Inhalte der Lehrveranstaltung

1. Theorie der Abbildung
2. Geometrische Strahldurchrechnung und Aberrationen
3. Wellenmodell
4. Analytische Bildfehlertheorie

   Anwendungsbeispiele: Einzellinse und Einzellspiegel

5. Optikdesign mit ZEMAX
6. Systematik des Entwurfs optischer Systeme
   1. Grundsätzliche Einteilung der Vorgehensweise
   2. Klassifizierung optischer Systeme
   3. Startstufen der analytischen Synthese
7. Beispiele der Synthese einfacher Optiken
   1. Spezielle Kegelschnitte zur öffnungsfehlerfreien Abbildung (Spezielle 2-Spiegelsysteme)
   2. Simpletansatz (2-linsig)
   3. Simpletvorrechnung (2-linsig)

Einzellinse und Einzelspiegel

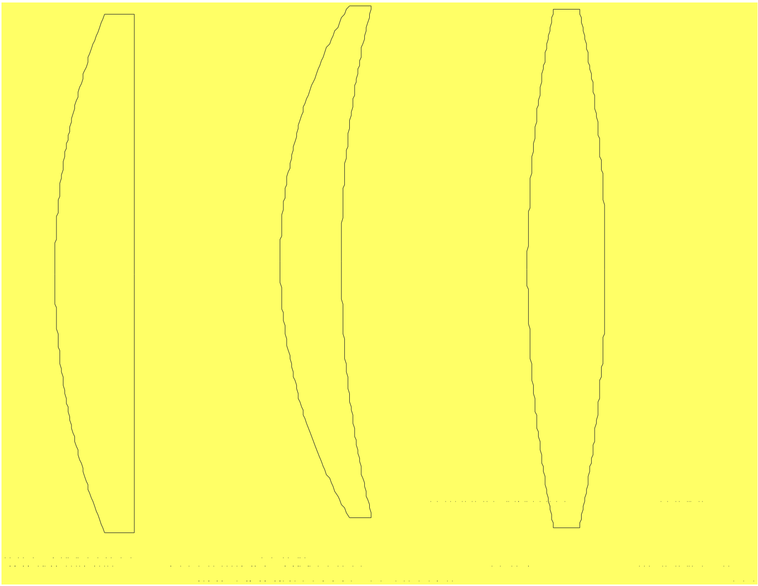
Ziel: Minimierung der Bildfehler 3. Ordnung

1.Einzellinse

1. 1 Optimale Durchbiegung von Einzellinsen

Ausgangspunkt: Linsenteilkoeffizienten der Bildfehler 3.Ordnung

B,K,C,P,E,L,H



?

Seidelsche Bildfehler (Querabweichungen 3. Ordnung)

$$\Delta x'_{\mathrm{B}} = -\frac{1}{2}\,\frac{x_{\mathrm{P1}}\,(x_{\mathrm{P1}}^2 + y_{\mathrm{P1}}^2)\,s_1^4\,\beta'}{n_1\,p_1^3}\sum_k B_k$$

Seidelscher

(1.1)

$$\Delta y'_{\mathrm{B}} = -\frac{1}{2}\,\frac{y_{\mathrm{P1}}\,(x_{\mathrm{P1}}^2 + y_{\mathrm{P1}}^2)\,s_1^4\,\beta'}{n_1\,p_1^3}\sum_k B_k$$

Öffnungsfehler

$$\Delta x'_{\mathrm{K}} = -\frac{y_1\,x_{\mathrm{P1}}\,y_{\mathrm{P1}}\,s_1^2\,\beta'}{p_1^2}\sum_k K_k$$

Seidelsche

(1.2)

$$\Delta y'_{\mathrm{K}} = -\frac{1}{2}\,\frac{y_1\,(x_{\mathrm{P1}}^2 + 3y_{\mathrm{P1}}^2)\,s_1^2\,\beta'}{p_1^2}\sum_k K_k$$

Koma

$$\Delta x'_{\mathrm{C,P}} = -\frac{1}{2}\,\frac{n_1\,y_1^2\,x_{\mathrm{P1}}\,\beta'}{p_1}\sum_k (C_k + P_k)$$

Seidelsche Bildfeldfehler

(1.3)

$$\Delta y'_{\mathrm{C,P}} = -\frac{1}{2}\,\frac{n_1\,y_1^2\,y_{\mathrm{P1}}\,\beta'}{p_1}\sum_k (3\,C_k + P_k)$$

Astigmatismus + Petzvalwölbung

$$\Delta x'_{\mathrm{E}} = 0$$

Seidelsche

(1.4)

$$\Delta y'_{\mathrm{E}} = -\frac{1}{2}\,\frac{n_1^2\,y_1^3\,\beta'}{s_1^2}\sum_k E_k$$

Verzeichnung

Flächenteilkoeffizienten – Linsenteilkoeffizienten

Seidelsche Flächenteilkoeffizienten (Flächenteilkoeffizienten 3. Ordnung)

$$B_k = \omega_k^{\;4} Q_k^{\;2}\; \delta\left(\tfrac{1}{n\,s}\right)_k \quad mit: \quad \delta\left(\tfrac{1}{n\,s}\right)_k = \tfrac{1}{n_k'\,s_k'} - \tfrac{1}{n_k\,s_k} \; und \; \omega_k = \frac{h_k}{h_{k-1}}$$

Öffnungsfehler

$$K_k = c_1\; \omega_k^{\;3} \omega_{pk}\; Q_k\; Q_{pk}\; \delta\left(\tfrac{1}{n\,s}\right)_k \quad mit: \quad \frac{1}{c_1} = \frac{1}{a_1} - \frac{1}{a_{p1}} \; und \; \omega_{pk} = \frac{h_{pk}}{h_{pk-1}}$$

Koma

$$C_k = c_1^{\;2} \omega_k^{\;2} \omega_{pk}^{\;2} Q_{pk}^{\;2}\; \delta\left(\tfrac{1}{n\,s}\right)_k$$

Astigmatismus

$$P_k = -\frac{1}{r_k}\,\delta\left(\frac{1}{n}\right)_k \quad mit \quad \delta\left(\frac{1}{n}\right)_k = \frac{1}{n_k'} - \frac{1}{n_k}$$

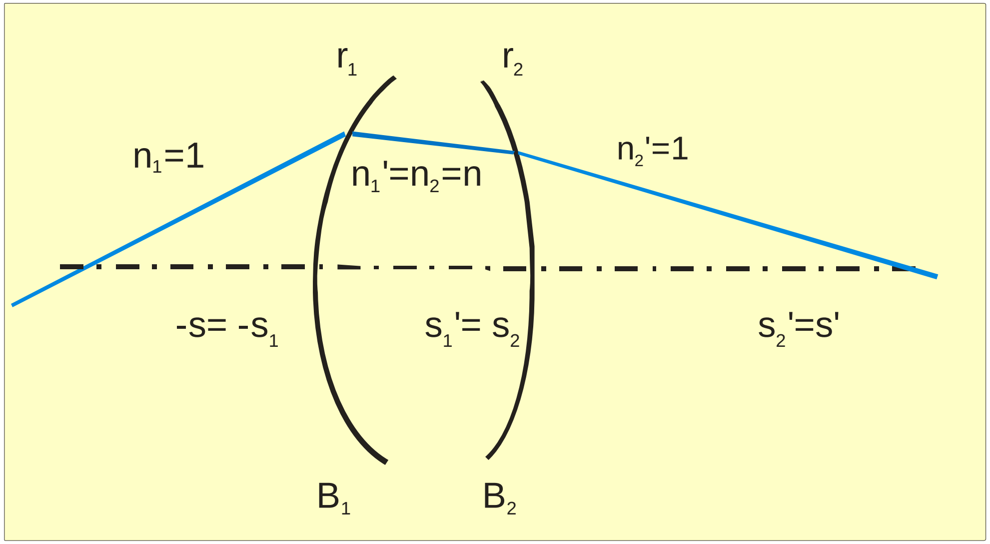
Petzvalwölbung

$$E_k = c_1^{\;3} \omega_k\; \omega_{pk}^{\;3} \left[\; Q_{pk}^{\;2}\; \delta\left(\tfrac{1}{n\,s}\right)_k - Q_{pk}\left(Q_k - Q_{pk}\right) \delta\left(\tfrac{1}{n\,s_p}\right)_k \;\right] \quad mit: \quad \delta\left(\tfrac{1}{n\,s_p}\right)_k = \tfrac{1}{n'\,s_p'} - \tfrac{1}{n\,s_p}$$

Verzeichnung

Durchbiegung Q

Modell: dünne Einzellinse $d \rightarrow 0$, $s = a$, $s' = a'$



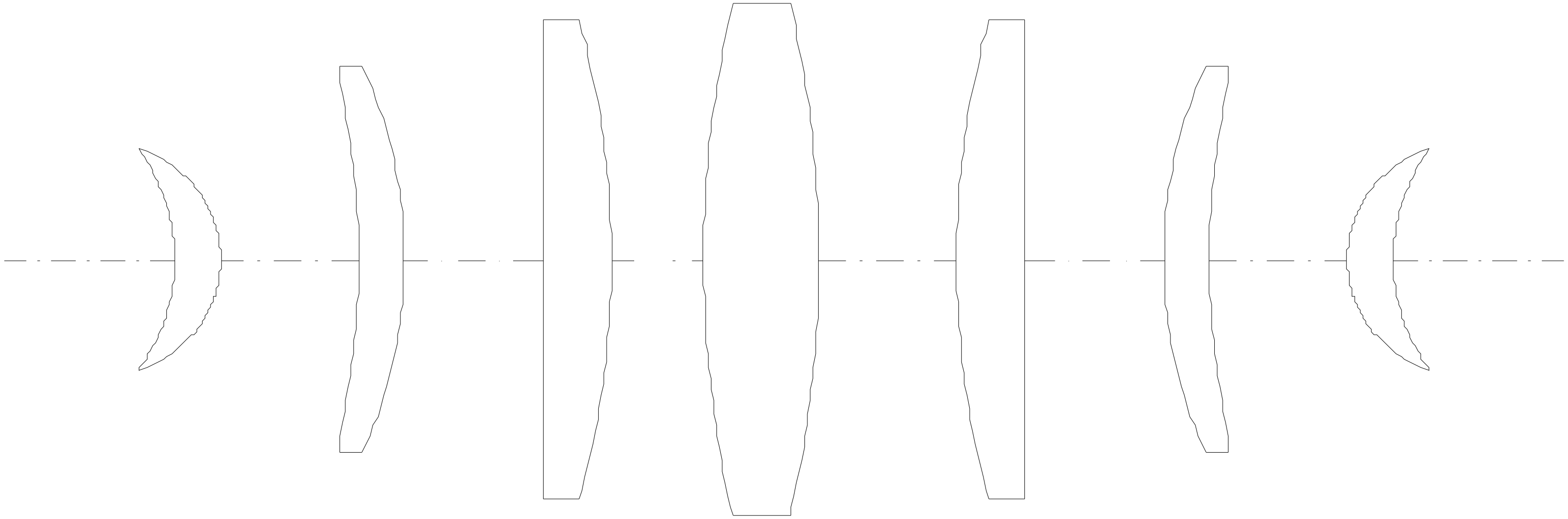
Durchbiegung Q= Summe der Abbeschen Invarianten Q_1 und Q_2

$$Q = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - F' - \frac{2}{s}$$

Monotone Änderung der Durchbiegung

(F‘=1mm^{-1}, s = ∞, n = 1,5)

Q/mm^{-1} -15 -6 -3 0 3 6 15



Hinweis: Formfaktor X (Groß) verschieden von Q

Flächenteil -> Linsenteilkoeffizient

Beispiel: **Flächenteilkoeffizient** für den Öffnungsfehler

$$B_k = \omega_k^{\,4} Q_k^{\,2}\ \delta\left(\frac{1}{n\,s}\right)_k \quad mit: \quad \delta\left(\frac{1}{n\,s}\right)_k = \frac{1}{n_k{}'\,s_k{}'} - \frac{1}{n_k\ s_k}$$

Linsenteilkoeffizient = Summe der **Flächenteilkoeffizienten**

$$B = B_1 + B_2 = Q_1^{\,2}\left(\frac{1}{n\,s'_1} - \frac{1}{s}\right) + Q_2^{\,2}\left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{n\,s'_1}\right)$$

mit:

$$\boxed{Q = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} - F' - \frac{2}{s}}$$

$$F' = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$$

$$\left(\omega_1 = \frac{h_1}{h_0} = 1, \ \omega_2 = \frac{h_2}{h_1} = 1 \right)$$

$$B = F'\,b \quad mit: \quad b = \frac{n+2}{4n} Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{a} + F'\right) Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n\,F'}{n-1}\right)^2$$

Einzellinse

Linsenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die dünne Einzellinse

dünne Linse: $a = s$, $a_p = s_p$

	$a_p \neq 0$	$a_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = F'b \quad mit: \quad b = \frac{n+2}{4n}Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{a} + F'\right)Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n\,F'}{n-1}\right)^2$	
2. Koma	$K = F'\left(cb + \frac{1}{2}k\right)$ $k = \frac{n+1}{n}Q - \left(\frac{2}{a} + F'\right)$	$K = \frac{1}{2}F'\,k$
3. Astigmatismus	$C = F'\left(c^2\,b + c\,k + 1\right)$ $\frac{1}{c} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a'_p}$	$C = F'$
4. Petzvalwölbung	$P = \frac{F'}{n}$	
5. Verzeichnung	$E = F'\left(c^3\,b + \frac{3}{2}c^2\,k + \frac{3n+1}{n}c\right)$	0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	$L = \frac{F'}{\nu}$	$\nu = \frac{n-1}{\Delta n}$
7. Farbquerfehler	$H = c\,\frac{F'}{\nu}$	0

a) Einzellinse ohne zusätzliche Blende

Einzellinse

Linsenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die dünne Einzellinse

dünne Linse: $a = s$, $a_p = s_p$	$a_p \neq 0$	$a_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = F' b \quad mit: \quad b = \frac{n+2}{4n} Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{a} + F'\right) Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n F'}{n-1}\right)^2$	
2. Koma	$K = F'\left(cb + \frac{1}{2}k\right)$ $k = \frac{n+1}{n} Q - \left(\frac{2}{a} + F'\right)$	$K = \frac{1}{2} F' k$
3. Astigmatismus	$C = F'\left(c^2 b + c k + 1\right)$ $\frac{1}{c} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a'_p}$	$C = F'$
4. Petzvalwölbung	$P = \frac{F'}{n}$	
5. Verzeichnung	$E = F'\left(c^3 b + \frac{3}{2} c^2 k + \frac{3n+1}{n} c\right)$	0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	$L = \frac{F'}{\nu}$	$\nu = \frac{n-1}{\Delta n}$
7. Farbquerfehler	$H = c \frac{F'}{\nu}$	0

1. Zur Betrachtung des Öffnungsfehlers

A) **Sonderfall:** Öffnungsfehler = 0

$$Q_{1,2} = \frac{n}{n+2}\left(\frac{2}{s} + F'\right) \pm \sqrt{\left(\frac{n}{n+2}\right)^2 \left(\frac{2}{s} + F'\right)^2 - \frac{n}{n+2}\left(\frac{nF'}{n-1}\right)^2}$$

Für spezielle Schnittweiten existieren maximal 2 Lösungen

Fragestellungen:

1.Kann eine reelle Abbildung öffnungsfehlerfrei realisiert werden??

2.Kann ein unendlich ferner Achspunkt öffnungsfehlerfrei abgebildet werden?

Untersuchung der öffnungsfehlerfreien Abbildungsmöglichkeit

A) **Sonderfall:** Öffnungsfehler = 0

1.Kann eine reelle Abbildung öffnungsfehlerfrei realisiert werden??

Beispiel:

n= 1.5
F= 1
Forderung: |s| > f'

Einsetzen der Forderung in den Wurzelausdruck und Lösung der quadratischen Ungleichung

$$Q_{1,2} = \frac{n}{n+2}\left(\frac{2}{s} + F'\right) \pm \sqrt{\left(\frac{n}{n+2}\right)^2 \left(\frac{2}{s} + F'\right)^2 - \frac{n}{n+2}\left(\frac{nF'}{n-1}\right)^2}$$

$$\left(\frac{n}{n+2}\right)^2 \left(\frac{2}{s} + F'\right)^2 - \frac{n}{n+2}\left(\frac{nF'}{n-1}\right)^2 \geq 0$$

$$mit:\ |s| > \frac{1}{F'}$$

Lösung:

-0.358258 <= s < 0 || 0 < s <= 0.558258

Keine reelle Abbildung öffnungsfehlerfrei möglich!!

1. Zur Betrachtung des Öffnungsfehlers

A) **Sonderfall:** Öffnungsfehler = 0

$$Q_{1,2} = \frac{n}{n+2}\left(\frac{2}{s} + F'\right) \pm \sqrt{\left(\frac{n}{n+2}\right)^2 \left(\frac{2}{s} + F'\right)^2 - \frac{n}{n+2}\left(\frac{nF'}{n-1}\right)^2}$$

Für spezielle Schnittweiten existieren maximal 2 Lösungen

Fragestellungen:

1.Kann eine reelle Abbildung öffnungsfehlerfrei realisiert werden?? **nein!**

2.Kann ein unendlich ferner Achspunkt öffnungsfehlerfrei abgebildet werden?

B) Sonderfall: Öffnungsfehlerminimum

$B = F'b$ mit: $b = \frac{n+2}{4n} Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{s} + F'\right) Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n F'}{n-1}\right)^2$

$B = B_{min}$!

$\Downarrow$

$$\frac{dB}{dQ} = 0 \rightarrow \frac{db}{dQ} = 0 = \frac{n+2}{2n} Q - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{s} + F'\right)$$

$$\boxed{Q_{B\,\min} = \frac{n}{n+2}\left(\frac{2}{s} + F'\right)}$$

mit $s \neq 0$

Bedingung für Öffnungsfehlerminimum

Für $|s| = \infty$:

$$\boxed{Q_{B\,\min} = \frac{n\,F'}{n+2}}$$

Öffnungsfehlerminimum

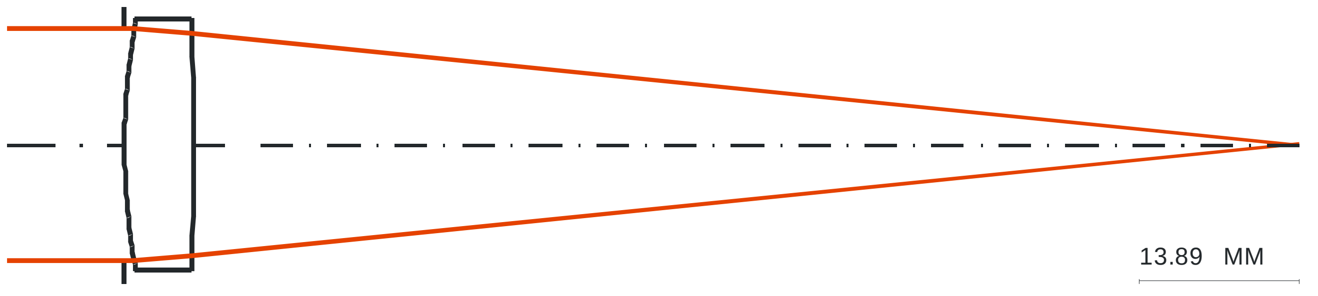
Numerisches Beispiel:

Gegeben: f‘=100mm (F‘ =10dpt)

$|s| = \infty$, n=1.5

Ergebnis: r_1 = 58.3 mm, r_2 = -349,9 mm

Optimierungsergebnis aus realer Strahldurchrechnung (CODE V):



Verknüpfung mit codev.lnk

	RDY	THI	RMD	GLA	CCY	THC	GLC
OBJ:	INFINITY	INFINITY			100	100	
STO:	INFINITY	0.000000			100	100	
2:	58.78767	6.000000		500000.275795	0	100	100
3:	-323.10992	96.597926			0	PIM	
> IMG:	INFINITY	0.000000			100	100	

Einzellinse

Betrachtung der restlichen Fehler mit Hilfe von: K,C,P, E, L, H

Linsenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die dünne Einzellinse

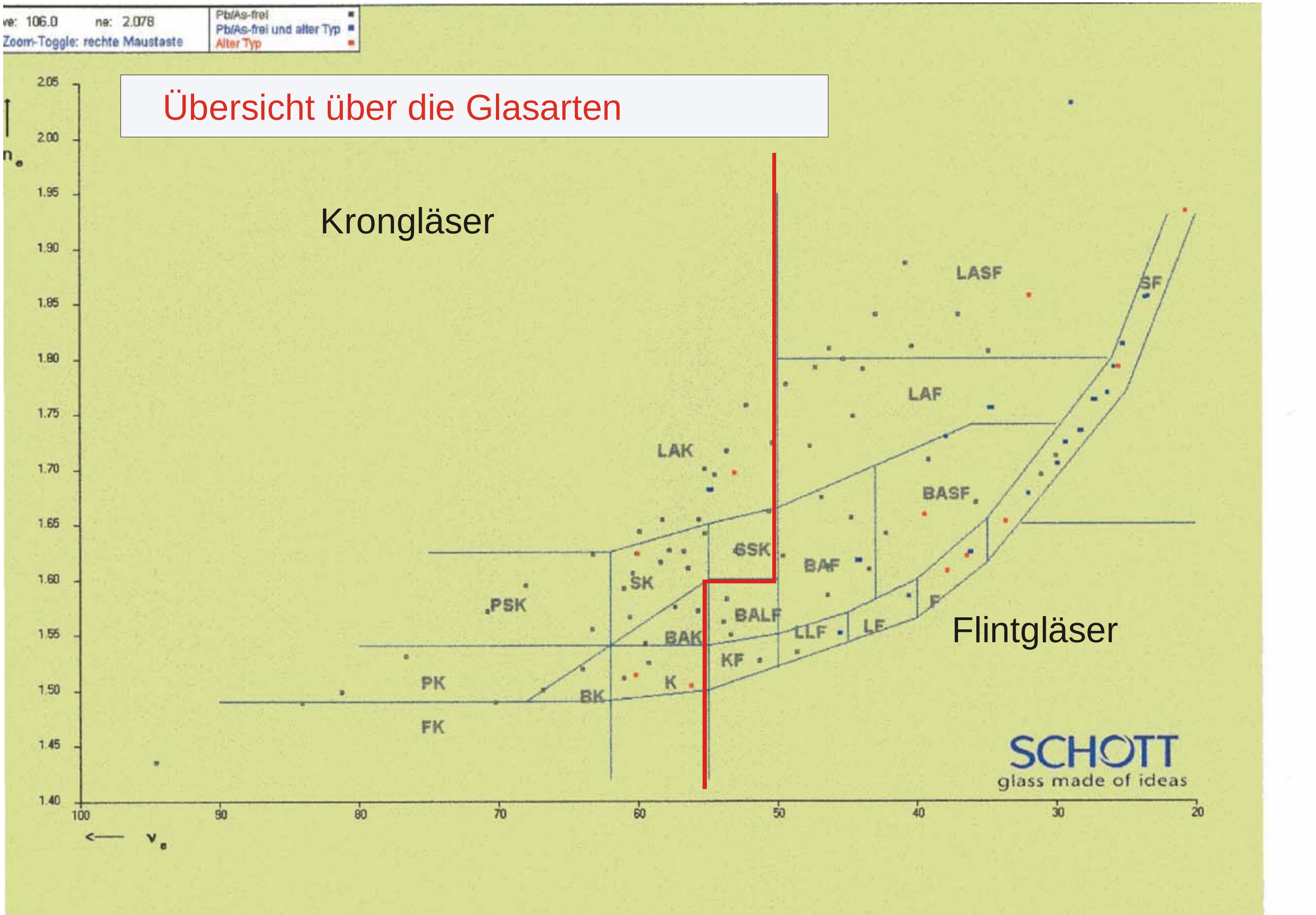
dünne Linse: $a = s$, $a_p = s_p$	$a_p \neq 0$	$a_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = F'\,b \quad mit: \quad b = \frac{n+2}{4n}Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{a} + F'\right)Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n\,F'}{n-1}\right)^2$	
2. Koma	$K = F'\left(cb + \frac{1}{2}k\right)$ $k = \frac{n+1}{n}Q - \left(\frac{2}{a} + F'\right)$	$K = \frac{1}{2}F'\,k$
3. Astigmatismus	$C = F'\left(c^2\,b + c\,k + 1\right)$ $\frac{1}{c} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a'_p}$	$C = F'$
4. Petzvalwölbung	$P = \frac{F'}{n}$	
5. Verzeichnung	$E = F'\left(c^3\,b + \frac{3}{2}c^2\,k + \frac{3n+1}{n}c\right)$	0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	$L = \frac{F'}{\nu}$	$\nu = \frac{n-1}{\Delta n}$
7. Farbquerfehler	$H = c\,\frac{F'}{\nu}$	0

Hinweis auf aplanatische Schnittweiten (Punkte)!

Fallen Öffnungsfehlerminimum und Koma =0 zusammen?

Können Öffnungsfehler und Koma gleichzeitig korrigiert sein?

n_e -ν_e – Glasdiagramm



$n\uparrow \Rightarrow P\downarrow$,aber $\nu\uparrow \Rightarrow L\downarrow$

Zusammenfassung
Einzellinse ohne zusätzliche Blende

Die Einzellinse ohne zusätzliche Blende ist für die Abbildung kleiner Felder mit merklicher Öffnung geeignet, da eine Korrektur von **Öffnungsfehler** und **Koma** möglich ist.

Der **Farblängsfehler** kann durch Einsatz eines Kronglases mit großer Abbezahl und mit günstiger Auffangebene (AFE an der Stelle, an der die Farbe fokussiert wird, für die der Empfänger am empfindlichsten ist) klein gehalten werden

b) Einzellinse mit zusätzlicher Blende

Einzellinse

Linsenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die dünne Einzellinse

dünne Linse: $a = s$, $a_p = s_p$

	$a_p \neq 0$	$a_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = F' b \quad mit: \quad b = \frac{n+2}{4n} Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{a} + F'\right) Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n F'}{n-1}\right)^2$	
2. Koma	$K = F'\left(cb + \frac{1}{2}k\right)$ $k = \frac{n+1}{n} Q - \left(\frac{2}{a} + F'\right)$	$K = \frac{1}{2} F' k$
3. Astigmatismus	$C = F'\left(c^2 b + c k + 1\right)$ $\frac{1}{c} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a'_p}$	$C = F'$
4. Petzvalwölbung	$P = \frac{F'}{n}$	
5. Verzeichnung	$E = F'\left(c^3 b + \frac{3}{2} c^2 k + \frac{3n+1}{n} c\right)$	0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	$L = \frac{F'}{\nu}$	$\nu = \frac{n-1}{\Delta n}$
7. Farbquerfehler	$H = c \frac{F'}{\nu}$	0

B, P, L

unabhängig von der Blendenlage

Ist die gleichzeitige Korrektur von Öffnungsfehler ($B = B_{min}$) und Koma ($K=0$) möglich?

Einzellinse

Linsenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die dünne Einzellinse

dünne Linse: $a = s$, $a_p = s_p$	$a_p \neq 0$		$a_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = F' b \quad mit: \quad b = \frac{n+2}{4n} Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{a} + F'\right) Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n F'}{n-1}\right)^2$		
2. Koma	$K = F' \left(cb + \frac{1}{2} k \right)$	$k = \frac{n+1}{n} Q - \left(\frac{2}{a} + F' \right)$	$K = \frac{1}{2} F' k$
	zusätzlicher Parameter c!		
3. Astigmatismus	$C = F' \left(c^2 b + c k + 1 \right)$	$\frac{1}{c} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a_p} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a'_p}$	$C = F'$
4. Petzvalwölbung	$P = \frac{F'}{n}$		
5. Verzeichnung	$E = F' \left(c^3 b + \frac{3}{2} c^2 k + \frac{3n+1}{n} c \right)$		0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	$L = \frac{F'}{\nu}$	$\nu = \frac{n-1}{\Delta n}$	
7. Farbquerfehler	$H = c \frac{F'}{\nu}$		0

2. Koma

Zusätzlicher Parameter: c = fkt (s_p)

$$K = F'\left(c\, b + \frac{1}{2} k \right)$$

Bedingung für Komafreiheit:

$$c = -\frac{1}{2}\frac{k}{b} \quad mit \quad b \neq 0$$

Für |s| = ∞ :

$$s_p = -\frac{1}{2}\frac{k_\infty}{b_\infty} \quad mit \quad b_\infty \neq 0$$

Die Koma ist durch geeignete Lage der Blende vollständig korrigierbar außer für B = 0

Numerisches Beispiel

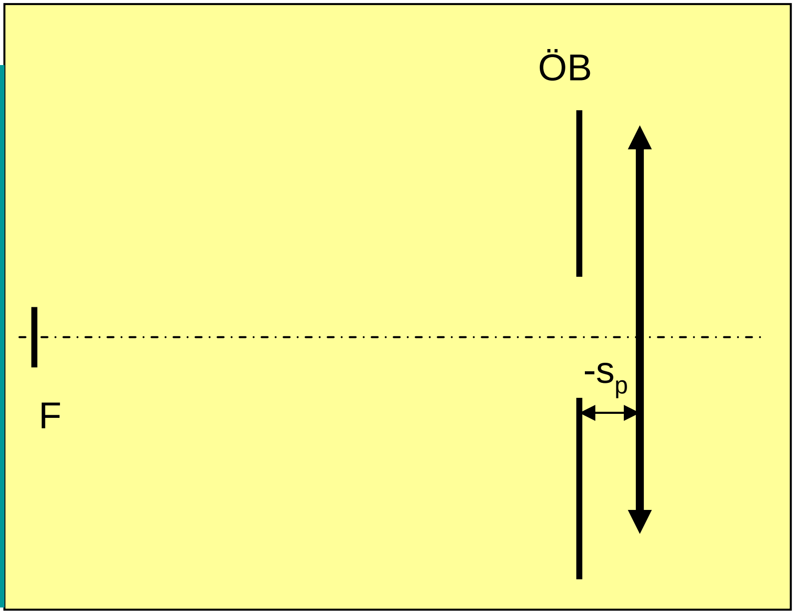
- Forderungen: B_{min}
  $K=0$
- Gegeben: $f'=100mm$ ($F'=10dpt$)
  $|s| = \infty$, $n=1.5$
- Gesucht: s_p
- Lösung:

$$s_p = \frac{1}{2}\frac{k_\infty}{b_\infty} \quad mit \quad Q_{B\min} = \frac{n\,F'}{n+2} \quad und$$

$$k_\infty = \frac{n+1}{n} Q_{B\min} - F'$$

$$b_\infty = \frac{n+2}{4n} Q^2{}_{B\min} - \frac{1}{2} F' Q_{B\min} + \frac{1}{4}\left(\frac{n\,F'}{n-1}\right)^2$$

$$\Rightarrow s_p = -6.67\ mm$$



Vorderblende in geringem Abstand zur Linse

Verknüpfung mit codev.lnk

3. Astigmatismus

$$C = F'\left(c^2\, b + c\, k + 1\right)$$

A Astigmatismusminimum

$$c = -\frac{1}{2}\frac{k}{b} \qquad mit \quad b \neq 0$$

$$|s| = \infty: \quad s_p = -\frac{1}{2}\frac{k_\infty}{b_\infty}$$

Entspricht dem Fall: Koma = 0

B Astigmatismusfreiheit

$$c = -\frac{1}{2}\frac{k}{b} \pm \sqrt{\left(-\frac{1}{2}\frac{k}{b}\right)^2 - \frac{1}{b}}$$

$\Rightarrow$

reele Lösung.: $\boxed{\frac{1}{4}\frac{k^2}{b} \geq 1}$

keine reele Lsg.: $\frac{1}{4}\frac{k^2}{b} < 1$

Bedingung für Astigmatismusfreiheit

Numerisches Beispiel zu C=0

- Gegeben: Sammellinse
  $F'=1$
  $n=1.5$
  $|s|=\infty$, d.h. $b \neq 0$

  Gesucht: Bereich von Q für Astigmatismusfreiheit

Lösung mit Hilfe von Mathematica:

$$b = \frac{n+2}{4n} Q^2 - \frac{1}{2}\left(\frac{2}{s} + F'\right) Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n F'}{n-1}\right)^2$$

$$k = \frac{n+1}{n} Q - \left(\frac{2}{s} + F'\right)$$

reele Lösung. : $\left(\frac{1}{4}\frac{k^2}{b} \geq 1, Q\right)$

Lösung der quadratischen Ungleichung:

Astigmatismusfreiheit möglich für: Q>=-3.|| Q>=6.

Vergleich: $Q_{BMin}(F'=1) = 0.43\text{dpt}$

Verknüpfung mit codev.lnk

Erkenntnisse

- Linse mit Öffnungsfehlerminimum ist nicht durch eine zusätzliche Blende hinsichtlich Astigmatismus korrigierbar.

- Je größer die Durchbiegung zur Korrektur des Astigmatismus, desto größer wird der Öffnungsfehler.

- Korrektion des Astigmatismus erfordert große Zugeständnisse an den Öffnungsfehler.

- Interessant: 1. $Q = -3$ und 2. $Q = 6$

1. Q = -3

Gesucht: Form der Linse und Lage der Blende

Berechnung der Radien aus Q und F‘:

B=9, K=0, C=0, E=0.56 (tonnenförmige Verzeichnung)

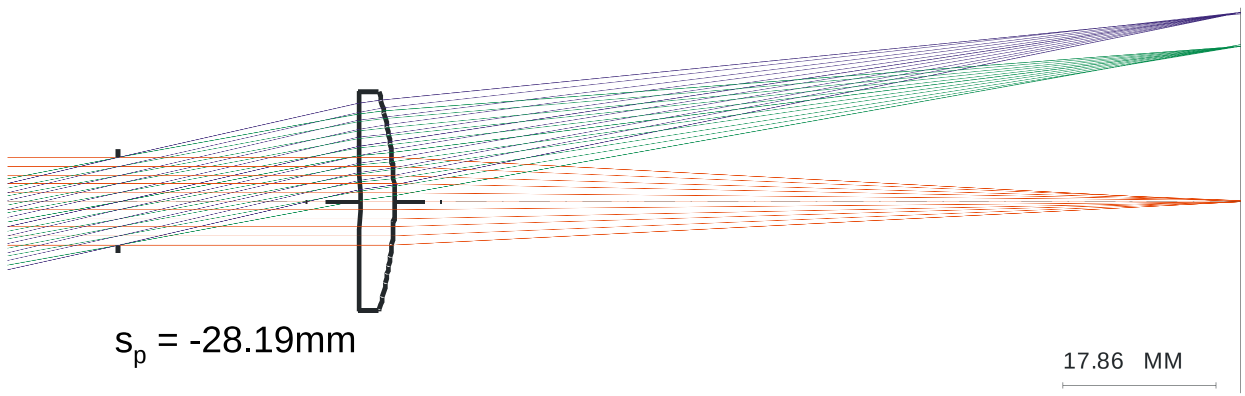
r1 =∞, r2=-0,5
sp =-0,333

Ermittlung der optimalen Linsenform für die Abbildung eines Feldpunktes mit Hilfe der Strahldurchrechnung

Minimierung der Querabweichungen ⟶ Parameter: r_1, r_2, s_p

Verknüpfung mit codev.lnk

Vergleich mit realem System



Optimierung mit CODE V

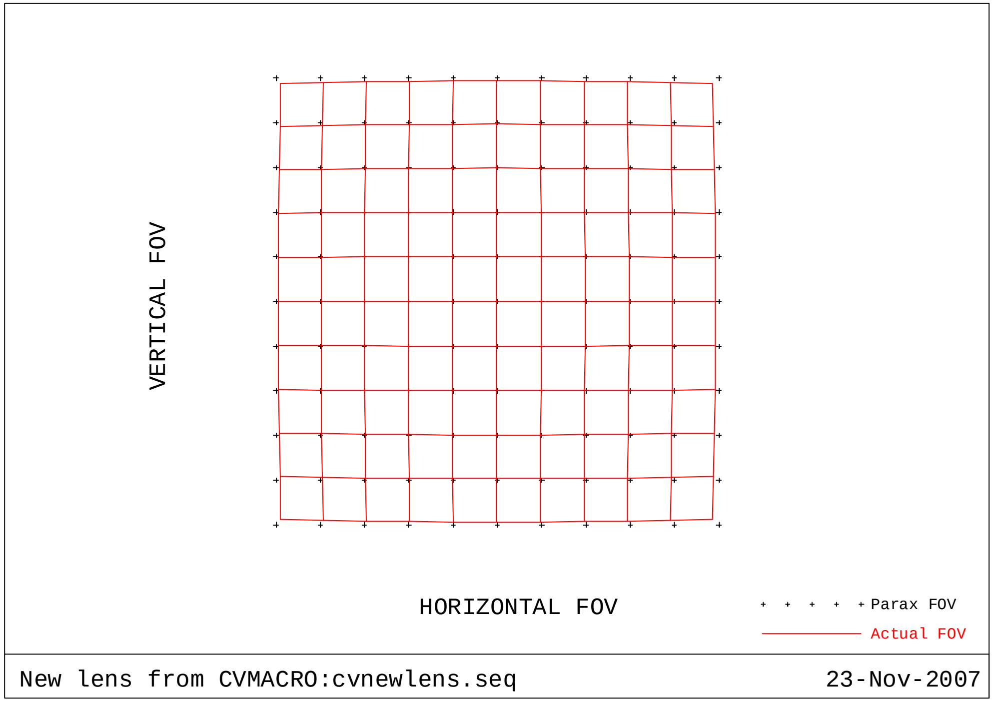
f‘ =100 mm, y‘ =22.5mm, h_{EP} =5mm

RDY	THI	RMD	GLA	GLC		
> OBJ:	INFINITY		INFINITY		100	100
STO:	INFINITY		28.194399		100	0
2:	**-389.57175**		4.000000	BK7_SCHOTT	0	100
3:	**-45.78679**		100.349838		0	PIM
IMG:	INFINITY		-1.508646		100	0

Verknüpfung mit codev.lnk

Analyse der Abbildung eines Feldes

Vorderblende ⟹ Tonnenförmige Verzeichnung

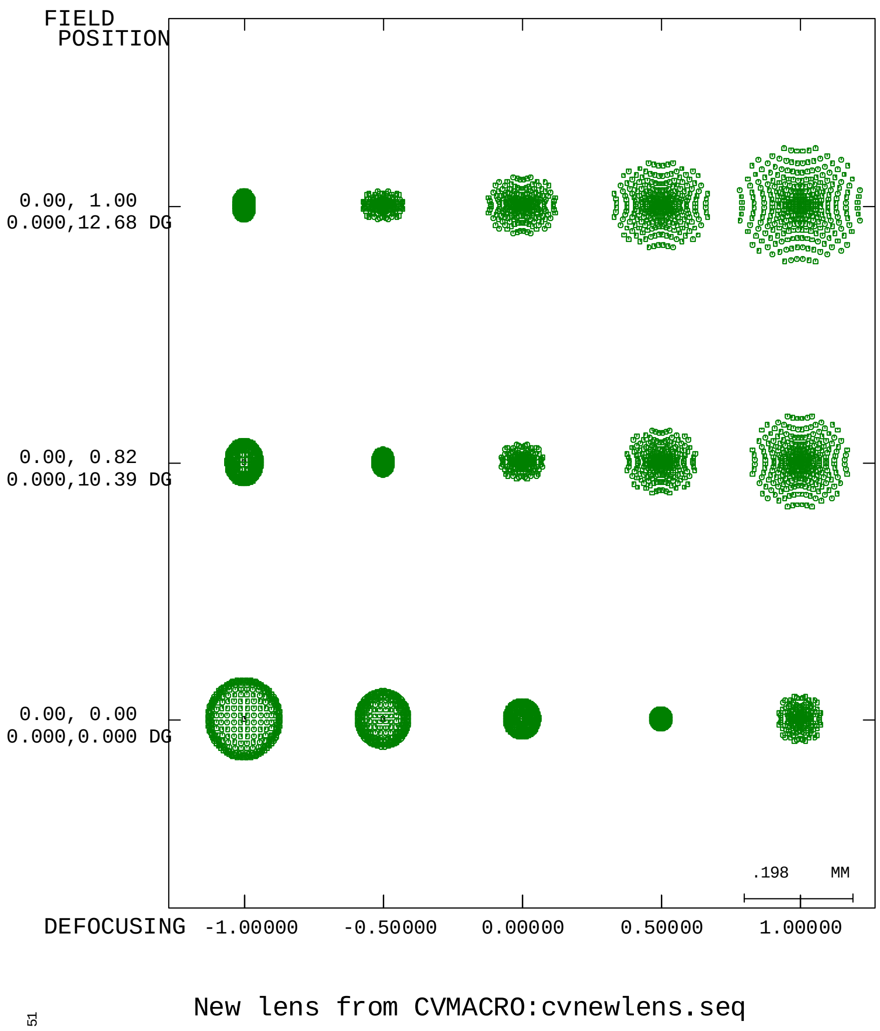


$$\Delta y'_{E_\infty} = -\frac{1}{2} y'^3 \; F'^2 \; E_\infty$$

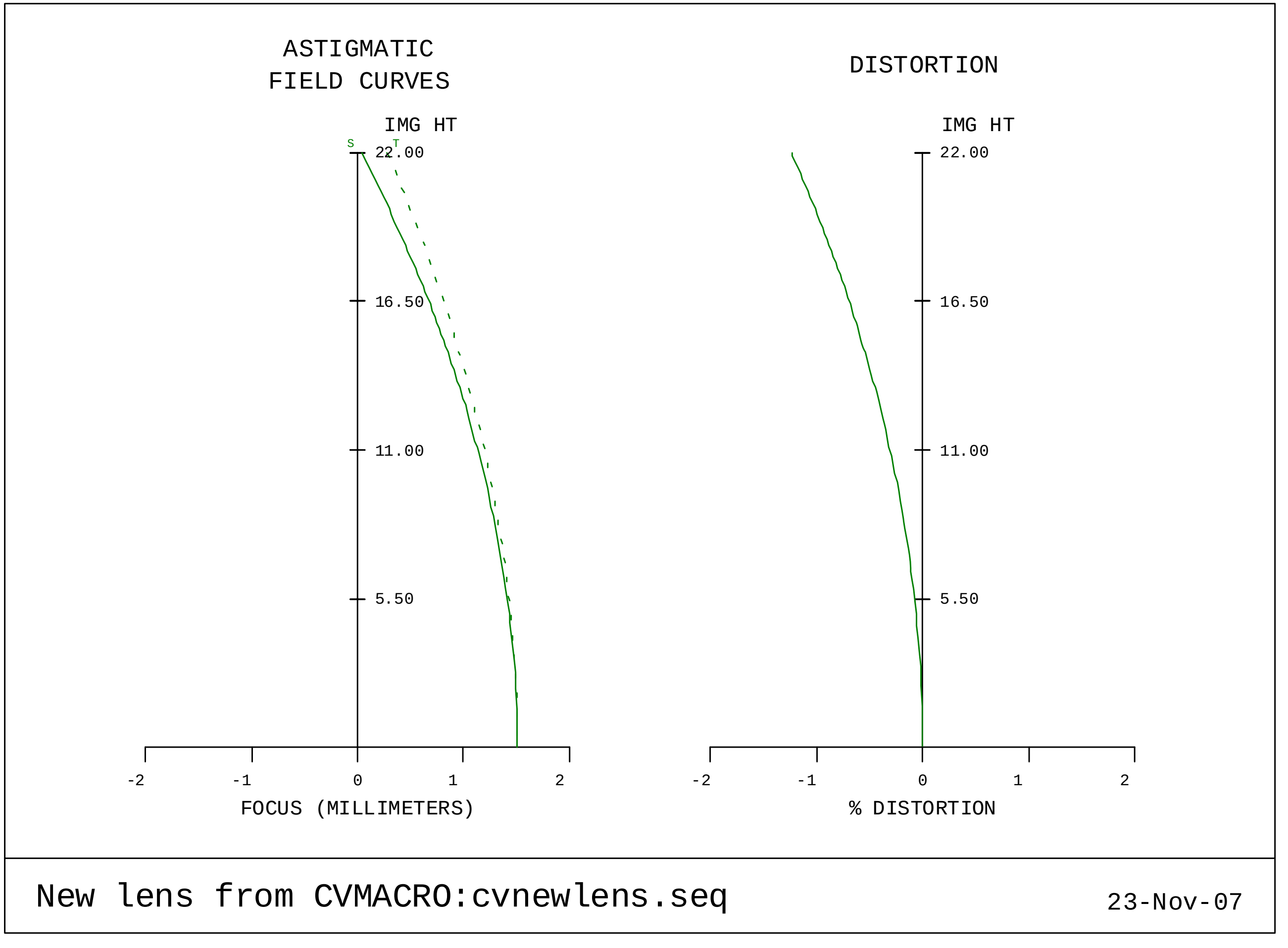
$$V = \frac{\Delta y'_{E_\infty}}{y'}$$

$$E_\infty > 0 \quad \Rightarrow \quad V < 0 \quad !$$

Spotdiagramm



Astigmatismus und Verzeichnung



2. Q = 6

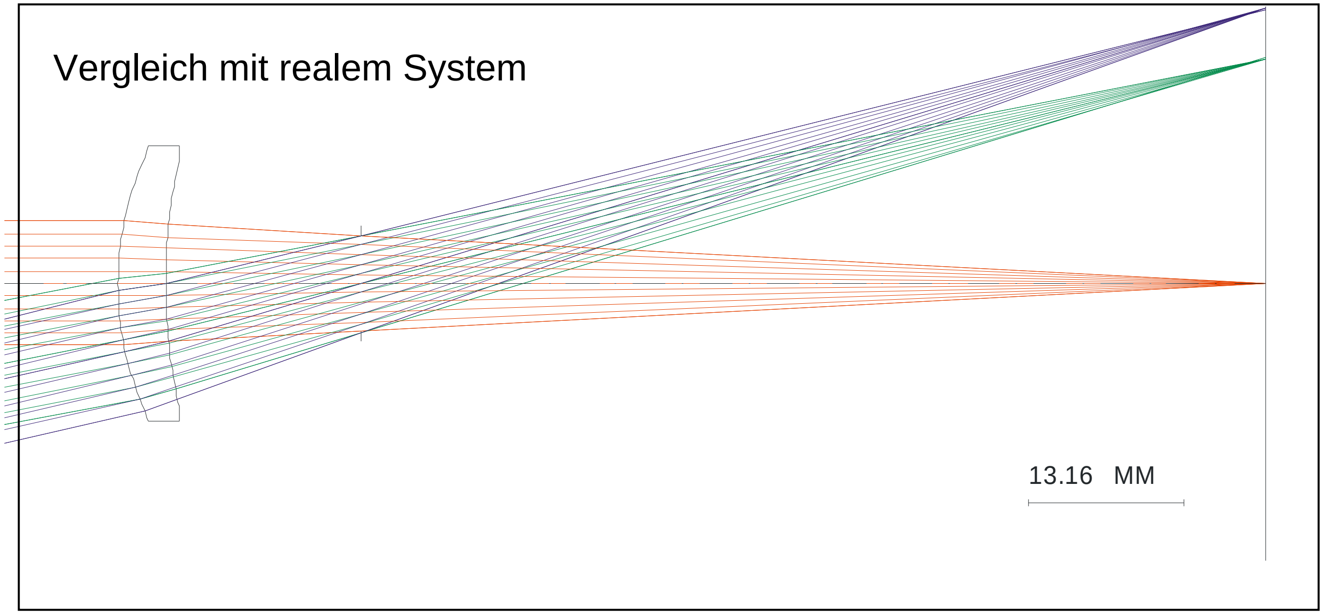
Gesucht: Form der Linse und Lage der Blende

Berechnung der Radien aus Q und F‘: $r_1 = 0.222$, $r_2 = 0.4$

$s_p = 0.22$

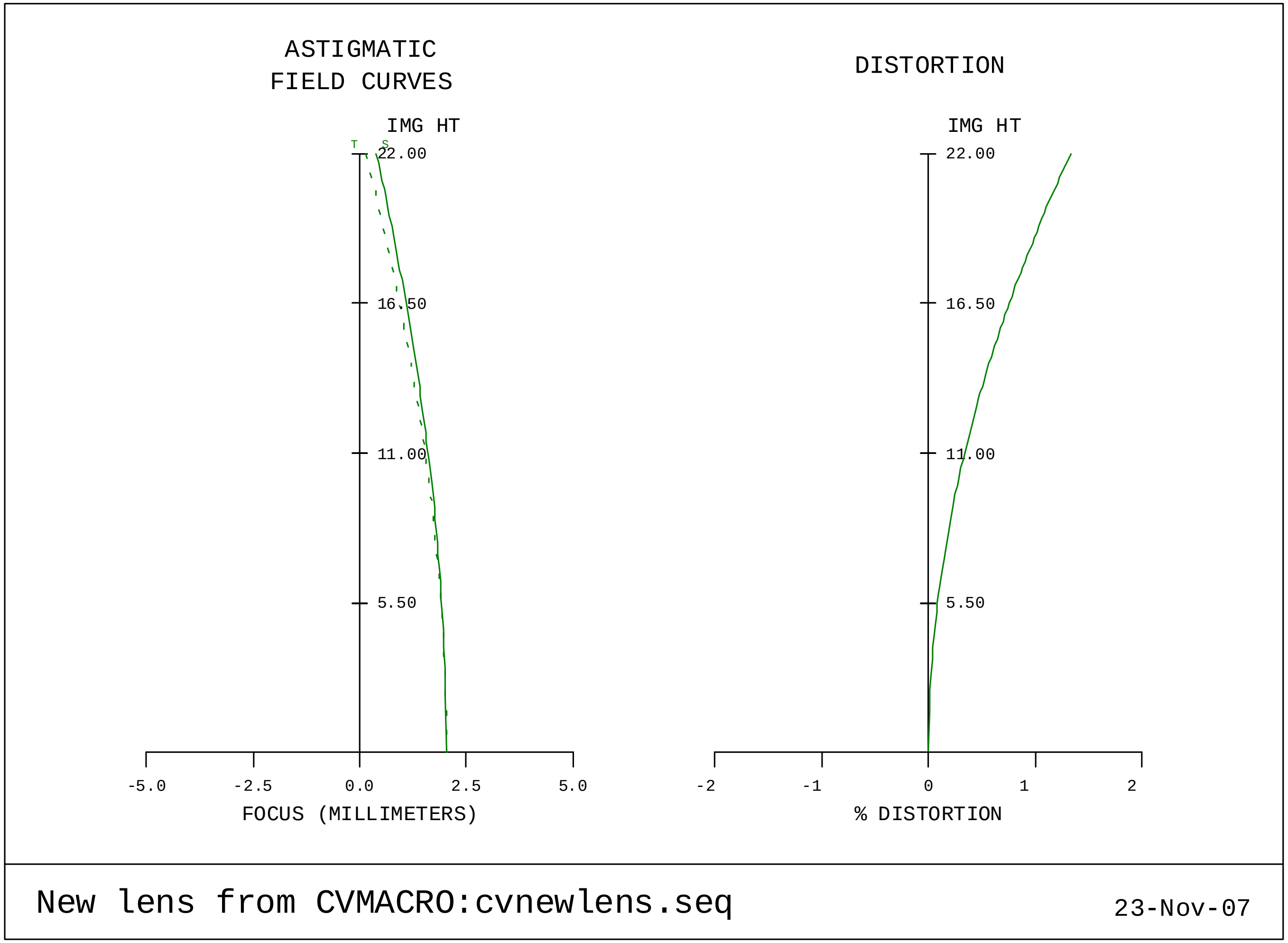
B=20.25, K=0, C=0, E = -0.38 (kissenförmige Verzeichnung)

Vergleich mit realem System

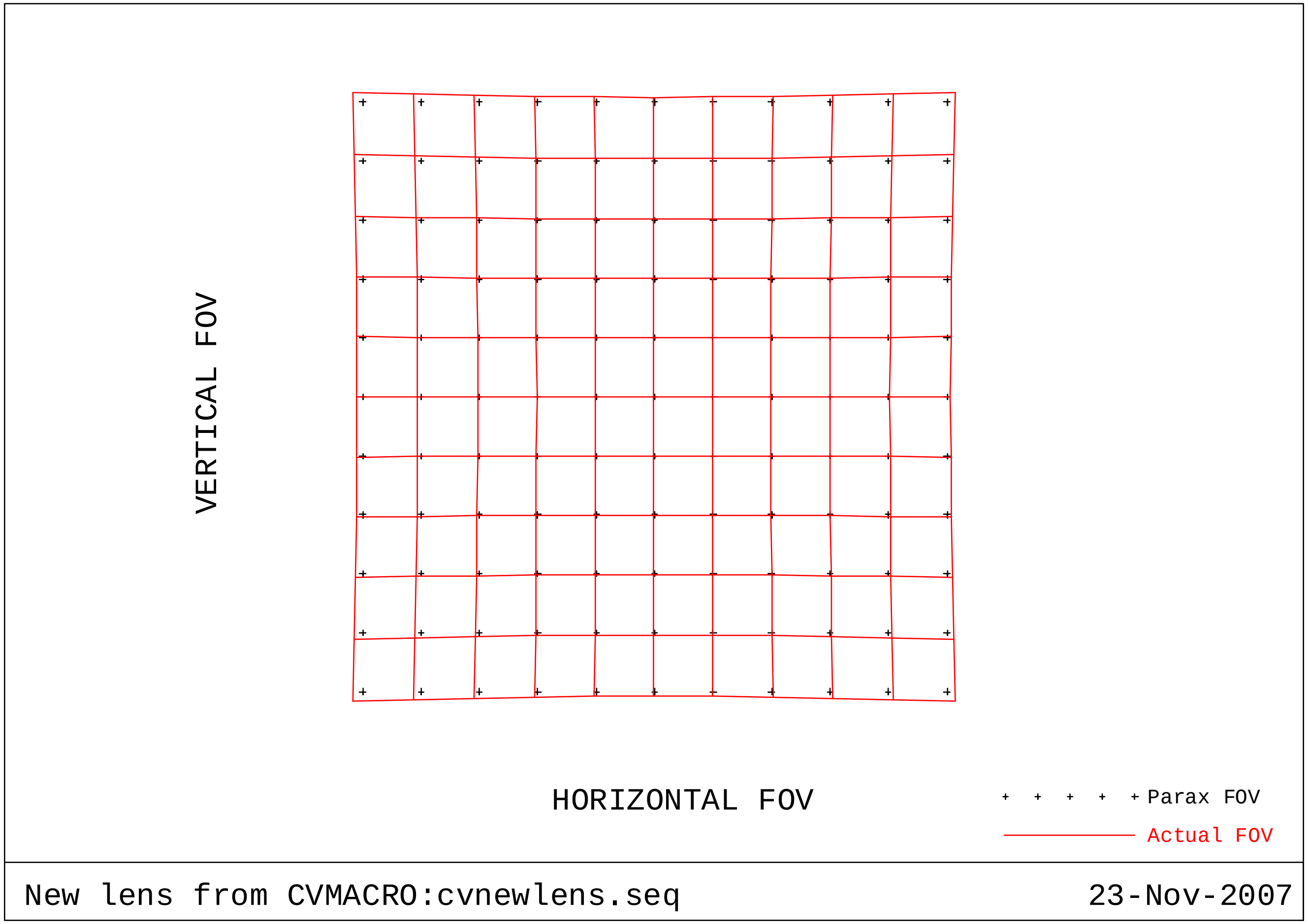


	RDY	THI	RMD	GLA	CCY	THC	GLC
> OBJ:	INFINITY	INFINITY			100	100	
1:	24.81815	4.000000		BK7_SCHOTT	0	100	
2:	45.12605	16.388643			0	0	
STO:	INFINITY	78.119936			100	PIM	
IMG:	INFINITY	-2.031589			100	0	

Astigmatismus und Verzeichnung bei Hinterblende



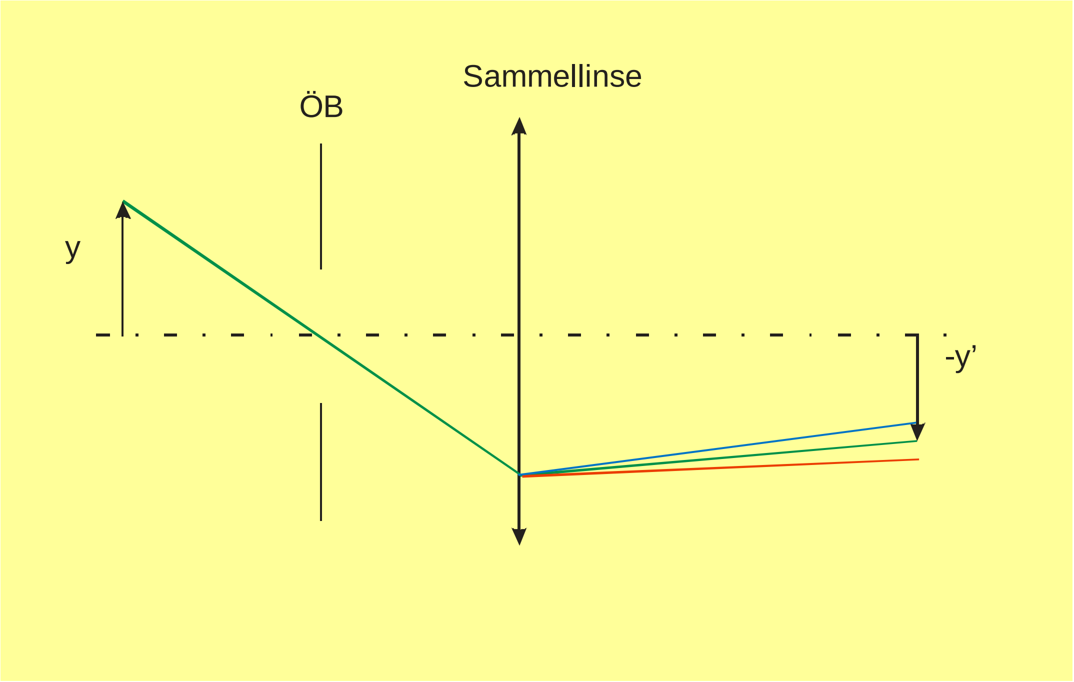
Kissenförmige Verzeichnung bei Hinterblende



Zusammenfassung
Einzellinse mit zusätzlicher Blende

- Die Einzellinse mit zusätzlicher Blende ist für Abbildung größerer Felder mit extrem kleiner Öffnung geeignet.

- Die Einzellinse mit zusätzlicher Blende besitzt immer Verzeichnung und einen Farbfehler des Hauptstrahls.



Einzelspiegel

Flächenteilkoeffizienten der Spiegelfläche

Ausgangsbeziehungen: Flächenteilkoeffizienten der brechenden Fläche

Beispiele: B (Flächenteilkoeffizient des Öffnungsfehlers 3. Ordnung)

K (Flächenteilkoeffizient der Koma 3. Ordnung)

$$B = \omega_1^{\;4} Q^2\, \delta\left(\frac{1}{n\,s}\right)$$

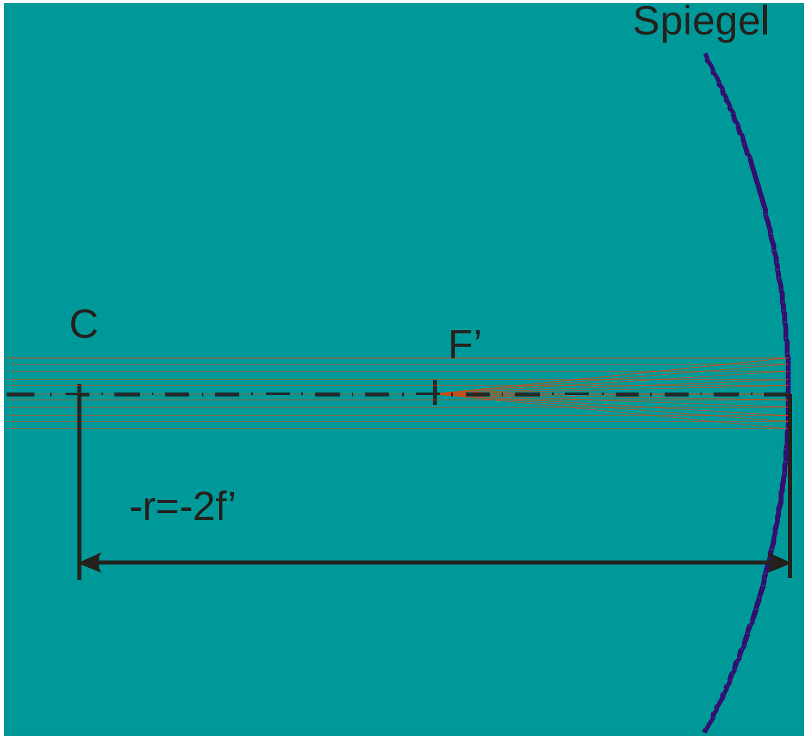
$$K = c\,\omega_1^{\;3}\omega_{p1}\, Q\, Q_p\, \delta\left(\frac{1}{n\,s}\right)$$

$$\text{mit}: \quad \delta\left(\frac{1}{n\,s}\right) = \frac{1}{n's'} - \frac{1}{n\,s} = ?$$

$$Q = n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s}\right) = ? \quad \text{und} \quad Q_p = n\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s_p}\right)$$

$$c = \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s_p}\right)^{-1} \Rightarrow \text{für} \quad s_p = 0: \quad c\,Q_p = ?$$

$$\omega_1 = 1, \quad \omega_{p1} = 1, \quad n = -n' = 1, r = \frac{2}{F'}$$



Einzelspiegel

Flächenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die Spiegelfläche

	$\|s\| \neq \infty$, $s_p \neq 0$	$\|s\| \neq \infty$, $s_p = 0$	$\|s\| = \infty$, $s_p \neq 0$	$\|s\| = \infty$, $s_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = -\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right)^2 F'$		$B = -\frac{1}{4} F'^3$	
2. Koma	$K = -c\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right) F'$	$K = -\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right) F'$	$K = +\frac{s_p}{2}\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right) F'^2$	$K = -\frac{1}{2} F'^2$
3. Astigmatismus	$C = -c^2\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)^2 F'$	$C = -F'$	$C = -s_p^2\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)^2 F'$	$C = -F'$
4. Petzvalwölbung	$P = F'$		$P = F'$	
5. Verzeichnung	$E = -c^3\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{2}{s_p} + \frac{1}{s}\right) F'$	0	$E = +s_p^3\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{2}{s_p}\right) F'$	0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	0		0	
7. Farbquerfehler	0		0	

$|s| \neq \infty$

Für welche Objektschnittweite verschwindet der Öffnungsfehler?

Einzelspiegel

Flächenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die Spiegelfläche

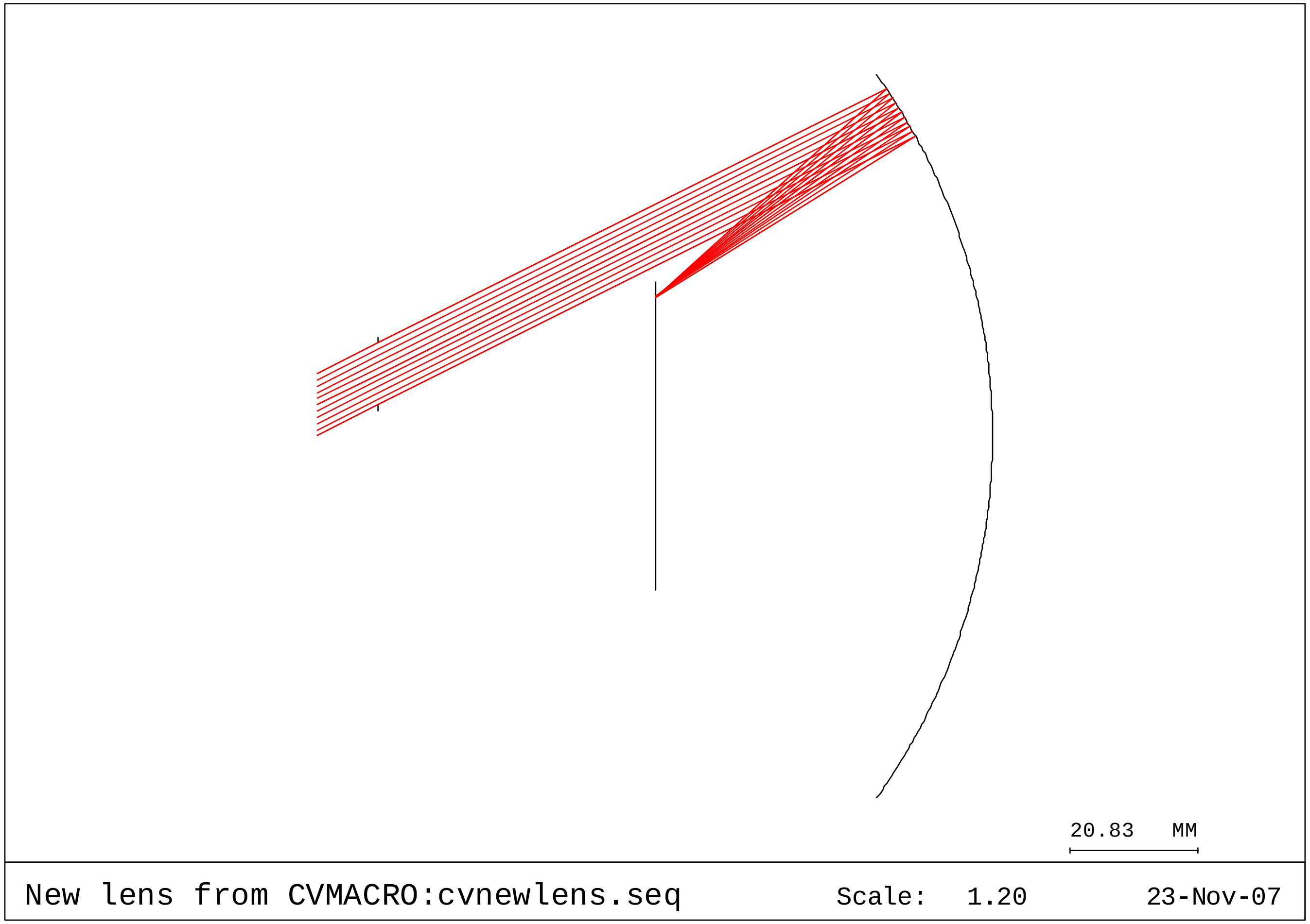
	$\lvert s \rvert \neq \infty$, $s_p \neq 0$	$\lvert s \rvert \neq \infty$, $s_p = 0$	$\lvert s \rvert = \infty$, $s_p \neq 0$	$\lvert s \rvert = \infty$, $s_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = -\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right)^2 F'$		$B = -\frac{1}{4} F'^3$	
2. Koma	$K = -c\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right) F'$	$K = -\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right) F'$	$K = +\frac{s_p}{2}\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right) F'^2$	$K = -\frac{1}{2} F'^2$
3. Astigmatismus	$C = -c^2\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)^2 F'$	$C = -F'$	$C = -s_p^2\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)^2 F'$	$C = -F'$
4. Petzvalwölbung	$P = F'$		$P = F'$	
5. Verzeichnung	$E = -c^3\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{2}{s_p} + \frac{1}{s}\right) F'$	0	$E = +s_p^3\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{2}{s_p}\right) F'$	0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	0		0	
7. Farbquerfehler	0		0	

$|s|=\infty$

Wann verschwinden Koma, Astigmatismus und Verzeichnung?

Spiegel mit „natürlicher Blende“

Spiegel mit „natürlicher Blende“



Einzelspiegel ⟺ Einzellinse

Welches Bauelement ist besser für die Abbildung eines unendlich entfernten Achspunktes (gleiche Öffnung, gleiche Brennweite) geeignet?

A) Auflösung Einzellinse |s| = ∞

Gesucht: $\Delta r' = \text{fkt}\,(h_{EP}, f', n)$

für dünne Einzellinse mit $Q = Q_{Bmin}$

Gegeben: f' = 25 mm, n_{Linse} =1.6, |s|=∞

Bekannt:

$$Q_{B_{\min}} = \frac{n}{n+2}\left(\frac{2}{s} + F'\right)$$

Querabweichungen für $|\,s\,| = \infty$:

$$\Delta x' = -\frac{x_p\left(x_p{}^2 + y_p{}^2\right)}{2\,F'}B$$

$$\Delta y' = -\frac{y_p\left(x_p{}^2 + y_p{}^2\right)}{2\,F'}B$$

mit $\quad B = b\,F' \quad$ und $\quad b = \frac{n+2}{4n}Q^2 - \frac{1}{2}F'\,Q + \frac{1}{4}\left(\frac{n\,F'}{n-1}\right)^2$

B) Auflösung Einzelspiegel |s| = ∞

Gesucht: $\Delta r' = \text{fkt}\ (h_{EP}, f)$

Bekannt:

Querabweichungen für $|s| = \infty$:

$$\Delta x' = -\frac{x_p\left(x_p{}^2 + y_p{}^2\right)}{2\,F'}B$$

$$\Delta y' = -\frac{y_p\left(x_p{}^2 + y_p{}^2\right)}{2\,F'}B$$

mit $B = -\frac{1}{4}F'^3$

Ergebnisse

Zerstreuungskreisradien bei Abbildung eines unendlich fernen Achspunktes:

A) Einzellinse

$$\Delta r'_L = \frac{1}{8} h_{EP}^{\;3} F'^2 \frac{n(4n-1)}{(n+2)(n-1)^2}$$

B) Einzelspiegel

$$\Delta r'_{Sp} = \frac{1}{8} h_{EP}^{\;3} F'^2$$

Numerisches Beispiel
Vergleich von $\Delta r'_L$ mit $\Delta r'_{Sp}$

Gegeben: $f' = 25$ mm, $n_{Linse} = 1.6$, $|s| = \infty$

	Einzellinse	Einzelspiegel
h_{EP}/mm	$\Delta r'_L$/µm	$\Delta r'_{Sp}$/ µ m
1	1.3	0.2
2	10.6	1.6
5	166.6	25
7	457	69
10	1333	200

Vergleich mit Auflösungsgrenze des Auges!

Kritische Blende

Wellenoptik

Physikalische Grenzauflösung

$$\delta r' = 0.61 \frac{\lambda}{NA'}$$

Radius des Airyscheibchens

Geometrische Optik

Geometrische Abbildungsfehler

$$\Delta r'_L = \frac{1}{8} h_{EP}^{\ 3} F'^2 \frac{n(4n-1)}{(n+2)(n-1)^2}$$

$$\text{mit: } n = 1.6$$

$$\Delta r'_L = \frac{1}{8} h_{EP}^{\ 3} F'^2 \times 6.666 = 0.83\, h_{EP}^{\ 3} F'^2$$

Zerstreuungskreisradius für Abbildung eines unendlich entfernten Achspunktes mit Einzellinse optimaler Form

Für k_{krit} gilt:

$$\delta r' = \Delta r'$$

$$\delta r' > \Delta r \quad \text{beugungsbegrenzte optische Abbildung}$$

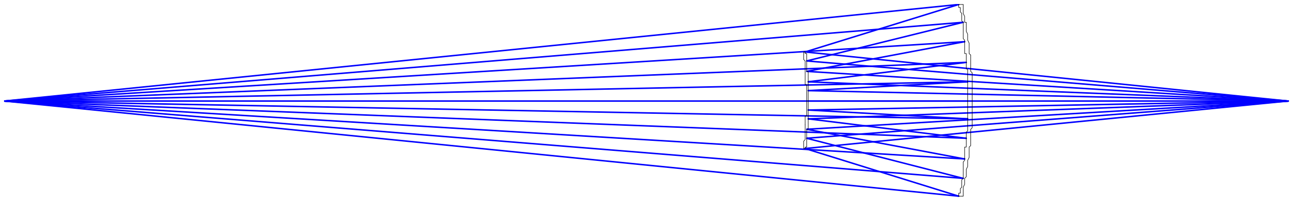
Gesucht: k_{krit} =fkt (λ, f') z.B. λ= 500nm, f'=100mm $\Longrightarrow$ $\Delta r'$=?

Analytische Modellierung eines 2-Spiegelsystems mit ß' = -1

ZIEL: Verschwinden des Öffnungsfehlers 3. Ordnung

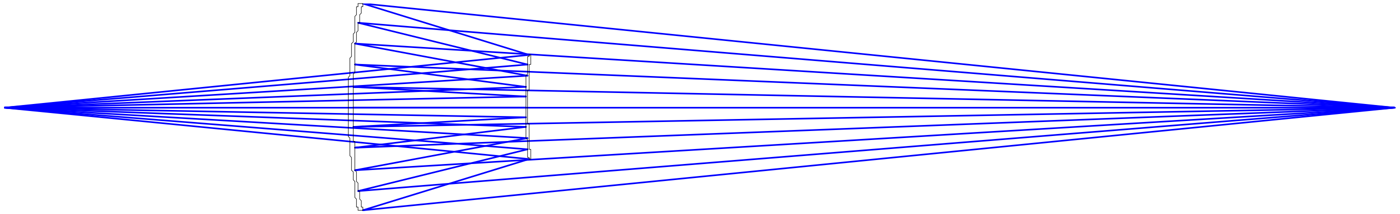
Lösung: 1. Cassegrain

s_1= -240mm, s_2 = 120mm, e_1' =-40mm, f_1'=f_2'=-60mm



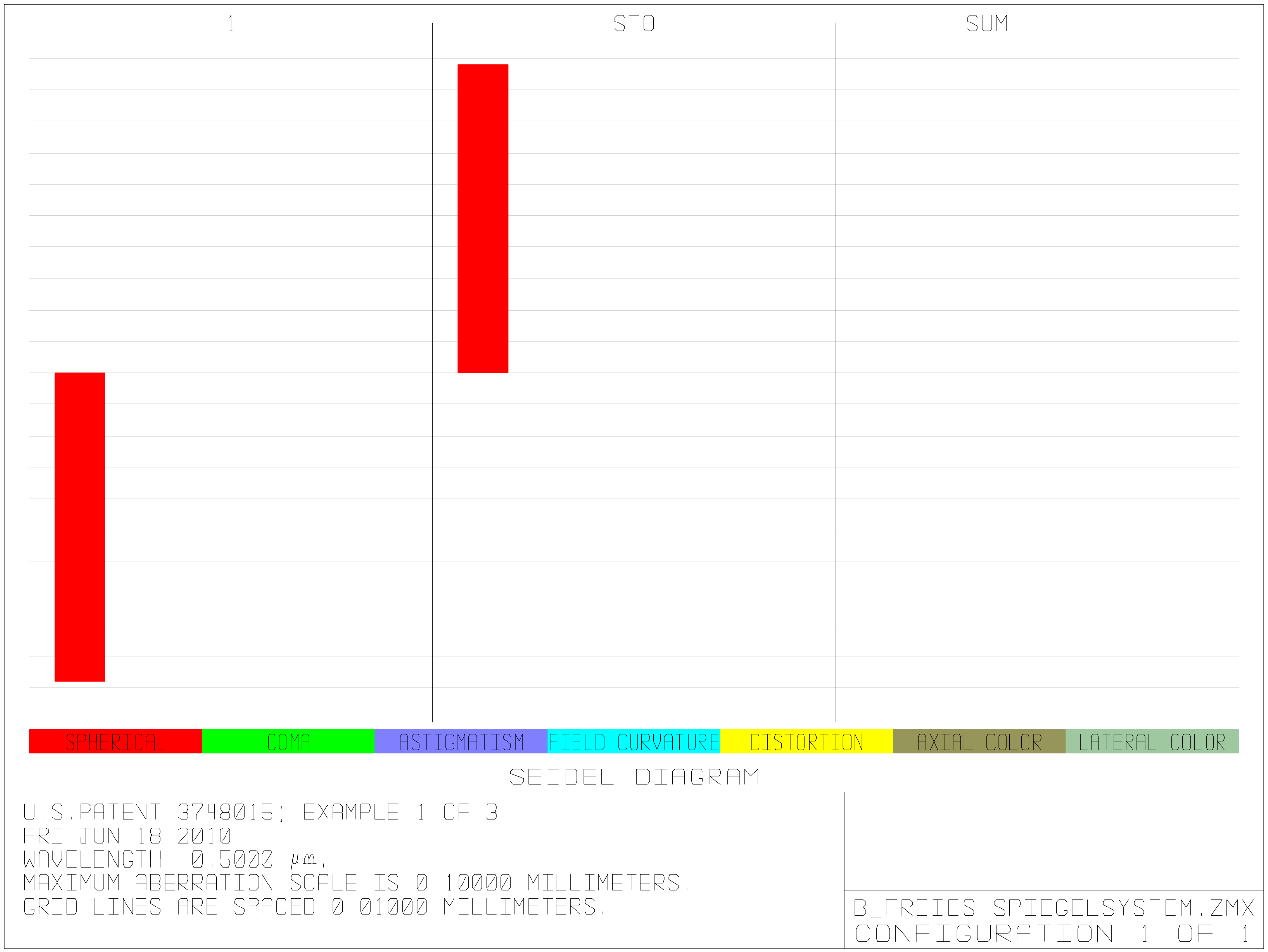
2. Schwarzschild

s_1= -120mm, s_2 = 240mm, e_1' =-40mm, f_1'=f_2'=60mm



Zemax.lnk

Seidelkoeffizienten



Analytische Modellierung eines astigmatismusfreien 3-Spiegelsystems mit ß'=-1??

Zemax.lnk

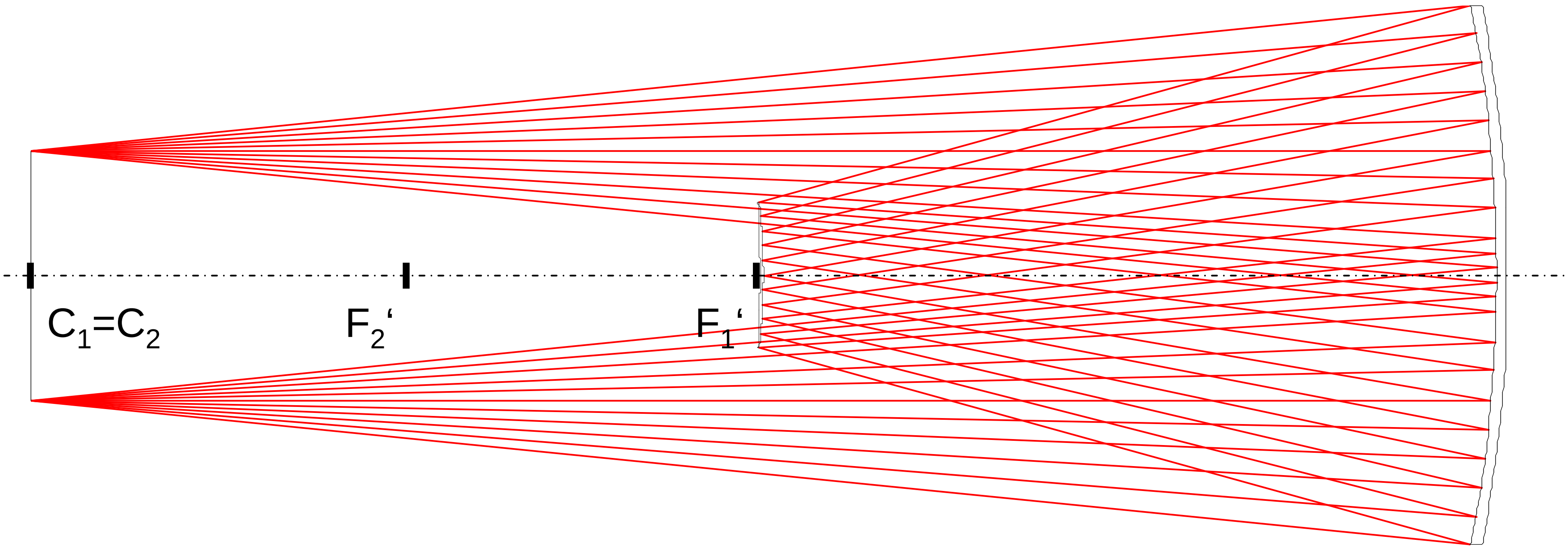
Einzelspiegel

Flächenteilkoeffizienten (3. Ordnung) für die Spiegelfläche

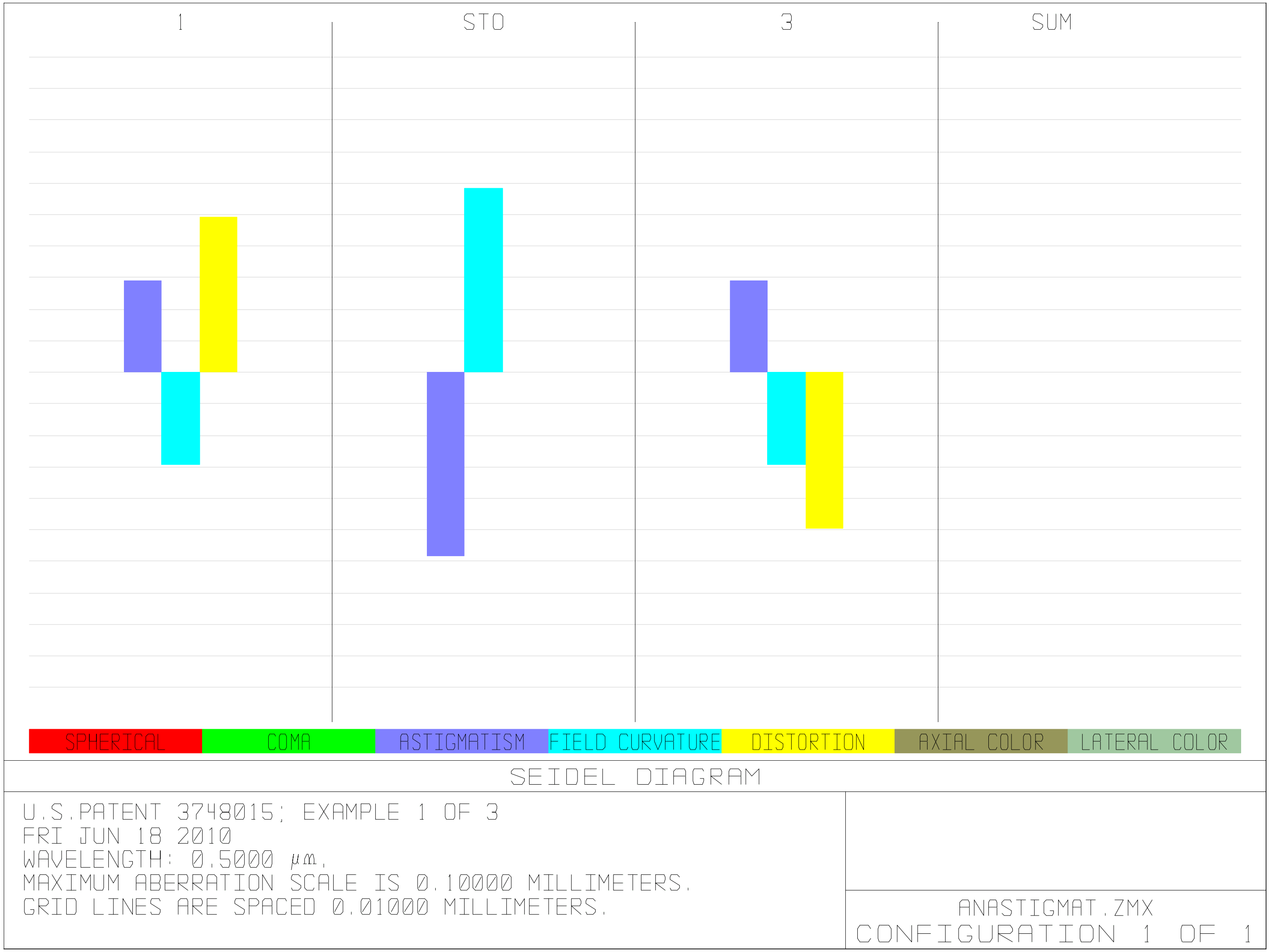
	$\lvert s \rvert \neq \infty$, $s_p \neq 0$	$\lvert s \rvert \neq \infty$, $s_p = 0$	$\lvert s \rvert = \infty$, $s_p \neq 0$	$\lvert s \rvert = \infty$, $s_p = 0$
1. Öffnungsfehler	$B = -\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right)^2 F'$		$B = -\frac{1}{4} F'^3$	
2. Koma	$K = -c\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right) F'$	$K = -\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s}\right) F'$	$K = +\frac{s_p}{2}\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right) F'^2$	$K = -\frac{1}{2} F'^2$
3. Astigmatismus	$C = -c^2\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)^2 F'$	$C = -F'$	$C = -s_p^2\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)^2 F'$	$C = -F'$
4. Petzvalwölbung	$P = F'$		$P = F'$	
5. Verzeichnung	$E = -c^3\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{2}{s_p} + \frac{1}{s}\right) F'$	0	$E = +s_p^3\left(\frac{F'}{2} - \frac{1}{s_p}\right)\left(\frac{F'}{2} - \frac{2}{s_p}\right) F'$	0
Linsenteilkoeff. der paraxialen Farbfehler 6. Farblängsfehler	0		0	
7. Farbquerfehler	0		0	

Zemax.lnk

3-Spiegelsystem



Seidelsche Bildfehlerkoeffizienten



Ende