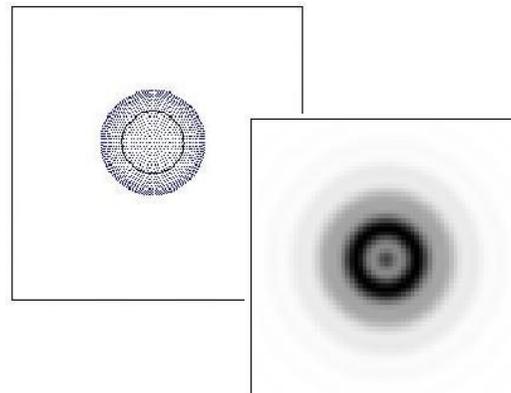


Abbildungsfehler und Abbildungsleistung optischer Systeme

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

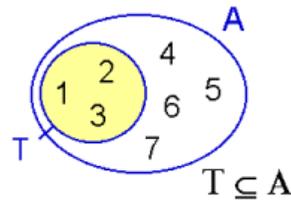
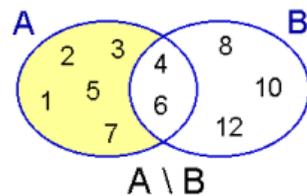
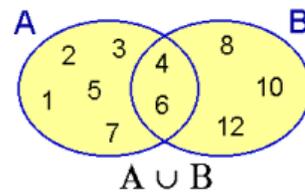
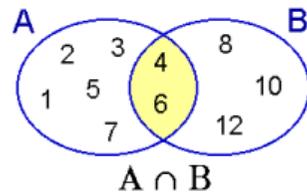
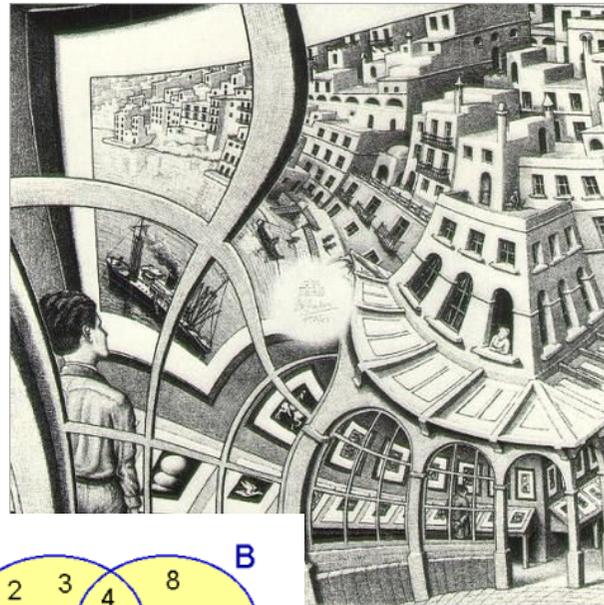
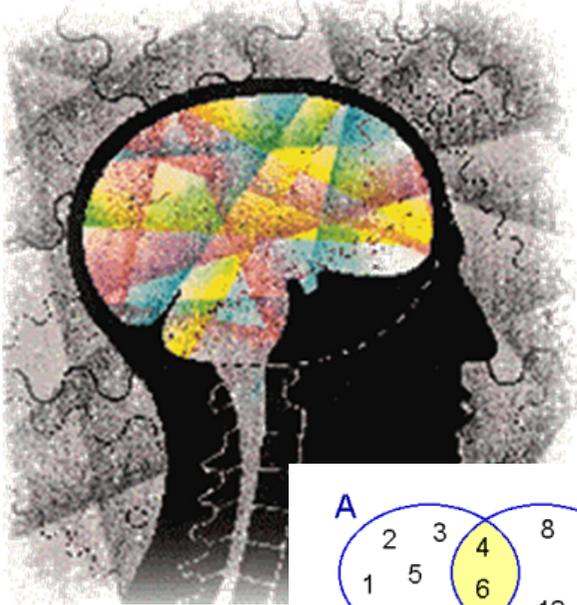
LINOS

Abbildung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Inhalt

Der Begriff der Abbildung beinhaltet u.a. mathematische, philosophische und künstlerische Aspekte. Diese Aspekte spiegeln sich auch beim Vorgang der optischen Abbildung wieder.



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

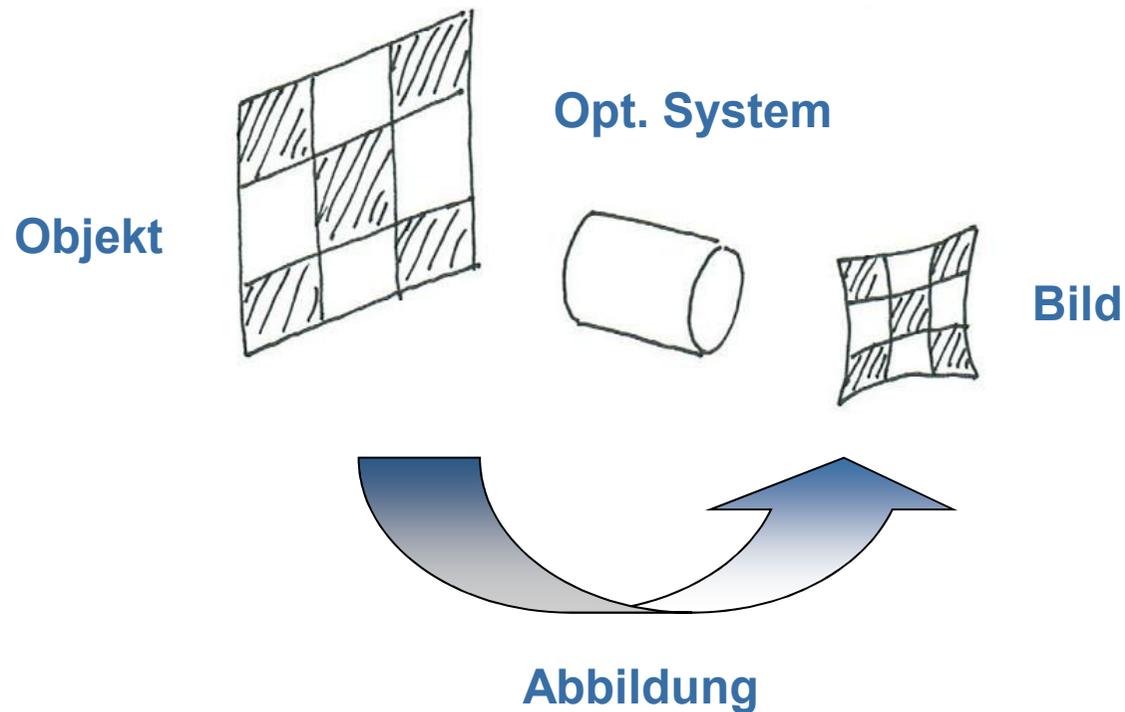
Optische Abbildung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Definition:

Übertragung einer lichtmodulierenden Objektstruktur in eine möglichst ähnliche Bildstruktur mit Licht als Informationsträger durch optische, d.h. das Licht beeinflussende Systeme.

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

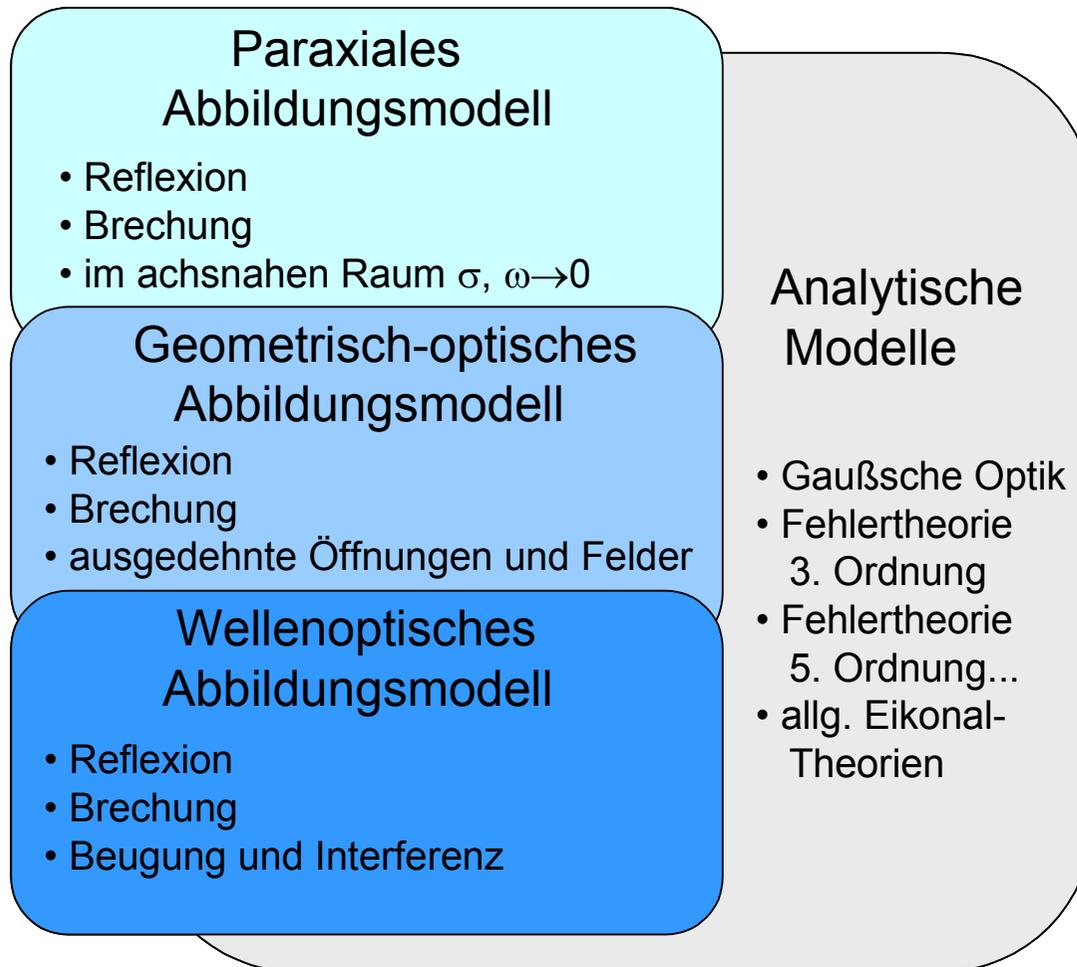
www.linos.de

LINOS

Modelle der optischen Abbildung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Annäherung an den Vorgang „optischen Abbildung“ durch verschiedene physikalische und mathematische Modelle:



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

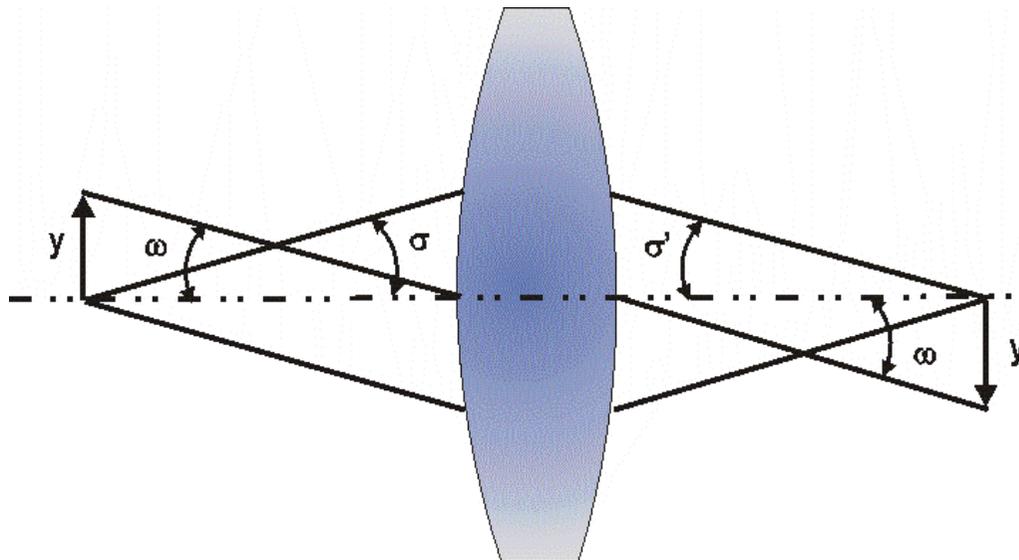
Modell der paraxialen (Gaußschen) Abbildung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Gültigkeit und Anwendung:

- nur Reflexion und Brechung von Licht-“Strahlen“ in Achsnähe
- auftretende Winkelfunktionen lassen sich durch Winkel ersetzen
- eindeutiger math. Bezug zwischen Objekt- und Bildraum
- Ersatz komplexer Systeme durch Kardinalelemente möglich
- Schneller Überblick über optische Verhältnisse

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



Bedingung:

$$\sigma = \sin \sigma = \tan \sigma$$

und

$$\omega = \sin \omega = \tan \omega$$

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

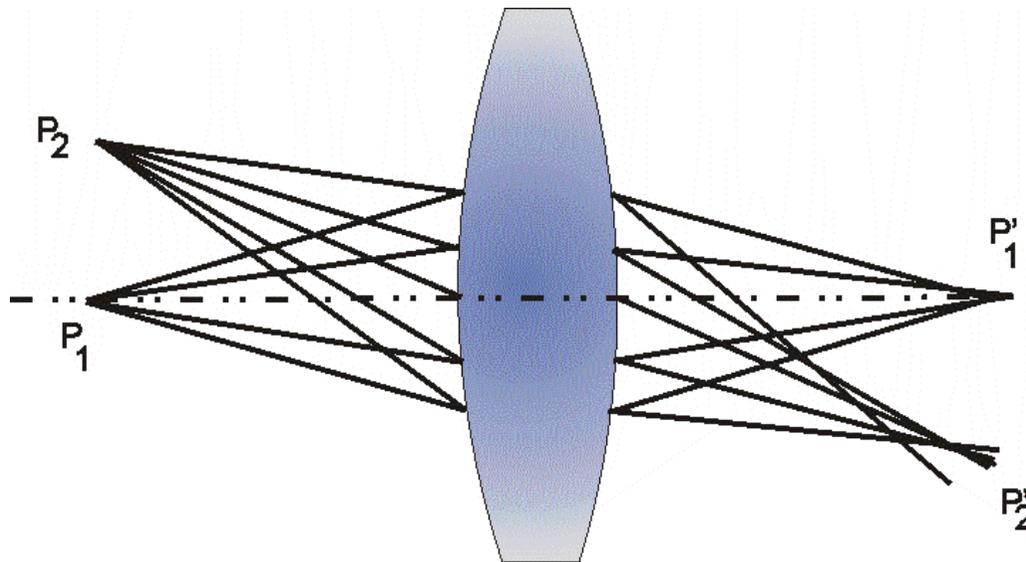
LINOS

Modell der geometrisch-optischen Abbildung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Gültigkeit und Anwendung:

- weiterhin nur Reflexion und Brechung
- Betrachtung auch achsferner und weit geöffneter Strahlbündel
- Beschreibung der Abbildung mittels noch fassbarer Formeln
- Zusammenhänge sind Grundlage für Optikkonstruktion
- für viele komplexe Anwendungsfälle ausreichend



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

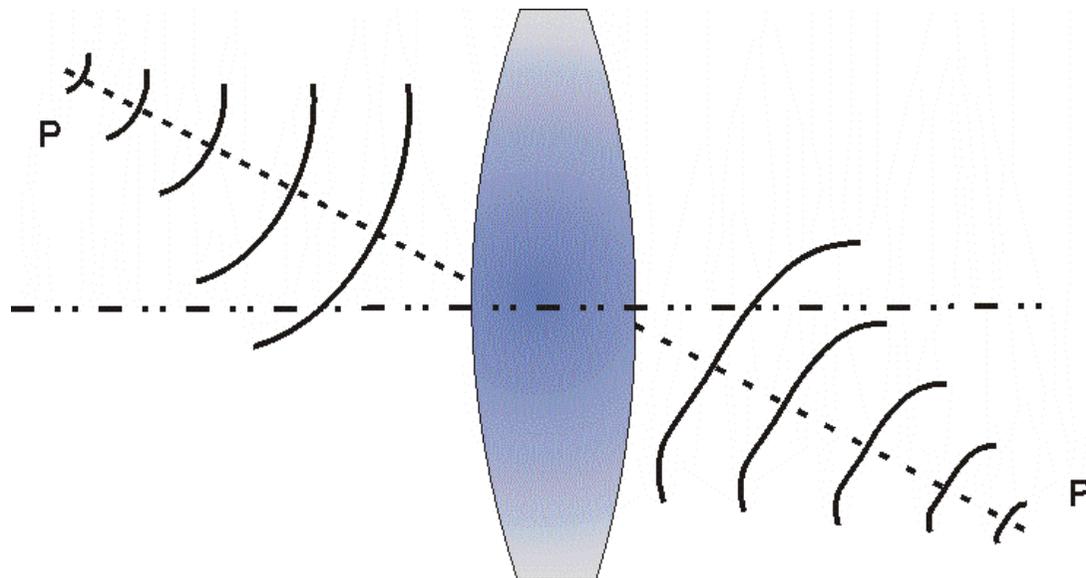
Modell der wellenoptischen Abbildung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Gültigkeit und Anwendung:

- komplexeste Näherung
- Abbildung durch Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz
- Erklärung von Phänomenen wie z.B. Filterung, Beugungsringen, physikalische Auflösungsgrenze usw.
- Beschreibung auch von „nichtklassischen“ Elementen (HOE usw.)

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

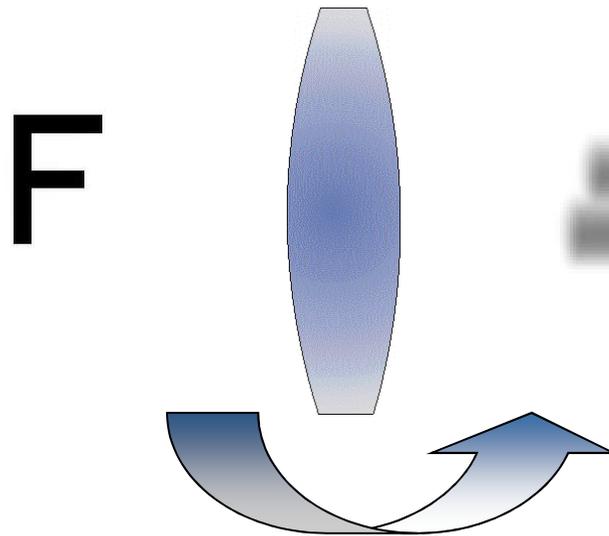
Thomas Thöniß
Manager
R&D

Definition:

Aberrationen sind Abweichungen (Abirrungen) der Strahlen im Bildraum von der punktuellen Abbildung. Bis auf wenige Ausnahme ist schon bei der Berechnung optischer Systeme keine ideale Abbildung im geometrisch-optischen Sinne möglich.

Hinzu kommen fertigungsbedingte Toleranzen bei der Umsetzung optischer Systeme, die zu weiteren Abweichungen der Abbildung führen können.

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



Abbildungsfehler (Aberrationen)

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

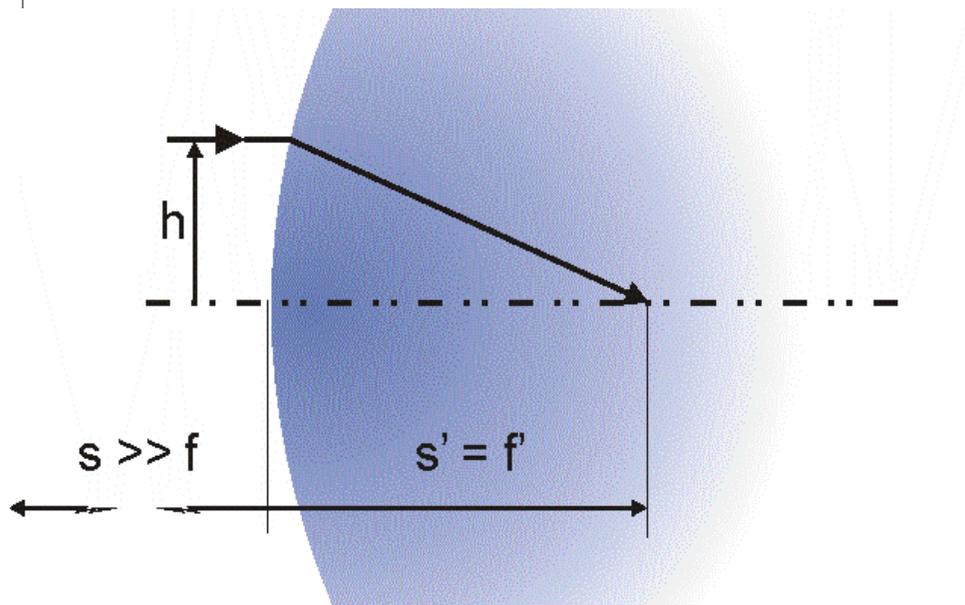
Abbildungsfehler im paraxialen Gebiet

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Chromatische Variation des Bildortes (Farblängsfehler oder chromatische Längsaberration):

Abbildung an einer sphärischen optischen Einzelfläche mit Radius r :

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



Aus der Abbeschen Invariante ergibt sich für $h \rightarrow 0$ die paraxiale Schnittweite mit s' :

$$s' = r \frac{n'}{n' - 1} = f'$$

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

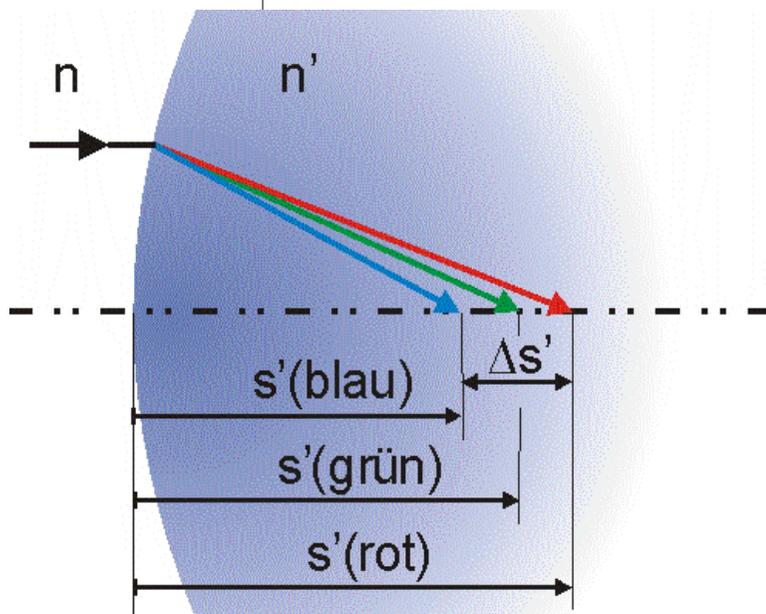
Abbildungsfehler im paraxialen Gebiet

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Chromatische Längsaberrationen:

Durch die wellenlängenabhängige Wechselwirkung des Lichtes (hier Brechung) mit dem opt. Medium wird s' zu $s' = F(\lambda)$:

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



$$s'(\lambda) = r \frac{n'(\lambda)}{n'(\lambda) - 1} = f'(\lambda)$$

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Abbildungsfehler im paraxialen Gebiet

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Chromatische Längsaberrationen:

Variation der Schnittweite $\Delta s'$ im visuellen Spektrum an einer sphärischen opt. Fläche mit $r = 100\text{mm}$ (Glas: N-BK7):

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

Fraunhofer-Linie	Wellenlänge λ In nm	Brechzahl $n(\lambda)$	Schnittweite $s'(\lambda)$
F	486,1327	1.52237	291,433
d	587,5618	1.51680	293,498
C	656,2725	1.51432	294,431

Farblängsfehler $\Delta s' = s'_{\lambda, \min} - s'_{\lambda, \max} = -2.998 \text{ mm!}$

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

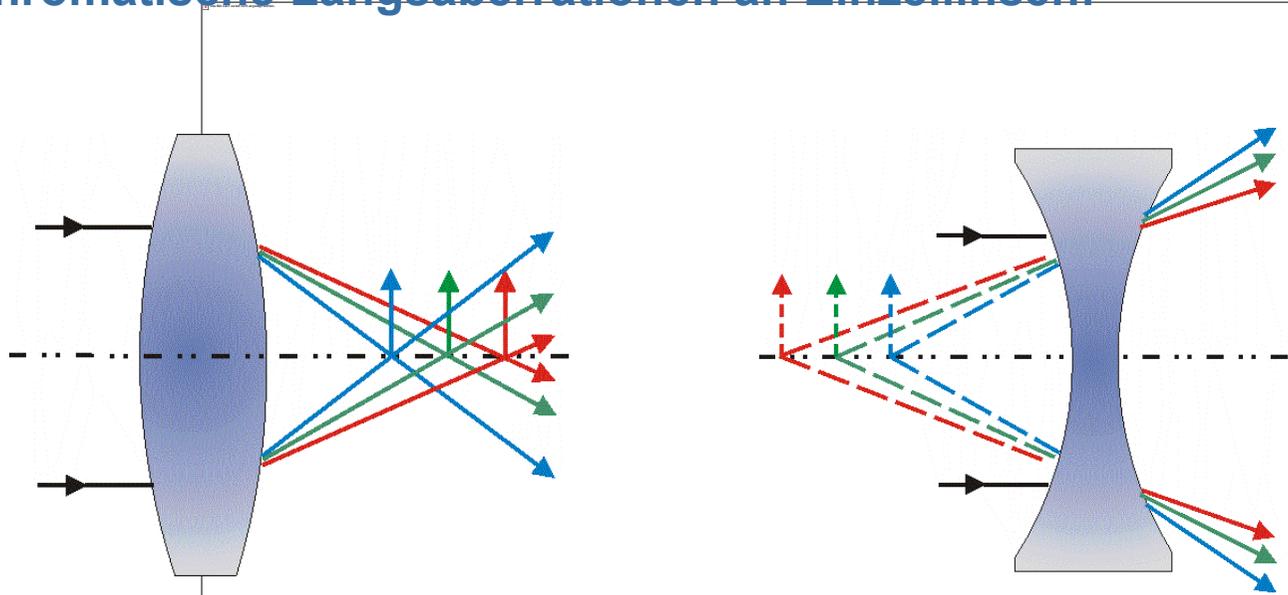
www.linos.de

LINOS

Abbildungsfehler im paraxialen Gebiet

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Chromatische Längsaberrationen an Einzellinsen:



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

Die unterschiedlichen Vorzeichen des Farblängsfehlers an einer Sammel- und einer Zerstreuungslinse eröffnen den Weg zur Korrektur des Farblängsfehlers!

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

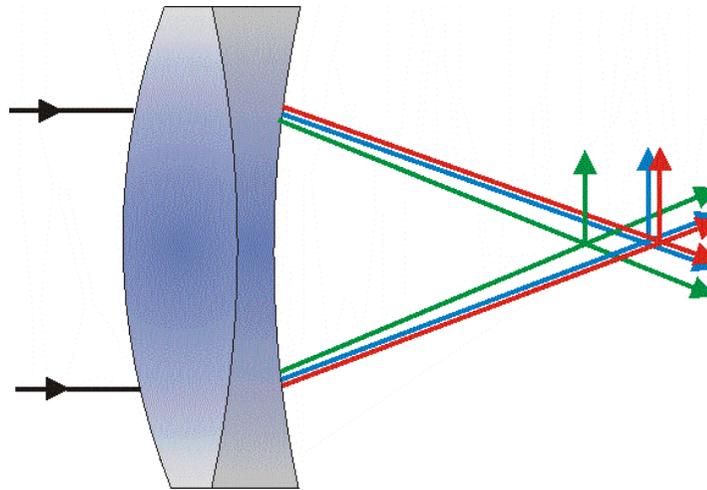
LINOS

Abbildungsfehler im paraxialen Gebiet

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Korrektion des Farblängsfehlers für zwei Farben:

Kombination eines schwach farbzerlegenden (Kron-) Glases mit einem stark farbzerlegendem (Flint-) Glas zu einem positiven achromatischen Dublet:



Korrektion von 2 Farben:

Achromat (Dichromat)

Korrektion von 3 Farben:

Apochromat (Trichromat)

Korrektion von mehr Farben:

Superachromat (Polychromat)

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

Auf Grund des nichtlinearen Verlaufs der Dispersion von opt. Materialien ist eine vollständige Korrektur nicht möglich!

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Chromatische Aberration der Bildgröße (Farbquerfehler, chromatische Queraberration):

- Beurteilung eines abbildenden Strahlbündels durch Hauptstrahl (i. d. R. Bündelmittenstrahl)
- Durchstoßpunkt in der Bildebene legt jeweilige Bildhöhe fest

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

Ursache der chromatischen Queraberration:

- chromatische Variation des Hauptstrahls
- Variation ist in der Regel eine Kombination verschiedener Erscheinungen:
 - Vorhandensein des Farblängsfehlers (!)
 - Variation der Austrittspupille
 - Variation der Brennweite bzw. der Hauptebenen

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

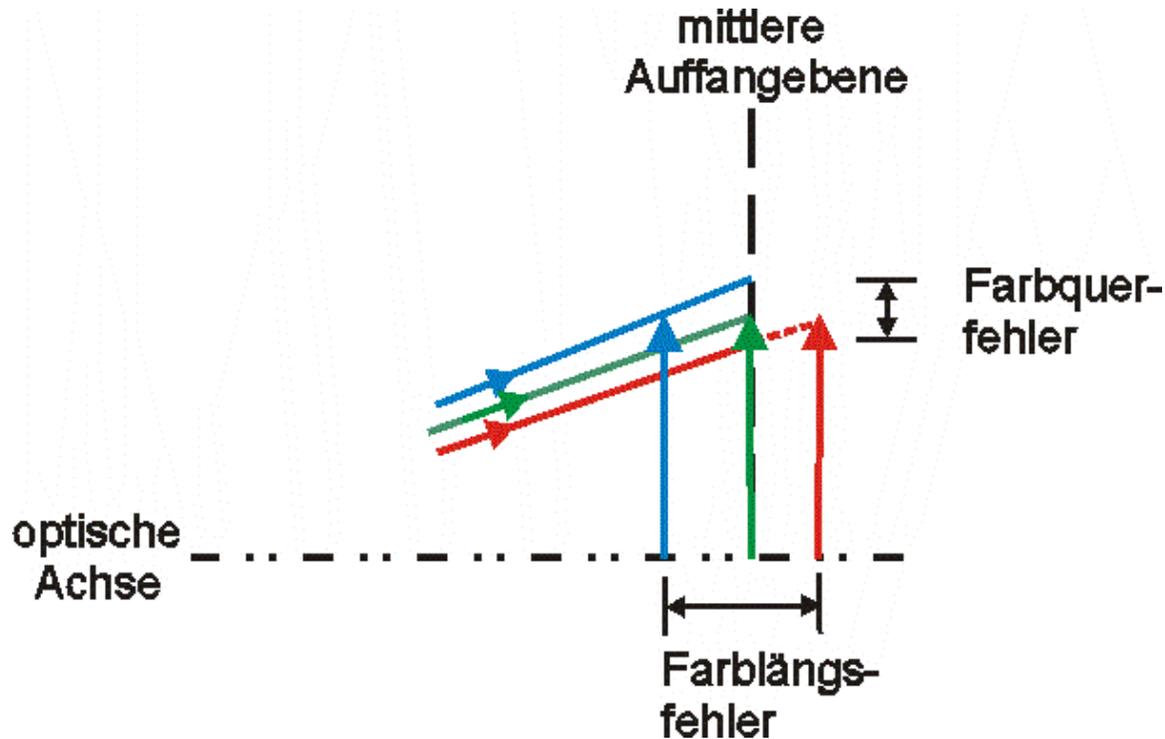
Abbildungsfehler im paraxialen Gebiet

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Chromatische Queraberration durch Farblängsfehler:

Variation des Ortes der idealer Weise gleichgroßen, durch den Farblängsfehler zerlegten Bilder verursacht unterschiedliche Durchstoßhöhen des jeweiligen Hauptstrahls in einer gewählten Auffangebene:

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

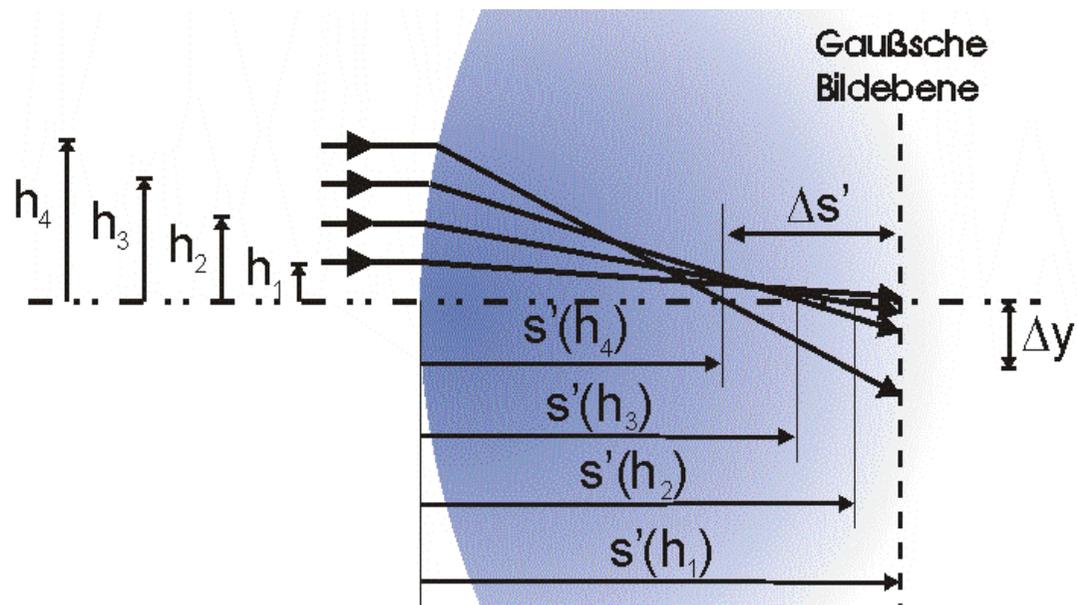
LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Sphärische Aberration (Öffnungsfehler):

Verkürzung der Schnittweite s' mit steigender Einfallshöhe h an einer sphärischen Einzelfläche:



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

Die paraxiale Schnittweitenformel ist für größere h nicht mehr anwendbar!

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Sphärische Aberration (Öffnungsfehler):

Höhenabhängige Schnittweite $s'(h)$:

$$s'(h) = r + \frac{h}{n' \sin \sigma'} \quad \text{mit} \quad \sigma' = \arcsin \frac{h}{r} - \arcsin \frac{h}{n'r}$$

Variation der Schnittweite $\Delta s'$ an einer sphärischen Fläche mit $r = 100$
(Glas: N-BK7 mit $n' = 1.5168$):

Einfallshöhe h in mm	Schnittweite $s'(h)$ in mm
0.1	293,515
10	292,859
20	290,927
30	287,654
40	282,952

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

Schnittweitenvariation $\Delta s' = s'_{h,min} - s'_{h,max} = -10.563$ mm!

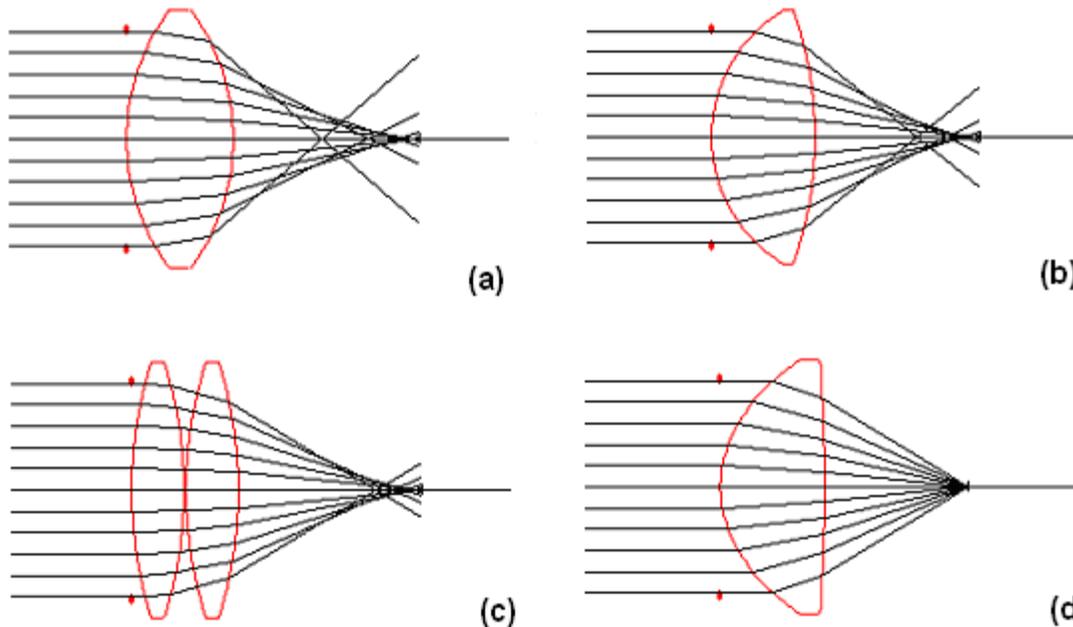
LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Ursache und Korrektur der Sphärische Aberration:

- Kugelgestalt der optischen Fläche (mathematisch nicht optimal)
- Starke Abhängigkeit von Einfallswinkel bzw. Umlenkung der Strahlen an der Fläche (a)



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

- Optimierung und Aufteilung der Umlenkung auf verschiedene Flächen (b, c)
- Brechzahlerhöhung des opt. Mediums
- Suche nach math. optimaler Fläche (Asphärisierung) (d)

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

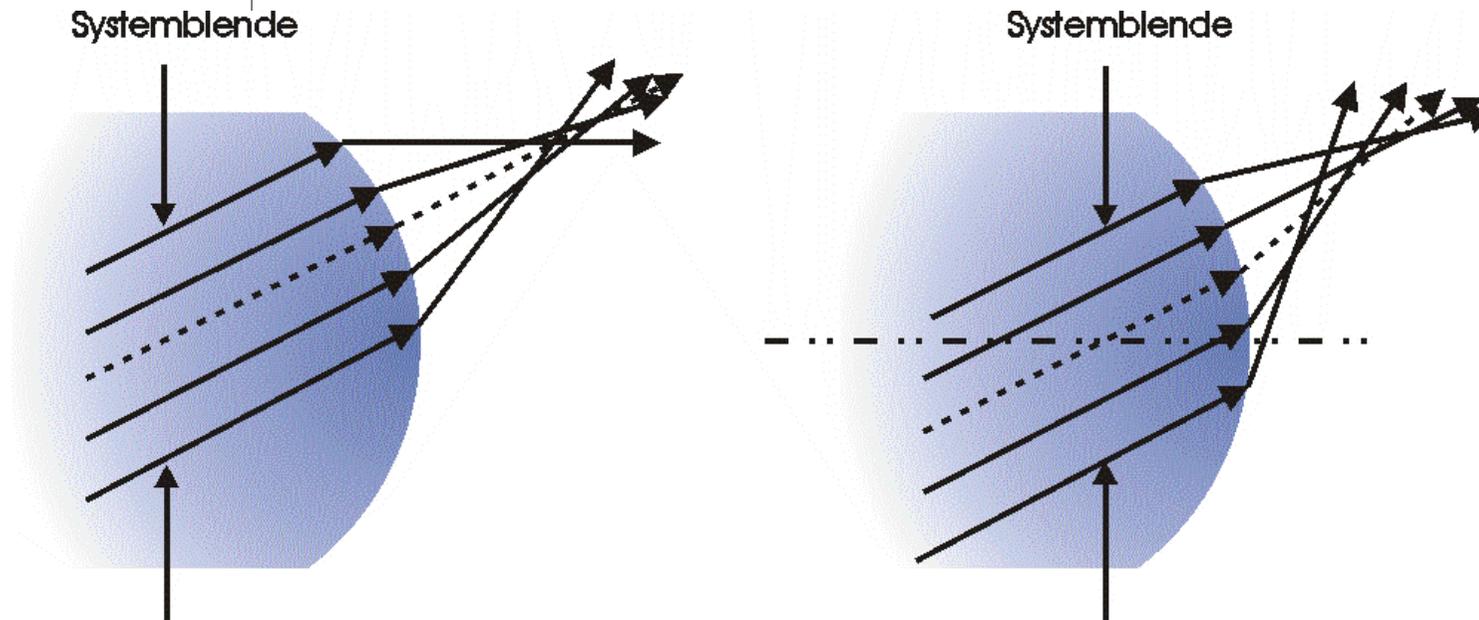
Thomas Thöniß
Manager
R&D

Koma (Asymmetriefehler):

Wird der Objekt bzw. Bildpunkt aus dem paraxialen Gebiet lateral verschoben kommt es zu kometenhaften Bildpunktverschmierungen

Ursache:

- schiefes Auftreffen des Strahlbündels auf die sphärische Fläche
- Strahlbündel wird je nach Blendenlage asymmetrisch gebrochen



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

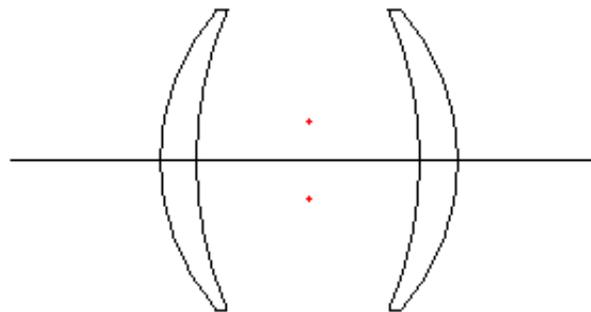
LINOS

Korrektion bzw. Behebung der Koma:

- Konstanz des Abbildungsmaßstabes bzw. der Brennweite (bei $s = -\infty$) über der Öffnung (Sinus-Bedingung nach Abbe, 1873):

$$\beta' = \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'} = \text{const} \quad \text{bzw.} \quad f' = \frac{h}{\sin \sigma'} = \text{const}$$

- Allgemeinere Bedingung für Systeme mit sphärischer Aberration: Isoplanasie-Bedingung (Staeble, Lihotzky, 1919)
- Die Koma ist ein lateraler Fehler und verschwindet bei einer 1:1 Abbildung durch blendensymmetrische Systeme vollständig!



Symmetrisches, für 1:1 Abbildung komafreies System (Periskop nach Steinheil, 1865)

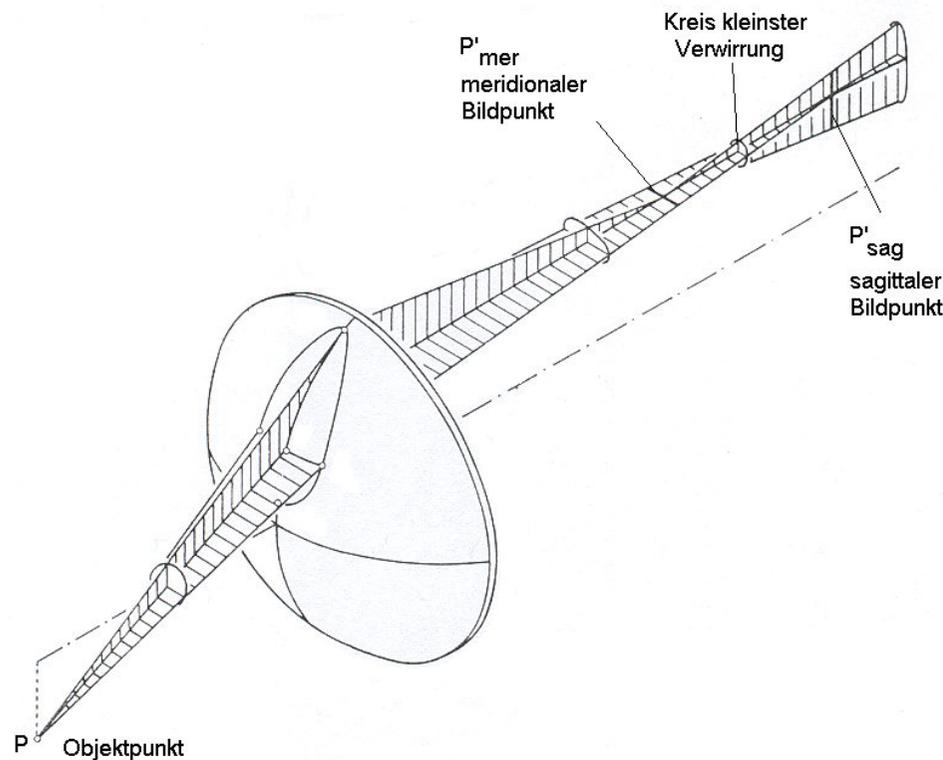
Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Astigmatismus (Zweischalenfehler):

- außeraxialer Objektpunkt wird schon bei geringem Bündelquerschnitt nicht punktförmig (stigmatisch) abgebildet
- im meridionalen und sagittalen Schnitt ergeben sich unterschiedliche Bildorte

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

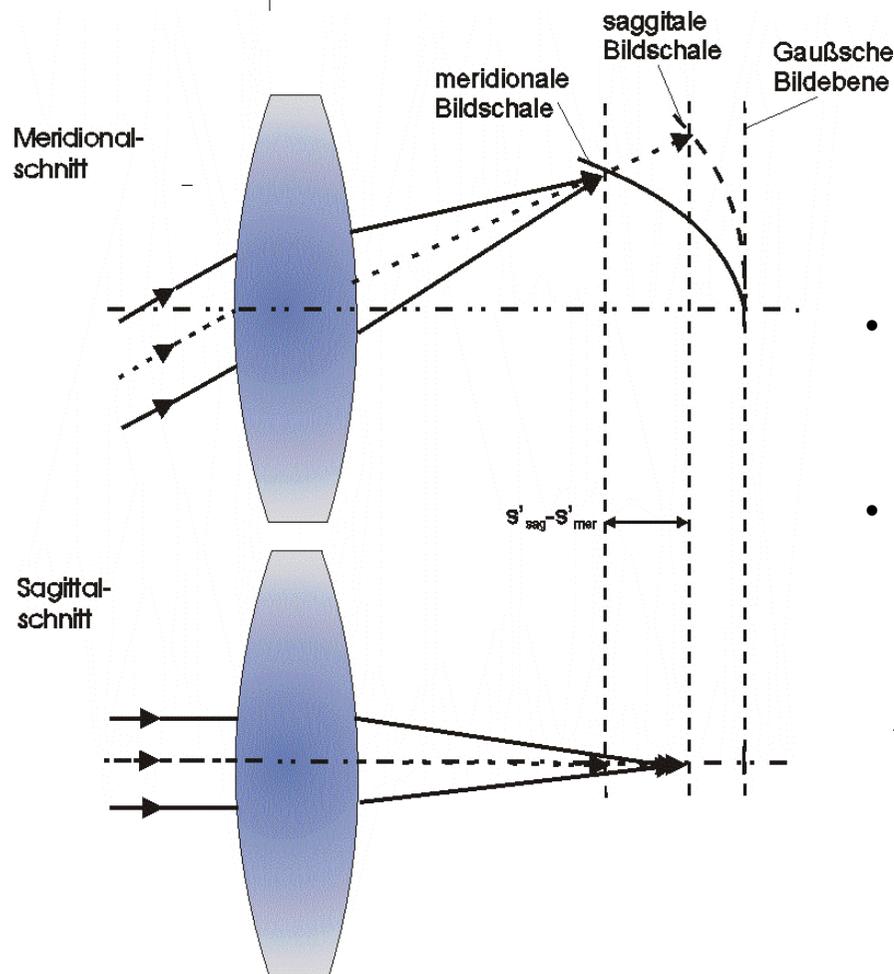
LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Ursachen des Astigmatismus:

unterschiedliche Bildorte für schiefe Bündel durch unterschiedliche Brechkräfte der Flächen im meridionalen und sagittalen Schnitt



- Abbildung eines ebenen Objekt in zwei gekrümmte Bildschalen
- Korrektur erfordert komplexere Systeme mit definierter Blendenlage

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

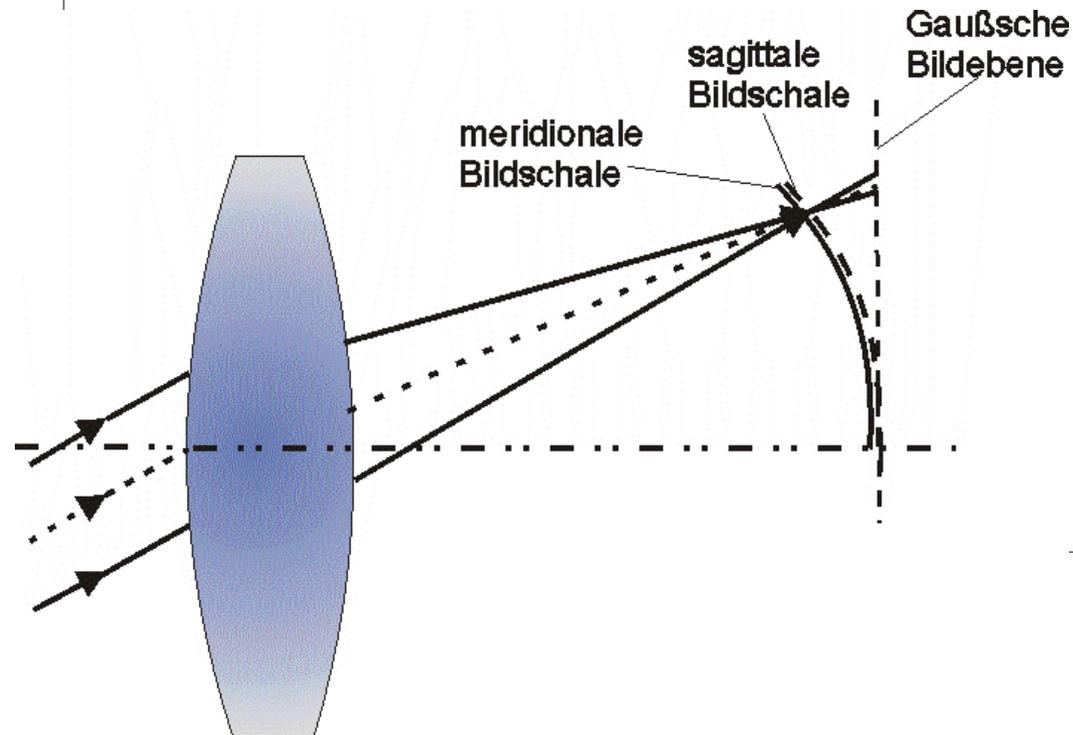
Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Bildfeldkrümmung:

- Bei behobenen Astigmatismus resultierende Bildebene u.U. weiterhin gekrümmt
- eigentlicher Lagefehler führt bei ebenem Detektor zur Unschärfe des Bildes
- somit in letzter Konsequenz ebenfalls ein Unschärfefehler!

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

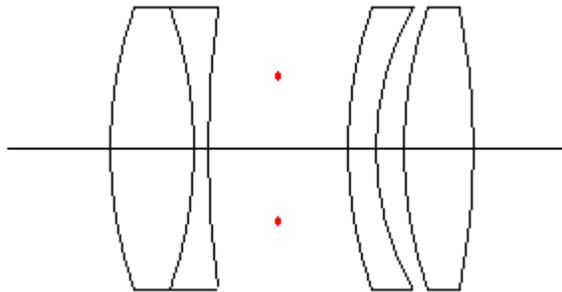
Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

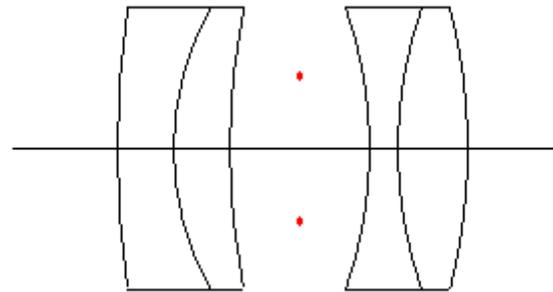
Korrektion der Bildfeldkrümmung:

- komplexere opt. Systeme notwendig
- erste analytische Untersuchung durch Petzval
- erstes Objektiv (Petzval, 1840) mit reduzierter meridionaler Bildfeldwölbung
- eigentliche Korrektion beider Fehler (anastigmatische Korrektion) durch Rudolph (1890)

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



Petzvalsches Portraitobjektiv
(1840) mit geebneten
meridionaler Bildschale



Anastigmat Protar von
Rudolph (1890)

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

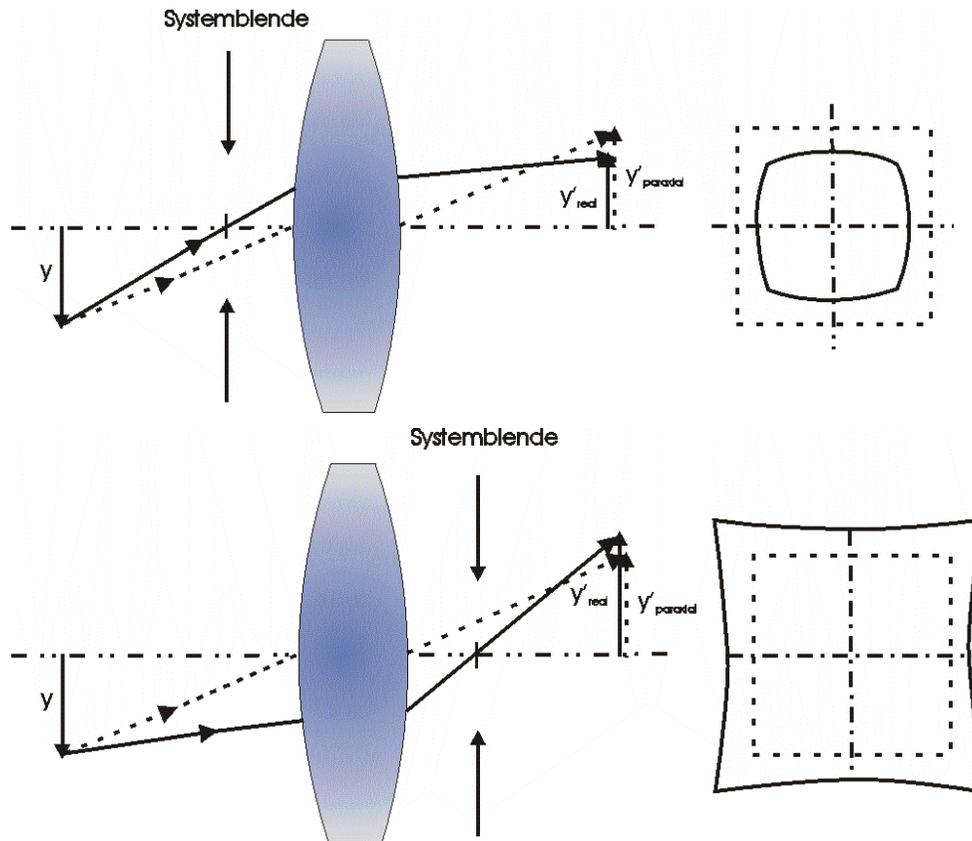
LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Verzeichnung:

- bei scharfer, ebener Abbildung u.U. Unähnlichkeit des Bildes zum Objekt durch Verzerrung
- Verzeichnung schon bei einfachen Einzellinsen mit einer Blende im endlichen Abstand durch Aberration des Hauptstrahls



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Definition der Verzeichnung:

Verzeichnung allg.:

$$V = y_{ist} - y_{soll}$$

Prozentuale Verzeichnung:

$$V_{proz} = \frac{y_{ist} - y_{soll}}{y_{soll}} 100\%$$

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

- $V < 0$ tonnenförmige Verz. (typisch bei Ultraweitwinkelobjektiven)
- $V > 0$ kissenförmige Verz.
- $V < 3\%$ bei visueller Betrachtung i.d.R. nicht störend

Ein lineares Ansteigen der Verzeichnung ist bei visueller Betrachtung weniger störend als eine kleine Verzeichnung mit stark wechselndem Gradienten!

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

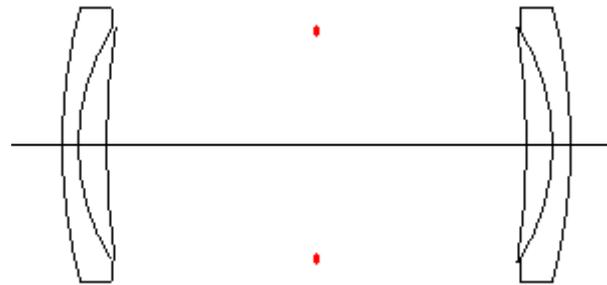
Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Korrektion der Verzeichnung:

- Verzeichnung ist ein lateraler Lagefehler
- Verschwindet bei 1:1 Abbildung durch blendensymmetrische Systeme vollständig
- Symmetrie eines opt. Systems (z.B. Cooke-Triplet, Doppel-Gauss etc.) unterstützt auch Korrektur bei anderen Abbildungsmaßstäben

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



Symmetrisches, für 1:1 Abbildung
verzeichnungsfreies System
(Aplanat nach Steinheil, 1865)

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsfehler

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Zusammenfassung:

- trivial aber nützlich: Spiegel haben keine Farbfehler!
- laterale Fehler (Farbquerfehler, Koma, Verzeichnung) verschwinden bei 1:1 Abbildung durch blendensymmetrische Systeme vollständig
- bis auf sphärische Aberrationen treten alle monochromatischen Fehler in Mischformen auf
- monochromatische Fehler können farblich variieren

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

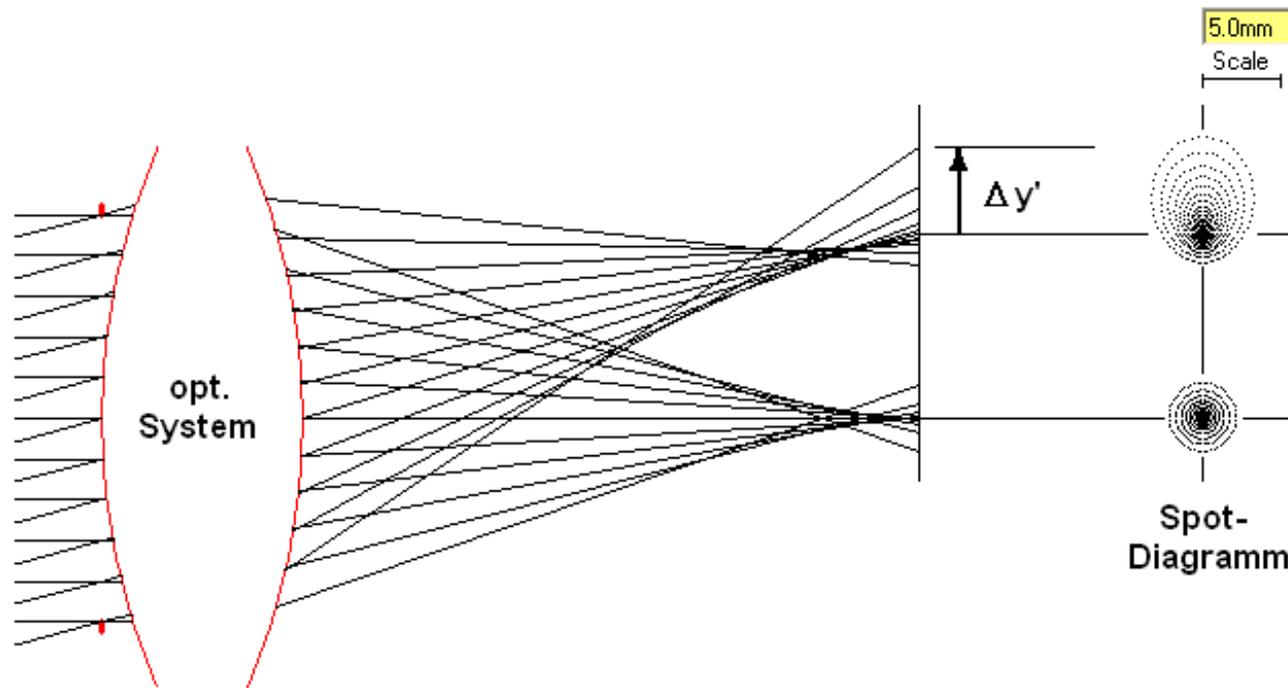
Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Bewertung der Abbildungsleistung:

Im wesentlichen durch grafische und tabellarische Darstellung von Strahlkoordinaten im Bildraum

Spot-Diagramm:



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

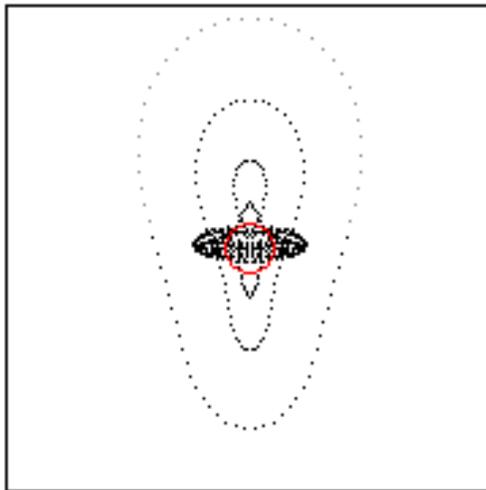
LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Spot-Diagramm:

- anschaulichste aber wenig aussagekräftigste Darstellung
- Rückschluss auf spez. Abbildungsfehler nur bedingt möglich
- Vergleich mit wellenoptischer Beugungsgrenze durch Darstellung des Airy-Durchmessers:



- Airy-Durchmesser D_{Airy} (physikalisch kleinstmöglicher) Fokus
- Falls Mehrzahl aller Strahlen innerhalb des D_{airy} → beugungsbegrenztes System
- **Widerspruch zwischen Wellenoptik und geom. Optik, da im geom. opt. Modell Spottedurchmesser = 0 möglich!**

$$D_{\text{Airy}} = 1.22 \frac{\lambda}{NA'}$$

mit $NA' = \sin \sigma'$

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

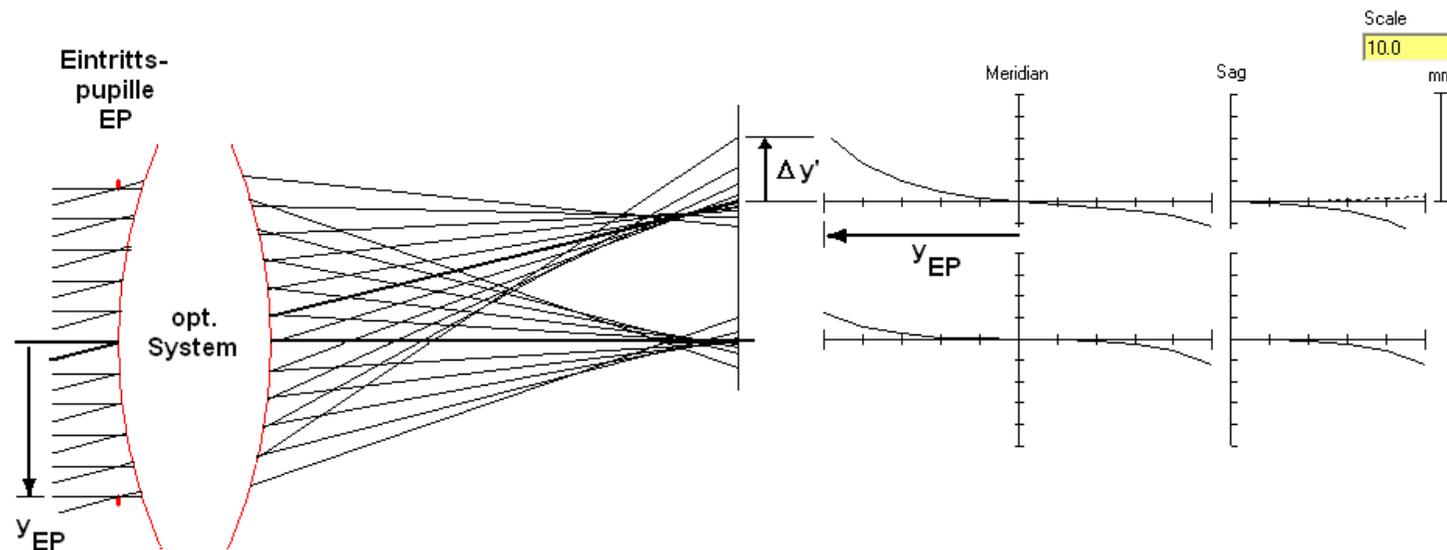
Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Queraberration (transverse ray aberration bzw. TRA):

- Bei der Berechnung opt. Systeme wohl am häufigsten genutzte Darstellung der Abbildungsqualität
- Strahldurchstoßkoordinaten in der Bildebene $\Delta x'$, $\Delta y'$ (Abweichung vom Sollpunkt) in Abhängigkeit der Eintrittspupillencoordinate des jeweiligen Strahls x_{EP} , y_{EP}
- Im Idealfall der punktuellen Abbildung: Gerade auf der Abzisse

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

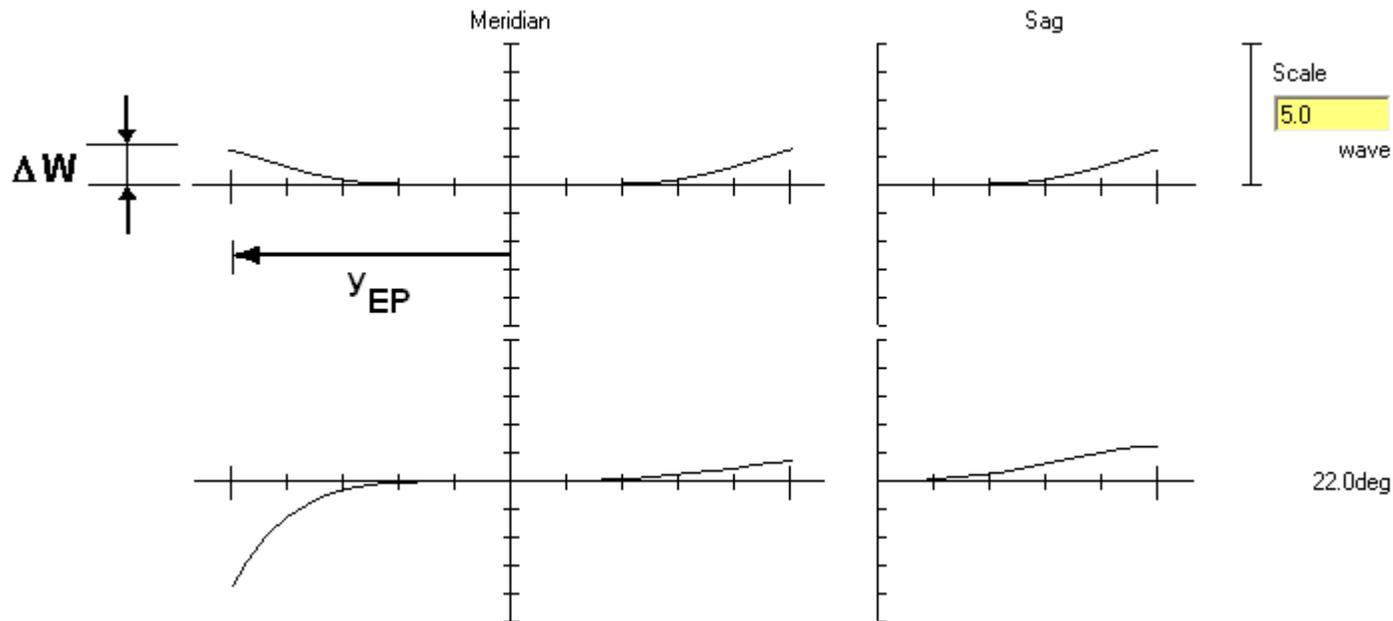
Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Darstellung der Wellenaberration

Abweichung zwischen der idealen, im Bildpunkt konvergierenden, Kugelwelle zur realen durch Aberrationen deformierte Welle gibt Aufschluss über die Abbildungsqualität

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

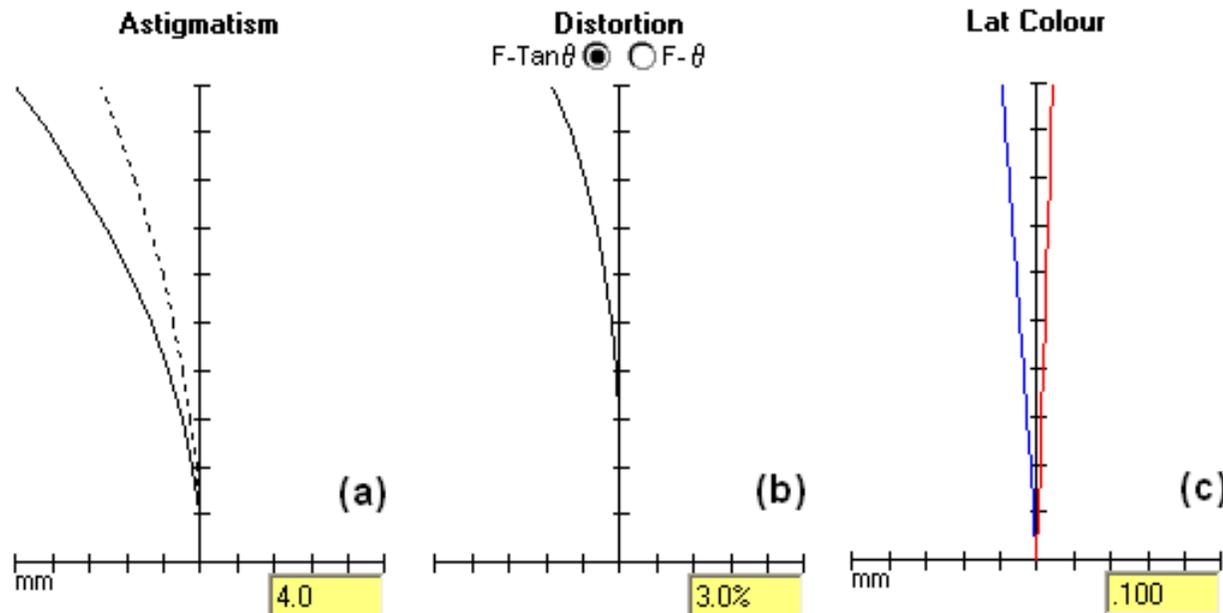
Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Feldaberrationen (field aberrations):

- Darstellung feldabhängiger Aberrationen: Astigmatismus/Feldkrümmung (a), Verzeichnung (b), Farbquerfehler (c)
- Abbildung einer Linie
- Direkter Rückschluss auf Qualität und Quantität der Fehler möglich

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



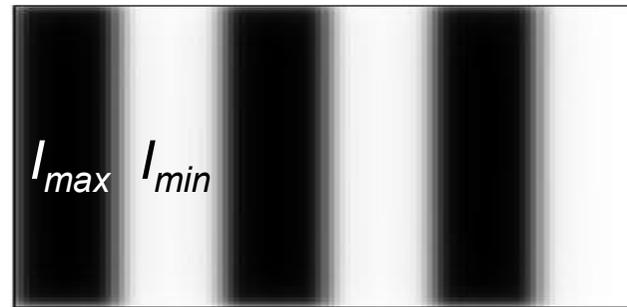
LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Geometrische Modulationsübertragungsfunktion (geometric modulation transfer function bzw. GMTF):

- Darstellung des Kontrastes K eines opt. Systems in Abhängigkeit der Feinheit der Objektstruktur (Ortsfrequenz ω) für Anwender am aussagekräftigsten
- Übertragung einer Referenzstrukturen (z.B. Hell-Dunkel-Linienpaare) vom Objektraum in den Bildraum
- Vergleich der Intensitäten I in den Strukturen miteinander
- Berechnung aus Strahldichteverteilung im Bildpunkt



$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



$$GMTF = \frac{K_{\text{Bild}}(\omega)}{K_{\text{Obj}}(\omega)}$$

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

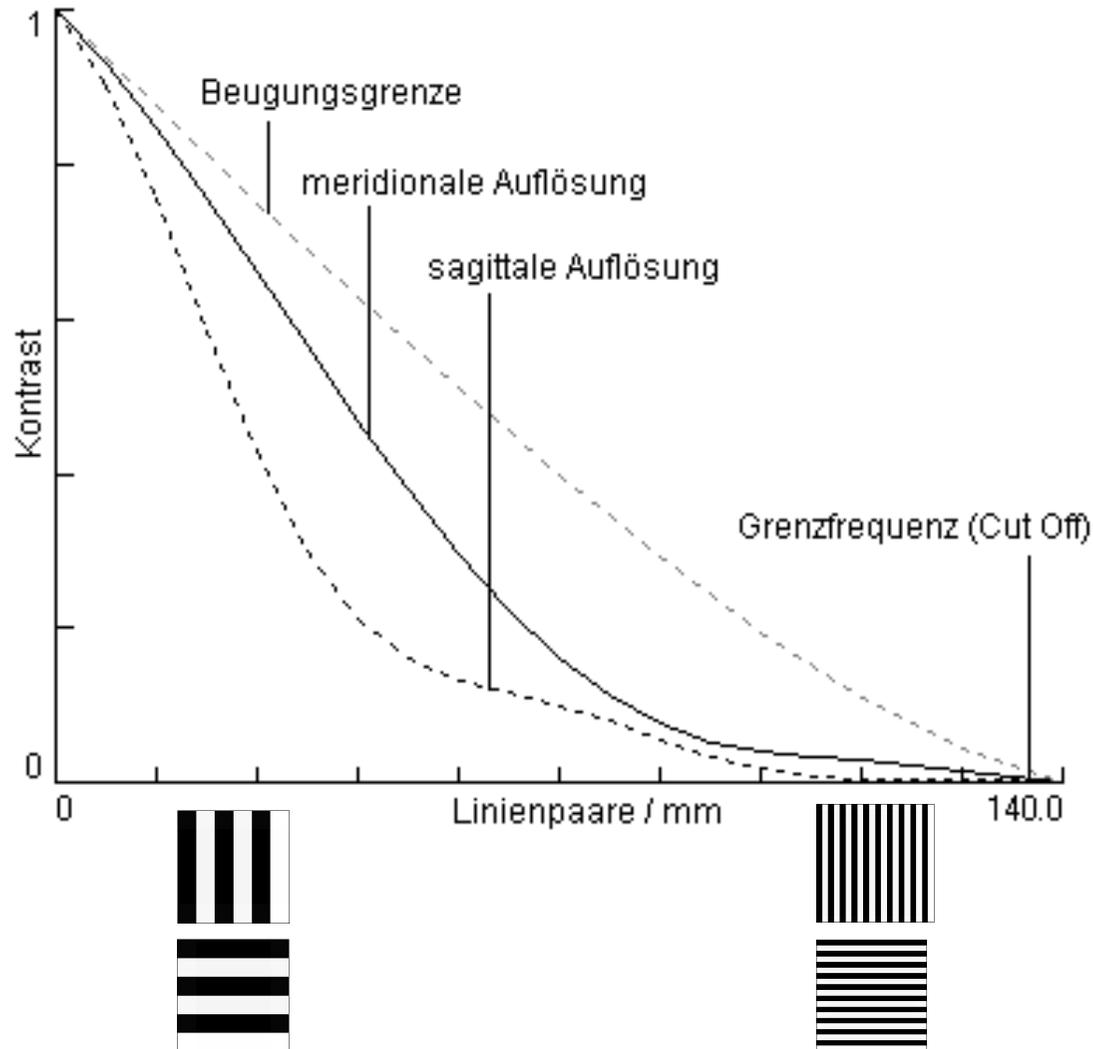
www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Darstellung der GMTF vs Frequenz:



$$\omega_{\text{grenz}} = \frac{2NA'}{\lambda}$$

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

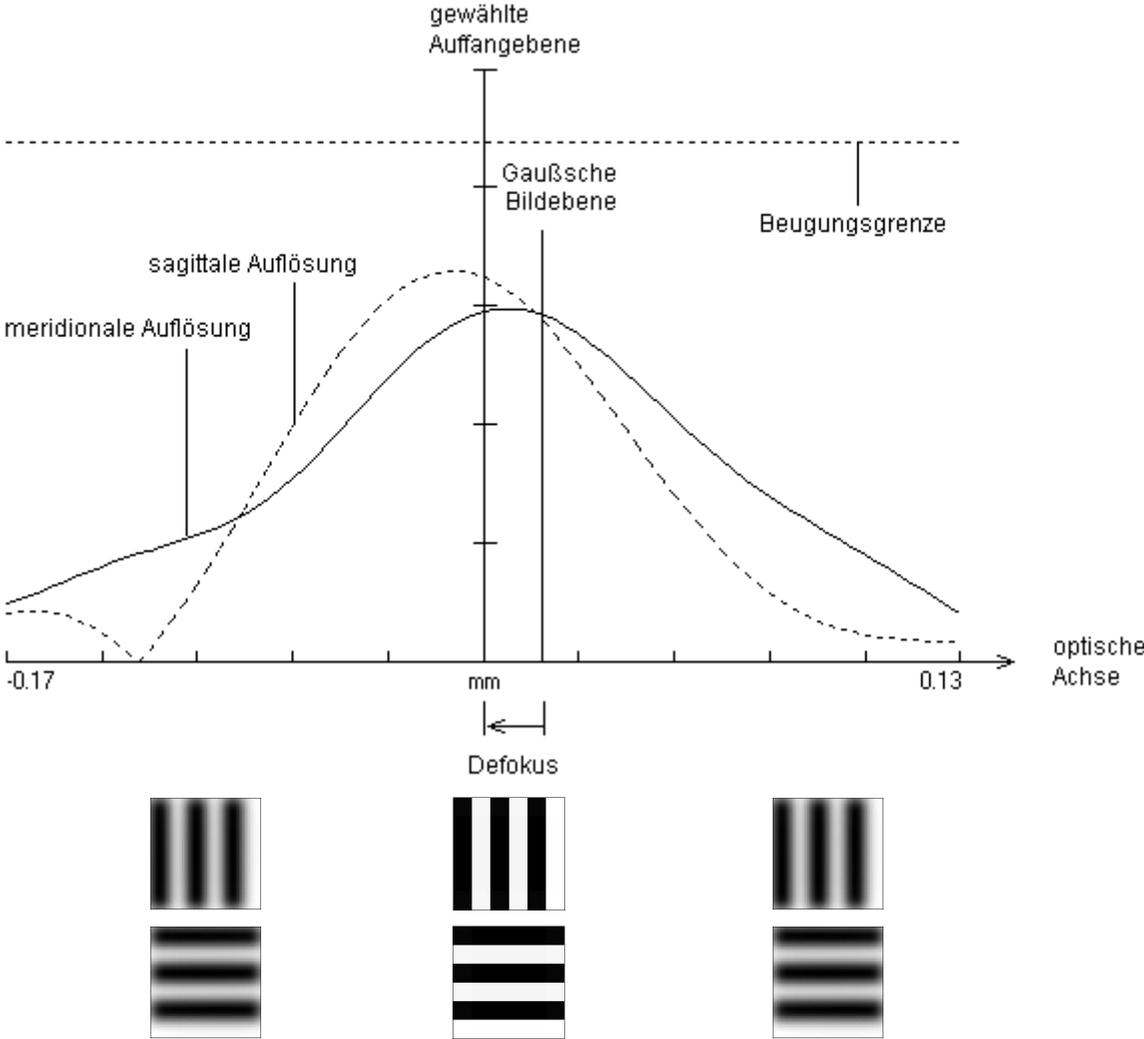
www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Darstellung der GMTF entlang der optischen Achse (Through Focus MTF):



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

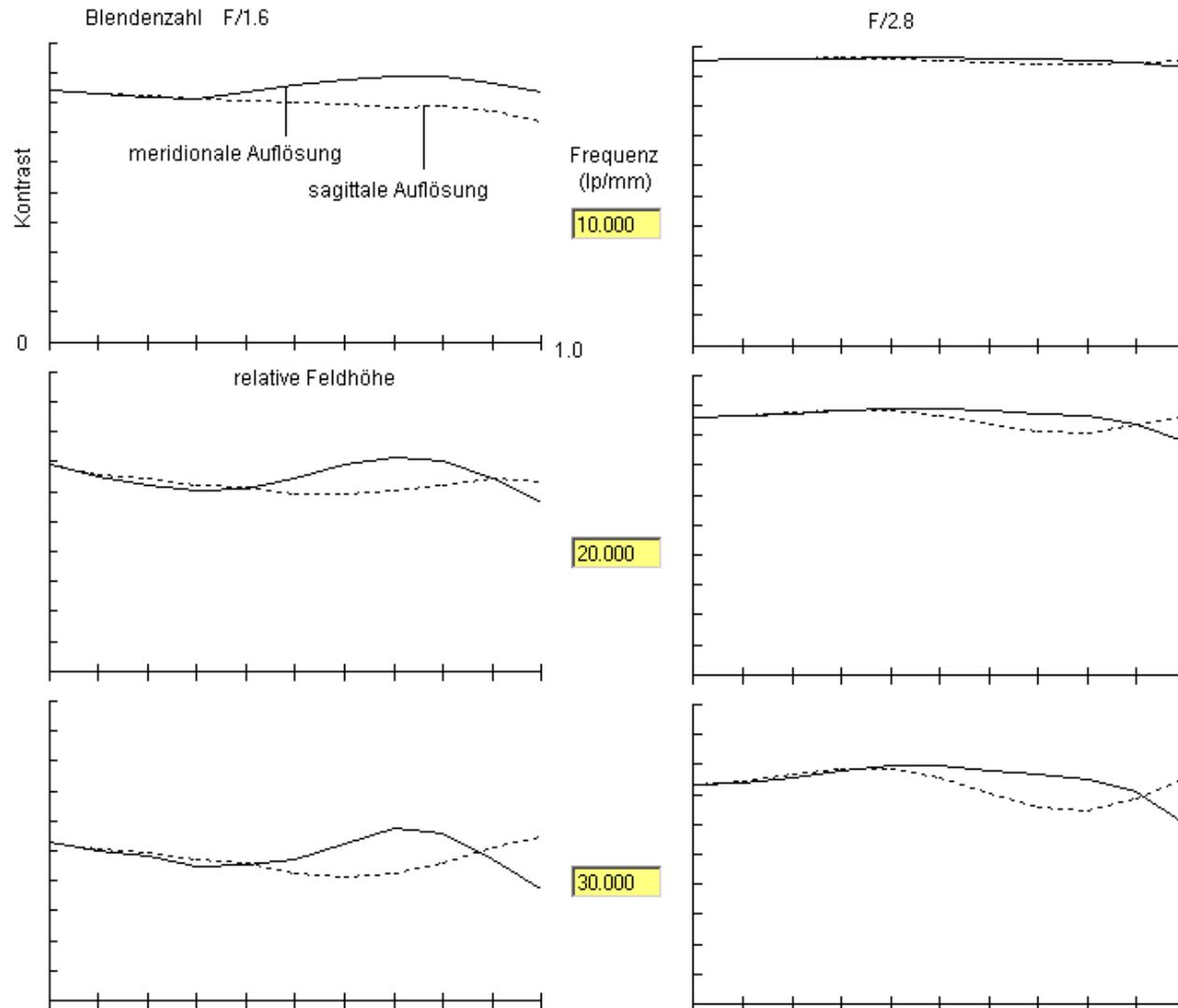
www.linos.de

LINOS

Geometrisch-optische Abbildungsleistung

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Darstellung der GMTF vs Feldhöhe (MTF vs Field):



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

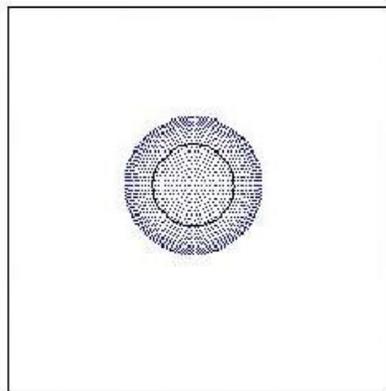
LINOS

Wellenoptische Abbildungsleistung

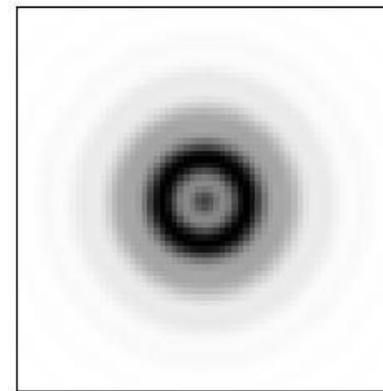
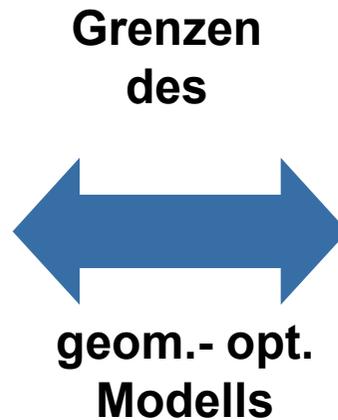
Thomas Thöniß
Manager
R&D

Zur möglichst realitätsnahen Beurteilung der Abbildungsqualität können in einigen Fällen die Phänomene der Interferenz und Beugung nicht vernachlässigt werden. Durch komplexe Formalismen lässt sich das wellenoptische Abbildungsverhalten bestimmen.

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



Geom.-opt. Fokus mit
Airy-Scheibchen



Wellenoptisch errechneter
Fokus (invertiert)

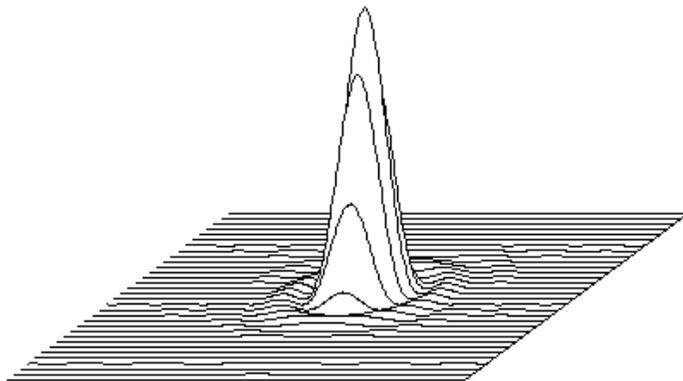
LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

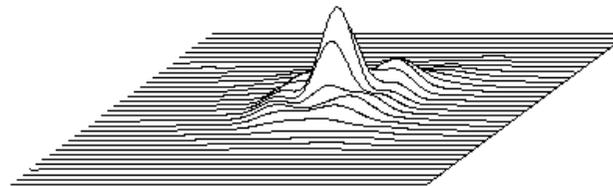
LINOS

Punktbildfunktion (point spread function bzw. PSF):

- Selbst bei idealer geom.-opt. Abbildung kann ein Bildpunkt aus Energieerhaltungsgründen nicht unendlich klein werden (Verhinderung durch Beugung)
- Darstellung der Intensitätsverteilung des wellenoptischen Punktbildes als „Gebirge“ veranschaulicht die wellenoptischen Abbildungseigenschaften eines opt. Systems



Ideales Punktbild bei
aberrationsfreier Abbildung



Reales Punktbild eines
aberrationsbehaftetes opt. System

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Strehlsche Definitionshelligkeit *SDH* (Strehl ratio):

- Auswertung des kompletten Punktbildes ist i. d. R. nicht effektiv
- Vergleich der Gipfelhöhen des idealen und des realen Punktbildes bildet ein sehr anschauliches Kriterium zur wellenoptischen Beurteilung

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

Definition:

Verhältnis der max. Intensität des realen Punktbildes $I_{max, real}$ zur maximal möglichen Intensität des idealen Punktbildes $I_{max, ideal}$:

$$SDH = \frac{I_{max\ real}}{I_{max\ ideal}}$$

Systeme mit $SDH > 0.8$ gelten als beugungsbegrenzt und lassen einen guten Kontrast bei hoher Auflösung erwarten!

Beispiel:

Der Vergleich der beiden gegebenen Punktbilder ergibt einen Strehl-Wert von $SDH = 0.38$.

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

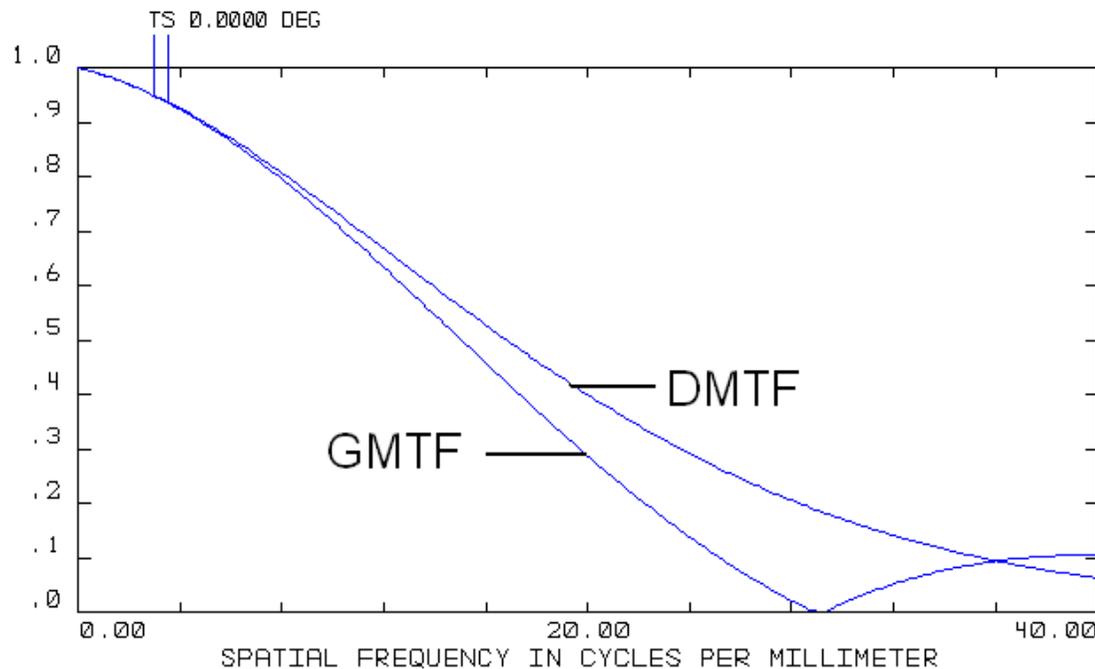
www.linos.de

LINOS

Beugungs-MTF (Diffraction MTF)

- Aus bekanntem Beugungspunktbild kann ähnlich der GMTF die Beugungs-MTF für diesen Punkt errechnet werden
- Darstellung der Beugungs-MTF unterscheidet sich nicht von der geom.-opt. Darstellung
- berücksichtigt die jedoch wellenoptischen Phänomene und ist somit exakter

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme



Vergleich der geom.-opt. MTF und der wellenopt. MTF für ein gegebenes System
(siehe Punktbilder)

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Mathematische Modelle

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Um die verschiedenen physikalischen Abbildungsmodelle handhabbar zu machen, bedient man sich verschiedener mathematischer, analytischer Modelle.

Kollineares Modell (Gaußsche Kollineation):

- einfachstes mathematisches Modell basierend auf simplen trigonometrischen Beziehungen
- Erlaubt paraxiale Beschreibung komplexester Systeme auf der Basis von Kardinalen (z.B. Hauptpunkte, Brennpunkte usw.) durch z.B. die paraxialen Abbildungsgleichungen:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a'} - \frac{1}{a} \quad \text{oder auch} \quad \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a}$$

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

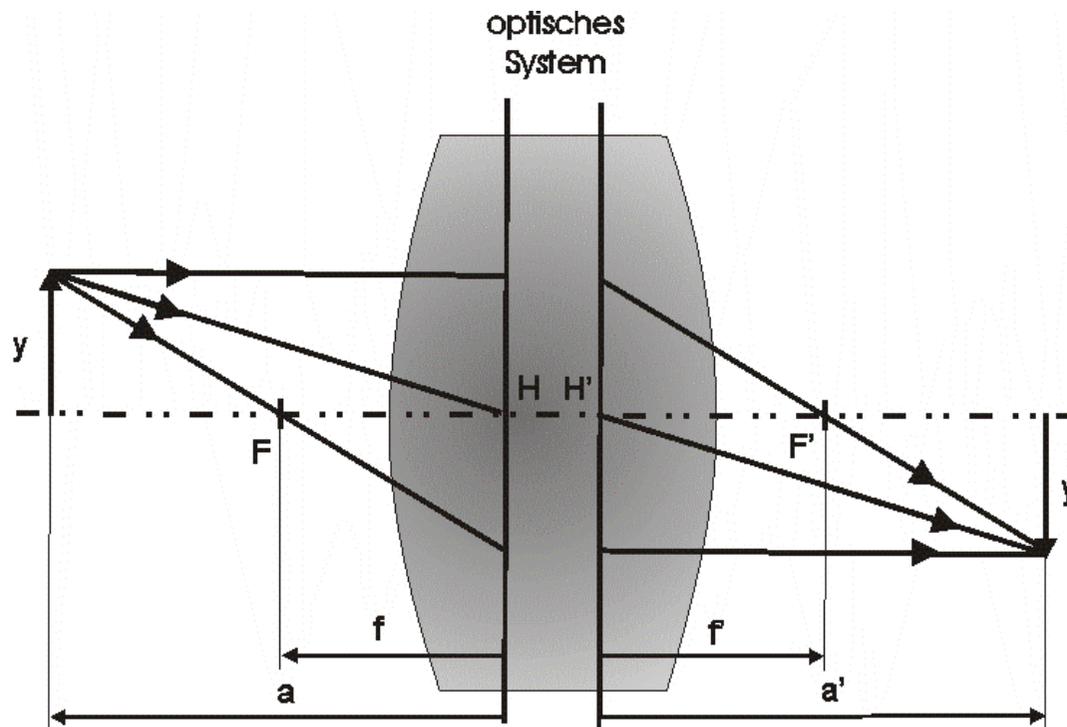
LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Veranschaulichung der kollinearen Abbildung:

Listingsche Strahlkonstruktion:



- Hauptpunktstrahl bleibt Hauptpunktstrahl
- Achsparallelstrahl wird zu Brennpunktstrahl
- Brennpunktstrahl wird zu Achsparallelstrahl

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Fehlermodell 3. Ordnung:

- Bei der geschlossenen Durchrechnung von Strahlen durch eine Vielzahl von Flächen wird Rechenaufwand enorm (Bsp.: Exakte Schnittweitenformel)
- Komplexität durch Auftreten von Winkeln und Winkelfunktionen
- Ersatz der Winkelfunktionen durch Taylor-Reihen z.B.:

$$\sin \sigma = \sigma - \frac{\sigma^3}{3!} + \frac{\sigma^5}{5!} \dots$$

- Abbruch nach erstem Glied der ersten Ordnung führt zu paraxialen Gleichungen
- Abbruch nach zweitem Glied der dritten Ordnung bildet eine gute Näherung an die exakten Durchrechnungsformeln und erlaubt Zusammenfassung spez. für die Abbildungsfehler relevanter Terme

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Seidelsches Fehlermodell 3. Ordnung:

- Bekannteste Fehlermodell 3. Ordnung durch Seidel (1856)
- Zuordnung von 5 spez. Termen zu den 5 monochromatischen Abbildungsfehlern
- Nur durch Vorgabe von Strahlanfangskordinaten und Konstruktionsparametern kann Aussage über Verteilung (durch Flächenteilkoeffizienten) und Größe von vorhandenen Abbildungsfehlern hinsichtlich ihres Beitrages zu Queraberrationen gemacht werden.

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

$$\sum_i M = \sum_i \bar{\Phi}_i + 2e_{12} \frac{h_2}{h_1} \beta_2 + 2 \frac{h_3}{h_1} \frac{e_{12} \frac{h_3}{h_1} + e_{23}}{\frac{h_2}{h_1}} \beta_3 + e_{12}^2 \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^2 \alpha_2 + \left(\frac{h_3}{h_1} \right)^2 \left(\frac{e_{12} \frac{h_3}{h_1} + e_{23}}{\frac{h_2}{h_1}} \right)^2 \alpha_3$$

mit $\alpha_i = \left[\left(\frac{n_i}{n_i - 1} \right)^2 \bar{\Phi}_i^3 + \frac{3n_i + 1}{n_i + 1} \bar{\Phi}_i^2 \frac{1}{a_i} + \frac{3n_i + 2}{n_i} \bar{\Phi}_i \left(\frac{1}{a_i} \right)^2 \right] - \frac{1}{r_i} \left(\frac{2n_i + 1}{n_i - 1} \bar{\Phi}_i^2 + \frac{4(n_i + 1)}{n_i} \bar{\Phi}_i \frac{1}{a_i} \right) + \left(\frac{1}{r_i} \right)^2 \left(\frac{n_i + 2}{n_i} \bar{\Phi}_i \right)$

und $\beta_i = \left(-\frac{n_i}{n_i - 1} \bar{\Phi}_i^2 - \frac{2n_i + 1}{n_i} \bar{\Phi}_i \frac{1}{a_i} \right) + \frac{1}{r_i} \left(\frac{n_i + 1}{n_i} \bar{\Phi}_i \right)$

Beispiel für „einfache“ Seidelsche Fehlersumme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

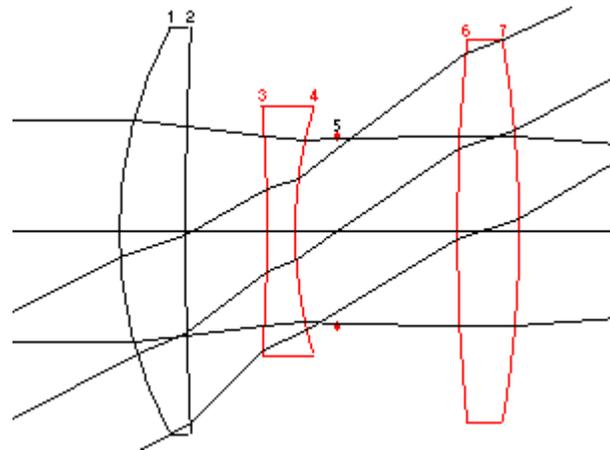
www.linos.de

LINOS

Mathematische Modelle

Thomas Thöniß
Manager
R&D

Seidelsches Bildfehler für z.B. Cooke-Triplet:



Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

	#	Surf	SphAbn	Coma	Astig	PtzCv	Distn	CI	CII
Totals			0.00144	-0.0023	-0.0102	0.0398	-0.0147	0.000974	0.001050
1	1		0.02560	-0.0225	0.0198	0.1596	-0.1577	0.010493	-0.009224
2			0.00626	0.0351	0.1969	-0.0179	1.0038	0.004372	0.024520
3	2		-0.02009	-0.0703	-0.2461	-0.0399	-1.0007	-0.009806	-0.034314
4			-0.01730	0.0411	-0.0976	-0.1591	0.6096	-0.011401	0.027072
5	3	*	0.00000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.000000	0.000000
6	4		0.00060	-0.0057	0.0538	0.0368	-0.8570	0.002380	-0.022513
7			0.00638	0.0200	0.0630	0.0602	0.3873	0.004935	0.015509

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Abhängigkeit der Bildfehler 3. Ordnung:

Durch Auswertung der Seidelschen Fehlerterme lassen sich die 5. monochromatischen Bildfehler (genauer Ihr Beitrag zur Queraberration) hinsichtlich ihrer Abhängigkeit der Potenz von Öffnung und Feld systematisieren:

		Feld (Potenz)			
		0.	1.	2.	3.
Öffnung (Potenz)	0.			Proz. Verzeichn.	Verzeichn.
	1.			Astig. Feldwölb.	
	2.		Koma		
	3.	Öffnungs- fehler			

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS

Quellen:

- [1] H. Haferkorn, Optik – Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen, Verlag Wiley-VCH, Weinheim, 2003
- [2] H. Haferkorn, Bewertung optischer Systeme, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin, 1986
- [3] C. Hofmann, Harry Zöllner, Feingerätetechnik 22 (1973), S. 151-159
- [4] M. v. Rohr, Theorie und Geschichte des photographischen Objektivs, Verlag Julius Springer, Berlin, 1899
- [5] C. Hofmann, Die optische Abbildung, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig K.-G., Leipzig, 1980
- [6] M. Berek, Grundlagen der praktischen Optik – Analyse und Synthese optischer Systeme, Verlag Walter de Gruyter, Berlin, 1970
- [7] WinLens 3D Software-Paket, LINOS Photonics GmbH & Co. KG
- [8] H. A. Buchdahl, Optical Aberration Coefficients, Dover Publications, New York, 1968

Abbildungsfehler /
Abbildungsleistungen
optischer Systeme

LINOS Photonics
GmbH & Co. KG
Königsallee 23
37081 Göttingen

www.linos.de

LINOS