

10. Prüfung von optischen Systemen

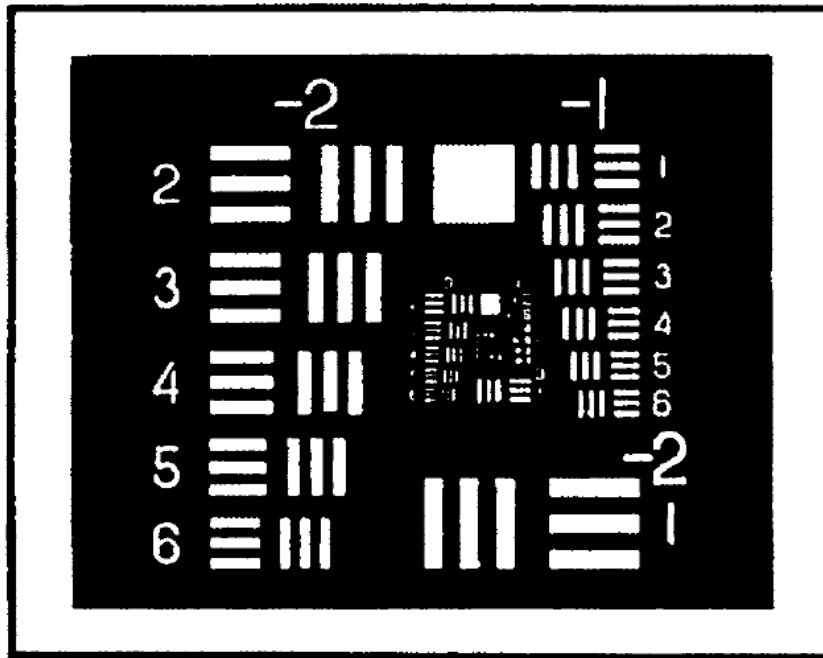
10.1 Test-Targets, MTF

10.2 Interferometrie - Allgemein

10.3 Interferometer-Typen

10.4 Bestimmung der Wellenfront

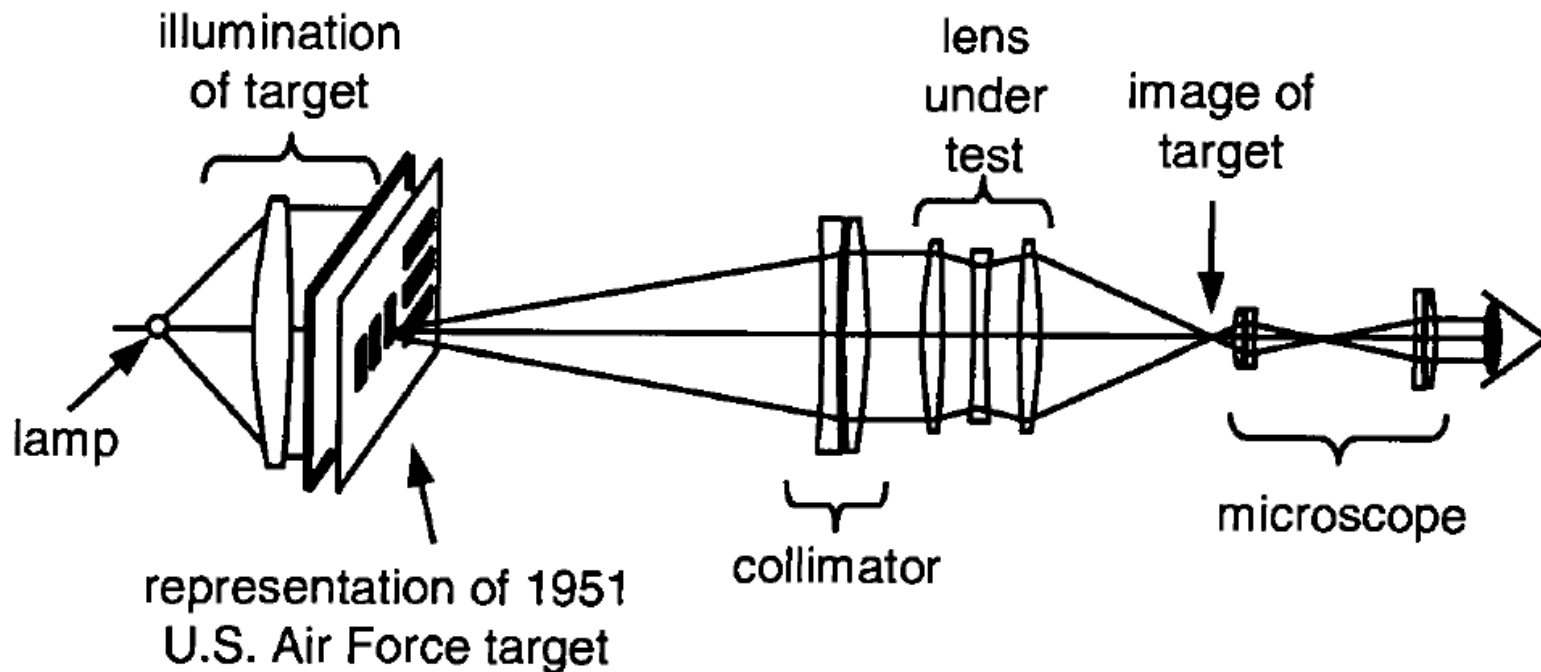
Einfachste Variante: Abbildung einer Test-Struktur



The Standard 1951
U.S. Air Force Target

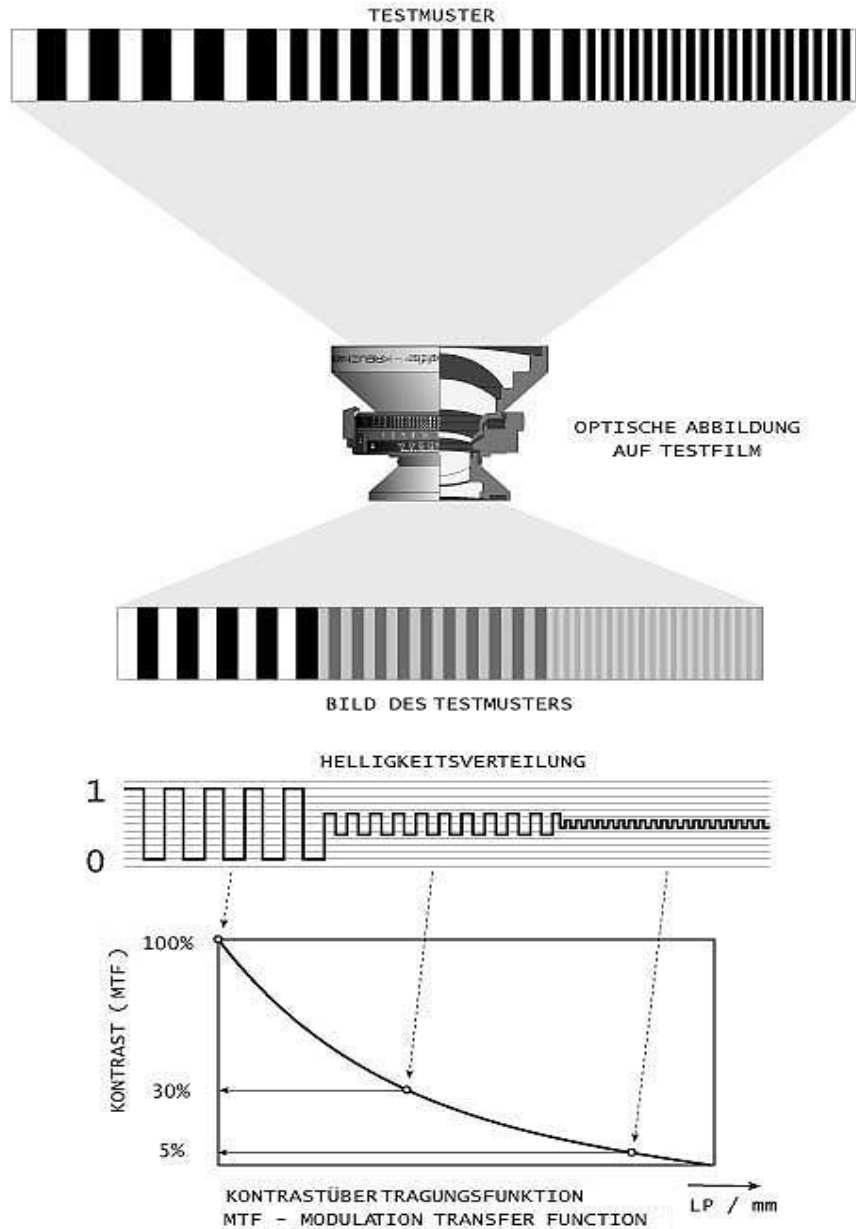
Quelle: Fischer „Optical System Design“

- Test-Aufbau – Varianten:**
- System im **realen Betriebsmodus** (Sensor)
 - **Test-Aufbau für das Optik-System allein** (s.u.)
 - ➔ muss an Optik angepasst sein (Winkel, etc.)



Quelle: Fischer „Optical System Design“

Quantitative Prüfung (z.B. MTF)



Direkte Messung der
MTF-Funktion

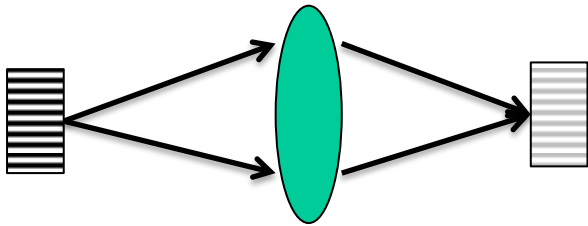
Quelle: Lenhardt, Karl,
Die Bildqualität von Objektiven für die
digitale Fotografie.

MTF:

Objekt = Gitter – d.h. Anregung des Systems mit **bestimmter Ortsfrequenz**

Messung des Bildkontrastes entspricht der Übertragungsfunktion bei dieser Ortsfrequenz.

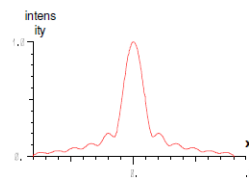
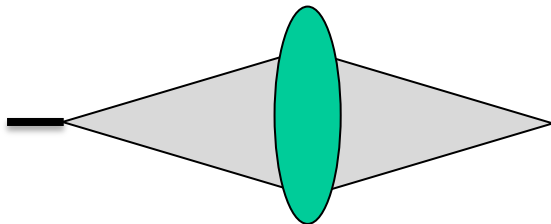
Variation der Ortsfrequenz → MTF-Verlauf



LSF = Line Spread Function (Linien-Spreiz-Funktion)

Objekt = sehr schmale Linie – entspricht eindimensionaler Delta-Funktion

→ Anregung des Systems bei **allen Ortsfrequenzen** gleichzeitig



Line spread function

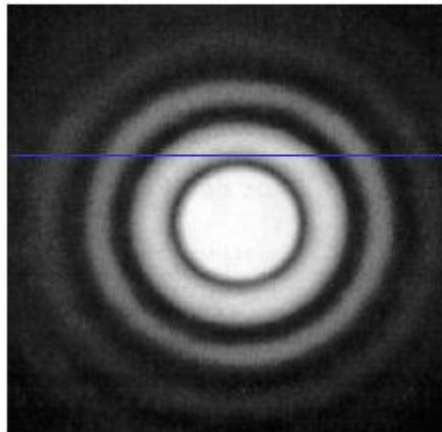
LSF = Line Spread Function (Linien-Spreiz-Funktion)

Objekt = sehr schmale Linie – entspricht eindimensionaler Delta-Funktion

PSF = Point Spread Function (Punkt- Spreiz – Funktion)

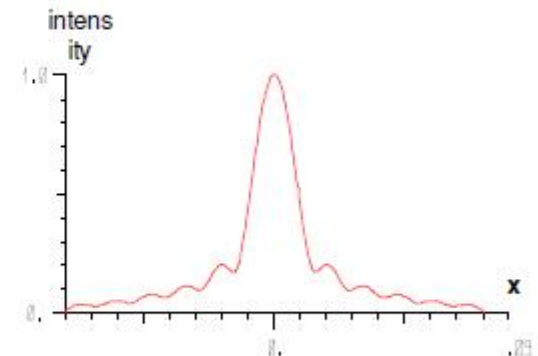
Objekt = Punkt – entspricht zweidimensionaler Delta-Funktion

PSF



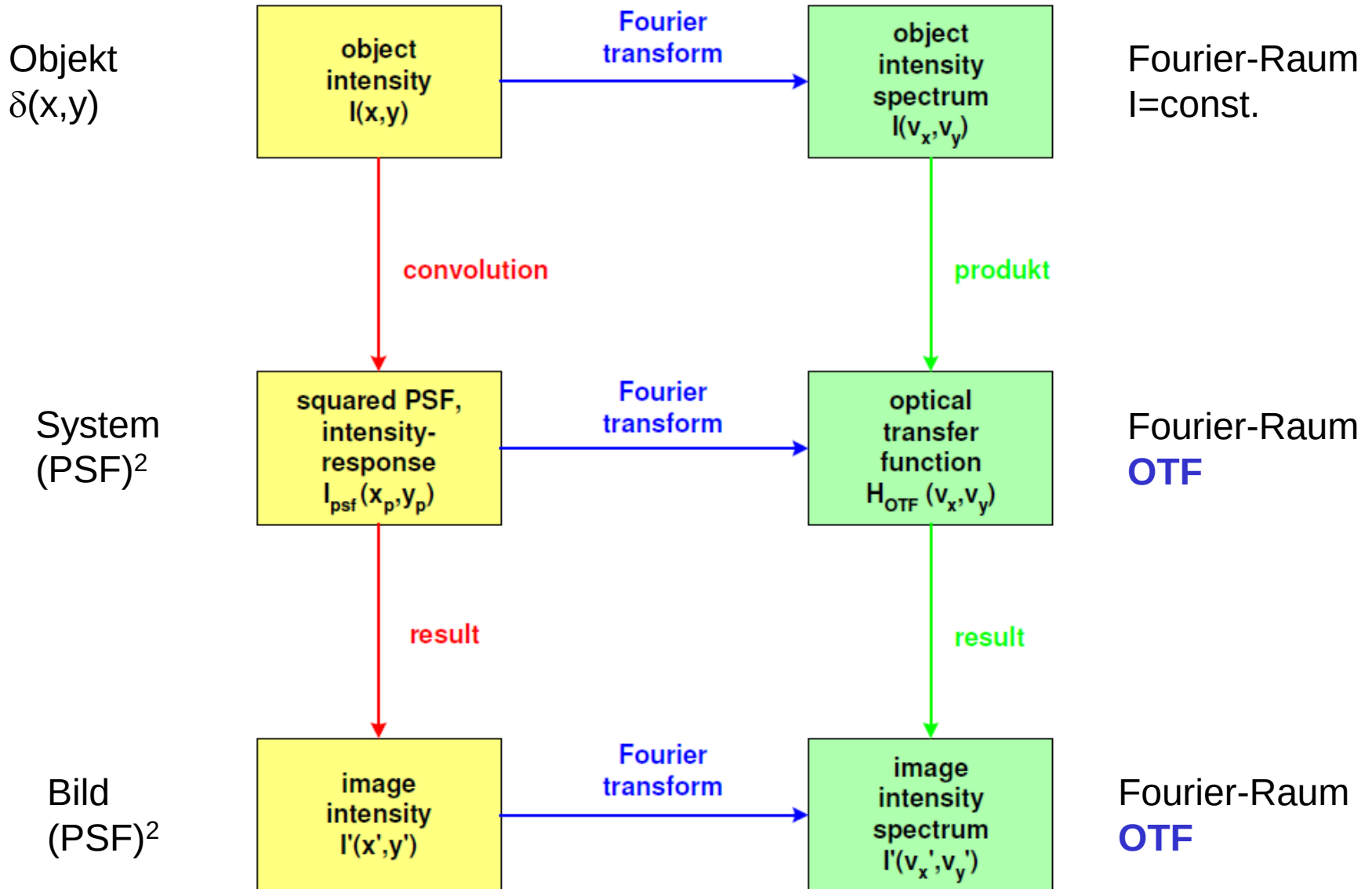
Integration

$$I_{LSF}(x) = \int I_{PSF}(x, y) dy$$

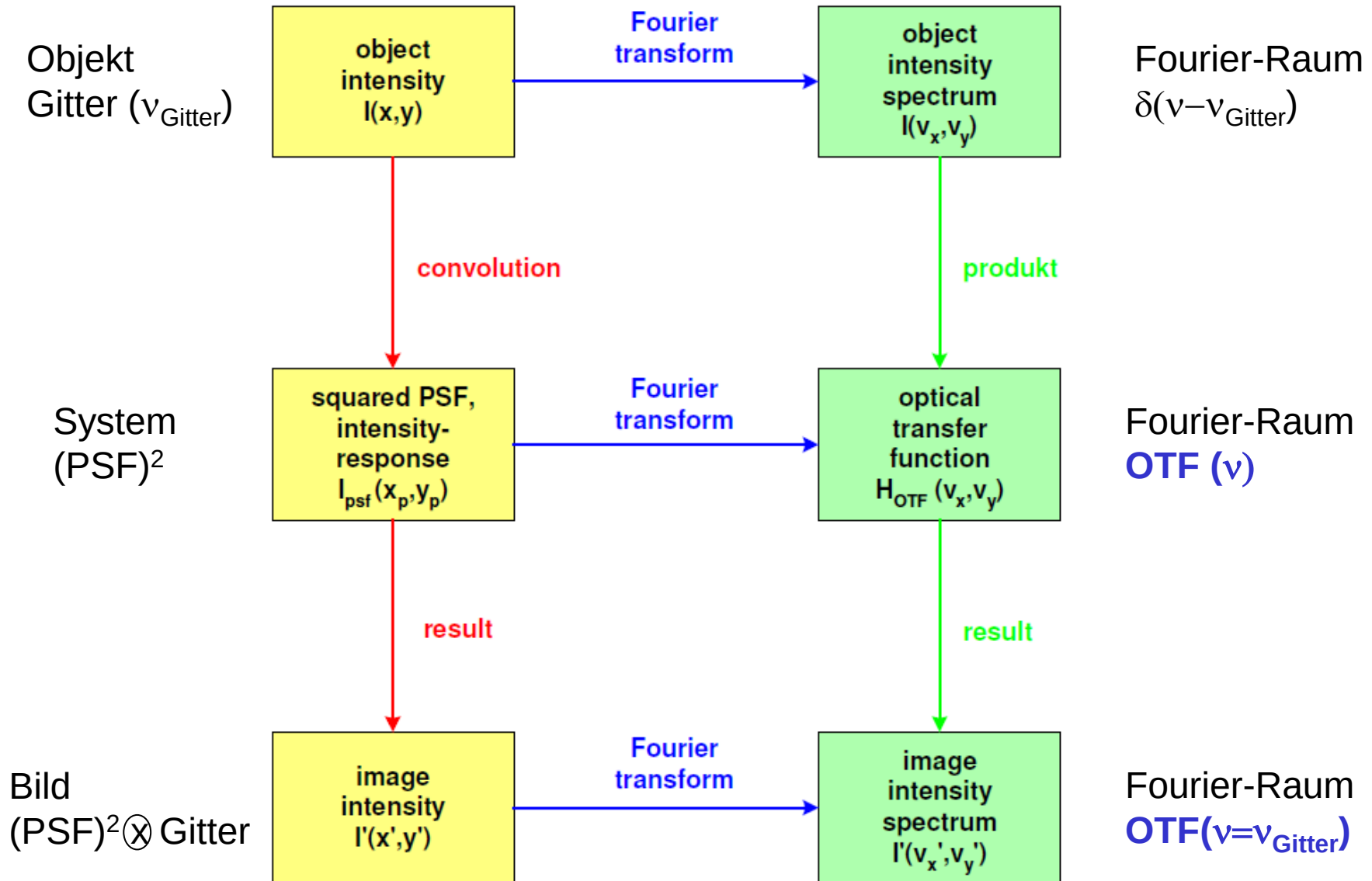


Line spread function

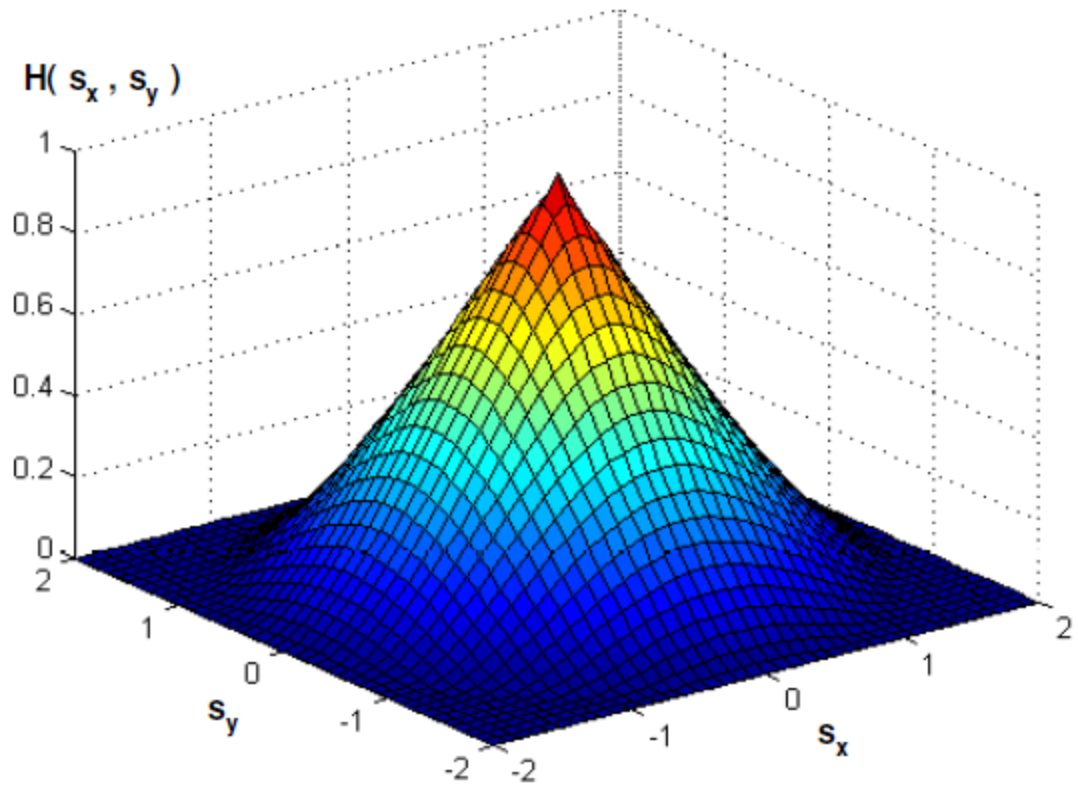
Zusammenhänge Inkohärente Abbildung



Zusammenhänge Inkohärente Abbildung -MTF



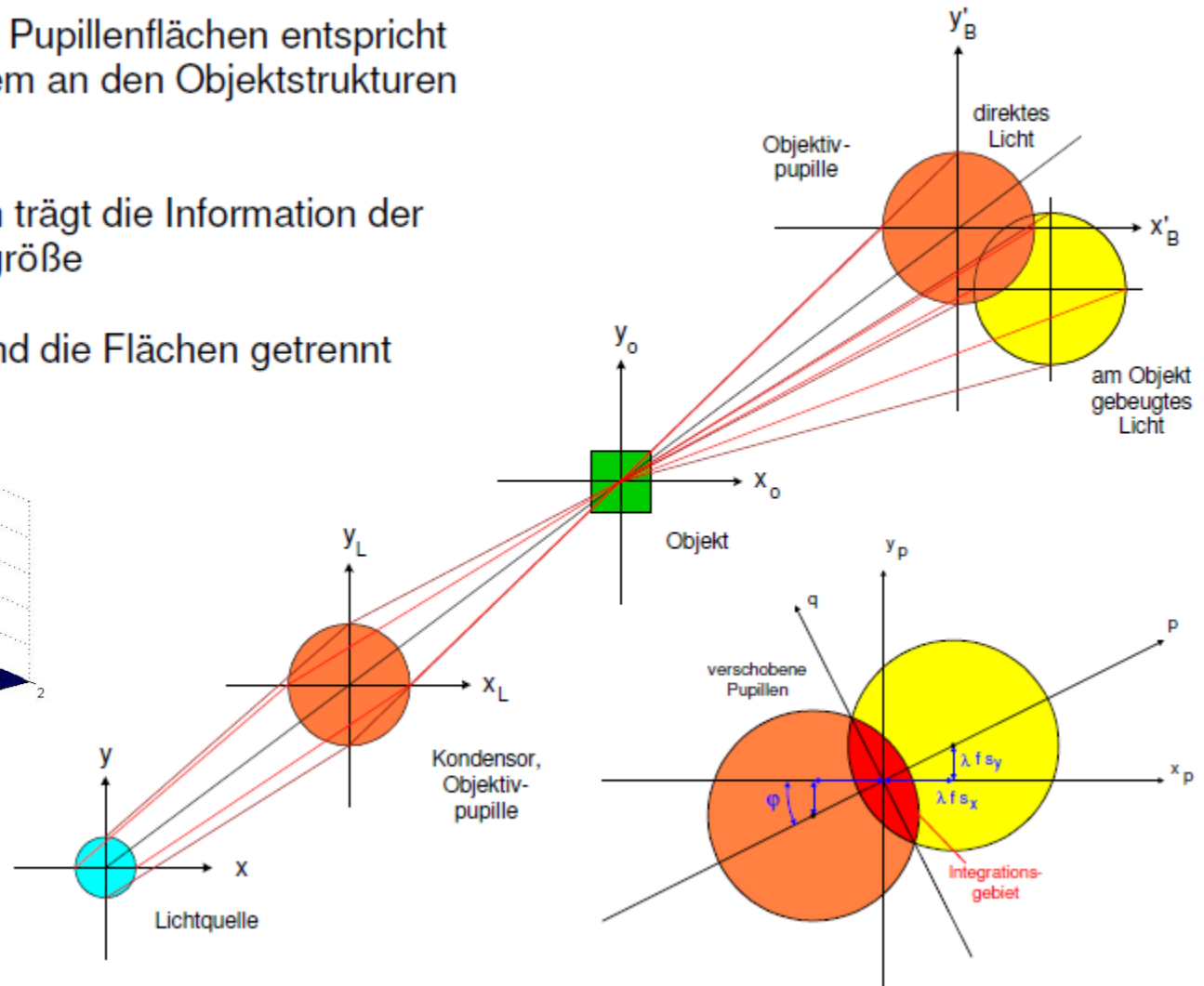
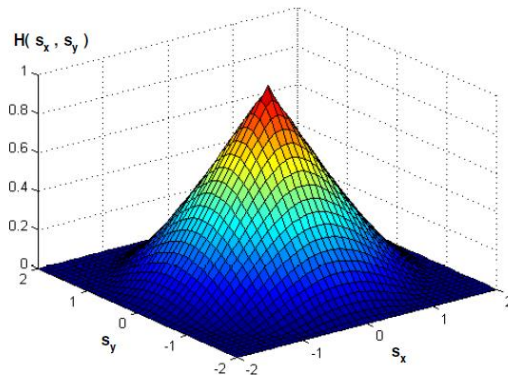
- Zweidimensionale Abhängigkeit der Übertragungsfunktion von den beiden Ortsfrequenzkomponenten s_x und s_y
- Typische Zuckerhut-Figur



OTF – Optische Transferfunktion

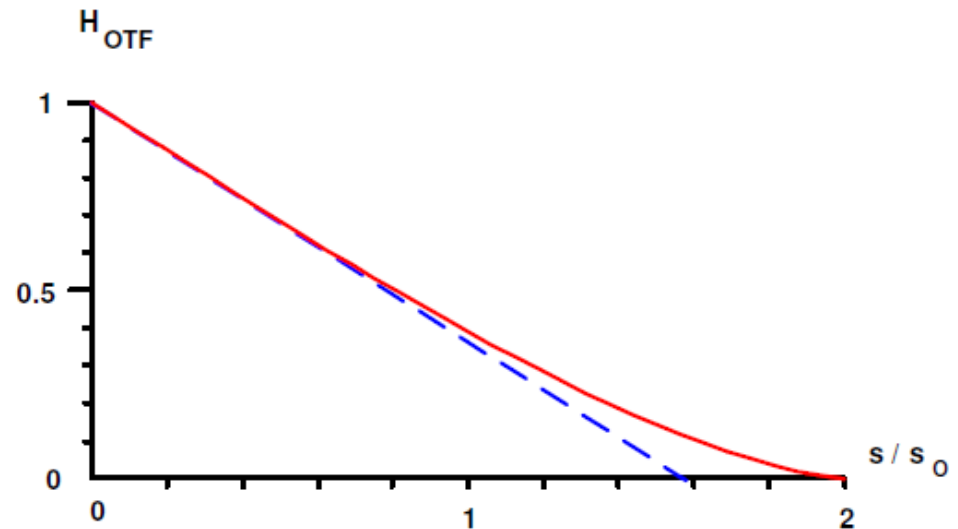
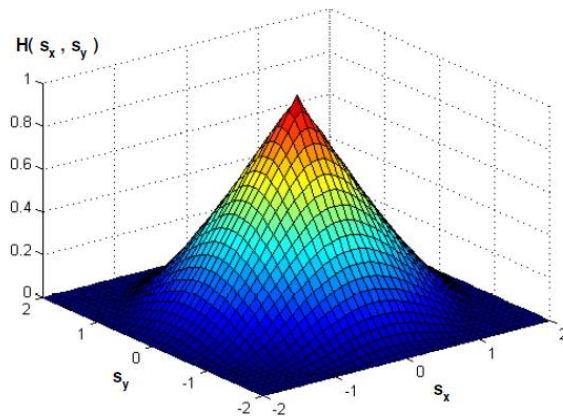


- Anschaulich : Versatz der Pupillenflächen entspricht dem direkten Licht und dem an den Objektstrukturen gebeugten Licht
- Der Überlapp der Flächen trägt die Information der entsprechenden Strukturgröße
- Bei der Grenzfrequenz sind die Flächen getrennt



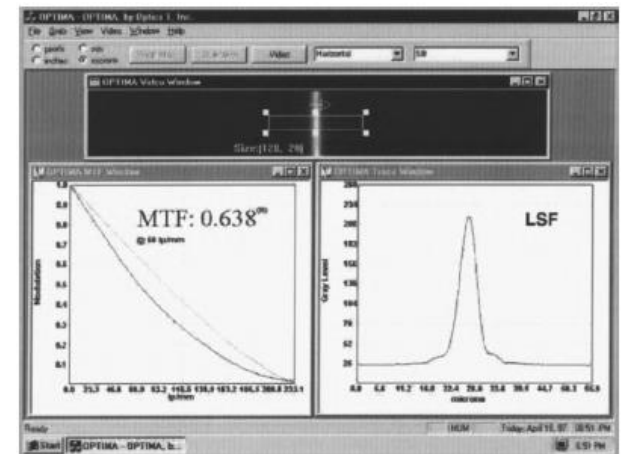
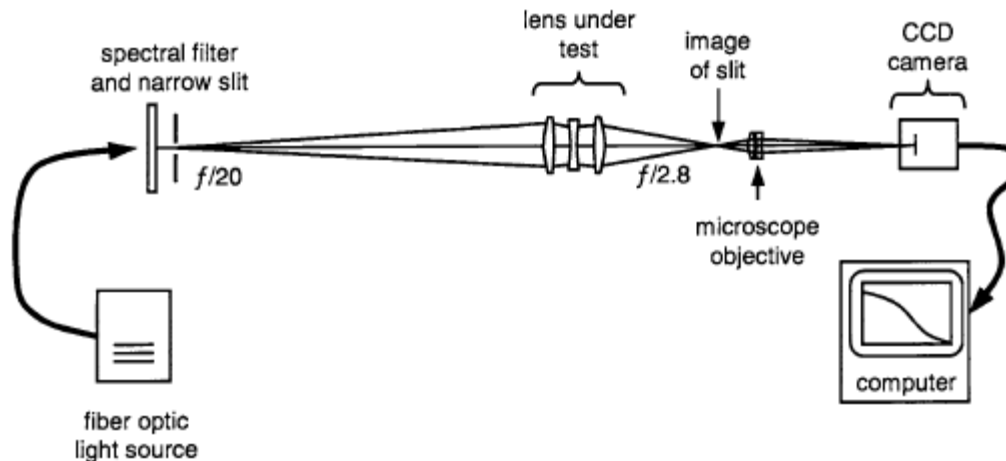
Die OTF ist allgemein eine komplexe Funktion und zerlegbar in Betrag (Modulation Transfer Function, MTF) und Phase (Phase Transfer Function, PTF)

$$H_{OTF}(s_x, s_y) = H_{MTF}(s_x, s_y) e^{iH_{PTF}(s_x, s_y)}$$

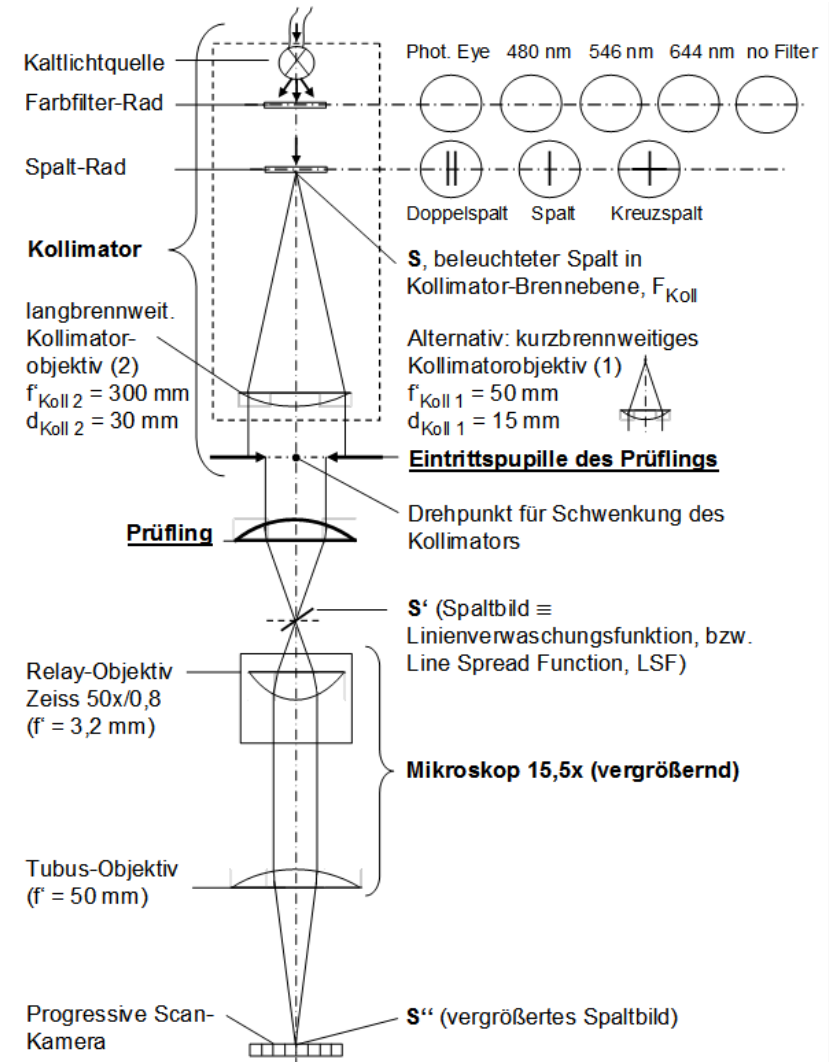


Wegen der Zusammenhänge zwischen LSF und MTF kann die MTF auch aus der Messung der LSF und Fourier-Transformation erzeugt werden. ($MTF = |FT(LSF)|$)

➔ Daher basieren MTF-Messgeräte meist auf Messung der LSF (Objekt = schmaler Spalt oder Kreuz (S/T))



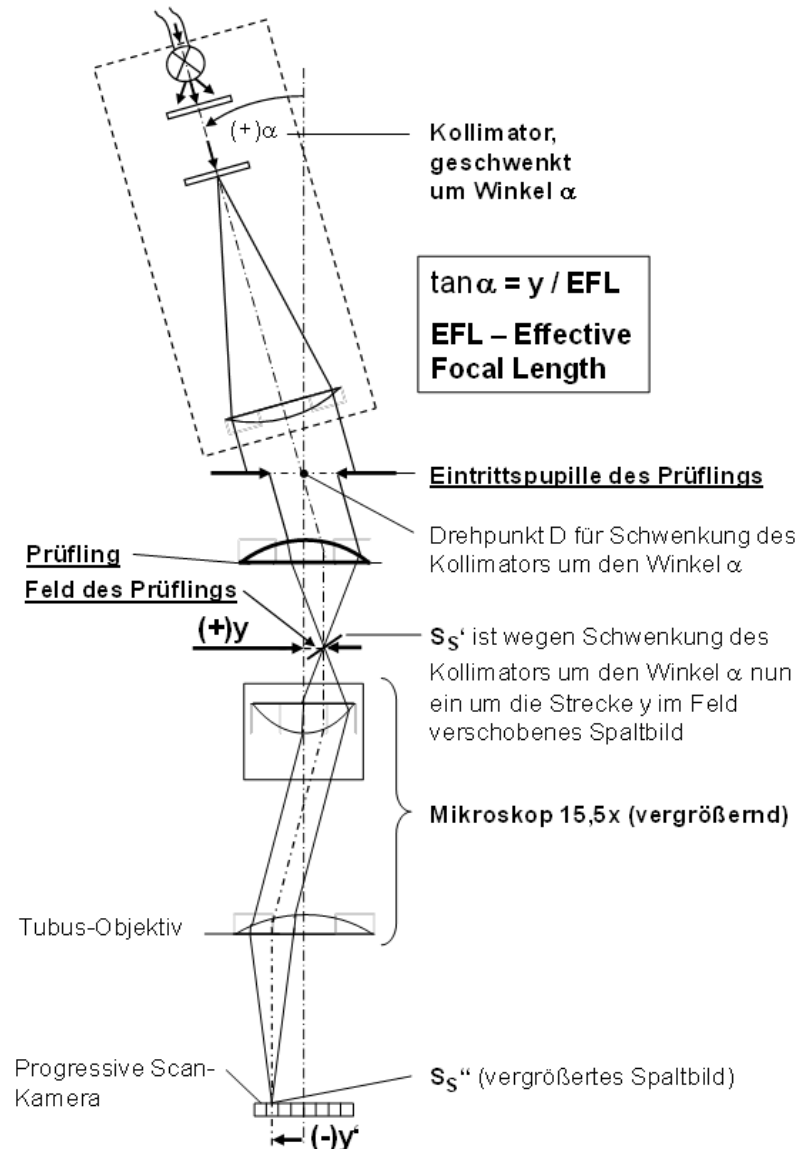
Beispiel MTF-Messgerät am ITO



Quelle: ITO-Praktikums-Anleitung (Steinbeisser)

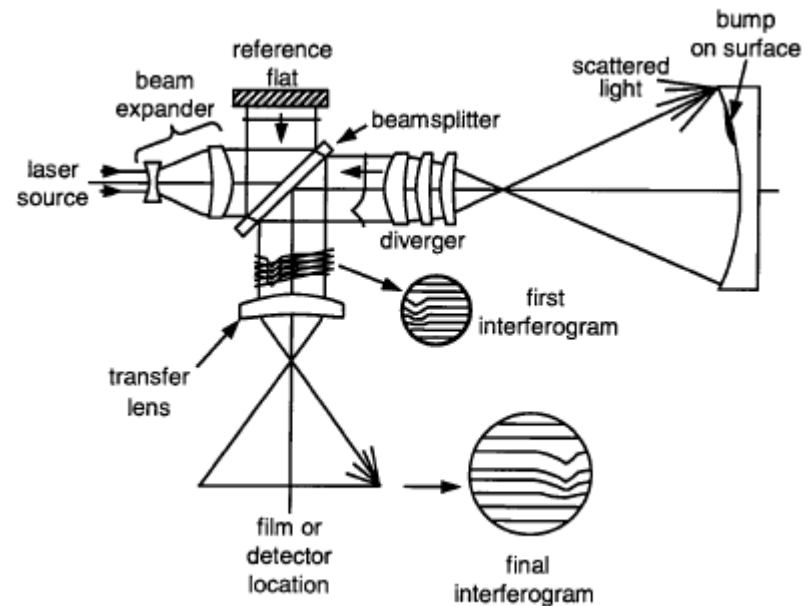
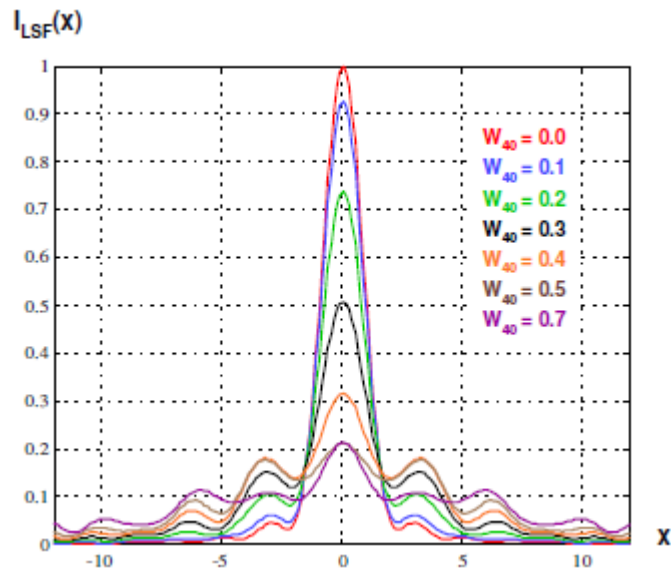
MTF-Messung im Feld:

Einfallslicht muss um Feldwinkel gekippt werden.



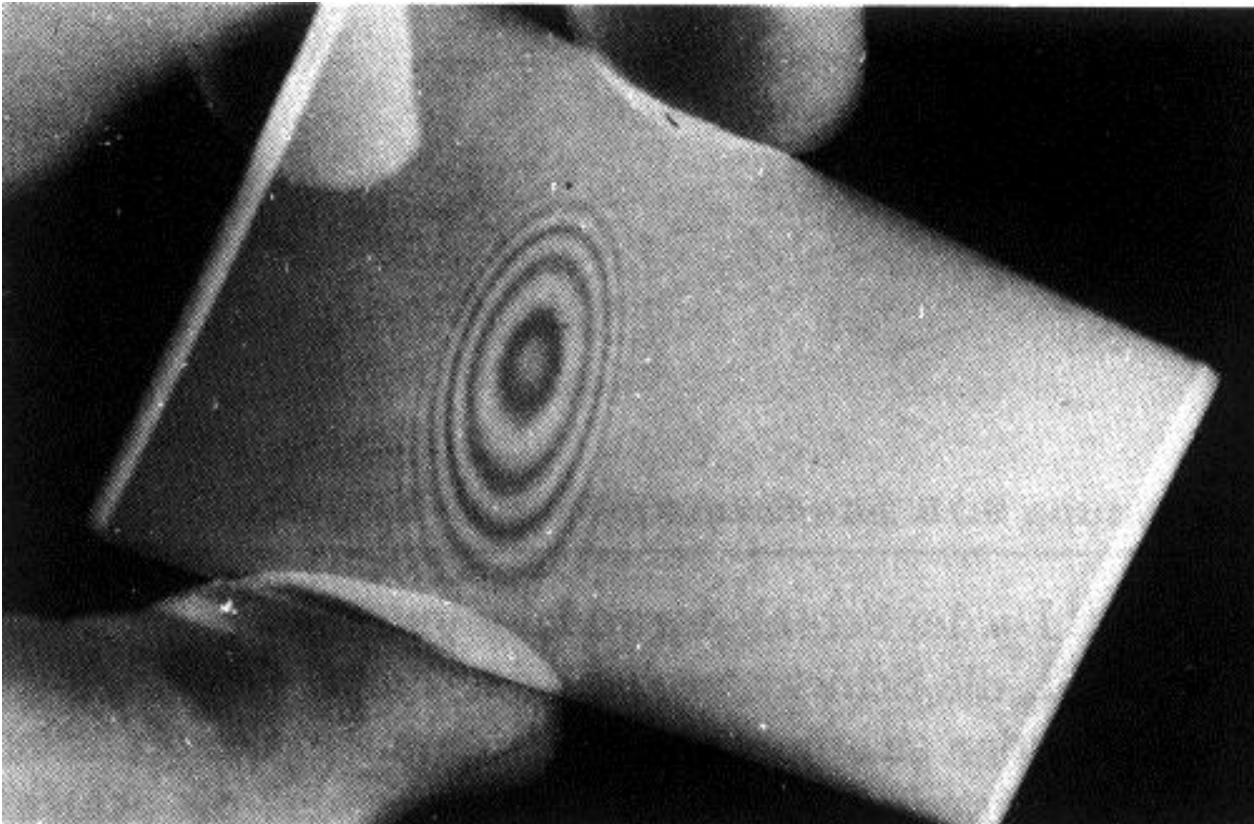
MTF-Messung oder LSF/PSF-Messung erlauben nur **indirekte Rückschlüsse** über konkrete Bildfehler / Wellenfront-Fehler

LSF bei Sphärische Aberration

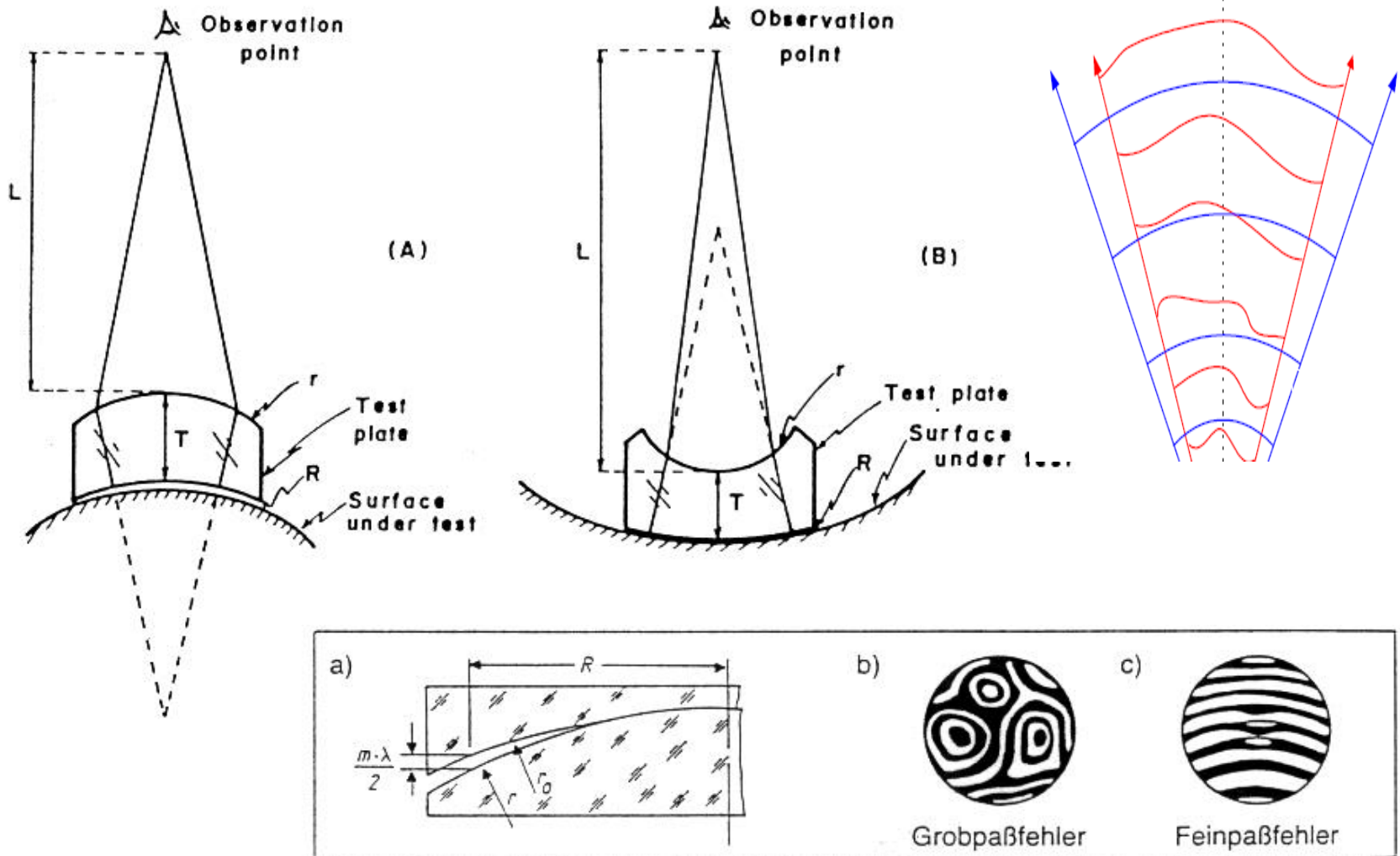


Interferometer liefert **direkte Aussage** zur Wellenfront

Newton'sche Ringe



Passe-Prüfung mit dem Probeglas



Beispiele von Interferogrammen

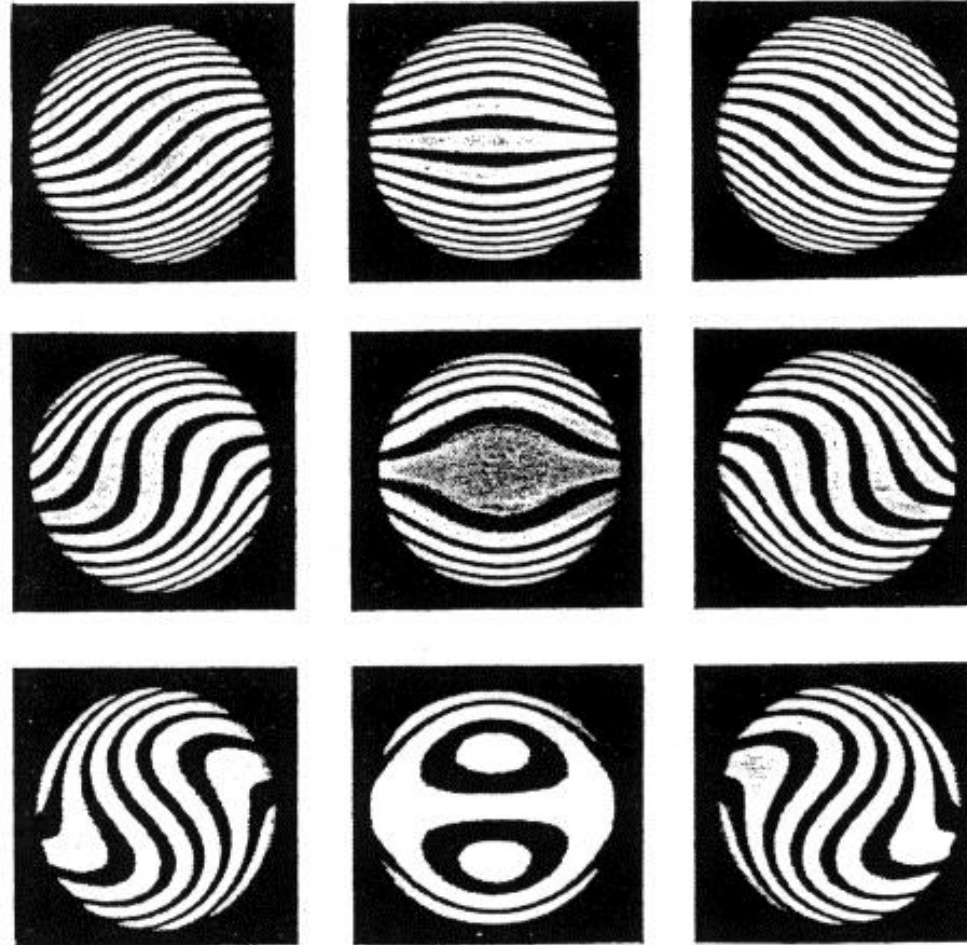


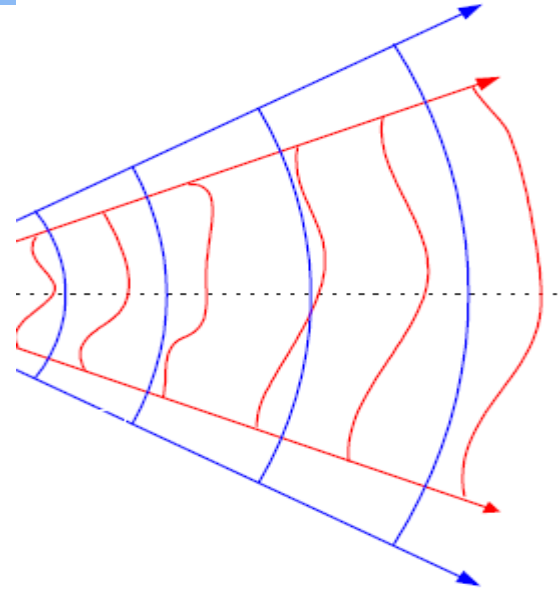
Figure 2.23. Interferograms for a lens with coma at the paraxial focus.

Überlagerung von Test und Referenz-Welle:

$$E_1(x, y) = E_1 \cdot e^{iR(x, y) + i\alpha}$$

$$E_2(x, y) = E_2 \cdot e^{iT(x, y)}$$

$$I_{\text{Summe}} = (E_1 + E_2) \cdot (E_1 + E_2)^*$$



Intensität:

$$\begin{aligned} I_{\text{Summe}} &\propto |E_{\text{Summe}}|^2 \\ &= E_1^2 + E_2^2 + \underbrace{2 \cdot E_1 E_2 \cdot \cos(\phi(x, y) + \alpha)}_{\text{Interferenz-Term}} \end{aligned}$$

$$\phi(x, y) = R(x, y) - T(x, y)$$

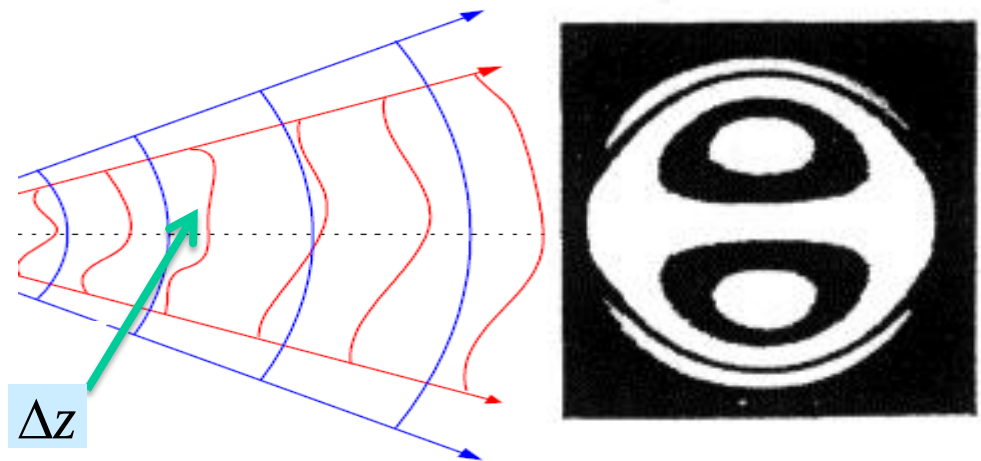
$$I(x, y) \propto a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos(\phi(x, y) + \alpha)$$

Was ist ein Interferometer ?

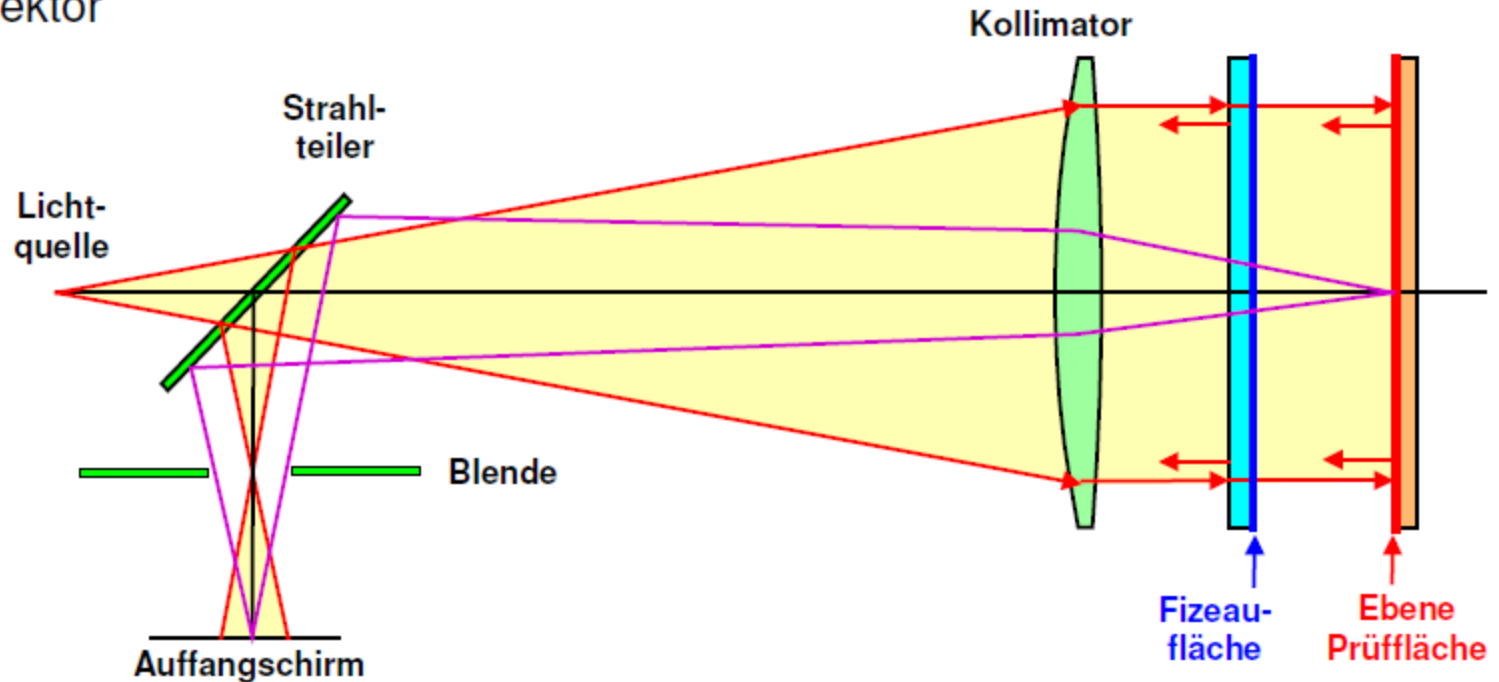
Ein Meßgerät basierend auf der *Interferenz* des Lichtes zur
Messung von optischen *Weglängenunterschieden*.

Maßeinheit ist die Wellenlänge
(typisch 632,8 nm für roten Helium-Neon-Laser).

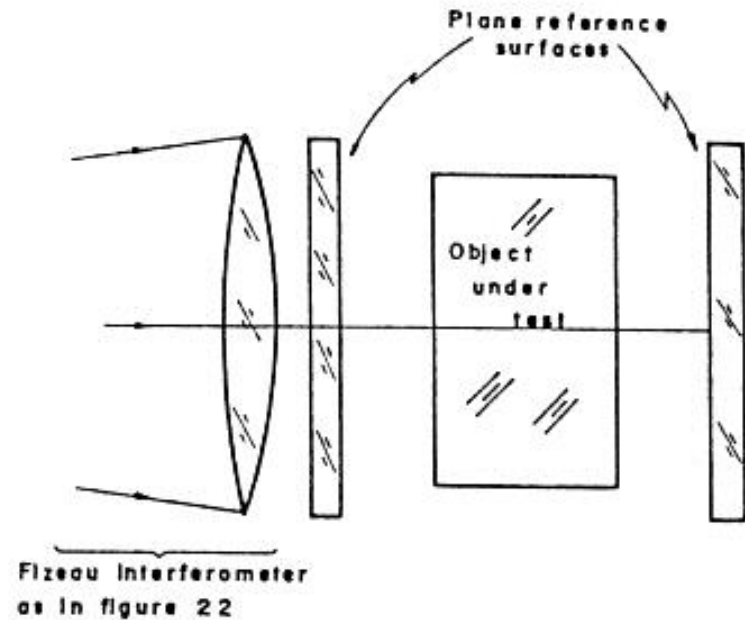
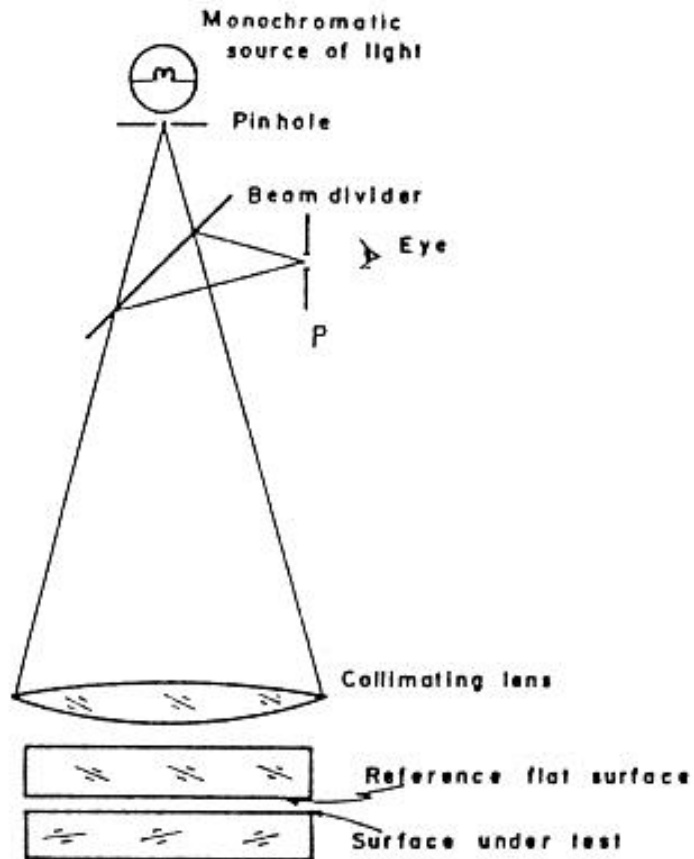
$$\phi = k \cdot \Delta z = 2\pi \cdot \frac{\Delta z}{\lambda}$$



- Fizeaufläche im System als Referenz, möglichst dicht an Prüffläche
- Weitgehend gleicher Strahlengang (common path) : insensitiv gegen Störungen
- Die Prüffläche wird auf den Detektor abgebildet



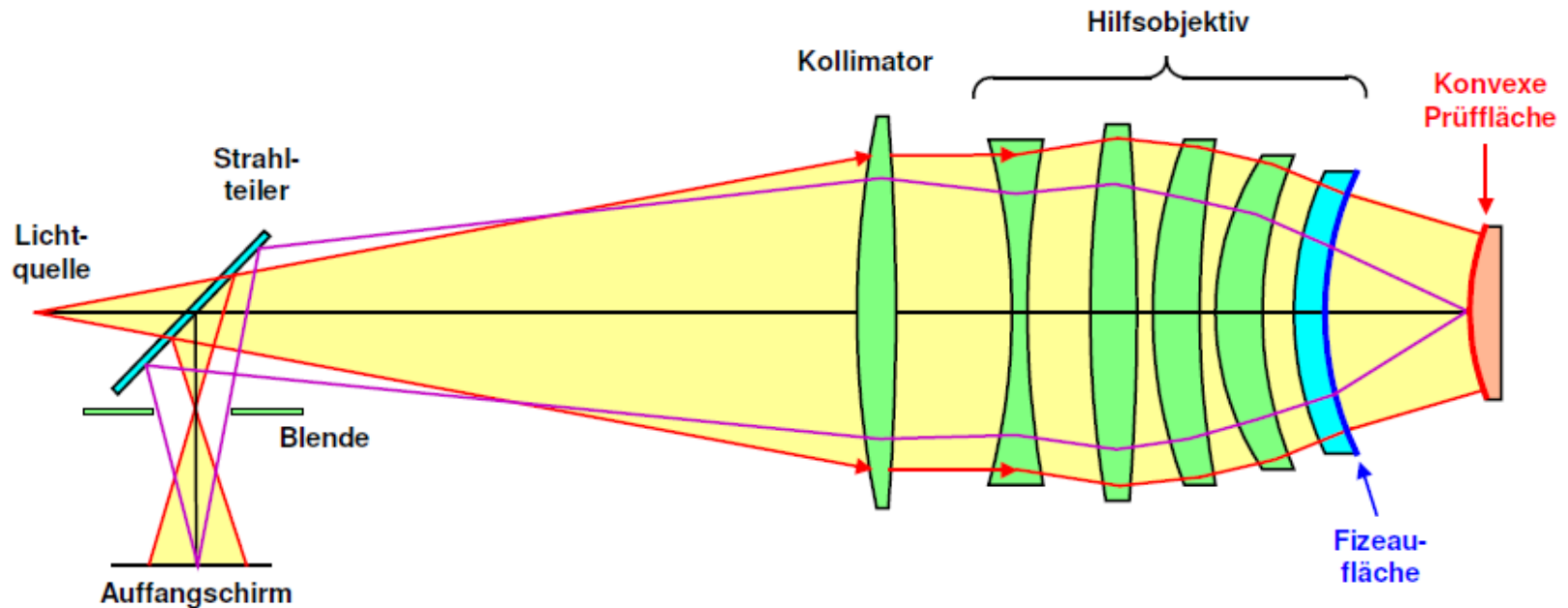
Fizeau-Interferometer zur Prüfung von Planoptik



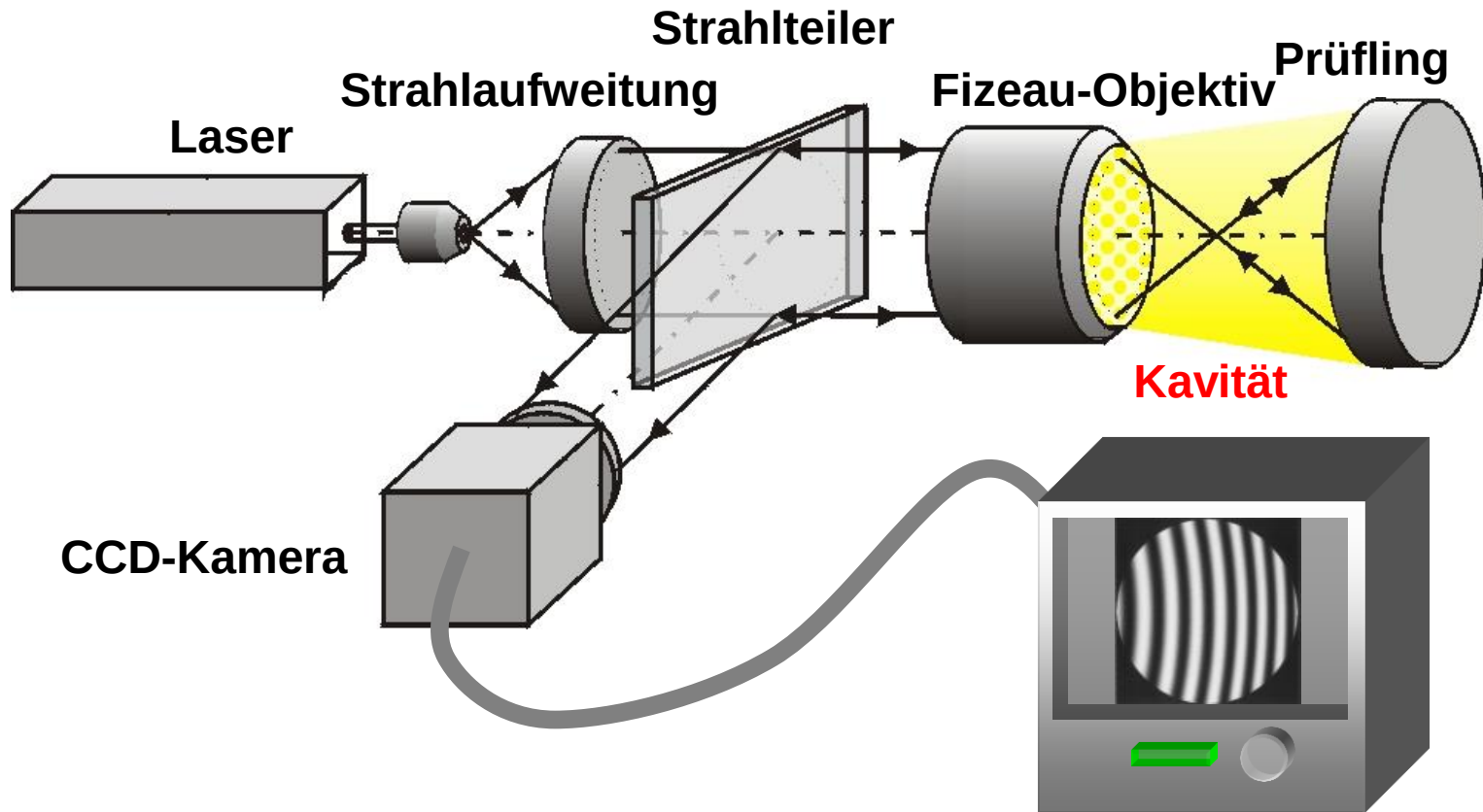
Fizeau-Interferometer für sphärische Flächen



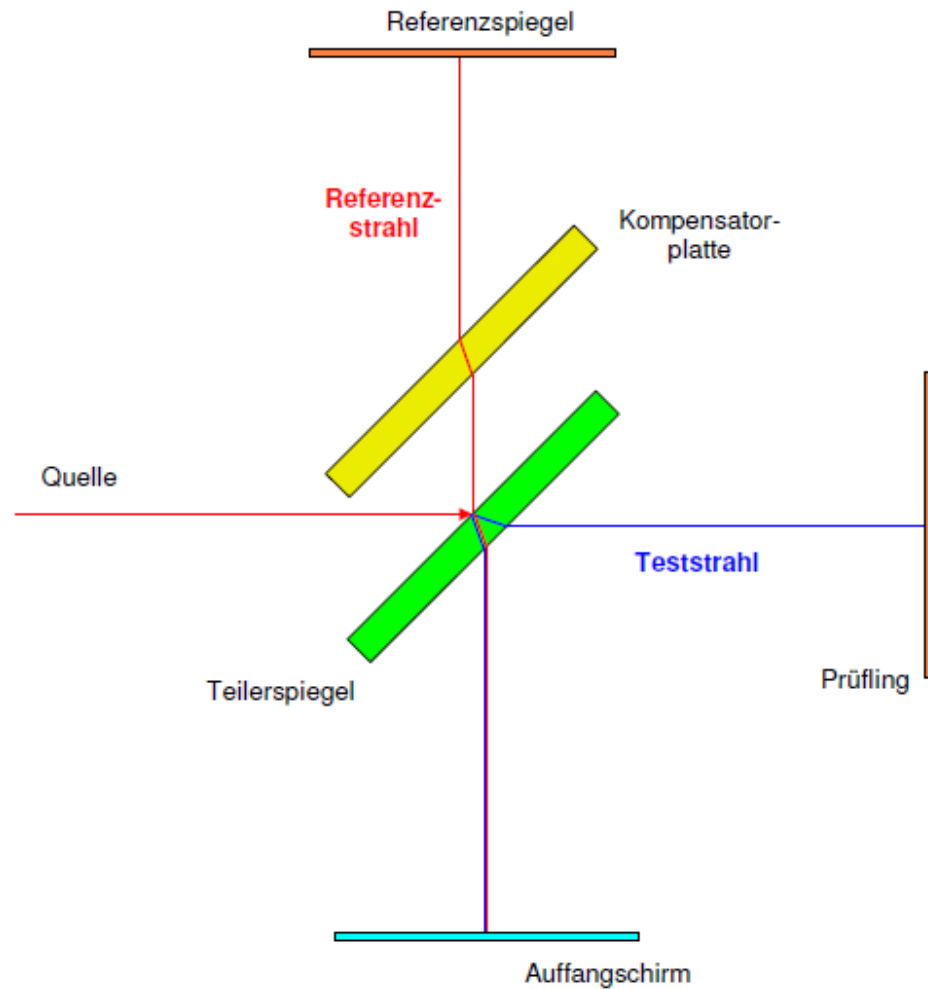
- Nicht-ebene Prüffläche : aplanatisches Hilfsobjektiv mit Fizeaufläche
- Vorteil Common Path : Aberrationen des Objektivs unkritisch



Kavität im Fizeau-Interferometer



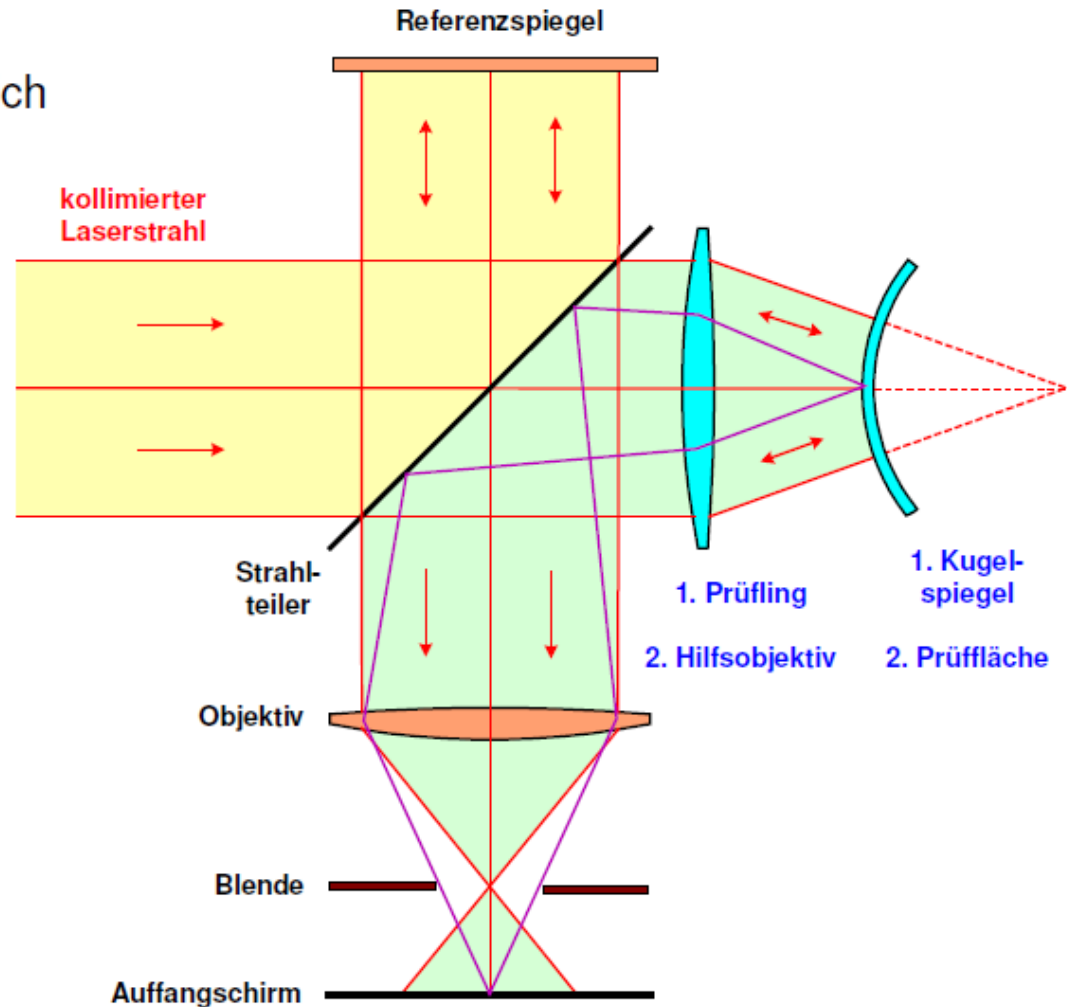
- Getrennter Meß- und Referenzarm
- Arme zentriert :
Streifen gleicher Neigung
- Kippung im Referenzarm :
Streifen gleicher Dicke
- Empfindlicher Aufbau :
getrennte Arme
- Entspricht weitgehend dem
Twyman-Aufbau



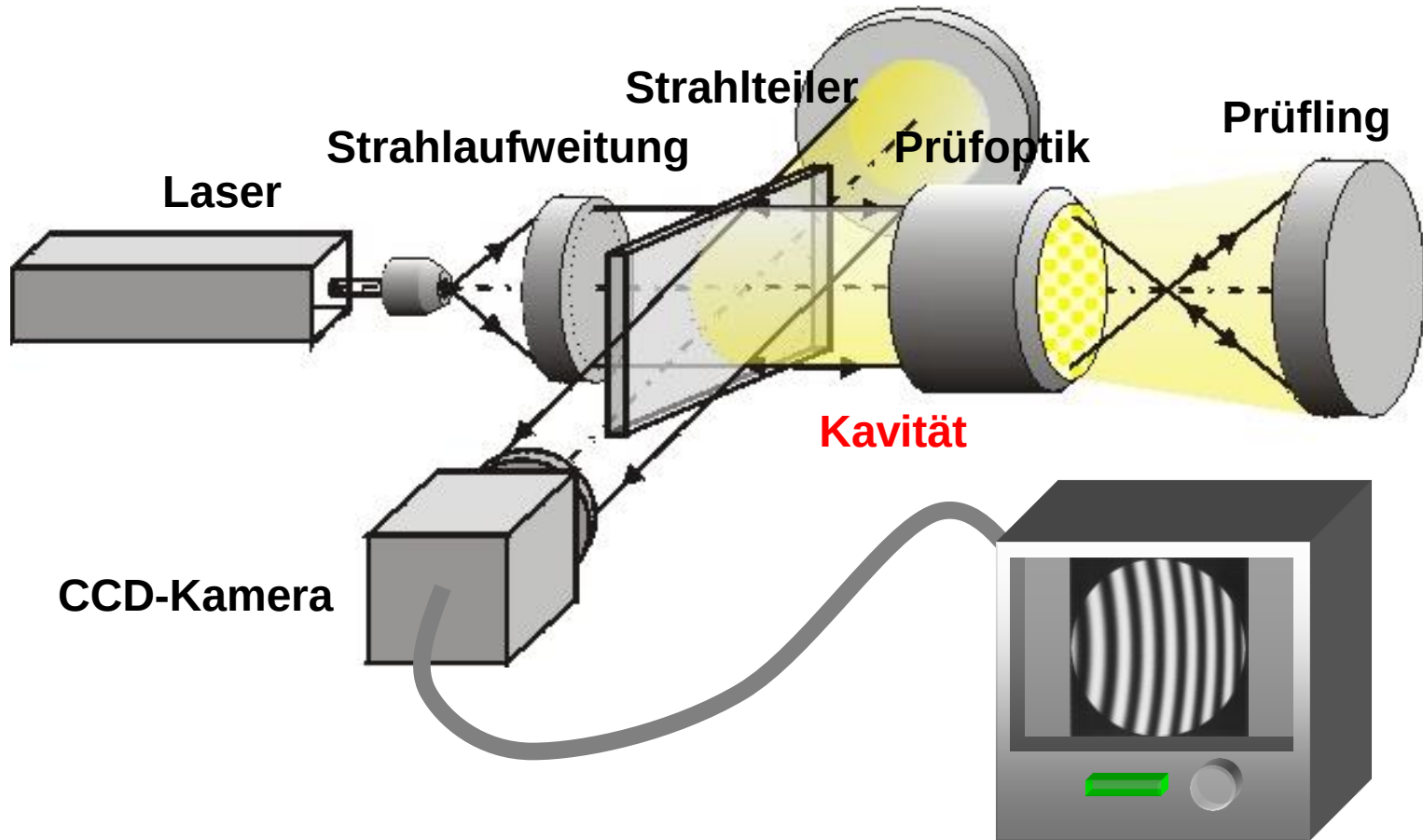
Twyman-Green-Interferometer



- Kein Common Path : empfindlich
- Prüfung in Transmission :
Referenz Kugelspiegel
- Prüfung in Reflexion :
Hilfsobjektiv

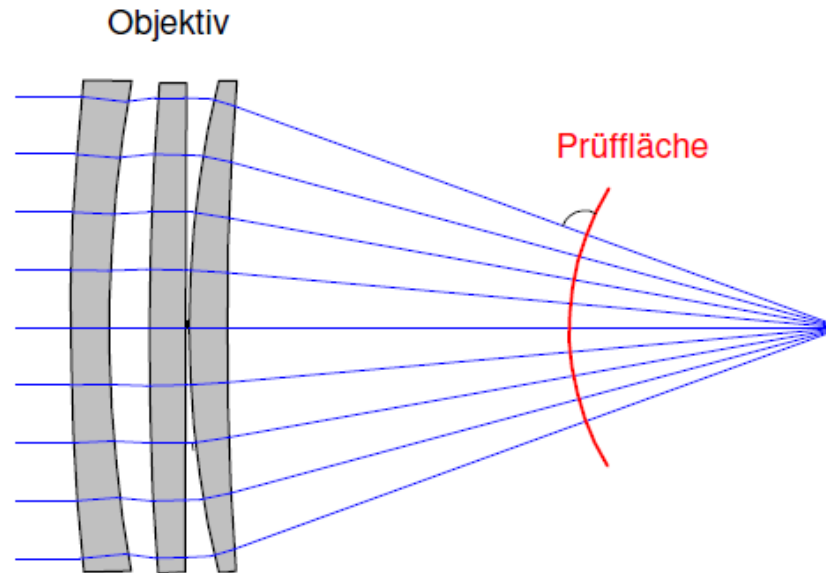


Kavität im Twyman-Green-Interferometer

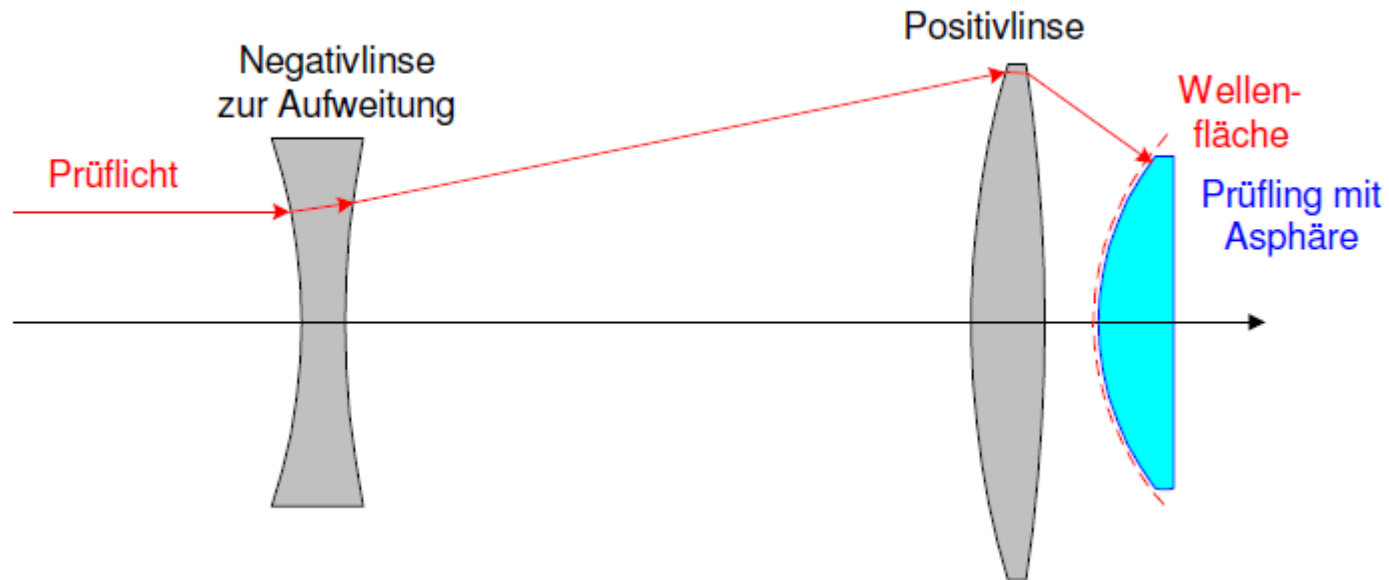


Ziel: Erzeugung einer möglichst exakten sphärischen Referenz-Wellefront

- ➔ minimale sphärische Aberration
- ➔ keine direkten Reflexe von den Linsen (Einfallswinkel = 0°)
- ➔ für konvexe Oberflächen große Durchmesser der Optik



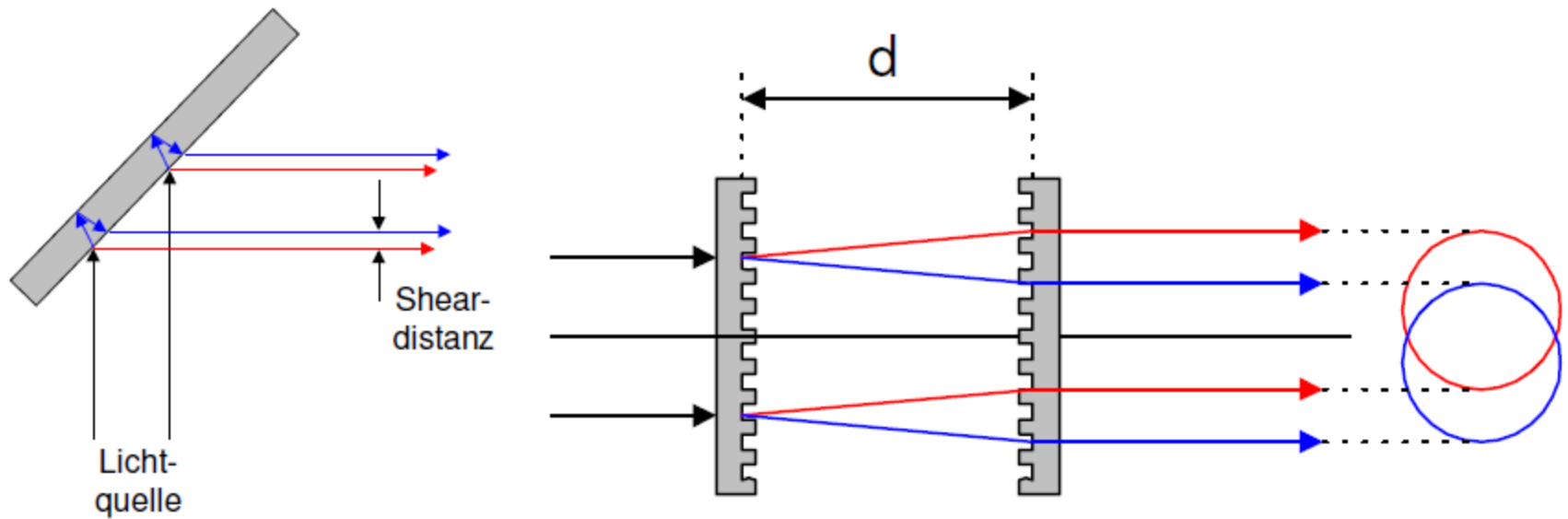
- K-System zur Asphärisierung der Wellenfläche (Autokollimation)
- Das System stellt eine der Asphäre möglichst gut angenäherte Wellenfront her



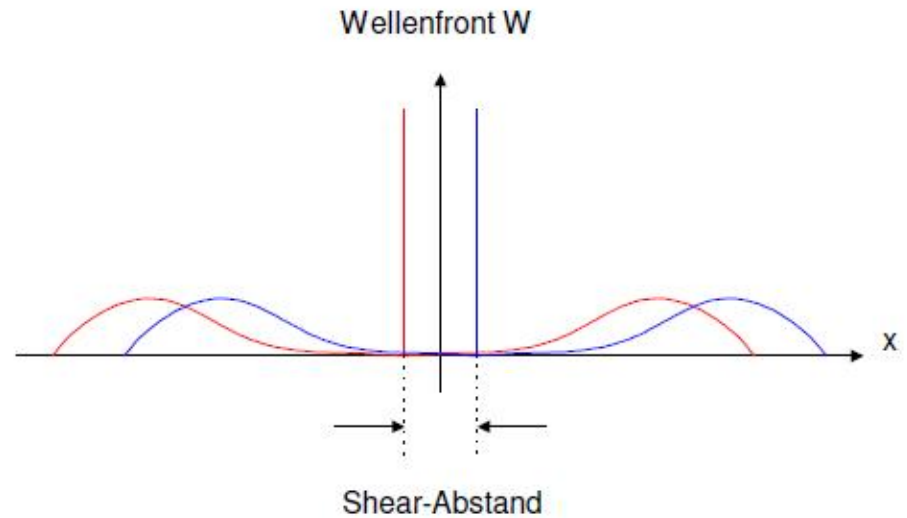
Shearing-Interferometer



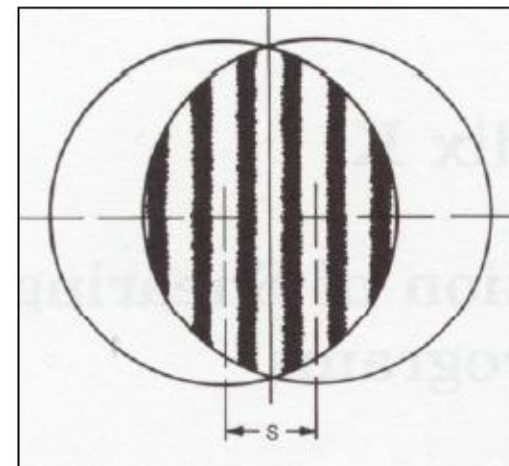
- Teilung der Wellenfront : selbst-referenzierend
- Differenzwellenfront ergibt andere Interferogramme



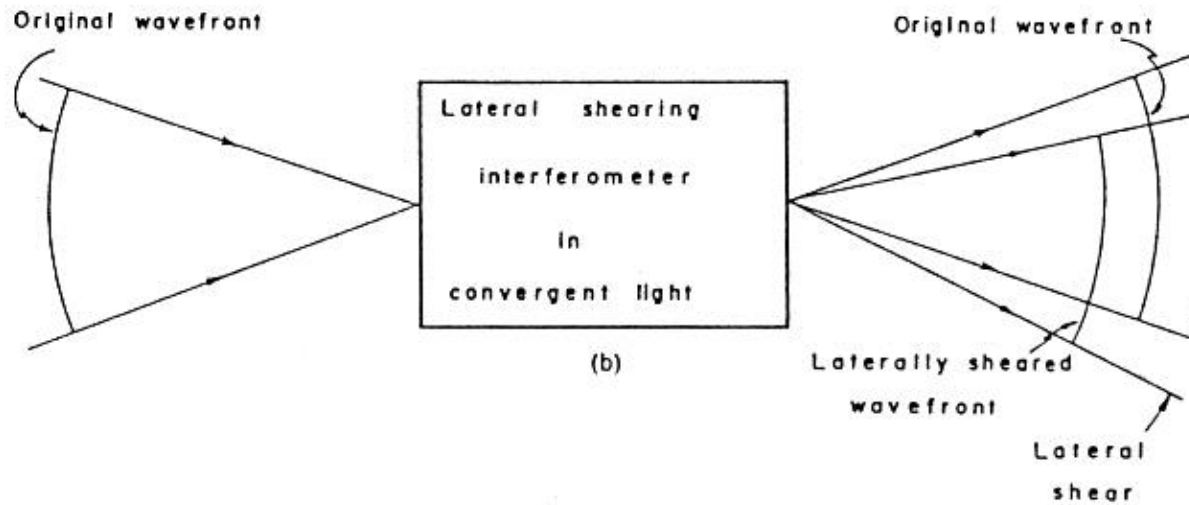
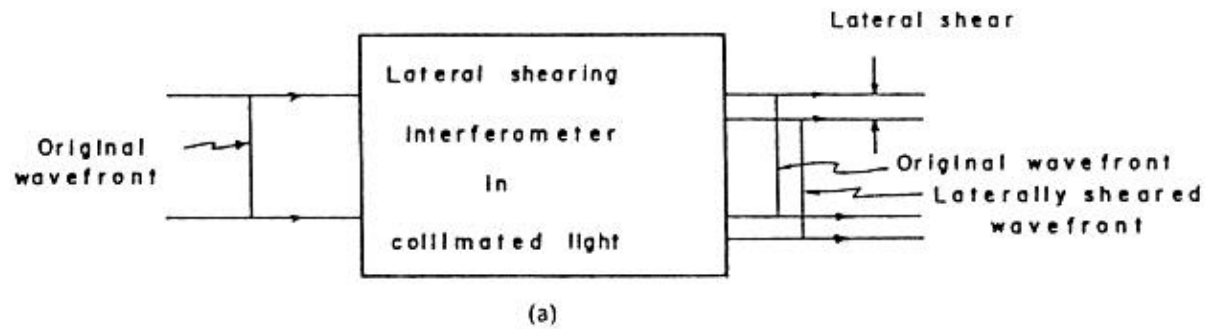
- Differenzwellenfront schematisch



- Typisches Shearing-Interferogramm



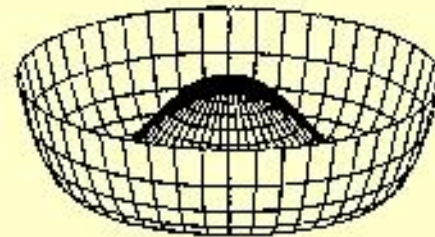
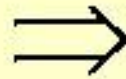
Shearing-Interferometer



Fragestellung :
**Wie erhält man Oberflächenabweichungen
einer Linse aus dem Interferogramm ?**



Interferogramm

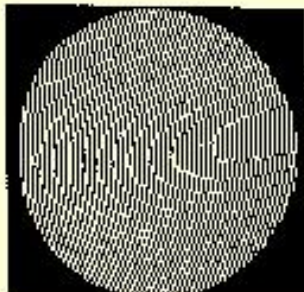


Wellenfläche oder
Oberflächenabweichung

Streifenanalyse-Verfahren

Statische Verfahren

- Streifenlokalisierung
- Vielstreifen-Methoden

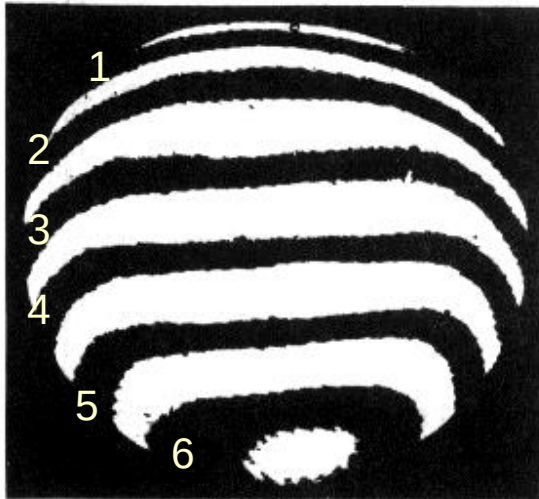


Dynamische Verfahren

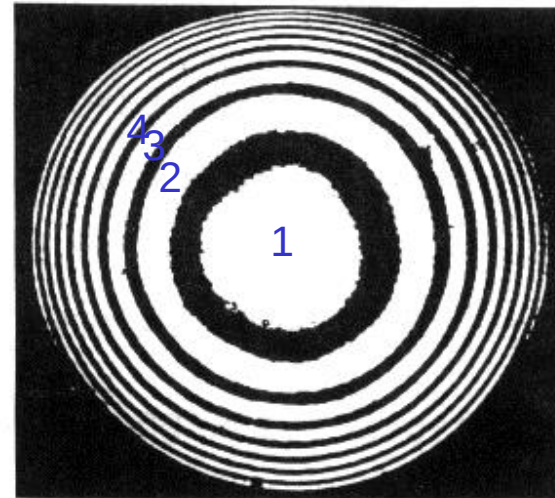
- Phasenstep-Methoden (Phaseshifting)
- Fourier-Analyse-Methoden



**Interferogramme geeignet zur
„von Hand“-Auswertung
(monotone Streifenfolge ist notwendig)**



„gerade“ Streifen



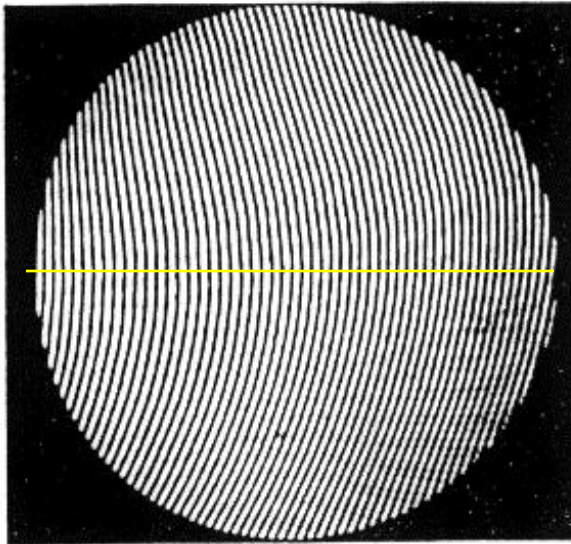
konzentrische Ringe

Trägerfrequenzmethode :

Kippanteil erzeugt Trägerfrequenz

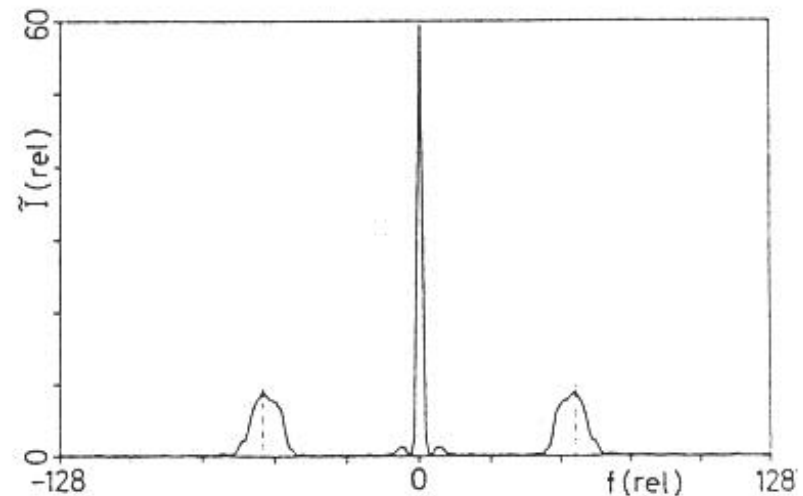
$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\varphi(x, y) + 2\pi f_0 x]$$

Die Information ist in der Abweichung von der Linearität enthalten.
Auswertung im Frequenzraum : Trägerfrequenz herausgefiltert.



Vielstreifen-Interferogramm

(a)



Fourier-Spektrum entlang gelber Linie

Vielstreifen-Verfahren

Aufgenommen wird ein Interferenzbild der Form :

$$I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot x + \phi(x, y))$$

Betrachtet man die Intensitäten an 3 benachbarten Pixeln, so kann näherungsweise geschrieben werden :

$$I_1(x - \Delta x, y) \approx a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot (x - \Delta x) + \phi(x, y))$$

$$I_2(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot x + \phi(x, y))$$

$$I_3(x + \Delta x, y) \approx a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos(2\pi \cdot f_0 \cdot (x + \Delta x) + \phi(x, y))$$

Errechneter Phasenwert :

$$\phi(x, y) = \arctan \left\{ \frac{I_3 - I_1}{I_3 + I_1 - 2 \cdot I_2} \cdot \tan(\pi \cdot f_0 \cdot \Delta x) \right\} - 2\pi \cdot f_0 \cdot x$$

3-Interferogramm-Methode



Phasen-Schiebe-Methode (TPMI):

Veränderlicher Phasenterm α addiert $I(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cdot \cos[\varphi(x, y) + \alpha]$

Drei veränderliche Werte : $I_{1/2/3} = a + b \cdot \cos[\varphi + \alpha_{1/2/3}]$

Auswertung :
$$\varphi = \arctan \frac{(I_2 - I_3) \cdot \cos \alpha_1 - (I_1 - I_3) \cdot \cos \alpha_2 + (I_1 - I_2) \cdot \cos \alpha_3}{(I_2 - I_3) \cdot \sin \alpha_1 - (I_1 - I_3) \cdot \sin \alpha_2 + (I_1 - I_2) \cdot \sin \alpha_3}$$

4-Frame-Technik :

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \frac{\pi}{2}, \alpha_3 = \pi, \alpha_4 = \frac{3\pi}{2} \quad \varphi = \arctan \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3}$$