

9. Toleranzen und Optomechanik

9.1 Toleranzen / Sensitivitäten

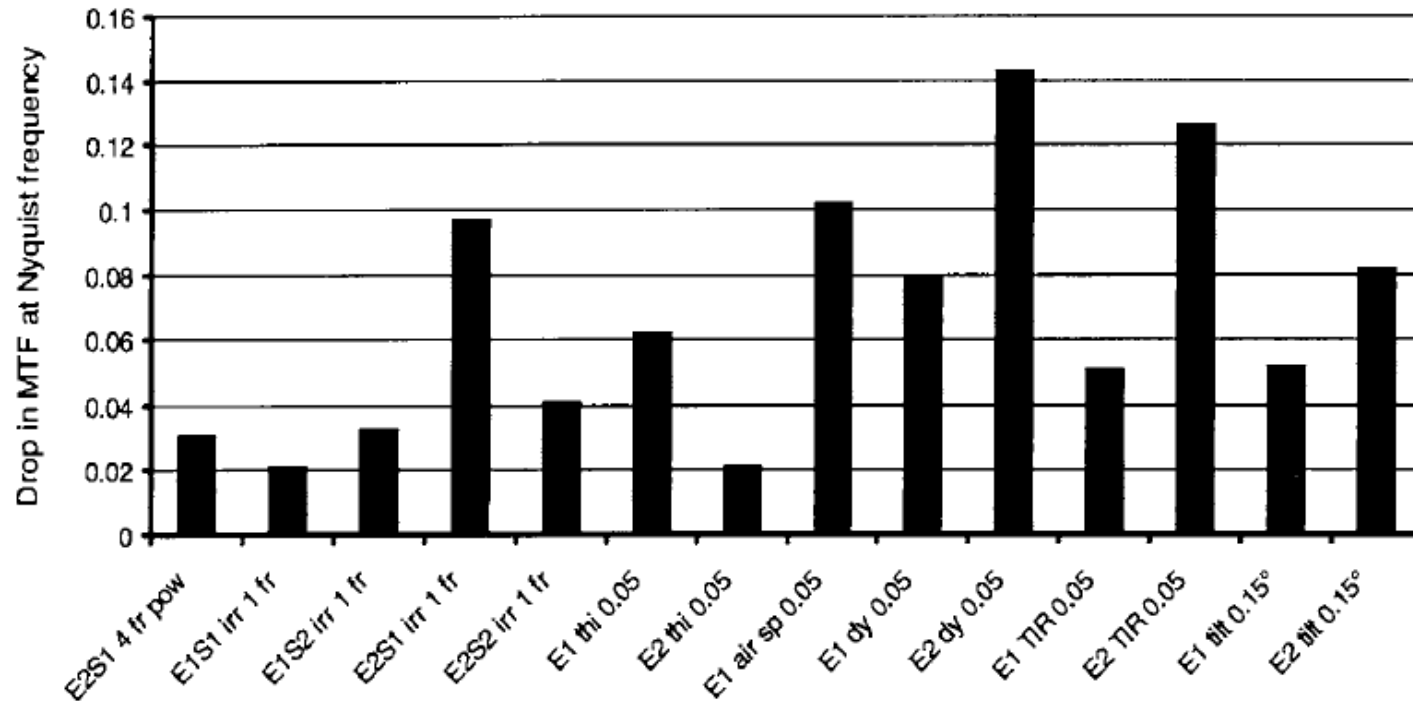
9.2 Zusammenhänge Oberflächenfehler

9.3 Zusammenhänge Lagefehler

9.4 Fassungskonzepte / Justage

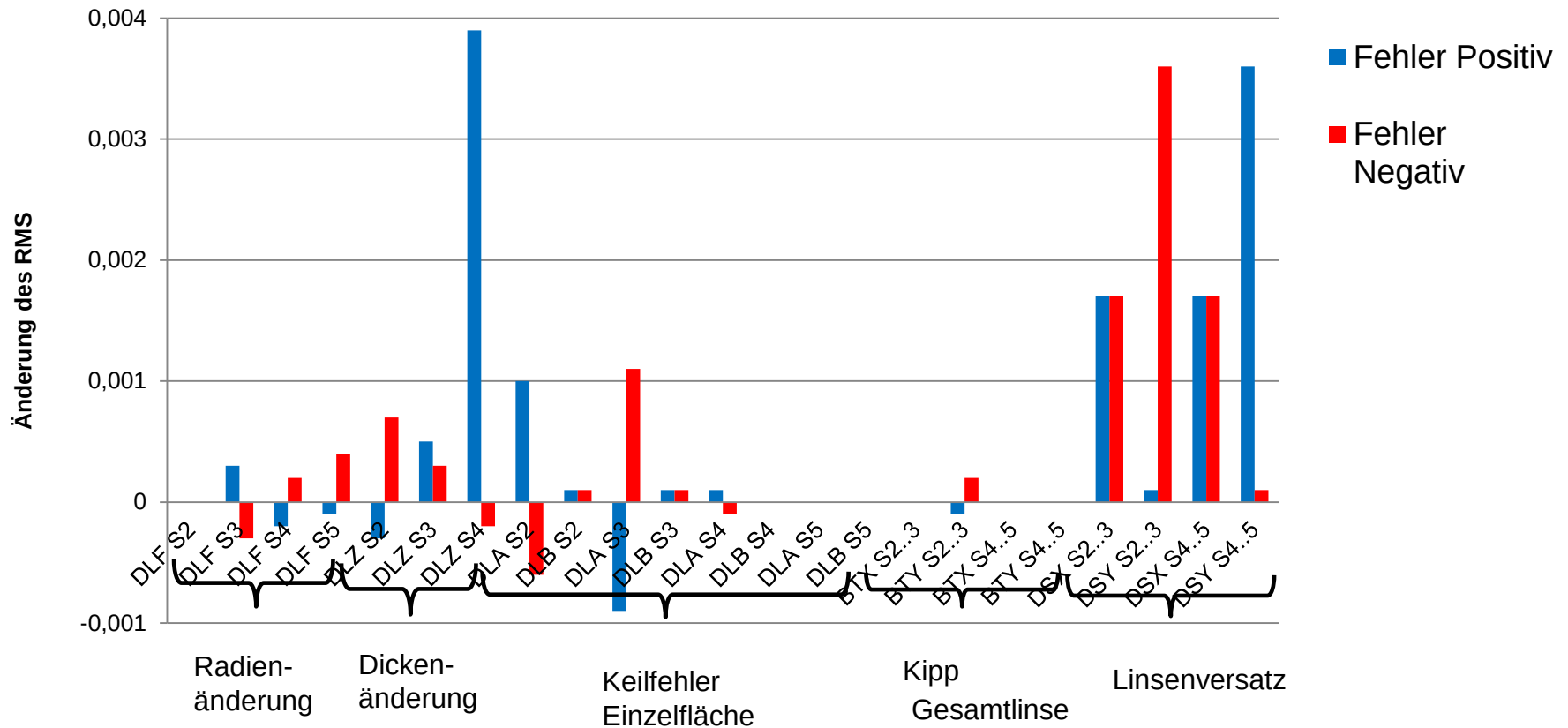
Berechnung der Toleranzen erfolgt typischerweise im Optik-Design-Programm

- Sensitivitäts-Analyse
- Z.B. Kontrast-Verlust vs. Fehler



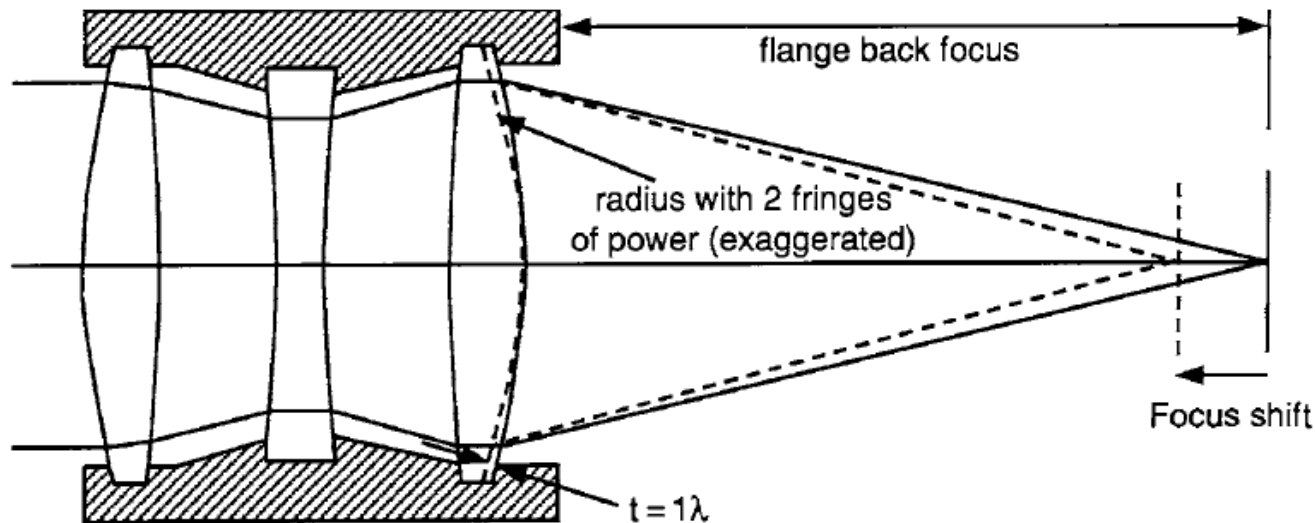
Sensitivitäts-Analyse

→ RMS-Wellenfrontfehler vs. Fehler



Ein Haupt-Fehler (1'Ordnung) ist in der Regel die Verschiebung des Bildes/Fokus in axialer Richtung = Fokus-Verschiebung (Defokussierung)

Typischerweise kann/muss dies kompensiert werden

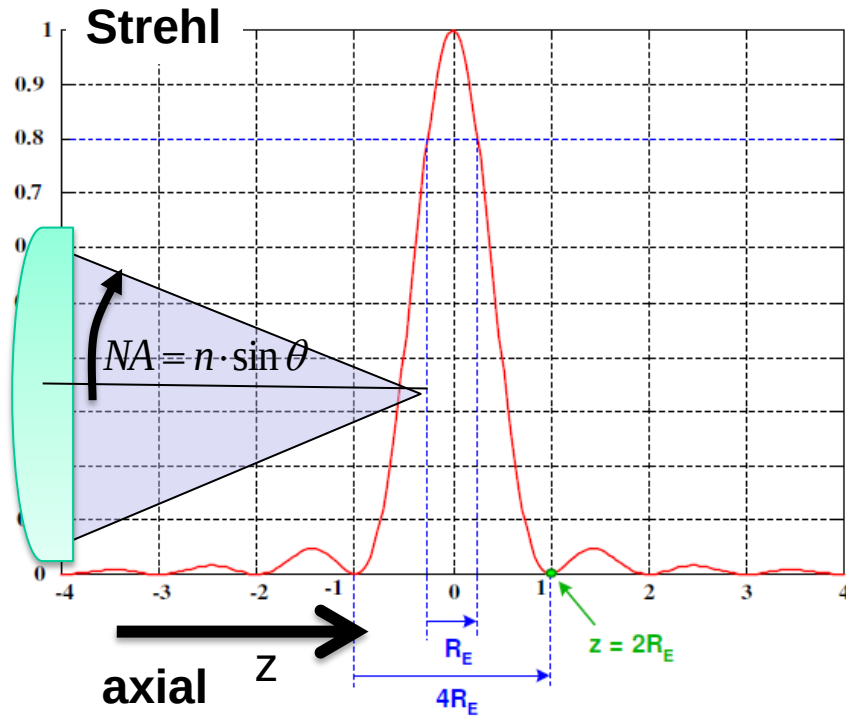


Quelle: Fischer „Optical System Design“

Einfluss Defokussierung auf PSF



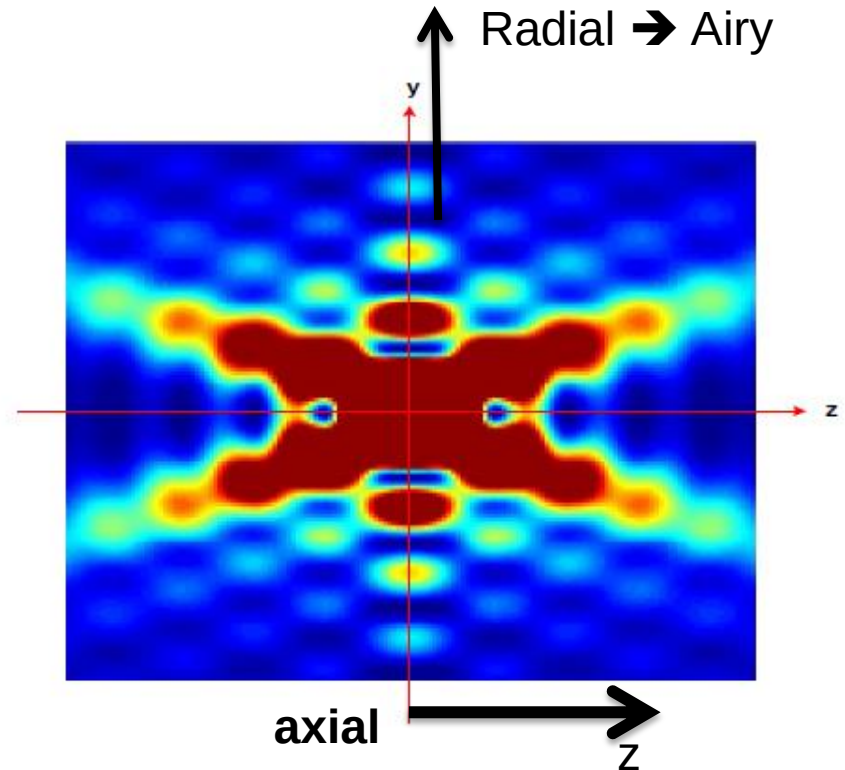
Lichtverteilung auch vor/nach der optimalen Bildebene
(kann ähnlich wie die Airy-Figur aus der Wellenoptik berechnet werden)



Rayleigh-Einheit

$$R_E = \frac{\lambda}{NA^2}$$

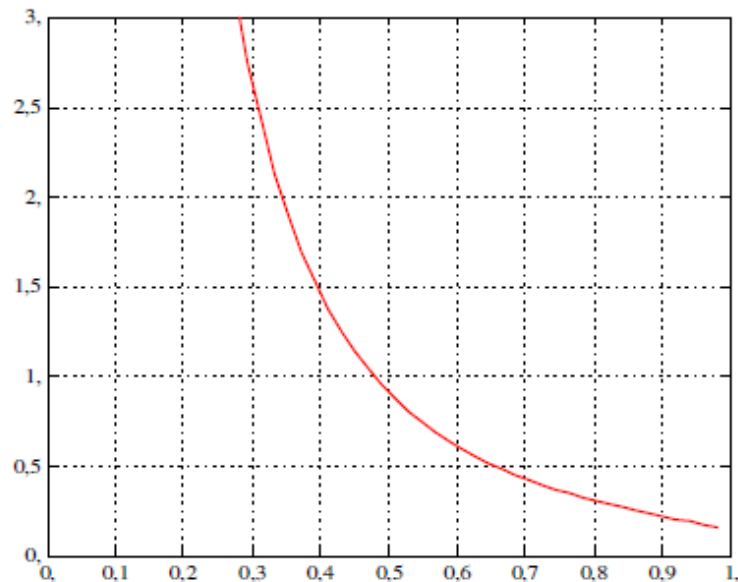
→ Wellenoptische Schärfentiefe = $\pm 0.5 R_E$
(Strehl > 80%)
„depth of focus“ (DoF)



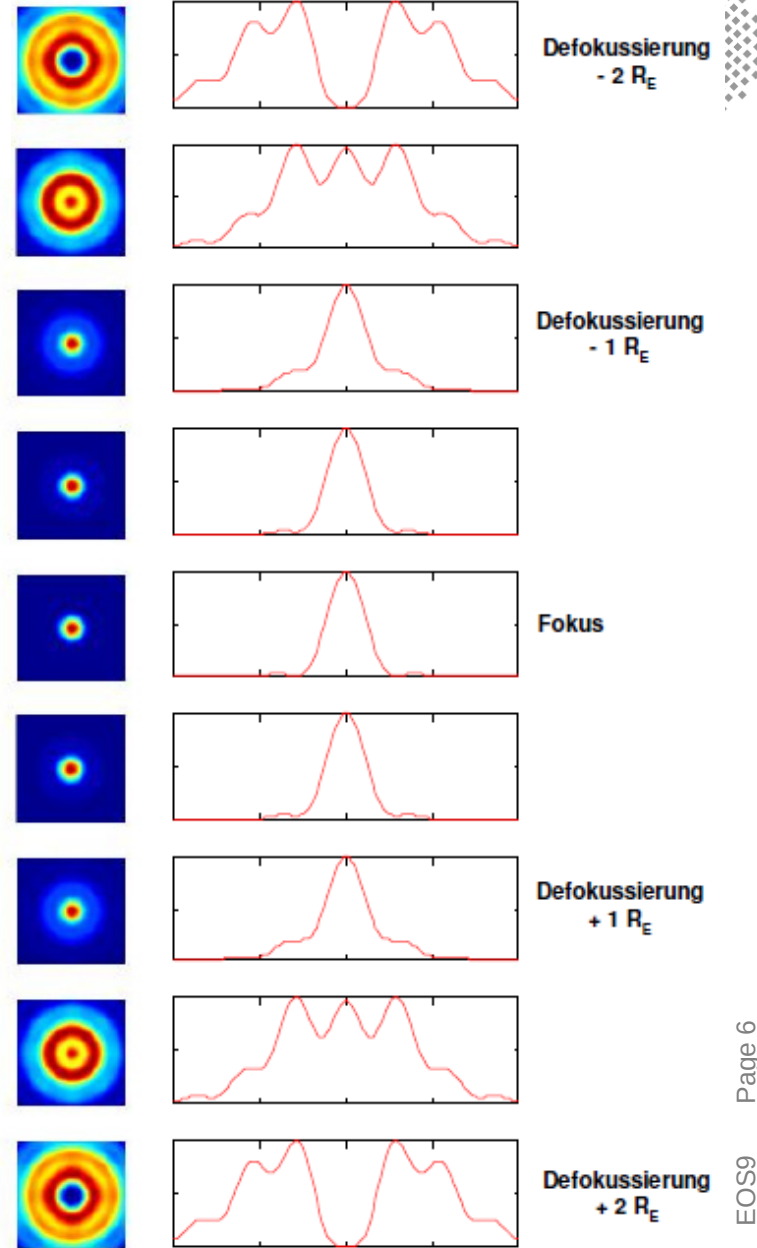
Einfluss Defokussierung auf PSF

- Außerhalb des Fokus :
 - Psf verbreitert sich
 - es entsteht Ringsystem
- Schärfentiefe :
wächst mit abnehmender numerischer Apertur

Δz in μm



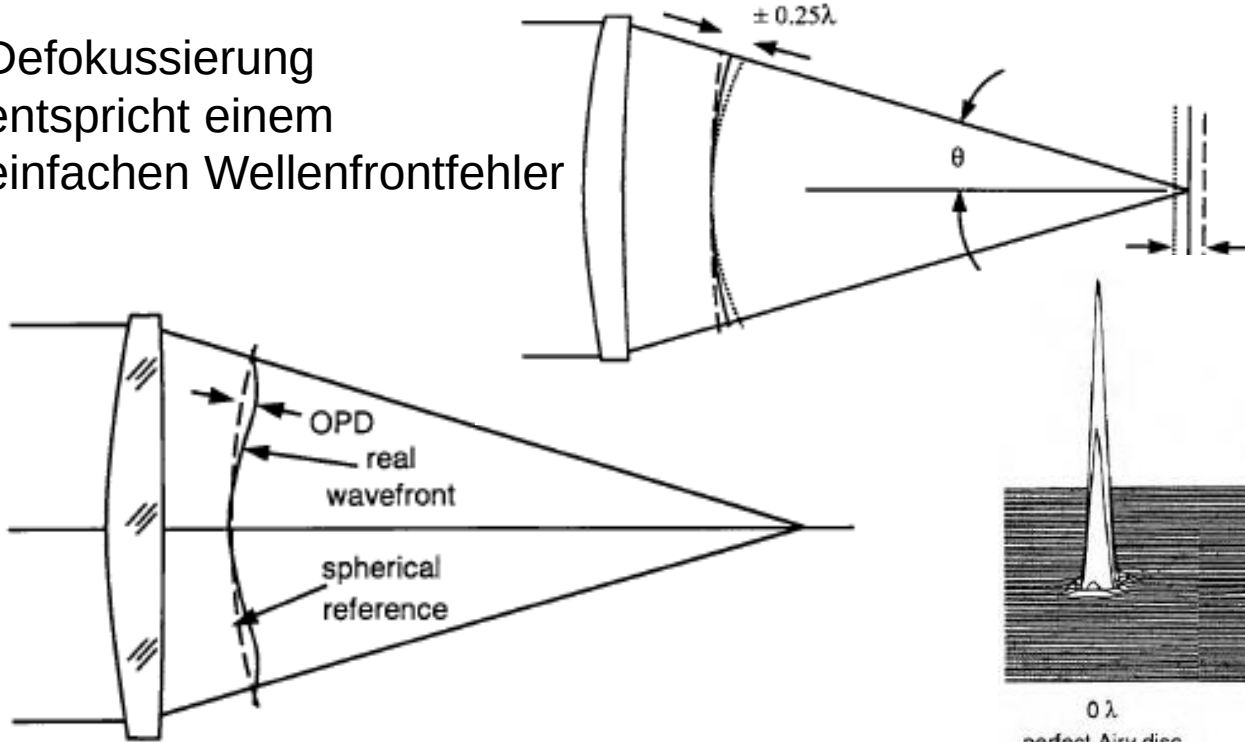
NA



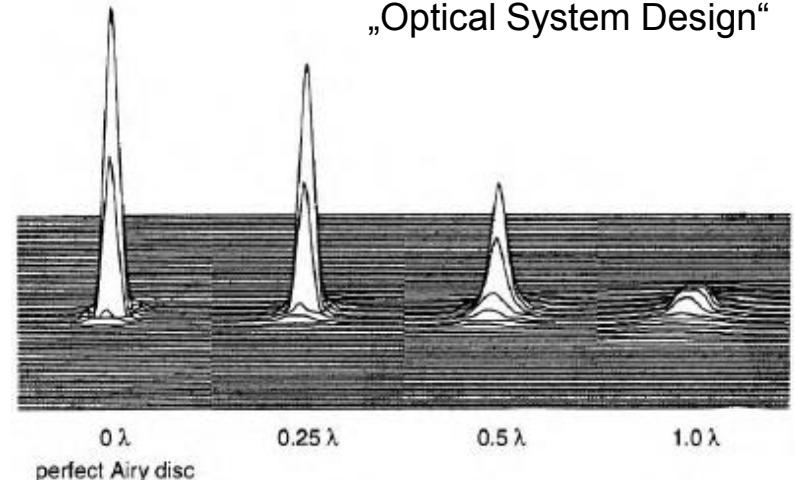
Zusammenhang Wellenfrontfehler - Strehl



Defokussierung
entspricht einem
einfachen Wellenfrontfehler



Quelle: Fischer
„Optical System Design“



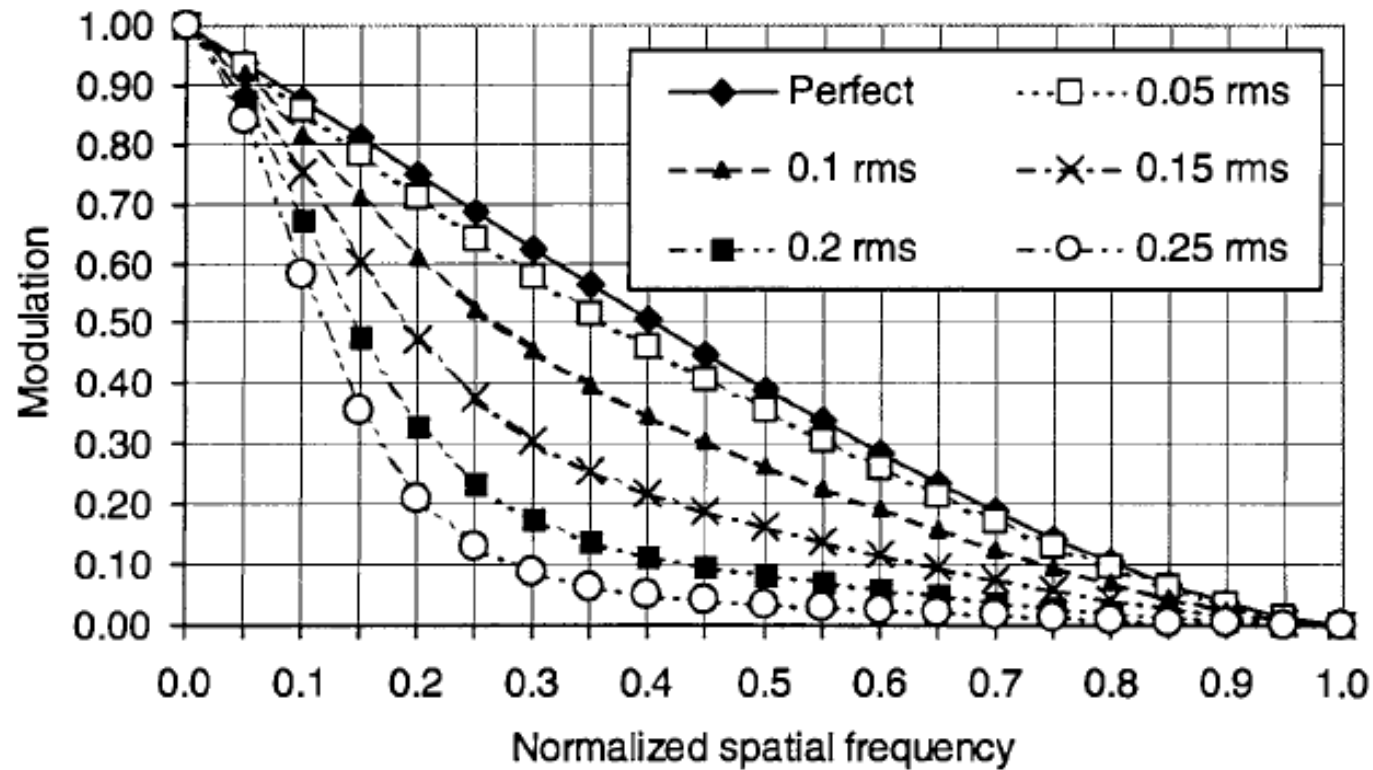
Zusammenhang zwischen
Strehl und Wellenfrontfehler (OPD)
(OPD = Optical path difference)

$$D_s = 1 - 4\pi^2 \left(\frac{W_{rms}}{\lambda} \right)^2$$

$$W_{rms} < 0.07\lambda$$

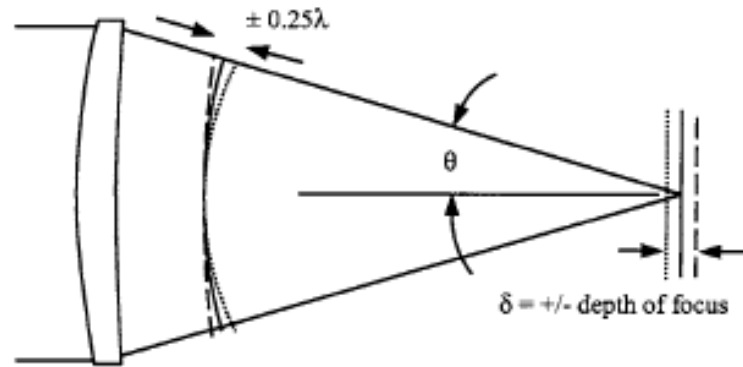
Bzw. da PV und RMS mit ca. 3-4X skalieren

$$W_{PV} < \frac{\lambda}{4}$$

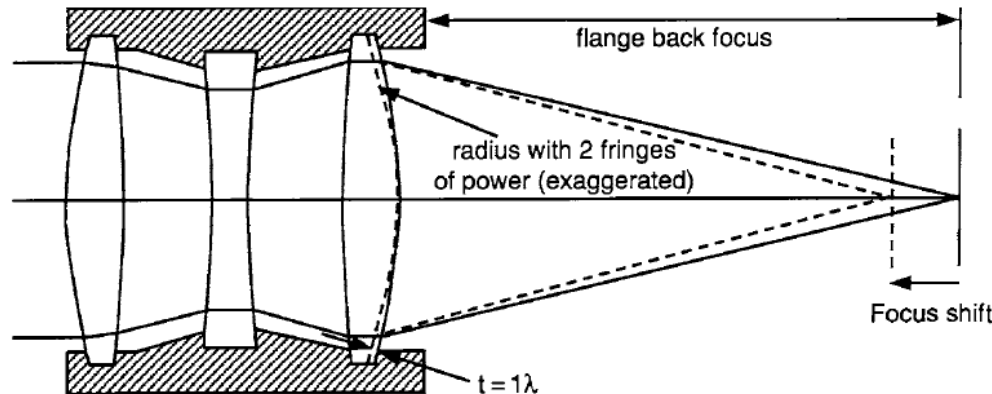


Quelle: Fischer „Optical System Design“

Umrechnung Wellenfrontfehler in Oberflächenfehler



Erlaubter Wellenfrontfehler



Oberflächenfehler/Toleranz:
 $2 \text{ Ringe} = 2 \times \lambda/2$

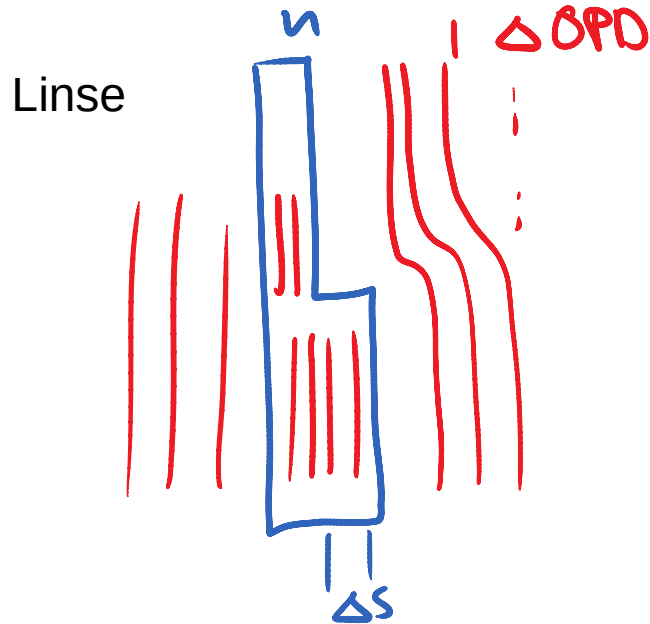
→ Oberflächenfehler $\Delta s = 1\lambda$

Änderung der optischen Weglänge:
 $\Delta \text{OPD} = (n-1) \times \Delta s = 0.5\lambda$

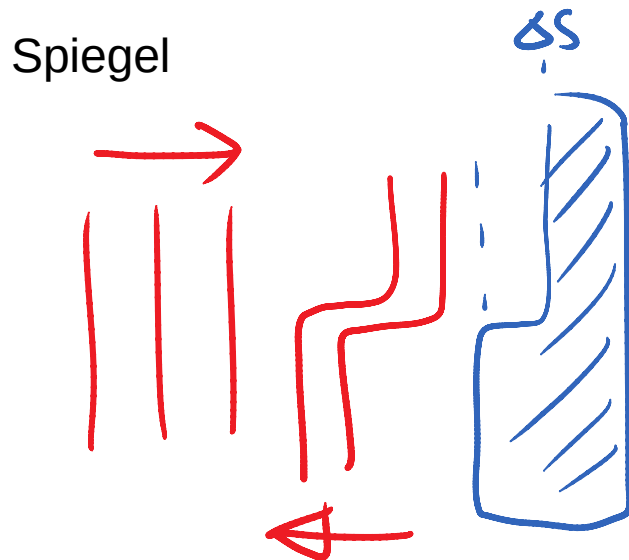
Quelle: Fischer „Optical System Design“

→ Bereits zuviel !!
→ Kompensator nötig

Umrechnung Wellenfrontfehler in Oberflächenfehler



$$\Delta OPD = (n - 1) \cdot \Delta s \approx 0.5 \cdot \Delta s$$

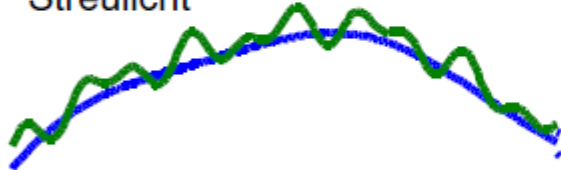


$$\Delta OPD = 2 \cdot \Delta s$$

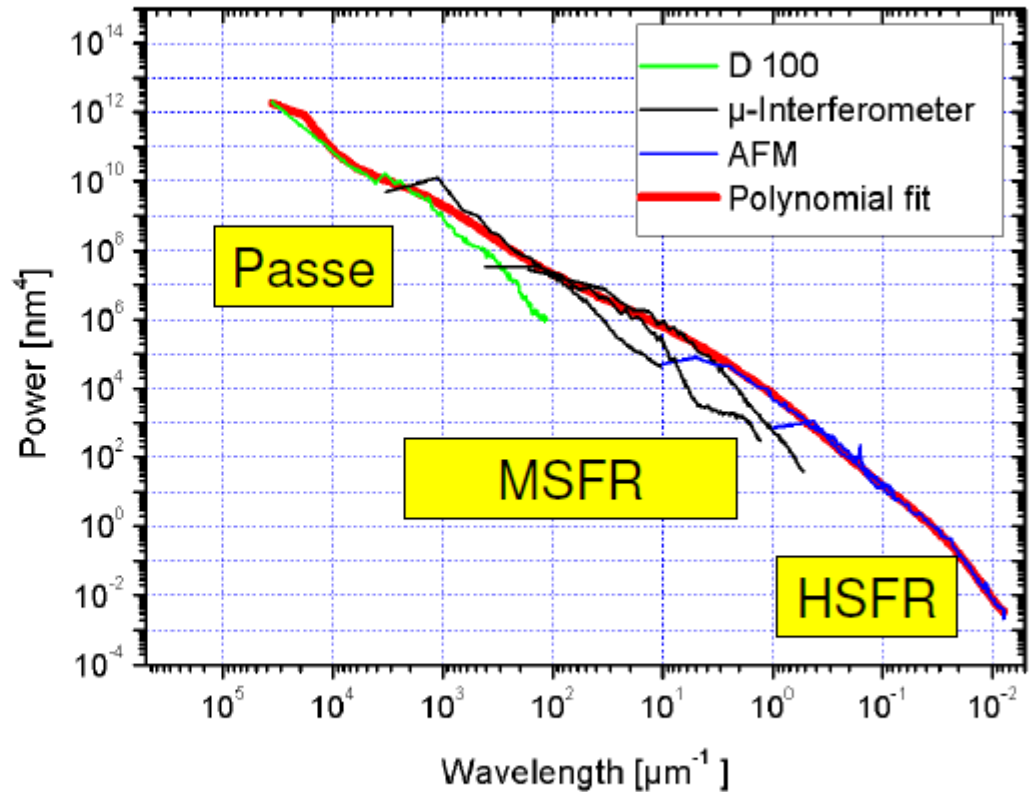
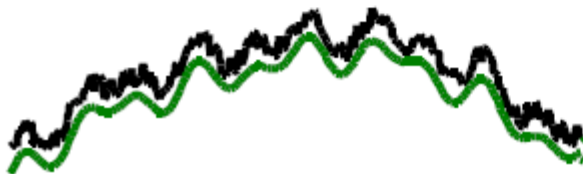
- Passfehler erzeugen Aberrationen



- MSFR-Fehler erzeugen Streulicht



- HSFR-Fehler reduzieren Reflektivität



1. Worst Case :

Addition alle Fehler betragsmäßig.

Ansatz unrealistisch schlecht, da keine Kompensationen berücksichtigt sind

$$\Delta f = \sum_j |\Delta f_j|$$

2. Rms-Mittelung

Ideal statistischer Ansatz : quadratische Überlagerung

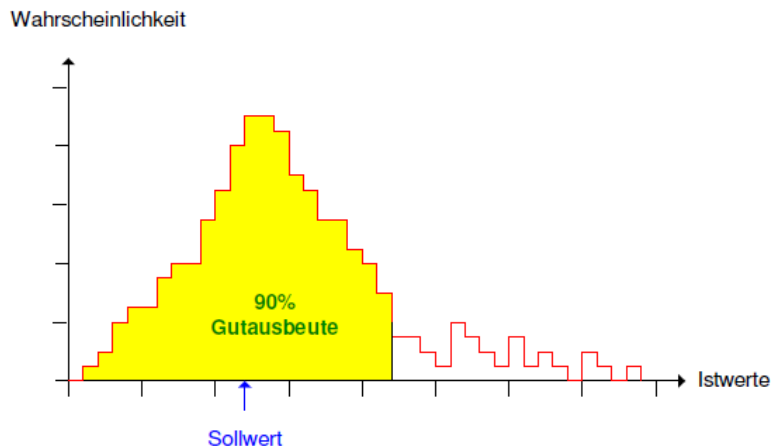
$$\Delta f = \sqrt{\sum_j |\Delta f_j|^2}$$

3. Exakte statistische Simulation :

Statistischer Ansatz für die Istwerte der Systemparameter.

Berücksichtigung von Justageschritten bei der Fertigung mit entsprechenden Meßgenauigkeiten und Statistik

Statistische Verteilung der Istwerte eines Parameters



Quelle: Gross „Handb. of Optical Systems“

Beispiel: Feinpasse



Bei vielen optischen Systemen kann der Fokusfehler (Radienfehler) kompensiert werden.

Begrenzende Fehler sind dann meist die Oberflächen/Wellenfrontfehler höherer Ordnung.

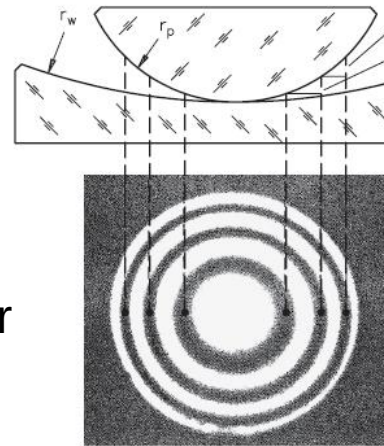
➔ Feinpasse (3/ Ringe (Feinpasse))

➔ Bei mehreren Flächen addieren sich die Wellenfrontfehler quadratisch (da statistisch unabhängig)

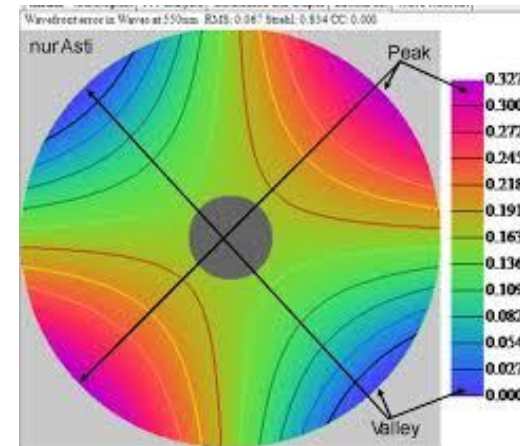
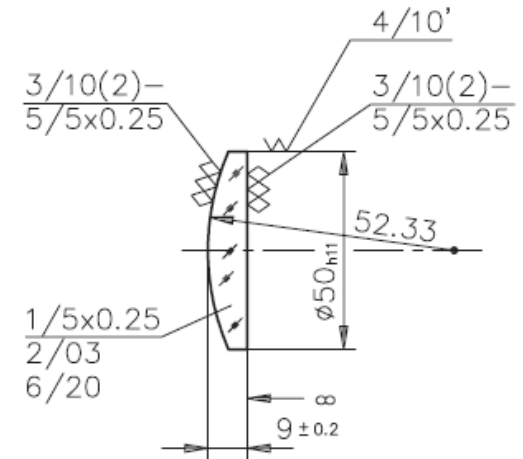
$$W_{rms} = \sqrt{RMS_1^2 + RMS_2^2 + \dots}$$

z.B. 4 Flächen, $RMS = \frac{\lambda}{10}$

$$\Rightarrow RMS_{Tot} = \sqrt{4} \cdot \frac{\lambda}{10} = \frac{\lambda}{5}$$



Passeprüfung mit dem Probeglas



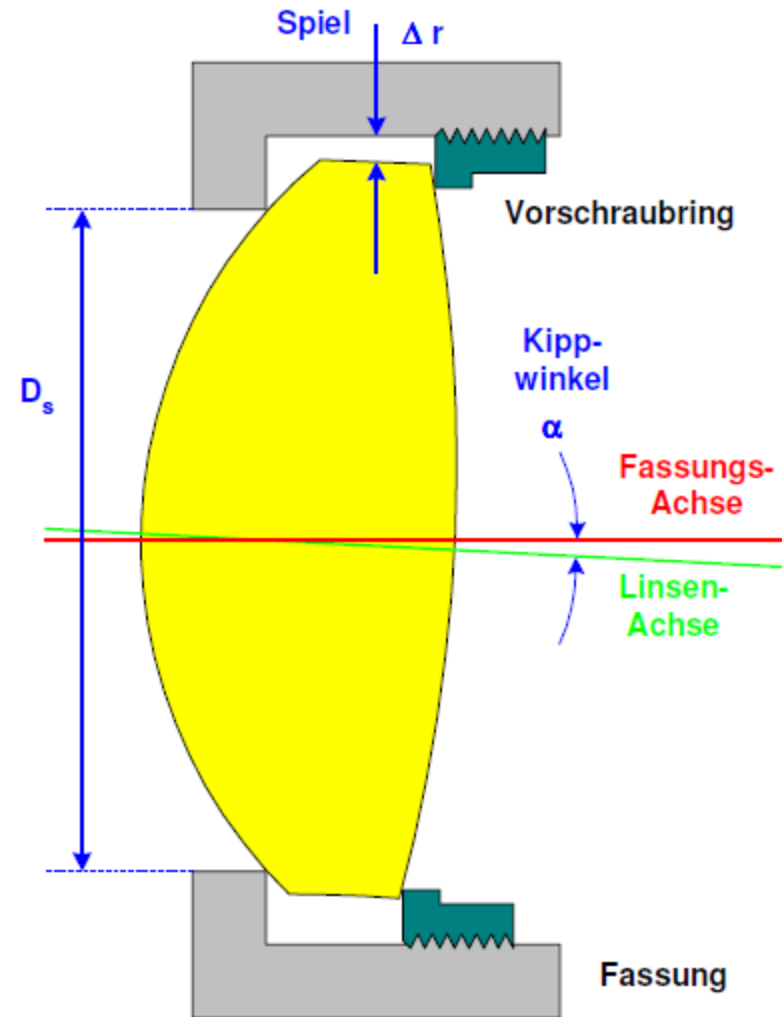
Typische Toleranzen Einzellinsen



Parameter	Tolerance	Parameter	Tolerance
Radius	Testplate measurement accuracy	Tilt	0.05-mm TIR
Power fit to testplate	Three fringes	Decenter	± 0.05 mm
Surface irregularity	One fringe	Refractive index	± 0.001
Thickness	± 0.05 mm	Abbe number	$\pm 0.8\%$
Air space	± 0.05 mm	Glass inhomogeneity	± 0.0001
Wedge/centration	0.025-mm TIR		

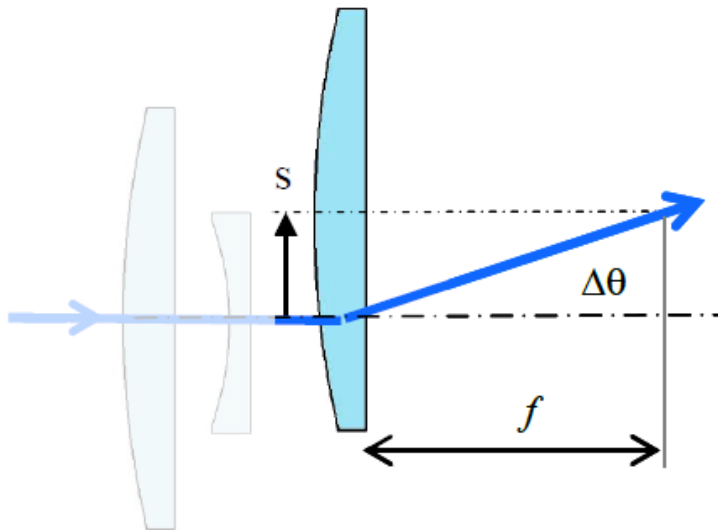
Quelle: Fischer „Optical System Design“

- Schnittstelle Optik - Mechanik :
Fassungstechnik
- Typische Technologien :
 - Füllfassung mit Vorschraubring
 - Einkitten und abdrehen
 - Bördeln
- Kritisch : **Zentriertoleranzen**,
Bezugsgrößen und Geometrie-
analyse
- Schnittstelle zur Konstruktion

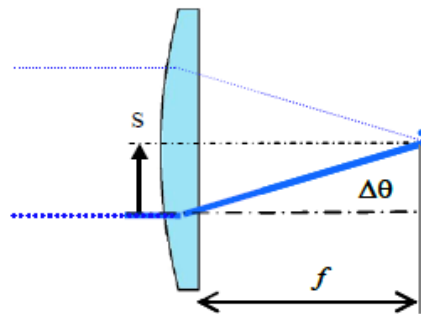


Quelle: Gross „Handb. of Optical Systems“

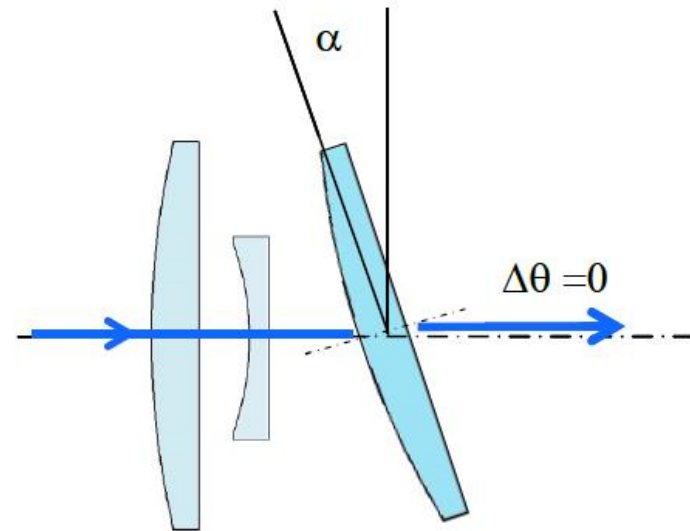
Dezentrierung



$$\Delta\theta_s \cong \frac{s}{f}$$

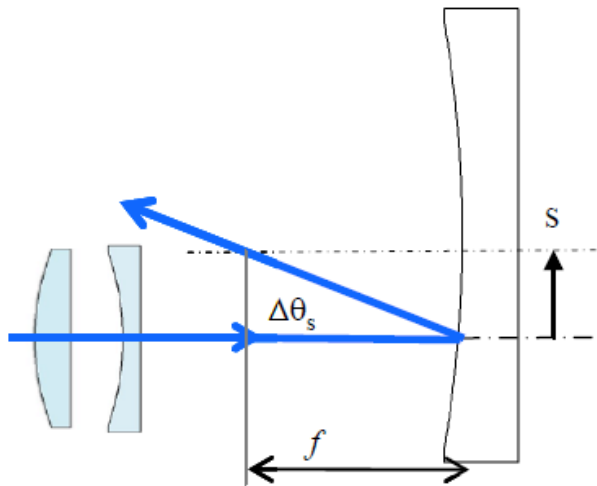


Linsen-Kipp



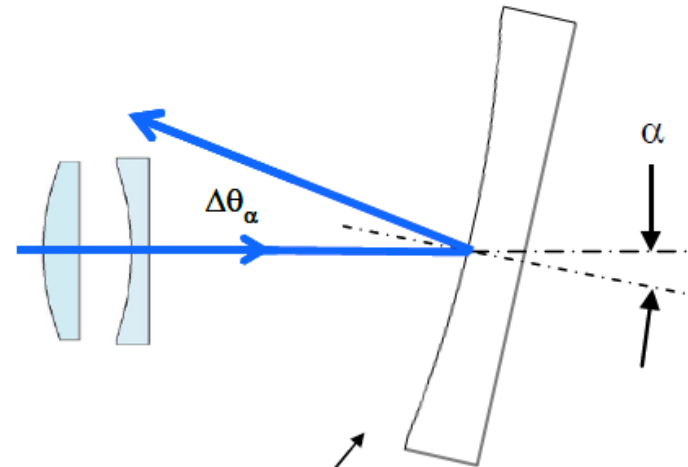
(Very small effect)

Dezentrierung



like lens

Linsen-Kipp

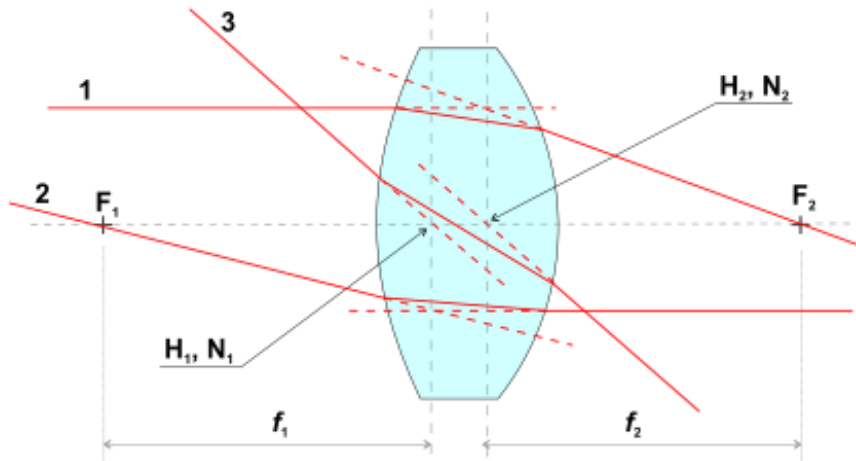


$$\Delta\theta_\alpha = 2\alpha$$

like flat mirror

$$\Delta\theta \cong \frac{s}{f} + 2\alpha$$

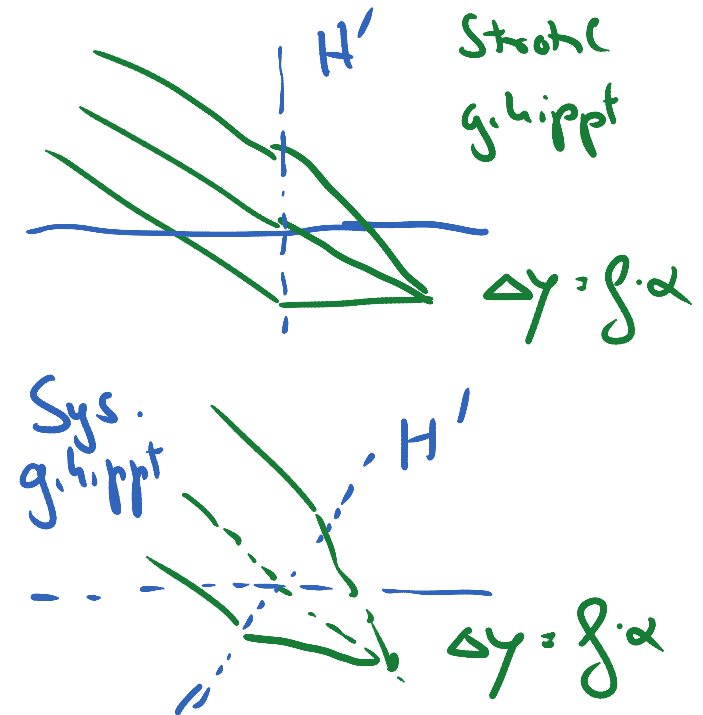
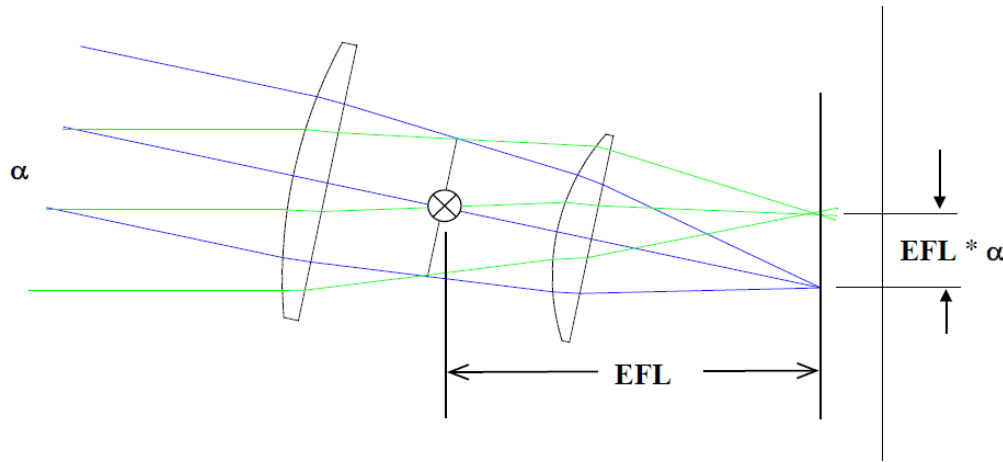
Knotenpunkte – Nodal-Punkte



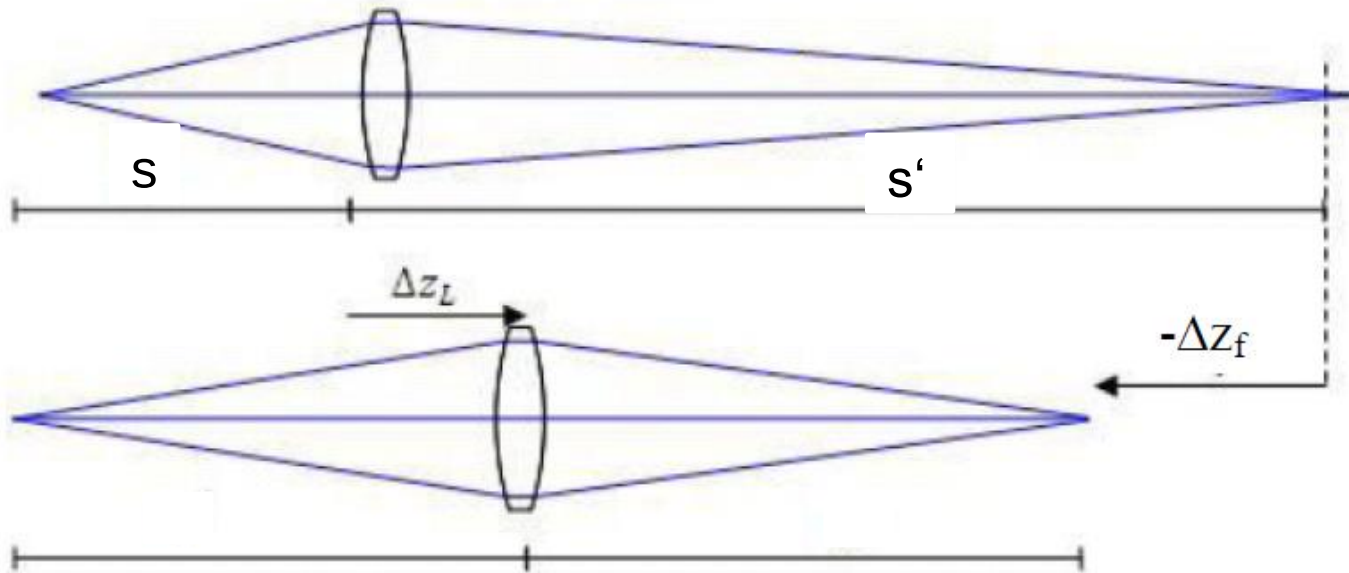
Für System an Luft:

→ Knotenpunkt = Hauptebene

Rotation des Systems um N'
führt zu keinem Bild-Versatz
(analog N und Objekt)



Wirkung von Lagetoleranzen in axialer Richtung



$$ds = -\Delta z_L \quad ds' = \Delta z_F - \Delta z_L$$

Tiefenmaßstab $\frac{ds'}{ds} = \beta^2 = \frac{\Delta z_F - \Delta z_L}{-\Delta z_L} = 1 - \frac{\Delta z_F}{\Delta z_L}$

$$\text{für } s = \infty \Rightarrow \beta = 0 \Rightarrow \Delta z_F = \Delta z_L$$

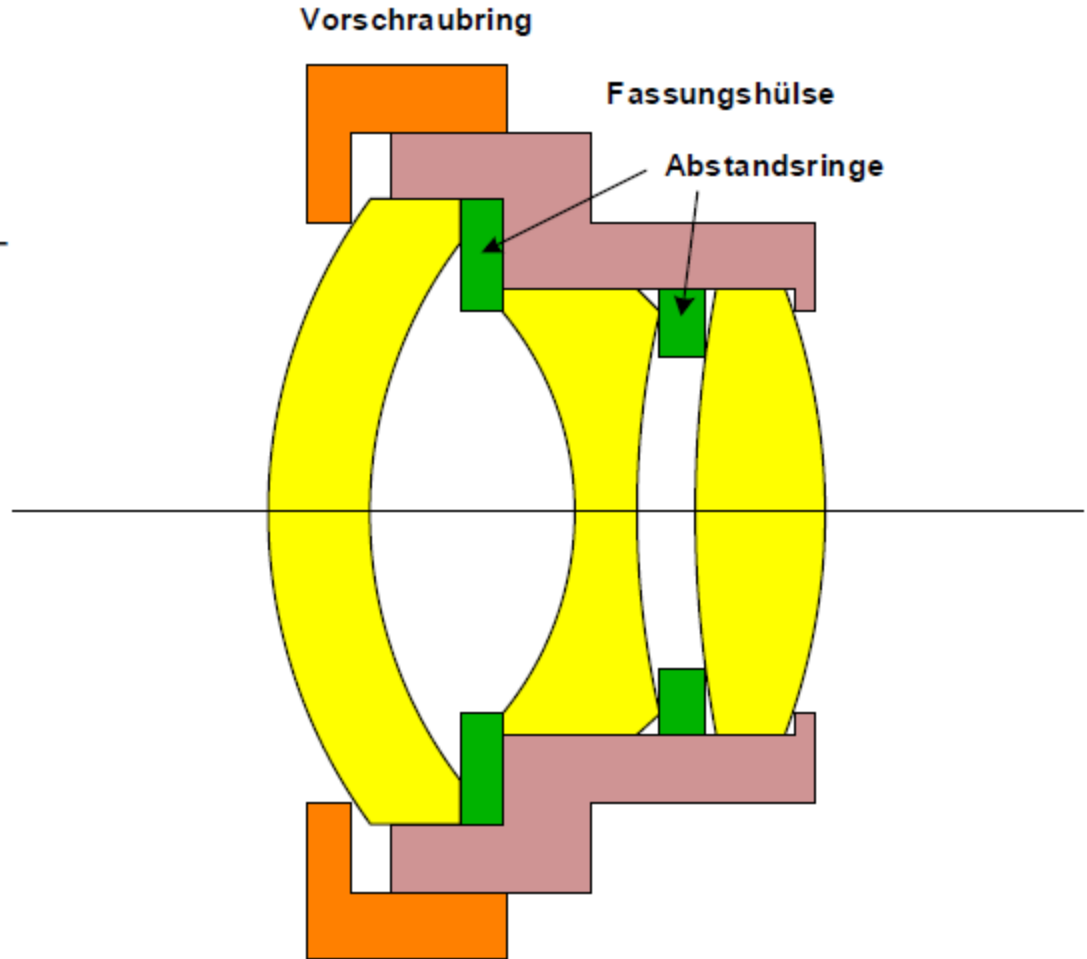
$$\text{für } \beta = 1 \Rightarrow \Delta z_F = 0$$

$$\Delta z_F = \Delta z_L \cdot (1 - \beta^2)$$

Fassungskonzepte - Füllfassung



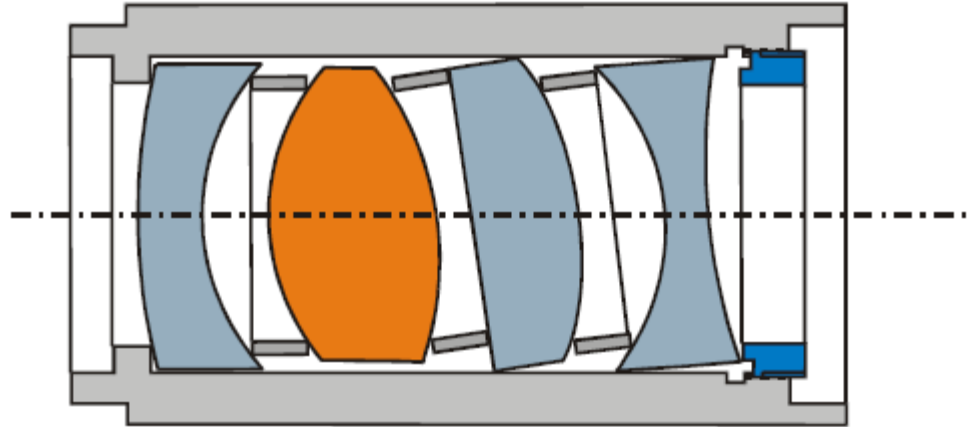
- Linsen mit Abstandsringen in Metallhülse eingefüllt
- Fehlerfortpflanzung der Kipp- und Keilfehler
- Zentrierung durch Vorschraubring
- Fassungslose und Spiel legen Zentrierung fest



Quelle: Gross „Handb. of Optical Systems“

System mit Optik / Mechanik-Toleranzen

Quelle: Gross „Handb. of Optical Systems“



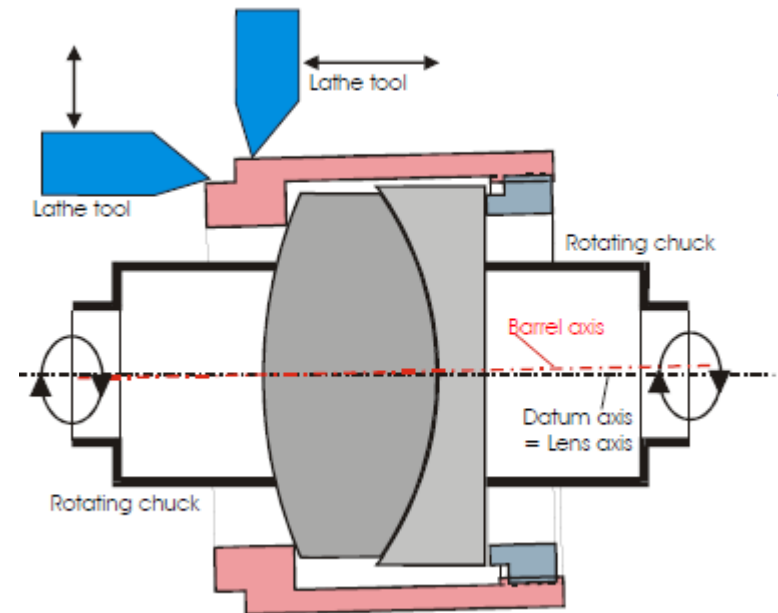
→ Einfluss auf Abbildungsqualität evtl. nicht tolerierbar:

→ Möglichkeiten:

- Verbesserte Fassungstechnik
- Aktive oder Passive Kompensatoren (Abstimmung)

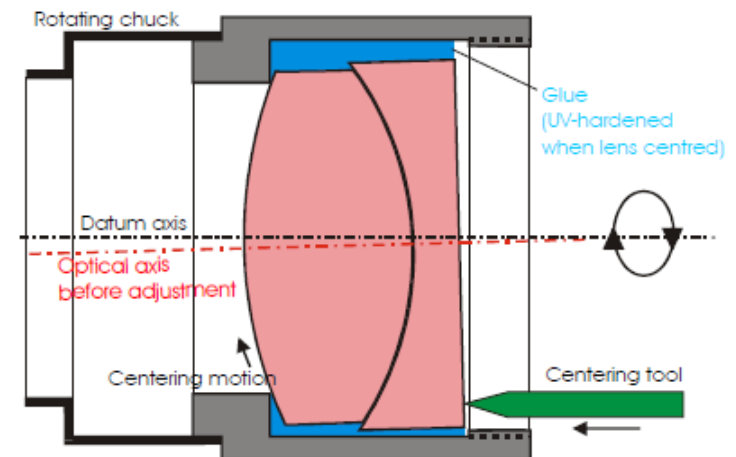
Richtdrehen:

- 1.) Optik wird (inkl. Tol.) fest in Mechanik-Fassung eingeschraubt / klebt
- 2.) Fassung wird am Außendurchmesser und an vorder/Rückseite unter aufgrund eines Meß-Signals (optisch) präzisions-gedreht



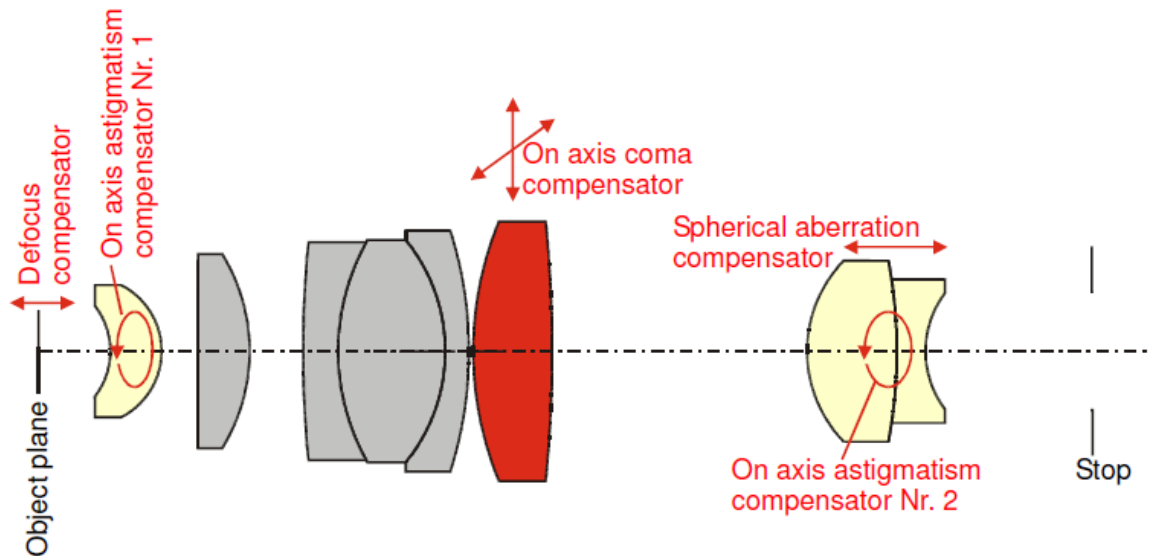
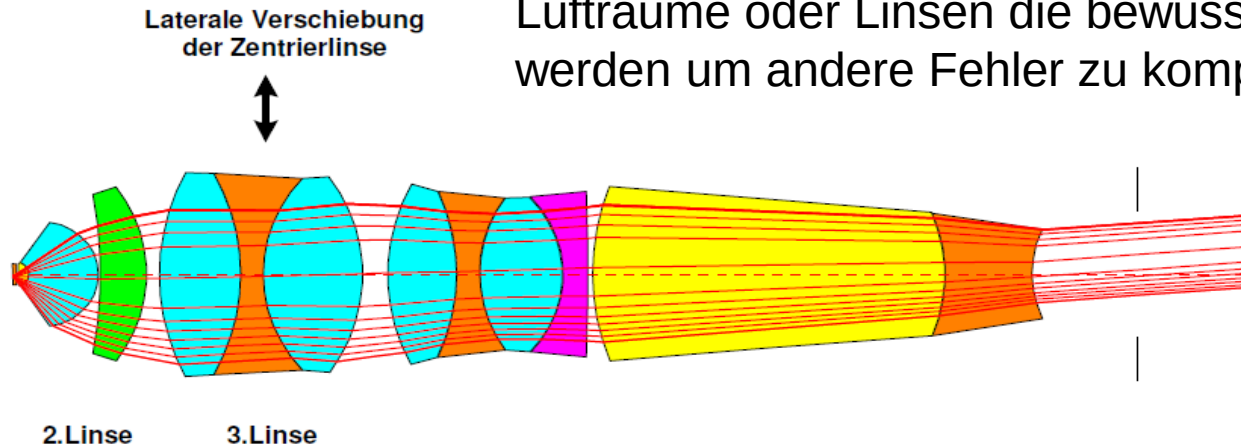
Richtkleben:

- 1.) Optik wird unter Beobachtung (Messung) eingeklebt
(Feinjustage während Härtingsphase Kleber)



Kompensatoren:

Lufträume oder Linsen die bewusst verändert/bewegt werden um andere Fehler zu kompensieren



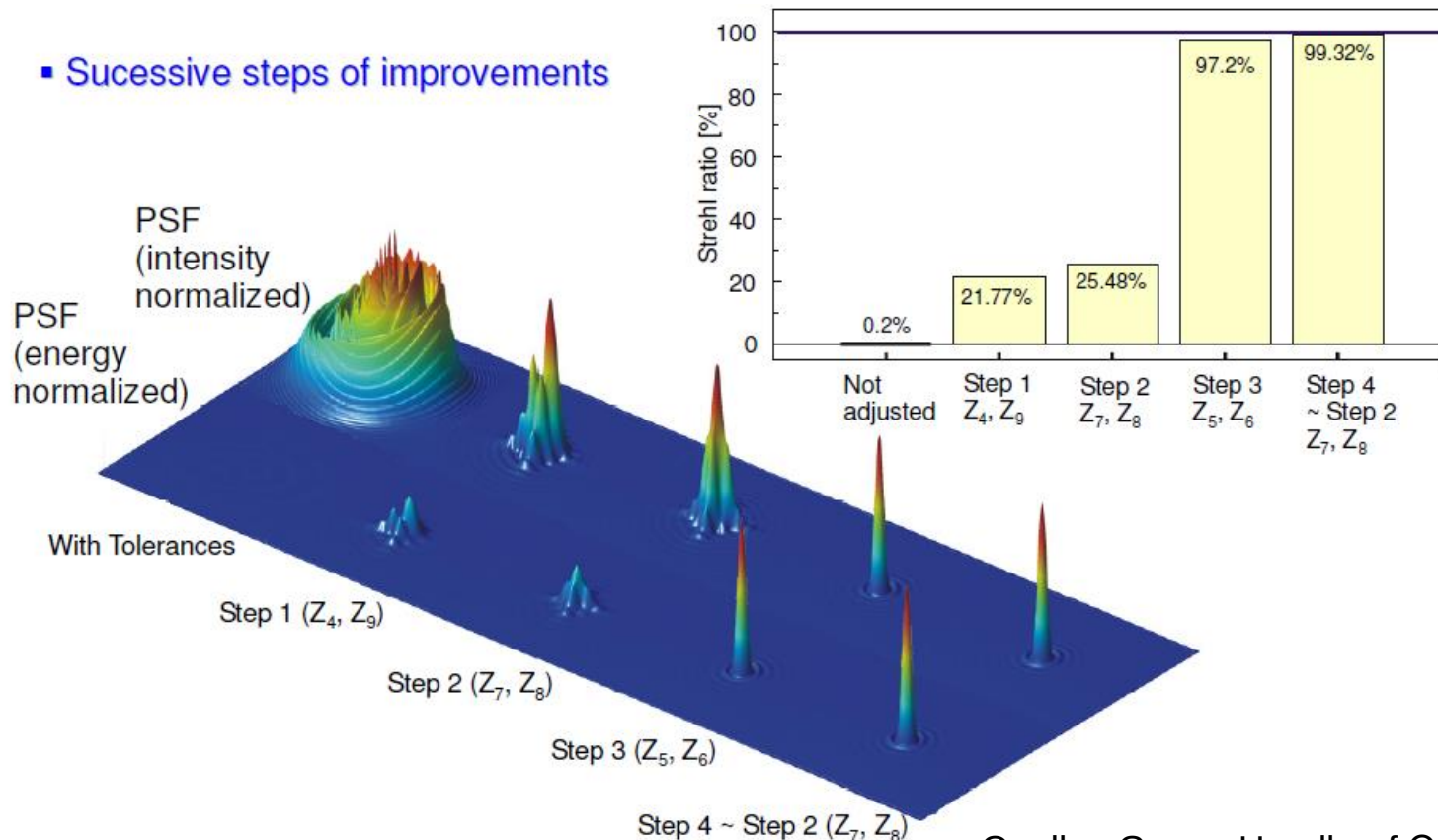
Quelle: Gross „Handb. of Optical Systems“

Justage des Systems:

Passiv: Komponenten werden vermessen und Kompensator entsprechend eingestellt (z.B. Lufträume)

Aktiv: System wird vermessen (z.B. Punktbild) und Fehler werden gegenkompensiert (meist iterativer Prozess)

▪ Successive steps of improvements



Quelle: Gross „Handb. of Optical Systems“

Zusammenhang Wellenfrontfehler und Oberflächenfehler

- Faktor $(n-1)$ bei Linsen
- Faktor 2 bei Spiegeln

Je nach Ortsfrequenz der Oberflächenfehler werden beeinflusst:

- Fokusslage, Abbildungsqualität, Streulicht, Reflektivität

Wie wirken sich Lagetoleranzen von Linsen/Spiegeln aus Was sind Nodal-Punkte

- Dezentrierung bei Linsen kritischer als Kipp
- Spiegel sind Kipp-Sensitiv
- Axiale Linsen-Lage übersetzt sich mit β^2 in Fokusfehler
- Kipp um Nodal-Punkt hält Bildlage konstant

Was sind typische Fassungstechniken / Justagemethoden

- Füllfassung, Vorschraub-Ringe
- Richt-Drehen, Kleben
- Kompensator-Elemente