

8. Optische Systeme

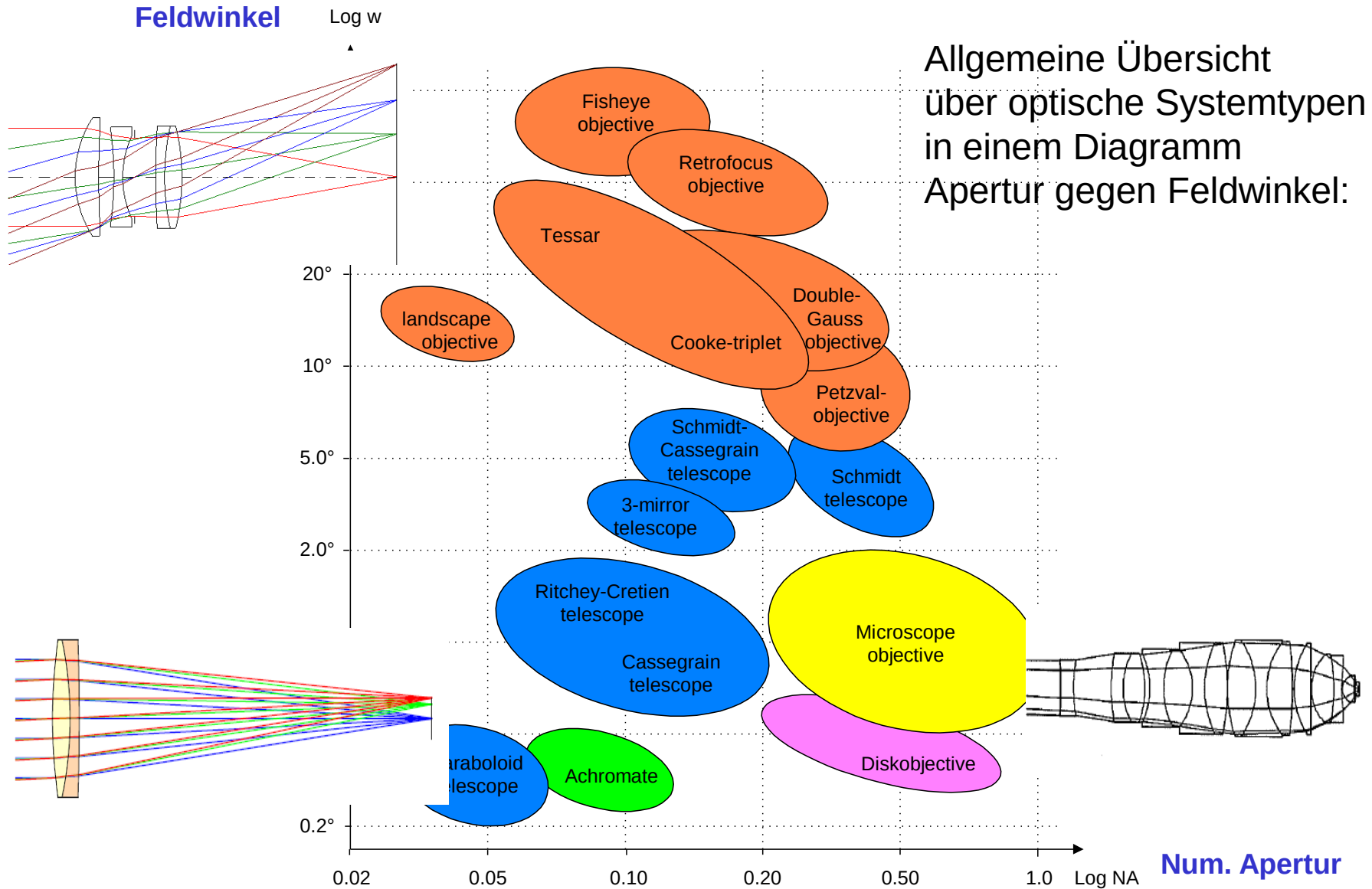
8.1 Kauf-Systeme

**8.2 Selbst-Zusammengestellte Systeme
(intermediate optical design)**

8.3 Individuelles Optikdesign

8.4 Optisches Datenblatt

Typklassen optischer Systeme



Entscheidend für die Kosten und Verfügbarkeit von Kaufsystemen sind folgende Kriterien:

Anforderungen an
Öffnung (NA, f#) und Feld

e.g. 1.4/50 Objektiv für 1" Detektor

Abbildungs-
Qualität

„beugungsbegrenzt“, Strehl, MTF

Wellenlängen-Bereich

z.B. UV-Mikroskop-Objektiv

Individuelle Anforderungen

Baugröße, Gewicht,
Strahlungsbeständigkeit, Zoom-Range,
etc.

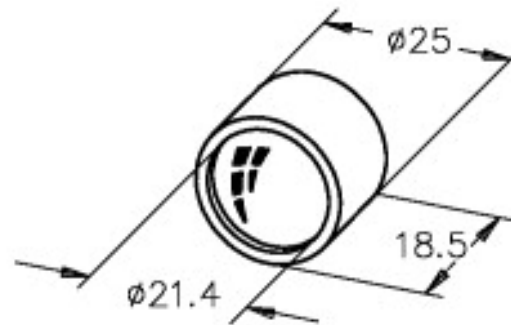
Typische Katalog-System Klassen sind:

- Beleuchtungssysteme (Kondensoren)
- Lasersysteme (Strahlaufweitung, f-Theta)
- Kamera-Objektive („machine vision“)
- Mikroskop-Objektive
- Relay-Systeme (evtl. Zoom)

Kombinationskondensor, $f = 16$ mm aus Kronglas



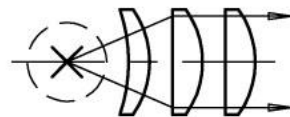
- Zur gleichmäßigen Ausleuchtung von Objektfeldern
- Zur Kollimierung in Beleuchtungssystemen mit großem Öffnungsverhältnis
- In Fassung CL, $\varnothing 25$ mm, Öffnung 21.4 mm (Mikrobank-kompatibel)
- Linsenanzordnung variabel (siehe Abbildungen, Werkzeug wird mitgeliefert)
- bestehend aus: 2 Plankonvexlinsen $f = 40$ mm (G31 2314 000), 1 Konkavkonvexlinse $f = 50$ mm (G31 5505 000)



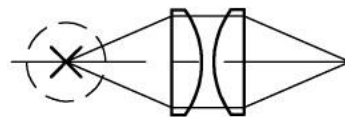
Quelle: qioptiq-Katalog

Ziel: Sphärische Aberr. minimieren

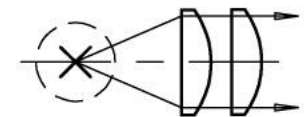
$\lambda_{588 \text{ nm}}$:



$f = 16$ mm

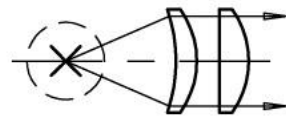


$f = 20$ mm

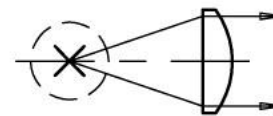


$f = 21.2$ mm

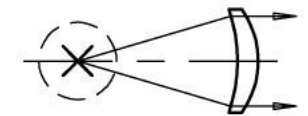
$\lambda_{588 \text{ nm}}$:



$f = 22.5$ mm



$f = 40$ mm



$f = 50$ mm

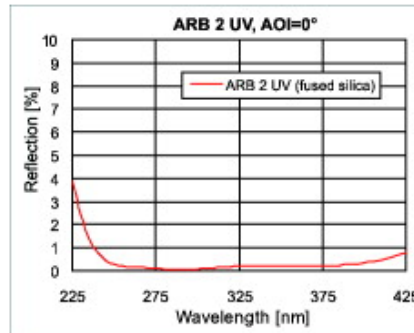
Laser-Systeme: z.B. Strahlaufweitung

UV Laseraufweitungssysteme bm.x

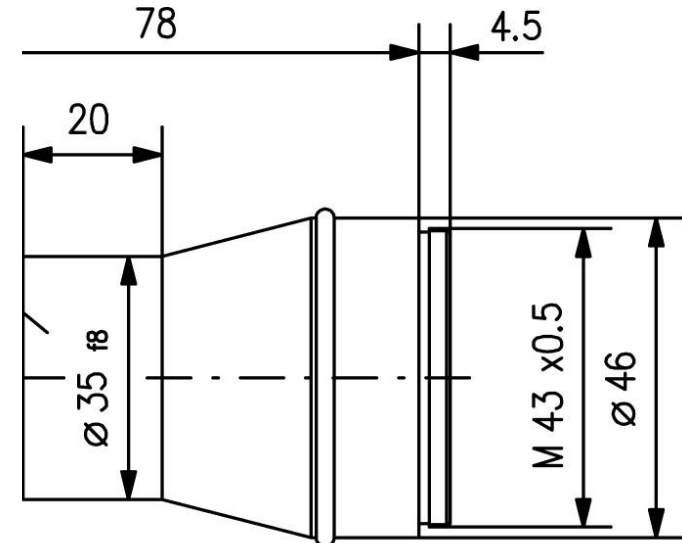


Die Laseraufweitungssysteme der Serie bm.x sind die weltweit einzig verfügbaren modularen Laseraufweitungssysteme. Durch Austausch des bm.x Einsatzes kann der Aufweitungsfaktor ohne zusätzliche Kalibrierung verändert werden.

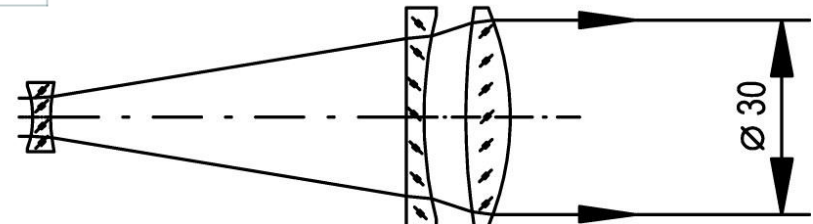
- Zur Aufweitung von Laserstrahlung (Austrittsöffnung 30 mm)
- Zur Reduzierung der Strahldivergenz
- Schneller Wechsel zwischen verschiedenen Aufweitungsverhältnissen durch modularen Aufbau aus bm.x-Grundmodul und dazu kombinierbaren bm.x-Einsätzen
- Mit Antireflexbeschichtung ARB2 UV 266-405 nm
- Restreflexion < 0,5 %
- Zerstörschwelle > 2 J/cm² für 10 ns-Laserpulse bei 308 nm
- Eintrittsoptik aus Quarzglas
- Mit Innenfokussierung
- Diverse Anbau- bzw. Montagemöglichkeiten



Example: ARB 2 UV for 245-400 nm



Stelling zur Innenfokussierung



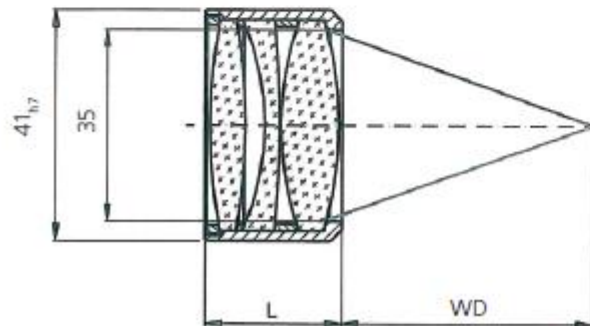
Bei Laser-Systemen:
 ⇒ hohe Strahlungsbelastung
 ⇒ zerstörendes Licht wichtig

LINOS Focus-Ronar 1064+532 nm



Focusing lenses are optimized for high-precision applications, as used in laser systems for welding, cutting, drilling and structuring.

- Focal lengths ranging from 58 mm to 120 mm
- Flexible lens exchange without any adjustment
- Three-lens-element designs
- High clear aperture 35 mm
- Housing diameter 41_{h7} mm
- The coating is optimized for 1064 nm, $T \geq 97\%$ and $T(532 \text{ nm}) \geq 96\%$
- Good inspection performance at VIS wavelengths
- Laser-damage threshold 10 J/cm^2 at 1064 nm, 9 ns, 100 Hz
- Laser-damage threshold 6 J/cm^2 at 532 nm, 6 ns, 100 Hz



Anforderungen:

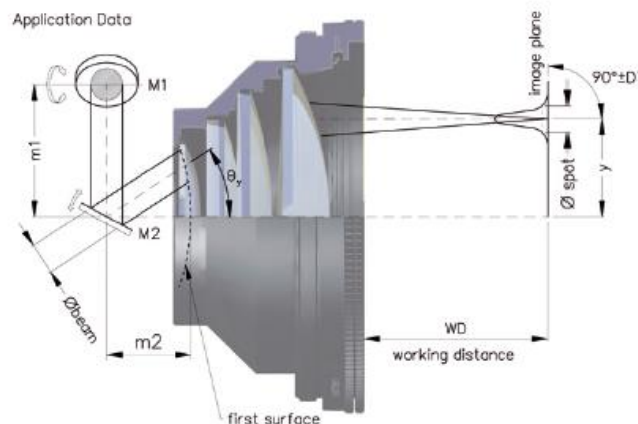
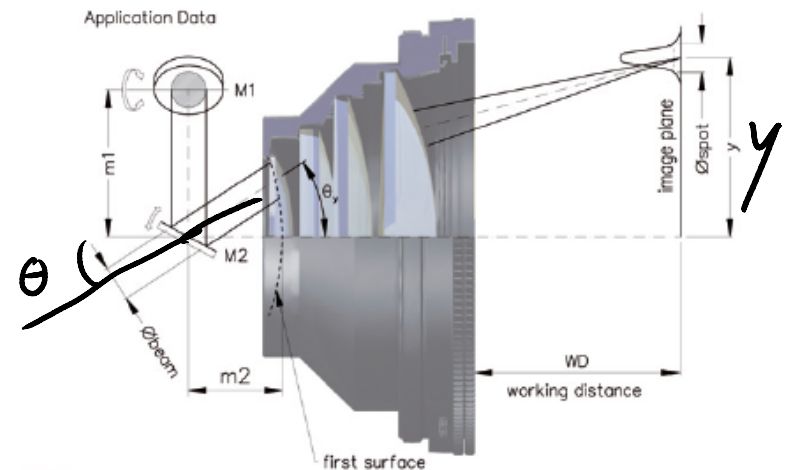
- hohe Transmission
- beugungsbegrenzter Spot
- i.d.R. kein Bildfeld

Characteristics of F-Theta lenses

F-Theta lenses have two main characteristics. When a beam is deflected by a scanning mirror in front of a lens, then the scanned distance is proportional to the scanning angle. Secondly the focus position over the entire scan field is always in the same plane.

Telecentric lenses

With telecentric lenses the beam impact angle on the work piece is nearly perpendicular over the entire scan field.

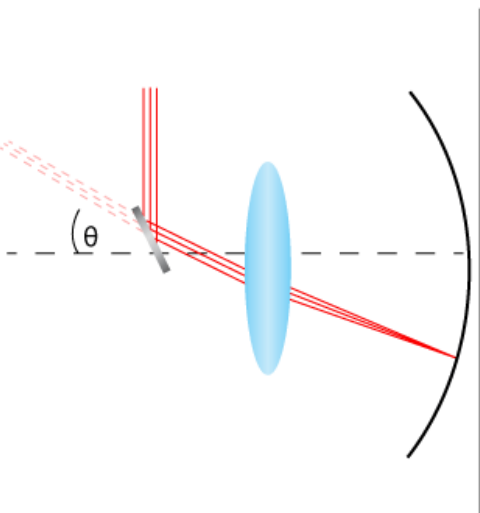


Hier: großes Bildfeld
Zusammenhang:
 $y = f \cdot \theta$

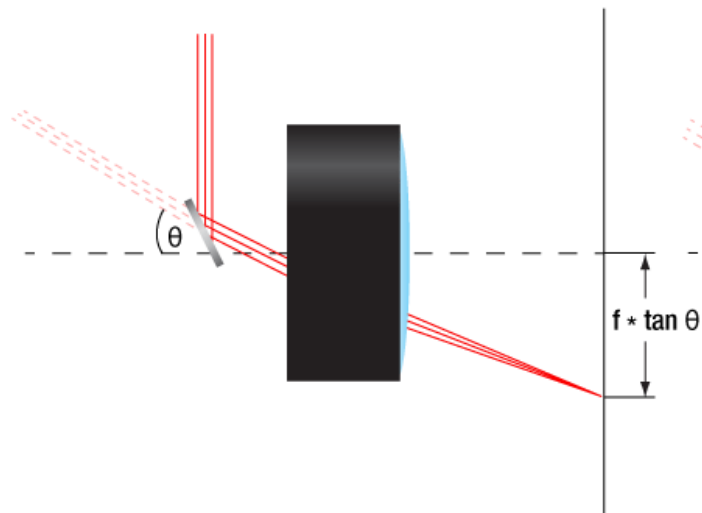
Quelle: qioptiq-Katalog

Normale Linse:

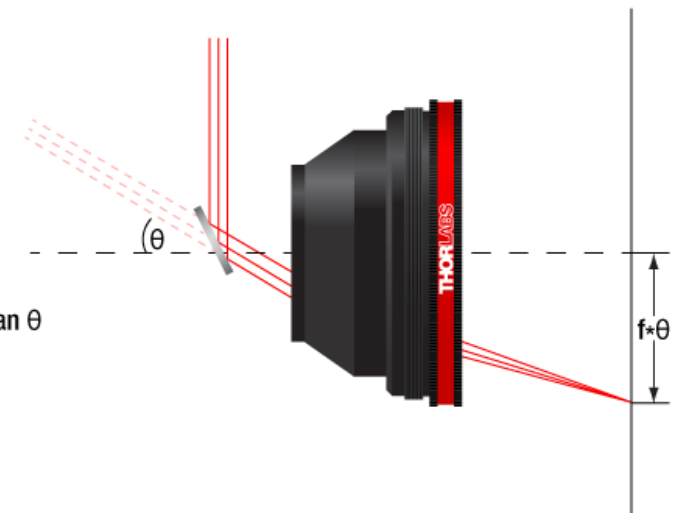
- Bildfeldwölbung
- Beziehung $y = f \cdot \tan \theta$
Einfallswinkel und Bildhöhe :



A. Spherical Lens



B. Flat-Field Scanning Lens



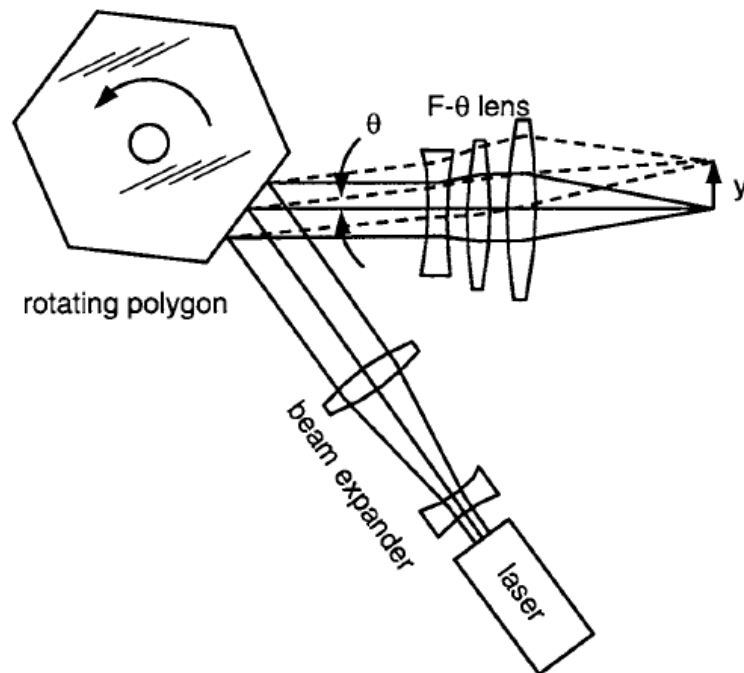
C. F-Theta Scanning Lens

F-theta Linse:

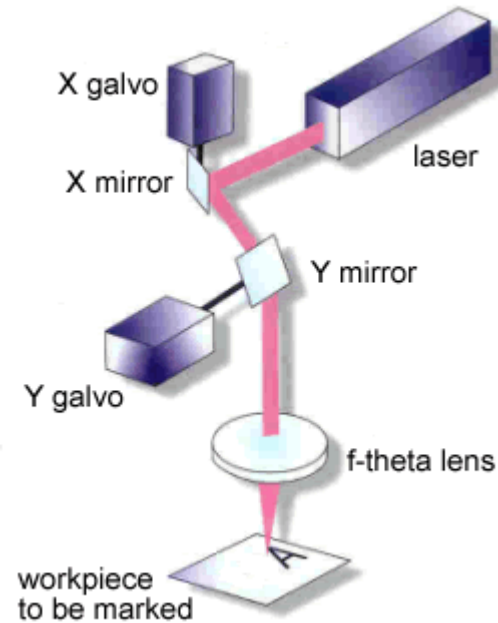
- Ebenes Bildfeld
- Lineare Beziehung $y = f \cdot \theta$
(= Verzeichnung)

Quelle: Thorlabs

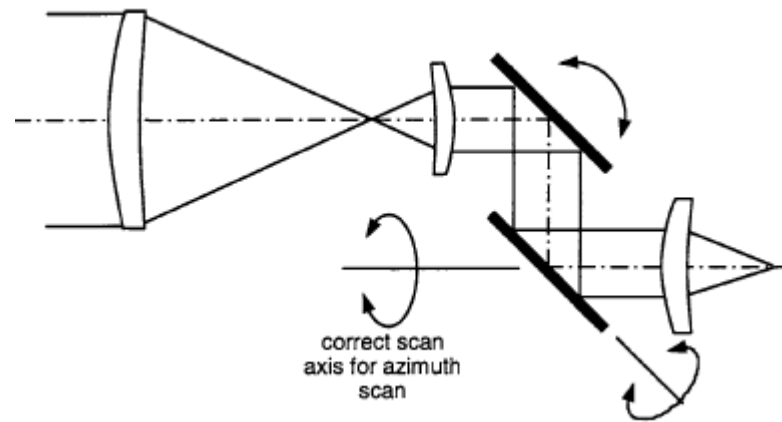
Laser-Material-Bearbeitung / Scanner



Quelle: Fischer „Optical System Design“



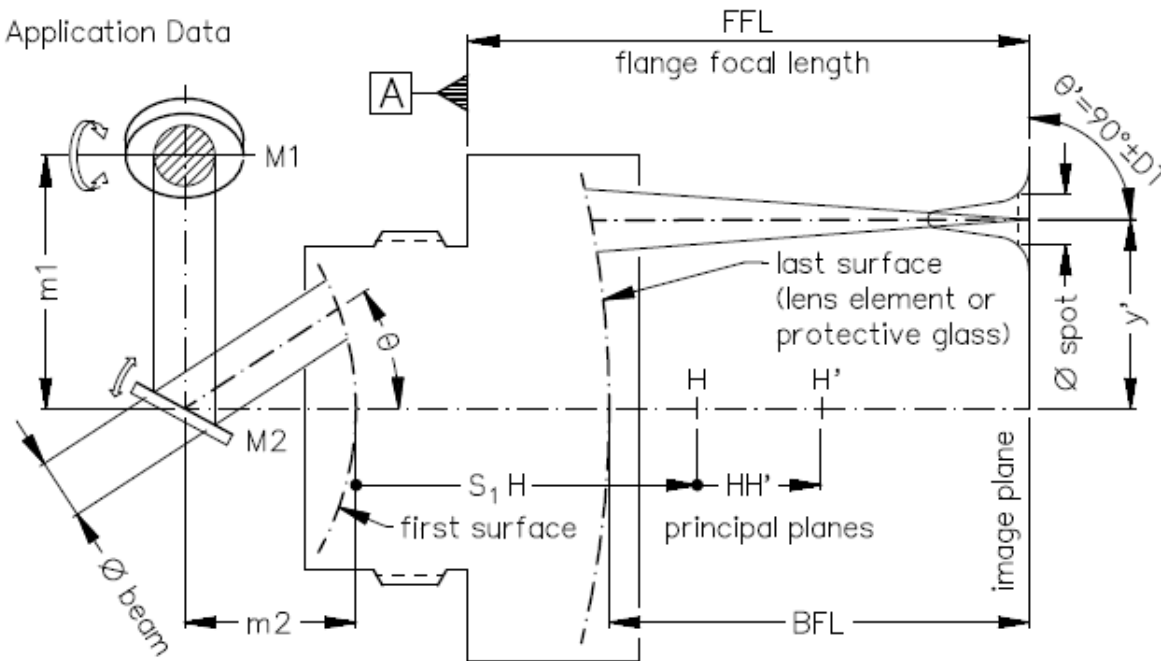
Quelle: <http://www.sintecoptronics.cn/markinghead.gif>



F-Theta System



Application Data

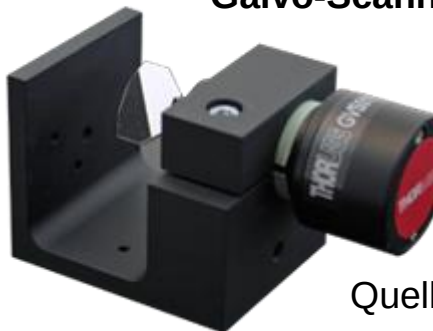


ON	4575-9341	
λ	(nm)	355
EFL	(mm)	104.1
BFL	(mm)	139.6
S1H	(mm)	62.4
HH'	(mm)	60.2
$2 \cdot \theta$	(deg.)	36
$2 \cdot y'$	(mm)	65.4
$\varnothing_{\text{beam}}$	(mm)	14/10**
$\varnothing_{\text{spot}}$	(μm)	7
FFL	(mm)	215.1
$DT+)*$	(deg.)	0.5
$m1 *$	(mm)	13
$m2 *$	(mm)	29.4
mass	(g)	1600

+) maximum Deviation from Telecentricity

*) recommended mirror distances

Galvo-Scanner



Quelle: Thorlabs-Katalog



Quelle: qioptiq-Katalog

Wichtige Größen:

- Detektorgröße (1/2“, 3/4“, 1“, 2“)
- Wellenlängenbereich (UV, VIS, IR)
- Brennweite
- Öffnung
- Abbildungsqualität

Quelle: Thorlabs-Katalog

- ▶ Camera and Video Lenses
- ▶ Compatible with DCU and DCC Cameras
- ▶ External C-Mount Threading



MVL16M1



MVL25M23

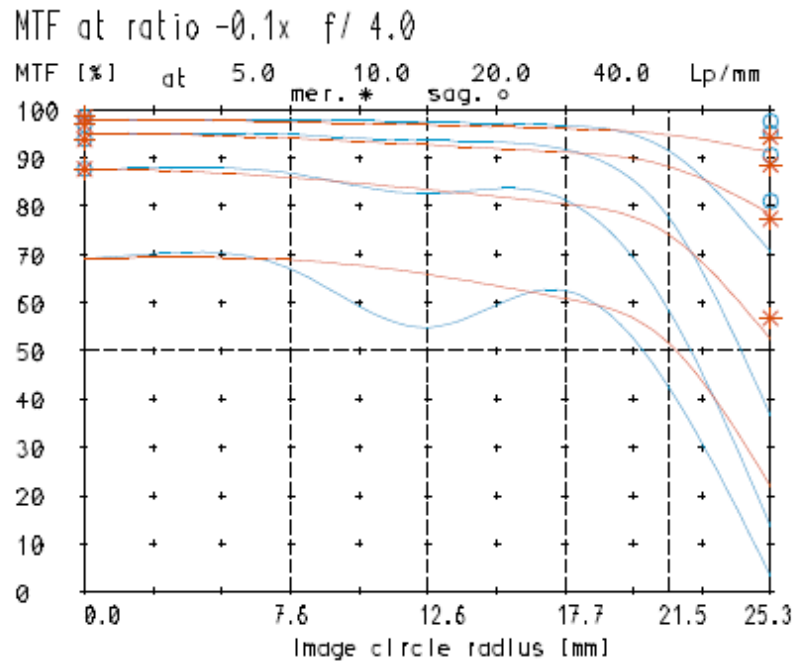


MVL25M23 C-Mount Camera Lens
with 1500M-GE Scientific Camera

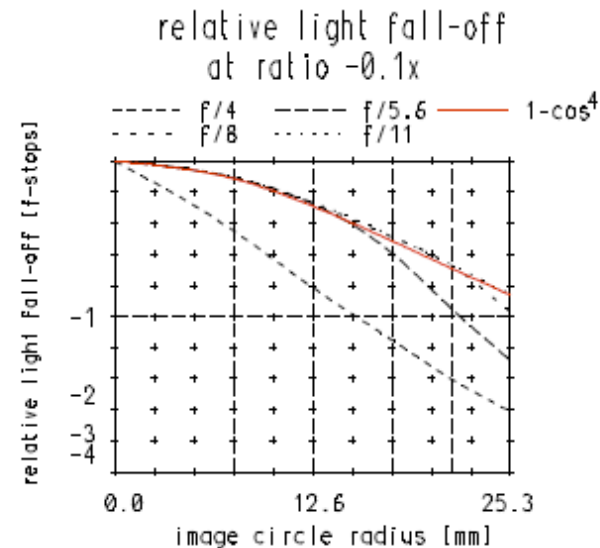
Beispiel Kamera-Objektiv



Rodagon_F_40



Bildgüte



Nicht



Quelle: qioptiq-Katalog

Telezentrisches Kamera-Objektiv



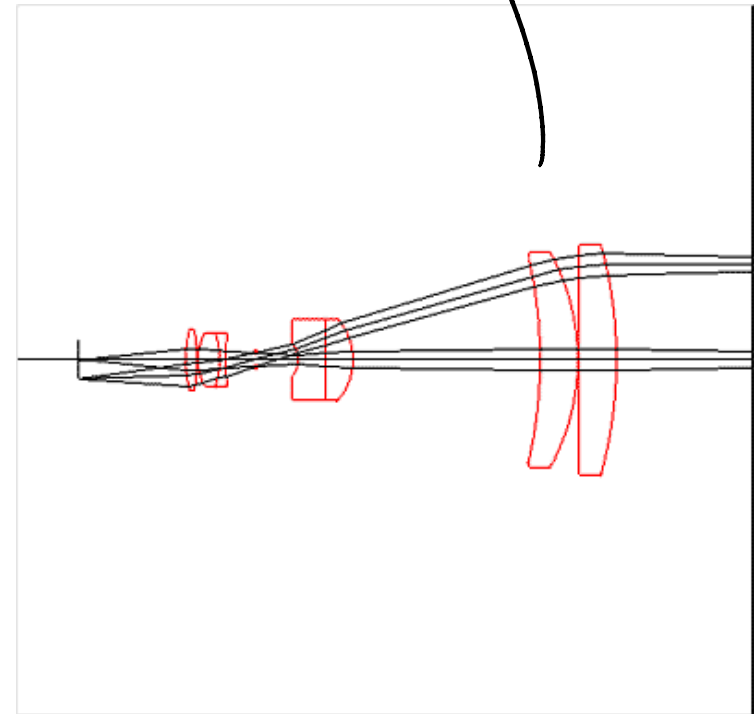
- ▶ Ideal for Machine Vision Applications
- ▶ Provide Constant Magnification Independent of Object Location
- ▶ 0.128X, 0.243X, and 0.528X Magnification Lenses Available



MVTC23013
0.128X Bi-Telecentric Lens

Quelle: Thorlabs-Katalog

große Frontlinse notwendig

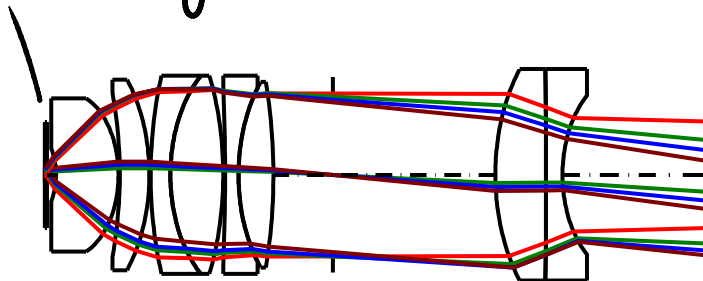


Wichtige Größen:

- Brennweite, bzw. Vergrößerung (meist bezogen auf Tubuslinse)
- Wellenlängenbereich (UV, VIS, IR)
- Arbeitsabstand (long working distance objektive → teuer)
- NA
- Feldgröße
- (Abbildungsqualität: meist beugungsbegrenzt)

$$\beta_{Obj} = -\frac{f'_{TL}}{f'_{Obj}}$$

working distance



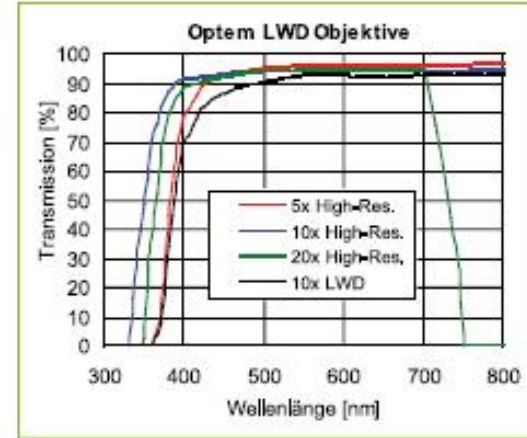


Mikroskopobjektive für unendliche Bildweite

Optem Long Working Distance Objektive von Qioptiq bieten hohe Vergrößerungen bei großen Arbeitsabständen.

Die Objektive sind sowohl als MPlan APO als auch als High-Resolution Modelle in einer großen Auswahl an Vergrößerungen erhältlich.

MPlan APO Objektive bieten eine außergewöhnlich geringe Bildfeldwölbung, minimale Verzeichnung und exakte Farbkorrektur über das gesamte Bildfeld.



Quelle: qioptiq-Katalog

Produktbezeichnung	Vergrößerung	Numerische Apertur	Arbeitsabstand, WD (mm)	Brennweite (mm)	Auflösung (µm)	Schärfentiefe (µm)
Objektiv High-Res. 5x *)	5x	0.225	34.0	40.0	1.20	5.4
Objektiv High-Res. 10x *)	10x	0.45	19.0	20.0	0.70	2.0
Objektiv High-Res. 20x *)	20x	0.60	13.0	10.0	0.45	0.76
Objektiv LWD 2x *)	2x	0.055	34.0	100.0	6.1	181.8
Objektiv LWD 5x *)	5x	0.14	34.0	40.0	2.4	28.1
Objektiv LWD 10x *)	10x	0.3	34.0	20.0	1.1	6.1
Objektiv LWD 20x *)	20x	0.42	20	10.0	0.8	3.1
Objektiv LWD 50x *)	50x	0.55	13	4.0	0.61	1.8

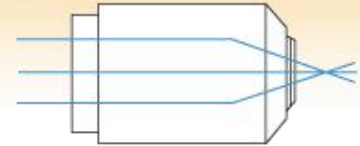
$\beta = \frac{f}{f_{obj}}$

Achtung: Vergrößerung ist hier in Kombination mit **200mm** - Tubuslinse

Mikroskop-Objektive



- ▶ Infinity-Corrected Microscope Objectives for Visible Light
- ▶ Air or Oil Immersion Designs Available
- ▶ Magnifications Ranging from 4X to 100X



RMS4X



RMS40X-PF



N100X-PFO



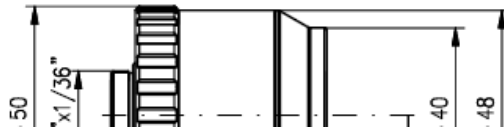
RMS100X-PFOD

Quelle: Thorlabs-Katalog

Olympus Plan Achromat Objectives

Item #	RMS4X	RMS10X	RMS20X	RMS40X
Diameter ^a	24 mm	24 mm	24 mm	24 mm
Length ^a	30.89 mm	38.79 mm	48.49 mm	48.79 mm
Magnification	4X	10X	20X	40X
Numerical Aperture (NA)	0.10	0.25	0.40	0.65
Field Number	22	22	22	22
Working Distance (WD)	18.5 mm	10.6 mm	1.2 mm	0.6 mm
Effective Focal Length (EFL)	45 mm	18 mm	9.0 mm	4.5 mm

Achtung: Vergrößerung ist hier in Kombination mit **180mm** - Tubuslinse

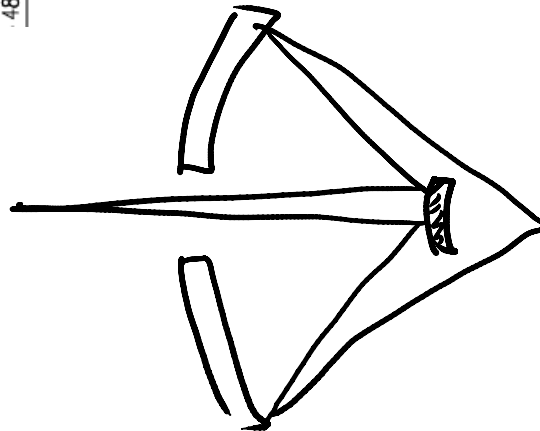


Spiegelobjektiv mag.x® RO 20x / 0.35

Das Spiegelobjektiv mag.x® RO 20x/0.35 von Qioptiq bietet eine hervorragende Abbildungsleistung.

Durch die Verwendung von Spiegeln ist das Objektiv frei von chromatischen Aberrationen und kann über einen breiten Wellenlängenbereich für Anwendungen im UV und VIS verwendet werden. Das optimierte Schwarzschild Design, bestehend aus einem großen Konkav-Primärspiegel und einem kleinen Konvex-Sekundärspiegel, bietet ein optisches System, welches für primäre sphärische Aberration, primäre Koma und primären Astigmatismus korrigiert ist.

- Großer Arbeitsabstand
- Große NA
- Breiter Spektralbereich ohne chromatische Aberrationen
- Ideal für Laser beam delivery
- Vergrößerung: 20x mit Tubuslinse $f' = 200$ mm
- Brennweite: nominal $f' = 10$ mm
- Numerische Apertur: nominal 0.35
- Wellenfrontdeformation: $\lambda/10$ RMS
- Arbeitsabstand: 18.6 mm
- Bildfeld: 0,9 mm
- Für bildseitig unendliche Schnittweite
- Abschattung: $< 18\%$
- Wellenlängenbereich: 190-900 nm
- Zerstörschwelle: > 200 mJ/cm², 30 ns, 193 nm



Quelle: qioptiq-Katalog

Mikro-Objektiv mit angepasster Vergrößerung



Mikroskop-Objektiv:

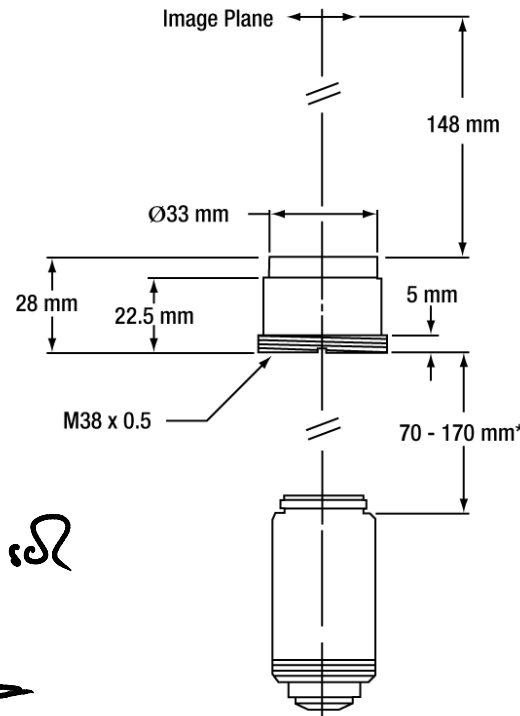
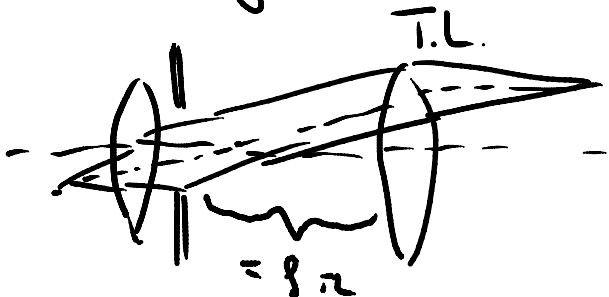
- ➔ meist Abbildung nach Unendlich
- ➔ Kombination mit verschiedenen Tubuslinsen möglich
- ➔ Unterschiedliche Vergrößerung

$$\beta = \frac{f_{TL}}{f_{n.o}}$$

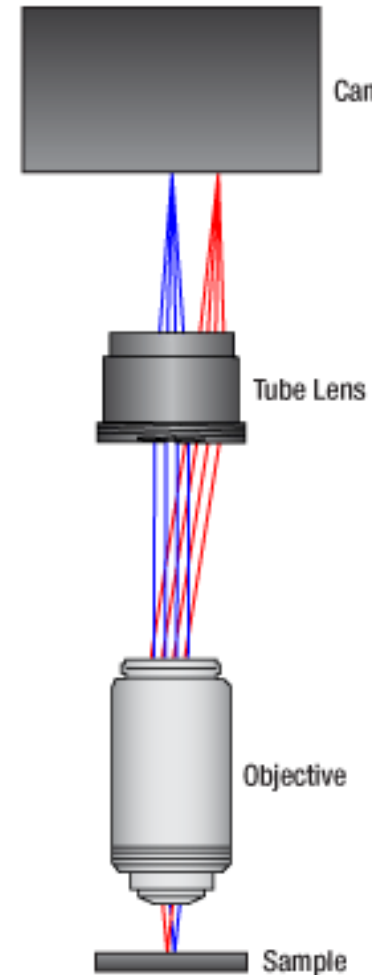
Lage T.L.:

meist so dass

Bildseitig $\approx$ telezentrisch



Quelle: Thorlabs-Katalog



Einfache optische Systeme (kleine Öffnung, kleines Feld) können auch ohne Optik-Design-Software ausgelegt und optimiert werden

Grundregeln:

- Paraxiale Auslegung
- Wahl der optimalen Linsenform und Orientierung durch Minimierung der i-Winkel.
- Falls breites Spektrum – Verwendung von Achromaten anstelle von Einzellinsen

Beispiele:

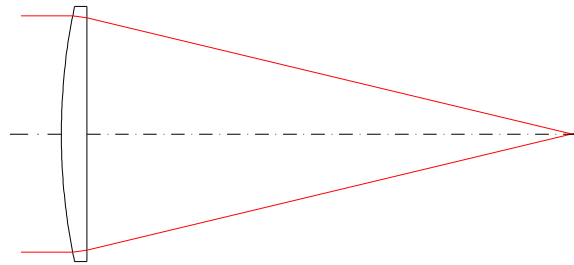
- Relay-Systeme
- Fokussier-Systeme
- Teleskope, Beam-Expander

Selbst ausgelegte mehrlinsige System

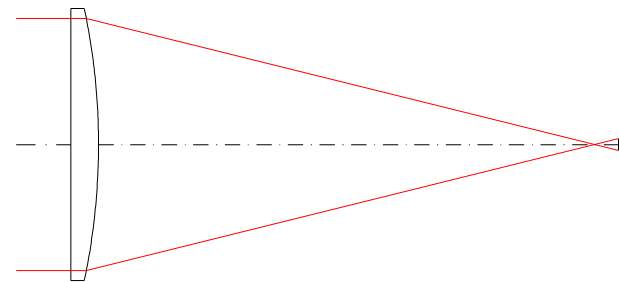


Was sind die Grenzen von Einzellinsen:

z.B. Plankonvex-Linse (BK7)



Bei 550nm:
Strehl > 80% → $NA < 0.067$



Bei 550nm:
Strehl > 80% → $NA < 0.047$

Was passiert bei anderer Wellenlänge (gleicher Brechzahl) – z.B. bei 300nm
→ **Wellenfrontfehler wird größer !!**, da geometrisch alles gleich, aber λ kleiner

Beispiel: Relay-System

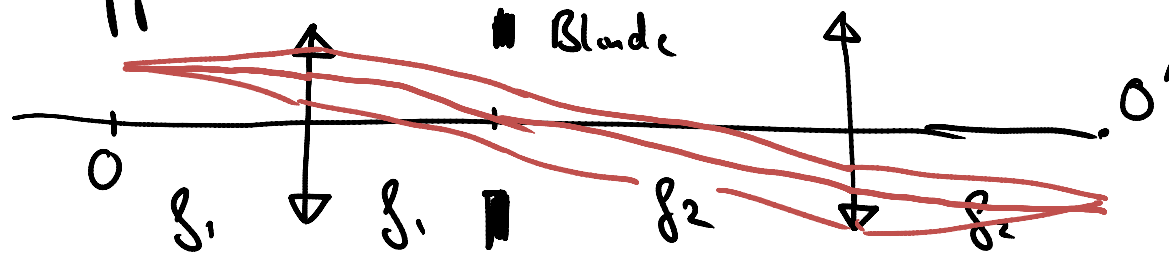


Aufgabe:

Doppel-telezentrisches Relay-System, Abbildungsmaßstab 1:2
mit variabler Blende (NA=0.02 – 0.07), max. Länge 60cm, Objektfeld: 5mm

Wie würden Sie aufbauen, Welche Linsen kaufen & Wie orientieren

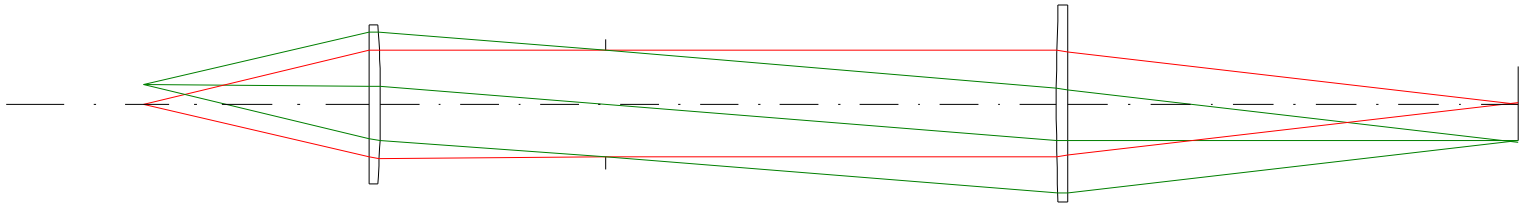
⇒ Doppelt telezentrisch: → 4f-Aufbau



$$\begin{aligned} OO' &= 2f_1 + 2f_2 \\ &= 6f_1 \end{aligned} \quad / \quad \beta = \frac{f_2}{f_1} = 2 \Rightarrow f_2 = 2 \cdot f_1$$

$$OO' \approx 600 \text{ mm} \Rightarrow f_1 = 100 \text{ mm} \quad f_2 = 200 \text{ mm}$$

Beispiel: Relay-System

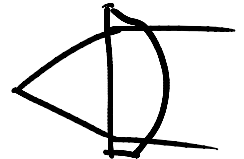


Abschätzung Winkel:

Apertur: 0.07

Feld: $y = 2.5 \Rightarrow w_s = \frac{y}{f_1} \approx 0.025$

$\Rightarrow$ Aperturwinkel dominieren $\Rightarrow$ Linsenorientierung



Abschätzung Linsengröße

$$f_1 = 100 \text{ mm} / NA = 0.07 \Rightarrow D_{NA} = 2 \cdot 0.07 \cdot 100 = 14 \text{ mm}$$
$$D_{ges} = 14 \text{ mm} + 5 \text{ mm} \approx 19 \text{ mm}$$

Was ist ein Optisches Datenblatt?:

Dokument / Beschreibung („Bauanleitung“), welche es erlaubt ein optisches System aufzubauen, so dass die vorgegebenen Anforderungen erfüllt sind.

Typischer Inhalt:

- Wesentlichen optischen Parameter (inkl. Toleranz) des Gesamtsystems:
z.B. Abbildungsmaßstab 10X (+/- 1%), Feldgröße
- Beschreibung der Art, Form und Lage der optischen Komponenten.
Falls Kaufkomponenten: Angabe des Lieferanten und Bestellnummer
- Toleranzen der Lage der optischen Komponenten
- Skizze des Systems

Beispiel optisches Datenblatt:

10X – Abbildungssystem:
Objektfeld: 2mm ; $OO' = 200\text{mm}$

Achromat

$f = +90\text{mm}$

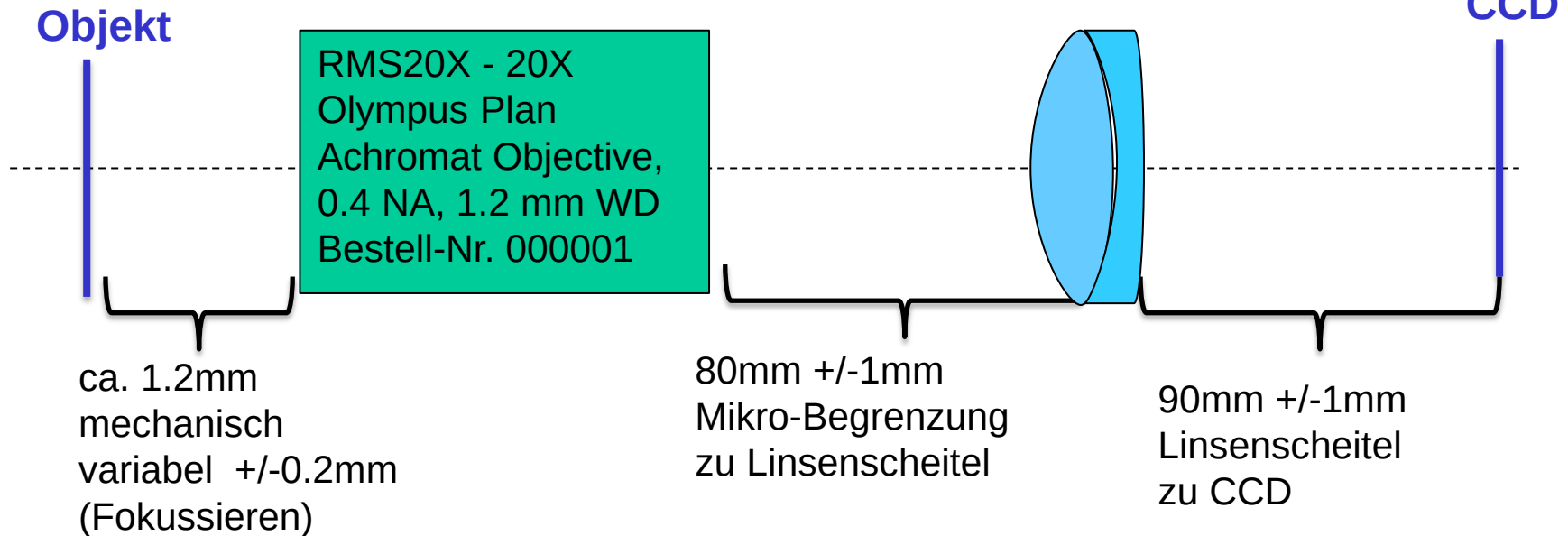
Qioptiq:

Bestell-Nr.: 000002

Optisch freier Durchmesser = 20mm

Linsenkip $< 1^\circ$

Dezentrierung $< 0.1\text{mm}$

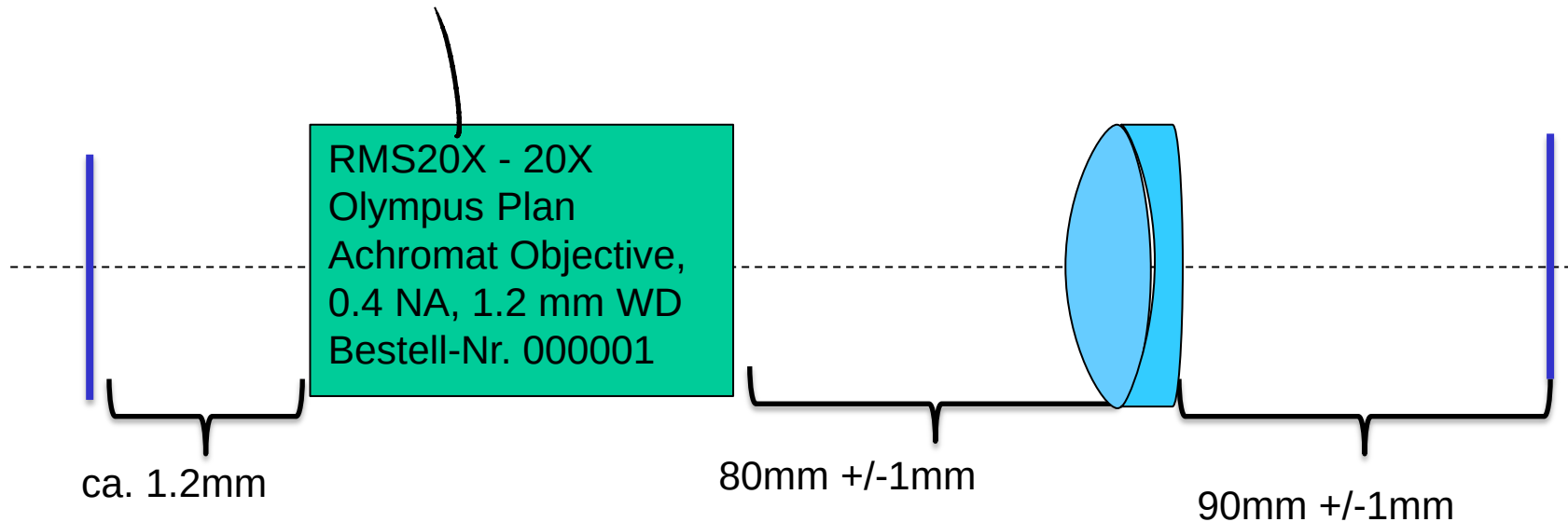


Zusammenhänge:

20x Objektiv
(für 180 mm TL)

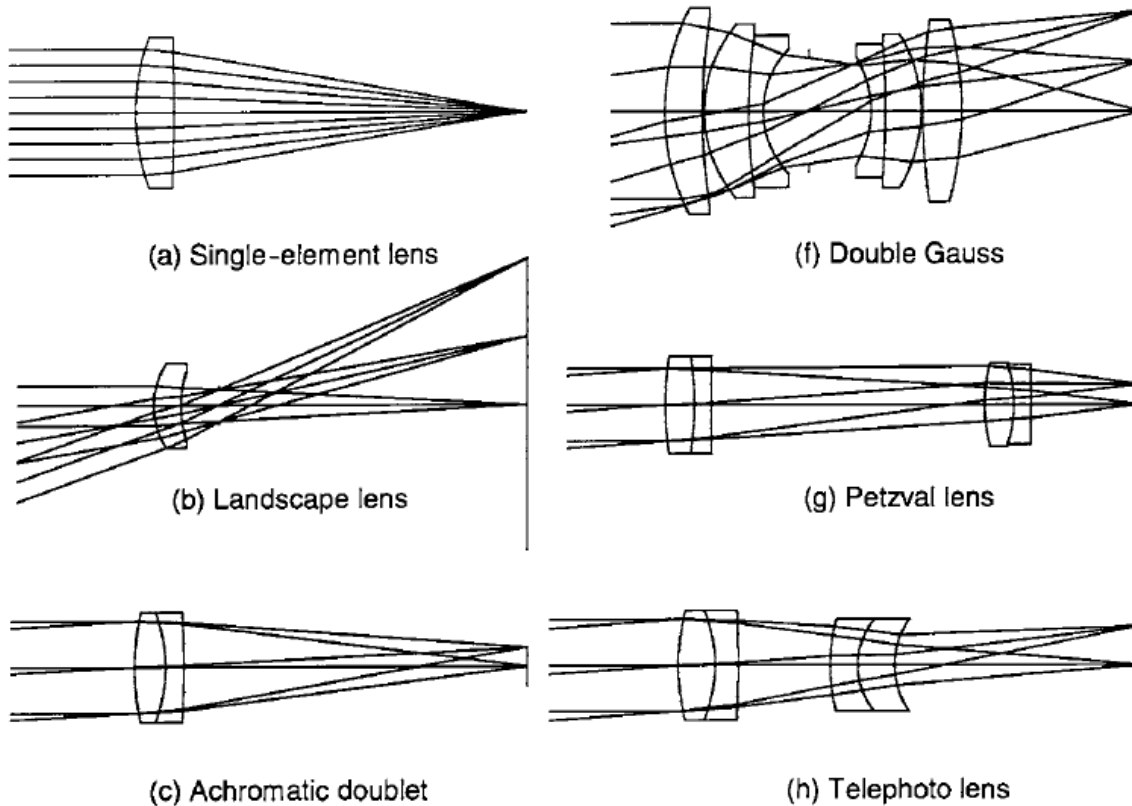
⇒

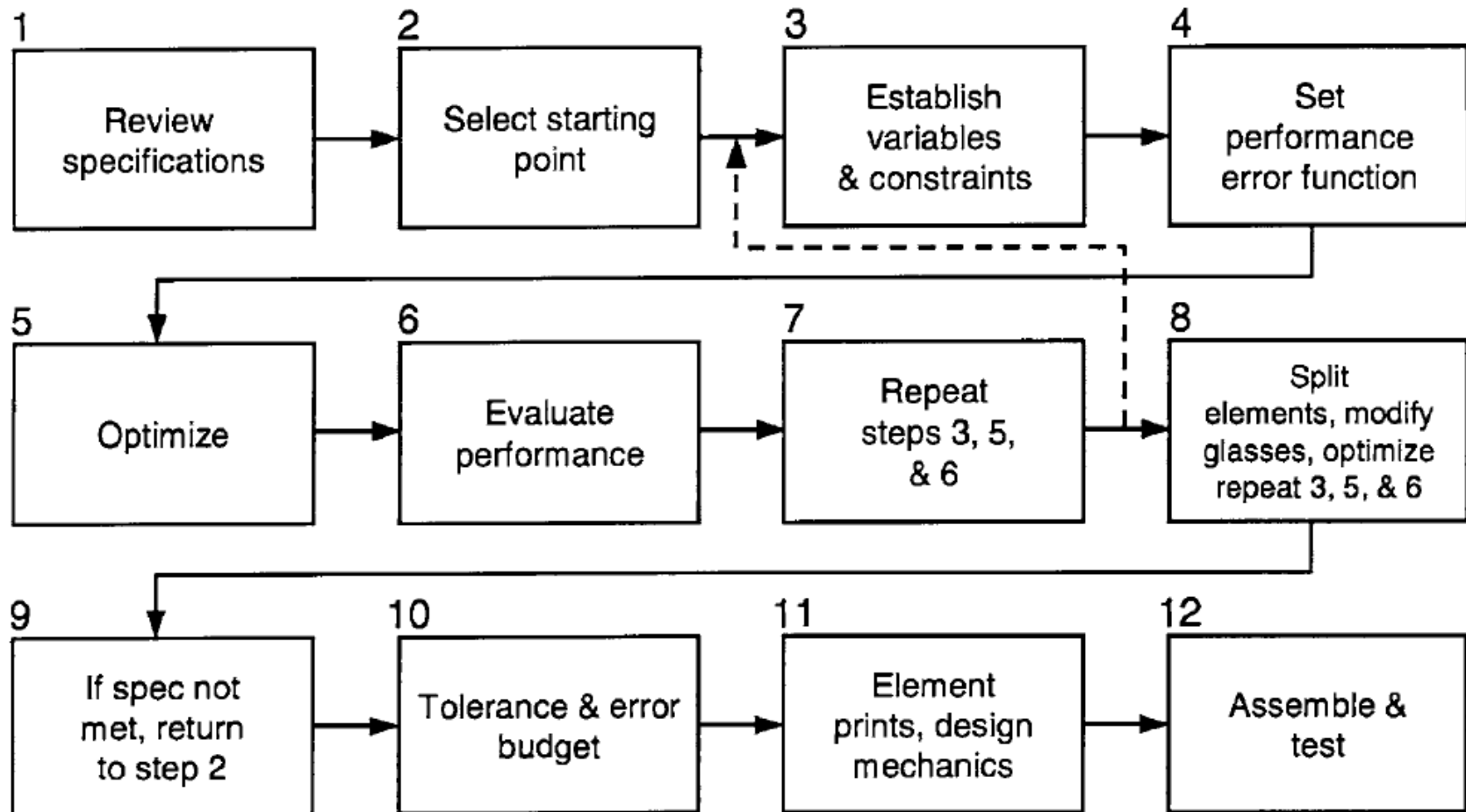
$$f_{TL} = 30 \text{ mm} \Rightarrow \beta = 10\times$$



Tiefenmaßstab $\alpha = \beta^2$
⇒ $1 \text{ mm} \hat{=} 0.01 \text{ mm}$

Komplexere individuelle Optik-Systeme bedürfen in der Regel einer Optimierung mit einem Optik-Design-Programm



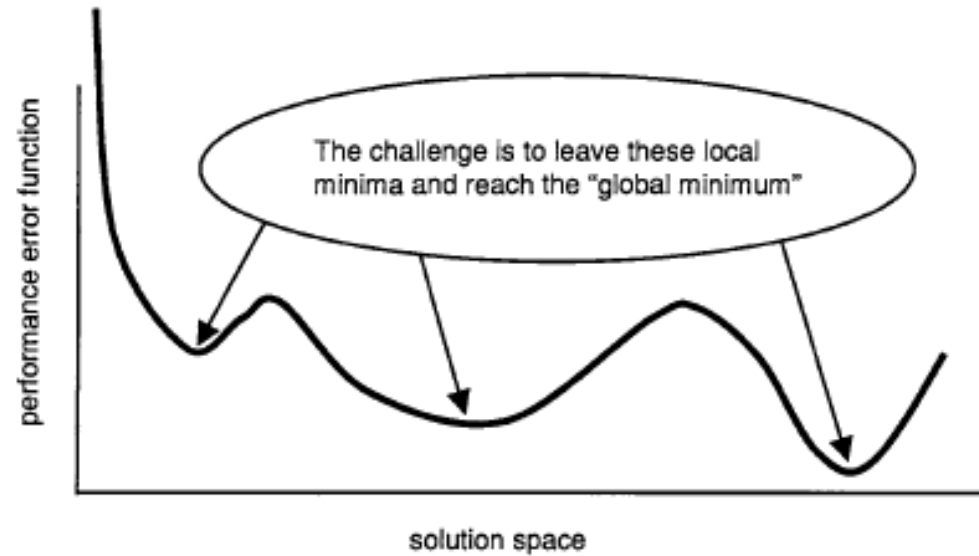


Die Schwierigkeit im Optikdesign von komplexen Systemen ist in der Regel das „globale“ Optimum zu finden, da die Optimierung in einem hochdimensionalen Raum erfolgt:

Freiheitsgrade 5 Linsen:

- 10 Radien
- 4 Abstände, 5 Linsendicken
- 5 Materialien

➔ ca. 25 Parameter



Wenn Sie ein optisches Design in Auftrag geben, sollten Sie:

- Möglichst genau die optischen Anforderungen und Anwendung beschreiben (Objektfeld, Bildfeld, Arbeitsabstände, Abbildungsqualität)
- Die Randbedingungen nennen:
Kosten, Linsenzahl, Baugröße
- Aber auch:
Mögliche Freiräume identifizieren: <, > Aussagen
(z.B.: MTF sollte besser als x% sein, aber individuelle Bildfehler irrelevant)

Kompromissbereit sein

Regelmäßige Diskussionen führen

Spezifikation	Beispiel
Objektfeld (Field of View) FOV	in mm oder Grad [°]
Abbildungsmaßstab (endlich nach endlich), Vergrößerung oder Brennweite (unendlich)	$\beta=10X$, $\Gamma=10X$, $f'=100\text{mm}$
Bildfeld (wir u.U. zusätzlich angeben, auch wenn es aus der Vergrößerung folgt)	mm
Verzeichnung	x% in der Diagonalen
Öffnung	NA, f#, EPD
Abbildungsqualität	„beugungsbegrenzt“ Mindest-Kontrast bei bestimmter Frequenz Wellenfrontfehler Strehl-Wert Spot
Wellenlänge und/oder Spektrum	Sichtbar Infrarot Laserwellenlänge

Typische Anforderungsliste Optikdesign



Parameter	Specification
Object distance	200 mm
Object full diagonal	60 mm
Magnification	0.1×
Image full diagonal	6 mm
f /number	$f/3.5$ at used conjugate

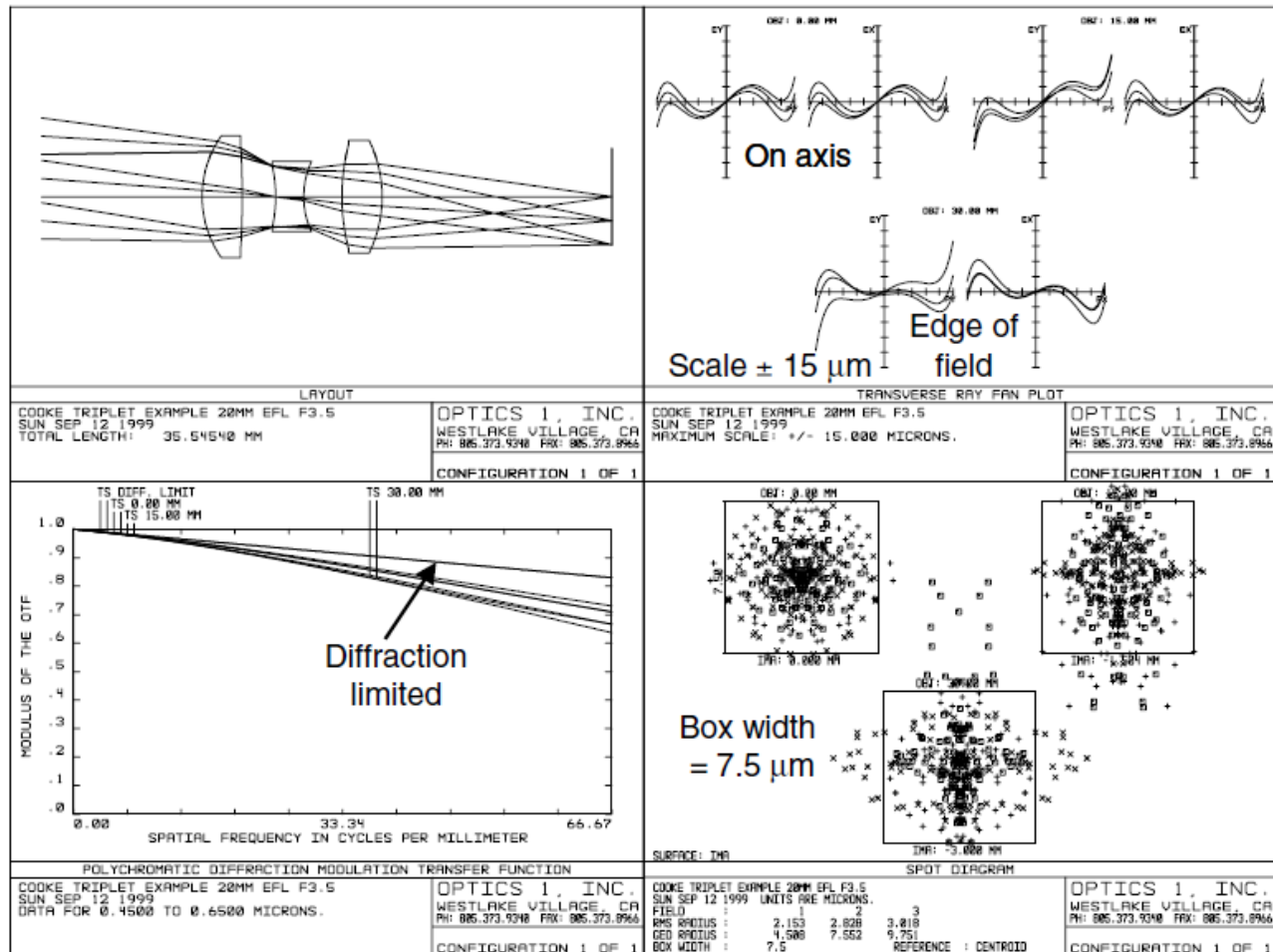
Parameter	Specification
Focal length	≈20 mm
Full field of view	≈17.06°
Spectral band	550 to 650 nm, uniform weights
Sensor	1/3-in CCD
Number of pixels	640 × 480
Pixel pitch at image	7.5 × 7.5 μm
Pixel pitch at object	75 μm
Nyquist frequency at image	66.67 line pair/mm
Nyquist frequency at object	6.667 line pair/mm
MTF spec at image	>0.3 at Nyquist

Typischer „Lieferumfang“ Optikdesign



Wenn Sie ein optisches Design in Auftrag geben, sollten Sie als **Ergebnis** fordern:

- Designkonzepte (mehrere Varianten)
- Analyse der Design-Performance (MTF, Spot)

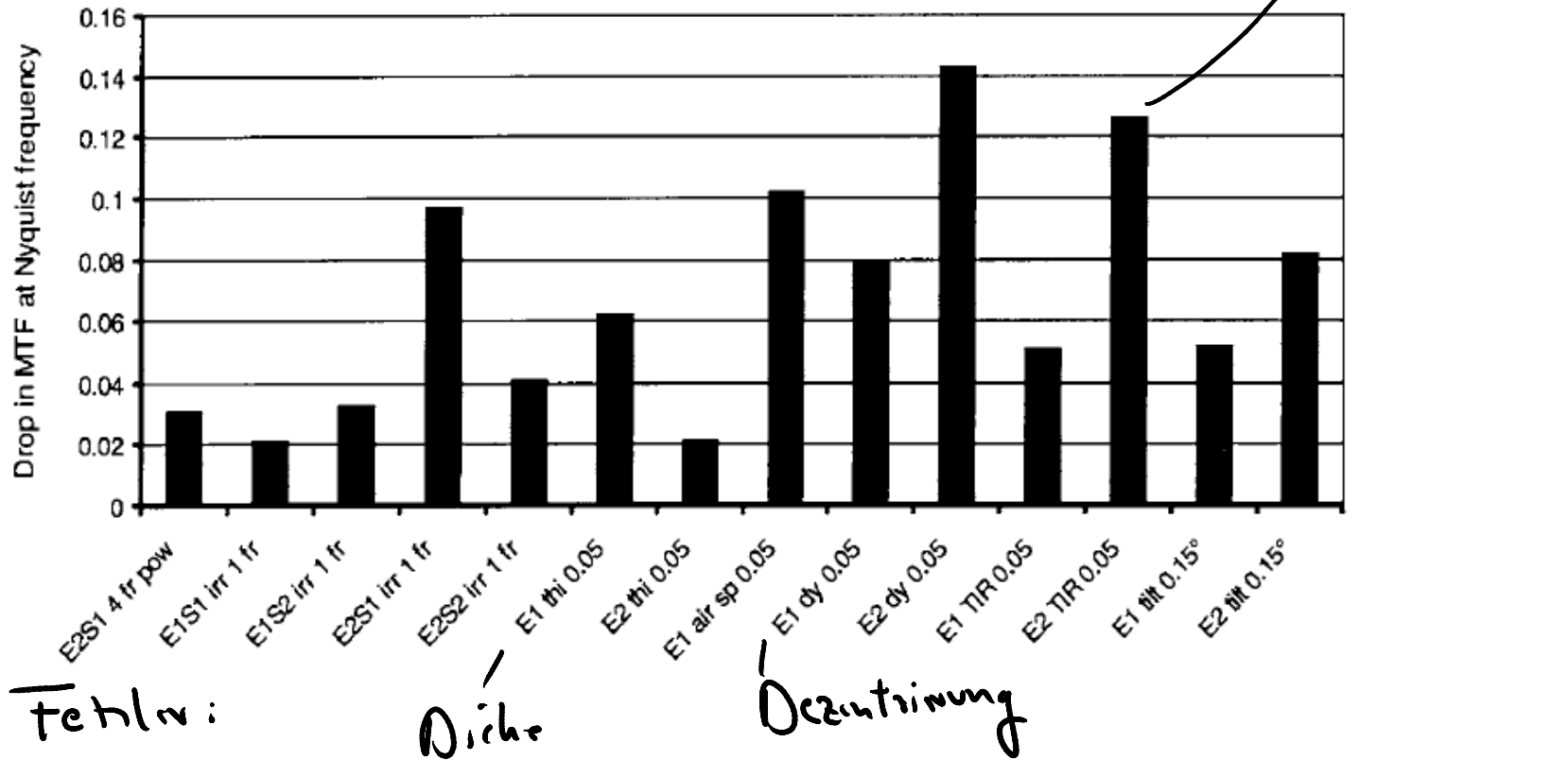


Typischer „Lieferumfang“ Optikdesign



- Analyse der Toleranzen (Herstellbarkeit Optisch / Mechanisch)

⇒ Auswirkung von Fehlern auf Performance



Output- Optisches Datenblatt



- Fertigungsdaten (Optisches Datenblatt)

ZEISS										OBERKochen: RECHNUNG VOM xxx										ABT. xxxxx																			
DATEN: BETA =-99.6 X1 =UNENDL. F2,3=+ 4.0MM F8,9 =-35. F1-16=+ 1.66MM X16'=-8.59MM F4,5=+102.3MM F9,10=+10. 0-0' =195.0MM 0-S16=38.21MM F6,7=+ 17.3MM F8-10=+15.										ZEICHNUNG : Ø										KOMIKRO																			
										MIKRO 63D13415										K0 HERAUSGEGEBEN AM 26.6.91										FO-EMM/MUCH									
RADIUS			PLAN	PLAN	2.0700	2.6550	3.2210	13.428	6.3100																														
SKIZZE																																							
TEIL NR.																																							
2H			0.5	1.5	3.9	4.5	6.2	8.7	9.4																														
FREIER Ø			1.5	1.5	3.9	4.5	6.2	8.7	9.4																														
Ø																																							
GLASART			K5	IMOEL	K7		LAK11		PSK53A																														
SCHMELZE																																							
(587.6 nm)			1.52249	1.51500	1.51112		1.65830		1.62014																														
STUFE			±0.001 (4)		±0.0003 (2)		±0.0005 (3)		±0.0005 (3)																														
Vd			59.48	43.45	60.41		57.26		63.48																														
STUFE			±0.8 % (4)		±0.5 % (3)		±0.5 % (3)		±0.3 % (2)																														
TOLERANZEN: KOMBINATIONSFREIE FERTIGUNG																																							
D			±0.04		±0.03	±0.05	±0.02	±0.01	±0.02																														
KITT																																							
Ø) KUEHLUNG			20		20		20		20																														
1) BLASEN					1X0.1		1X0.1		1X0.1																														
2) SCHLIEREN			-; 2		-; 2		-; 2		-; 2																														
3) PASSE					5.0(1.0)	2.0(0.4)	2.0(0.4)	3.0(0.6)	1.0(0.2)	1.0(0.2)																													
4) ZENTR.					9'	6'	8'	6'	2'	2'																													
5) UNSAUB.	3415				1X0.04	1X0.1	1X0.1	1X0.1	1X0.16	1X0.16																													

Geometrie

Material

Toleranzen

Was beeinflusst maßgeblich die Komplexität von opt. Systeme

→ Feld und Öffnung

Wie sind die wesentlichen Kenngrößen bei Katalogsystemen

→ Feld, Öffnung, Brennweite, Wellenlänge, Abb.-Qualität

Was sollte in einem Design-Lastenheft spezifiziert sein ?

→ Optischen Parameter

→ Anforderungen an Qualität und Kosten

→ Freiheiten für den Designer

Welche Größen werden in einem optischen Datenblatt angegeben

→ Abstände, Lage – inkl. Toleranzen

→ Spezifikation der Komponenten

→ Kenngrößen