

---

# **Bewertung optischer Systeme**

## **7. Gütekriterien**

Herbert Gross

# Inhalt / Übersicht

---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienuflösung
- 7.8 Kantenuflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Inhalt / Übersicht

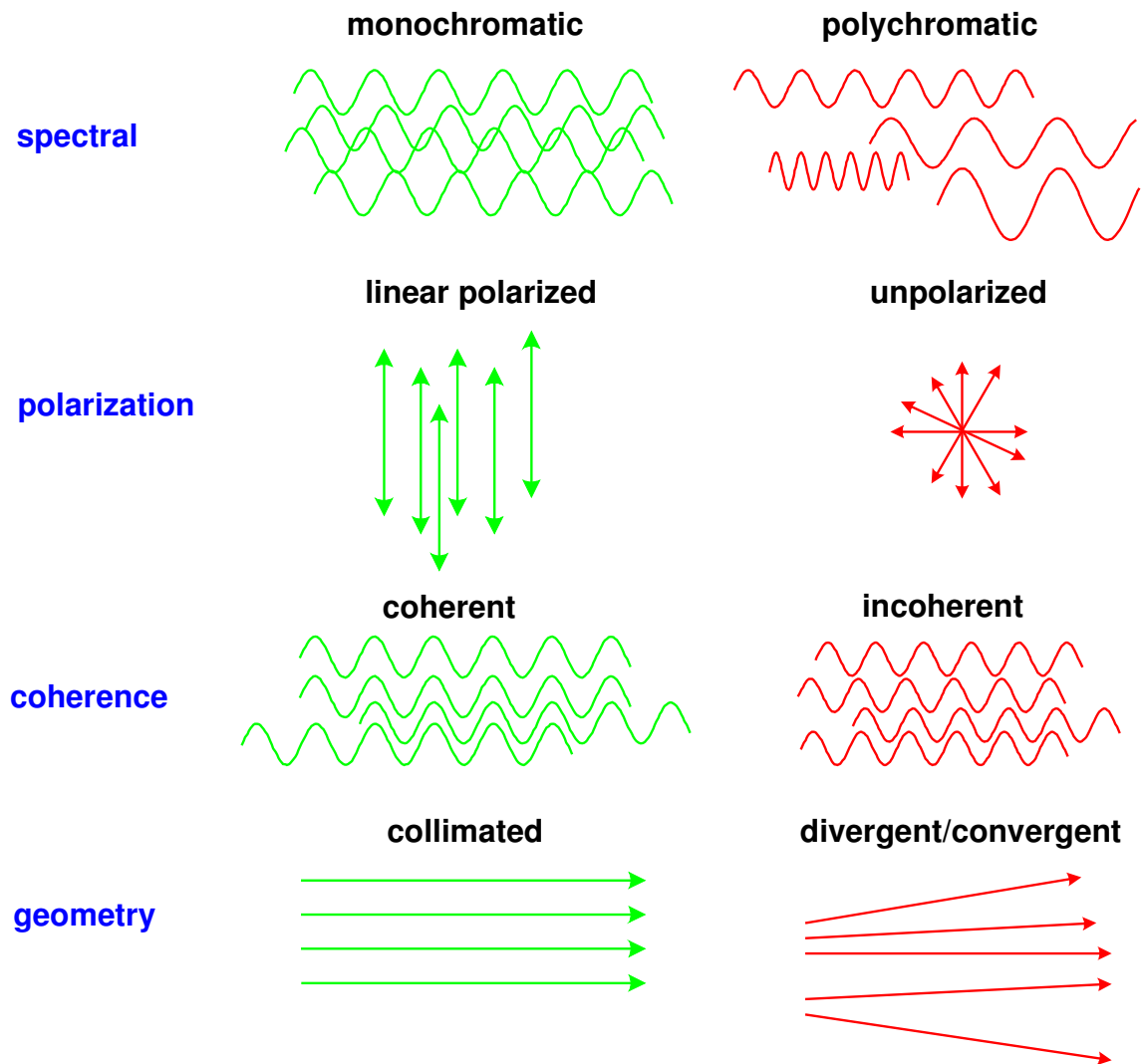
---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienauflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Arten von Gütekriterien

- Eigenschaften des Lichtes



# Qualitätskriterien / Überblick

---

- Geometrisch-optische Kriterien :
  - Bildfehler
  - Spotdiagramme
  - Homogenität Beleuchtungsintensität
- Wellenfläche :
  - Aberrationskoeffizienten
  - PV-, Rms-Wert
- Punktbild :
  - Strehlsche Definitionshelligkeit
  - Momente der Verteilung
- Auflösung und Kontrast :
  - 2-Punktauflösung
  - Modulationsübertragungsfunktion, Kontrast und Linienuflösung
  - Kantenschärfe
- Sonstige :
  - $M^2$
  - Energiefunktion
  - Fidelity, Sharpness, Korrelation, Strukturgehalt,...

# Inhalt / Übersicht

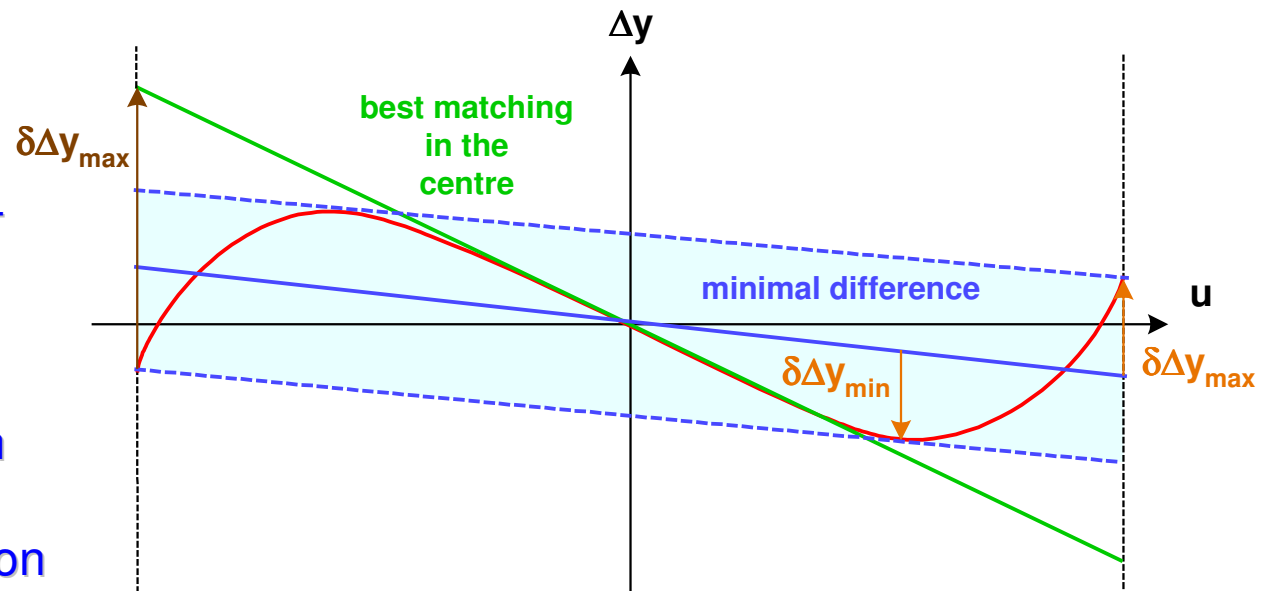
---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienauflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

## Beste Auffangebene

- Beste Auflösung :  
Bildkern optimiert,  
Tangente an Querabweichungskurve
- Bester Kontrast :  
Ausgemittelte Gerade an  
Querabweichungskurve,  
kleinste Maximalaberration
- Verschiedene Kriterien liefern  
allgemein andere bestmögliche Auffang-Ebenen

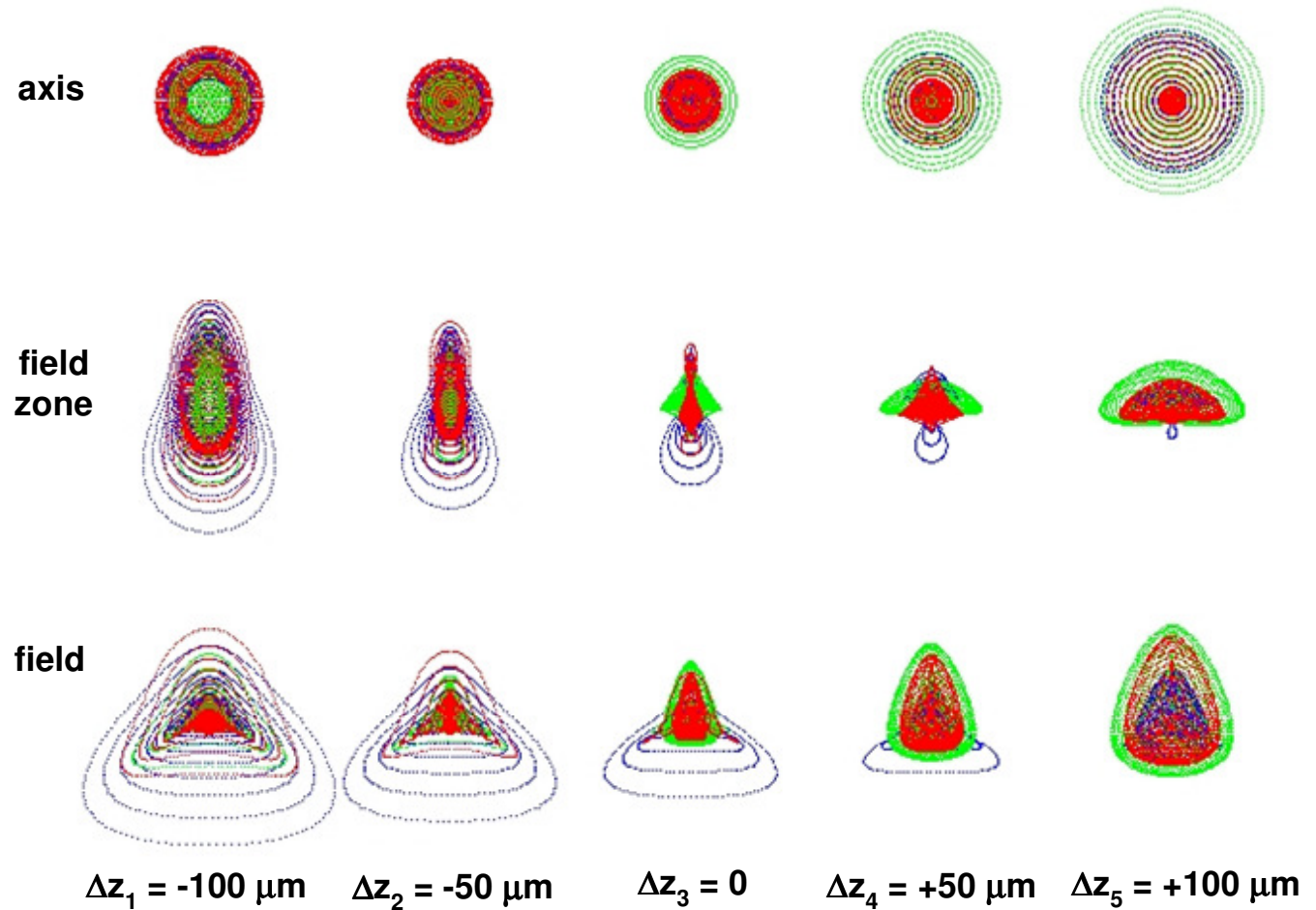


$$\frac{\partial W_{rms}}{\partial \Delta z} = 0$$

$$\frac{\partial D_s}{\partial \Delta z} = 0$$

# Beste Fokusebene

- Allgemeine Funktion von Farbe und Feldposition
- Geometrischer Spot

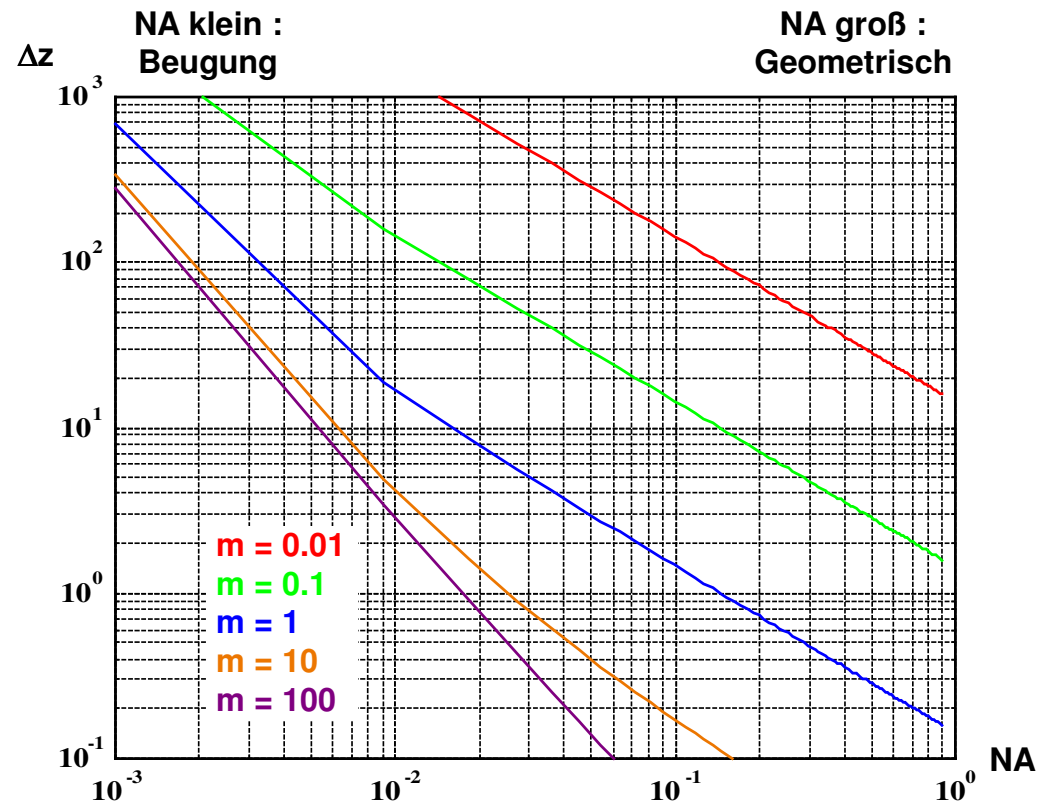




# Schärfentiefe : visuell

- Schärfentiefe bei visueller Betrachtung :
  - Modell nach Abbe / Berek
  - Grenzwinkel 2' angenommen
  - Geometrischer und Beugungsanteil
  - Augen-Akkommodation geht ein
  - Systemvergrößerung m geht ein
  - halb-empirisches Ergebnis ( Din-Norm )

$$\Delta z_{vis} = \frac{\lambda}{2 \cdot NA^2} + \frac{[mm]}{7 \cdot m \cdot NA}$$



# Inhalt / Übersicht

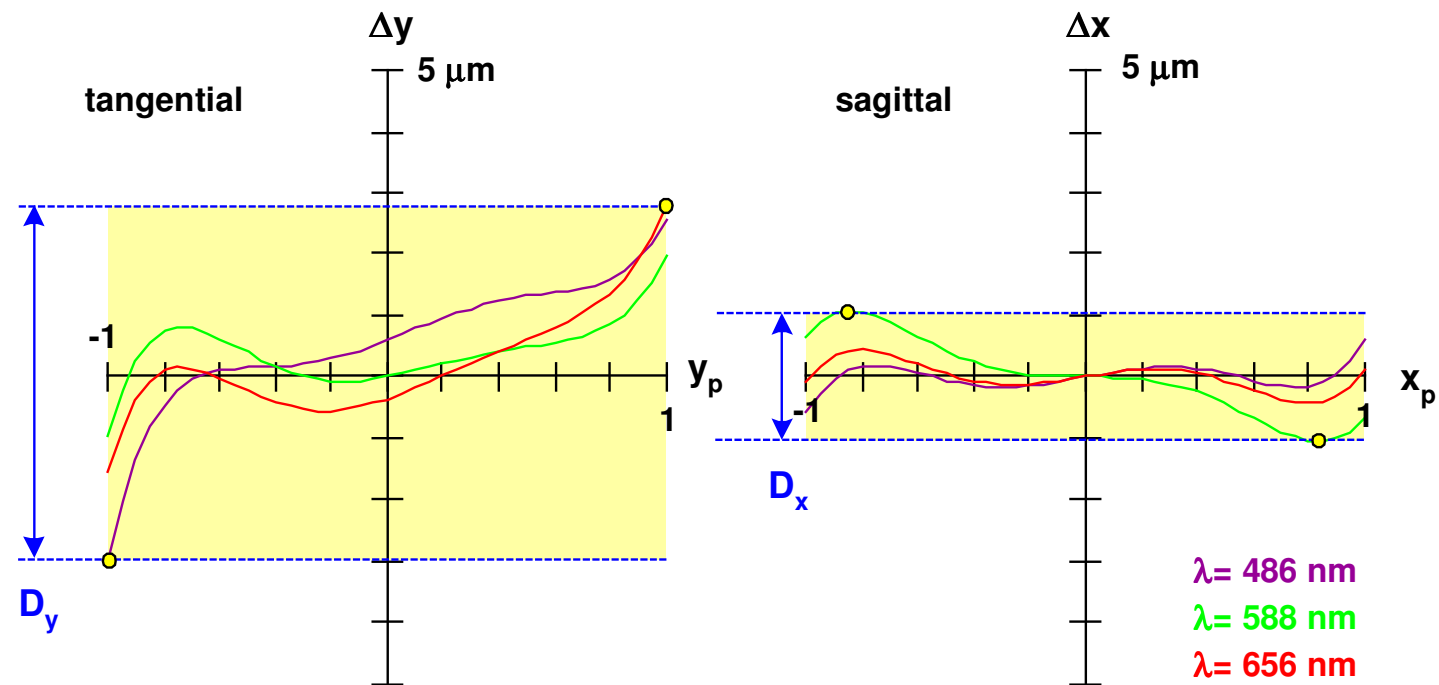
---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienauflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

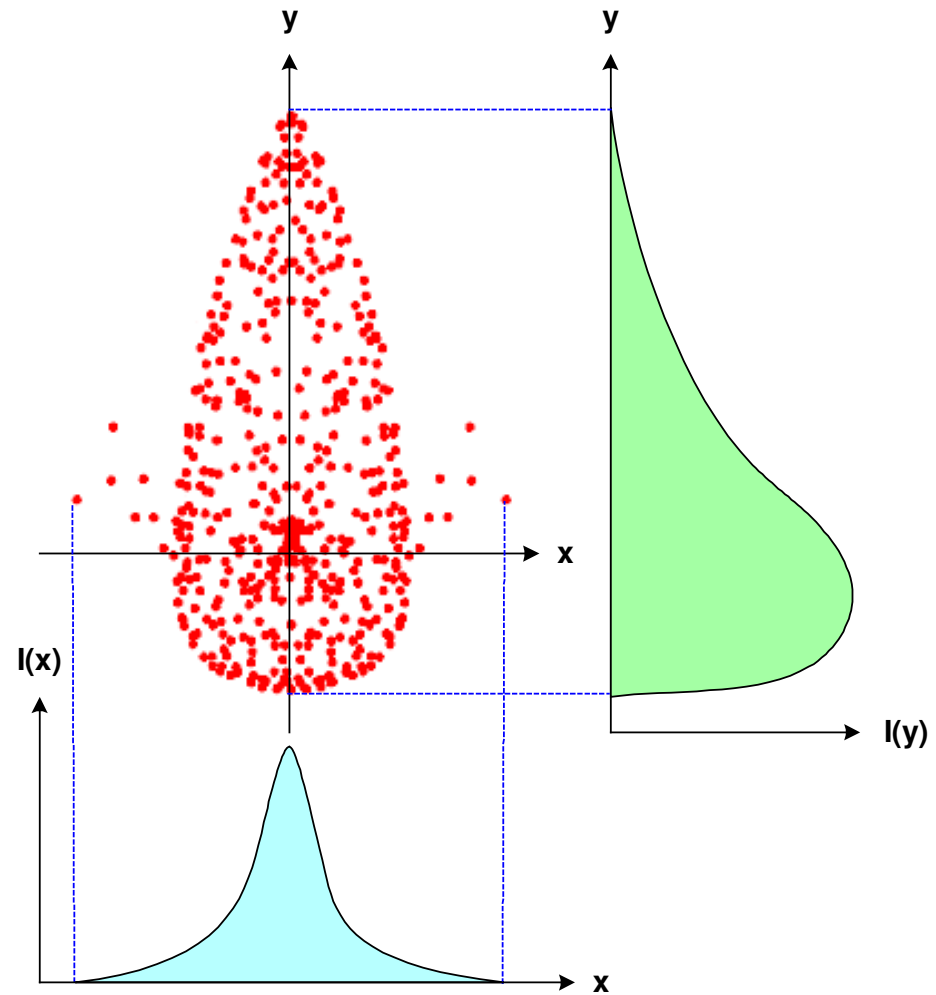
# Transversale Aberrationen

- Klassische Bildfehlerkurven
- Relation zum Spotdiagramm
- In der Regel nur Rasterung der Pupille auf den Achsen, keine Information über die Quadranten



# Transversale Aberrationen

- Strahldichte im Spotdiagramm
- Geometrische Näherung für die Intensitätsverteilung



# Gaussmoment

- Beliebige Spotfigur mit Querabweichungen  $\Delta x_j$  und  $\Delta y_j$ .  
Schwerpunkt der Figur  $\varnothing = 2 \cdot \sqrt{M_G}$

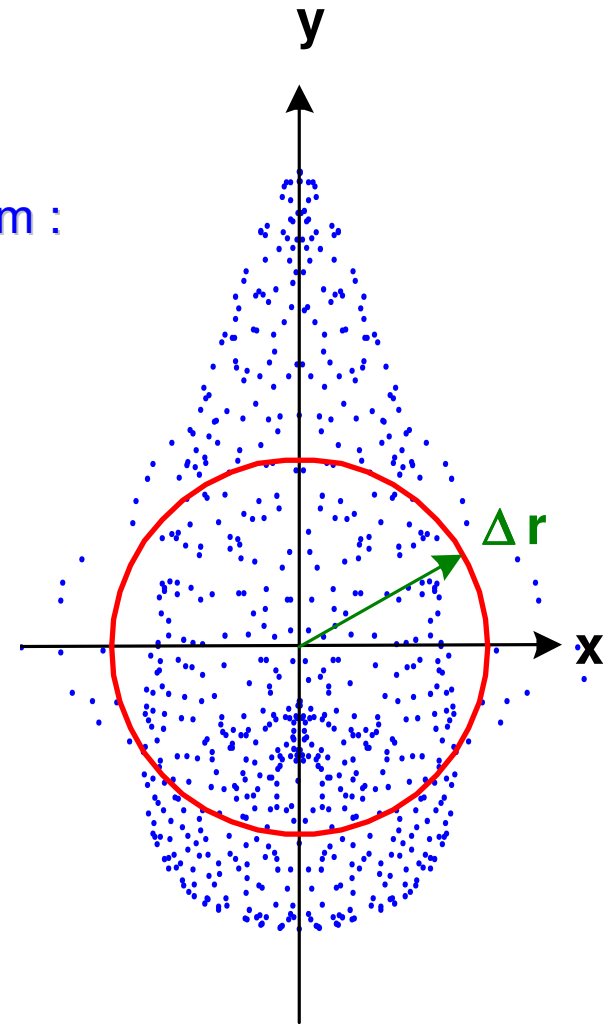
Ausdehnung der Zerstreungsfigur und Qualitätskriterium :  
Gaußmoment, Trägheitsmoment der Punktverteilung

$$\langle \Delta x_s \rangle = \frac{1}{N} \sum_j \Delta x_j \quad \langle \Delta y_s \rangle = \frac{1}{N} \sum_j \Delta y_j$$

$$M_G = \langle \Delta r^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_j \left[ (\Delta x_j - \langle \Delta x_s \rangle)^2 + (\Delta y_j - \langle \Delta y_s \rangle)^2 \right]$$

- Durchmesser des Spots abschätzen
- Systeme mit Apodisation :  
Strahlen mit Gewichtsfaktoren  $g_j$

$$M_G = \langle \Delta r^2 \rangle = \frac{1}{N_G} \sum_j g_j \cdot \left[ (\Delta x_j - \langle \Delta x_s \rangle)^2 + (\Delta y_j - \langle \Delta y_s \rangle)^2 \right]$$

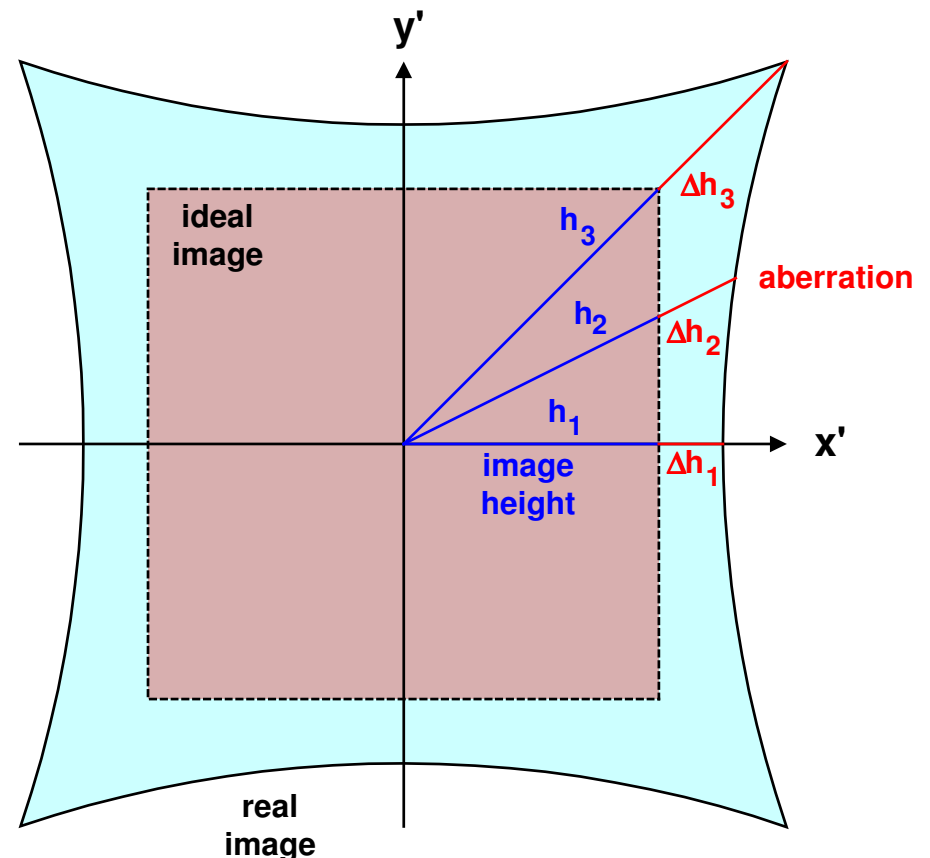


# Verzeichnung

- Verzerrung des Maßstabs über das Bildfeld
- Grund : sphärische und Komaaberration des Hauptstrahls (Öffnungsfehler der Pupillenabbildung )
- Maß für die Verzeichnung : relative Änderung der Bildhöhe

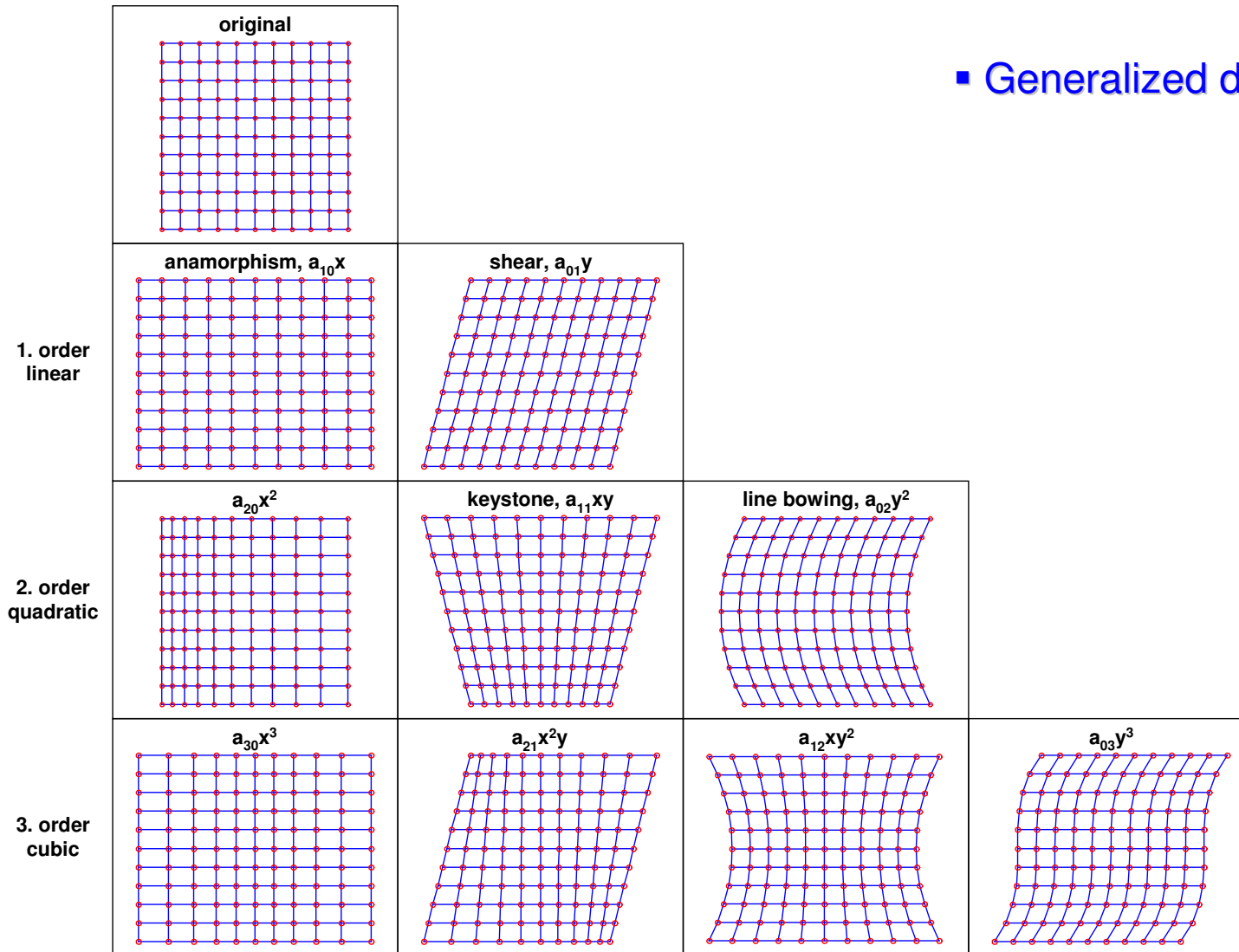
$$V = \frac{y_{real} - y_{ideal}}{y_{ideal}}$$

- Keine Verbreiterung des Bildpunktes
- Tonnenverzeichnung :  $V < 0$   
Linse mit Vorderblende
- Kissenverzeichnung :  $V > 0$   
Linse mit Hinterblende



# Non-Axisymmetric Systems: General Distortion

- Generalized distortion types

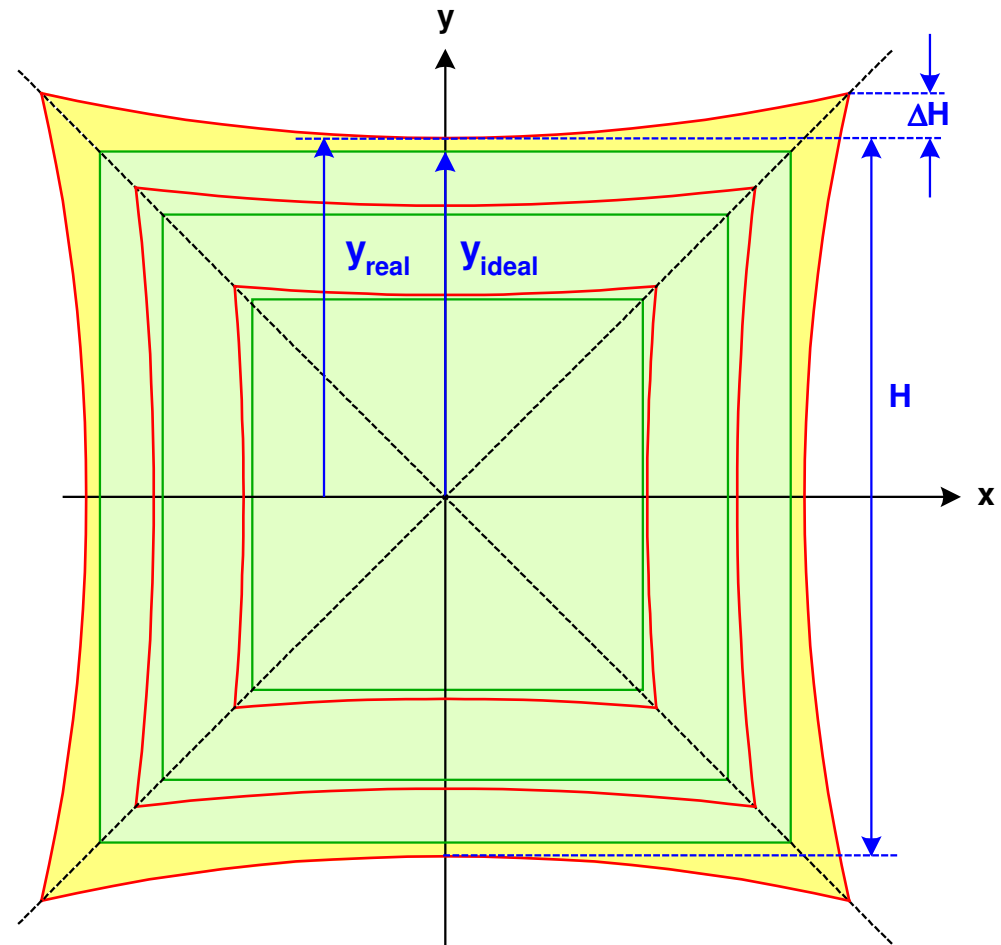


# TV Distortion

- Special definition of TV distortion

$$V_{TV} = \frac{\Delta H}{H}$$

- Measure of bending of lines





# Inhalt / Übersicht

---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienuflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Rayleigh- und Marechalkriterien

---

- Rayleighkriterium:
  - maximale Wellenaberration  $W_{pv} < \lambda/4$
  - System wird beugungsbegrenzt genannt
  - Beginn der destruktiven Interferenz
- Für Rms-Wert der Wellenaberration bei Defokussierung:  
 $W_{rms} < \lambda/14$
- Verallgemeinerung des Rms-Wertes : Marechal-Kriterium
- Damit Kriterien für :
  1. Wellenaberration  $W_{pv}$
  2. Wellenaberration  $W_{rms}$
  3. Strehlzahl  $D_s < 0.80$  (Defokus)
  4. Beliebige Zernike-Koeffizienten
  5. Seidel-Koeffizienten
- Unterschiedliche Koeffizienten je nach Aberrationstyp

# Rayleigh-Kriterium

---

Das Rayleigh-Kriterium sagt ganz pauschal aus, daß ein System als beugungs-  
begrenzt und somit gut korrigiert gilt, wenn der pv-Wert der Wellenaberration die  
Bedingung erfüllt.

$$|W_{PV}| \leq \frac{\lambda}{4}$$

| aberration type         |         | coefficient      |
|-------------------------|---------|------------------|
| defocus                 | Seidel  | $a_{20} = 0.25$  |
| defocus                 | Zernike | $c_{20} = 0.125$ |
| spherical<br>aberration | Seidel  | $a_{40} = 0.25$  |
| spherical<br>aberration | Zernike | $c_{40} = 0.167$ |
| astigmatism             | Seidel  | $a_{22} = 0.25$  |
| astigmatism             | Zernike | $c_{22} = 0.125$ |
| coma                    | Seidel  | $a_{31} = 0.125$ |
| coma                    | Zernike | $c_{31} = 0.125$ |

# Marechal-Kriterium

Für Defokussierung führt das Rayleigh-Kriterium auf den Rms-Wert

$$W_{rms}^{Rayleigh} \leq \frac{\lambda}{\sqrt{192}} = \frac{\lambda}{13.856} \approx \frac{\lambda}{14}$$

Man verallgemeinert diesen Grenzwert auch auf andere Bildfehler :  
Marechalkriterium

| aberration type                   |         | coefficient  |
|-----------------------------------|---------|--|
| defocus                           | Seidel  | $a_{20} = \frac{1}{4} = 0.25$                              |
| defocus                           | Zernike | $c_{20} = \frac{1}{8} = 0.125$                             |
| spherical aberration              | Seidel  | $a_{40} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\frac{5}{192}} = 0.2421$ |
| spherical aberration with defocus |         | $b_{40} = 6 \cdot \sqrt{\frac{5}{192}} = 0.9682$           |
| spherical aberration              | Zernike | $c_{40} = \sqrt{\frac{5}{192}} = 0.1614$                   |
| astigmatism                       | Seidel  | $a_{22} = \frac{4}{\sqrt{192}} = 0.2887$                   |
| astigmatism with defocus          |         | $b_{22} = 2 \cdot \sqrt{\frac{6}{192}} = 0.3536$           |
| astigmatism                       | Zernike | $c_{22} = \frac{1}{\sqrt{32}} = 0.1768$                    |
| coma                              | Seidel  | $a_{31} = \frac{2}{\sqrt{91}} = 0.2097$                    |
| coma with tilt                    |         | $b_{31} = \frac{6}{\sqrt{91}} = 0.6124$                    |
| coma                              | Zernike | $c_{31} = \frac{2}{\sqrt{91}} = 0.2097$                    |

# Inhalt / Übersicht

---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 **Wellenaberrationen**
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienauflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Wellenaberrationen

---

- Mittlere quadratische Wellenfrontdeformation (  $W_{Rms}$ , root mean square )

$$W_{rms} = \sqrt{\langle W^2 \rangle - \langle W \rangle^2} = \sqrt{\frac{1}{A_{Exp}} \iint [W(x_p, y_p) - W_{mean}(x_p, y_p)]^2 dx_p dy_p}$$

Dabei ist

$$A_{Exp} = \iint dx dy$$

die Fläche der Austrittspupille ( in normierten Koordinaten bei kreisförmiger Öffnung : Wert  $\pi$  )

- Peak-valley-Wert  $W_{pv}$  : maximale Differenz

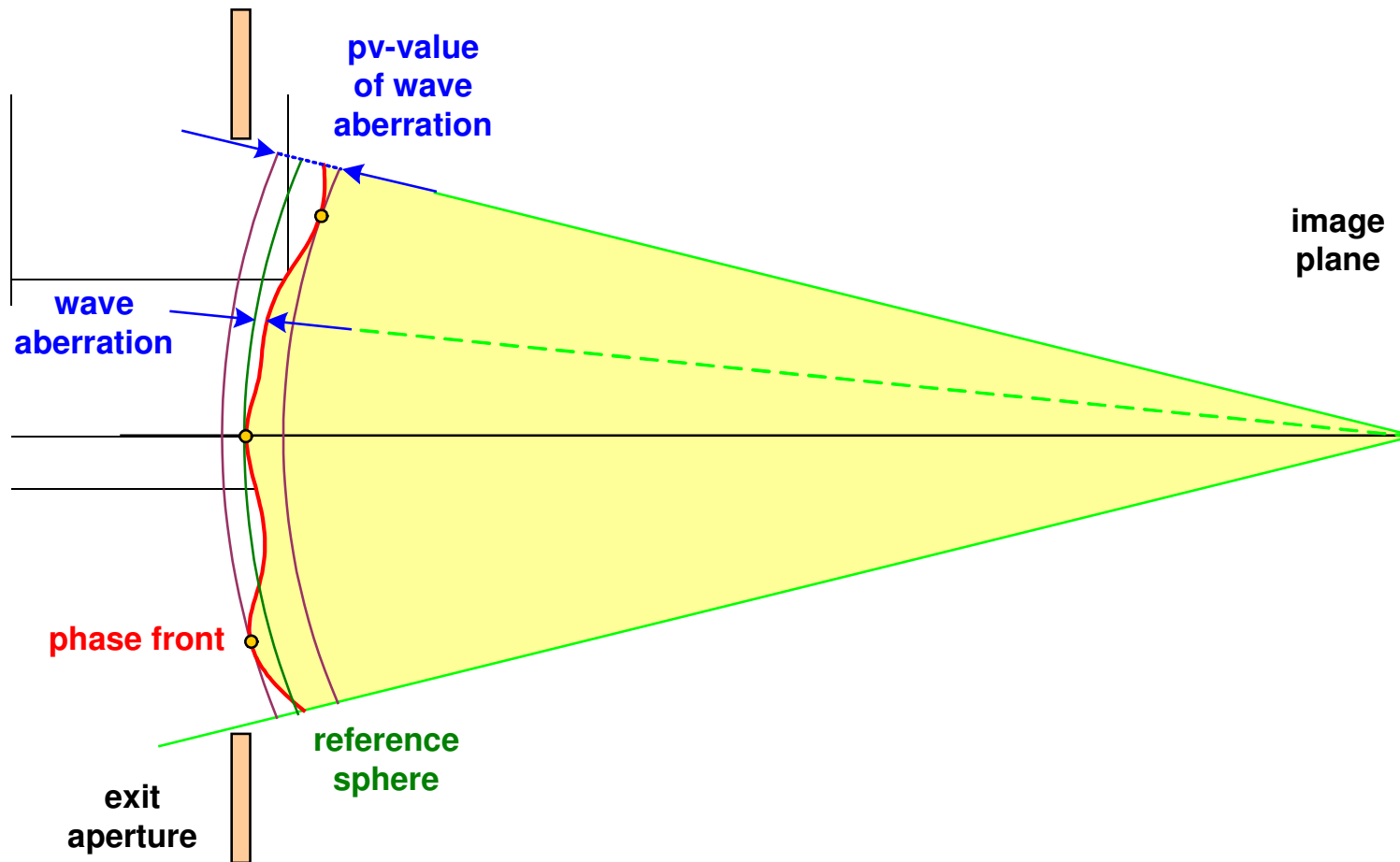
$$W_{pv} = \max [W_{\max}(x_p, y_p) - W_{\min}(x_p, y_p)]$$

- Allgemein : Gewichtung mit der Ausleuchtung ( Pupillenintensität )

$$W_{rms} = \sqrt{\frac{1}{A_{Exp}^{(w)}} \iint I_{Exp}(x_p, y_p) \cdot [W(x_p, y_p) - W_{mean}^{(w)}(x_p, y_p)]^2 dx_p dy_p}$$

# Wave Aberration

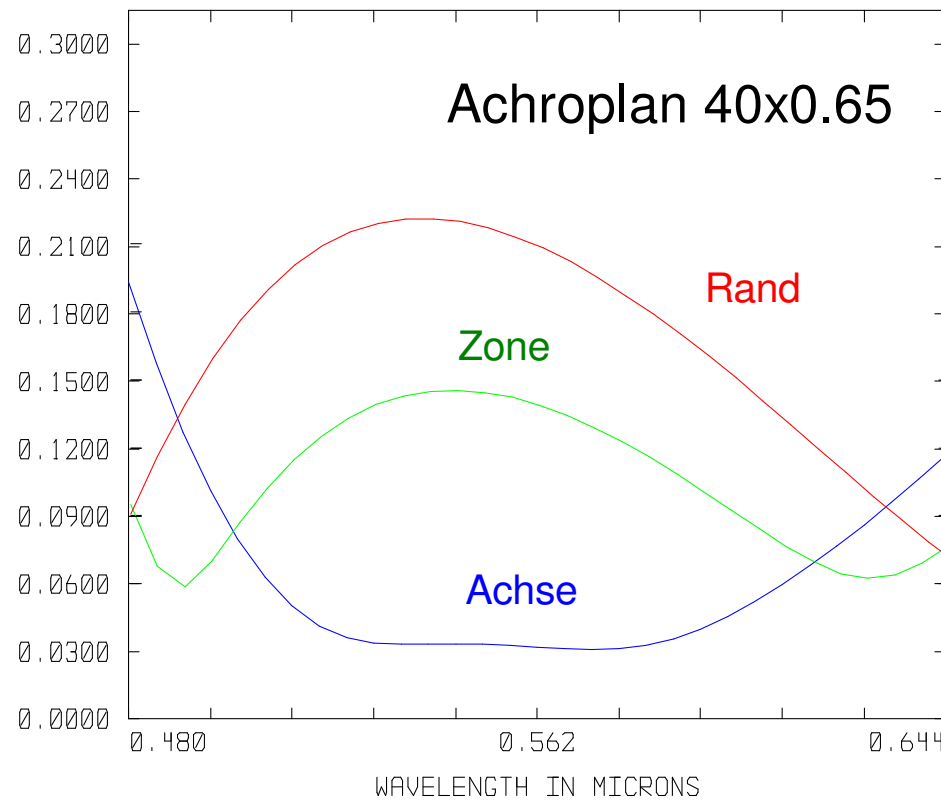
- Definition des PV-Wertes



# Tolerierung der Wellenaberrationen

---

- Darstellung der Korrektur eines Systems :  
 $W_{\text{rms}}$  für Achse Feldzone und Feldrand über der Wellenlänge





# Tolerierung der Zernike-Koeffizienten

---

- Es gilt für den Rms-Wert bei gegebenen Zernikekoeffizienten angenähert:

$$W_{rms} = \sqrt{\sum_{n,m} c_{nm}^2 \cdot \frac{1 + \delta_{m0}}{2(n+1)}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N \frac{c_{n0}^2}{n+1} + \frac{1}{2} \cdot \sum_{n=1}^N \sum_{m=0}^n \frac{c_{nm}^2}{n+1}}$$

- Es gibt verschiedene Nomenklaturen der Zernikekoeffizienten :
  - Standard
  - Fringe
  - Nijboer-Zernike
- Unterschiede : Skalierung / Indizierung

$$Z_{nm}^{(standard)}(x_p, y_p) = \sqrt{\frac{1 + \delta_{m0}}{2(n+1)}} \cdot Z_{nm}^{(fringe)}(x_p, y_p)$$

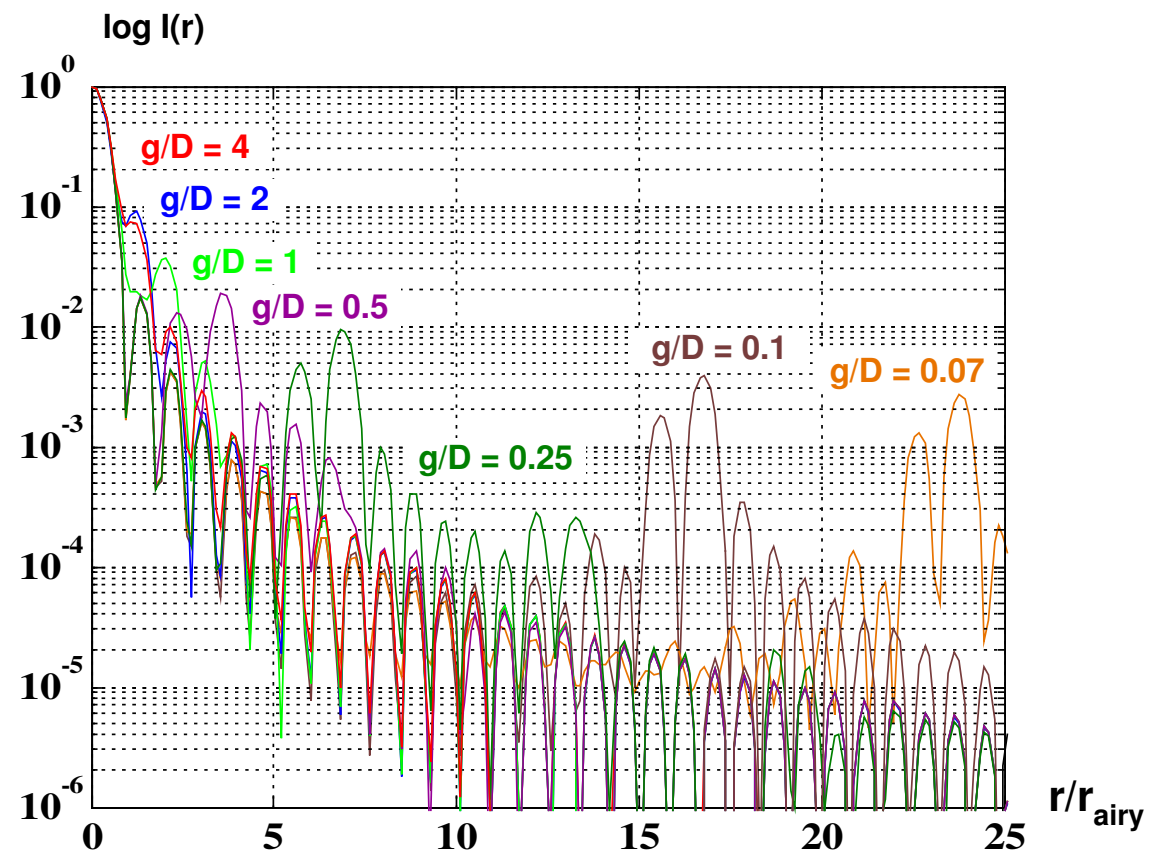
$$Z_{nm}^{(nijboer)}(x_p, y_p) = \sqrt{\frac{\pi \cdot (1 + \delta_{m0})}{n+1}} \cdot Z_{nm}^{(fringe)}(x_p, y_p)$$

## PV- / rms-Wert

| aberration type                   |         | definition  | mean<br>$W_{\text{mean}}$ | peak-<br>valley<br>$W_{\text{PV}}$ | root mean square<br>$W_{\text{rms}}$             |
|-----------------------------------|---------|---|---------------------------|------------------------------------|--|
| defocus                           | Seidel  | $a_{20} \cdot r_p^2$  | $\frac{a_{20}}{2}$        | $a_{20}$                           | $\frac{a_{20}}{2\sqrt{3}} = 0.289 \cdot a_{20}$  |
| defocus                           | Zernike | $c_{20} \cdot (2r_p^2 - 1)$                                     | 0                         | $2c_{20}$                          | $\frac{c_{20}}{\sqrt{3}} = 0.577 \cdot c_{20}$   |
| spherical aberration              | Seidel  | $a_{40} \cdot r_p^4$  | $\frac{a_{40}}{3}$        | $a_{40}$                           | $\frac{2a_{40}}{3\sqrt{5}} = 0.298 \cdot a_{40}$ |
| spherical aberration with defocus |         | $b_{40} \cdot (r_p^4 - r_p^2)$                                  | $-\frac{b_{40}}{6}$       | $\frac{b_{40}}{4}$                 | $\frac{b_{40}}{6\sqrt{5}} = 0.075 \cdot b_{40}$  |
| spherical aberration              | Zernike | $c_{40} \cdot (6r_p^4 - 6r_p^2 + 1)$                            | 0                         | $\frac{3c_{40}}{2}$                | $\frac{c_{40}}{\sqrt{5}} = 0.447 \cdot c_{40}$   |
| astigmatism                       | Seidel  | $a_{22} r_p^2 \cos^2 \theta$                                    | $\frac{a_{22}}{4}$        | $a_{22}$                           | $\frac{a_{22}}{4} = 0.25 \cdot a_{22}$           |
| astigmatism with defocus          |         | $b_{22} \left( r_p^2 \cos^2 \theta - \frac{1}{2} r_p^2 \right)$ | 0                         | $b_{22}$                           | $\frac{b_{22}}{2\sqrt{6}} = 0.204 \cdot b_{22}$  |
| astigmatism                       | Zernike | $c_{22} (2r_p^2 \cos^2 \theta - r_p^2)$                         | 0                         | $2c_{22}$                          | $\frac{c_{22}}{\sqrt{6}} = 0.408 \cdot c_{22}$   |
| coma                              | Seidel  | $a_{31} r_p^3 \cos \theta$                                      | 0                         | $2a_{31}$                          | $\frac{a_{31}}{2\sqrt{2}} = 0.353 \cdot a_{31}$  |
| coma with tilt                    |         | $b_{31} \left( r_p^3 - \frac{2}{3} r_p \right) \cos \theta$     | 0                         | $\frac{2b_{31}}{3}$                | $\frac{b_{31}}{6\sqrt{2}} = 0.118 \cdot b_{31}$  |
| coma                              | Zernike | $c_{31} (3r_p^3 - 2r_p) \cos \theta$                            | 0                         | $2c_{31}$                          | $\frac{c_{31}}{2\sqrt{2}} = 0.353 \cdot c_{31}$  |

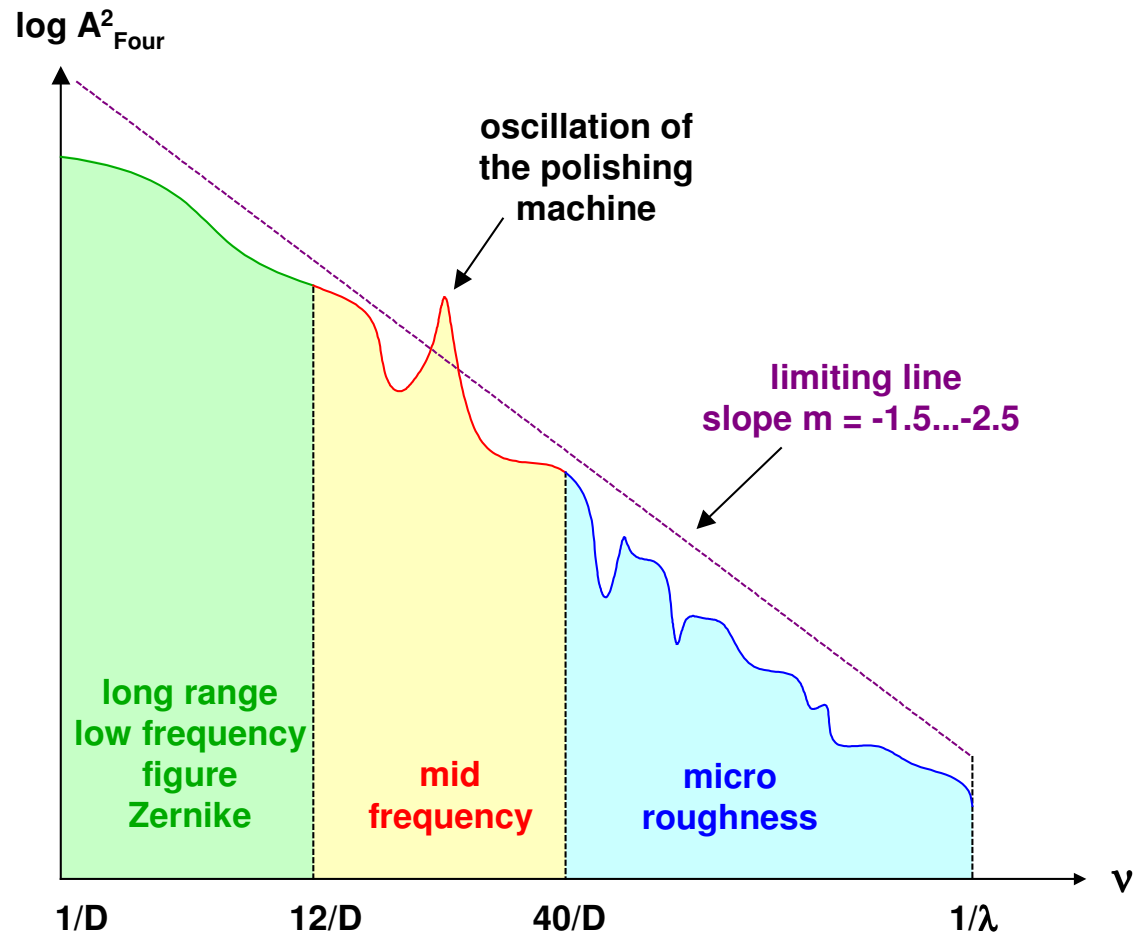
# Ortsfrequenz der Störung

- Die Ortsfrequenz der Wellenfrontstörung legt den Einfluß auf die Psf fest :
  - figure error : Zernike
  - midfrequency range
  - high frequency : Rauigkeit



# Ortsfrequenz der Störung

- Darstellung der Power spectral density über der Ortsfrequenz



# Inhalt / Übersicht

---

## 7. Gütekriterien

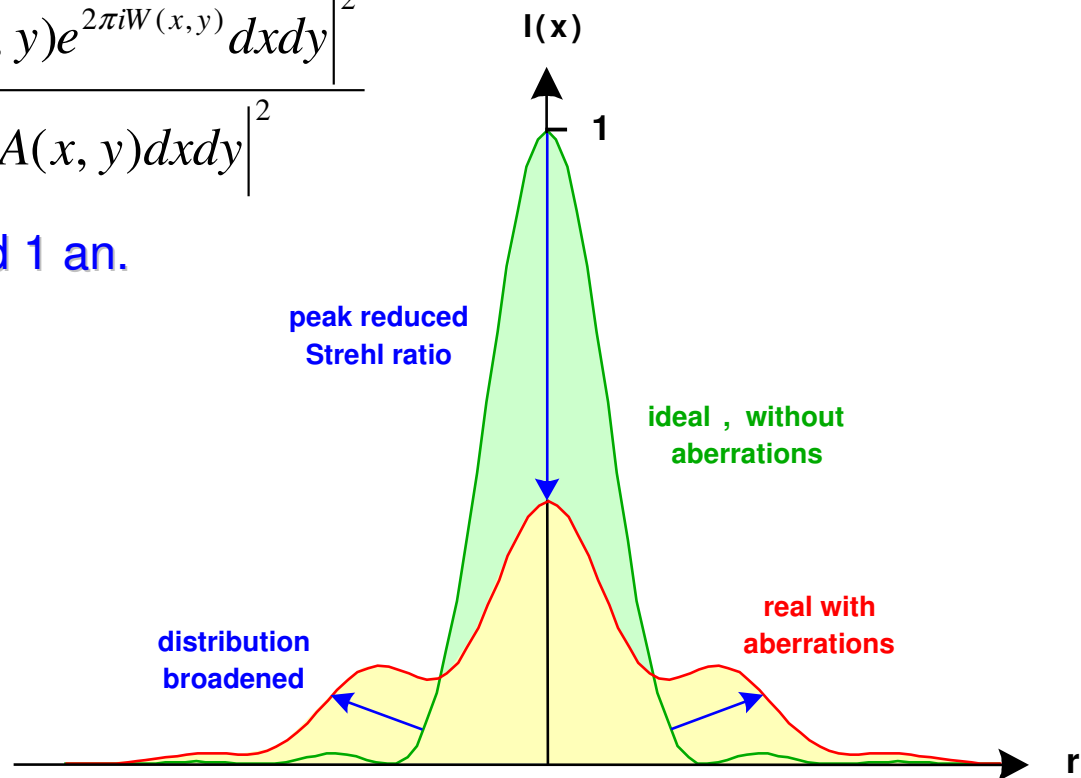
- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 **Punktbild und Punktauflösung**
- 7.7 MTF, Linienuflösung
- 7.8 Kantenuflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Strehlsche Definitionshelligkeit

- Wichtiges wellenoptisches Bewertungskriterium :  
Strehlsche Definitionshelligkeit.  
Verhältnis der Peakintensität im Punktbild mit Aberrationen zu dem ohne Aberrationen auf dem Bezugsstrahl

$$D_S = \frac{I_{PSF}^{(real)}(0,0)}{I_{PSF}^{(ideal)}(0,0)} \quad D_S = \frac{\left| \iint A(x,y) e^{2\pi i W(x,y)} dx dy \right|^2}{\left| \iint A(x,y) dx dy \right|^2}$$

- $D_S$  nimmt Werte zwischen 0 und 1 an.  
Ideal ist  $D_S = 1$
- Die Bewertung erfolgt mit nur einer einzigen Zahl, was problematisch ist.



## Definitionshelligkeit und Rayleighkriterium

---

Im Fall einer reinen Defokussierung führt das Rayleighkriterium mit einer PV-Wellenaberration von  $\lambda / 4$  auf die Definitionshelligkeit

$$D_S = \frac{8}{\pi^2} = 0.8106 \approx 0.8$$

Man setzt daher näherungsweise das Rayleigh-Kriterium mit beugungsbegrenzter Korrektur der Forderung

$D_S > 80 \%$  gleich.

| aberration type      |         | coefficient      | Marechal approximated Strehl | exact Strehl               |
|----------------------|---------|------------------|------------------------------|----------------------------|
| defocus              | Seidel  | $a_{20} = 0.25$  | 0.7944                       | $\frac{8}{\pi^2} = 0.8106$ |
| defocus              | Zernike | $c_{20} = 0.125$ | 0.7944                       | 0.8106                     |
| spherical aberration | Seidel  | $a_{40} = 0.25$  | 0.7807                       | 0.8003                     |
| spherical aberration | Zernike | $c_{40} = 0.167$ | 0.7807                       | 0.8003                     |
| astigmatism          | Seidel  | $a_{22} = 0.25$  | 0.8458                       | 0.8572                     |
| astigmatism          | Zernike | $c_{22} = 0.125$ | 0.8972                       | 0.9021                     |
| coma                 | Seidel  | $a_{31} = 0.125$ | 0.9229                       | 0.9260                     |
| coma                 | Zernike | $c_{31} = 0.125$ | 0.9229                       | 0.9260                     |

## D<sub>S</sub> Marechalkriterium

Im Fall einer reinen Defokussierung führt das Rayleighkriterium mit einer PV-Wellenaberration von  $\lambda / 4$  auf die Definitionshelligkeit

$$D_S = \frac{8}{\pi^2} = 0.8106 \approx 0.8$$

Man setzt daher näherungsweise das Rayleigh-Kriterium mit beugungsbegrenzter Korrektur der Forderung  $D_S > 80\%$  gleich.

| aberration type                   |         | coefficient  | exact Strehl               |
|-----------------------------------|---------|--|----------------------------|
| defocus                           | Seidel  | $a_{20} = \frac{1}{4} = 0.25$                              | $\frac{8}{\pi^2} = 0.8106$ |
| defocus                           | Zernike | $c_{20} = \frac{1}{8} = 0.125$                             | 0.8106                     |
| spherical aberration              | Seidel  | $a_{40} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\frac{5}{192}} = 0.2421$ | 0.8117                     |
| spherical aberration with defocus |         | $b_{40} = 6 \cdot \sqrt{\frac{5}{192}} = 0.9682$           | 0.8117                     |
| spherical aberration              | Zernike | $c_{40} = \sqrt{\frac{5}{192}} = 0.1614$                   | 0.8117                     |
| astigmatism                       | Seidel  | $a_{22} = \frac{4}{\sqrt{192}} = 0.2887$                   | 0.8144                     |
| astigmatism with defocus          |         | $b_{22} = 2 \cdot \sqrt{\frac{6}{192}} = 0.3536$           | 0.8133                     |
| astigmatism                       | Zernike | $c_{22} = \frac{1}{\sqrt{32}} = 0.1768$                    | 0.8133                     |
| coma                              | Seidel  | $a_{31} = \frac{2}{\sqrt{91}} = 0.2097$                    | 0.8064                     |
| coma with tilt                    |         | $b_{31} = \frac{6}{\sqrt{91}} = 0.6124$                    | 0.8127                     |
| coma                              | Zernike | $c_{31} = \frac{2}{\sqrt{91}} = 0.2097$                    | 0.8034                     |



## $D_s = 0.8$ - Kriterium

Aus der Forderung  
 $D_s > 80\%$  ergibt sich

| aberration type                   |         | coefficient for Strehl in Marechal approximation  | coefficient for exact Strehl ratio |
|-----------------------------------|---------|---|------------------------------------|
| defocus                           | Seidel  | $a_{20} = \frac{1}{\pi\sqrt{2}} = 0.2251$         | $a_{20} = 0.2576$                  |
| defocus                           | Zernike | $c_{20} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2}} = 0.1125$        | $c_{20} = 0.1288$                  |
| spherical aberration              | Seidel  | $a_{40} = \frac{3}{4\pi} = 0.2387$                | $a_{40} = 0.2502$                  |
| spherical aberration with defocus |         | $b_{40} = \frac{3}{\pi} = 0.9549$                 | $b_{40} = 1.001$                   |
| spherical aberration              | Zernike | $c_{40} = \frac{1}{2\pi} = 0.1592$                | $c_{40} = 0.1668$                  |
| astigmatism                       | Seidel  | $a_{22} = \frac{2}{\pi\sqrt{3}} = 0.3676$         | $a_{22} = 0.3010$                  |
| astigmatism with defocus          |         | $b_{22} = \frac{\sqrt{6}}{\pi\sqrt{5}} = 0.2191$  | $b_{22} = 0.3675$                  |
| astigmatism                       | Zernike | $c_{22} = \frac{\sqrt{6}}{2\pi\sqrt{5}} = 0.1095$ | $c_{22} = 0.1837$                  |
| coma                              | Seidel  | $a_{31} = \frac{\sqrt{2}}{\pi\sqrt{5}} = 0.2013$  | $a_{31} = 0.2137$                  |
| coma with tilt                    |         | $b_{31} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi\sqrt{5}} = 0.6040$ | $b_{31} = 0.6351$                  |
| coma                              | Zernike | $c_{31} = \frac{\sqrt{2}}{\pi\sqrt{5}} = 0.2013$  | $c_{31} = 0.2117$                  |

# Intensitäts-Momente

---

- Momente der Psf-Intensität

$$M_{2,x} = \iint x^2 I_{PSF}(x, y) dx dy$$

- Relation zur Übertragungsfunktion

$$M_{2,x} = -\frac{1}{4\pi^2} \cdot \frac{\partial^2 g_{OTF}(0,0)}{\partial v_x^2}$$

- Einfluß von Apodisierung und Wellenaberrationen

$$M_{2,x} = \frac{1}{4\pi^2} \iint \left[ \frac{dA(x_p, y_p)}{dx} \right]^2 dx_p dy_p + \iint \left[ A(x_p, y_p) \cdot \frac{dW(x_p, y_p)}{dx} \right]^2 dx_p dy_p$$

- Ungerade Momente : beschreiben Asymmetrie

# Spot-Durchmesser

---

- Schwellwert-Durchmesser der Intensität

Beispiel : 50 % (FWHM)

$$I(r_{thresh}) = \varepsilon \cdot I_{peak}$$

- 2. Moment, Gauss-Durchmesser

$$D_{spot} = 2 \cdot \Delta r_{rms} = 2 \sqrt{\frac{\iint ((x - x_s)^2 + (y - y_s)^2) \cdot I(x, y) dx dy}{\iint I(x, y) dx dy}}$$

- Energie-Inhalt (PiB)

$$E(r_{thresh}) = \varepsilon$$

- Halber Petermann-Durchmesser

$$W_{Peter}^2 = \frac{2 \cdot \int_0^{\infty} E^2(r) r dr}{\int_0^{\infty} \left( \frac{\partial E(r)}{\partial r} \right)^2 r dr}$$

- Entropie-Durchmesser

$$D_s = e^S$$

$$S = - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|E(x)|^2}{P} \ln \left( \frac{|E(x)|^2}{P} \right) dx = - \int_{-\infty}^{\infty} I(x) \ln I(x) dx$$

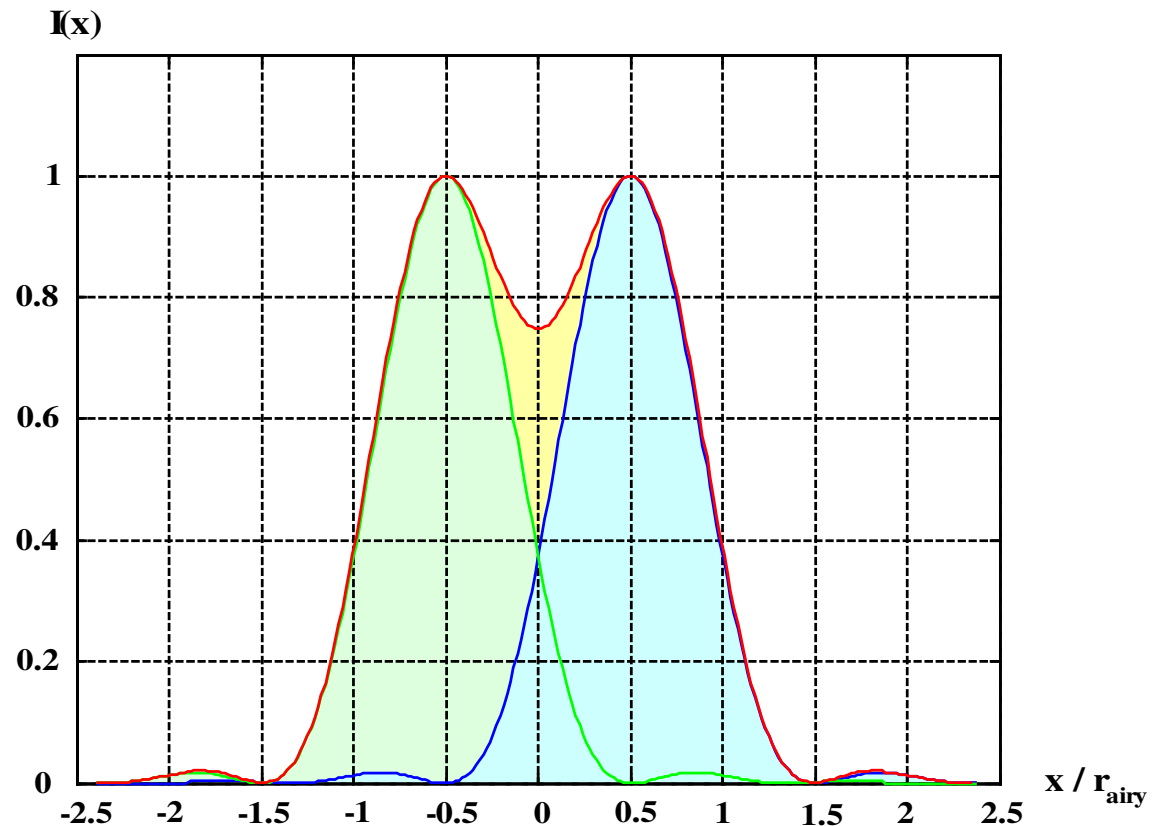
# Inkohärente 2-Punkt-Auflösung : Rayleighkriterium

- Rayleighkriterium :  
Maximum fällt in die benachbarte Nullstelle

$$\Delta x = \frac{1}{2} D_{\text{Airy}} = \frac{0.61 \cdot \lambda}{n \cdot \sin u}$$

- Kontrast in diesem Fall :  
 $K = 0.15$

- Intensitätseinbruch auf  
 $I = 0.735 I_0$



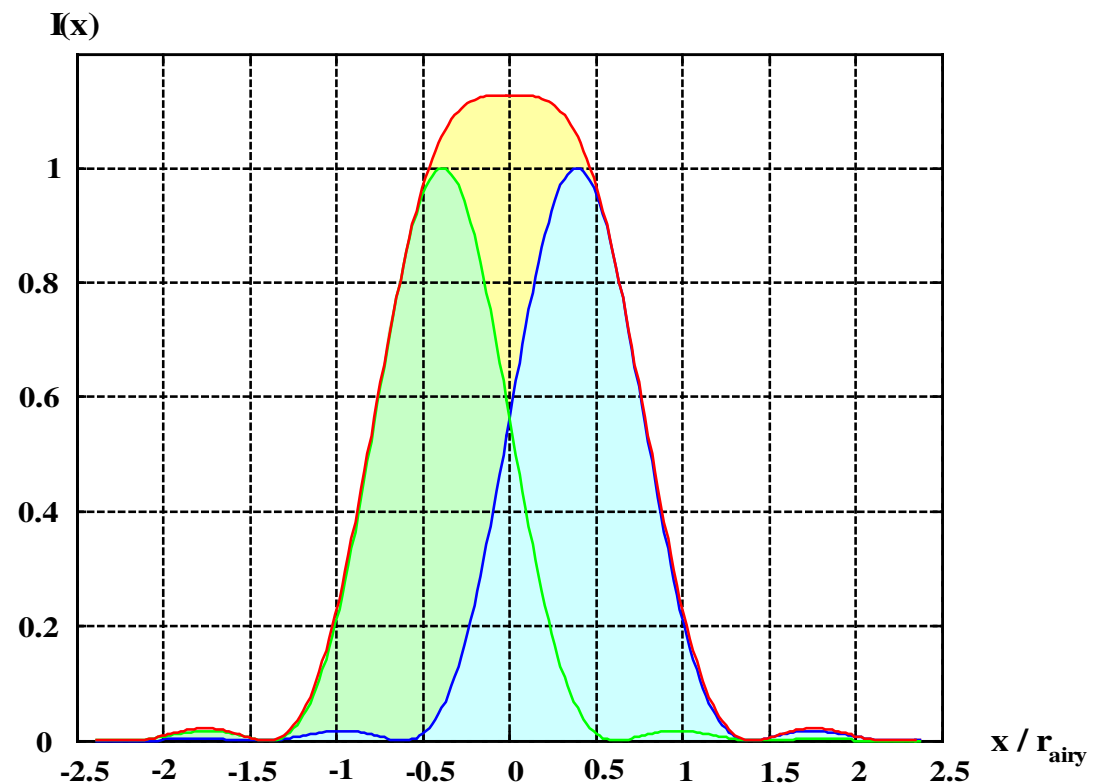
# Inkohärente 2-Punkt-Auflösung : Sparrowkriterium

- Sparrow-Kriterium :  
Verschwinden der 2. Ableitung in der Mitte
- Liefert die Auflösung

$$\left( \frac{d^2 I(x)}{d x^2} \right)_{x=0} = 0$$

$$\begin{aligned} \Delta x_{Sparrow} &= \frac{0.474 \cdot \lambda}{n \cdot \sin u} = 0.385 \cdot D_{Airy} \\ &= 0.770 \cdot \Delta x_{Rayleigh} \end{aligned}$$

- Kontrast hier :  $K = 0$
- Anwendung in der Astronomie
- Vorteil :  
Auch für nicht-Airy-Verteilungen  
anwendbar



## Inkohärente 2-Punkt-Auflösung : weitere Kriterien

---

- Visuelle Grenzauflösung :  
Gut erkennbarer Kontrast von  $K = 26\%$  :

$$\Delta x = \frac{0.83 \cdot \lambda}{n \cdot \sin u} = 0.680 \cdot D_{Airy}$$

- Totalauflösung :  
Übereinanderfallen der Nullstellen der  
Airyverteilungen : Kontrast  $K = 1$

$$\Delta x = D_{Airy} = \frac{1.22 \cdot \lambda}{n \cdot \sin u}$$

Extrem konservatives Kriterium

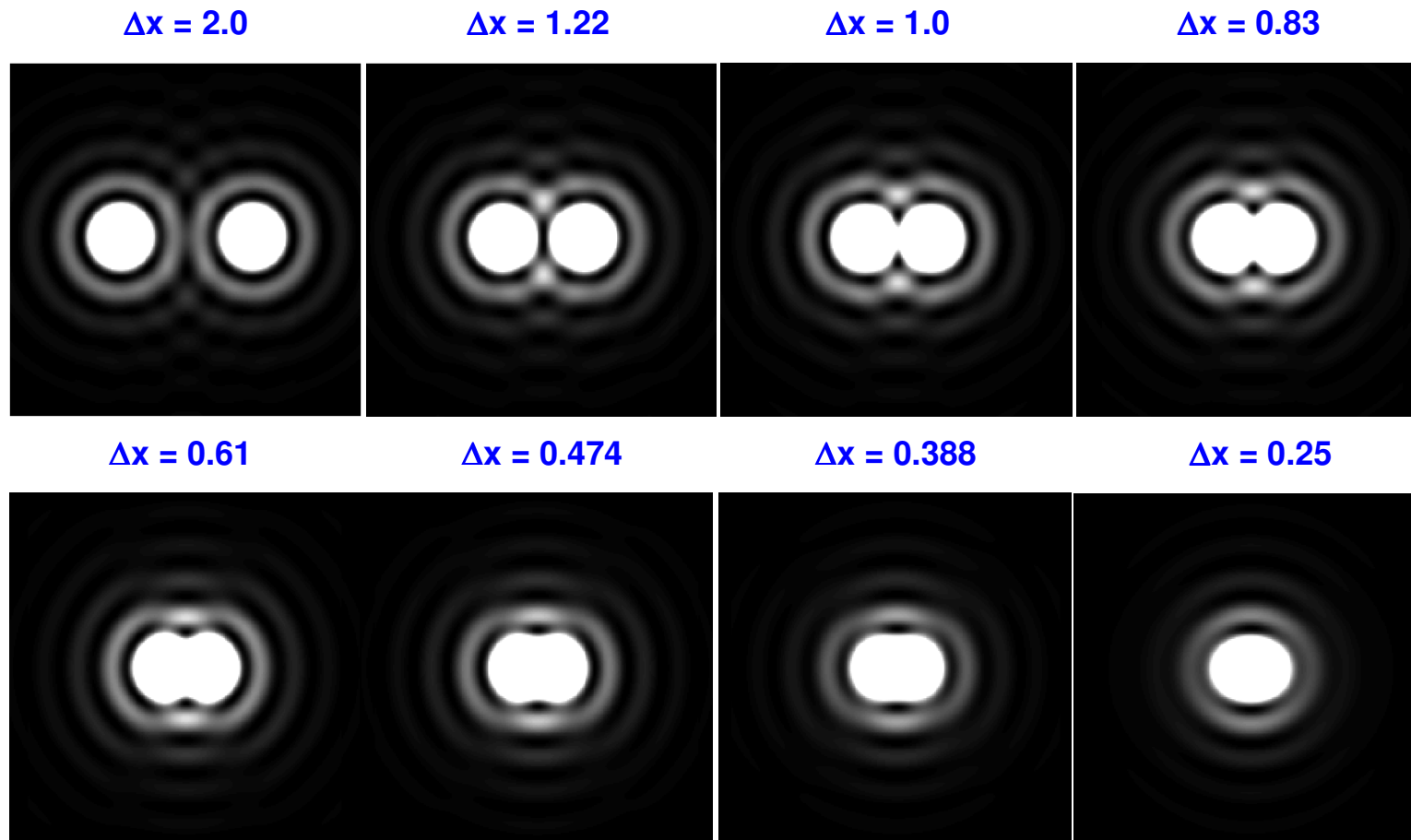
- Kontrastgrenzwert :  $K = 0$  :  
Intensitätswert  $I = 1$  in der Mitte

$$\Delta x = \frac{0.51 \cdot \lambda}{n \cdot \sin u} = 0.418 \cdot D_{Airy}$$

## 2-Punkt-Auflösung

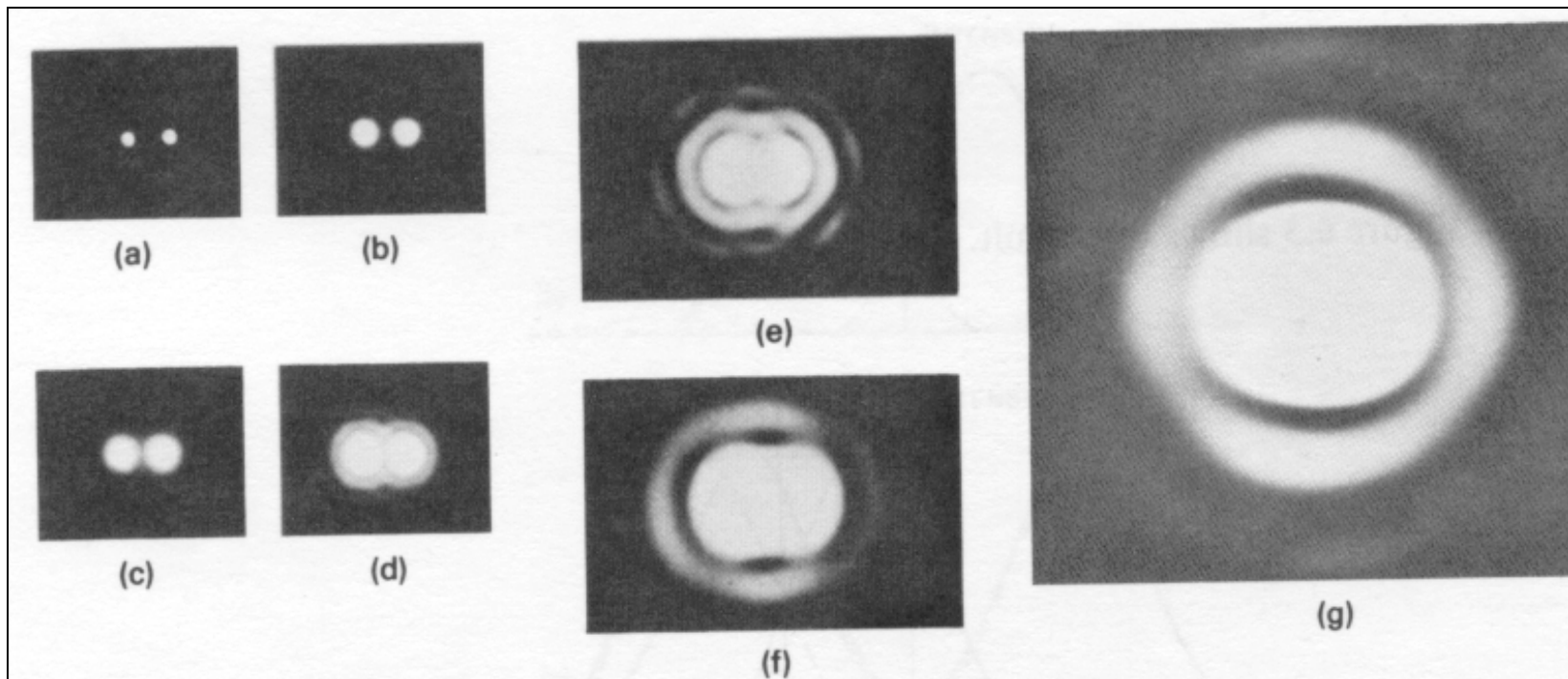
---

- Intensitätsbilder unterhalb 10 % für 2 Punkte verschiedenen Abstandes



## Inkohärente Auflösung : Beispiele

- Visuelle Darstellung : 2-Punkt-Auflösung bei abnehmender Apertur  $\sin u'$
- Bild g : Spot ist schwach elliptisch, die beiden Punkte werden nicht mehr aufgelöst
- Bild b : beide Punkte sind noch völlig getrennt
- Bild e entspricht dem Rayleigh-Kriterium.





# Inhalt / Übersicht

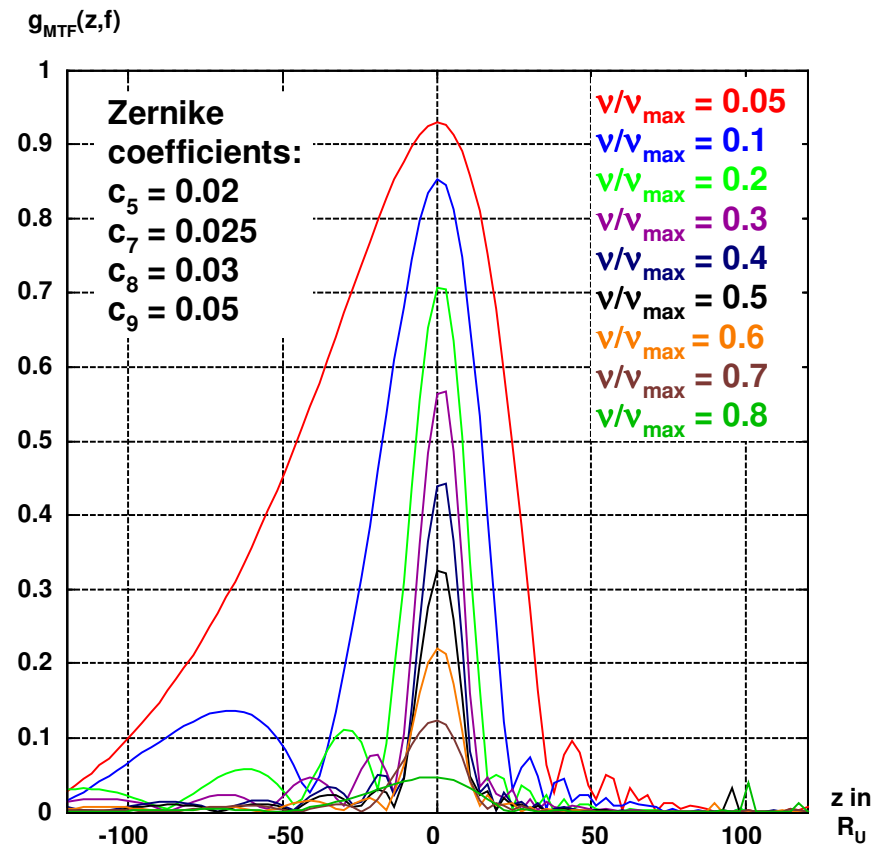
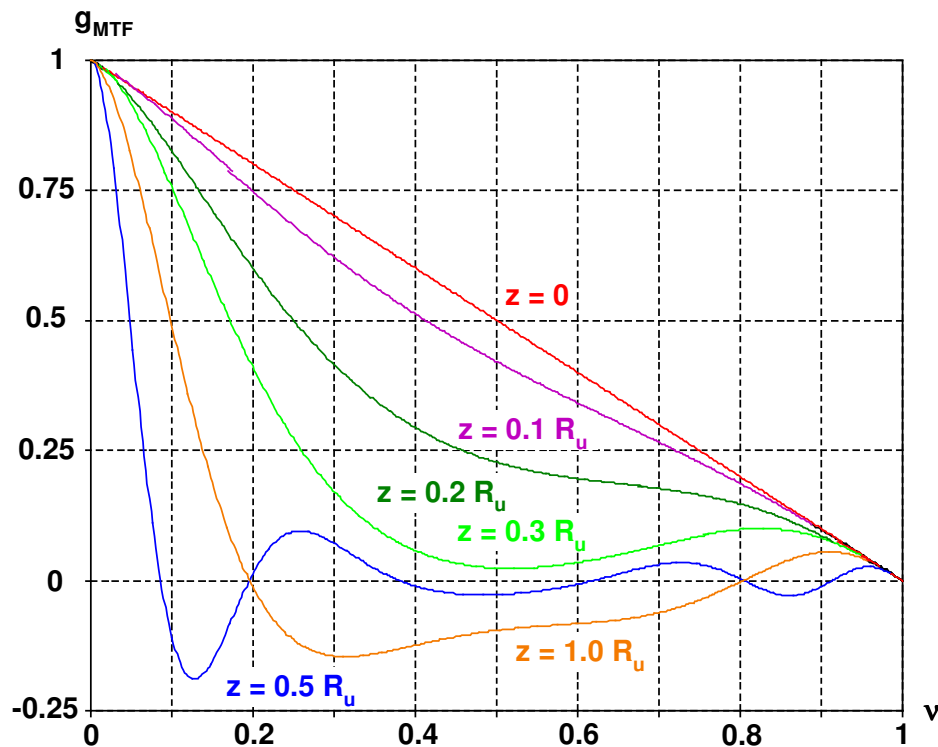
---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienuflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Reale MTF-Kurve

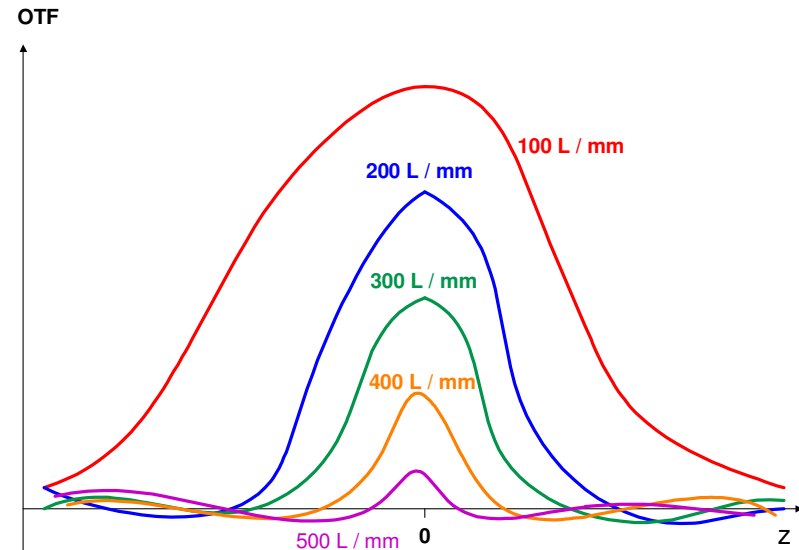
- MTF mit Aberrationen : Kontrast sinkt



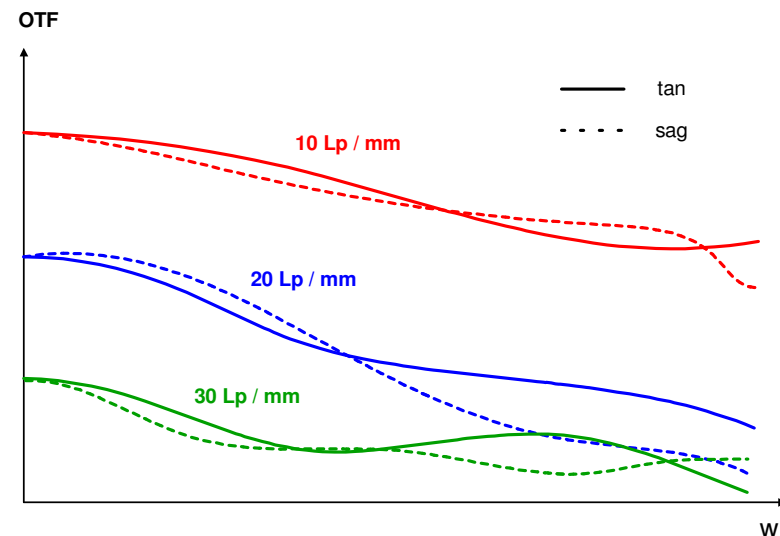
# OTF : Funktion von Defokussierung und Feld

- Typische Darstellungen der MTF für die Bewertung optischer Systeme

1. Einzelne Frequenzen als Funktion der Defokussierung

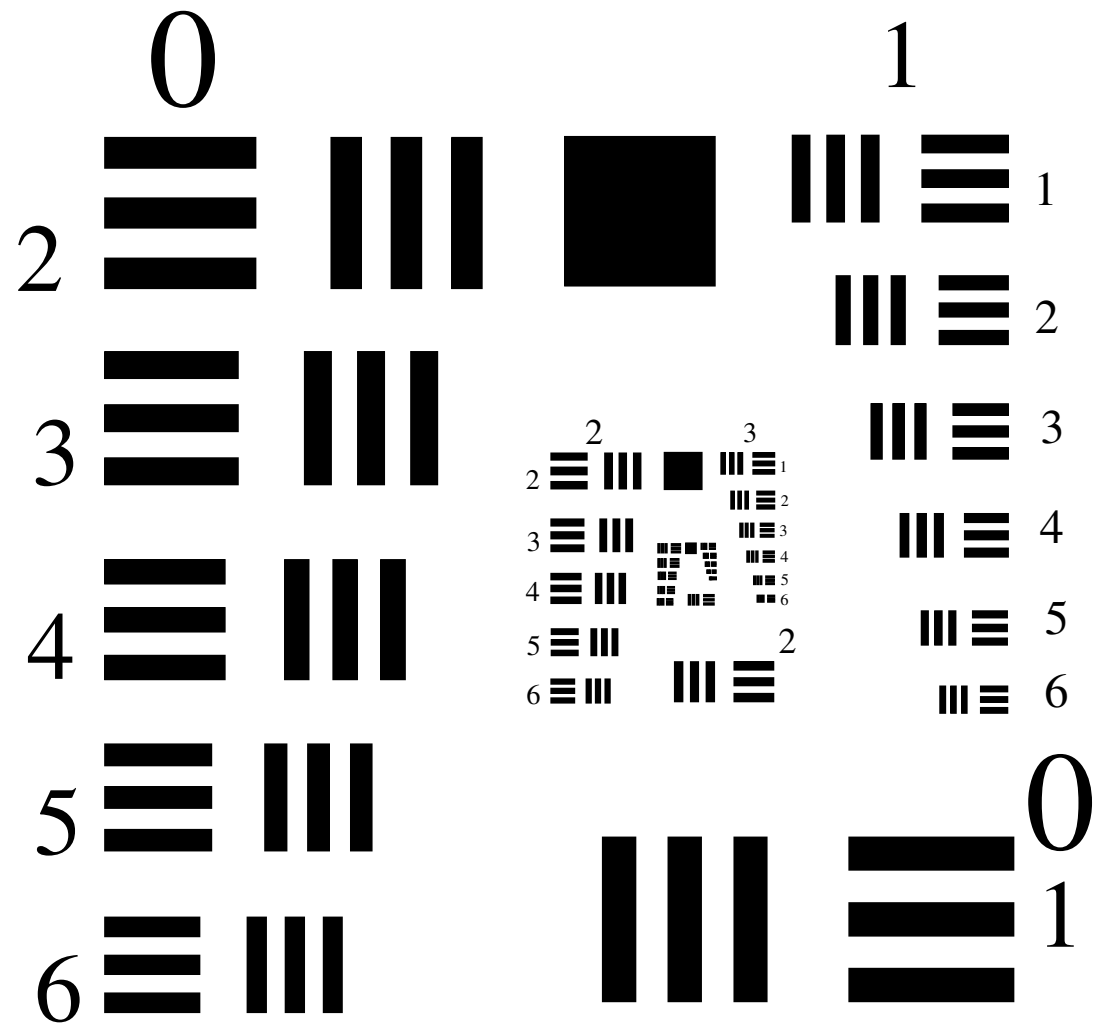


2. Einzelne Frequenzen als Funktion der Feldhöhe



# Kontrast : Testplatte

Messung der Auflösung mit Hilfe einer Testplatte mit Streifenmustern verschiedener Größe und Orientierung

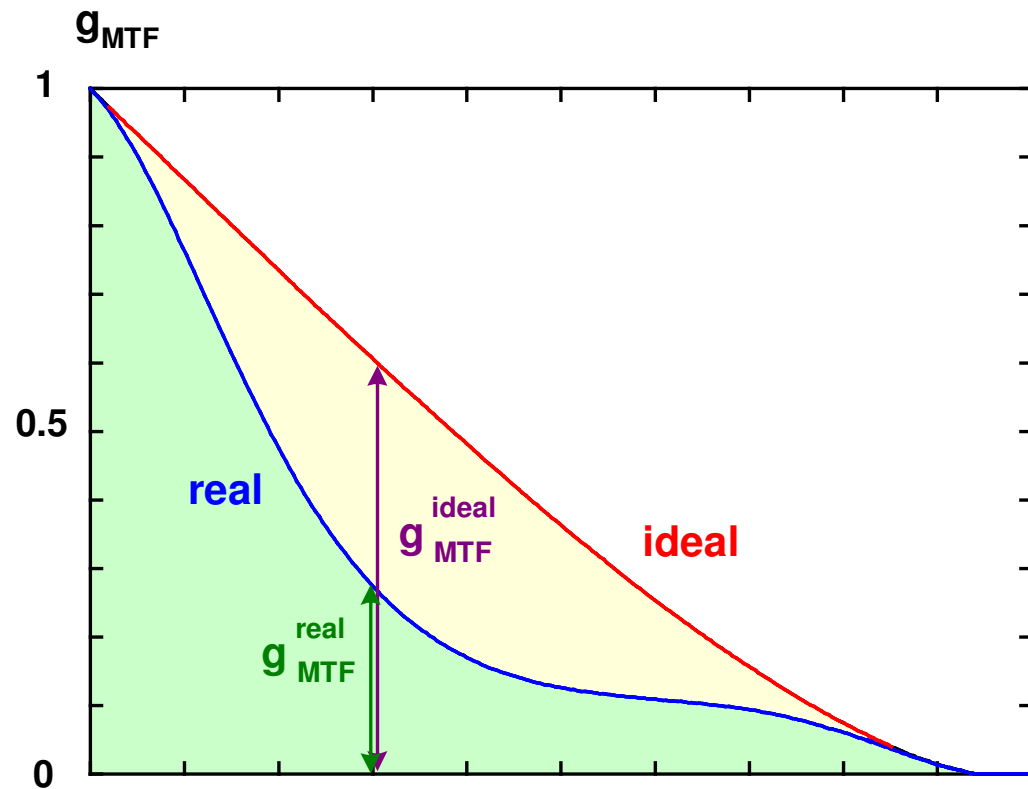


# Hopkinsfaktor

- Kriterium für Systembewertung mit OTF :  
Verhältnis des Kontrastes mit / ohne Aberrationen für eine Ortsfrequenz

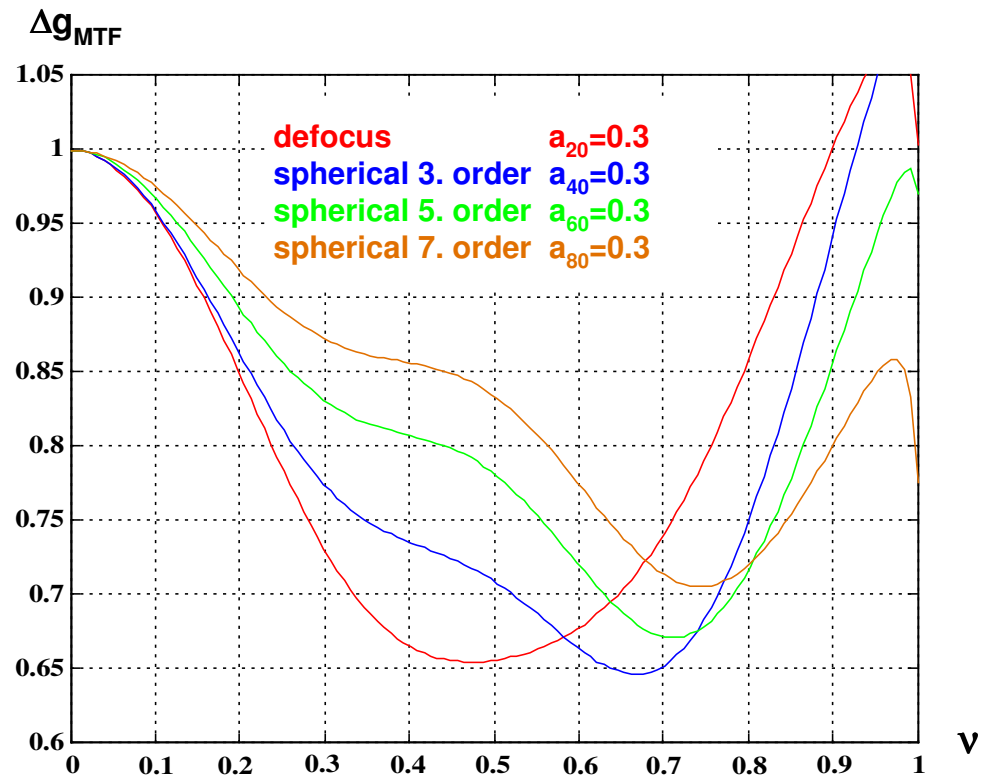
$$\Delta g_{MTF}(v) = \frac{g_{MTF}^{(real)}(v)}{g_{MTF}^{(ideal)}(v)}$$

- Bewertung der Kontrastverbesserung



# Hopkinsfaktor

- Relative Änderung des Kontrast durch Aberrationen :  
Bezug auf ideale MTF-Kurve



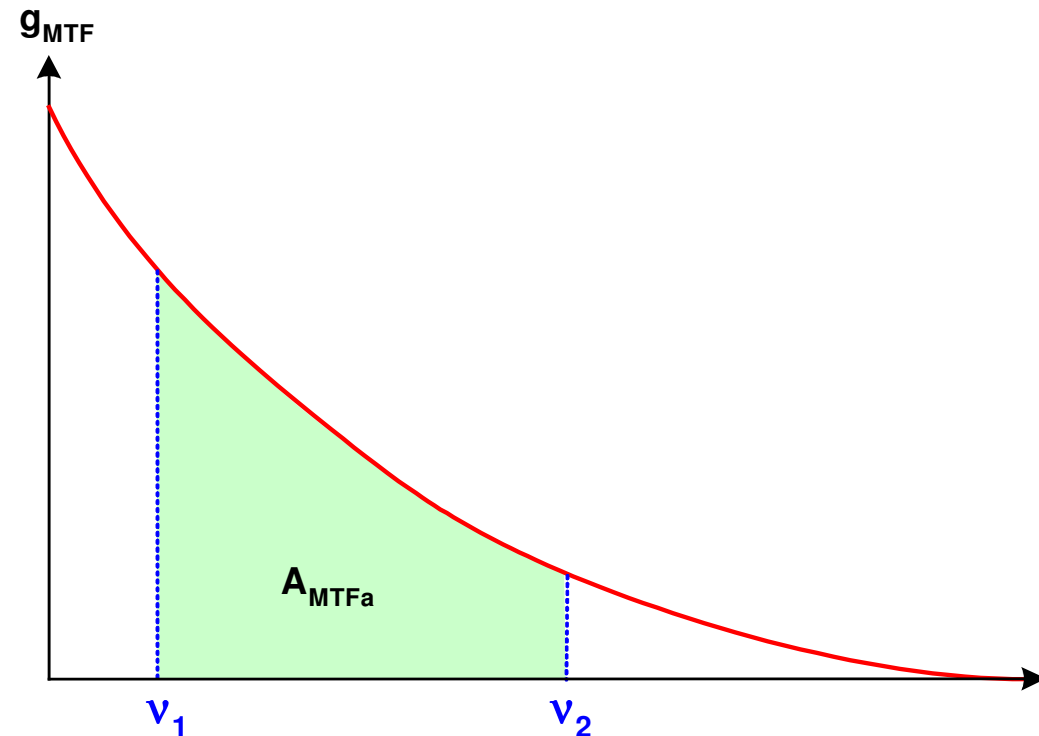
# MTF-Area-Kriterium

---

- Bewertung der Fläche unterhalb der MTF-Kurve innerhalb des interessanten Ortsfrequenzbandes

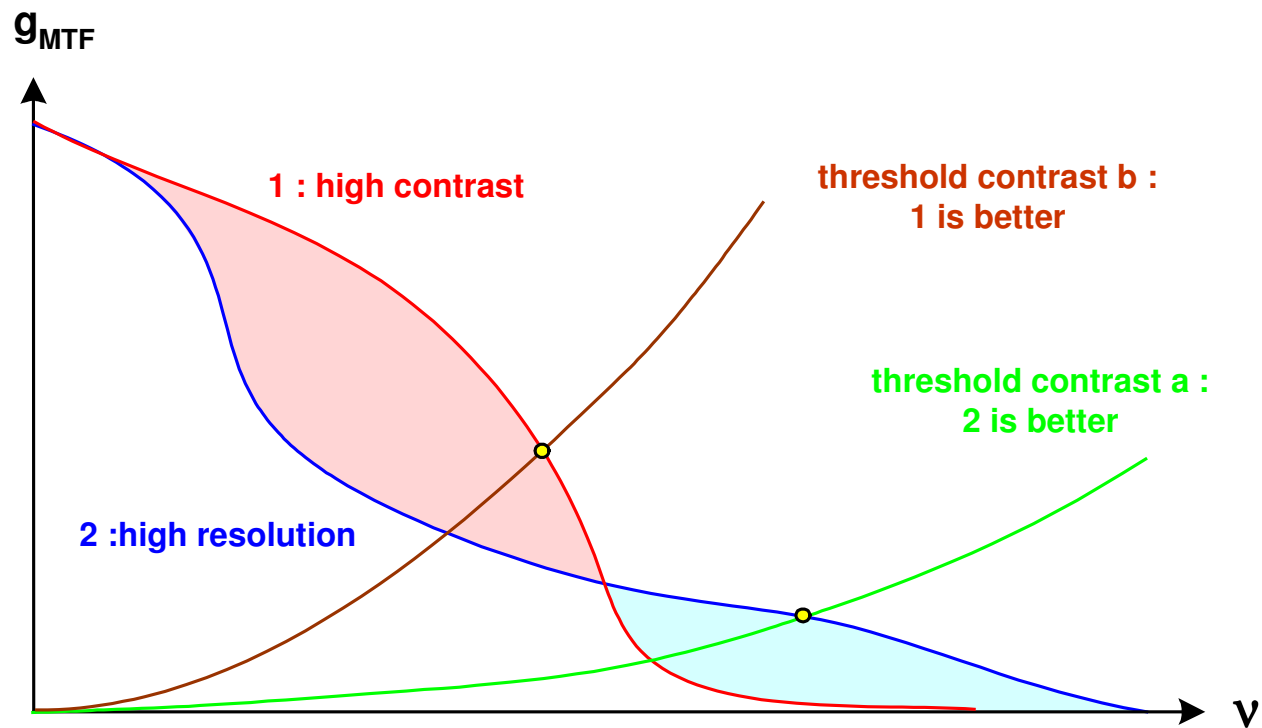
$$A_{MTFa} = K \cdot \int_{s_1 < s < s_2} H_{MTF}(s) ds$$

- Verallgemeinerung auf zwei Dimensionen :  
Volumen unterhalb MTF-Fläche



# Kontrast versus Auflösung

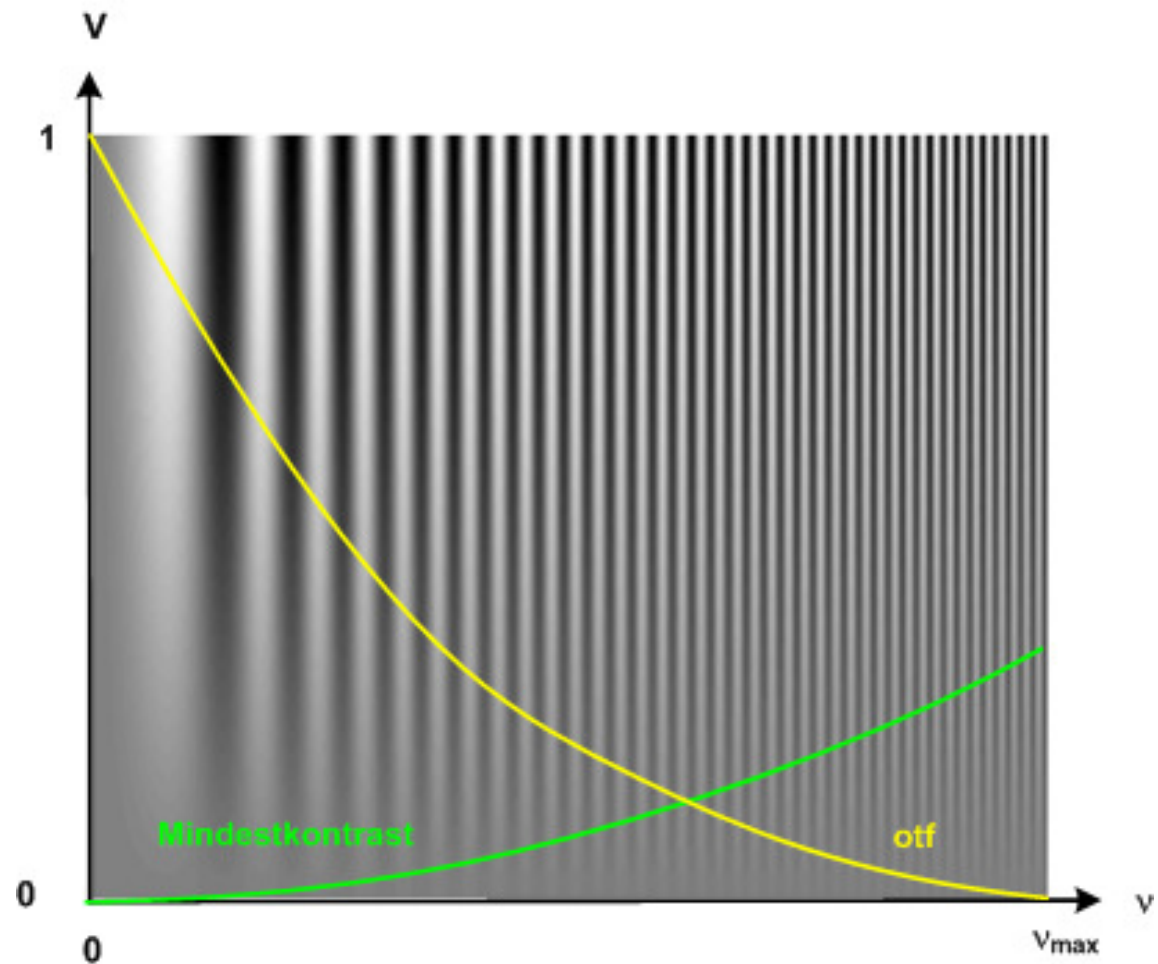
- Für ein gutes Bild sind Kontrast und Auflösung wichtig
- Die Optimierung hängt von der Applikation ab
- Empfänger : Mindest-Kontrast für Auflösung einer Ortsfrequenz
- Die Bewertung einer MTF hängt von der Mindestkontrastkurve ab.





# Kontrast und Auflösung

- Verlauf des Kontrastes über der Ortsfrequenz
- Typisch : mit wachsender Frequenz abnehmender Kontrast
- Kompromiß zwischen Auflösung und Kontrast je nach Anwendung



# Image Blur

---

Original 256 x 256



- Blur im SW-Bild

Blurr 3 Pixel



Blurr 6 Pixel



Blurr 9 Pixel



# Inhalt / Übersicht

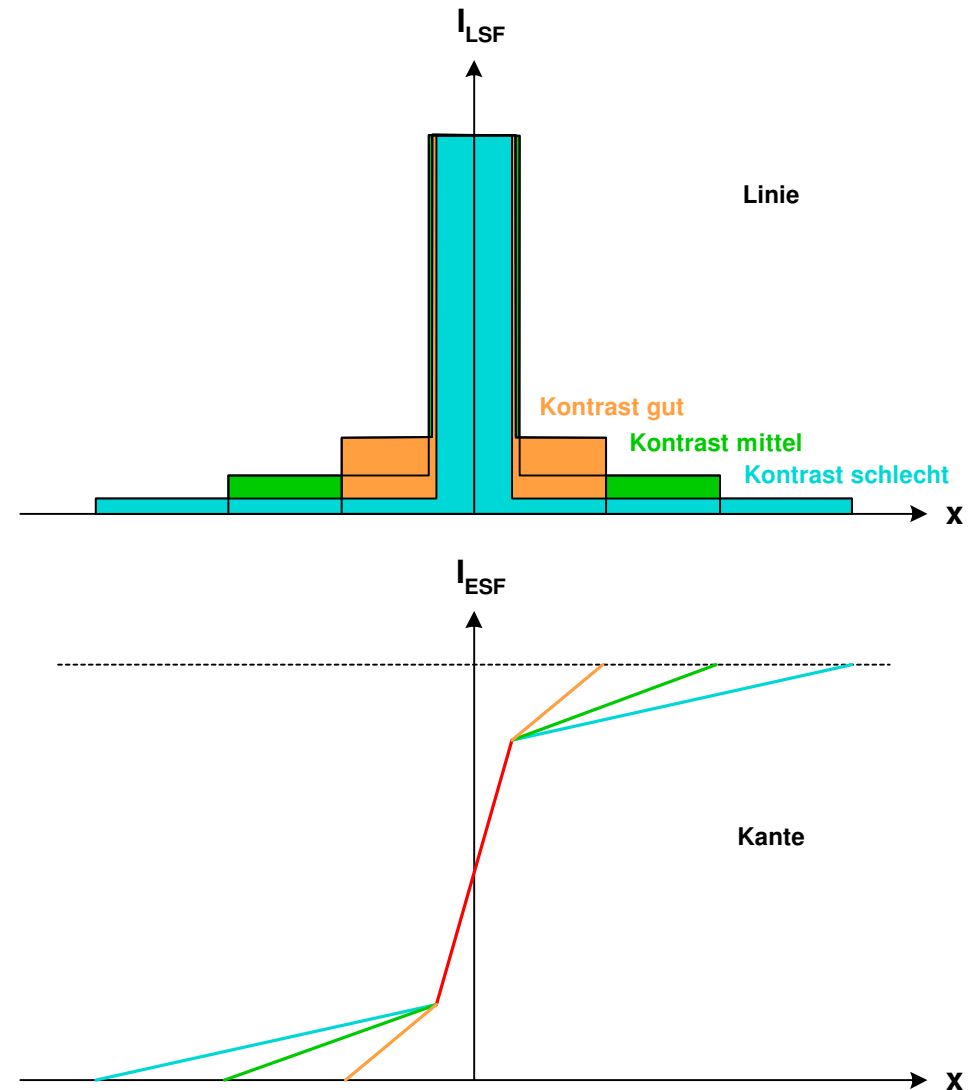
---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienuflösung
- 7.8 Kantenauflösung**
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Kantenabbildung

- Kantenabbildung :
  - breit auslaufende Randbereiche :  
Kontrast gemindert
  - zentraler Bereich mit Gradient :  
Bildschärfe
  - reagiert empfindlich auf Bild-  
fehler
  - Anisotropie : Unterscheidung in  
sagittale / tangentielle Richtung



# Kantenabbildung

---

- Kantensteilheit : NILS  
(normalized image log slope)

$$S_{NILS} = \Delta x_{CD} \cdot \left. \frac{d \ln I(x)}{dx} \right|_{thresh} = \frac{\Delta x_{CD}}{I_{thresh}} \cdot \left. \frac{dI(x)}{dx} \right|_{thresh}$$

- Kantenschärfe  
(acutance, sharpness)

$$A_{acut} = \frac{1}{x_{min} - x_{max}} \cdot \frac{\int_{x_{min}}^{x_{max}} \left( \frac{dI_{edge}(x)}{dx} \right)^2 dx}{I_{edge}(x_{max}) - I_{edge}(x_{min})}$$

- Kantendefekt : Rms-Abweichung  
der realen von der idealen Kanten-  
intensitätsverteilung

$$K_{Defekt} = \sqrt{\left[ \int \left( I_{Kante}^{(real)}(x) - I_{Kante}^{(ideal)}(x) \right) dx \right]^2}$$

# Kantenbreite

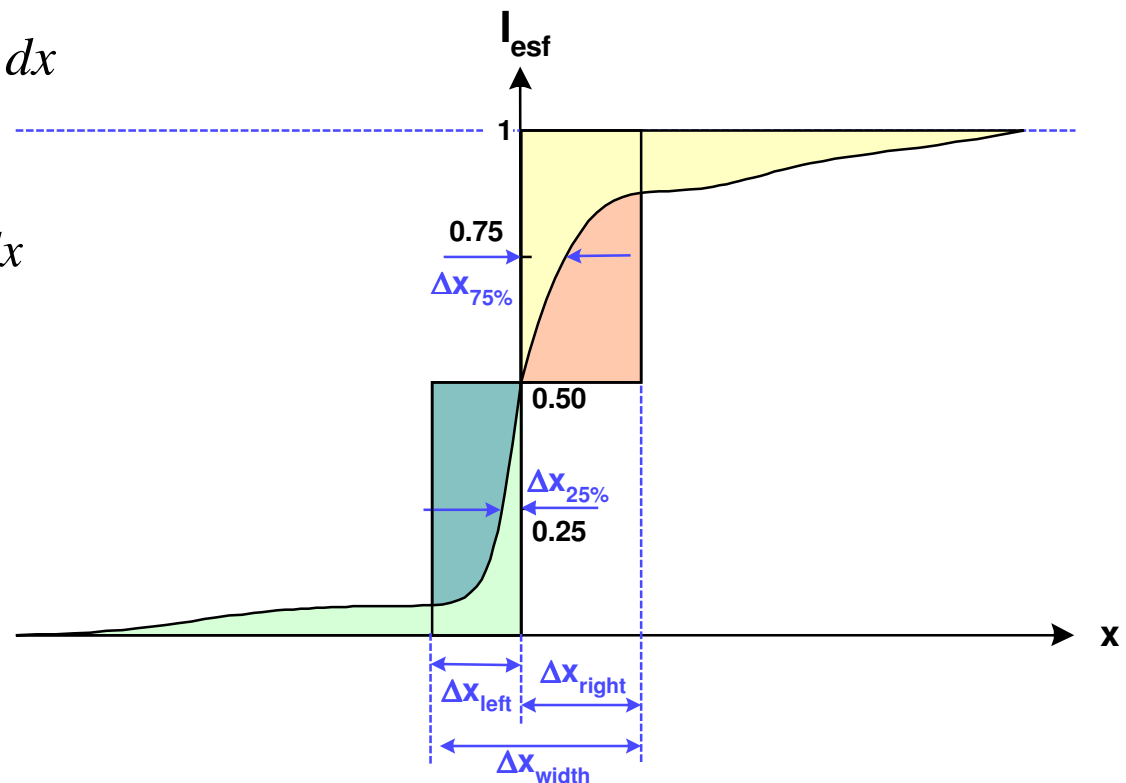
- Definition der Kantenbreite nach Thomas :  
links- und rechtsseitig flächengleiche  
Rechtecke mit Bezug auf 50 %

$$\Delta x_{IKb} = \frac{1}{I_0} \cdot \int_{-\infty}^0 [I_{real}(x) - I_{ideal}(x)] dx$$

$$\Delta x_{Rkb} = \frac{1}{I_0} \cdot \int_0^{\infty} [I_{real}(x) - I_{ideal}(x)] dx$$

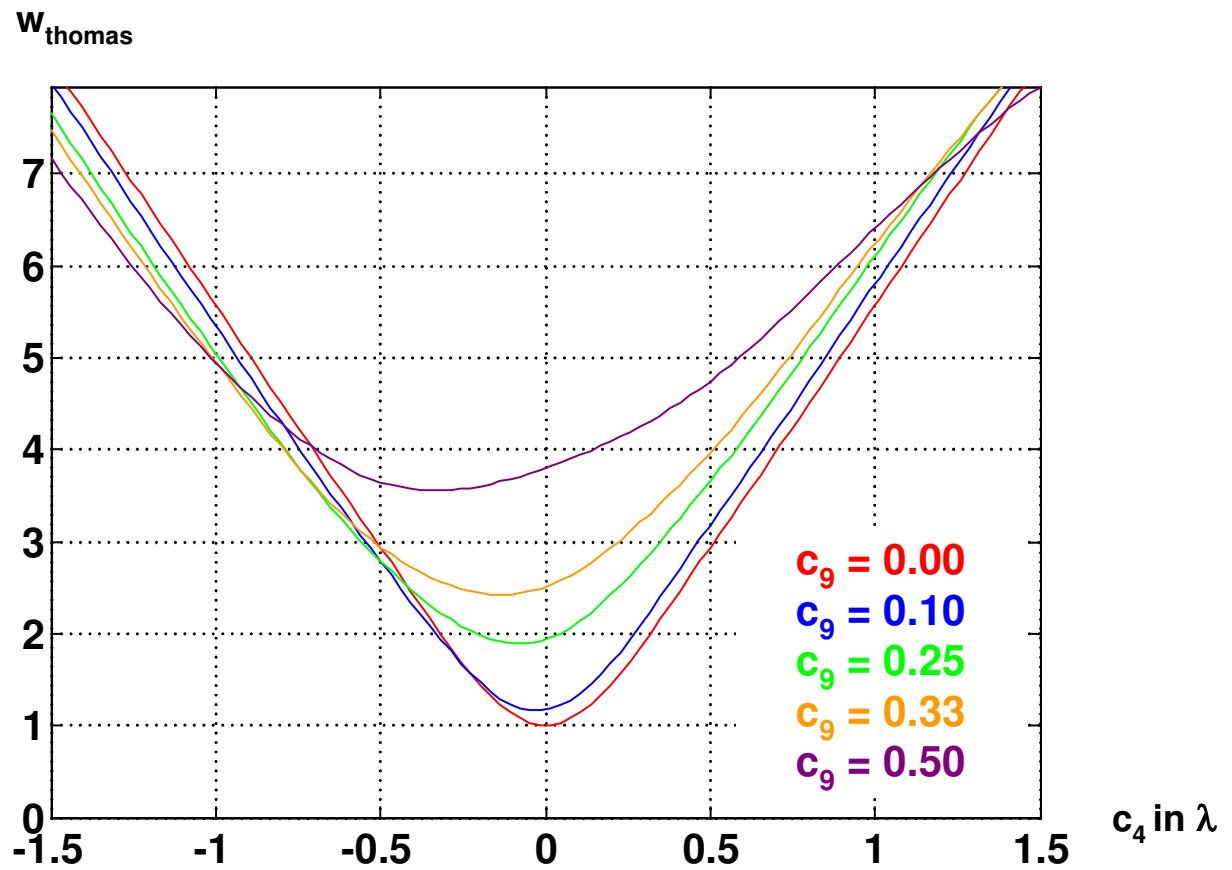
Breite : Mittelwert

$$\Delta x_{Kb} = \frac{\Delta x_{IKb} + \Delta x_{rKb}}{2}$$



# Kantenbreite : Thomaskriterium

Kantenbreite nach Thomas bei sphärischer Aberration



# Kantenbreite und -schärfe

---

- Direkter Zusammenhang mit der Übertragungsfunktion

$$\Delta x_{Kb} = \frac{1}{\pi^2} \cdot \int_0^{\infty} \frac{1 - \operatorname{Re} H_{OTF}(s)}{s^2} ds$$

Die Größe setzt sich zusammen aus zwei Anteilen :

1. Kontrastanteil ( MTF )
2. Phasenanteil ( PTF ) , Verzeichnung

- Asymmetrie der Kantenabbildung :  
Differenz zwischen links- und rechtsseitiger Breite

$$\Delta x_{Asym} = \Delta x_{lKb} - \Delta x_{rKb}$$

- Kantenschärfe :  
Gradient des Kantenbildes zwischen 25%- und 75% - Punkt :  
Maß für die Steilheit der Kante

$$\Delta x_{KSchä} = \Delta x_{I=75\%} - \Delta x_{I=25\%}$$



# Inhalt / Übersicht

---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienauflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Linienbild-Kriterium

---

- Struve-Kriterium analog zur Strehlschen Definitionshelligkeit

$$S_{LSF} = \frac{I_{LSF}^{(real)}(0)}{I_{LSF}^{(ideal)}(0)}$$

- Rayleighkriterium zur Linienauflösung

$$\Delta x = 0.50 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin \theta}$$

- Sparrowkriterium :            Inkohärent  
zur Auflösung

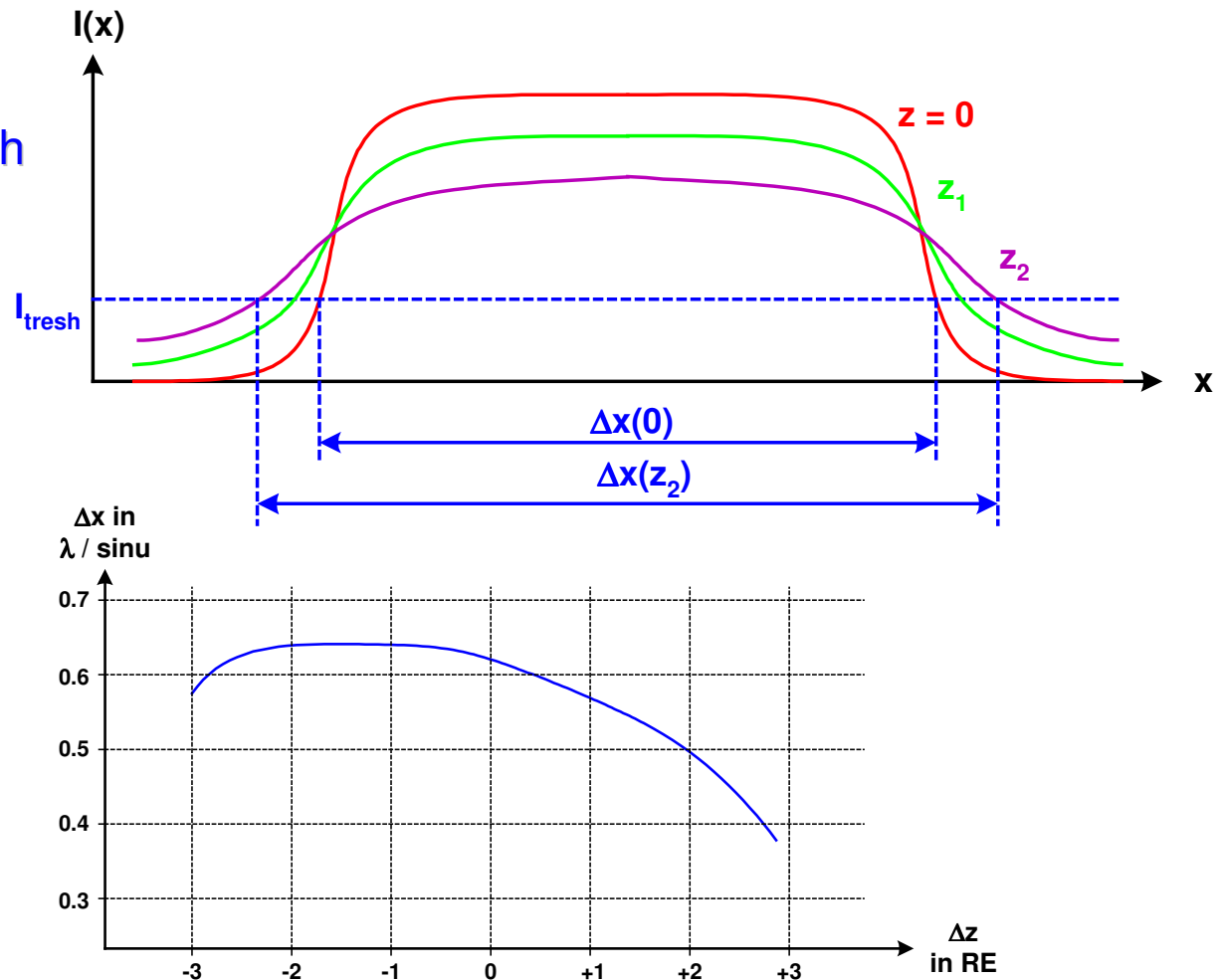
$$\Delta x_{Sparo}^{(ink)} = 0.415 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin \theta}$$

Kohärent

$$\Delta x_{Spar}^{(coh)} = 0.663 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin \theta}$$

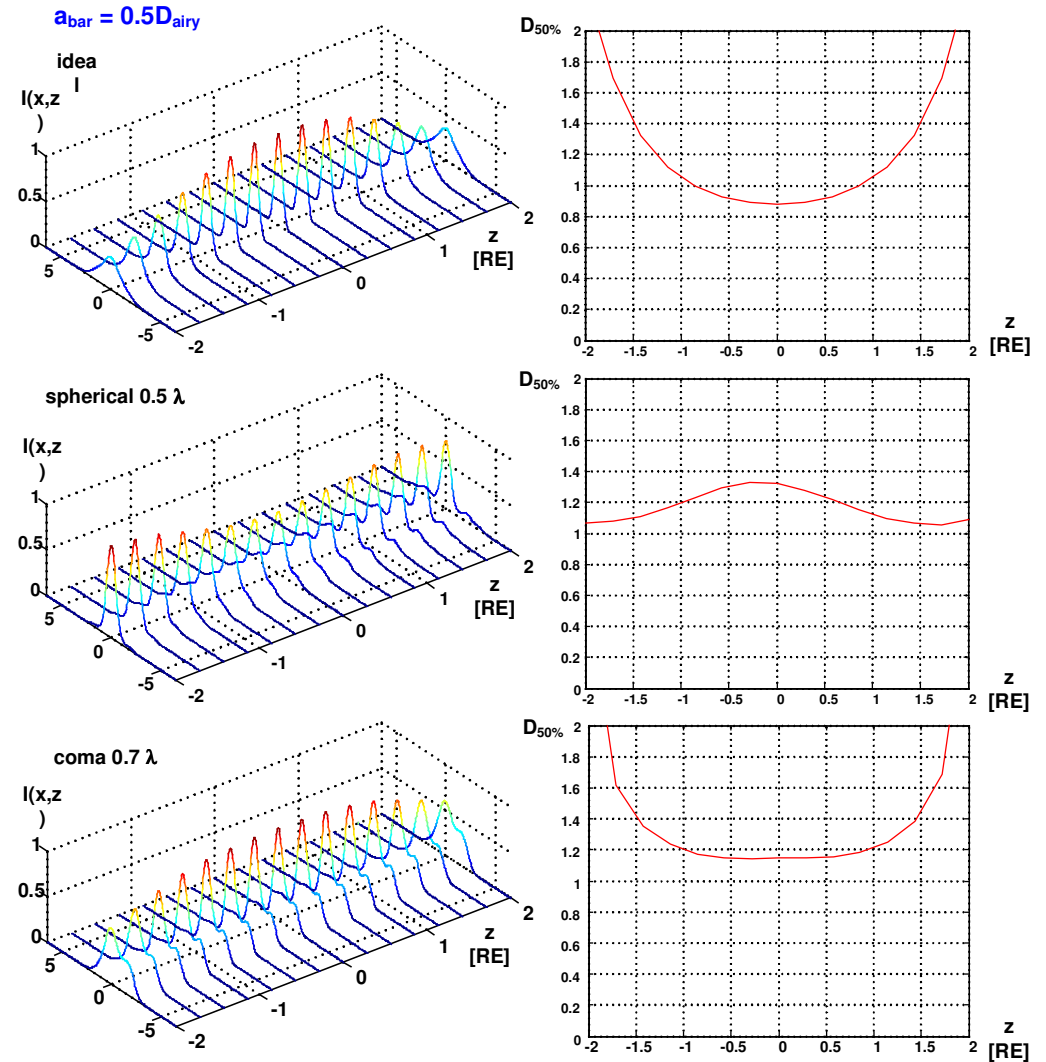
# Bossung-Plots

- Auftragung der Intensitätsverteilung eines Barobjekts über der Defokussierung :  
Bossung-Plots
- In der Regel asymmetrisch



# Bossungplots

- Bossungplots bei 50% Level für einen Bar mit  $0.5 D_{\text{airy}}$  Breite bei Aberrationen



## Spezielle Kriterien

---

- Relative Gipfelhöhe  
Höhe Linienbild

$$W = \frac{I_{lsf}^{(\max)}(x)}{I_{lsf}(0)}$$

- Fidelity (Linfoot)  
relative Ähnlichkeit zwischen  
Objekt und Bild

$$F = 1 - \frac{\iint [I_{image}(mx, my) - I_{obj}(x, y)]^2 dx dy}{\iint I_{obj}^2(x, y) dx dy}$$

- Strukturgehalt,  
Kontrast-Inhalt des Bildes  
(equivalent passband)

$$S = \frac{\iint I_{image}^2(x, y) dx dy}{\left[\iint I_{image}(x, y) dx dy\right]^2} = \frac{\iint |g_{of}(v_x, v_y)|^2 dv_x dv_y}{\left|\iint g_{of}(v_x, v_y) dv_x dv_y\right|^2}$$

- Korrelation  
zwischen Objekt und Bild

$$C = \frac{\iint I_{image}(mx, my) \cdot I_{obj}(x, y) dx dy}{\iint I_{obj}^2(x, y) dx dy}$$

- Schroffheit :  
Maß für Kontrastinhalt im Bild

$$S = \int_{-\infty}^{\infty} I_{LSF}^2(x') dx' = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{OTF}(s)|^2 ds$$

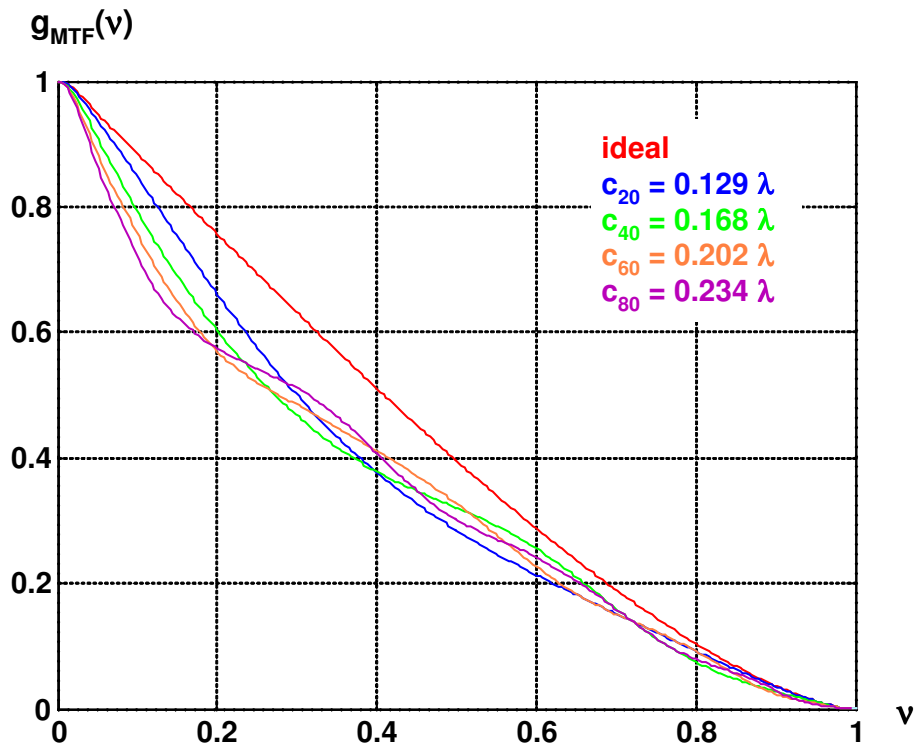
# Structural Content

- Structural content:  
Contrast capacity of an image

$$S = \frac{\iint I_{image}^2(x, y) dx dy}{\left[ \iint I_{image}(x, y) dx dy \right]^2} = \frac{\iint |g_{otf}(v_x, v_y)|^2 dv_x dv_y}{\left| \iint g_{otf}(v_x, v_y) dv_x dv_y \right|^2}$$

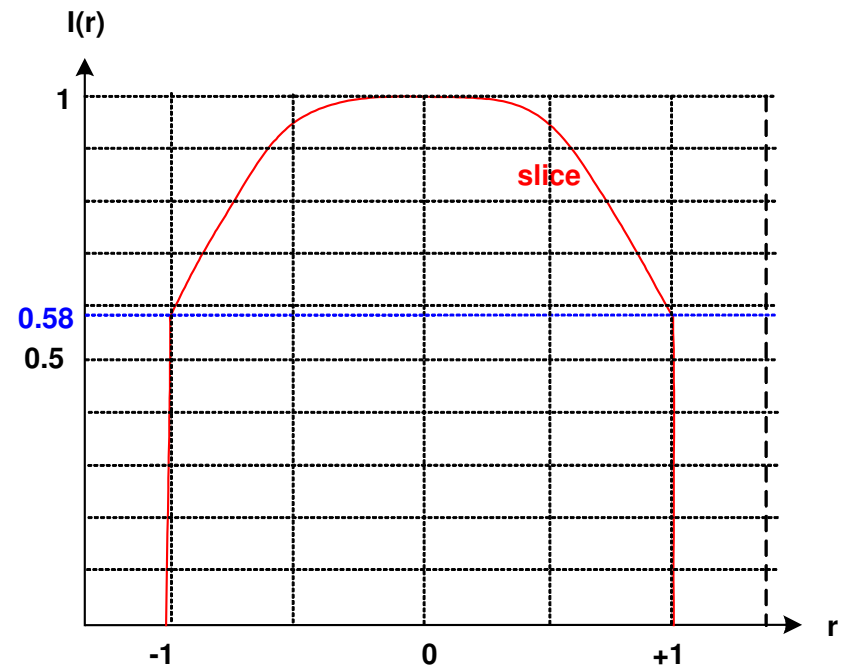
- Equal Strehl ratio DS = 0.8  
but different structural content:

0.79 - 0.73 - 0.70 - 0.69



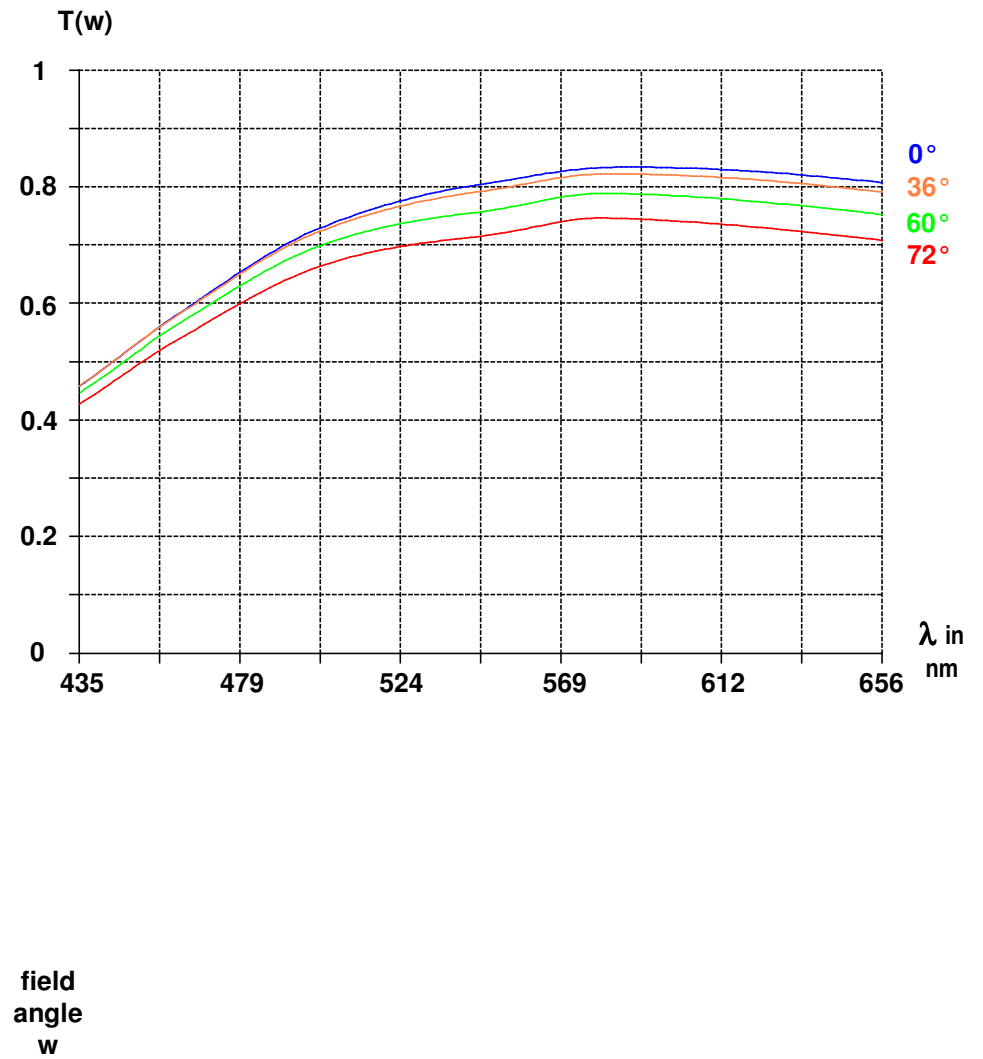
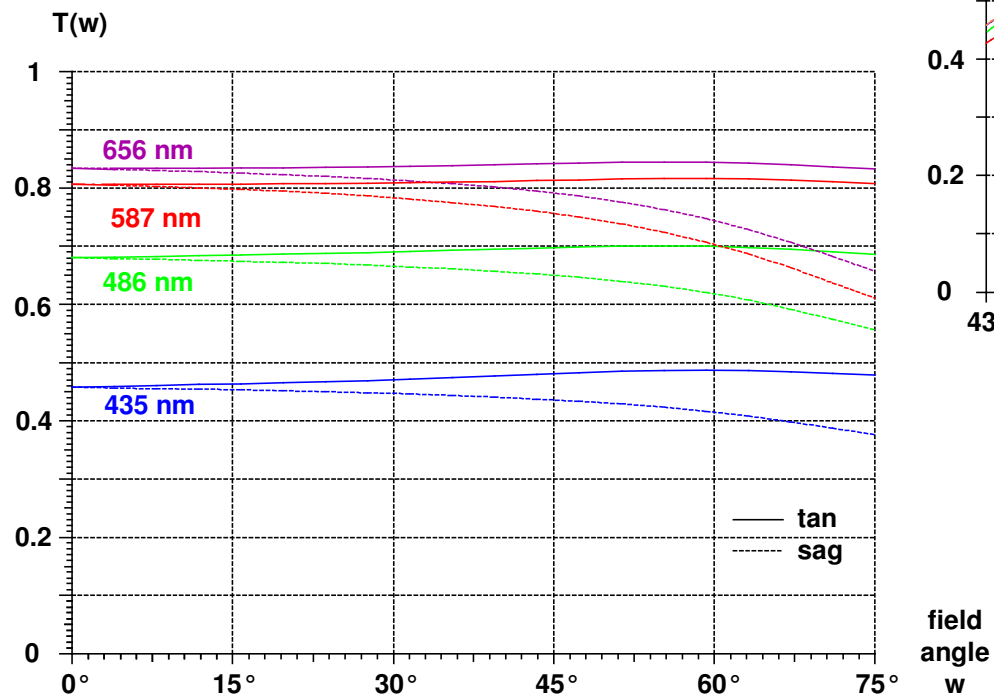
# Beleuchtung

- Helligkeitsabfall zum Feldrand hin
- Ursachen :
  - Vignettierung
  - $\cos^4$ -Faktor
  - Schicht-Performance für große Inzidenzen



# Beleuchtung

- Helligkeitsabfall :  
Abhängig von Feldposition und  
Wellenlänge





# Inhalt / Übersicht

---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienauflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Strahlqualität von Laserstrahlung : Momente

---

- Qualitätskriterien der konventionellen Wellenoptik zur Bewertung abbildender optischer Systeme :

In der Laseroptik als Gütemaße nicht sinnvoll, da in der Regel

1. Eine ausgeprägte Apodisation vorliegt
2. Das System nicht abbildenden Zwecken dient
3. Allgemein keine ideale Kohärenz / Inkohärenz besteht

- Momente für kohärente Strahlung

1. Ortsmoment m-ter Ordnung der Intensitätsverteilung eines Strahls :

Maß für die räumliche Ausdehnung des Strahlprofils.

$$\langle x^m \rangle = \frac{\iint x^m |E(x, y)|^2 dx dy}{\iint |E(x, y)|^2 dx dy}$$

2. Bewertung der Winkelverteilung ( Fernfeld ) Moment

$$\langle \varphi^m \rangle = \frac{\iint \varphi^m |E(\varphi, \psi)|^2 d\varphi d\psi}{\iint |E(\varphi, \psi)|^2 d\varphi d\psi}$$

- Impulsvariablen :
  1. Winkel  $u_x = u_x$
  2. Ortsfrequenz  $s_x$
  3. Transversale Wellenzahl  $k_x$

Zusammenhang

$$u_x = \theta_x = \lambda s_x = \frac{k_x}{k_o}$$

# Strahlqualität von Laserstrahlung : $M^2$

---

Maß für die Strahlqualität

$$M_x^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\langle w_x^2 \rangle \cdot \langle \theta_x^2 \rangle - \langle w_x \theta_x \rangle^2}$$

Sonderfall Strahlradius am Ort der Taille : Ohne Mischmoment

$$M_x^2 = \frac{\pi}{\lambda} w_{ox} \theta_x$$

Eigenschaften des Strahlqualitätsmaßes  $M^2$  :

1. TEM<sub>00</sub>-Gaußbündel  $M^2 = 1$   
Minimaler Wert für  $M^2$
2. Paraxiale Strahlausbreitung :  $M^2$  konstant.
3. Reale Strahlen :  $M^2 > 1$   
Faktor  $M^2$  beschreibt die normierte Verschlechterung der Strahlqualität gegenüber dem TEM<sub>00</sub>-Grundmode
4. Inkohärent überlagertes Gemisch einzelner Moden :  
 $M^2$  additiv bzgl. der einzelnen Anteile

## Strahlqualität im 2-D-Fall

---

- Eindimensionale Momente in den beiden Schnitten

$$M_x^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\langle w_x^2 \rangle \cdot \langle \theta_x^2 \rangle - \langle w_x \theta_x \rangle^2}$$

$$M_y^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\langle w_y^2 \rangle \cdot \langle \theta_y^2 \rangle - \langle w_y \theta_y \rangle^2}$$

- Gemischtes Moment

$$M_{xy}^2 = \frac{\pi}{\lambda} \cdot \sqrt{\langle w_x \theta_y \rangle \cdot \langle w_y \theta_x \rangle - \langle w_x w_y \rangle \cdot \langle \theta_x \theta_y \rangle}$$

- Allgemeine 2-D-Strahlqualität  
Annahme : Bezug auf den Schwerpunkt  
bzgl. Ort und Winkel

$$M^2 = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot (M_x^4 + M_y^4) - M_{xy}^4}$$

- Sonderfall : Kein Astigmatismus und keine Elliptizität

$$M^4 = \frac{M_x^4 + M_y^4}{2}$$

- Die 4. Potenz von M ist additiv. Dies gilt allgemein.  
Anteile sind : Profilform, Wellenaberrationen, Kohärenz

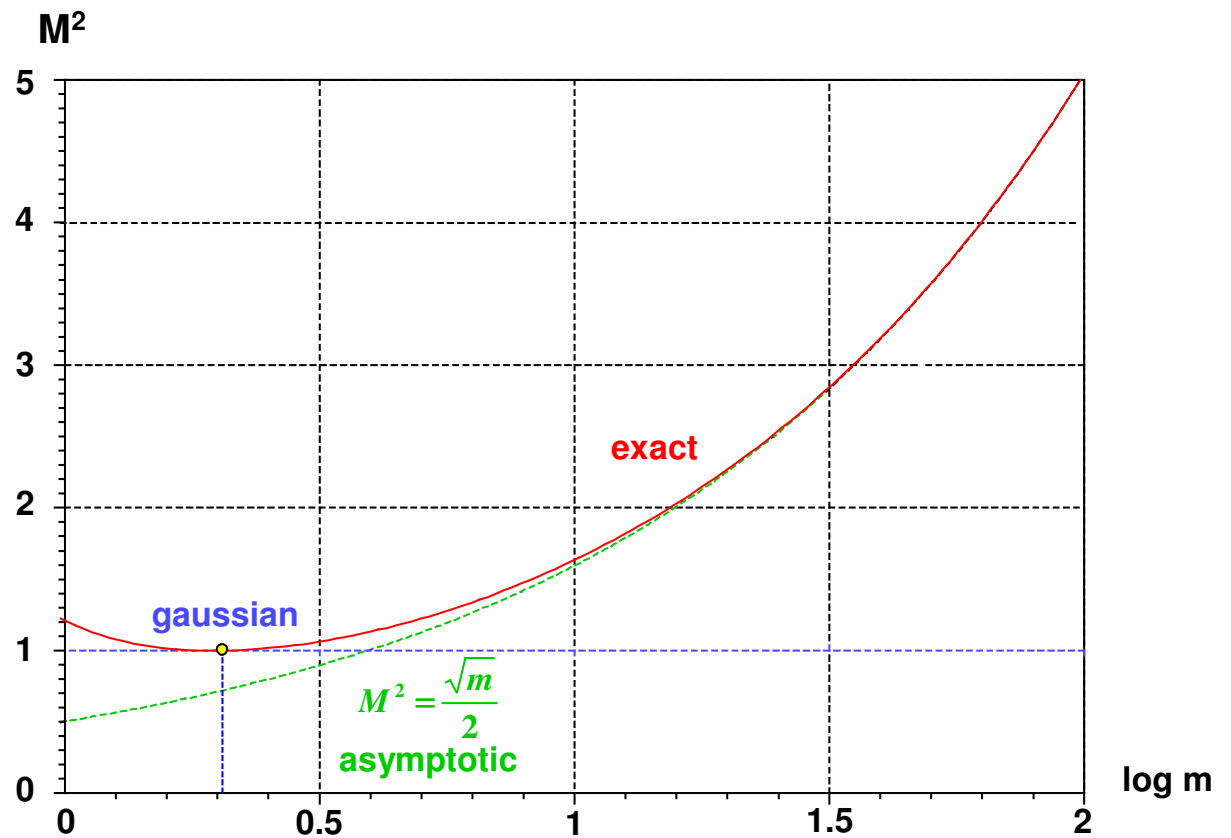
# M<sup>2</sup> eines Supergaussprofils

- Strahlqualität sinkt mit wachsendem m :

$$M^2 = \frac{m \sqrt{\Gamma\left(\frac{4}{m}\right)}}{2\Gamma\left(\frac{2}{m}\right)}$$

- Asymptotisch gilt für große m

$$M^2 = \frac{\sqrt{m}}{2}$$



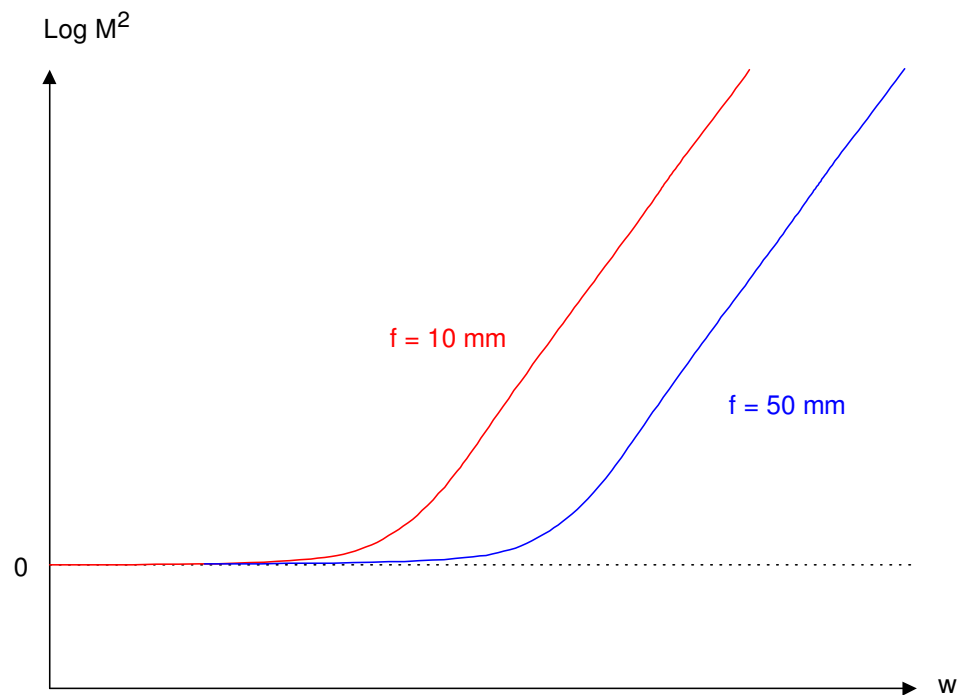
# Strahlqualität $M^2$ : Beispiel

Fokussierung eines Gaußbündels mit plankonvexer Einzellinse der Brechzahl  $n = 1.5$

- Variation des kollimierten Strahlradius
- Verschiedene Brennweiten der Linse

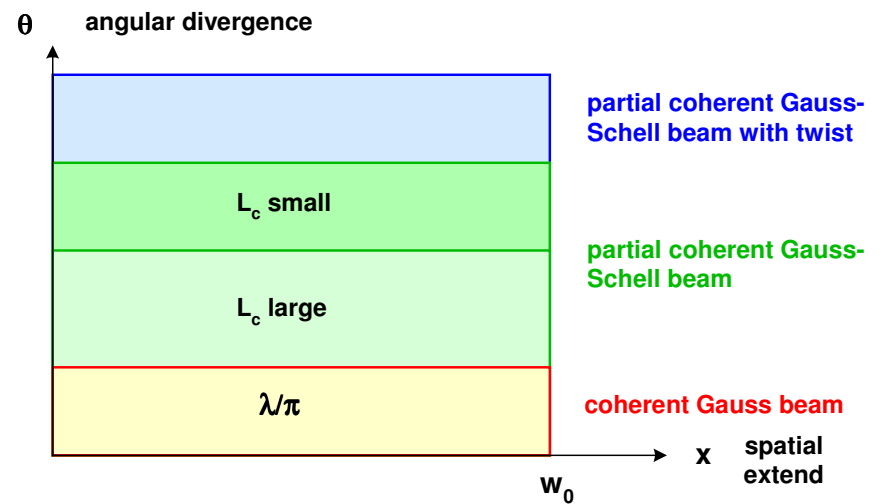
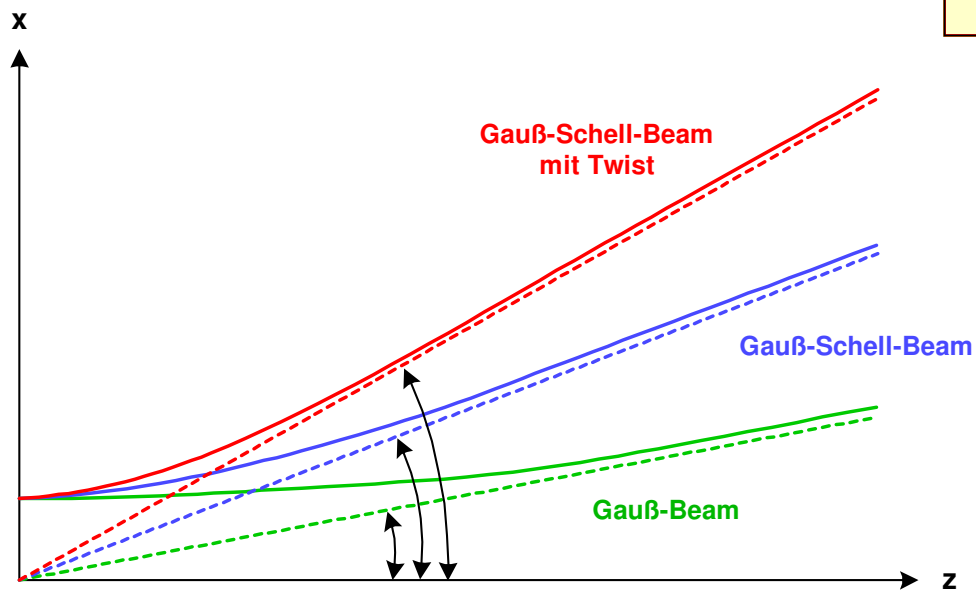
Verlauf der Strahlqualität

- Mit wachsendem Strahlradius und sinkender Brennweite steigt der Einfluß des Öffnungsfehlers : Qualität sinkt

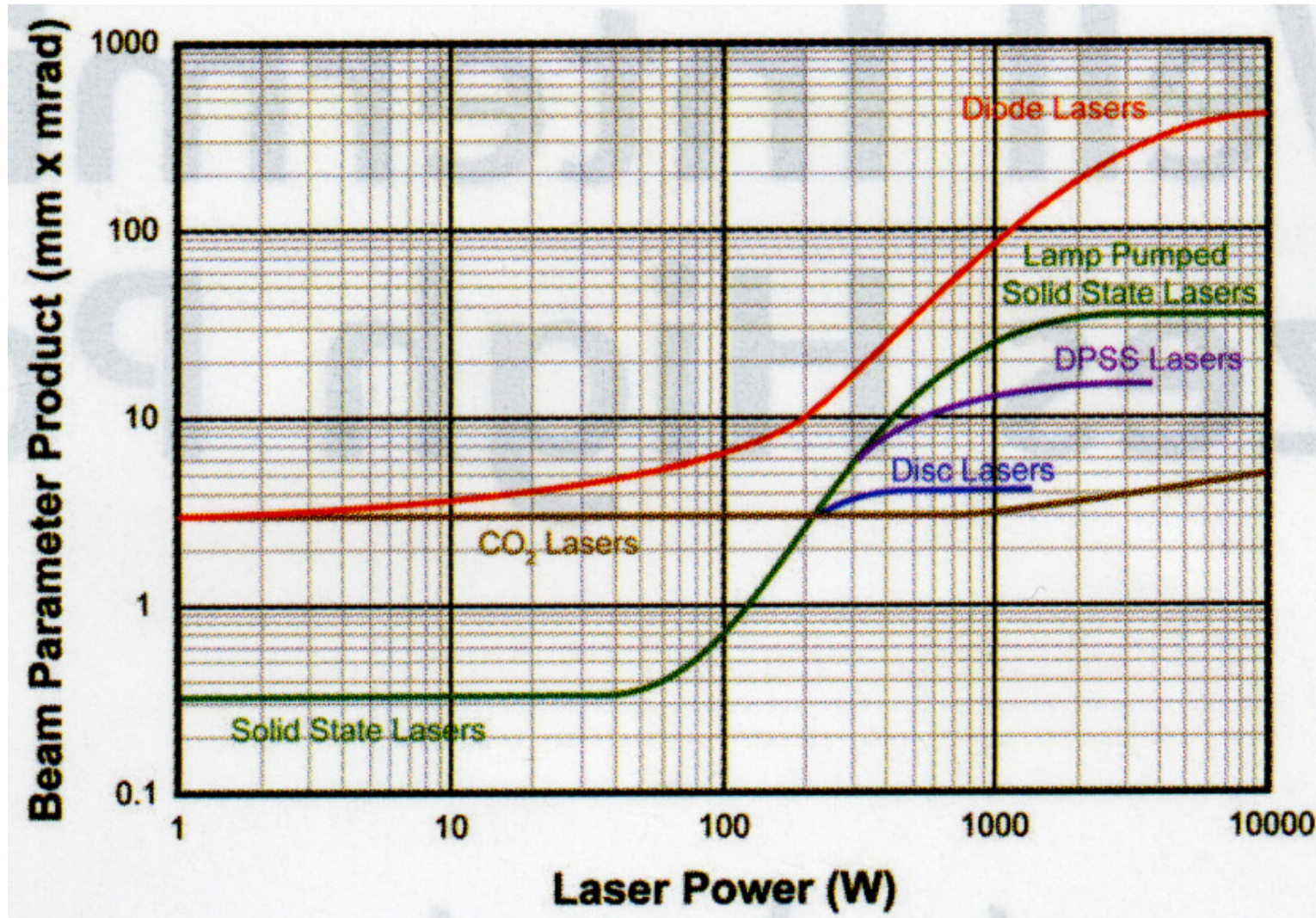


# Strahlqualität und Twist

- Die Strahlqualität sinkt mit abnehmender Kohärenz
- Bei konstanter Tailenweite: Winkelspektrum wächst



# Strahlqualität verschiedener Lasertypen





# Energie-Inhalts-Kriterium

- Leistungsinhalts-Kriterium :  
Relative Leistung in Blende mit Durchmesser  $2r_p$  :  
( power content radius )

$$P_{rel} = \frac{\int_0^{r_p} \int_0^{2\pi} I(r, \varphi) r dr d\varphi}{\int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I(r, \varphi) r dr d\varphi}$$

- Entsprechende Definition für Ort und Winkel,  
Qualitätsparameter K für z.B. 98% Leistung :

$$w_{E95} \cdot \theta_{E95} = \frac{1}{K_{E95}} \cdot \frac{\lambda}{\pi}$$

- Korrelation  $K_{E95}$  mit  $M^2$  -Parameter

| p | l   | 1 / K | M <sup>2</sup> |
|---|-----|-------|----------------|
| 0 | 0   | 1.00  | 1.00           |
| 1 | 0   | 1.63  | 1.73           |
| 4 | 0   | 2.85  | 3.00           |
| 7 | 0   | 3.72  | 3.87           |
| 0 | 1   | 1.33  | 1.41           |
| 0 | 4   | 1.92  | 2.24           |
| 0 | 7   | 2.35  | 2.83           |
| 0 | 10  | 2.70  | 3.32           |
| 0 | 100 | 7.46  | 10.0           |
| 1 | 10  | 1.55  | 1.79           |
| 4 | 10  | 4.00  | 4.35           |
| 7 | 10  | 5.30  | 5.00           |

# Kurtosis-Parameter

- Parameter zur Beschreibung der Schärfe ( peakedness ) eines symmetrischen Strahlprofils

Definition : eindimensional

$$K_x = \frac{\langle x^4 \rangle}{3\langle x^2 \rangle^2}$$

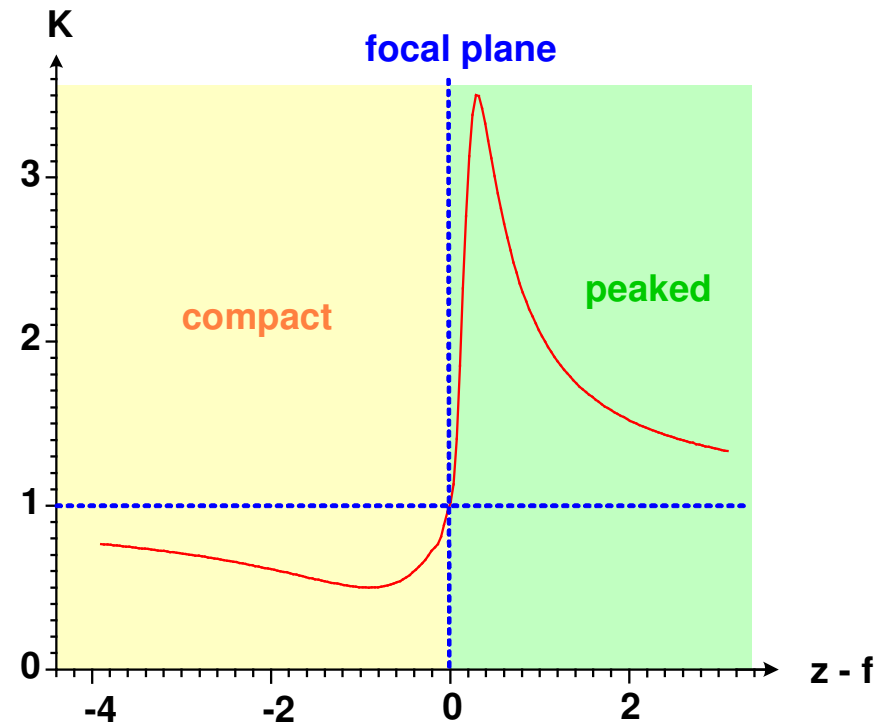
rotationssymmetrisch

$$K_r = \frac{\langle r^4 \rangle}{2\langle r^2 \rangle^2}$$

$K < 1$  : spitzer als Gauß

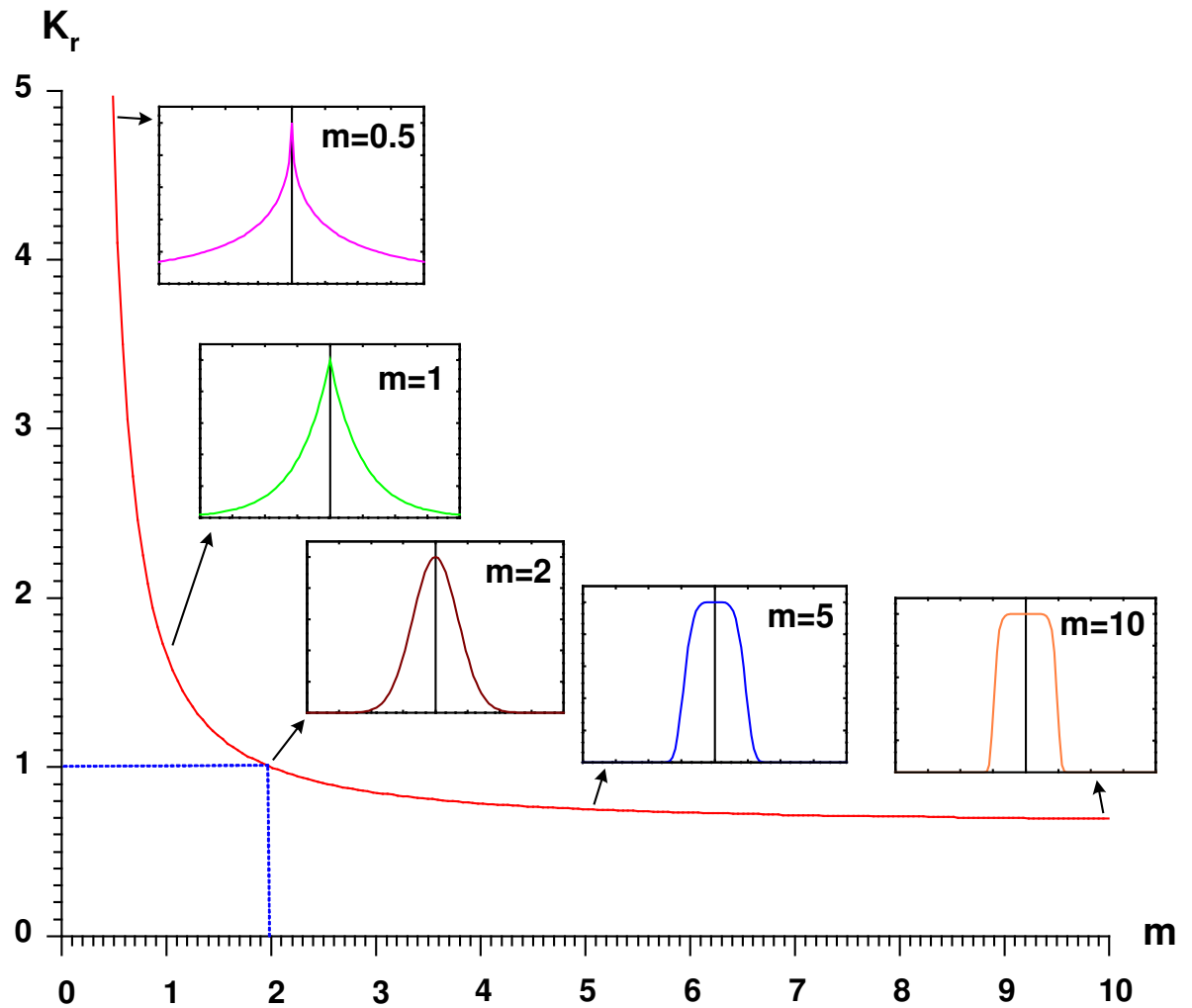
$K > 1$  : kompakter als Gauß

- Kurtosis eines Gaußprofils bei sphärischer Aberration als Funktion der Position  $z$
- $K$  ist keine Invariante der Propagation



# Kurtosis-Parameter

- Kurtosis eines Supergaußprofils, Funktion der Ordnung  $m$



## Strahlqualitätsdefinition in der ISO-Norm

---

- Knife-Edge-Verfahren,  
Scan einer Schneide über den Strahl,  
Transmission von zwei ausgezeichneten Transmissions-Leistungswerten.

$$d = 2 \cdot (x_{84} - x_{16})$$

- Variable Apertur im Strahl, Definition der 86.5 % -Leistungstransmission

- Moving Slit :  
Spalt über Strahl gescannt, Festlegung des  
Strahldurchmessers bzgl. des Maximums

$$d = x_{13.5}^{(2)} - x_{13.5}^{(1)}$$

- Strahldurchmesser über mehrere z aufgetragen :  
Strahlkaustik

$$d_{\sigma}^2(z) = A + B \cdot z + C \cdot z^2$$

Daraus Strahlqualität

$$M^2 = \frac{\pi}{4\lambda} \cdot \sqrt{A \cdot C - \frac{B^2}{4}}$$

# Strahlqualitätsdefinition in der ISO-Norm

- Umrechnung der Strahlqualitätsmaße : je nach Modenprofil

| Mode   | w-zweites Moment<br>( normiert ) | Variable Apertur<br>( 86.5 % ) | Knife-Edge<br>(84 %-16 %) | Spalt-<br>methode<br>( e <sup>-2</sup> ) |
|--------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--|
| TEM00  | 1.00                             | 1.00                           | 1.00                      | 1.00                                     |
| TEM01* | 1.414                            | 1.32                           | 1.53                      | 1.42                                     |
| TEM10  | 1.732                            | 1.64                           | 1.99                      | 1.66                                     |
| TEM02* | 1.732                            | 1.56                           | 1.92                      | 1.68                                     |
| TEM11* | 2.00                             | 1.88                           | 2.32                      | 1.98                                     |
| TEM03* | 2.00                             | 1.76                           | 2.26                      | 1.88                                     |

- Umrechnung Strahlqualität , Faktoren

$$\sqrt{M^2} = 1 + c_j \cdot (\sqrt{M_j^2} - 1)$$

| Methode           | c <sub>j</sub> |
|-------------------|----------------|
| Variable Apertur  | 1.14           |
| Moving Knife-Edge | 0.81           |
| Moving Slit       | 0.95           |

# Inhalt / Übersicht

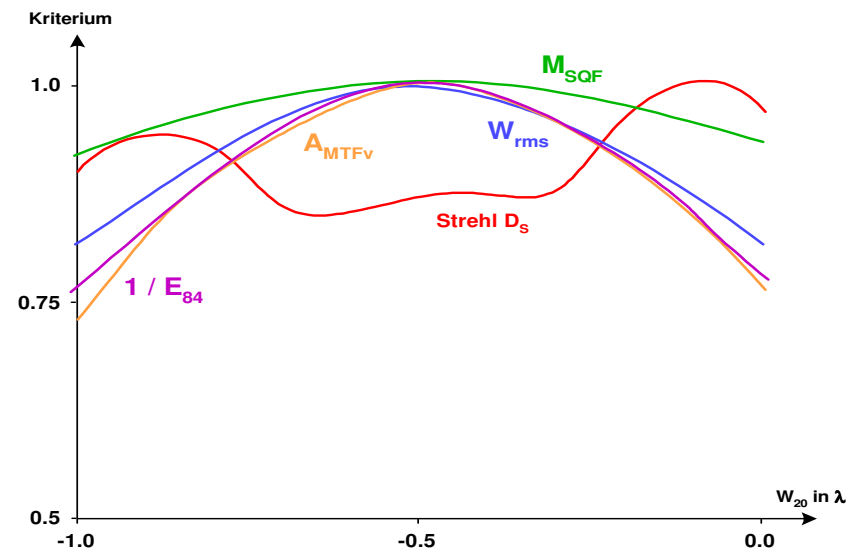
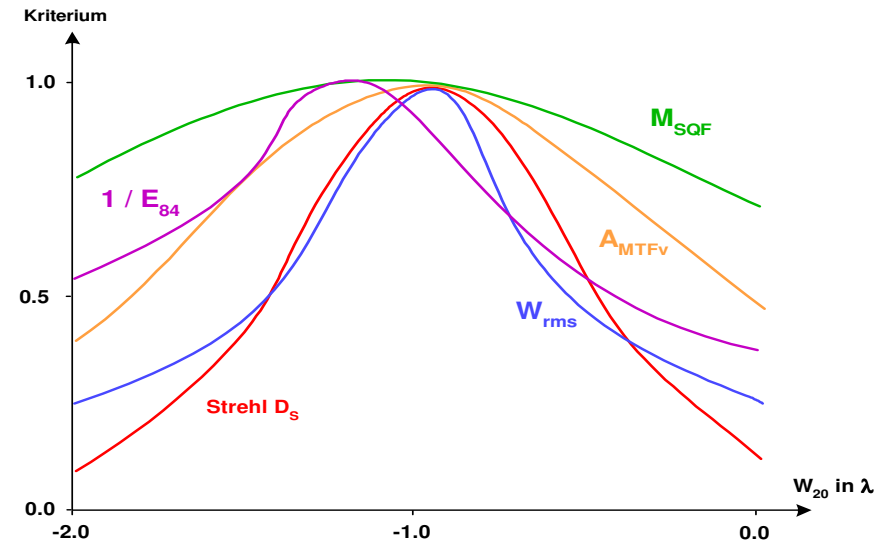
---

## 7. Gütekriterien

- 7.1 Allgemeines
- 7.2 Fokussierung
- 7.3 Geometrische Aberrationen
- 7.4 Rayleigh- und Marechalkriterien
- 7.5 Wellenaberrationen
- 7.6 Punktbild und Punktauflösung
- 7.7 MTF, Linienauflösung
- 7.8 Kantenauflösung
- 7.9 Sonstige Kriterien
- 7.10 Laserstrahlqualität  $M^2$
- 7.11 Vergleiche

# Vergleich von Gütekriterien

- Vergleich verschiedener Gütekriterien für ein System mit  $1 \lambda$  Astigmatismus, aufgetragen über der Defokussierung
- Vergleich verschiedener Gütekriterien für ein System mit  $1 \lambda$  sphärischer Aberration, aufgetragen über der Defokussierung
- Entsprechende Kurven anderer Form ergeben sich bei anderen Bildfehlern



## Vergleich verschiedener Gütekriterien

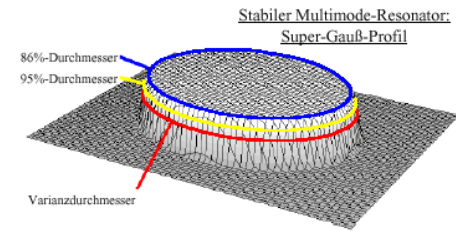
---

| Wellen-<br>aberration | Wert                         | Definitions-<br>helligkeit $D_S$ | Rel. Radius für<br>Energie $E_{84}$ | Übertragung<br>$A_{MTFv}$ |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Sphärisch             | $W_{40} = 2.0 \cdot \lambda$ | 0.39                             | 2.7                                 | 0.44                      |
|                       | $W_{40} = 3.0 \cdot \lambda$ | 0.27                             | 3.9                                 | 0.36                      |
|                       | $W_{40} = 4.0 \cdot \lambda$ | 0.20                             | 5.0                                 | 0.28                      |
| Astigmatismus         | $W_{22} = 0.6 \cdot \lambda$ | 0.55                             | 1.4                                 | 0.83                      |
|                       | $W_{22} = 1.3 \cdot \lambda$ | 0.16                             | 2.3                                 | 0.39                      |
|                       | $W_{22} = 2.3 \cdot \lambda$ | 0.09                             | 3.6                                 | 0.22                      |
| Koma                  | $W_{31} = 1.0 \cdot \lambda$ | 0.57                             | 2.0                                 | 0.68                      |
|                       | $W_{31} = 2.0 \cdot \lambda$ | 0.20                             | 3.5                                 | 0.35                      |
|                       | $W_{31} = 3.0 \cdot \lambda$ | 0.11                             | 5.0                                 | 0.24                      |

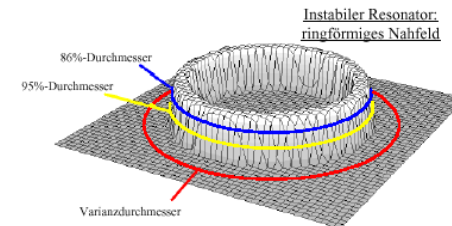


# Vergleich Leistungsdurchmesser

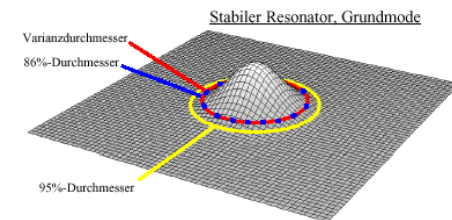
- Die Leistungsdurchmesser hängen über das Strahlprofil kompliziert mit dem 2. Momenten-Durchmesser zusammen



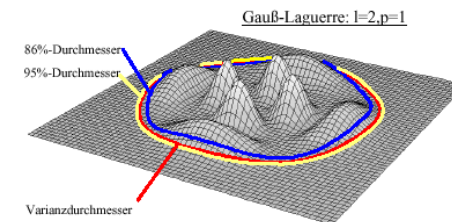
1. Supergaußprofil



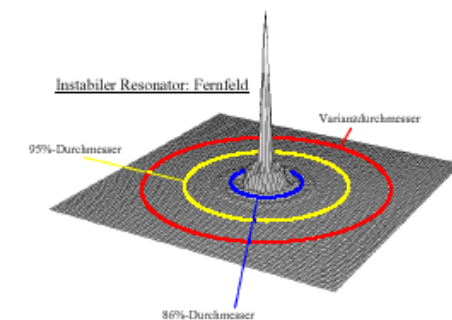
2. Ringprofil



3. Gaußprofil



4. Laguerremode 2,1



5. Peakprofil

Durchmesser :  
**2. Moment**  
**86% Energie**  
**95% Energie**