 12.454306$  und der Abbildungsmaßstab beträgt  $\beta' = +0.508$ .

Surf:	Type	Comment	Radius	Thickness	Class	Semi-Diameter
OBJ	Standard		Infinity	-29.151301	V	0.000000
1	Standard		Infinity	-29.920837	V	3.226221
STO	Standard		Infinity	29.920837	P	6.537608
3	Standard	G1 --->	15.504404	V	2.500000	N-BAK2
4	Standard		-10.857427	V	1.200000	N-F2
5	Standard		-105.087934	V	12.454306	M
6	Standard		Infinity	0.000000		0.001996
IMA	Standard		Infinity	-		0.001996

Bild 2. Systemdaten SphaCorr-Achr-8x30\_for-Lister\_s150\_Pu.zmx (Config. No.2)

Die folgenden Grafen (Bild 3 und 4) zeigen den Korrektionszustand in beiden Konfigurationen.

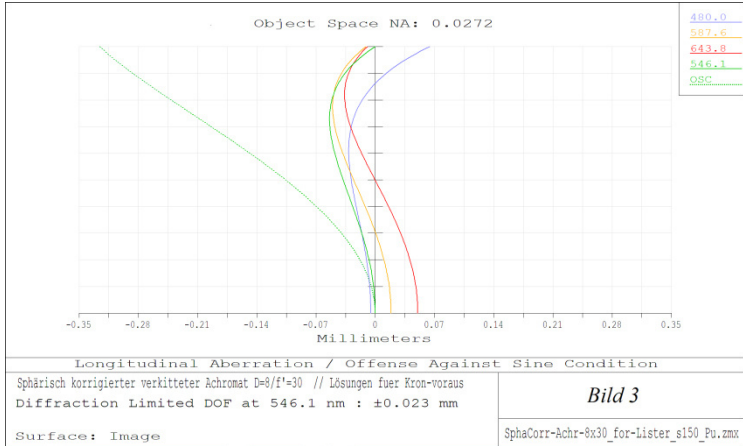


Bild 3. Korrektionszustand *SphaCorr-Achr-8x30\_for-Lister\_s150\_Pu.zmx*  
(Config. No.1)



Bild 4. Korrektionszustand *SphaCorr-Achr-8x30\_for-Lister\_s150\_Pu.zmx*  
(Config. No.2)

Das hier in zwei Konfigurationen gezeigte System verfügt, konform mit dem *Listerschen Theorem*, über zwei konjugierte Punktepaare korrigierten Öffnungsfehlers. Bis zu der Zeit von *Ernst Abbe* um 1870 nannte man sie *aplanatische* Punkte. Der praktische Nutzen der o.g. Erkenntnis liegt in der intelligenten Verwendung dieser für einen sachgerechten Bau von Mikroskopobjektiven höherer NA.

Die Einstellung der Pupillenlage und Größe der zweiten Konfiguration erfolgt nach folgenden Kriterien. Demnach muss die objektseitige numerische Apertur der Verbundgruppe in der zweiten Konfiguration den Wert der bildseitigen numerischen Apertur der Verbundgruppe in der ersten Konfiguration einnehmen:

$A_{\text{Conf.2}} = A'_{\text{Conf.1}} = 0.11$ ; zusätzlich wir die Aperturblende STO des Systems in der Konfiguration No.2 in den objektseitigen Fokuspunkt der Verbundgruppe verlagert, was zu der paraxialen Telezentrie für die Hauptfarbe in ihrem Bildraum führt.

2. Nun folgen wir dem *Listerschen Theorem* und definieren den *Gaußschen Bildpunkt* des Systems der ersten Konfiguration (Gruppe G1) zum Objektpunkt des Systems in der zweiten Konfiguration (Gruppe G2). Dies geschieht, indem wir das System der Conf.2 dem System der Conf.1 nachschalten.

Surf:Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter
OBJ Standard		Infinity	150.000000		0.000000
STO Standard		Infinity	0.000000		4.081510
2 Standard	G1 --->	15.504404	2.500000	N-BAK2	4.096502
3 Standard		-10.857427	1.200000	N-F2	4.004691
4 Standard	EXPP(G1) = -37.564794	-105.087934	35.191378	M	3.903329
5 Standard	-29.151301 - 29.920837 =	Infinity	-29.151301		0.007122
6 Standard	= sEP(G2) = -59.072138	Infinity	-29.920837		3.227966
7 Standard	sEP(G2) soll EXPP(G1)	Infinity	29.920837	P	6.538426
8 Standard	= -37.564794 sein;	15.504404	2.500000	N-BAK2	3.191286
9 Standard	(G2) Scal-Faktor soll =	-10.857427	1.200000	N-F2	2.934645
10 Standard	= 37.564794/59.072138 =	-105.087934	12.454306	M	2.743774
11 Standard	= 0.6359139	Infinity	0.000000		0.005739
IMA Standard		Infinity	-		0.005739

Bild 5. Isoplanatisches Lister-Objektiv 8/0.22; Systemdaten F-  
*Lister\_s150\_Pu\_b\_zmx*