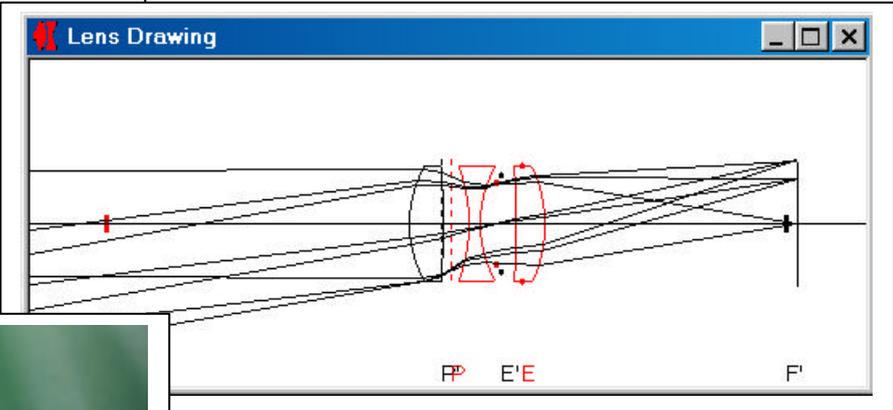
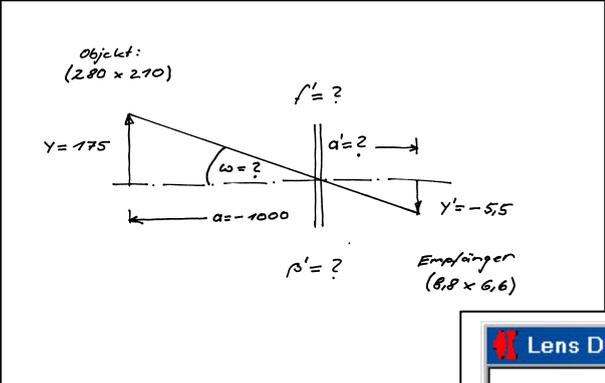


# Einführung in das computergestützte Optical Design mit WinLens

Thomas Thöniß  
LINOS Photonics GmbH & Co. KG



# Inhaltsverzeichnis

- 0. Einführung
- 1. „Typische“ Kundenanfrage
- 2. Analyse der Vorgaben
  - 2.1 Analyse der Paraxialdaten
  - 2.2 Analyse der Empfängeranforderungen
  - 2.3 Analyse der sonstigen Anforderungen
- 3. Paraxialer Ansatz
  - 3.1 Manueller Ansatz
  - 3.2 Computergestützter Ansatz
- 4. Realer Ansatz: Einzellinse
  - 4.1 Symmetrische Bikonvexlinse
    - 4.1.1 Manueller Ansatz
    - 4.1.2 Computergestützter Ansatz
  - 4.2 Defokussierte Einzellinse (1. Optimierung)
    - 4.2.1 Manueller Ansatz
    - 4.2.2 Computergestützter Ansatz
  - 4.3 Linse bester Form (2. Optimierung)
    - 4.3.1 Manueller Ansatz
    - 4.3.2 Computergestützter Ansatz
  - 4.4 Modifizierte Best Form Linse (3. Optimierung)
    - 4.4.1 Manueller Ansatz
    - 4.4.2 Computergestützter Ansatz
  - 4.5 Analyse des errechneten Systems
    - 4.5.1 Analyse der axialen polychromatischen Abbildung
    - 4.5.2 Analyse der monochromatischen Feldabbildung
  - 4.6 Fazit und Ausblick
- 5. Realer Ansatz: Achromat
  - 5.1 Manueller Ansatz
  - 5.2 Computergestützter Ansatz
  - 5.3 Analyse des errechneten Systems
  - 5.4 Fazit und Ausblick
- 6. Realer Ansatz: Triplet
  - 6.1 Manueller Ansatz
  - 6.2 Computergestützter Ansatz
  - 6.3 Fazit und Ausblick
- 7. Schlußbetrachtung des errechneten Systems
- 8. Anhang
  - 8.1 Allgemeine Hinweise zum computergestützten Optical Design
  - 8.2 Praktische Formeln
  - 8.3 Übersicht über wichtige optische Systeme
  - 8.4 Abhängigkeiten der Bildfehler 3. Ordnung
  - 8.5 Schematischer Ablauf einer computergestützten Optimierung
  - 8.6 SCHOTT-Glastafel
  - 8.7 Wellenlängenübersicht
    - 8.7.1 Wichtige Wellenlängenbereiche
    - 8.7.2 Wichtige Wellenlängen
  - 8.8 Empfängerformate
  - 8.9 Empfohlene Literatur

## 0. Einleitung

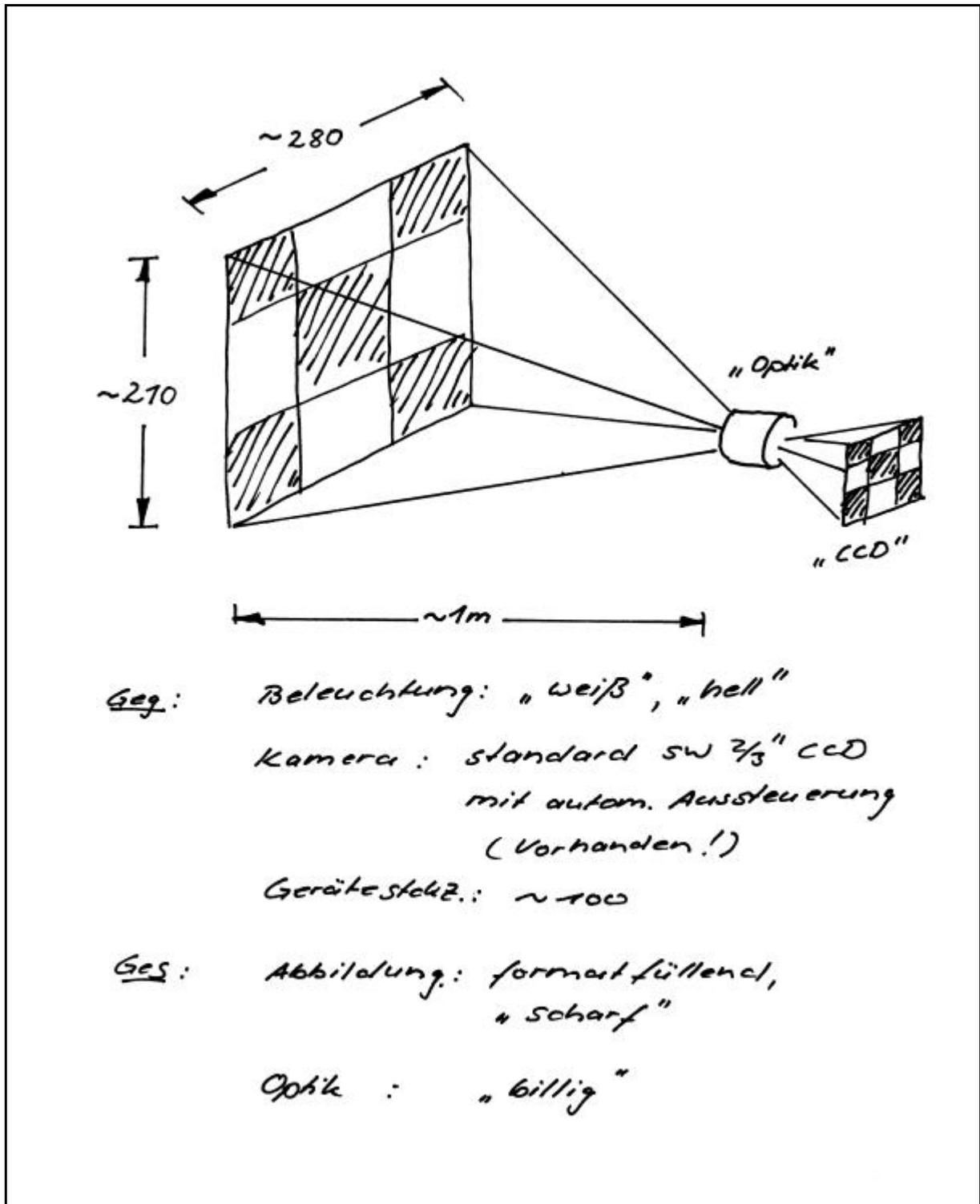
Die enorme Entwicklung der Rechen- bzw. Computertechnik in den letzten Jahrzehnten hat den Prozeß der Berechnung optischer Systeme – das Optical Design - nachhaltig verändert. Noch vor nicht langer Zeit wurden zur Berechnung und Analyse der Abbildungseigenschaften eines optischen Systems einzelne Strahlen mühsam von Fläche zu Fläche des Systems mit der Hilfe von Logarithmentafeln und Rechenschiebern durchgerechnet. Dabei war ein tiefes Verständnis der Theorie der Abbildungsfehler unerlässlich. Ein gänzlicher Neuansatz eines optischen Systems dauerte oft Monate. Grobe Fehler waren dabei nicht immer ausgeschlossen und offenbarten sich oftmals erst nach der eigentlichen Herstellung des Objektivs. Dennoch wurde mit komplexesten manuellen Methoden Erstaunliches geleistet und einige grundlegende, noch heute oft gebrauchte Objektivtypen mit hoher Abbildungsleistung geschaffen. Die Nutzung von Abbildungsfehlermodellen (das wohl bekannteste Modell ist die Seidelsche Bildfehlertheorie 3. Ordnung) führte dabei zu einer enormen Vereinfachung der Berechnung und Bewertung optischer Systeme. Trotzdem war das Gelingen der langwierigen Objektiventwicklung im Wesentlichen von der Erfahrung und Intuition des jeweiligen Optikrechners - dem heutigen Optical Designer - abhängig.

Die Einführung von Tischrechnern und automatischen Rechenmaschinen führte wiederum zu einer enormen Zeitersparnis im Optical Design. Jedoch erst die Entwicklung der Computertechnik und die damit verbundene Einführung von Optikberechnungsprogrammen inklusive leistungsfähiger Algorithmen zur Optimierung von Abbildungseigenschaften gestattete ein effizientes Korrigieren von optischen Systemen. Ferner konnten durch die ständig wachsende Rechengeschwindigkeit der Computer immer mehr, für neue optische Abbildungsprobleme relevante, physikalische Effekte (Polarisation, Beugung usw.) in das Optical Design aufgenommen werden. Nicht selten scheinen heutige Softwarepakete durch die Fülle der sich bietenden Möglichkeiten überfrachtet zu sein. War früher die Berechnung optischer Systeme von einer Aura des Geheimnisvollen umgeben, erweckt moderne Optical Design Software bei Außenstehenden den Eindruck, daß lediglich das geschickte Vorgeben von Startparametern ausreicht, um durch die Software ein ausgereiftes optisches System automatisch generieren zu lassen. Ein tieferes Verständnis der Materie scheint nicht mehr notwendig.

In der folgenden Einführung in die computergestützte Optikentwicklung mit Hilfe des Optical Design Softwarepaketes WinLens und seinen dazugehörigen Programmen soll aufgezeigt werden, daß trotz aller komfortabler Ausstattung derartiger Programme und immer schnellerer Rechentechnik eine gute Kenntnis der Theorie der optischen Abbildung auch heute noch erforderlich ist, um zu einem ausgereiften, „harmonischen“ Lens Design zu gelangen. In den folgenden Kapiteln kann jedoch lediglich eine Einführung bzw. der Ansatz zu einem kompletten Systemdesign gegeben werden. Die Feinkorrektur eines optischen Systems (die ohnehin stark von der Vorgehensweise des einzelnen Optical Designers abhängig ist) und dessen Analyse hinsichtlich der Einflüsse von Fertigungstoleranzen auf seine Abbildungsleistung würden den Rahmen dieser Einführung sprengen.

Es wurde versucht, jedem computergestützten Entwicklungsschritt das prinzipielle manuelle Vorgehen ansatzweise gegenüberzustellen. Auf langwieriges Herleiten von entsprechend notwendigen Formeln wurde verzichtet. Hier muß auf die im Anhang aufgeführte Literatur verwiesen werden. Dort finden sich ferner einige nützliche Formeln zur ersten, schnellen Abschätzung von Grunddaten einer optischen Abbildung.

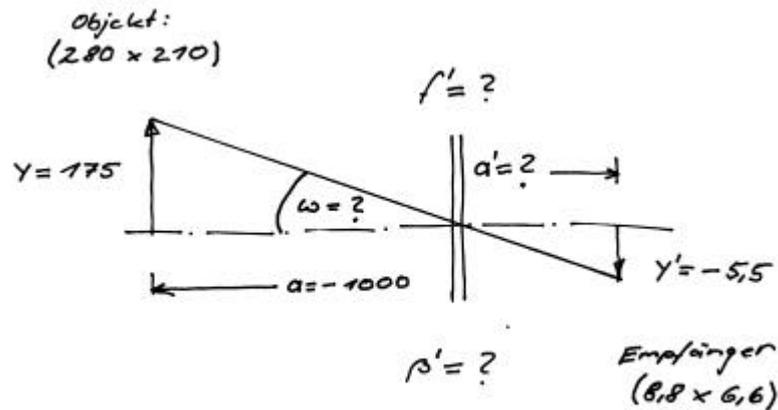
# 1. „Typische“ Kundenanfrage



## 2. Analyse der Vorgaben

### 2.1 Analyse der Paraxialdaten

Die Analyse der Kundenanfrage hinsichtlich gegebener und noch fehlender paraxialer Grundgrößen erfolgt am schnellsten und einfachsten manuell:



### 2.2 Analyse der Empfängeranforderungen

Zusammenstellen der direkt (automatischer Shutter, schwarz/weiß) bzw. indirekt („hell“, „scharf“) gegebenen Empfängeranforderungen bzw. Eigenschaften, daraus Ableiten der für die Abbildung relevanten Größen:

- weiße Beleuchtung → Wellenlängen → z.B. 486nm, 587nm, 656nm
- automatischer Shutter → Blendenart → feste Blende
- „hell“ → Blendenzahl → z.B.  $k = 3.0 \dots 4.0$
- „scharf“ → Auflösung → z.B. 30lp/mm mit ca. 20% Kontrast (abhängig von der Pixelgröße der Kamera)

### 2.3 Analyse der sonstigen Anforderungen

Überprüfen der Kundenanfrage auf spezielle Wünsche bzw. Erfordernisse wie z.B. besondere Bauform der Optik, spezifische Strahlengänge (z.B. Telezentrie), Umgebungsbedingungen usw.:

- „billig“ bei 100 Stück → Komplexität → Objektivaufbau so einfach wie möglich

### 3. Paraxialer Ansatz

Berechnung der fehlenden paraxialen Grundgrößen (paraxialer Objekt- bzw. Bildwinkel  $\omega$ , Abbildungsmaßstab  $\beta'$ ), daraus können paraxiale Bildweite  $a'$  und die gesuchte Objektivbrennweite  $f'$  bestimmt werden.

#### 3.1 Manueller Ansatz

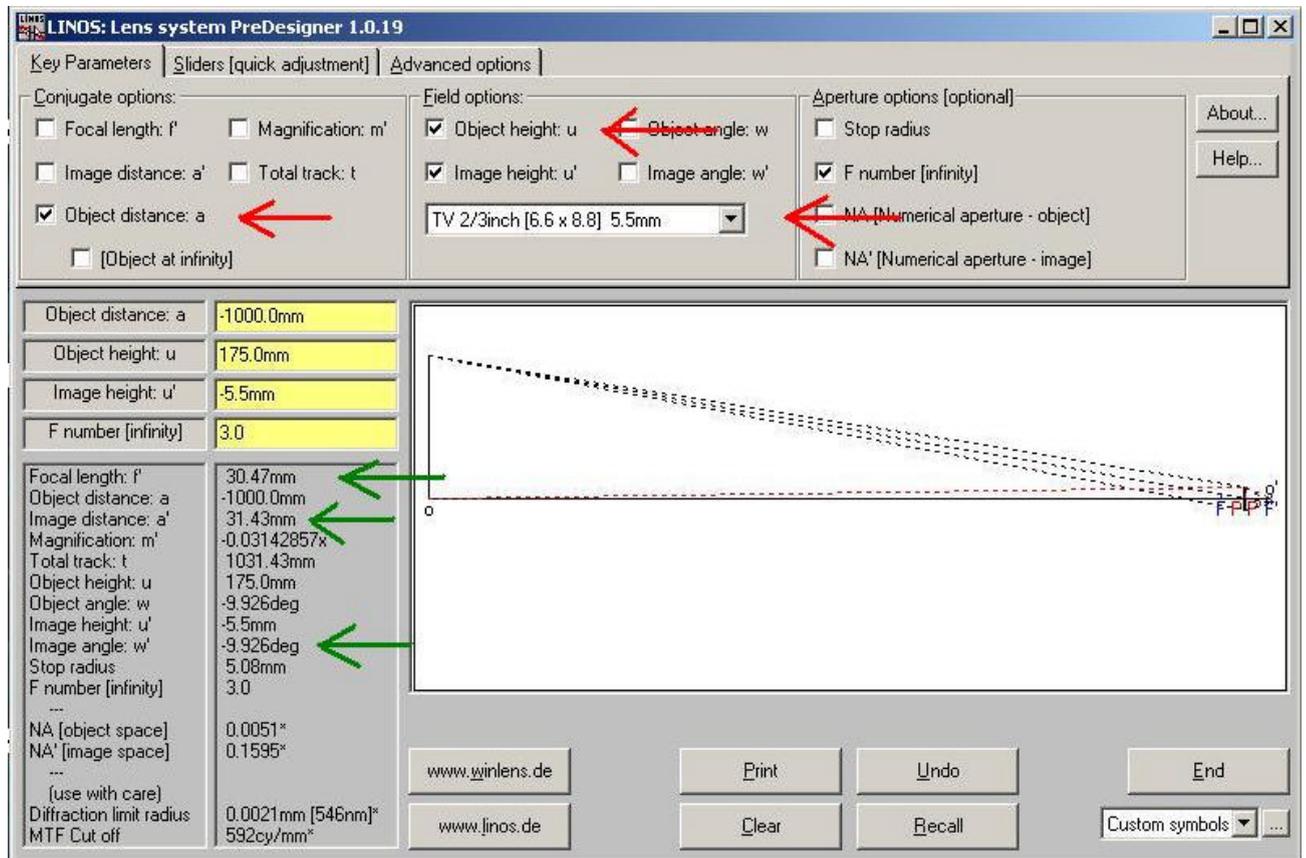
Die Nutzung der paraxialen Abbildungsgleichungen (siehe Anhang) führen nach Einsetzen der gegebenen Grundgrößen und etwaigem Umformen schnell zu den gesuchten Daten.

(Aufwand: gering)

#### 3.2 Computergestützter Ansatz

Nutzung von paraxialen Analyse-Software-Paketen

z.B. PreDesigner



Ergebnis:

$$b' \gg -1/32 \gg -0.0314$$

$$\omega \gg 10^\circ$$

$$a' \gg 31.4\text{mm}$$

$$f' \gg 30\text{mm}$$

#### 4. Realer Ansatz: Einzellinse

Die Einzellinse (Simplet) ist vom Rechenaufwand der einfachste Ansatz und wurde zunächst aus didaktischen Gründen gewählt (ohne das ein Erfüllen der gegebenen Anforderungen vorausgesetzt wird), da sich die ersten Schritte einer Systementwicklung bzw. Optimierung am besten veranschaulichen lassen.

Zur besseren Veranschaulichung des Optical Design Vorganges werden zusätzlich einige für das jeweilige System hilfreiche Vereinbarungen getroffen bzw. Vereinfachungen vorgenommen:

- Vereinbarung:**
- zunächst monochromatische Abbildung
  - zunächst On Axis Betrachtung
  - Objekt im Unendlichen (hier zulässige Vereinfachung, da Verhältnis  $a/f > 30!$ )

#### 4.1. Symmetrische Bikonvexlinse

Die symmetrische Bikonvexlinse ist wiederum die einfachste Einzellinse und soll somit als Startsystem für diese Optikentwicklung dienen.

##### 4.1.1 Manueller Ansatz

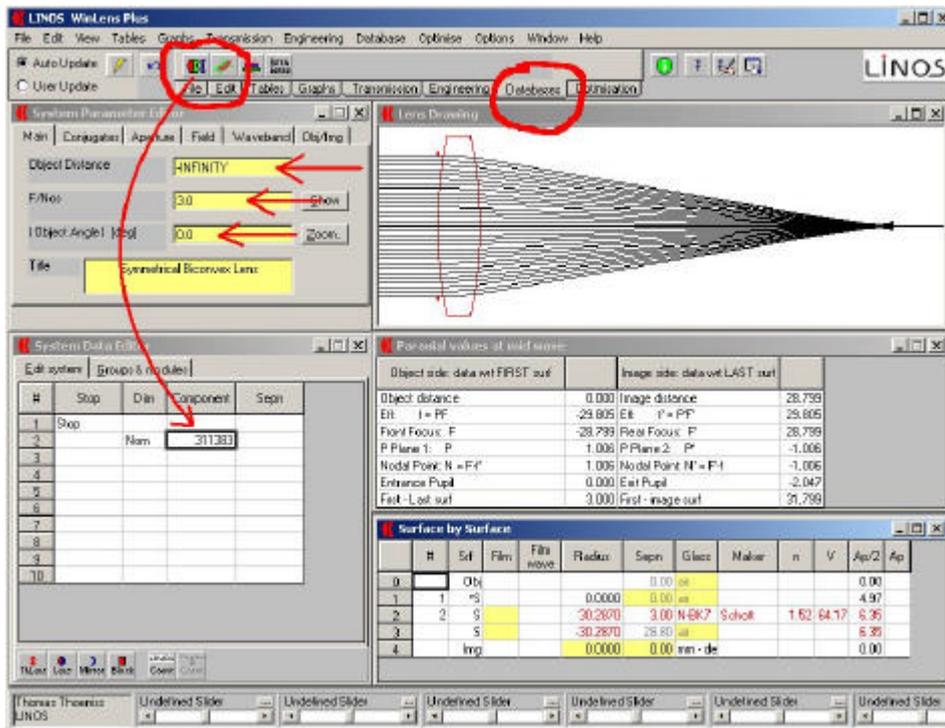
Nutzung der „Linsenmacher“-Formel (Lens Makers Formula - siehe Formelsammlung im Anhang) plus der gegebenen Brennweite zur Errechnung der Linsenradien, Glasauswahl: zunächst Standard Glas N-BK7 mit Brechzahl  $n \approx 1.5$ .

(Aufwand: gering)

##### 4.1.2 Computergestützter Ansatz

Auswahl einer bikonvexen Kataloglinse mit geeignetem Durchmesser ( $\varnothing \approx 10\text{mm}$  bei  $k=3.0$  und  $f' = 30\text{mm}$ ) in Datenbanken von

z.B. WinLens 4.3  , WinLensPlus  und Eingabe der in 2.2 ermittelten paraxialen Systemparameter.

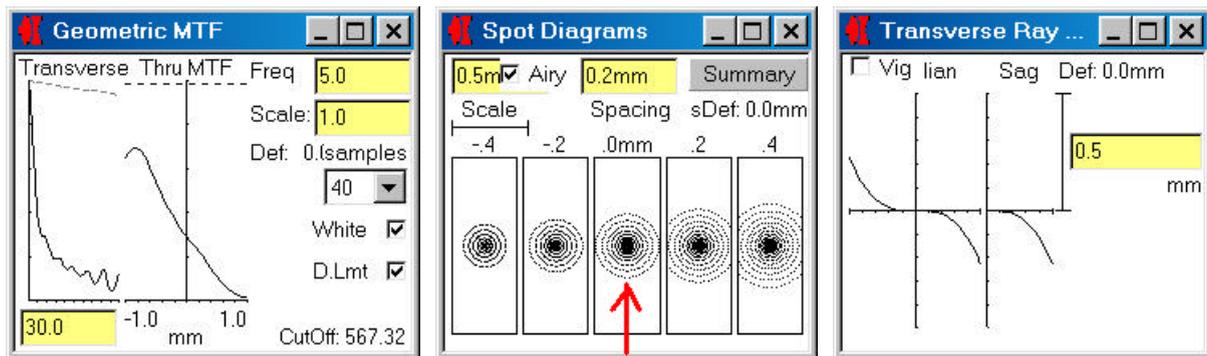


#	Stop	Dia	Component	Stop
1	Stop			
2		Nom	311.333	
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Object side: data wt FIRST surf		Image side: data wt LAST surf	
Object distance	0.000	Image distance	28.799
Elt. I = FF	-29.805	Elt. I' = FF'	29.805
Front Focus: F	-28.799	Rear Focus: F'	28.799
P Plane 1: P	1.006	P Plane 2: P'	-1.006
Nodal Point: N = FF'	1.006	Nodal Point: N' = F-I	-1.006
Entrance Pupil	0.000	Exit Pupil	-2.047
Fst - Last surf	3.000	Fst - Image surf	31.799

#	Surf	Film	Film move	Radius	Sepn	Glass	Maker	n	V	Ap/2	Ap
0	Obj			0.0000	0.00	air				0.00	
1	1	S		0.0000	0.00	air				4.97	
2	2	S		-30.2670	3.00	N-BK7	Schott	1.52	64.17	6.35	
3	3	S		-30.2670	28.80	air				6.35	
4	Img			0.0000	0.00	mm-de				0.00	

## Ergebnis:



MTF (Auflösung/Kontrast): zu gering!

Spot: zu groß!

Queraberration: zu groß!

## 4.2 Defokussierte Einzellinse (1. Optimierung)

Im Folgenden ist zu untersuchen, ob eine bessere („schärfere“) Bildebene außerhalb der aktuellen Gauss- bzw. paraxialen Bildebene existiert.

### 4.2.1 Manueller Ansatz

Die manuelle Errechnung der besten Einstell- bzw. Fokusebene eines optischen Systems ist aufwendig und hängt stark von den zu Grunde gelegten Gütekriterien ab. Bei Spezialfällen (z.B. axiale, monochromatische Abbildung aus dem Unendlichen) und genauer Kenntnis der Art der vorhandenen Abbildungsfehler (z.B. Öffnungsfehler) lassen sich vereinfachte Methoden zur Errechnung der besten Einstellebene anwenden.

(Aufwand: mittel bis hoch)

### 4.2.2 Computergestützter Ansatz

#### Variablen:

Für die automatische Untersuchung, ob eine bessere Bildebene außerhalb der paraxialen Bildebene existiert, steht zunächst als Freiheitsgrad nur die Verschiebung der Bildebene (Defokus) entlang der optischen Achse zur Verfügung.

The screenshot shows the 'Optimisation variables & limits' dialog box with the 'Separations' tab selected. The table below represents the data shown in the dialog:

	#	Part	Separation between surfaces	Separation: [variable or fixed]	center thickness lower limit	center thickness upper limit
	1	*1 - gap -		Fixed		
	2	Lens.311383	3.00	Fixed		
	3	- gap -				
	4	Defocus	-0.4589	Variable		

The 'Separations' tab is circled in red. A red arrow points to the 'Variable' cell in the 'Separation: [variable or fixed]' column for the 'Defocus' row.



### Definition der Zielfunktion:

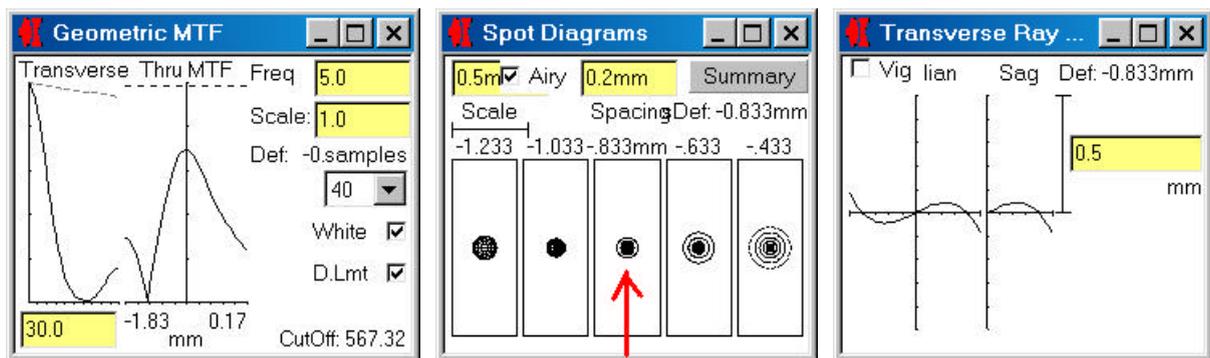
Zur einfachen Erzeugung einer geeigneten Zielfunktion (Merit Function) wird der „Easy Wizard“ genutzt. Mit diesem Tool kann durch wenige, einfache Vorgaben eine „Default“ Merit Function erzeugt werden, wenn eine spezifische, systembezogene Zielfunktion noch unklar ist. Als Gütekriterium für eine „schärfere“ Bildebene wird z.B. der Ort der kleinsten Queraberration (Transverse Ray Aberration TRA) genutzt. Als Zielwert der Queraberration sollte ein Wert gewählt werden, der kleiner als der aktuelle Betrag ist. Wie aus den Queraberrations- und Spotdiagrammen in 3.1.2 ersichtlich, beträgt die Queraberration bzw. der Fokaldurchmesser im aktuellen Design ca. 0.4mm. Somit kann der „Default“-Wert 0.05 mm zunächst beibehalten werden.

### Struktur der Zielfunktion (Merit Function):

Aus den gewählten Vorgaben hat der Easy Wizard automatisch eine Zielfunktion generiert, in der ausgewählte Strahlen hinsichtlich ihrer tatsächlichen (Defect Actual) und erwünschten lateralen Koordinaten in der Bildebene (Defect Target) verglichen werden. Während der Optimierung wird nun durch axiales Verschieben der Bildebene der Ort der besten Übereinstimmung zwischen Sollwert (TRA=0) und Istwert gesucht. Der defaultmäßig eingefügte Parameter für die Bildschnittweite (Back Focal Length – BFL) ist für die Bildortsuche nicht relevant und kann deaktiviert werden.

	Defect Name	In	Ry #	Field X	Field Y	Ap X	Ap Y	Defect [Actual]	< >	Defect Target	Diff [y-yt]	Tolerance ±	Relative Defect	Percent contribution
1	BFL	<input type="checkbox"/>	1					28.7995	=	28.7995	0.0000	0.2900	0.0000	
2	TRA-R	<input checked="" type="checkbox"/>	2	0.0000	0.0000	0.9420	0.0000	0.1159	=	0.0000	0.1159	0.0250	4.6360	89.0178
3	TRA-R	<input checked="" type="checkbox"/>	3	0.0000	0.0000	0.7071	0.0000	0.0229	=	0.0000	0.0229	0.0156	1.4667	8.9094
4	TRA-R	<input checked="" type="checkbox"/>	4	0.0000	0.0000	0.3357	0.0000	0.0177	=	0.0000	0.0177	0.0250	0.7074	2.0728

## Ergebnis:



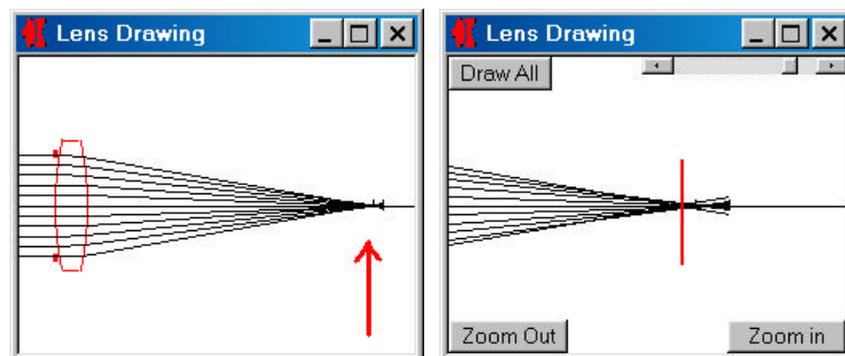
MTF: besser, zu gering!

Spot: besser, zu groß!

Queraberration: besser, zu groß!

## Deutung:

Bei der Suche nach der besten Einstellebene wurde während der Optimierung der Ort der kleinsten Strahleinschnürung bzw. des kleinsten Fokusdurchmessers gefunden.



### 4.3 Linse bester Form (2. Optimierung)

Aus den Queraberrationsdarstellungen ist ersichtlich, daß die Abbildung der Einzellinse durch einen starken Öffnungsfehler (sphärische Aberration) verschlechtert wird. Dieser Fehler hängt im entscheidenden Maße von den Einfallswinkeln und somit von der Umlenkung der Strahlen an den einzelnen Linsenoberflächen ab. Bei der gewählten symmetrischen Bikonvexlinse treffen die Strahlen auf zwei gleiche Radien. Es ist nun zu untersuchen, ob es für die Abbildung eines achsparallelen Büschels aus dem Unendlichen alternative Linsenformen zur symmetrischen Bikonvexlinse gibt.

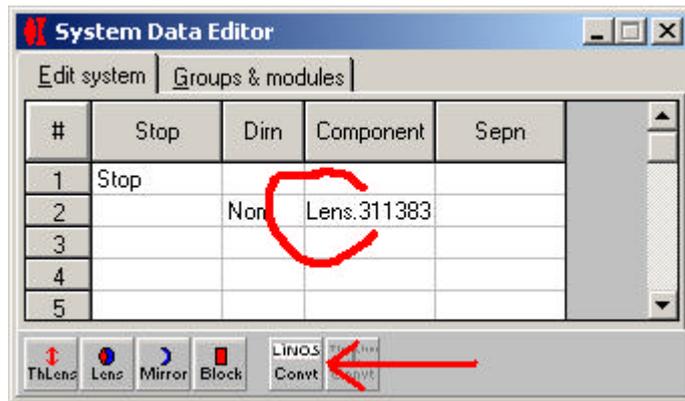
#### 4.3.1 Manueller Ansatz

Zur Errechnung der optimalen Linsenform können für den Fall der axialen Abbildung aus dem Unendlichen einfache Relationen zwischen dem Radius der Vorder- und Rückfläche (Best Form Bedingung) in Kombination mit der „Linsenmacher-Formel“ genutzt werden (siehe Formelsammlung im Anhang). Lediglich die Brennweite (durch Spezifikation gegeben) und die Brechzahl des Linsenmaterials müssen (ähnlich wie in Kapitel 3.1.1) vorgegeben werden.

(Aufwand: gering)

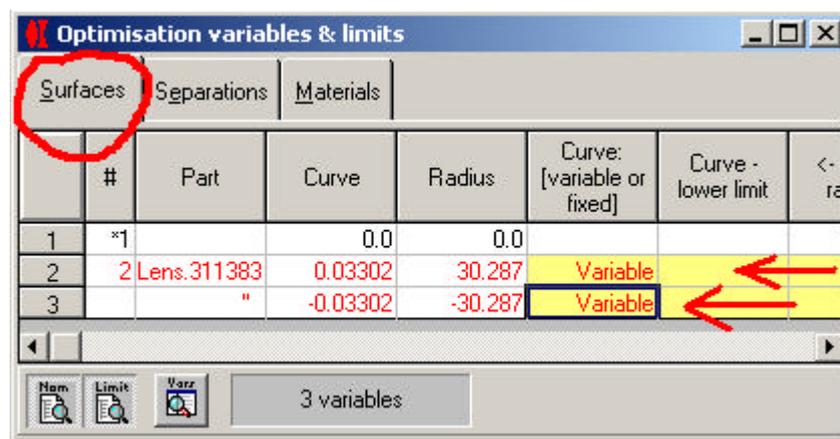
#### 4.3.2 Computergestützter Ansatz

Zur Untersuchung und Optimierung der Linsenform einer Einzellinse wird die bereits gewählte Kataloglinse genutzt. Damit die Standardkataloglinse aus dem Katalog hinsichtlich ihrer Konstruktionsparameter (Geometrie, Material usw.) verändert werden kann, muß sie zunächst in eine „User Defined Lens“ umgewandelt werden.



### Variablen:

Zusätzlich zum Defokus stehen nun auch die Radien bzw. Krümmungen der ersten und zweiten Linsenoberfläche zur Verfügung. Sie werden von „fixed“ auf „variable“ gesetzt und sind somit als Optimierungsparameter freigegeben.

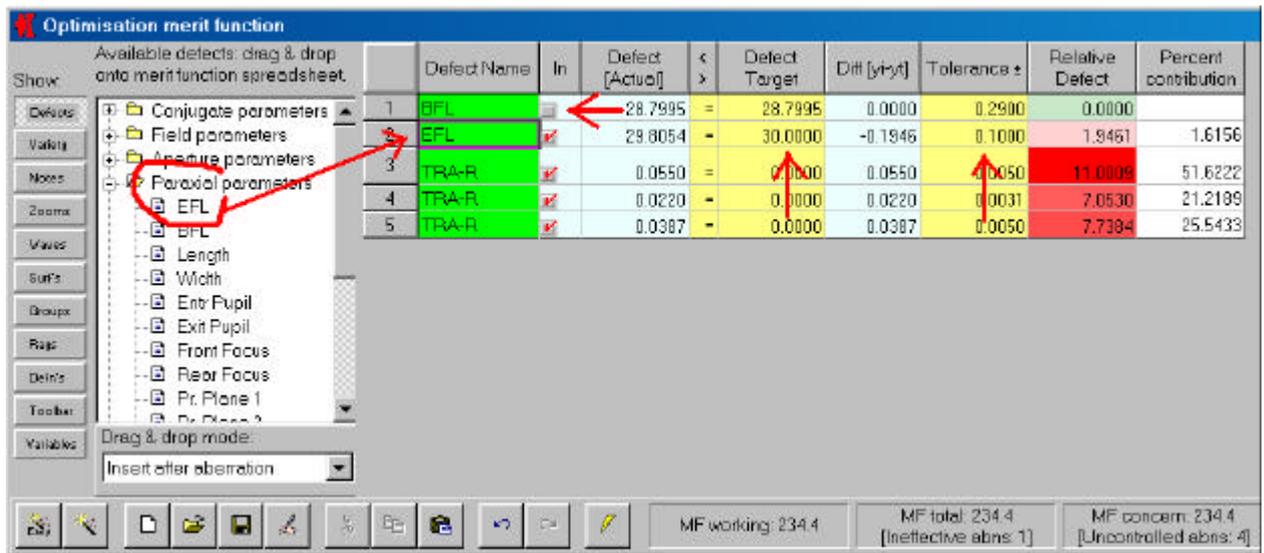


### Definition der Zielfunktion:

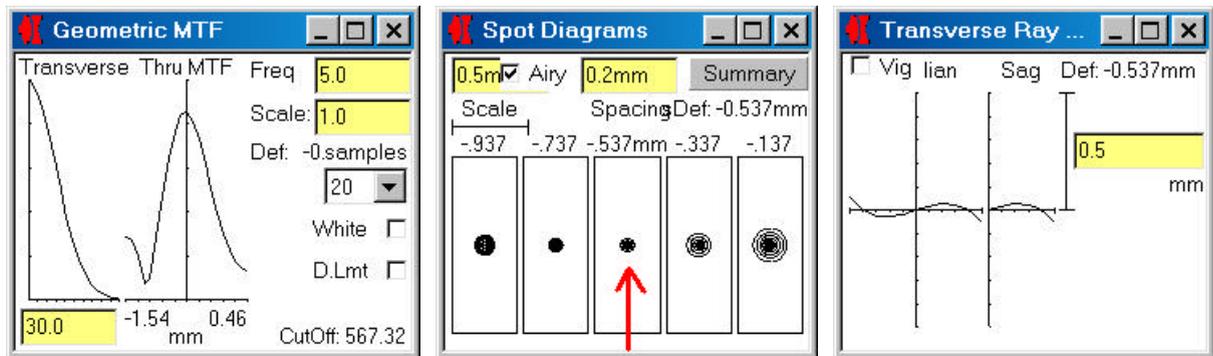
Da es sich bei der Suche nach der Linse bester Form ebenfalls „lediglich“ um die Optimierung des optischen Systems hinsichtlich einer kleineren Queraberration (TRA) handelt, kann zur Erstellung der Zielfunktion wiederum der Easy Wizard verwendet werden. Der Zielwert für die TRA wird auf z.B. 0.01mm reduziert.

### Struktur der Zielfunktion (erster manueller Eingriff):

Wie schon bei der Optimierung der Bildlage (Defokussierung) wurden wiederum in der Merit Function automatisch relevante Strahlen generiert. Da aber nun zur Optimierung auch Konstruktionsgrößen der Linsen (Radien) freigegeben wurden, kann es während der Optimierung der Radien hinsichtlich einer besseren Queraberration zu Änderungen der Systembrennweite  $f'$  kommen. Dieser Wert muß jedoch auf Grund der paraxialen Vorgaben ( $f' = 30\text{mm}$ ) „festgehalten“ werden. Hierzu wird in die Default Merit Function die Brennweite (Effective Focal Length – EFL) als eine erste benutzerdefinierte Zielvorgabe in die Zielfunktion eingefügt. Als Zielwert (Defect Target) wird 30mm vorgegeben und als zulässige Toleranz (Tolerance) für die Sollbrennweite wird z.B. 0.1mm gewählt. Der defaultmäßig eingefügte Operand der Bildschnittweite BFL kann wiederum deaktiviert werden.



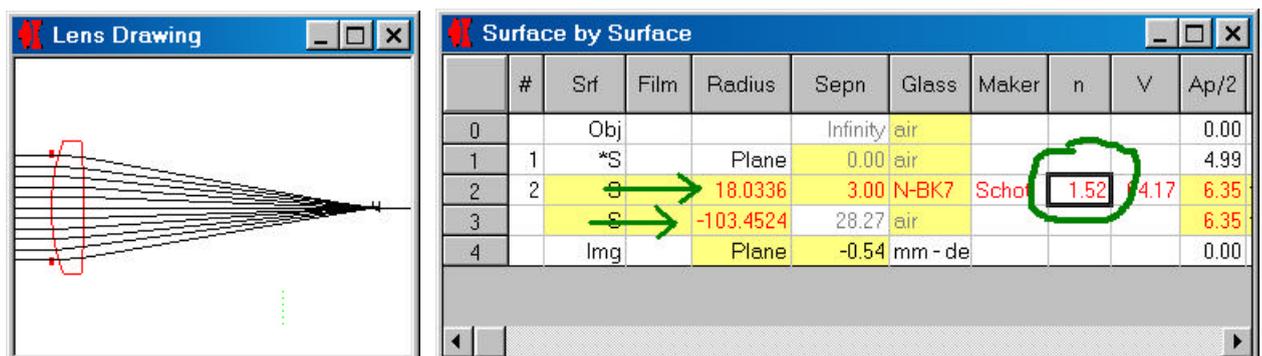
## Ergebnis:



MTF: deutlich besser, noch zu gering   Spot: deutlich besser, noch zu groß   TRA: deutlich besser, noch zu groß

## Deutung:

Die neue Linsenform zeigt eine deutlich bessere Abbildungsleistung (MTF). Durch die unterschiedlichen Radien der Linse wurden die Brechkräfte der Einzelflächen neu und somit die Strahlumlenkungen an den Flächen bei konstanter Linsenbrennweite gleichmäßiger verteilt. Dadurch wurden die Strahleinfallswinkel an den Flächen und damit die störende sphärische Aberration reduziert. Der neue Radius der Vorderfläche ( $r_1 = 18.0\text{mm}$ ) steht zum Radius der Hinterfläche ( $r_2 = -104\text{mm}$ ) in etwa im Verhältnis  $r_1/r_2 \approx -1/6$ . Das entspricht exakt der Bedingung für die Linse bester Form bei einer axialen Abbildung aus dem Unendlichen und einem Linsenmaterial mit der Brechzahl von etwa 1.5 (siehe Formelsammlung im Anhang).



#### 4.4 Modifizierte Best Form Linse (3. Optimierung, manueller Eingriff)

Durch die neue Aufteilung der Flächenbrechkkräfte und somit der Reduzierung der Strahleinfallswinkel an den Einzelflächen der Linse konnte die sphärische Aberration stark vermindert werden. Eine weitere Verringerung der Einfallswinkel kann nur über eine Reduzierung der Flächenkrümmungen (Vergrößerung der Radien erfolgen). Damit jedoch die Systembrennweite konstant gehalten werden kann, muß die Brechzahl des Linsenmaterials  $n$  vergrößert werden. Ein geeignetes Material mit einer hohen Brechzahl muß vorgegeben und die neuen entsprechenden Radien errechnet werden.

##### 4.4.1 Manueller Ansatz

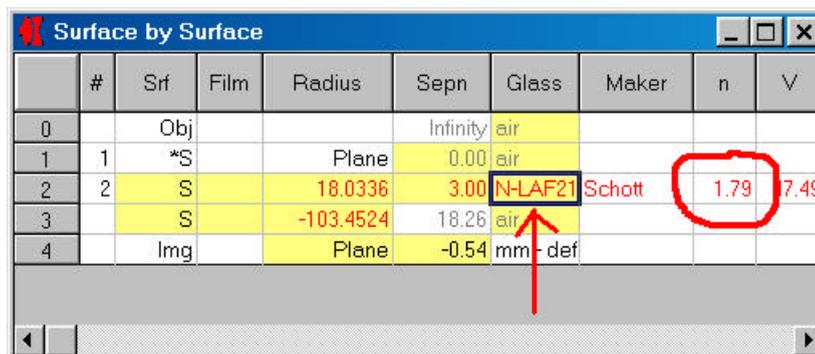
Ein gängiges hochbrechendes Material kann in Katalogen bzw. Übersichtstafeln für optisches Glas (siehe Anhang) der verschiedenen Hersteller (SCHOTT, Ohara, Hoya, Corning usw.) gefunden werden. Die neue Materialbrechzahl wird wiederum in den schon aus Kapitel 3.3.1 bekannten Formalismus eingesetzt, und somit kann die neue optimale Linsenform bestimmt werden.

(Aufwand: gering)

##### 4.4.2 Computergestützter Ansatz

Die Auswahl des geeigneten Materials kann aber auch komfortabler mit Materialdatenbankprogrammen wie z.B. dem Glass Manger  erfolgen. Hier ist eine schnelle Übersicht über die wesentlichen Eigenschaften der Materialien aller namhaften Anbieter möglich.

Ein gängiges und hoch brechendes Material ist z.B. das SCHOTT-Glas N-LaF 21 ( $n \approx 1.8$ ). Durch dieses wird das Ausgangsmaterial N-BK 7 ( $n \approx 1.5$ ) ersetzt.



	#	Srf	Film	Radius	Seprn	Glass	Maker	n	V
0		Obj			Infinity	air			
1	1	*S		Plane	0.00	air			
2	2	S		18.0336	3.00	N-LAF21	Schott	1.79	17.49
3		S		-103.4524	18.26	air			
4		Img		Plane	-0.54	mm-def			

##### Variablen:

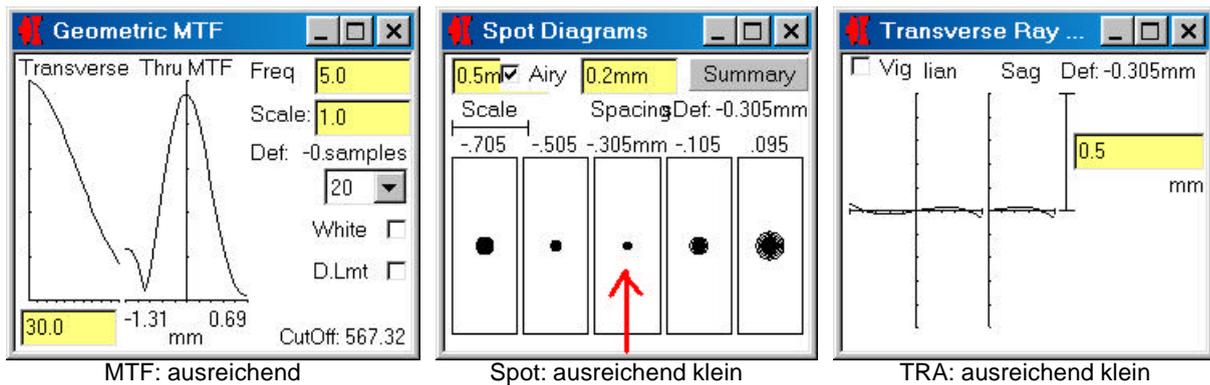
Da es sich bei der erneuten Optimierung lediglich um ein „Nach“-Optimieren der bereits vorhanden Best Form Linse handelt, können die variablen Größen (Defokus, Radius 1 und Radius 2) als Freiheitsgrade für die Optimierung beibehalten werden.

##### Erstellen der Zielfunktion:

Auch die eigentliche Struktur der Zielfunktion muß nicht modifiziert werden, da die ausgewählten Optimierungsparameter auch für dieses Nachoptimieren ihre Gültigkeit behalten. Nach Eingabe des neuen Linsenmaterials muß die Merit Function lediglich aktualisiert werden. 

**Struktur der Zielfunktion:** Keine Änderung zu Abschnitt 3.3

## Ergebnis:



## Deutung:

Die Abbildungsleistung konnte nochmals deutlich gesteigert werden. Die vorgegebenen Werte für die MTF sind nahezu erfüllt. Es werden 30 lp/mm mit etwa 20% Kontrast übertragen. Die Leistungssteigerung konnte durch das Einführen eines hoch brechenden Materials und somit durch das Verringern der Flächenkrümmungen erzielt werden. Im Ergebnis entstand eine der neuen Materialbrechzahl entsprechende Linse bester Form.

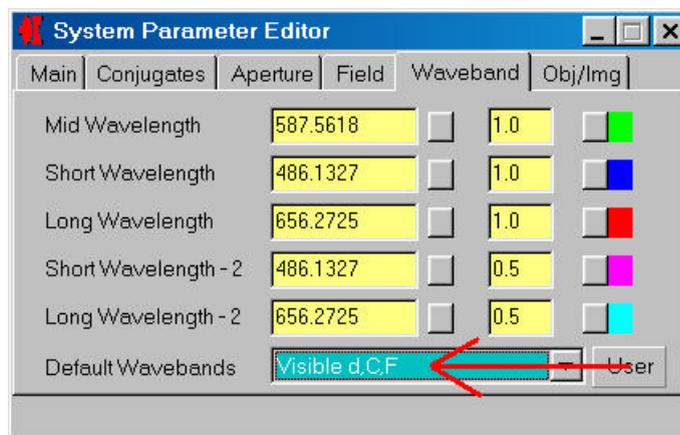
## 4.5 Analyse des errechneten Systems

Für die gestellte Aufgabe wurde willkürlich als einfachster optischer Ansatz eine symmetrische bikonvexe Kataloglinse gewählt. Durch die Modifizierung der Linse (Defokussieren, geeignetes Durchbiegen und Erhöhung der Materialbrechzahl) wurde die Abbildungsleistung hinsichtlich einer axialen und monochromatischen Abbildung aus dem Unendlichen soweit gesteigert, daß sie prinzipiell die gestellten Anforderungen erfüllt.

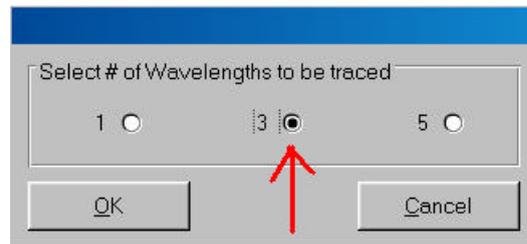
In der Aufgabenstellung war jedoch eine polychromatische (weiße) Abbildung und die Übertragung eines Feldwinkels von bis zu  $10^\circ$  gefordert. Diese beiden zusätzlichen Anforderungen müssen an dem errechneten System analysiert werden.

### 4.5.1 Analyse der axialen polychromatischen Abbildung

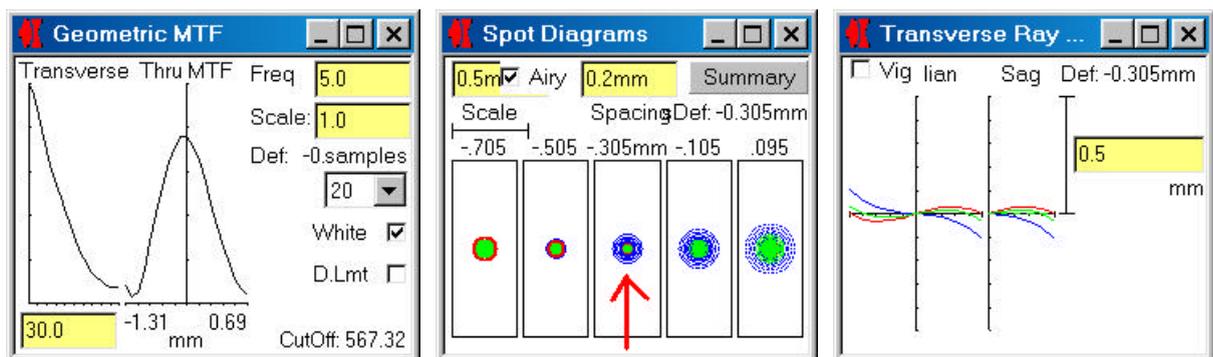
Zur Analyse der polychromatischen Abbildung werden repräsentative Wellenlängen innerhalb des „weißen“ Lichtspektrums ausgewählt. Es können z.B. die Default-Fraunhofer-Linien d, C, F (d = 587nm, C = 486nm und F = 656nm) ausgewählt werden.



Zur Systemanalyse werden die Rechenalgorithmen und grafischen Darstellungen von einer auf drei Wellenlängen umgestellt.



**Ergebnis:**



weiße MTF: abgesunken, zu niedrig

Spot: farblich verschmiert, zu groß

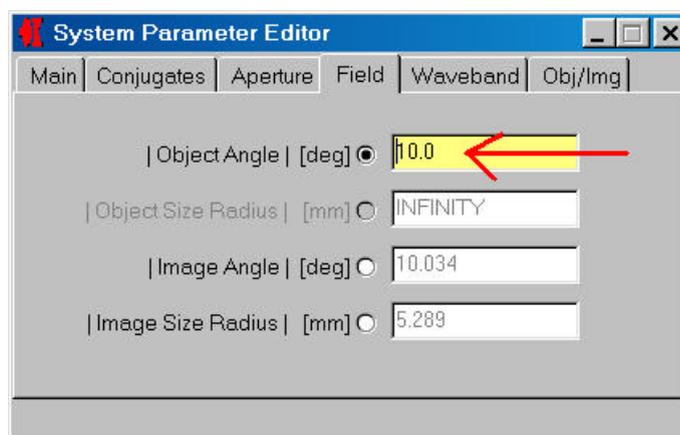
TRA: Variation mit Wellenlänge (Farblängsfehler)

**Deutung:**

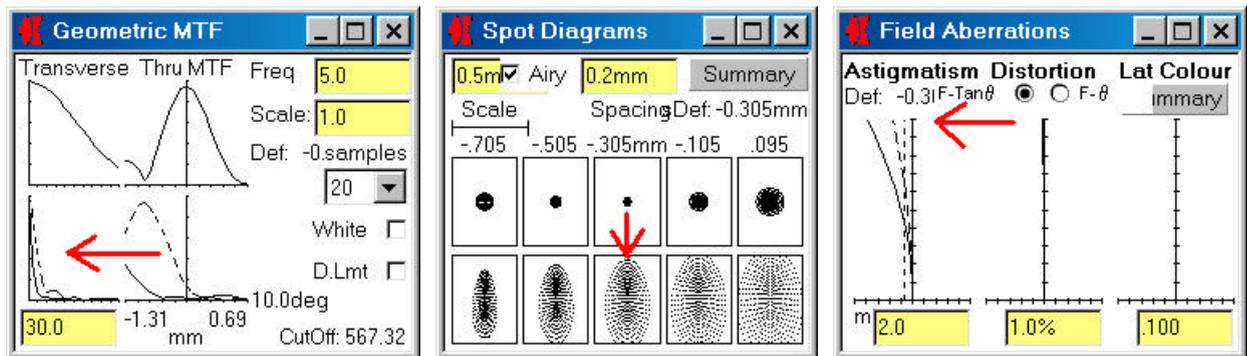
Die eigentlich relativ gute sphärische Korrektur wird durch die schon axial auftretenden Farbfehler (hier: Farblängsfehler) überlagert. Dadurch wird die Gesamtabbildung verschlechtert.

#### 4.5.2 Analyse der monochromatischen Feldabbildung

Die geforderte Abbildung eines ausgedehnten Objektes auf einen flächenhaften Detektor (CCD-Chip) hat einen maximalen Feldwinkel  $\omega \approx 10^\circ$  ergeben. Zur Simulation dieser Feldabbildung reicht im einfachsten Fall die zusätzliche Analyse des extremen Feldpunktes bei 10 Grad. Dieser Feldpunkt wird zunächst definiert. Zur besseren Veranschaulichung kann diese Analyse monochromatisch erfolgen.



## Ergebnis:



MTF: am Feldrand zu gering!

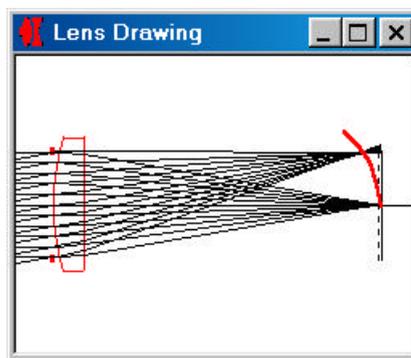
Spot: axial genügend für Feldrand für Feldrand zu groß

Feldaberration: zu große Bildfeldwölbung und Astigmatismus (zwei Bildschalen)

## Deutung:

Zur besseren Darstellung der Feldabbildung wurde die Queraberrationsdarstellung (TRA) durch die Feldaberrationsgrafik ersetzt. In dieser Grafik werden die Bildfeldfehler Astigmatismus bzw. Bildfeldwölbung, Verzeichnung und Farbquerfehler dargestellt. Verzeichnung und Farbquerfehler werden zunächst nicht betrachtet.

Die Analyse offenbart das Grundproblem der Einzellinse: Während die axiale Abbildung noch gut zu korrigieren ist, gelingt es in dieser Konfiguration nicht, ein ausgeprägtes Feld von mehreren Grad scharf abzubilden. Die extreme Vergrößerung des Spotdurchmessers für den äußeren Feldpunkt ist auf die Krümmung des eigentlichen Bildfeldes (Bildfeldwölbung) zurückzuführen. Zusätzlich fallen die Bildschalen für die scharfe Abbildung horizontaler und vertikaler Strukturen nicht zusammen (Astigmatismus), so daß eine wirklich punktuelle, scharfe Abbildung in keiner Ebene oder Bildschale gegeben ist.



## 4.6 Fazit und Ausblick

Die Möglichkeiten einer „einfachen“ Korrektur des Öffnungsfehlers einer Einzellinse sind mit der Suche nach der besten Fokusebene, der Variation der Durchbiegung der Linsenflächen und der Erhöhung der Glasbrechzahl erschöpft. Die Korrektur einer Einzellinse hinsichtlich der Farbfehler ist bedingt durch die dispersiven Materialeigenschaften prinzipiell nicht möglich. Die bei der Feldabbildung auftretenden Feldaberrationen lassen sich in dieser gewählten Konfiguration (Systemblende nahe der Linse) ebenfalls nicht beeinflussen. Dennoch gibt es Möglichkeiten, dieses einfache „System“ zu verbessern:

### Weiter Ansätze (siehe auch Hinweise im Anhang):

- Variation des Blendenortes in Verbindung mit Durchbiegung (z.B. Koma, Astigmatismus)
- Asphärisierung einer oder beider Linsenflächen (z.B. Öffnungsfehler)

- Vergrößerung der Linsendicke (z.B. Astigmatismus, Feldwölbung)
- Aufspalten der Einzellinse in zwei Linsen (z.B. sphärische Aberration)
- Einführung eines größeren Luftabstands zwischen beiden Linsen (alle Fehler)
- Hinzufügen einer Linse mit anderer Dispersion und Brechkraft zu einem Dublet (z.B. Farblängsfehler, sphärische Aberration, Isoplanasie siehe auch nächstes Kapitel)

## 5. Realer Ansatz: Achromat

- Vereinbarung:**
- zunächst On Axis Betrachtung
  - Objekt im Unendlichen (hier zulässige Vereinfachung, da Verhältnis  $a/f > 30!$ )

Der im Kapitel 3.5.1 als stark störend festgestellte Farblängsfehler (axiale Differenz der blauen, grünen und roten Fokuslage) der positiven Einzellinse hat seine Ursache in der dispersiven (farbzerlegenden) Eigenschaft des Linsenmaterials. Obwohl in den vorangegangenen Beispielen nur relativ niedrig dispergierende Materialien (Abbe-Zahl  $> 47$ ) verwendet wurden, sind die entstandenen „Systeme“ chromatisch stark unterkorrigiert (blauer Fokus liegt vor dem grünen und roten Brennpunkt). Dieser Fehler lässt sich nur durch das Hinzufügen eines zweiten Elementes korrigieren. Im einfachsten Fall wird eine zweite Linse mit hoher Dispersion und schwächerer negativer Brechkraft mit der positiven „Start“-Linse zu einem Dublet verkittet. Da bei negativen Linsen der Farbfehler überkorrigiert ist (roter Brennpunkt vor grünem und blauem Fokus), kann somit der unterkorrigierte Farbfehler der positiven Linse kompensiert werden. Die jeweiligen Brennweiten der verkitteten Einzellinsen müssen dabei so gewählt werden, daß die Gesamtbrennweite des Systems wiederum  $f' = 30\text{mm}$  ergibt.

Ferner erlaubt das verkittete Dublet durch ein geschicktes Aufteilen der Brechkräfte auf die einzelnen Linsenflächen eine bessere Korrektur der sphärischen Aberration.

### 5.1 Manueller Ansatz

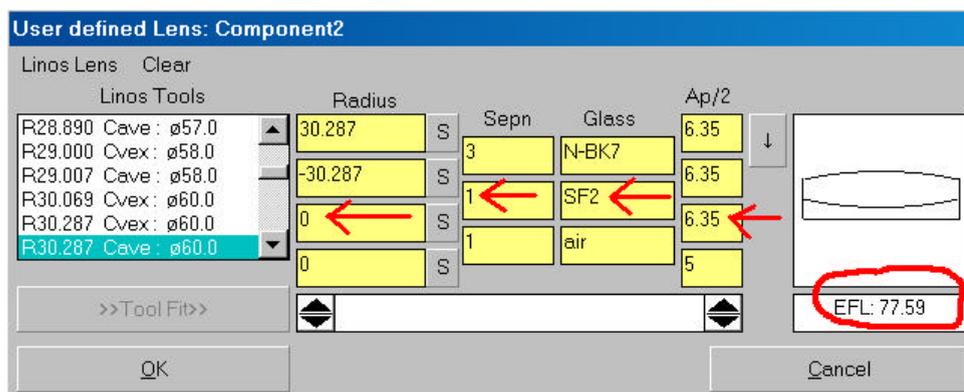
Die Synthese eines Dublets ist im Vergleich zu andern zwei- und mehrlinsigen optischen Systemen noch relativ einfach. Der Aufwand kann durch Faustformeln, Vereinfachungen und geschickte Wahl der Ausgangsparameter weiter reduziert werden. Dennoch ist schon einiger Rechenaufwand, vor allem durch das Probieren verschiedener Ausgangswerte, notwendig.

Zur Berechnung der Linsenbrechkkräfte bzw. Brennweiten und zur Glasauswahl werden im wesentlichen die Formeln für die Addition von Brennweiten, sowie die Achromasiebedingung für zwei Linsen benötigt. Beide Formeln beziehen sich zur Vereinfachung auf dünne Linsen mit geringem bzw. keinem Abstand zwischen den Elementen. Zur Ermittlung der Linsenradien der Einzelelemente wird wiederum die „Linsenmacher-Formel“ verwendet.

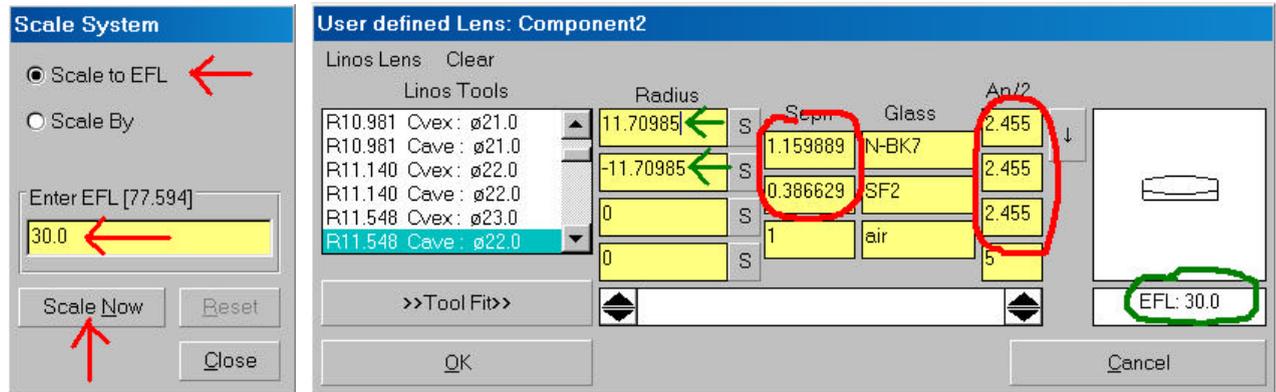
**(Aufwand: mittel)**

### 5.2 Computergestützter Ansatz

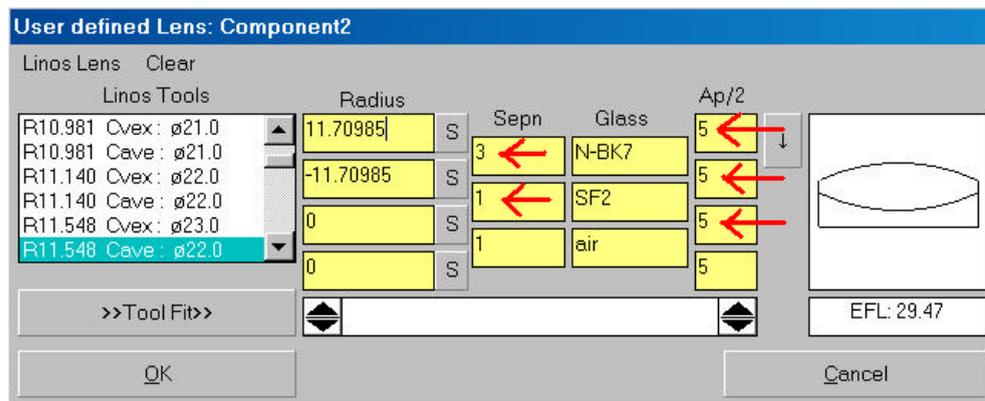
Als Startsystem kann wieder die Kataloglinse bzw. auch die defokussierte Einzellinse aus schwach dispergierendem Kronglas (N-BK7 mit Abbe-Zahl  $v \approx 64$ ) aus Kapitel 3.1 bzw. 3.2 verwendet werden. Unmittelbar daran wird eine einfache Plankonkavlinse aus dem relativ stark dispersiven Standardmaterial SF2 (Schwerflintglas, Abbe-Zahl  $v \approx 33.8$ ) angefügt.



Durch das Einfügen der Plankonkavlinse hat sich ein verkittetes Dublet mit der verlängerten Brennweite von  $f' \approx 78\text{mm}$  ergeben. Um wieder auf die geforderte Systembrennweite von  $f' = 30\text{mm}$  zu gelangen, kann das System einfach hinsichtlich der Brennweite skaliert werden.



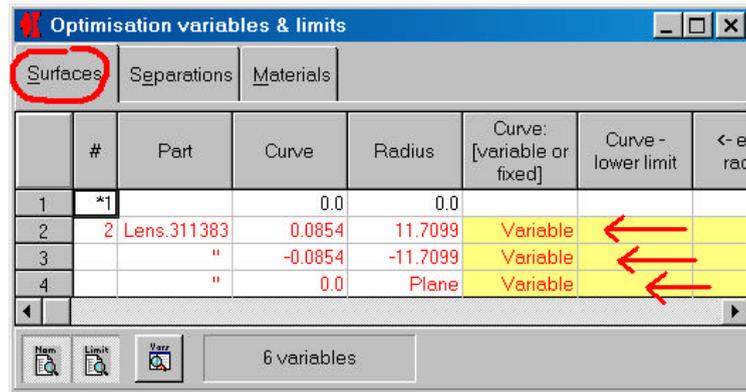
Das automatische Skalieren der Brennweite erfolgt durch ein einfaches Umskalieren der Konstruktionsparameter der Linse (Radien, Mittendicken und Durchmesser) um den Faktor der Brennweite. Dadurch, daß die Brennweite um einen Faktor 2.6 verringert worden ist, sind auch die Mittendicken, Durchmesser und Radien um diesen Faktor verkleinert worden! Es entstand somit ein sehr dünnes System (Linsenmittendicken zu klein - nicht fertigbar) mit dem Durchmesser von ca. 5mm (Öffnung zu klein). Um wieder zu einem brauchbaren Ansatz zu gelangen, werden manuell die Mittendicken auf den ursprünglichen Wert (notfalls auch größer) und die Linsendurchmesser auf die notwendige Öffnung von 10mm (Achtung: evtl. Randüberschneidungen!) zurückgesetzt.



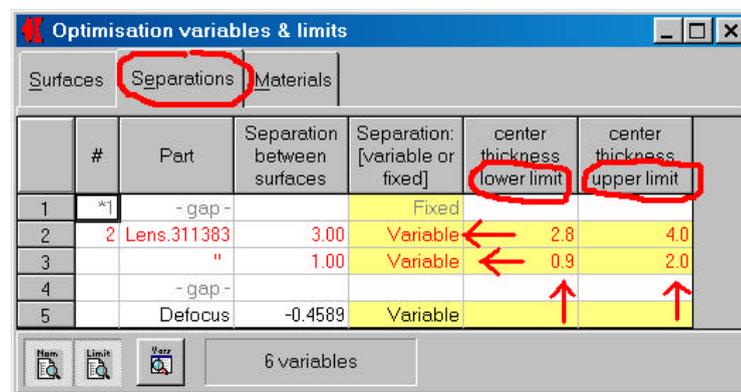
Durch das Ändern der Mittendicke wurde die Systembrennweite leicht geändert. Diese Abweichung ist jedoch unerheblich klein und ohnehin Bestandteil der folgenden Optimierung.

### Variablen:

Durch das Skalieren und Anpassen der Linsengeometrie ist ein für die Optimierung geeigneter Ansatz mit einigen Freiheitsgraden entstanden. Es stehen 5 Konstruktionsparameter (2 Mittendicken, 3 Radien) und der Defokus zur Verfügung. Die Glasauswahl wurde bereits im Ansatz getroffen, kann aber später (falls notwendig) ebenfalls variiert werden.

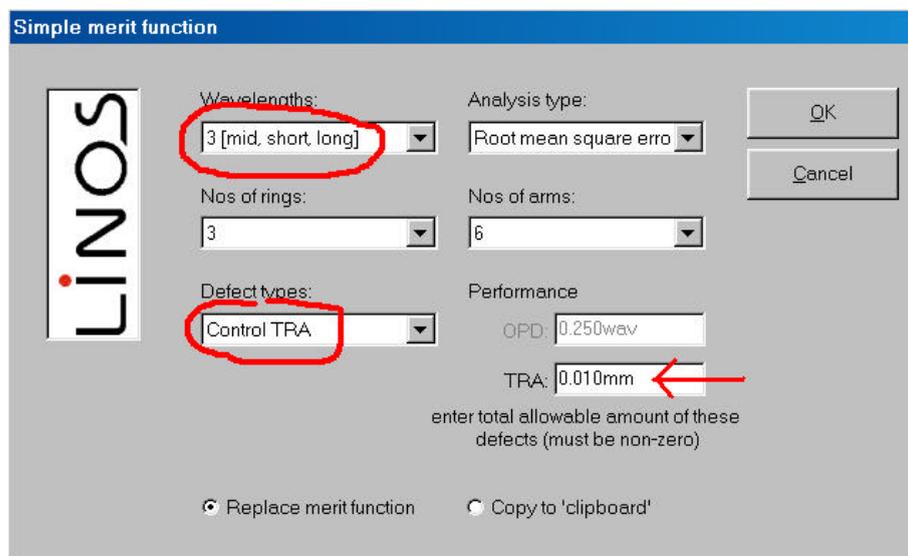


Die Freigabe der Radien erfolgt wie bei dem Einzellinsenansatz. Bei der Freigabe der Mittendicken sollten jedoch Vorgaben hinsichtlich des oberen und unteren Limits (maximale und minimale Linsendicke) gemacht werden, da sich während der Optimierung Scheinlösungen mit sehr dicken bzw. dünnen Linsen (sogar mit negativen Mittendicken) ergeben können.



### Erstellen der Zielfunktion:

Im einfachsten Fall wird auch hier wiederum die Default Merit Function des Easy Wizard genutzt. Jedoch müssen jetzt drei statt einer Wellenlänge berücksichtigt werden. Die weiteren Einstellungen können von der Best Form Linse übernommen werden.

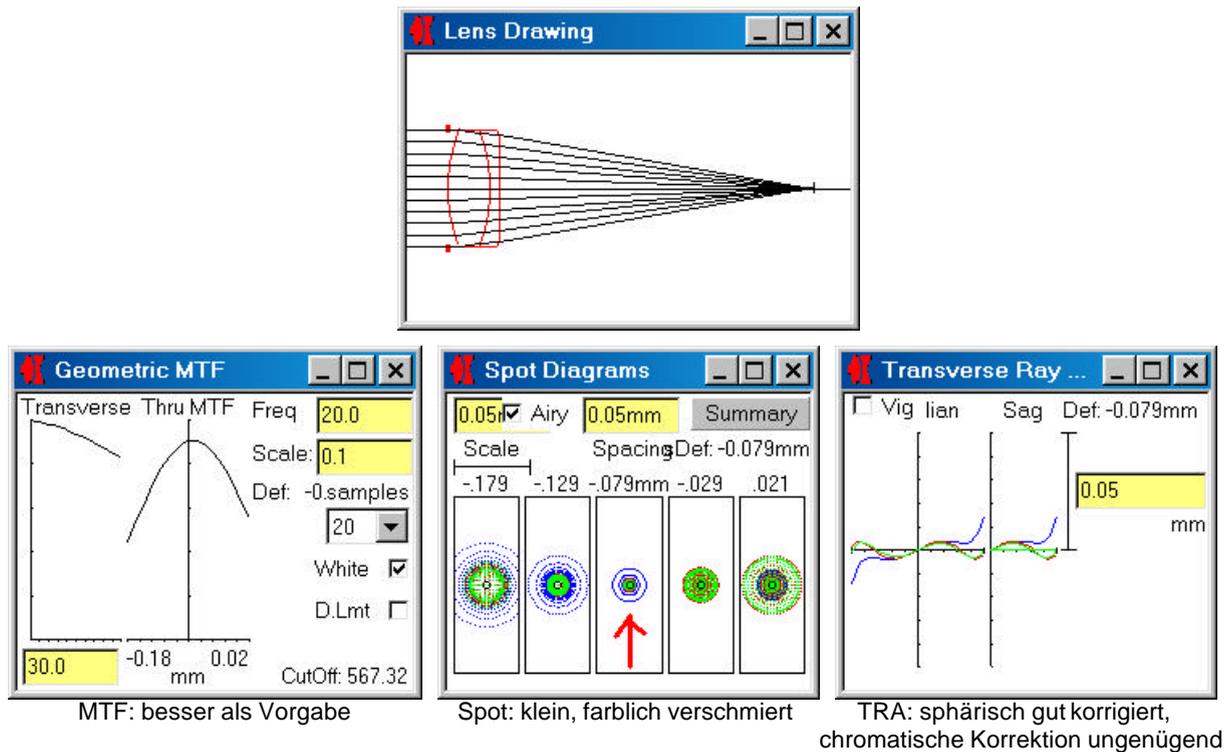


### Struktur der Zielfunktion:

Die Merit Function hat sich im Vergleich zur Optimierung der Best Form Linse nicht grundlegend geändert. Es wurden wiederum automatisch relevante Strahlen ausgewählt, jedoch in diesem Fall jeweils für die drei vorgegebenen Wellenlängen. Somit ist die Zielfunktion umfangreicher geworden. Manuell muß auch hier wieder die Systembrennweite von  $f' = 30\text{mm}$  mit einer Toleranz von z.B  $0.1\text{mm}$  als Zielwert vorgegeben werden.

### Ergebnis:

(Achtung: Skalierung geändert!)

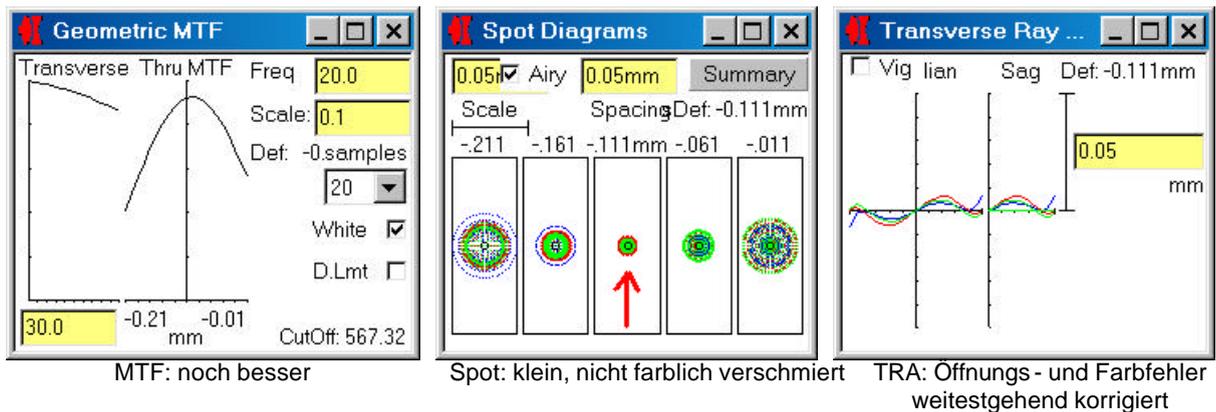


### Deutung:

Durch den mehr oder weniger empirisch gewählten Glasansatz konnte der Öffnungsfehler des verkitteten Duplets schon nach dem ersten Optimierungszyklus sehr gut auskorrigiert werden, womit das Auflösungsvermögen nochmals gesteigert werden konnte. Die MTF ist nun schon deutlich höher als gefordert.

Die chromatische Korrektur ist jedoch ungenügend. Während der rote und grüne Fokus sehr gut übereinander liegen, befindet sich der blaue Fokus hinter den anderen Farben. Das System ist demnach für das blaue Licht überkorrigiert und es kommt in der Bildebene zu blauen Farbsäumen. Die Ursache ist in der zu starken Dispersion des Flintglases der Negativlinse zu suchen. Mit Hilfe eines Glasdatenbank-Programmes kann schnell ein Glas mit einer etwas geringeren Dispersion gefunden werden. Es bietet sich das SCHOTT-Glas F2 (Abbe-Zahl  $v = 36.4$ ) an. Die folgende Nachoptimierung erfolgt durch ledigliches Neustarten der Optimierungsroutine und ohne Änderung der Vorgaben.

## Ergebnis der Nachoptimierung:



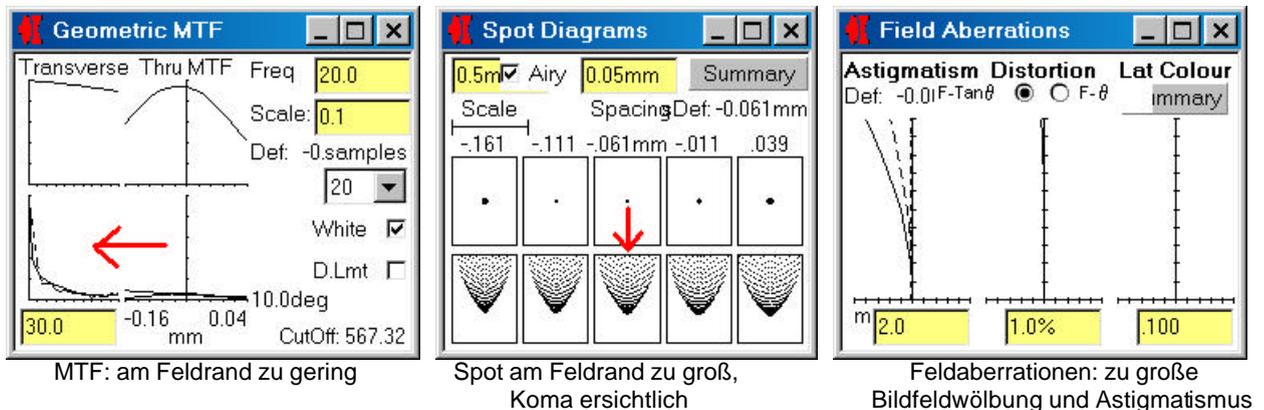
## Deutung:

Durch den verbesserten Glasansatz und das erneute Optimieren der Konstruktionsdaten des Systems ist ein sphärisch und chromatisch korrigiertes Dublet entstanden. Der Bildort für die Randwellenlängen Blau und Rot des gewählten Spektrums liegt zumindest für eine Pupillen- bzw. Blendenzone übereinander. Derartige Systeme werden als Achromate bezeichnet.

## 5.3 Analyse des errechneten Systems

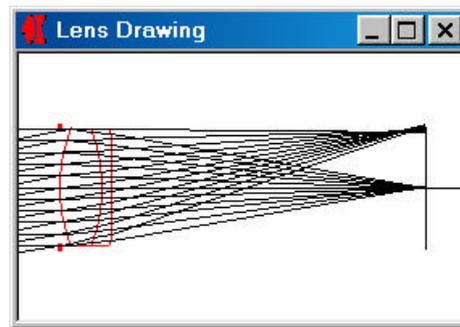
Die Forderung nach einer guten polychromatischen („weißen“) Abbildung wurde zumindest für den axialen Fall erfüllt. Wie sieht nun die Abbildung eines Feldes mit 10 Grad Ausdehnung aus? Die Analyse kann zur besseren Veranschaulichung auch hier wieder monochromatisch erfolgen.

## Ergebnis (Achtung: Skalierung geändert!):



## Deutung:

Trotz der guten Korrektur des Farb- und des Öffnungsfehlers durch das Hinzufügen eines zweiten Elementes zur ursprünglichen Zelleinlinse bleibt das Gesamtsystem für die Abbildung außersaxialer Feldpunkte schlecht zu korrigieren. Das Dublet zeigt bei der Feldabbildung ein ähnliches Verhalten wie die Zelleinlinse: Astigmatismus und Feldwölbung zerstören die gute axiale Abbildungsleistung im Feld. In der grafischen Spotdarstellung (Spot Diagrams) ist zusätzlich ein neuer Abbildungsfehler zu erkennen. Das kometenhafte Auseinanderlaufen der Strahldurchstoßpunkte in der Bildebene lässt auf das Vorhandensein von Koma schließen.



#### 5.4 Fazit und Ausblick

Das in diesem Abschnitt generierte Dublet kann natürlich auch als Standardkomponente bei diversen Katalogoptik-Anbietern gefunden werden (vergleich LINOS Standardachromat 322285). Derartige Katalogachromate sind in der Regel schon von vornherein für zumindest ein kleines Feld von bis zu 3 Grad (siehe weitere Ansätze) mitkorrigiert. Der vollständige Neubeginn eines derartigen Systems sollte die einfachsten Grenzen und Möglichkeiten einer Dubletoptimierung aufzeigen. Eine wesentliche Verbesserung dieses Systems ist hier mit einfachen Methoden ebenfalls nicht zu erreichen. Dennoch gibt es bedingt durch die größere Anzahl an Freiheitsgraden Möglichkeiten, die Abbildungsleistung hinsichtlich einer Feldabbildung zu steigern.

#### Weitere Ansätze (siehe auch Hinweise in der Literatur im Anhang):

- Einbeziehung der Isoplanasie-Bedingung (z.B. Koma)
- Variation der Gläser (höherbrechendes Kronglas) zum „Neuachromaten“ (z.B. Feldkrümmung)

## 6. Realer Ansatz: Triplet

**Vereinbarung:** - Objekt im Unendlichen (hier zulässige Vereinfachung, da Verhältnis  $a/f > 30!$ )

Wie in den vorangegangenen Abschnitten deutlich gemacht wurde, ist die Korrektur von einfachen Einzellinsen und verkitteten Dubletts hinsichtlich einer Feldabbildung von mehreren Grad bei einer mittleren Blendenzahl von  $k=3.0$  nicht möglich. Zur Korrektur der wichtigsten auftretenden Bildfehler (Öffnungsfehler, Astigmatismus, Bildfeldwölbung, Koma) ist ein komplexeres System mit mehr Freiheitsgraden notwendig. Das nächste komplexere System ist das sogenannte Triplet. Dieses prinzipielle Startsystem läßt sich auch durch Vorgabe des maximalen Bildwinkels und der Blendenzahl in der Objektivübersicht nach Smith (siehe Anhang) finden. In seiner Struktur besteht das Triplet aus drei durch einen signifikanten Luftabstand getrennte Einzellinsen. Der günstigste prinzipielle Ansatz wurde bereits von C. F. Gauss erkannt und ergibt sich in der Anordnung einer Negativlinse zwischen zwei positiven Linsen (+ - + Anordnung). Die Systemblende liegt in unmittelbarer Nähe der negativen Linse und verleiht dem System eine gewisse, hinsichtlich der späteren Korrektur vorteilhafte Symmetrie (siehe auch Hinweise zum Design im Anhang).

### 6.1 Manueller Ansatz

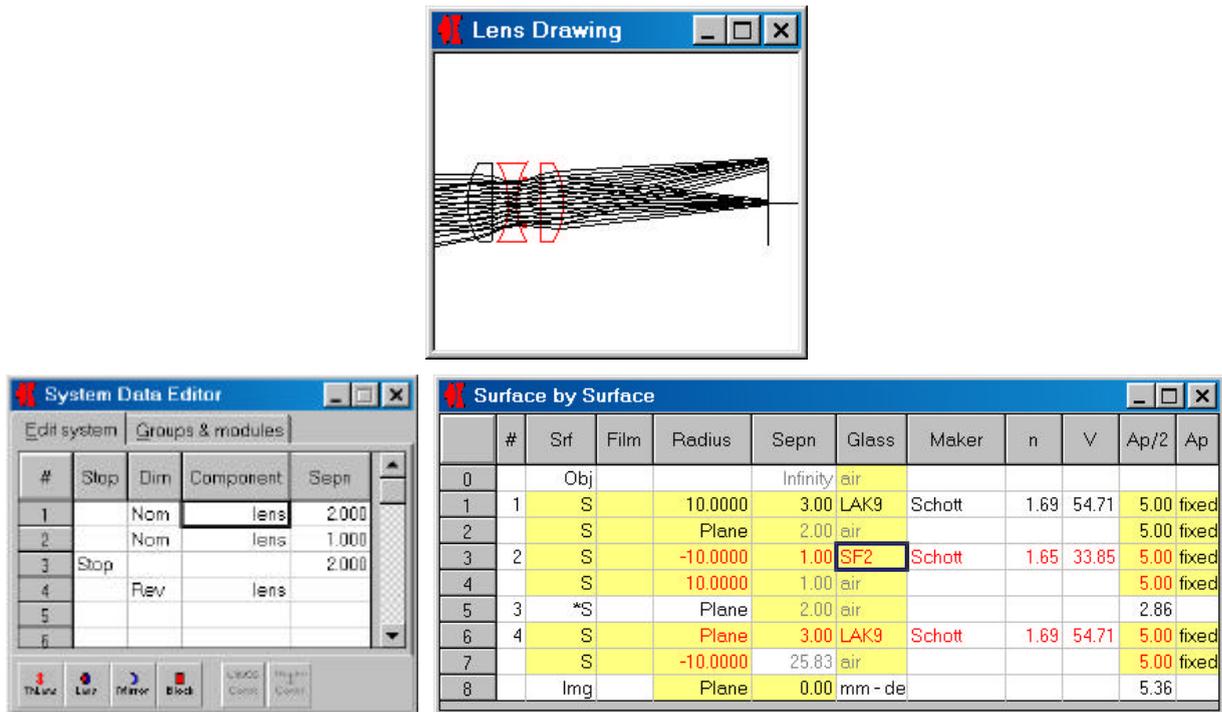
Das gewählte Startsystem hat den Vorteil und den „Fluch“ der zahlreichen Freiheitsgrade. Es stehen bereits 6 Radien, 3 Mittendicken, 3 Gläser und 2 Luftabstände zur Verfügung. Mit reiner Empirie gelangt man hier nur schwer zu einem brauchbaren Objektiv. Der Erfolg der Systemberechnung hängt sehr stark von den Startwerten ab. Ohne einige Vereinfachungen und gezielte Startwerte ist die Berechnung der Konstruktionsparameter sehr aufwendig. M. Berek (siehe Literaturliste im Anhang) hat 1930 zum ersten Mal eine relativ einfache Synthese eines Triplets veröffentlicht. Diese Synthese basiert auf der Seidelschen Bildfehlertheorie 3. Ordnung und setzt deren gute Kenntnis voraus. Dennoch liefert auch dieses Berechnungsschema keine vollständige Synthese. Es werden auch hier die verschiedensten manuellen Vorgaben verlangt.

**(Aufwand: hoch)**

### 6.2 Computergestützter Ansatz

Bei Kenntnis des prinzipiellen Objektivtyps kann aus Objektivdatenbanken (z.B. WinLens / WinLensLib) ein hinsichtlich der Blendenzahl und des Öffnungsverhältnisses annähernd geeignetes System ausgesucht und nachoptimiert werden. Zur besseren Verdeutlichung des Optimierungsvorganges wird aber auch hier von einem empirischen Tripletansatz ausgegangen. Willkürlich werden zwei positive Plankonvexlinsen aus dem höherbrechenden Material LaK9 mit der Brennweite  $f' \approx 15\text{mm}$  und eine negative, symmetrische Bikonkavlinse mit der Brennweite  $f' \approx -7.5\text{mm}$  aus dem schon bekannten Material SF2 in der bereits erwähnten Form + - + angeordnet. Die Linsenmittendicken wurden willkürlich auf 3mm und die Abstände auf 2mm festgelegt. Die Linsendurchmesser wurden wie schon bei der Best Form Linse auf 10mm festgelegt, und die Blende wurde dicht hinter die Negativlinse im Abstand = 1mm gestellt.

Das somit entstandene Startsystem hat eine zufällige Brennweite von  $f' \approx 30\text{mm}$ . Sich andere empirisch ergebende Brennweiten können wieder durch Skalieren angepaßt werden. Die Brennweite muß bei der nun folgenden Optimierung wieder als Parameter in der Merit Function überwacht werden. Die in der Linsenschnittdarstellung verlaufenden Strahlen lassen erkennen, daß bei dem Startdesign keinerlei „Voroptimierung“ erfolgt ist.



### Variablen:

Wie bereits erwähnt, stehen beim Triplet eine Reihe variierbarer Konstruktionsparametern zur Verfügung. Die Linsenradien können ohne Einschränkungen wie schon bei den vorangegangenen Beispielen freigegeben werden.

Bei den Linsenmittendicken und -abständen sollte jedoch wiederum der Variationsbereich sinnvoll eingegrenzt werden. Bei der Definition des Variationsbereiches für die Blende ist darauf zu achten, daß laut Ansatz der Abstand zwischen der Blende und der Negativlinse klein sein soll.

The 'Optimisation variables & limits' window shows the following data:

#	Part	Separation between surfaces	Separation: [variable or fixed]	center thickness lower limit	center thickness upper limit
1	lens	3.00	Variable	2.5	3.5
2	- gap -	2.00	Variable	1.5	2.5
3	lens	1.00	Variable	0.9	1.5
4	- gap -	1.00	Variable	0.5	1.5
5	*3	2.00	Variable	1.5	2.5
6	lens	3.00	Variable	2.5	3.5
7	- gap -				
8	Defocus	0.00	Variable		

13 variables

### Erstellung der Zielfunktion:

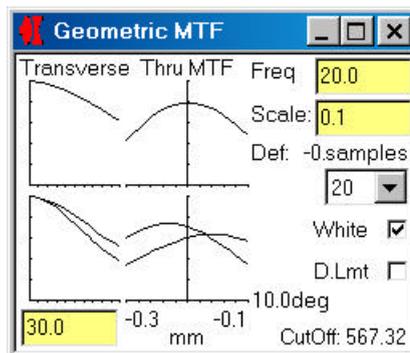
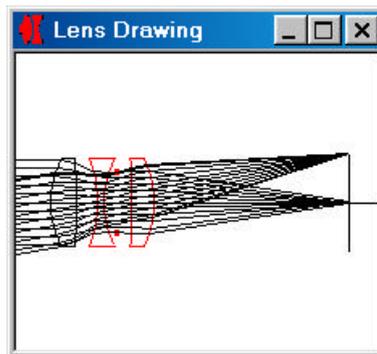
Auch hier wird wiederum der Easy Wizard zum Erzeugen einer ersten Zielfunktion genutzt. Da laut Ansatz mit dem gewählten Startsystem eine Korrektur auch der außeraxialen Strahlen möglich sein soll, wird gleich von Anfang an die Feldabbildung durch die Berücksichtigung des Feldrandpunktes (siehe auch Linsenschnittdarstellung) mitkorrigiert. Die Vorgaben für den Wizard bleiben wie schon beim Achromaten erhalten (3 Wellenlängen, TRA = 0.05mm)

### Struktur der Zielfunktion:

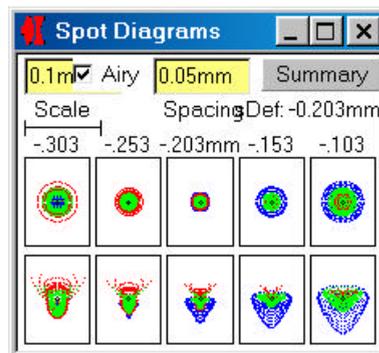
Im Vergleich zum Achromaten wurden in der Merit Function jetzt nicht nur Strahlen für jede der drei Wellenlängen für das Achsbüschel sondern auch für den Feldrandpunkt ausgewählt. Die Merit Funktion ist wiederum komplexer geworden. Die Brennweite wurde erneut als zu überwachendes Kriterium manuell mit einer zulässigen Toleranz von z.B. 0.3mm (1%) eingefügt und die Back Focal Length (BFL) deaktiviert.

### Ergebnis:

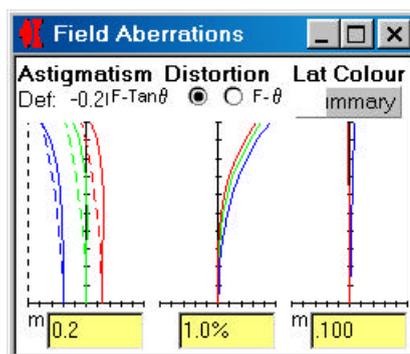
Um nach dem erfolgten Optimieren die Abbildungsleistung vollständig charakterisieren zu können, werden im Folgenden die MTF, die Spots, die TRA und die Feldaberrationen in der dreifarbigigen Konfiguration betrachtet.



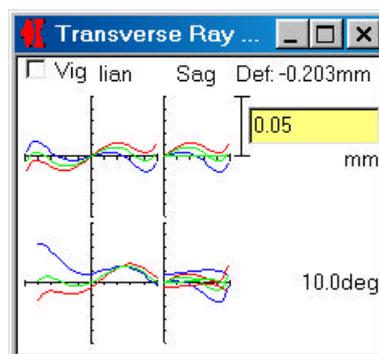
MTF: entspricht den Vorgaben



Spots: klein aber farblich verschmiert



Feldaberrationen: Astigmatismus und Feldwölbung korrigiert, leichte Verzeichnung

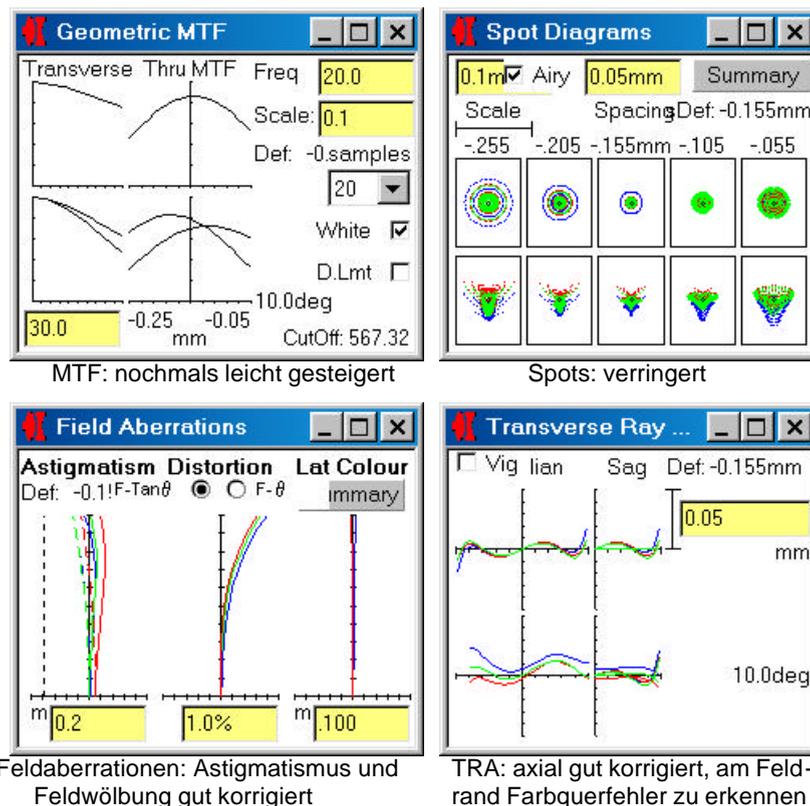


TRA: klein, Farblängs- und Querfehler zuerkennen

### Deutung:

Aus einem relativ willkürlichen Tripletansatz ist nach einem ersten Optimieren ein überwiegend gut sphärisch und chromatisch korrigiertes System sowohl für die Achs- als auch für die Feldabbildung entstanden. Astigmatismus und Bildfeldwölbung sind nahezu perfekt. Die bei den Feldaberrationen zu erkennende Verzeichnung von ca. 1 Prozent kann bei normalen Abbildungsaufgaben toleriert werden. Lediglich ein leicht unterkorrigierter Farblängsfehler und ein chromatischer Querfehler im Feld mindern die Abbildungsqualität. Durch ein etwas stärker dispergierendes Flintglas in der Negativlinse könnte zumindest der Farblängsfehler verbessert werden. Es wird hierzu z.B. das SCHOTT-Glas SF5 gewählt.

### Ergebnis der Nachoptimierung:



### Deutung:

Durch das Einführen des neuen, stärker dispergierenden Glases für die zentrale Negativlinse wurde der Farblängsfehler nahezu perfekt korrigiert. Die gute Korrektur der Bildfeldwölbung blieb erhalten. Lediglich der Astigmatismus hat sich geringfügig verschlechtert. Der Farbquerfehler hat sich erwartungsgemäß nicht wesentlich verändert und wird nur durch eine Änderung der Dispersion der äußeren Elemente wirksam zu beeinflussen sein (siehe auch Hinweise im Anhang).

Die MTF liegt sowohl für den Achs- als auch für den Feldrandpunkt über dem geforderten Limit. Durch die beim Start festgelegten Linsendurchmesser werden die Strahlbüschel der Feldabbildung leicht beschnitten (vignettiert). Durch ein einfaches Vergrößern der Linsendurchmesser kann diese Beschneidung aufgehoben werden. Eine Vignettierung ist bei normalen Abbildungsproblemen bis zu einem gewissen Grad zulässig (bei Fotoobjektiven bis zu 40 Prozent!) und kann sich bei gezieltem Einsatz positiv auf den Designprozeß auswirken, da stark aberrationsbehaftete und schwer zu korrigierende Randstrahlen der Feldbüschel ausgeblendet werden können.

### 6.3 Fazit und Ausblick

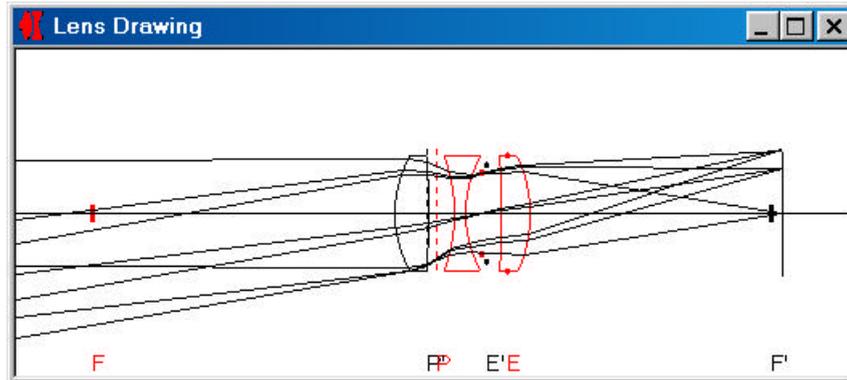
Die Vorhersage der guten Korrektionsmöglichkeiten des Tripletansatzes hat sich bestätigt. Alle wesentlichen Abbildungsfehler konnten korrigiert oder zumindest soweit minimiert werden, daß die Forderung nach einer guten polychromatischen Abbildung bis zu einem Feldwinkel von 10 Grad und der Öffnung von bis zu  $k=3$  erfüllt ist. Weitere Verbesserungen der noch verbliebenen Restfehler (Astigmatismus, Koma und Farbquerfehler) bleiben einer Feinkorrektur überlassen, die in diesem Rahmen nicht abgehandelt werden kann. Hierzu sei auf die Literaturangaben im Anhang verwiesen. Es ist zu beachten, daß bis auf die sphärische Aberration alle Abbildungsfehler miteinander verknüpft und nur mit einem gegenseitigen Ausbalancieren zu korrigieren sind. Hierzu können z.B. die Seidelschen Bildfehler als Zielgrößen in der Merit Function genutzt werden.

Das errechnete Design kann nur als vorläufiges Ergebnis eines kompletten Objektivdesigns dienen. Für die Umsetzung des errechneten Designs in ein reales Objektiv müssen zusätzlich Forderungen der Baubarkeit schon beim Designvorgang berücksichtigt werden (vorhandene Radienwerkzeuge, Linsenrandstärken, Auflageflächen usw.). Ferner können Toleranzen im Fertigungsprozeß zu einer erneuten Verschlechterung der Abbildungsleistung führen. Derartige fertigungsbedingte Einflüsse müssen ebenfalls in den Designprozeß einfließen und können zu drastischen Designänderungen führen. Der Einfluß von Fertigungsfehlern bei der Herstellung des Systems auf die optische Abbildungsleistung kann durch entsprechende Software simuliert

werden (z.B. Tolerancer )

## 7. Schlussbetrachtung des errechneten Systems

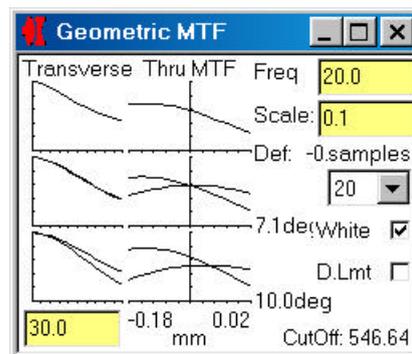
Während der Korrektur der verschiedenen Ansätze wurden unterschiedliche Annahmen bzw. Vereinfachungen zu Grunde gelegt. Diese konnten bis auf die Abbildung aus dem Unendlichen Schritt für Schritt aufgehoben werden. Nun bleibt zu überprüfen, ob die gute Abbildungsleistung auch unter den konkret gegebenen Bedingungen (Objekt mit einer halben Diagonale von 175mm in etwa 1 Meter Entfernung) über das ganze Feld erhalten bleibt. Die in der Kundenspezifikation gegebenen Größen (Objektgröße und Entfernung, Bildgröße) bzw. später errechneten paraxialen Grunddaten (Abbildungsmaßstab, Feldwinkel) werden nun der Analyse zu Grunde gelegt. Ferner wird auch noch ein mittlerer Feldpunkt in die Betrachtung mit aufgenommen.



Linsenschnitt mit allen paraxialen Grundpunkten

#	Srf	Film	Radius	Seprn	Glass	Maker	n	V	Ap/2	Ap
0		Obj		-980.72	air				175.00	
1	1	S	10.2625	3.02	LAK9	Schott	1.69	54.71	5.00	fixed
2		S	-62.9154	2.25	air				5.00	fixed
3	2	S	-14.2689	0.89	SF8	Schott	1.69	31.18	5.00	fixed
4		S	10.1909	1.46	air				5.00	fixed
5	3	*S	Plane	1.62	air				3.44	
6	4	S	-120.3794	2.50	LAK9	Schott	1.69	54.71	5.00	fixed
7		S	-11.9698	22.07	air				5.00	fixed
8		Img	Plane	-0.08	mm - de				5.49	

Konstruktionsdaten



MTF

System parameters					
<b>Conjugates</b>					
Object Distance	-958.1946			-963.7842	
Image Distance	22.1726			30.2628	
Magnification	-0.0314	Track		993.0117	
<b>Aperture</b>					
Stop Rad	3.444	Object NA	0.00505	Image NA	0.16094
Entr Beam Rad	4.842	Exit Beam Rad	3.568	F/Nos	3.0
Entr Pupil Rad	4.89	Exit Pupil Rad	4.315	Effective F/Nos	3.1068
<b>Field Size</b>					
Object Angle   [deg]	10.251	Object Size Radius   [mm]	175.0		
Image Angle   [deg]	11.583	Image Size Radius   [mm]	5.495		
<b>Waveband</b>					
Mid Wavelength	587.5618	Long Wavelength	656.2725		
Short Wavelength	486.1327	Long Wavelength - 2	656.2725		
Short Wavelength - 2	486.1327				
<b>Media</b>					
Object Medium	air	Image Medium	air		
Radius of Image Curvature	Plane				
<b>Triplet 1:3.0/30</b>					
<input type="button" value="OK"/>			<input type="button" value="Print"/>		

Systemdaten

Aus der MTF Grafik ist zu entnehmen, daß auch nach dem Umfokussieren auf den geforderten Abbildungsmaßstab von  $\beta' = -0.0314$  die gute Abbildungsleistung über das gesamte Feld erhalten bleibt. Die leichte Verkürzung der realen gegenüber der geforderten Objektweite hat seine Ursache in der axialen Ausdehnung des Objektivs und in der leichten Abweichung der Brennweite von dem paraxial exakt geforderten Wert  $f' = 30.5\text{mm}$ . Diese Abweichung kann jedoch in diesem Fall der ungefähren Spezifikation von ca. 1 Meter vernachlässigt werden.

## 8. Anhang

### 8.1 Allgemeine Hinweise zum computergestützten Optical Design

- Die Ansatzsuche für ein System erfolgt in der Regel in der Patentliteratur bzw. in Systembibliotheken z.B. **WinLensLib** (LINOS), LensVIEW (Optima Research), Hierbei ist auf grundsätzliche Eigenschaften zu achten (relative Öffnung, Feldwinkel und Sondereigenschaften wie z.B. lange Schnittweiten → z.B. Retrofokussystem, kurze Baulängen → z.B. Telesystem).
- Bekannte Systeme mit erforderlichen Grundeigenschaften aber anderen Brennweiten können skaliert werden z.B. **WinLens**-Funktion „Scale“. Achtung: Bildfehler werden mitskaliert!
- Bei Neuentwicklungen oder starken Systemmodifikationen sollte auf eine Grundsymmetrie der Optik zur Systemblende geachtet werden. Stark asymmetrische Systeme erschweren die Korrektur lateraler Fehler (Verzeichnung, Farbquerfehler).
- Stark angespannte Systeme (Symptome: große Strahlrichtungsänderungen im System, stark gekrümmte Linsenflächen → „Aschenbecher“) sind in der Regel zu vermeiden, da derartige Systeme eine hohe Sensibilität gegenüber Fertigungstoleranzen besitzen oder nicht herstellbar sind.
- Systeme mit einem „harmonischen“ Strahlverlauf sind „gesund“!
- Stark gekrümmte Einzelelemente können u.U. in zwei oder mehrere entspannte Elemente gleicher Wirkung aufgespaltet werden.
- Bei der Glasauswahl sollte auf die Verfügbarkeit und auf die chemischen und mechanischen Eigenschaften geachtet werden. Sondergläser sind teuer und u.U. schwer zu beschaffen. Chemisch und mechanisch empfindliche Gläser verteuern den Bearbeitungsprozess und somit das Gesamtsystem erheblich!
- Systemblendenferne Elemente können wirksam achsferne Fehler (Verzeichnung, Feldwölbung, Farbquerfehler) beeinflussen.
- Systemblendennahe Elemente erlauben die effektive Korrektur von achsnahen Fehlern (Öffnungsfehler, Koma, Farblängsfehler).
  
- Vor Optimierungsbeginn sollten die Hauptparameter eines Systems (Brennweite, Abmaße) grob stimmen.
- Öffnungen und Feldwinkel können in Grenzen schrittweise während des Optimierungsvorganges vergrößert werden.
- Bei der Definition der Zielfunktion (Merit Funktion) sollte auf eine einfache und übersichtliche Struktur geachtet werden. Somit können redundante Eingaben vermieden und einzelne Parameter besser beobachtet werden.
- „Default“-Merit Funktionen können bestenfalls zu einem Startsystem führen!
- Gewünschte Zielwerte für einzelne Aberrationen in der Merit Funktion können sich widersprechen und „lähmen“ den Optimierungsprozess (z.B. Cook-Triplet: Astigmatismus=0 UND Bildfeldwölbung=0).
- Eingriffe in das Startsystem sollten überschaubar sein (nicht alle Parameter gleichzeitig ändern bzw. freigeben) sonst geht das „Gefühl“ für die Wirksamkeit eines Parameters verloren.
- Eine Standardoptimierung zeigt das Dilemma, dass nach dem Abschluss einer Optimierung nur eine lokale Lösung eines globalen Problems vorliegt. Eventuell verhilft ein Rückschritt zu einer früheren Optimierungsstufe oder ein gänzlicher Neuansatz zu einem besseren Endergebnis.
- Bei Neuansätzen helfen u.U. auch „ausgefallene“ Ansätze: z.B. Einsatz von Asphären, Kunststoffen, Spiegelsystemen.
- Optimierung nur so gut wie nötig! Optical Designer neigen zur Detailverliebtheit und Perfektion und können nur schwer den Optimierungsprozess abschließen.

## 8.2 Praktische Formeln (Für Systeme beiderseits in Luft, Achtung: Vorzeichen beachten!)

- paraxialer Abbildungsmaßstab:  $b' = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}$

- 

- paraxiale Abbildungsgleichung:  $\frac{1}{a'} = \frac{1}{a} - \frac{1}{f'}$   $f' = -f$

nützliche Umstellungen:  $a = \frac{f' a'}{f' - a'}$ ,  $a' = \frac{f' a}{f' + a}$ ,  $f' = \frac{a a'}{a - a'}$

- paraxialer Feldwinkel (Blende im Linsenort):  $w = w' = \arctan\left(\frac{y}{a}\right) = \arctan\left(\frac{y'}{a'}\right)$

- Addition der Brechkräfte zweier dünner Linsen:  $\Phi_{Ges} = \frac{1}{f_{Ges}} = \Phi_1 + \Phi_2 - D\Phi_1\Phi_2$

- Linsenbrechkraft:

(„Lens Makers Formula“)

$$\Phi' = \frac{1}{f'} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{n-1}{n} \frac{d}{r_1 r_2} \right)$$

Vereinfachung für dünne Linsen:  $\Phi' = \frac{1}{f'} \approx (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

Spezialfälle (Brechzahl  $\approx 1.5$  z.B. N - BK7):

plankonvexe / -konkave Linse:  $f' \approx 2r$

symm. bikonvexe / -konkave Linse:  $f' \approx r_1 \approx -r_2$

- Linse bester Form (Objekt im Unendlichen,  $r_1$  positiv)  $\frac{r_1}{r_2} = -\frac{4+n-2n^2}{2n^2+n}$

Spezialfall  $n \approx 1.5$  (etwa N - BK7)  $\frac{r_1}{r_2} = -\frac{1}{6}$   
(stärkere Krümmung zum Objekt!)

- Kleinste visuell auflösbare Struktur (Rayleigh-Kriterium):  $\Delta y = \frac{0.61\lambda}{NA}$

$$(NA' = bNA)$$

- Blendenzahl für Abbildung aus dem Unendlichen:  $k = \frac{f'}{\varnothing_{EP}}$

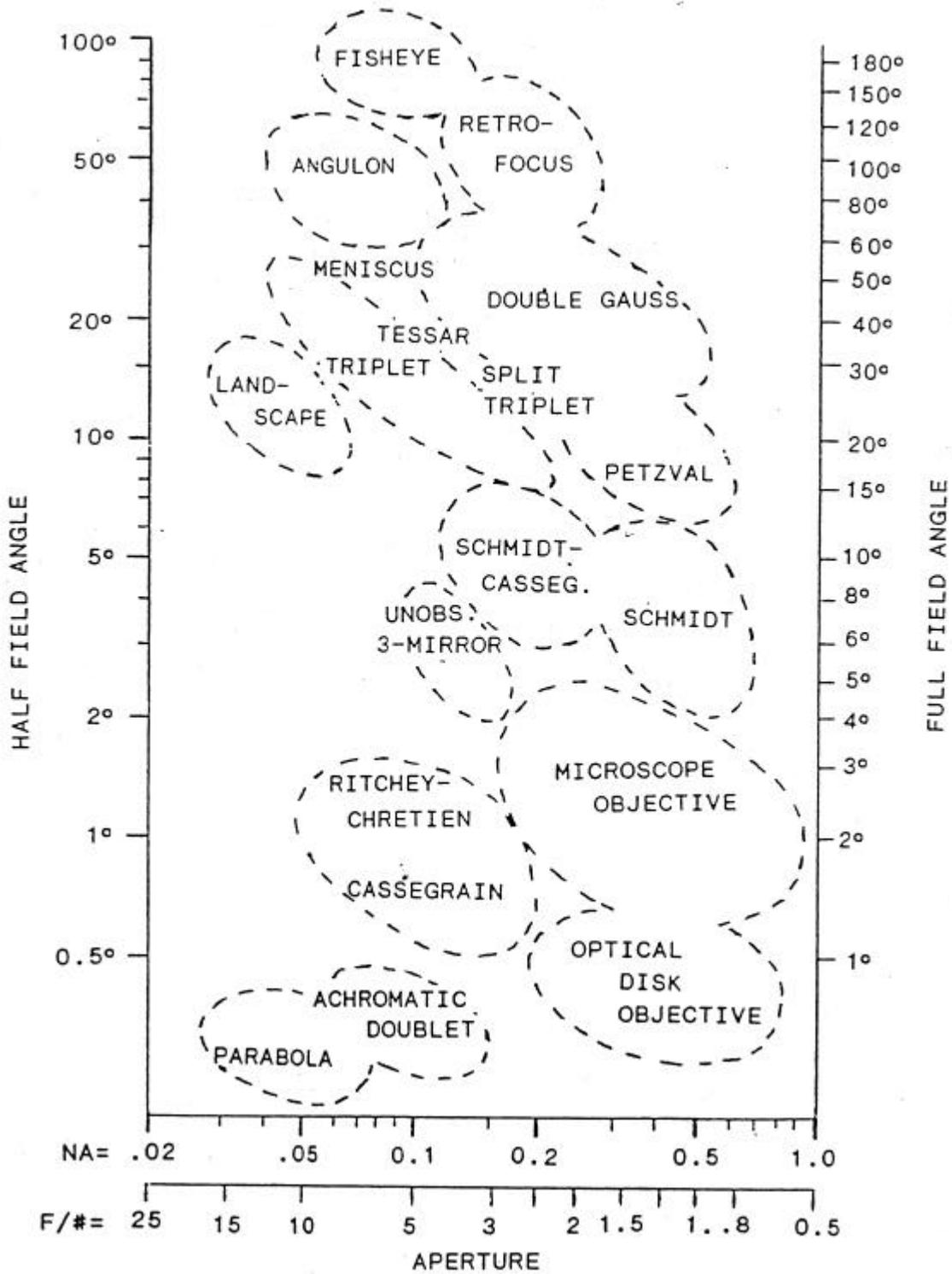
- Umrechnung Blendenzahl / numerische Apertur:  $k = \frac{1}{2NA}$

## Symbolschlüssel:

$a$	Abstand Objekt / Hauptebene
$a'$	Abstand Bild / Hauptebene
$\beta'$	paraxialer Abbildungsmaßstab
$d$	Linsendicke
$D$	Linsenabstand
EP	Eintrittspupille
$f$	Brennweite (objektseitig)
$f'$	Brennweite (bildseitig)
$\Phi$	Brechkraft (Kehrwert der Brennweite)
$n$	Brechzahl des Linsenmaterials
NA	numerische Apertur (objektseitig)
NA'	numerische Apertur (bildseitig)
$k$	Blendenzahl
$\lambda$	Wellenlänge
$\omega$	paraxialer Bildwinkel
$r$	Linsenflächenradius (allgemein)
$r_1$	Linsenflächenradius (Vorderseite)
$r_2$	Linsenflächenradius (Rückseite)
$y$	Objekthöhe
$y'$	Bildhöhe
$\Delta y$	Strukturbreite

### 8.3 Übersicht über wichtige optische Systeme

Schematische Darstellung typischer Gruppen optischer Systeme als Funktion ihrer erreichbaren Werte für Apertur und Feld (nach Warren J. Smith, „Modern Lens Design“).



## 8.4 Abhängigkeit der Bildfehler 3. Ordnung

Grafische Darstellung der Abhängigkeit der lateralen Bildfehler 3. Ordnung sowie des Farblängsfehlers (Farbfehler des Bildortes) und des Farbquerfehlers (Farbfehler der Bildgröße) als Quasi-Seidelfehler in Abhängigkeit der Potenzen des Öffnungswinkels  $\sigma$  und des Feldwinkels  $\omega$ .

<div style="text-align: right;">Feld <math>w</math></div> <div style="text-align: left;">Apertur <math>S</math></div>	$w^0$	$w^1$	$w^2$	$w^3$
$S^0$	-	(Farbquerfehler)	(prozentuale Verzeichnung)	Verzeichnung
$S^1$	(Farblängsfehler)	-	Astigmatismus, Bildfeldwölbung	-
$S^2$	-	Koma	-	-
$S^3$	Öffnungsfehler	-	-	-

## 8.5 Schematischer Ablauf einer computergestützten Optikentwicklung

### Kundenanfrage / opt. Problem

#### Analyse der Vorgaben hinsichtlich:

- Paraxialer Grundgrößen  
(z.B. parax. Objektwinkel, Objektentfernung, Abbildungsmaßstab)
- Empfängeranforderungen:  
(z.B. Helligkeit, Auflösung, Spektrale Anforderungen)
- Sonderanforderungen  
(z.B. Telezentrie, verkürzte Baulänge, spezielle Verzeichnungsvorgaben, Stückzahlen, Kosten)

#### Berechnung fehlender paraxialer Grundgrößen:

(z.B. Systembrennweite, Bildweite, andere konjugierte Größen)

® z.B. PreDesigner

#### Ansatzsuche:

- Erfahrung/Intuition
- Patentliteratur
- Systembibliotheken

® z.B. WinLensLib, LensVIEW

#### Analyse und grobe Anpassung des Ansatzes:

- Abschätzung der Korrektionsmöglichkeiten
- Skalierung der Brennweite
- Anpassung der Geometrie/Abmasse

® z.B. WinLens 4.3, Zemax, Oslo, Code V

#### Korrektion / Optimierung:

- Geometrisch optische Korrektion unter Berücksichtigung von geometrischen Randbedingungen

® z.B. WinLensPlus, Zemax, Oslo, Code V

- Wellenoptische Korrektion (MTF, Strehl-Wert usw.)

#### Toleranzrechnung / Analyse:

- Sensitivitätsanalyse/inverse Sensitivität
- Fertigungsfehlersimulation (Monte Carlo Analyse)

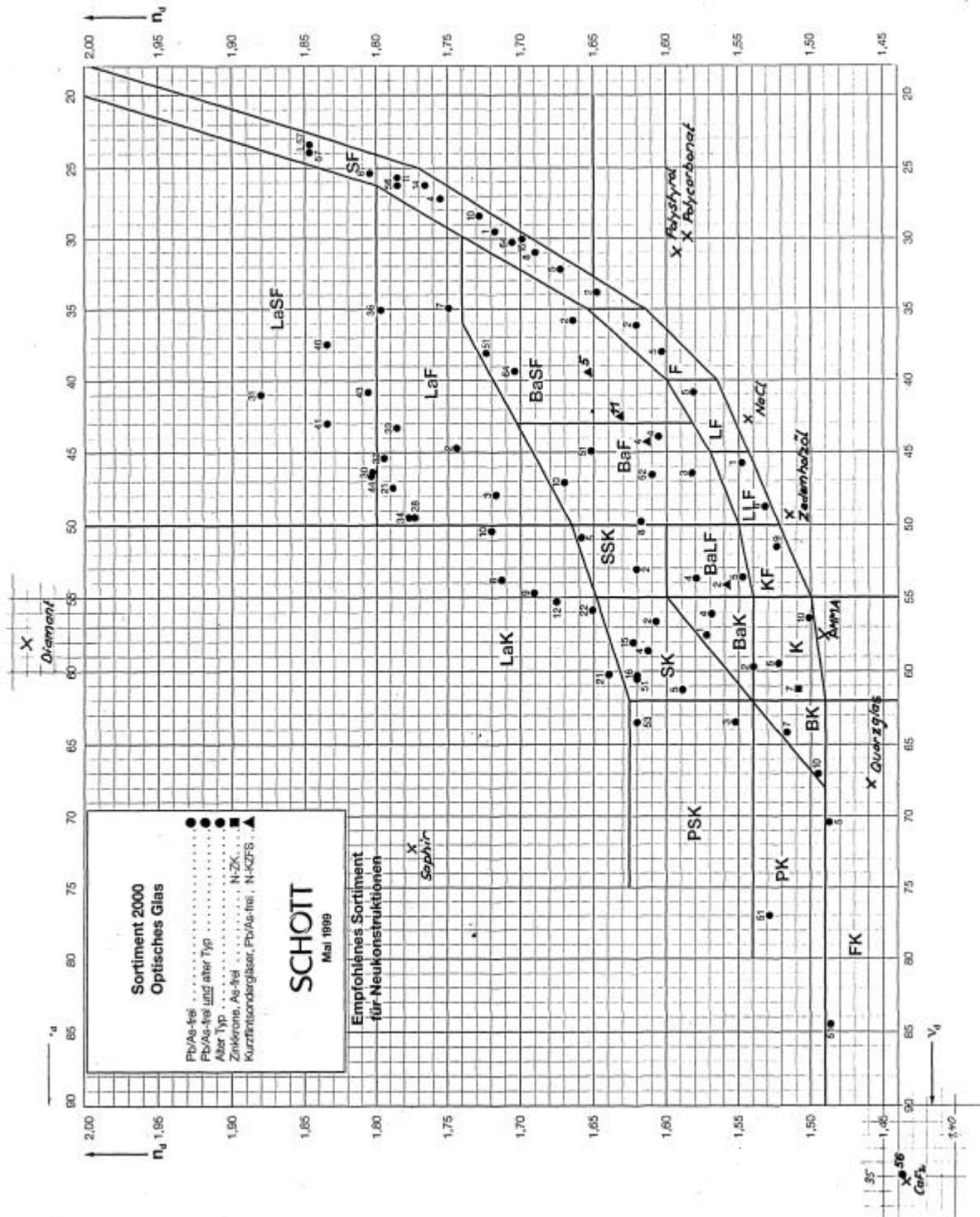
® z.B. Tolerancer

- Streulicht-, Narzissus-Analyse

® z.B. Trace Pro

## 8.6 SCHOTT – Glastafel (Abbe'sches $n_d / n_d$ - Diagramm)

Darstellung des Brechungsvermögens (Brechzahl  $n_d$ ) als Funktion des Dispersionsvermögens (Abbe'sche-Zahl  $v_d$ ) typischer optischer Gläser der Firma SCHOTT (Stand Mai 1999) sowie einiger Sondermaterialien. Weitere Daten von SCHOTT bzw. von anderen Herstellern können im **GlassManager** analysiert bzw. verglichen werden.



## 8.7 Wellenlängenübersicht

### 8.7.1 Wichtige Wellenlängenbereiche

Wellenlängenbereich <i>Wavelength range</i>	name <i>name</i>	Unterbereich <i>sub range</i>	Name <i>name</i>
3 $\mu\text{m}$ – 1 mm	IR - C		
1400 – 3000 nm	IR - B	1450 – 1650 nm	L+ Band
		1570 – 1610 nm	L Band
		1530 – 1570 nm	C Band
		1490 – 1530 nm	S Band
		1450 – 1490 nm	S+ Band
780 – 1400 nm	IR - A	1300 – 1350 nm	1310 Band
380 – 780 nm	VIS	400 – 780 nm	VIS photopic
		380 – 650 nm	VIS scotopic
315 – 380 nm	UV - A		
280 – 315 nm	UV - B		
100 – 280 nm	UV - C	190 – 280 nm	DUV
		100 – 190 nm	VUV
5 – 100 nm	EUV		

## 8.7.2 Wichtige Wellenlängen

Wellenlänge wavelength	Index designation	Spektrallinie spectral line	Element element
2940.0 nm		Erbium-YAG-Laser <i>erbium YAG laser</i>	Er:YAG
2325.42 nm		infrarote Quecksilberlinie <i>infrared mercury line</i>	Hg
2127.0 nm		Holmium-YAG-Laser <i>holmium YAG laser</i>	Ho:YAG
1970.09 nm		infrarote Quecksilberlinie <i>infrared mercury line</i>	Hg
1529.582 nm		infrarote Quecksilberlinie <i>infrared mercury line</i>	Hg
1064.1 nm		Neodym-YAG-Laser <i>neodymium YAG laser</i>	Nd:YAG
1060.0 nm		Neodym-Glaslaser <i>neodymium glass laser</i>	Nd:Glass
1013.98 nm	t	infrarote Quecksilberlinie <i>infrared mercury line</i>	Hg
1000 – 1900 nm		Laserdiode <i>laser diode</i>	InGaAsP
980 nm		Laserdiode <i>laser diode</i>	InGaAsP / InGaAs
750 – 910 nm		Laserdiode <i>laser diode</i>	GaAs / AlGaAs
852.11 nm	s	infrarote Cäsiumlinie <i>infrared cesium line</i>	Cs
768.1943 nm	A'	rote Kalium-Doppellinie (Zentrum) <i>red potassium double line (center)</i>	K
706.5188 nm	r	Rote Heliumlinie <i>red helium line</i>	He
694.25 nm		Rubin-Laser <i>ruby laser</i>	Cr:Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
656.2725 nm	C	rote Wasserstofflinie <i>red hydrogen line</i>	H
647.1 nm		Krypton-Ionen-Laser <i>krypton ion laser</i>	Kr+
643.8469 nm	C'	rote Cadmiumlinie <i>red cadmium line</i>	Cd
632.8 nm		Helium-Neon-Gaslaser <i>helium neon gas laser</i>	He-Ne
630 – 680 nm		Laserdiode <i>laser diode</i>	InGaAlP
589.2938 nm	D	gelbe Natrium-Doppellinie (Zentrum) <i>yellow sodium double line (center)</i>	Na
587.5618 nm	d	gelbe Heliumlinie <i>yellow helium line</i>	He
546.0740 nm	e	grüne Quecksilberlinie <i>green mercury line</i>	Hg
543.5 nm		Helium-Neon-Gaslaser <i>helium neon gas laser</i>	He-Ne
532.0 nm		Neodym-YAG-Laser (2. Harmonische) <i>neodymium YAG laser (2nd harmonic)</i>	Nd:YAG
514.5 nm		Argon-Ion-Gaslaser <i>argon ion gas laser</i>	Ar+
488.0 nm		Argon-Ion-Gaslaser <i>argon ion gas laser</i>	Ar+
486.1327 nm	F	blaue Wasserstofflinie <i>blue hydrogen line</i>	H
479.9914 nm	F'	blaue Cadmiumlinie <i>blue cadmium line</i>	Cd
457.9 nm		Argon-Ion-Gaslaser <i>argon ion gas laser</i>	Ar+
435.8343 nm	g	blaue Quecksilberlinie <i>blue mercury line</i>	Hg
441.6 nm		HeCd-Gaslaser.. <i>HeCd gas laser</i>	HeCd
404.6561 nm	h	violette Quecksilberlinie <i>violet mercury line</i>	Hg
400 – 415 nm		Laserdiode <i>laser diode</i>	GaN
365.0146 nm	i	ultraviolette Quecksilberlinie <i>ultraviolet mercury line</i>	Hg
355.0 nm		Neodym-YAG-Laser (3. Harmonische) <i>neodymium YAG laser (3rd harmonic)</i>	Nd:YAG
351.0 nm		Xenon-Fluorid-Gaslaser <i>xenon fluorid gas laser</i>	XeF*
337.1 nm		Stickstoff-Gaslaser <i>nitrogen gas laser</i>	N <sub>2</sub>
334.1478 nm		ultraviolette Quecksilberlinie <i>ultraviolet mercury line</i>	Hg
312.5663 nm		ultraviolette Quecksilberlinie <i>ultraviolet mercury line</i>	Hg
308.0 nm		Xenon-Chlorid-Gaslaser <i>xenon chlorid gas laser</i>	XeCl*
296.7278 nm		ultraviolette Quecksilberlinie <i>ultraviolet mercury line</i>	Hg
280.3952 nm		ultraviolette Quecksilber-Doppellinie (Zentrum) <i>ultraviolet mercury double line (center)</i>	Hg
266.0 nm		Neodym-YAG-Laser (4. Harmonische) <i>neodymium YAG laser (4th harmonic)</i>	Nd:YAG
248.4 nm		Krypton-Fluorid Gaslaser <i>krypton fluorid gas laser</i>	KrF*
248.3275 nm		ultraviolette Quecksilber-Doppellinie (Zentrum) <i>ultraviolet mercury double line (center)</i>	Hg
213.0 nm		Neodym-YAG-Laser (5. Harmonische) <i>neodymium YAG laser (5th harmonic)</i>	Nd:YAG
193.0 nm		Argon-Fluorid-Gaslaser <i>argon fluorid gas laser</i>	ArF*
157.0 nm		Fluor-Gaslaser <i>fluor gas laser</i>	F <sub>2</sub>
126.0 nm		Argon-Gaslaser <i>argon gas laser</i>	Ar <sub>2</sub> *

## 8.8 Empfängerformate

Type <i>type</i>	Format <i>format</i> [mm x mm]	Diagonale <i>diagonal</i> [mm]
Mikrofilm (ab) <i>micro film (from)</i>	1.0 x 1.0	1.4
Super-8-Film <i>super-8 film</i>	4.2 x 5.7	7.1
16 mm Kinofilm <i>16 mm cine film</i>	7.5 x 10.3	12.7
35 mm Kinofilm <i>35 mm cine film</i>	16 x 22	27.2
70 mm Kinofilm <i>70 mm cine film</i>	23 x 53	57.7
Minox-Film <i>Minox film</i>	8 x 11	13.6
Pocket-Film <i>pocket film</i>	13 x 17	21.4
Kleinbildfilm <i>35 mm photo film</i>	18 x 24	30.0
	24 x 36	43.3
APS	17 x 30	34.5
Foto-Mittelformat <i>photo mid format</i>	45 x 60	75.0
	60 x 60	84.9
	60 x 70	92.2
	60 x 80	100.0
Foto-Großformat <i>photo large format</i>	90 x 120	150.0
	180 x 240	300.0
Fernsehformat <i>TV format</i>	1/6" 1.6 x 2.1	2.7
	1/5" 1.9 x 2.6	3.2
	1/4" 2.4 x 3.2	4.0
	1/3" 3.6 x 4.8	6.0
	1/2" 4.8 x 6.4	8.0
	2/3" 6.6 x 8.8	11.0
	1" 9.6 x 12.8	16.0
	1 1/4" 12.9 x 17.1	21.4

## 8.9 Empfohlene Literatur:

### **Lexika:**

- „ABC der Optik“, Karl Mütze (Herausg.), Verlag Werner Dausien
- „Lexikon der Optik“, Harry Paul (Herausg.), Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 2 Bände

### **Einführung in *die physikalische Optik*:**

- „Lehrbuch der Experimentalphysik“ Band III, Optik, Heinrich Gobrecht (Herausg.), Verlag Walter De Gruyter
- „Introduction to Optics“ Frank L. Pedrotti und Leno S. Pedrotti, Verlag Prentice-Hall International

### **Weiterführende Literatur zur *physikalischen Optik*:**

- „Principles of Optics“, Max Born und Emil Wolf, Verlag Pergamon Press, Oxford, London, New York

### **Einführung in die *allg. optische Abbildung*:**

- „Technische Optik“, Prof. Gottfried Schröder, Vogel-Buchverlag Würzburg
- „Technische Optik in der Praxis“, Prof. Gerd Litfin (Herausg.), Springer Verlag
- „Optik“, H. Haferkorn, Verlag Harry Deutsch

### **Weiterführende Literatur zur *allg. optischen Abbildung*:**

- „Applied Optics & Optical Design“, A.E. Conrady, Verlag Dover Publications, 2 Bände
- „Die optische Abbildung“, Christian Hofmann, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig

### **Einführung in das *Optical Design*:**

- „Elements of Modern Optical Design“, Donald C. O’Shea, Verlag John Wiley & Sons
- „Lens Design“ Milton Laikin, Verlag Marcel Dekker
- „Handbook of Lens Design“, Daniel Malacara und Zacarias Malacara, Verlag Marcel Dekker
- „The Art and Science of Optical Design“, R.R. Shannon, Verlag Cambridge University Press
- “Modern Optical Engineering”, Warren J. Smith, Verlag McGraw-Hill Inc.
- “Modern Lens Design”, Warren J. Smith, Verlag McGraw-Hill Inc.

### **Weiterführende Literatur zum *Optical Design*:**

- „Grundlagen der praktischen Optik“, M. Berek, Verlag Walter de Gruyter
- „Synthese optischer Systeme“ H. Haferkorn und W. Richter, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften

### **Einführung in *Bauelemente der Optik / optische Geräte*:**

- „Bauelemente der Optik“, H. Naumann und G. Schröder, Carl Hanser Verlag München Wien

### **Einführung in *Lasertechnik*:**

- „Laser“, Klaus Tradowsky, Vogel-Buchverlag Würzburg

### ***Zeitschriften* zum Thema angewandte Optik/optischer Gerätebau (im weitesten Sinne):**

- „F&M“ Carl Hanser Verlag (Gerätebau)
- „Optik“ Urban & Fischer Verlag (allg. angewandte Optik)
- „Applied Optics“, Optical Society of America - OSA (allg. angewandte Optik)
- „Optical Engineering“, International Society for Optical Engineering – SPIE (allg. angewandte Optik)
- „Photonics“, Laurin Publishing (internationaler Querschnitt, Laser, Fasertechnik, abbildende Optik, Elektrooptik)
- „EuroPhotonics“, Laurin Publishing (europäischer Querschnitt, Laser, Fasertechnik, abbildende Optik, Elektrooptik)
- „OPN – Optics & Photonics News“, Optical Society of America – OSA (Querschnitt durch den Photonics Markt)
- „Laser Focus World“, PennWell, (Querschnitt durch den Photonics Markt)
- „LASER“ b-Quadrat Verlags GmbH (industrielle Laseranwendung)
- LaserOpto, AT-Fachverlag GmbH, (industrielle Laseranwendung)

### ***Verbände* zum Thema Optik:**

- Deutsche Gesellschaft für angewandte Optik - DGaO