

Entwicklung optischer Systeme:

2. Technisches Lastenheft

2. Technisches Lastenheft

2.1. Definition Lastenheft

2.2. Motivation

2.3. Optische Anforderungen

- Abbildungssysteme
- Objekt-Eigenschaften
- Detektor
- Beleuchtungssysteme

2.4. Weitere Anforderungen

Das **Lastenheft** (teils auch Anforderungsspezifikation, Anforderungskatalog, Produktskizze, Kundenspezifikation oder englisch Requirements Specification genannt) beschreibt die Gesamtheit der Anforderungen des Auftraggebers an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers.

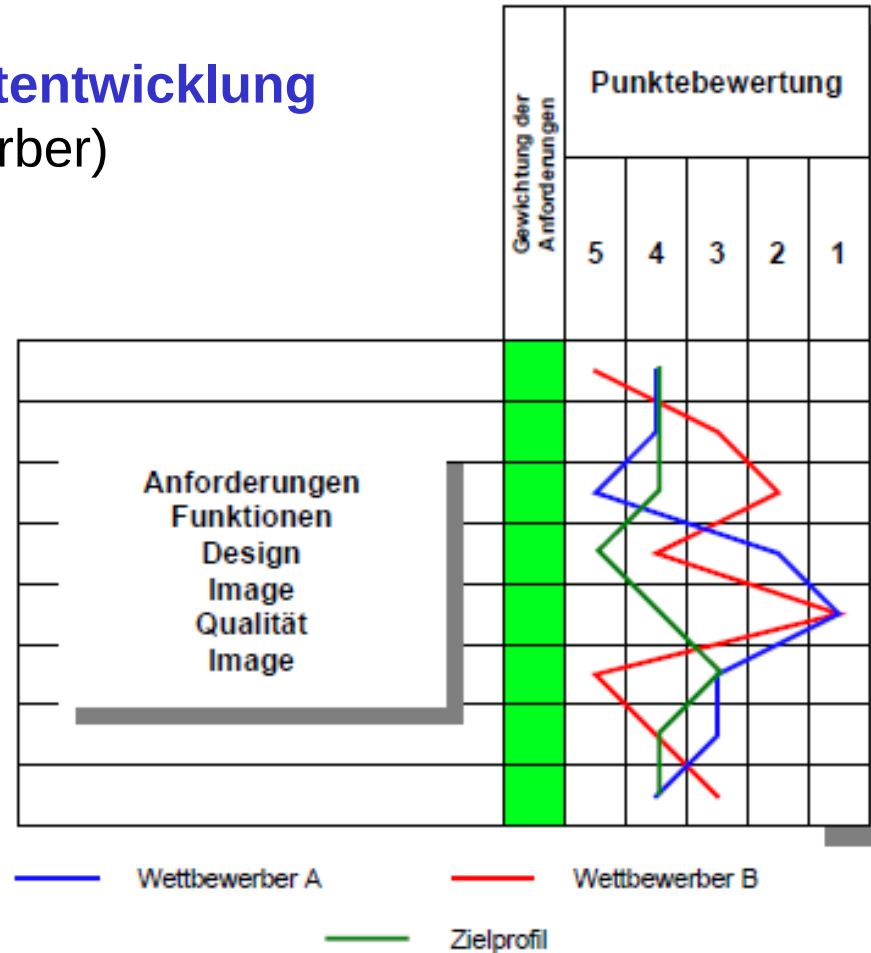
Quelle: Wikipedia

DIN 69901-5[1] (Begriffe der Projektabwicklung)
„vom Auftraggeber festgelegte Gesamtheit der Forderungen an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers innerhalb eines Auftrages“

Das Lastenheft besagt somit **„Was und Wofür“** entwickelt werden soll.

Im Gegensatz dazu beschreibt das **Pflichtenheft** später **„Wie und Womit“** die Anforderungen erfüllt werden.

Das Lastenheft und die Konzeptphase
dient sehr oft zur
systematischen Produktentwicklung
(Vergleich zum Wettbewerber)



Quelle: „Methoden der Produktentwicklung, Prof. Englen, Uni Pforzheim

Typische Inhalte des Lastenheftes:

(hängt stark von der Branche, Firmengröße, Projektumfang ab)

1. Einführung
2. Beschreibung des Ist-Zustands
3. Beschreibung des Soll-Konzepts
4. Beschreibung von Schnittstellen
5. Funktionale Anforderungen
6. Nichtfunktionale Anforderungen Benutzbarkeit
 - Zuverlässigkeit
 - Effizienz
 - Änderbarkeit
 - Übertragbarkeit
 - Wartbarkeit
7. Risikoakzeptanz
8. Skizze des Entwicklungszyklus und der Systemarchitektur oder auch ein Struktogramm
9. Lieferumfang
10. Abnahmekriterien

Quelle: Wikipedia

Warum braucht man ein Lastenheft?

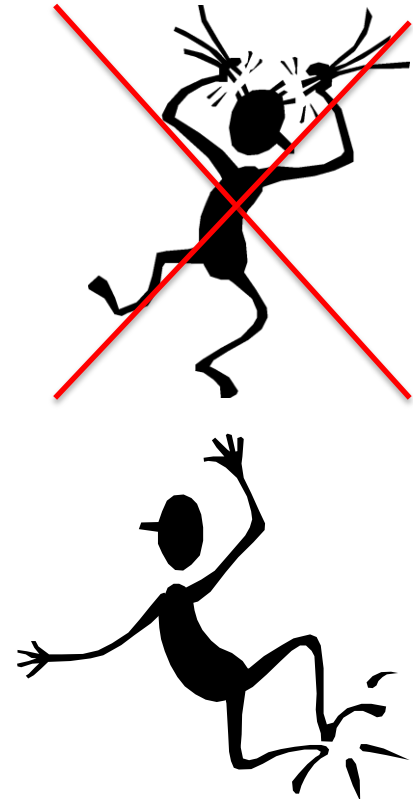
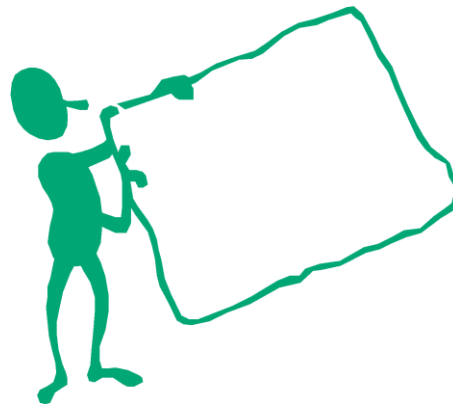


Anfrage:

Kunde möchte ein Optiksyst~~em~~ um „etwas“ zu machen.

Ziel:

Möglichst effiziente Entwicklung
Erfüllung aller Anforderungen



Was soll das System können?

Abbildungssystem: Was soll abgebildet werden?
Welcher Detektor?

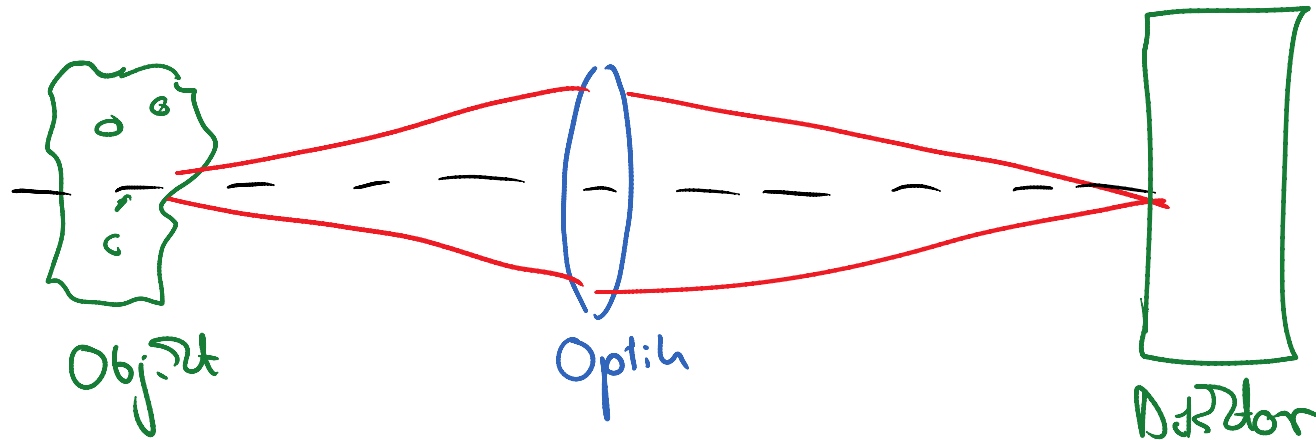
Auflösung? Objektfeld?

Beleuchtungssystem: Lichtquelle?
Intensität? / Winkel?

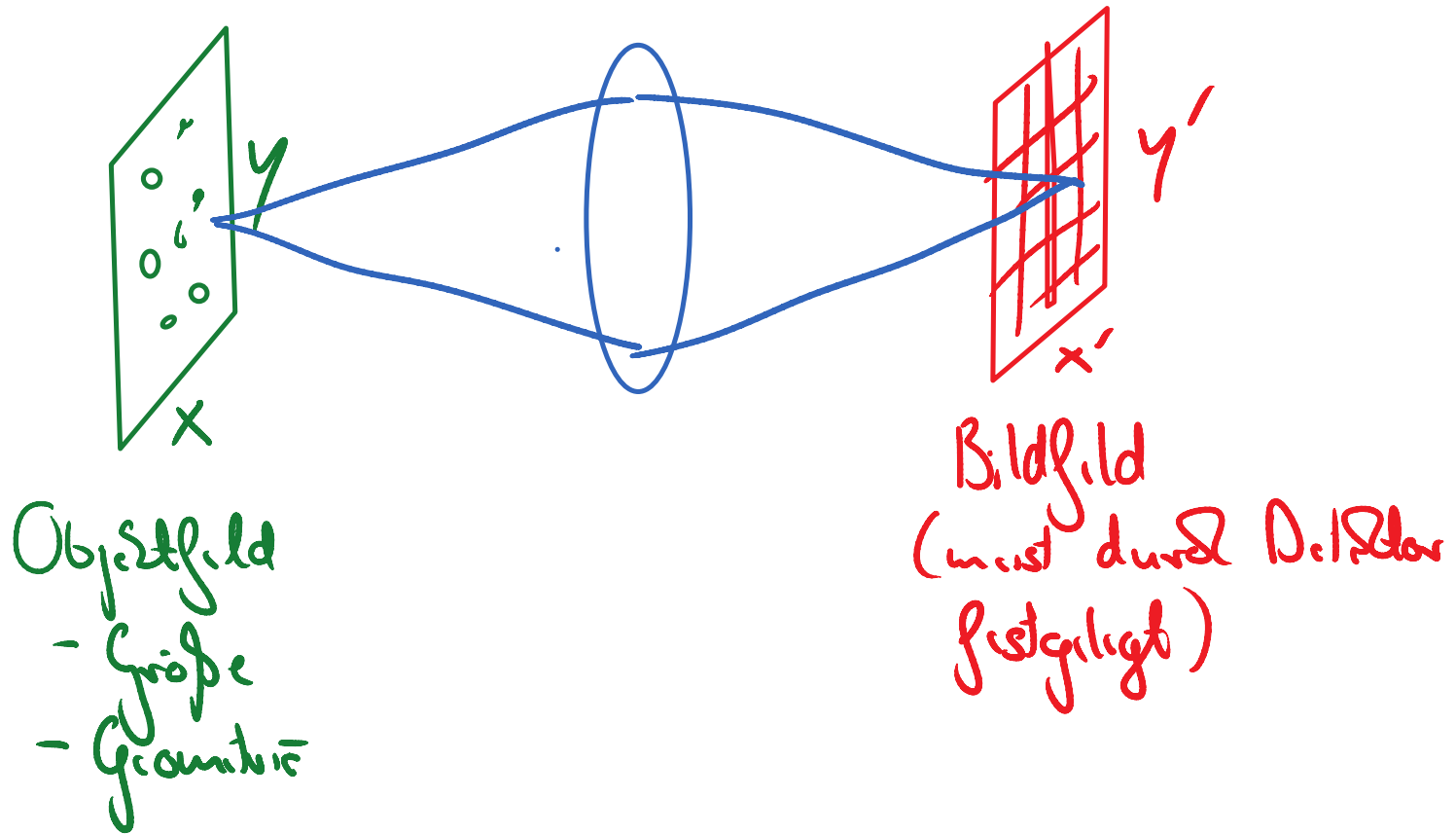
Homogenität

Spektrometer: Sp. Strale Auflösung?
Wellenlängenbereich?

Grundfragen:

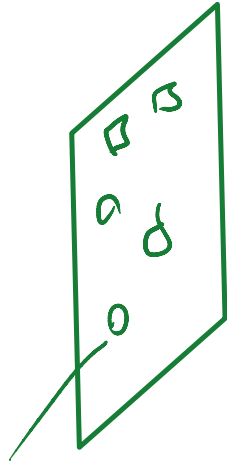


- Wieviel will man sehen? $\Rightarrow$ Objektfeld / Bildfeld
- Welche Details? $\Rightarrow$ Auflösung, Kontrast, Farbe



⇒ Abgeleitete Spezifikation
Maßstab $\beta_y = \frac{y'}{y}$ / Verzerrung $\times \%$

Ableitung von optischen Kenngrößen



Objekt-Details
z.B. Größe (1 μm)

- Farbe
- Polarisation
- Transmission
- Reflexion



Ableitung optischer
Kenngrößen: (NA, $\#$)

$$\Delta x = 0.61 \frac{\lambda}{NA} \Rightarrow NA$$

oder

MTF bei 10 lp/mm > 80%

usw.

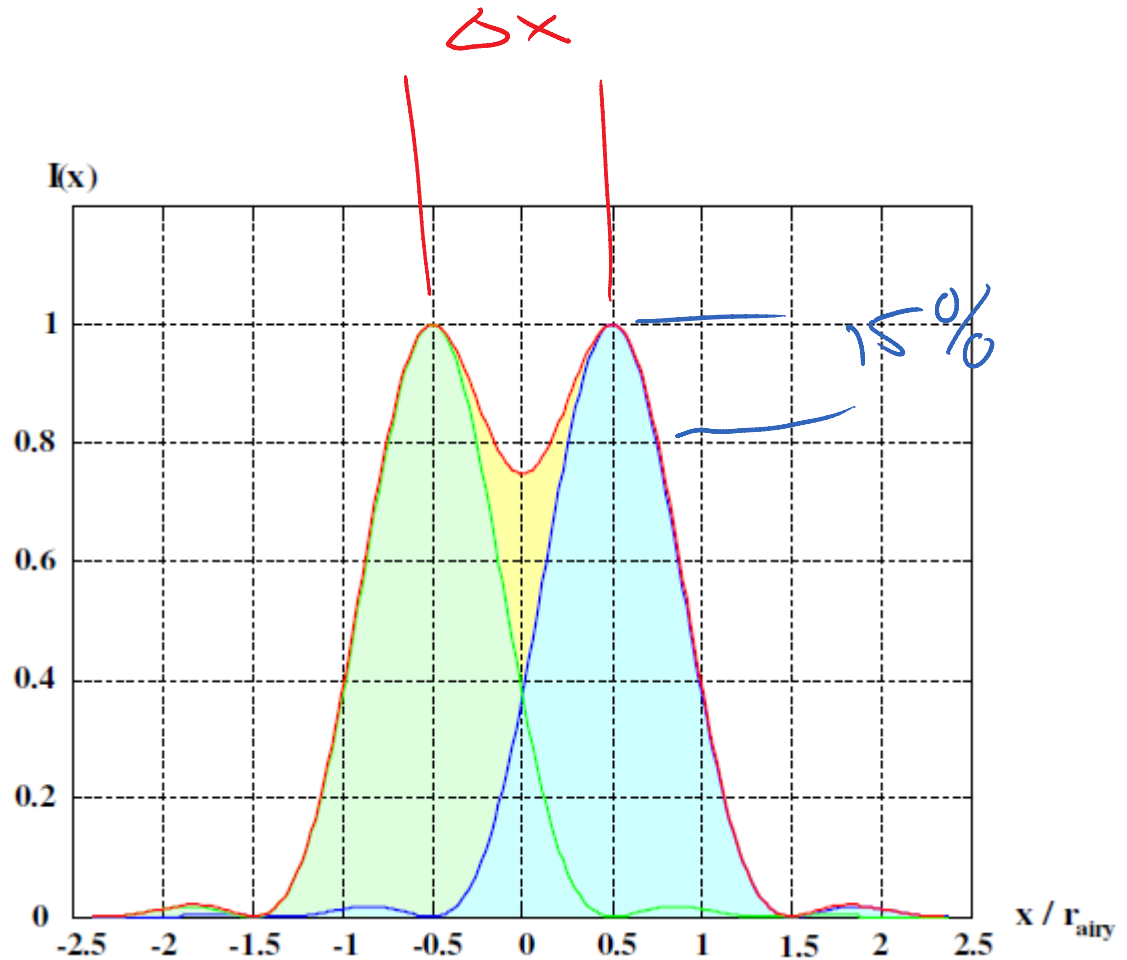
Rayleigh:

$$\Delta x = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

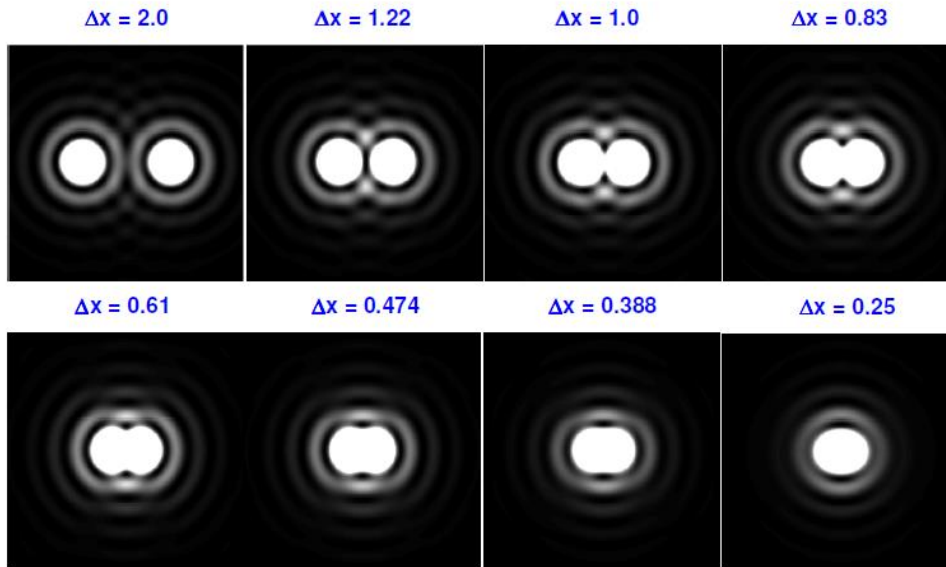
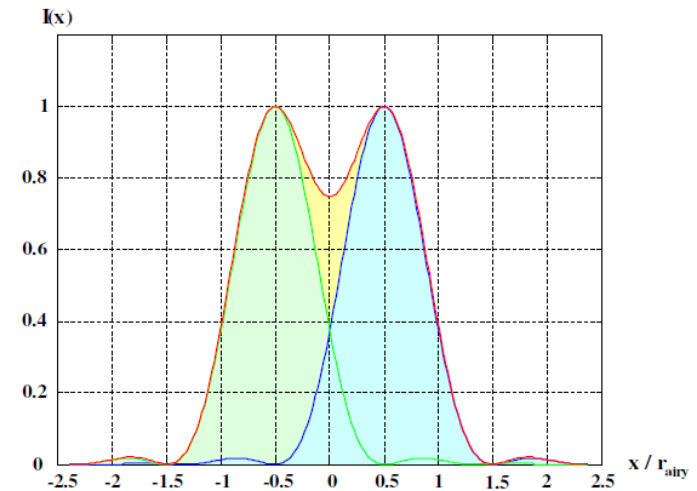
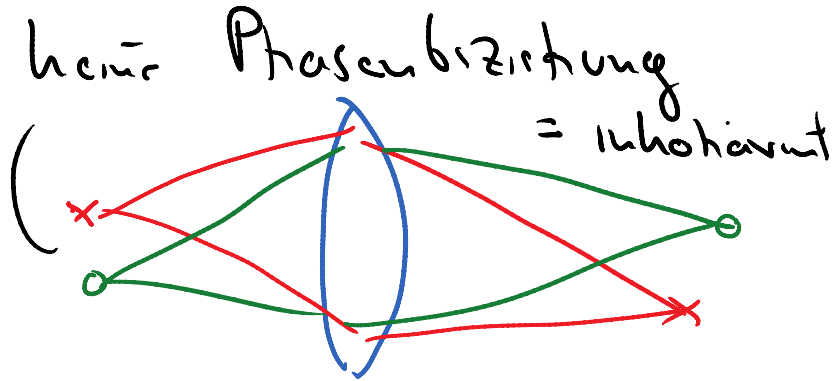
Achtung:

abhängig von

- Blendenform
 - rund (0.61)
 - eckig
- Blendendurchmesser
 - hoch.
 - in hoch.
- Objekt



Auflösung - inkohärent



Quelle: H. Gross „Optical Systems“

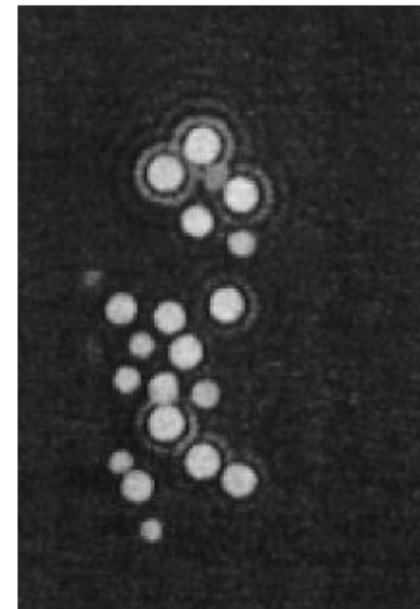
- Mit der numerischen Apertur des Mikroskopobjektivs zunehmende Auflösung von Objektdetails



NA = 0.20



NA = 0.60



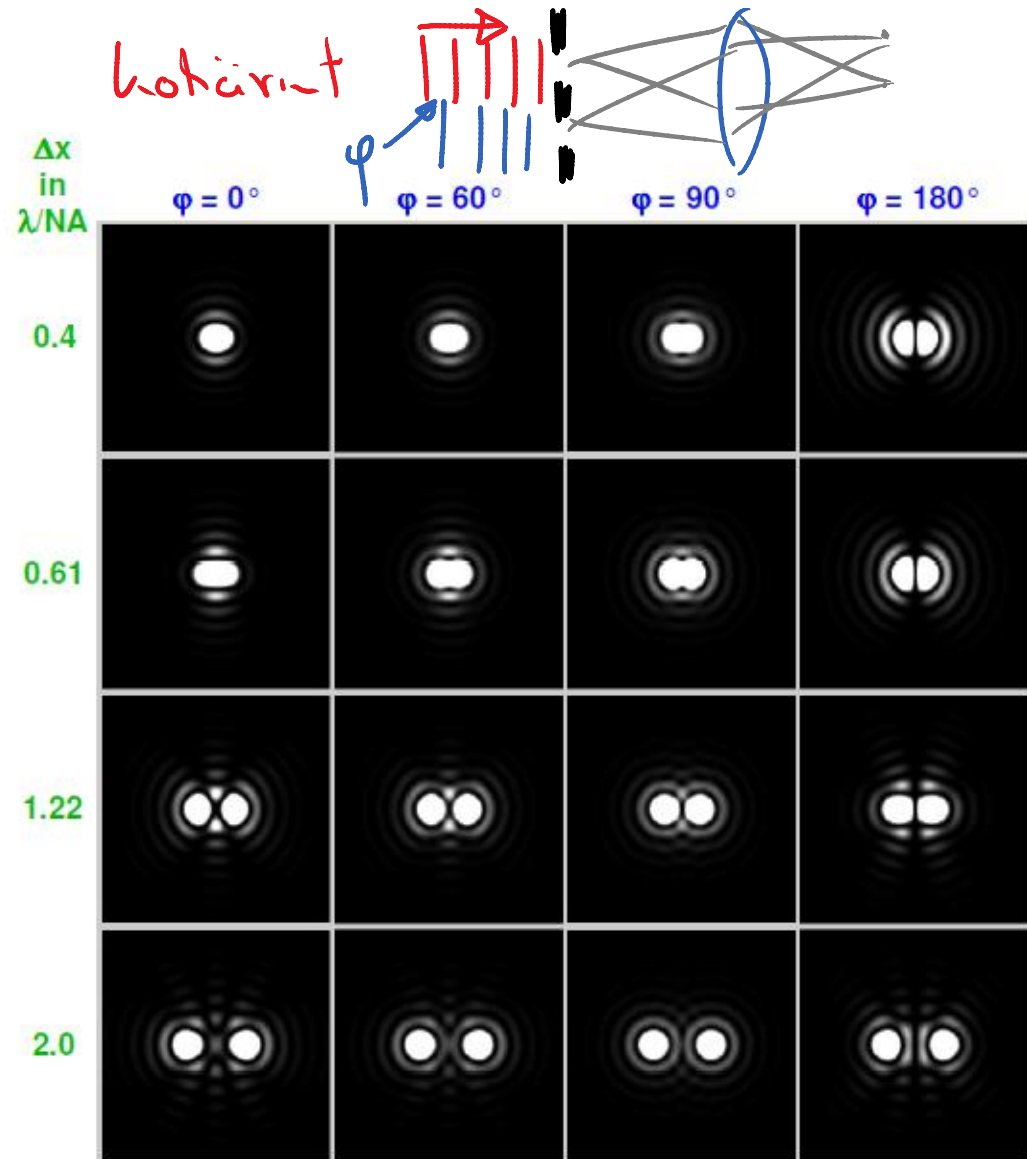
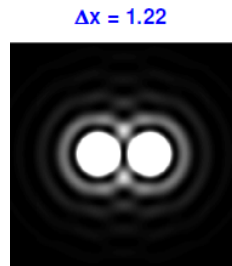
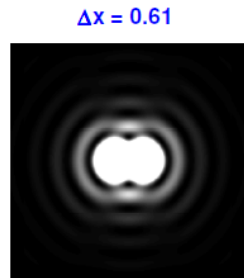
NA = 1.30

Quelle: H. Gross „Optical Systems“

Auflösung – Einfluss der Kohärenz



in kohärent



Quelle: H. Gross „Optical Systems“

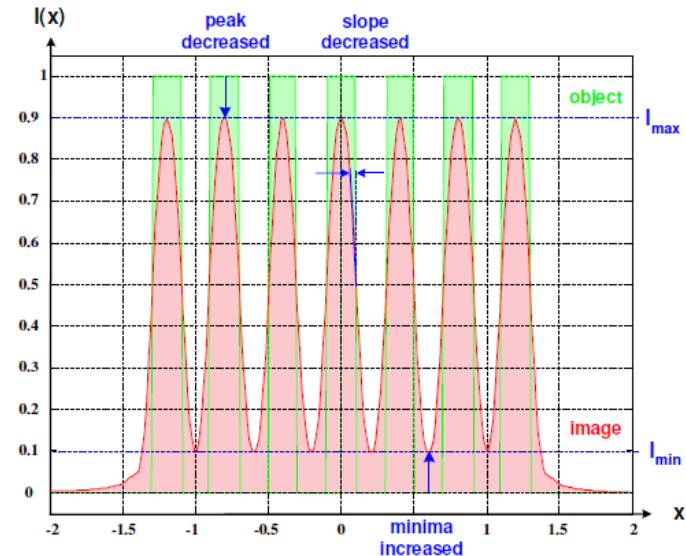
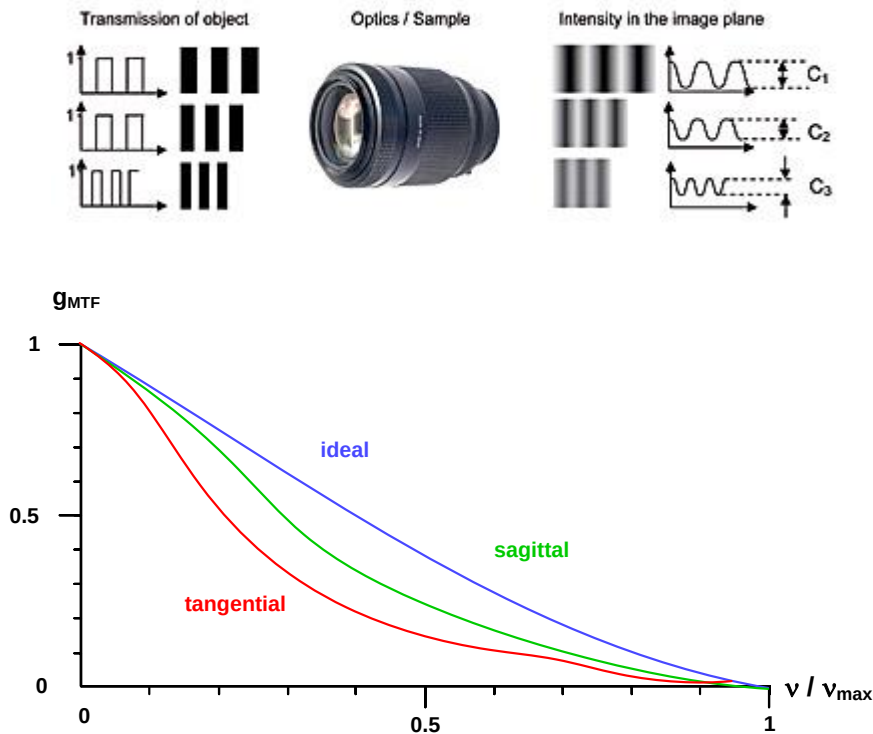
MTF = Kontrast – Übertragungs - Funktion



Kontrast (Modulation)

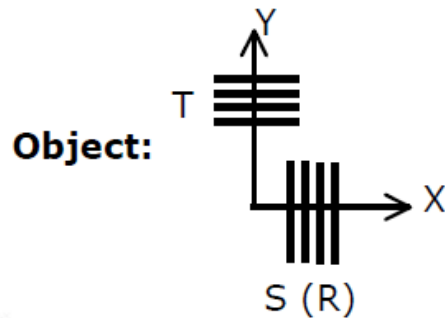
..... bei versch. Ortsfrequenzen

$$K = \frac{I_{Max} - I_{Min}}{I_{Max} + I_{Min}}$$

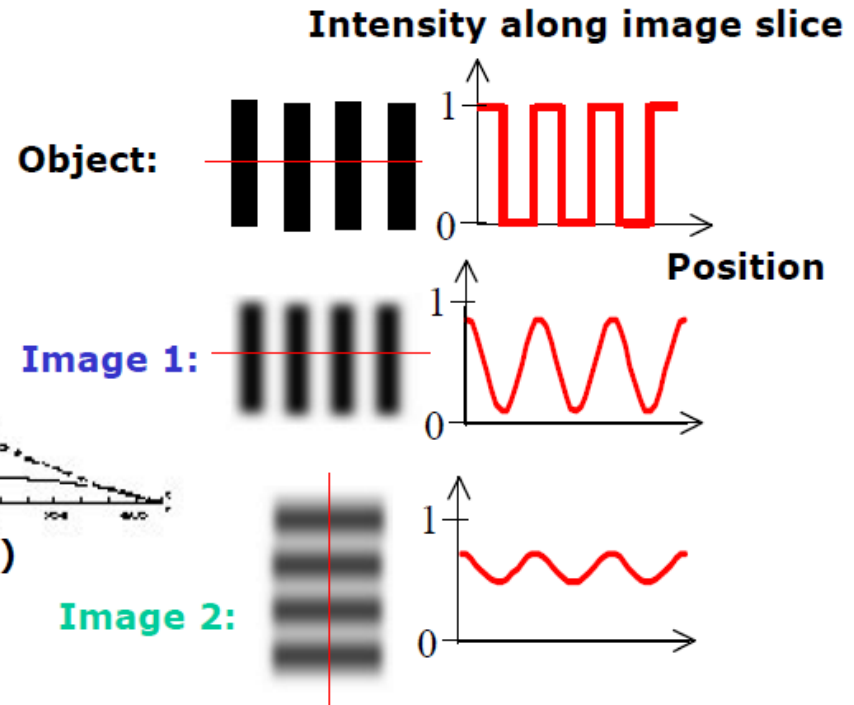
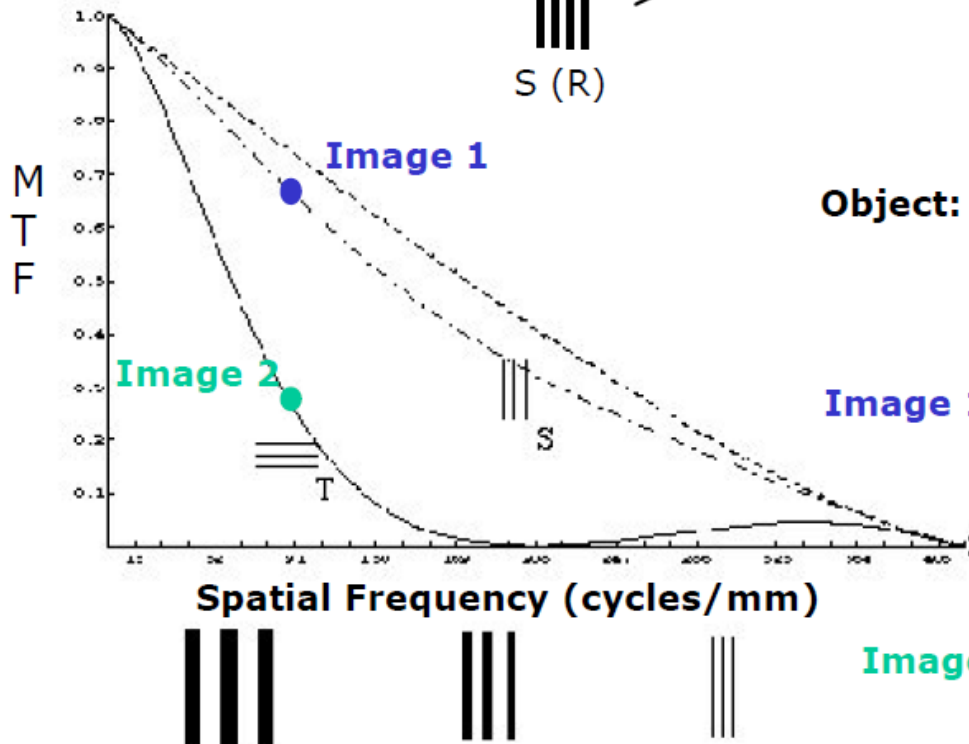


Ortsfrequenz $p = 1/d$ – Angabe in lp/mm (line pairs pro mm)

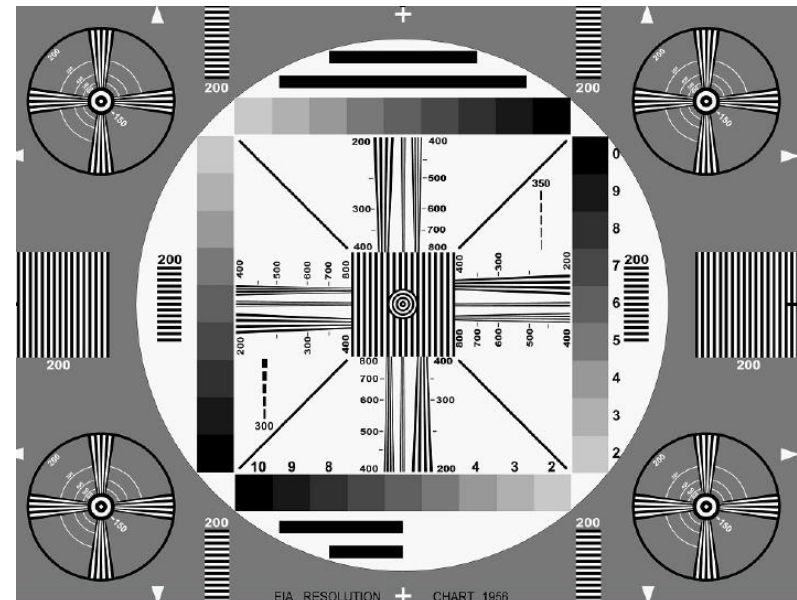
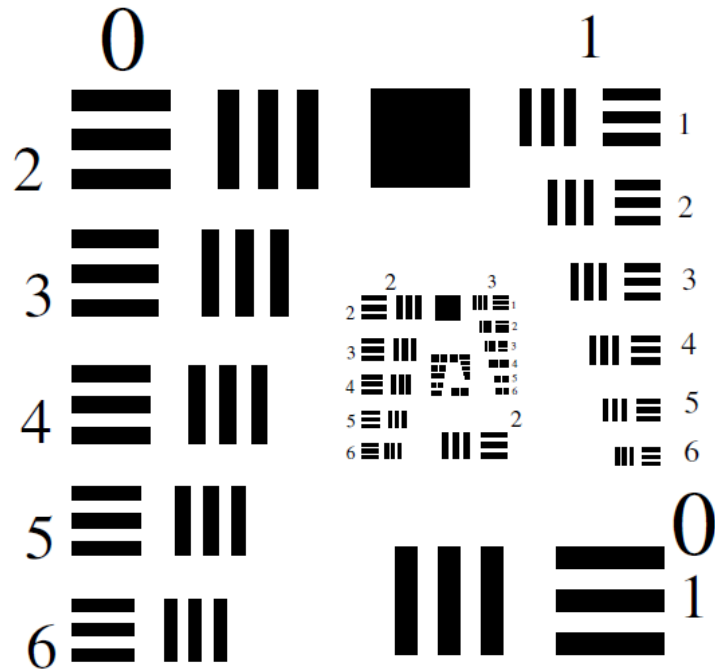
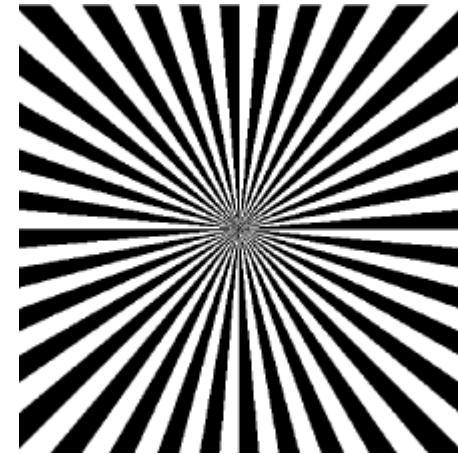
MTF – Sagittal (radial) und Tangential



MTF depends on target orientation:
(direction of variation of intensity)
S = Sagittal (a.k.a. R = Radial) or
T = Tangential



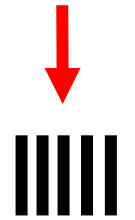
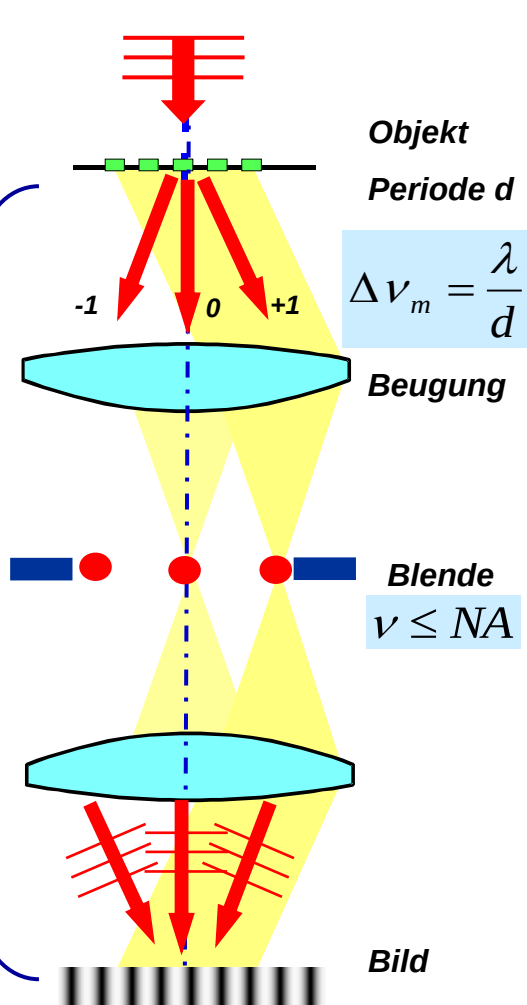
Siemens -
Stern



Ideale MTF (Bildentstehung nach Abbe)



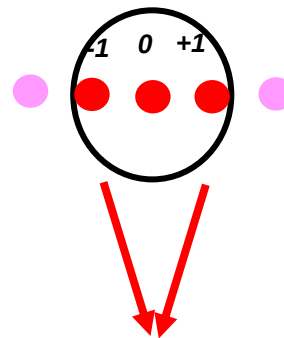
Abbildung 4f



Objekt erzeugt
Beugungsordnungen

$$\sin v_n = n \cdot \frac{\lambda}{d}$$

$$\Rightarrow v_1 = \frac{\lambda}{d}$$

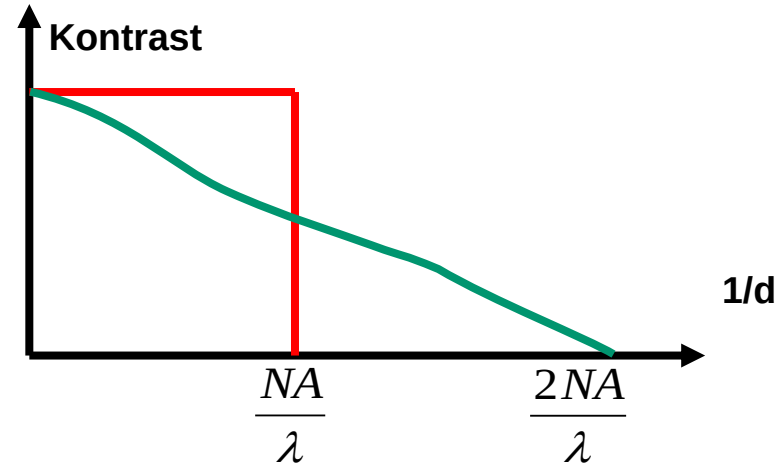
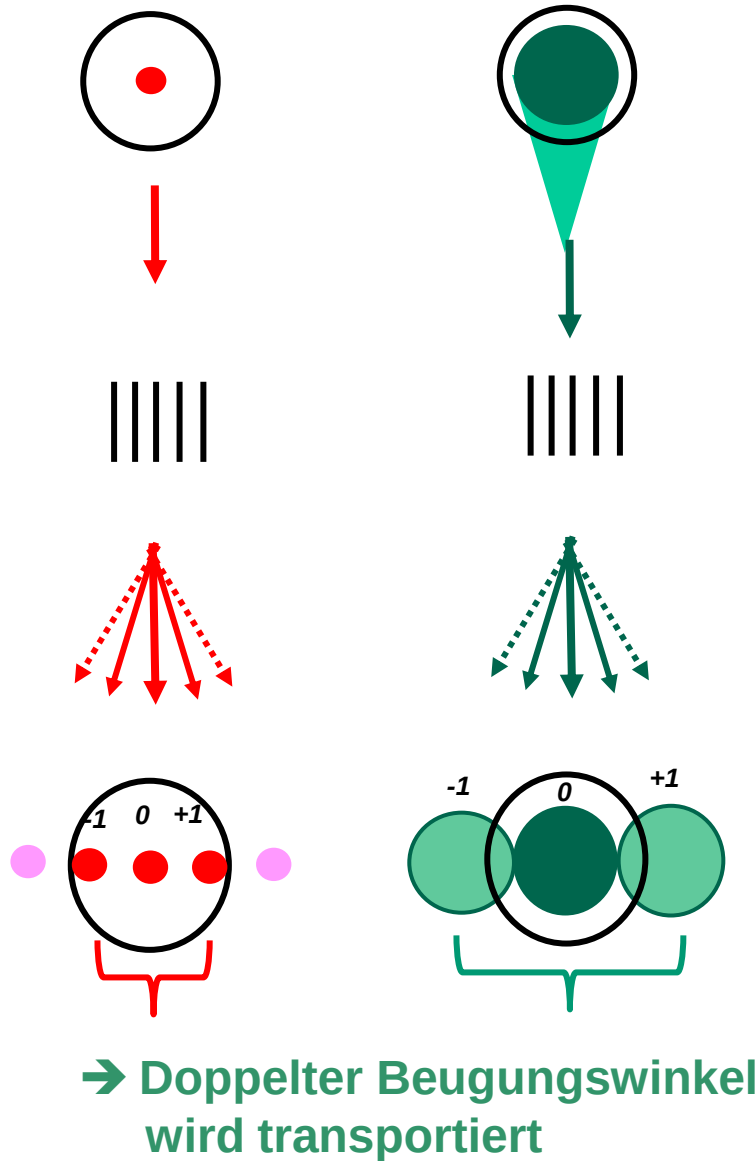


Blende wirkt als
Tiefpassfilter für
hohe Ordnungen



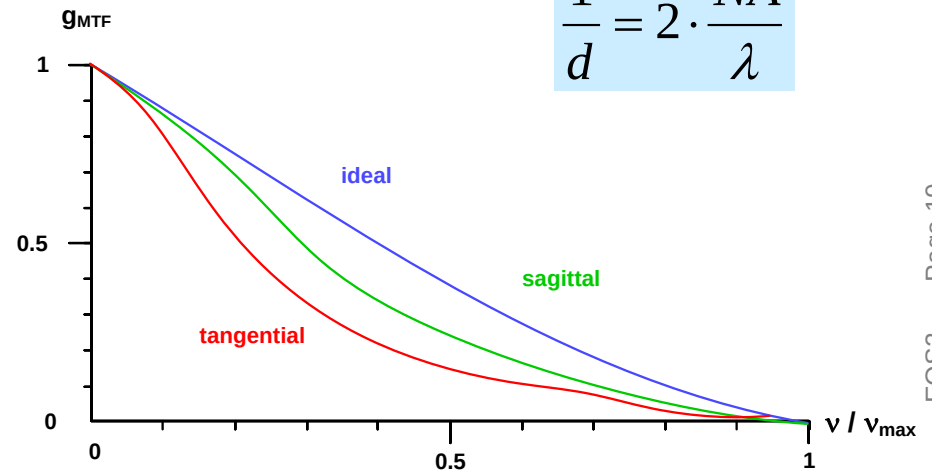
Bild entsteht durch
Interferenz der
Beugungsordnungen

MTF (kohärent – inkohärent)

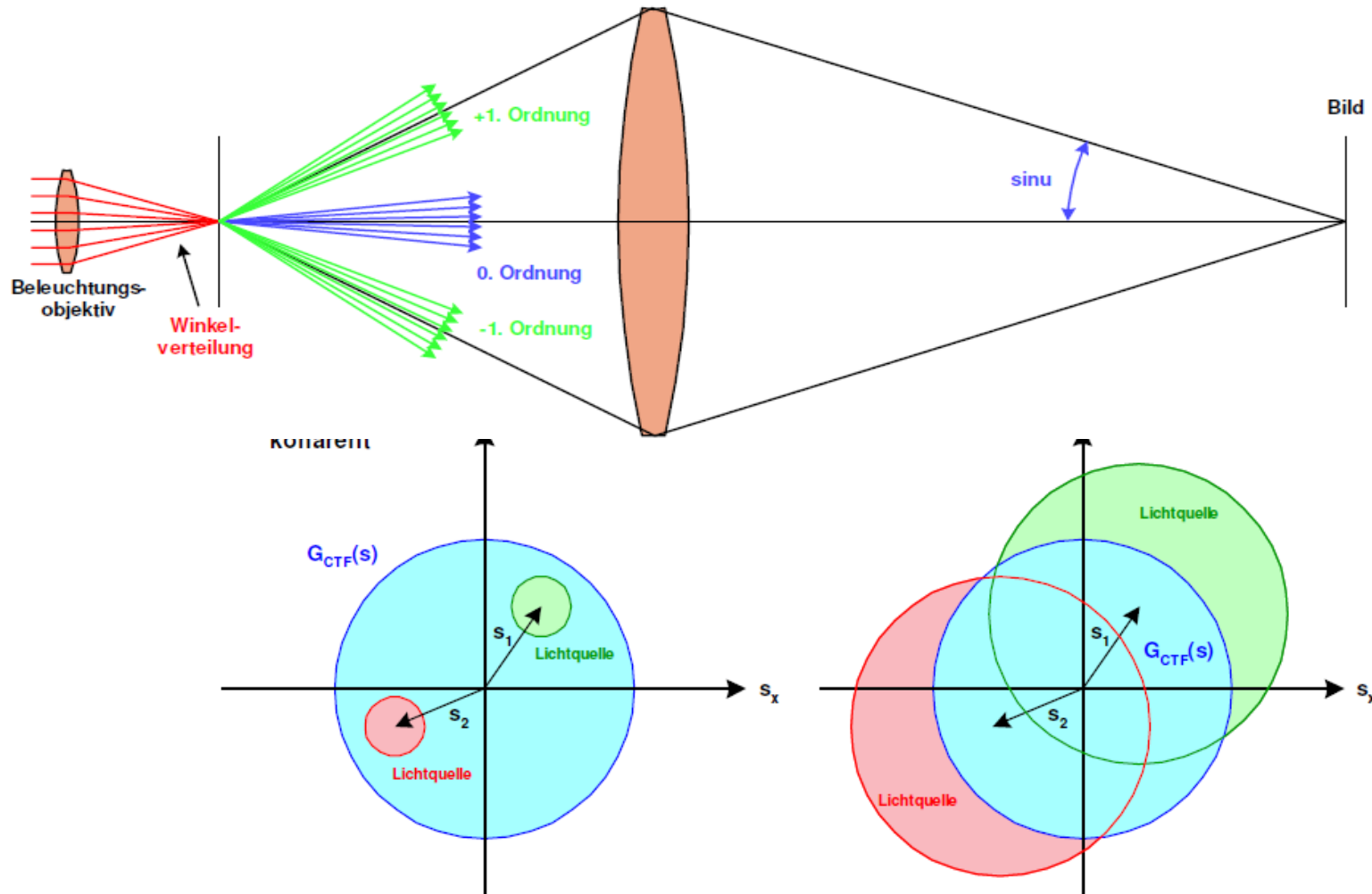


→ Maximale Grenzfrequenz für inkohärente Beleuchtung

$$\frac{1}{d} = 2 \cdot \frac{NA}{\lambda}$$



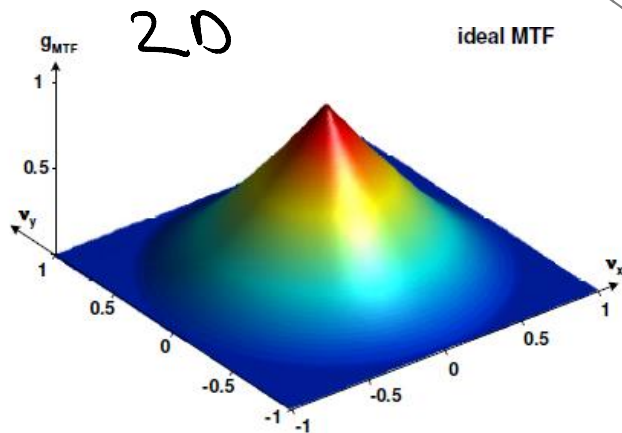
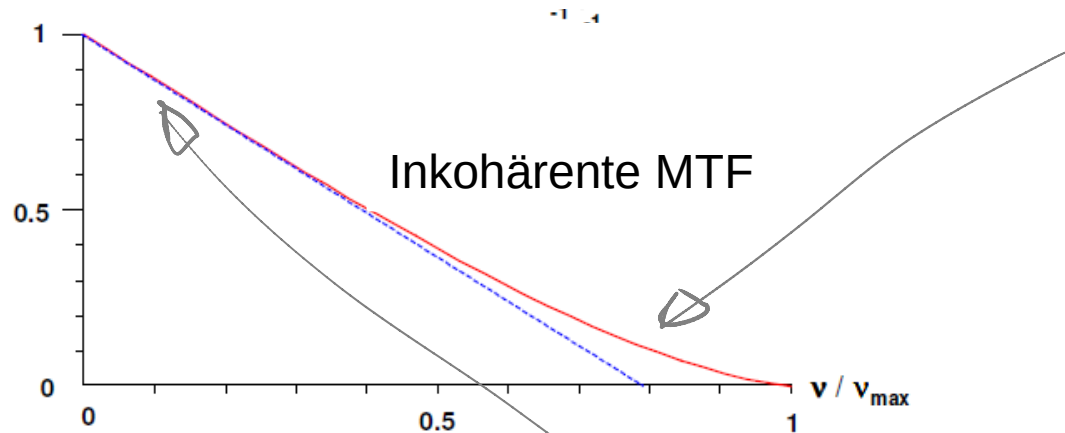
Für den Kontrast (MTF-Kurve) ist der Überlapp der Beugungsordnung mit der Objektiv-Begrenzung (Apertur) relevant:



MTF - Kurve

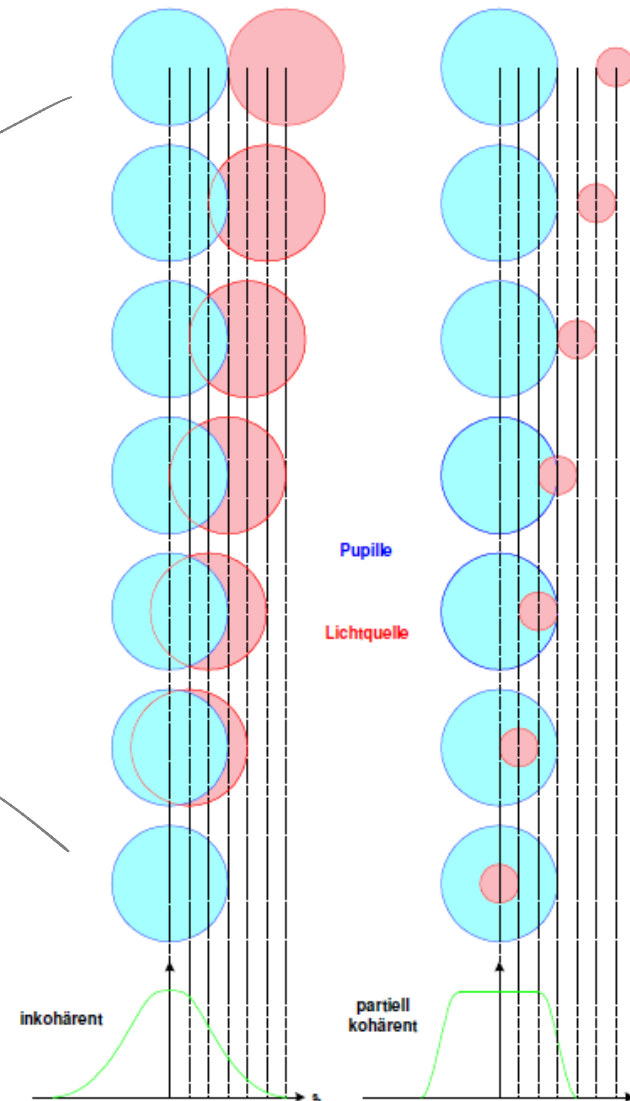


MTF-Verlauf aus Überlapp der Beugungsordnung mit der Objektiv-Begrenzung (Apertur)



inkohärent

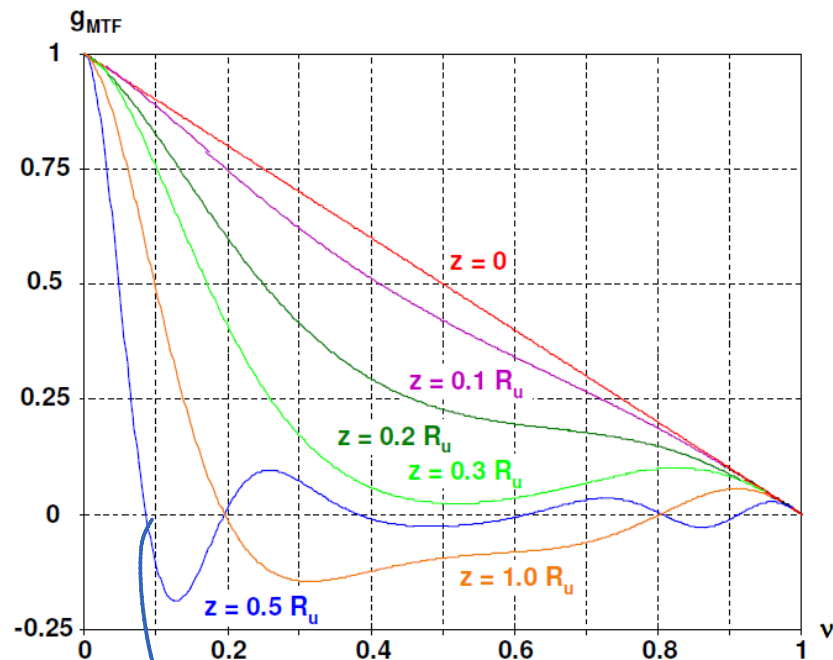
teil-kohärent



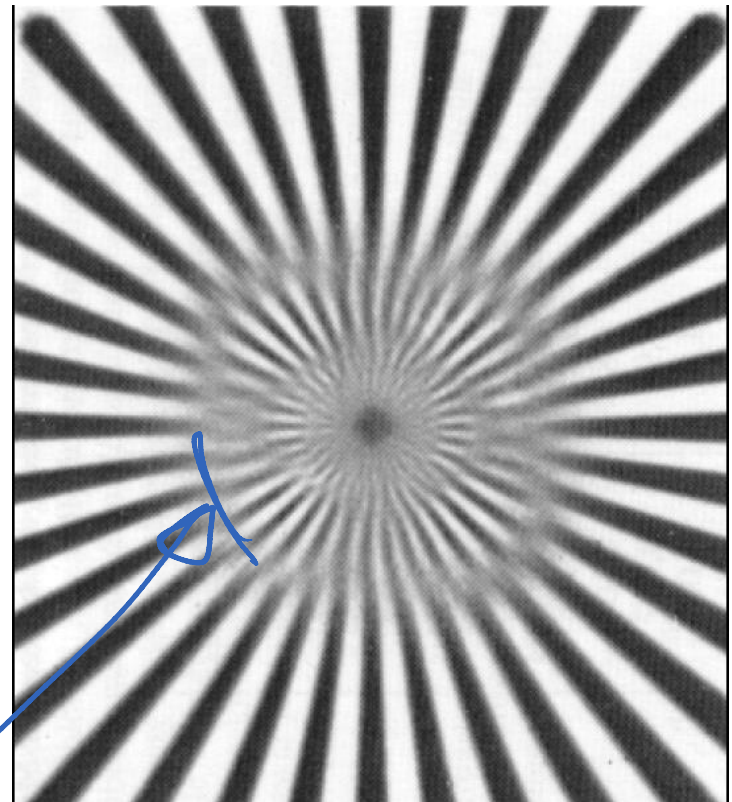
MTF-Verlauf für verschieden starke Bildfehler

- Kontrast sinkt
- MTF kann negativ werden (Kontrast-Umkehr)

MTF-Bewertung
mit Siemens-Stern

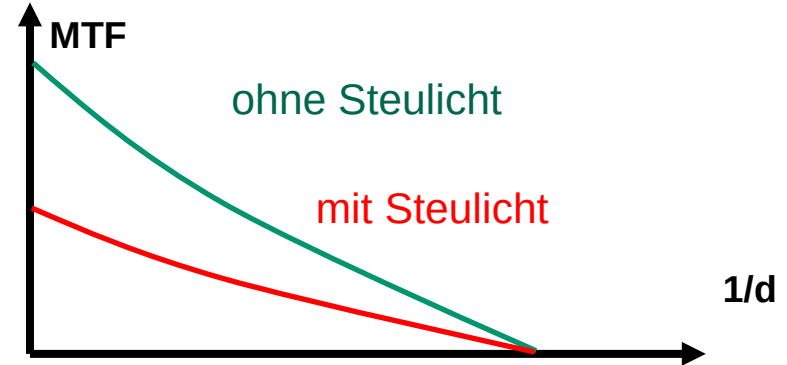


Kontrast-Umkehr



MTF und Streulicht

Streulicht lässt Kontrast sinken



original

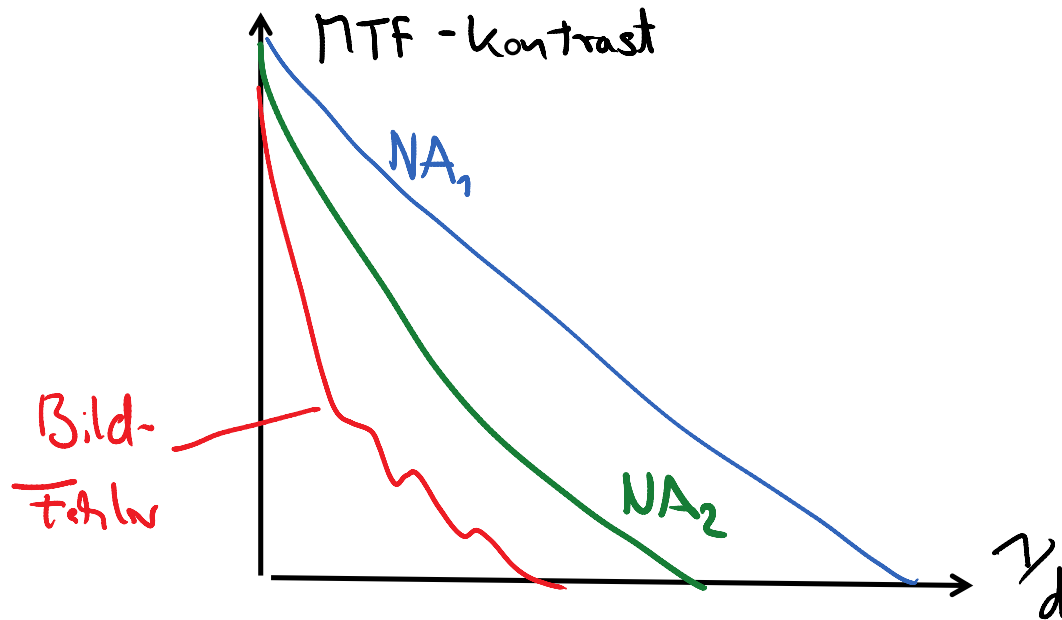
straylight 15%

straylight 30%

straylight 50%



Ableitung von Anforderungen aus der MTF



Form der MTF-Kurve
wird beeinflusst von
 λ (Wellenlänge), NA
und - Abblendeoptik
- Belichtung
- Streulicht

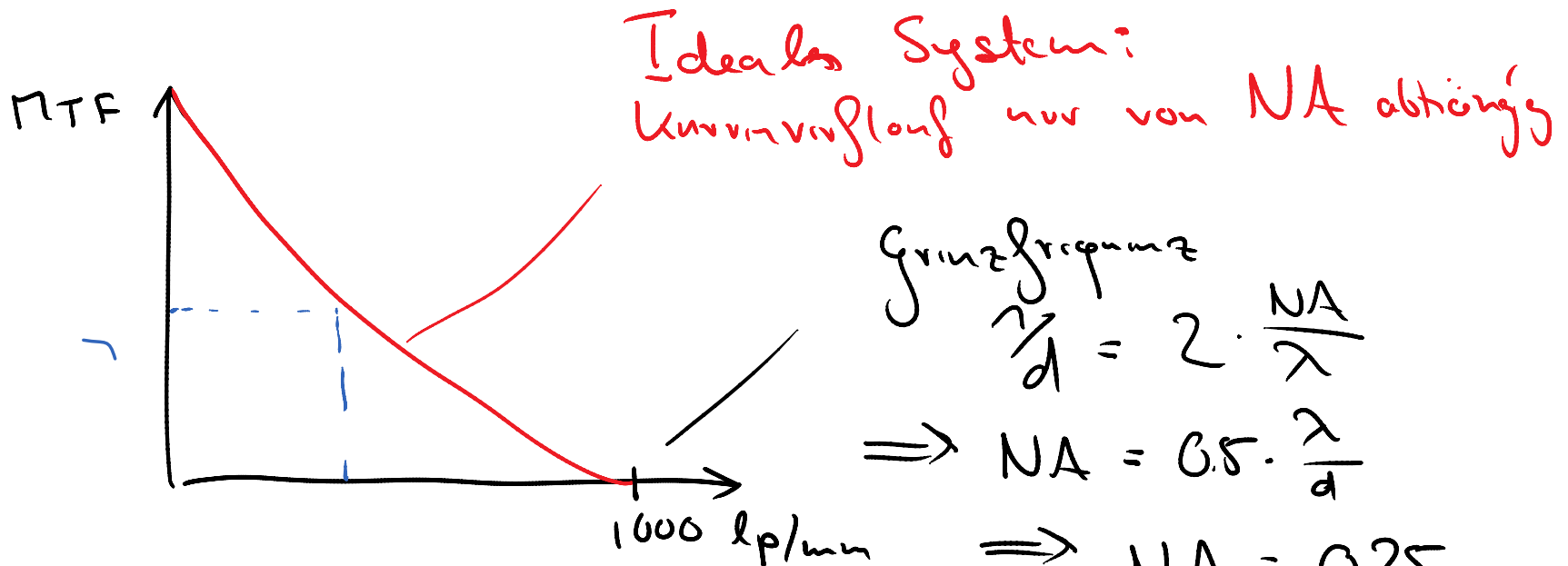
z.B. Vorgabe Kontrast $> x\%$ bei bestimmter Frequenz $1/d$
 $\Rightarrow NA, f\#$

Ableitung von Anforderungen – Beispiel 1



Beispiel: Beobachtung von Gewebe.
Typische Strukturgröße $1\mu\text{m}$.

$$\begin{aligned} & \text{|||} \Rightarrow 1 \text{ lp}/\mu\text{m} \\ & \text{' ' } d = 1\mu\text{m} = 1000 \text{ lp}/\text{mm} \end{aligned}$$

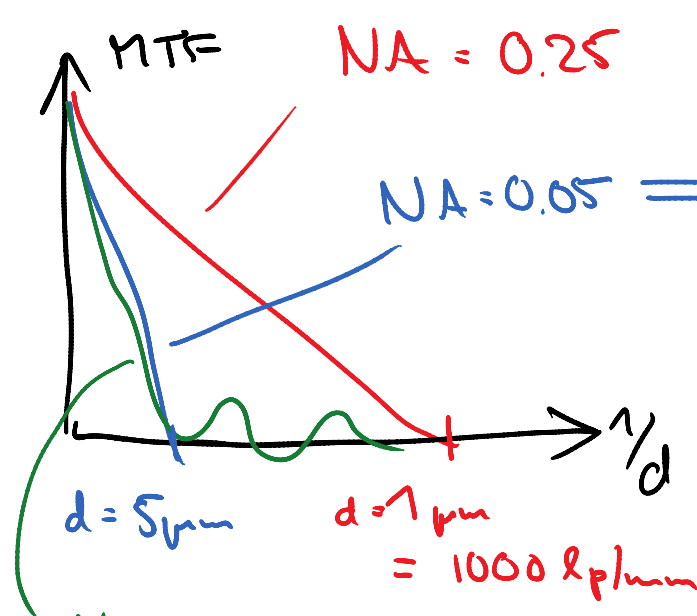


Vgl.: Rayleigh $\Delta x = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{NA} \Rightarrow NA = 0.61 \frac{\lambda}{\Delta x}$

Ableitung von Anforderungen – Beispiel 2



Beispiel: Beobachtung von Gewebe (typische Strukturgröße $1\mu\text{m}$),
der Detektor kann aber ohnehin nur $5\mu\text{m}$ auflösen $\rightarrow$ reduzierte Anforderung



$NA = 0.25$ — zu gut!

$NA = 0.05 \Rightarrow$ Vorwarte #1:

NA reduzieren und
ideales System bauen

$NA = 0.25$

mit Bildgittern $\Rightarrow$

Vorwarte #2

NA beibehalten und

Abbildungsqualität
reduzieren

Spot = $5 \times$ Airy

Vorteil:

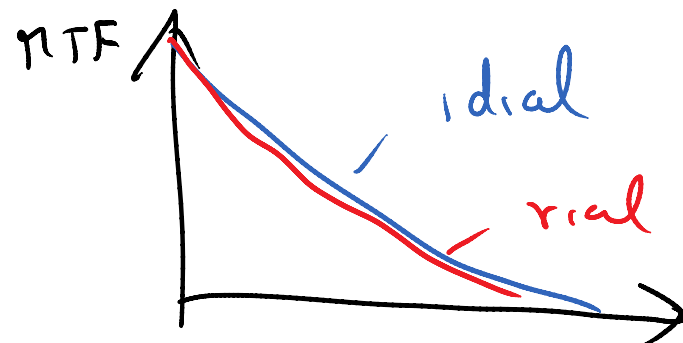
Minor List!

Beugungsbegrenztes System:

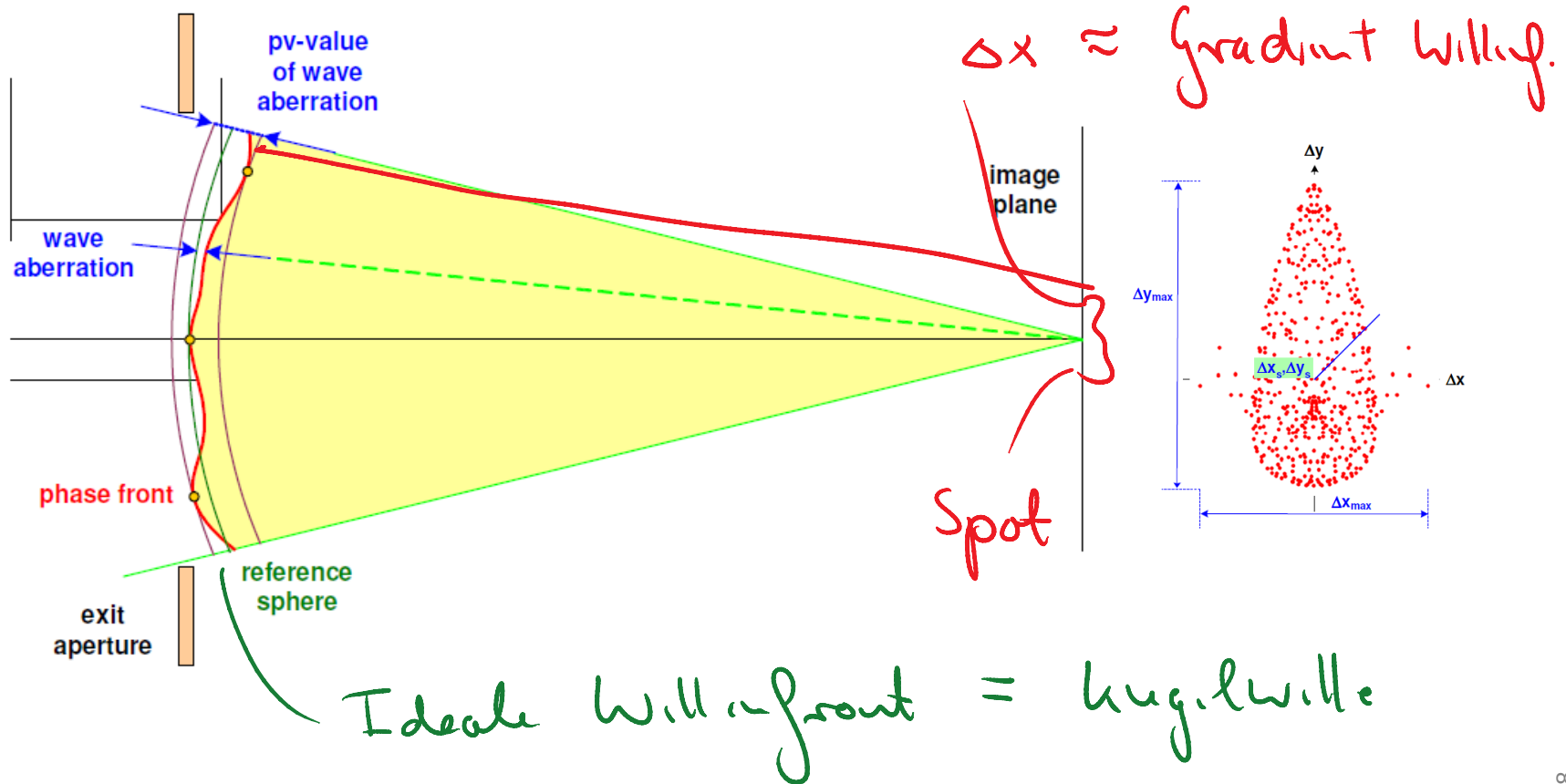
Spot $\leq$ Aug-Scheibe $\Delta r = 0.61 \cdot \frac{\lambda}{NA}$
oder

Wellenfrontfehler $RMS < 0.07 \lambda$
 $\Rightarrow$ Strahl $S \geq 80\%$

oder
MTF nahezu ideal



Spot und Wellenfront



⇒ Wellenfront, Spot und MTF hängen zusammen

Strehl Ratio, Strehlsche Definitionshelligkeit:

Verhältnis der Peakintensität
des aberrationsbehafteten Punktbilds
zum idealen Beugungsbild

$$D_s = \frac{I_{PSF}^{(real)}(0,0)}{I_{PSF}^{(ideal)}(0,0)}$$

Näherungsweise gilt:

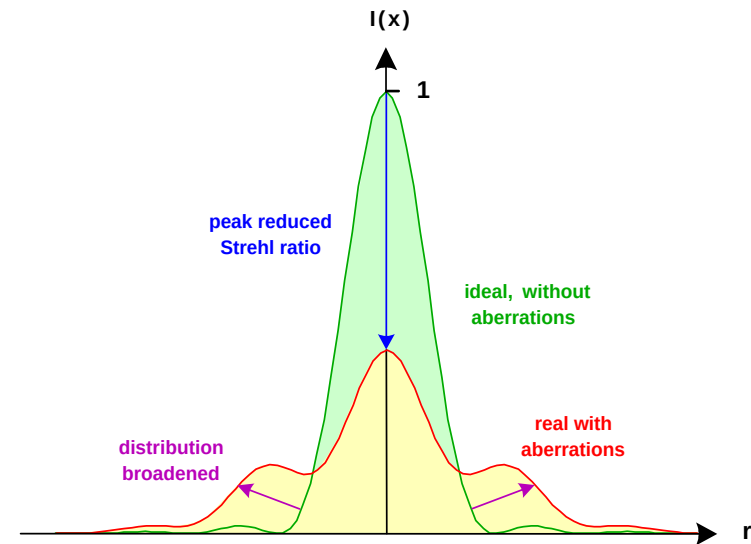
$$D_s = 1 - 4\pi^2 \left(\frac{W_{rms}}{\lambda} \right)^2$$

Als Daumen-Regel gilt deshalb, dass ein „beugungsbegrenztes“ Abbildungssystem (d.h. $D_s > 0.8$) einen maximalen Wellenfrontfehler von

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

Bzw. da PV und RMS mit ca. 3.5x skalieren

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



Anforderungen Abbildungsqualität



Das Lastentwurf beinhaltet in der Regel eine Aussage zur Abbildungsqualität

- Auflösungsvermögen $\Rightarrow$ NA = theoretl. Grenze

- Abbildungsqualität $\Rightarrow$ Spot
Wellenfrontfehler
Kontrast-Verlust

Spot

= geometrisch
optischer
Lichtfleck

Wellenfront-Fehler

RMS (WFR)

z.B. $RMS = 0.07\lambda$

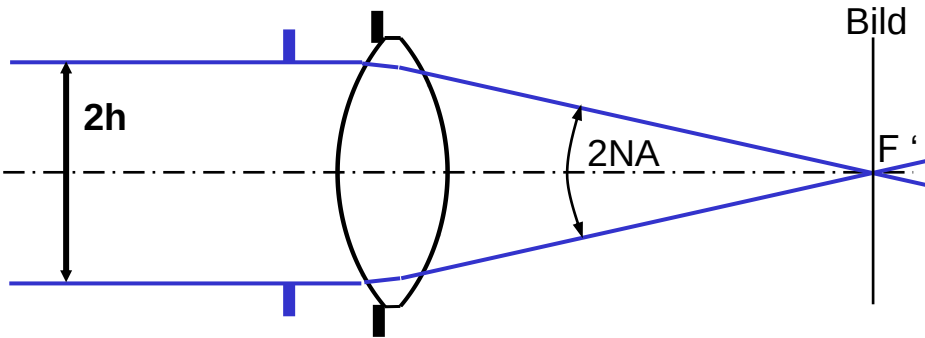
Strahl

$$S \approx 1 - \frac{2\pi}{\lambda} RMS^2$$

Größe der Apertur / Öffnung



Aperturblende



Kenngößen:

Durchmesser Eintrittspupille: $EPD=2h$

F-Zahl (Objekt in Unendlich) $f\# = \frac{f'}{EPD}$

F-Zahl (Endl. Objektstand) $f\# = \frac{1}{2NA'}$



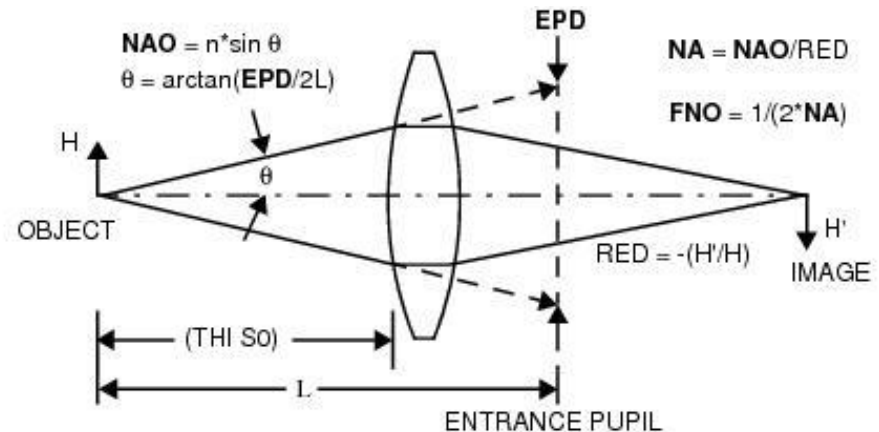
z.B. Photoobjektiv
1.4/50

$$f\# = 1.4$$

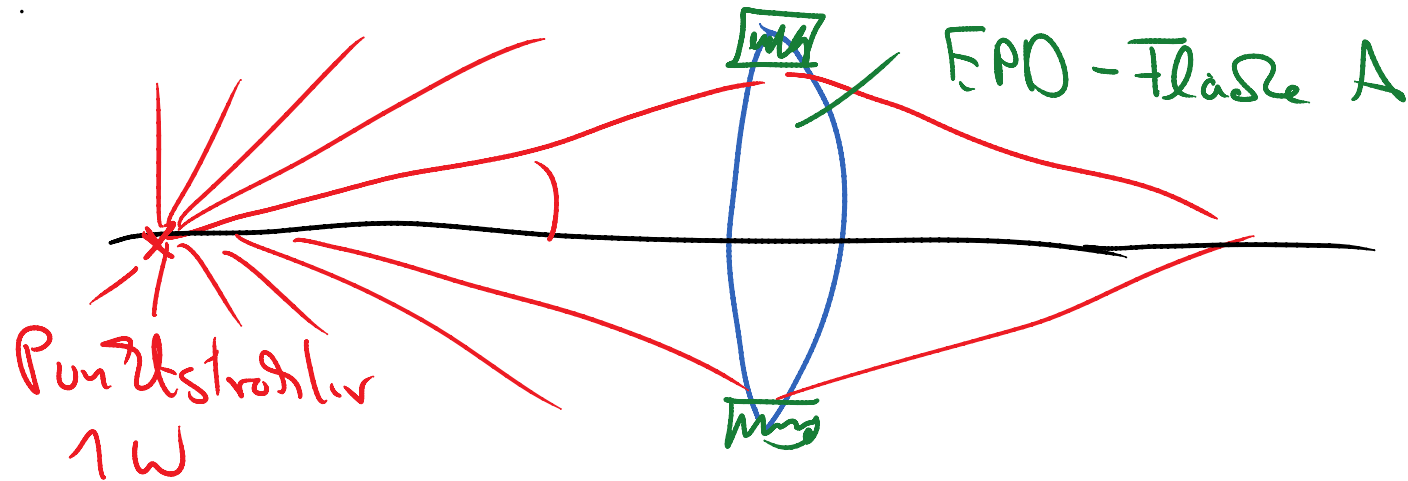
$$f' = 50$$

$$\Rightarrow EPD = \frac{f'}{f\#} \approx 36$$

$$\Rightarrow NA = \frac{1}{2 \cdot f\#} = \frac{1}{2.8} \approx 0.35$$



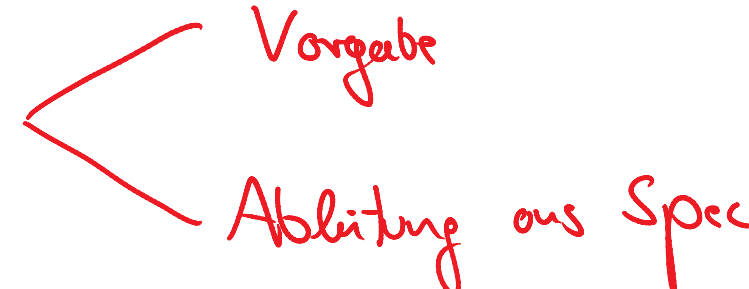
Anforderungen an Helligkeit / Lichtstärke



⇒ Lichtmenge skaliert mit Raumwinkel $\Omega = \frac{A}{r^2}$
bzw. mit Fläche A $A = \left(\frac{\text{EPD}}{2}\right)^2 \cdot \pi \sim \left(\frac{1}{f\#}\right)^2$

⇒ Beispiel: $f\# = 4$ / Wunsch: doppelt soviel Licht
⇒ $f\# = 2.8$

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

Detektor-Eigenschaften : 
Vorgabe
Ableitung aus Spec

Wichtig : Konsistenz-Prüfung : (Auflösung, Größe)

Beispiel : Auflösungs-Anforderung Objekt = $1\mu\text{m}$

Vergrößerung $\beta = 10\times$

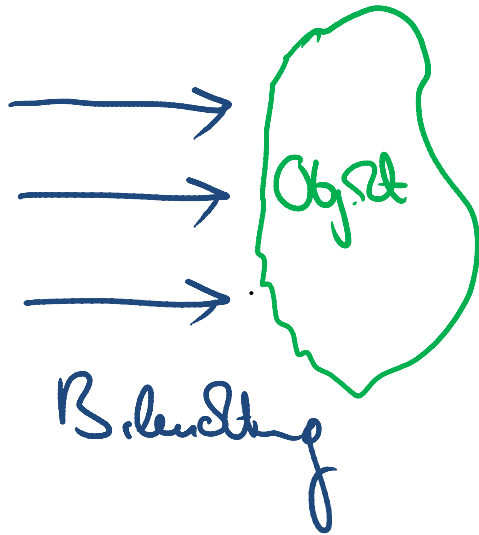
$\Rightarrow$ Bildauflösung = $10\mu\text{m}$

Detektorpixel = $20\mu\text{m}$



$\Rightarrow$ Genwill sollte das Lastentfeld konsistent sein,
d.h. frei von Widersprüchen

Direkte und indirekte Objekt-Eigenschaften:



1. Fall: Objekt ist Selbstleuchtend
– Spektrum (Farbe)
– Helligkeit

2. Fall: Objekt wird beleuchtet

↳ Transmission, Reflexion
+ Lichtquelleneigenschaften
(Spektrum, Helligkeit)

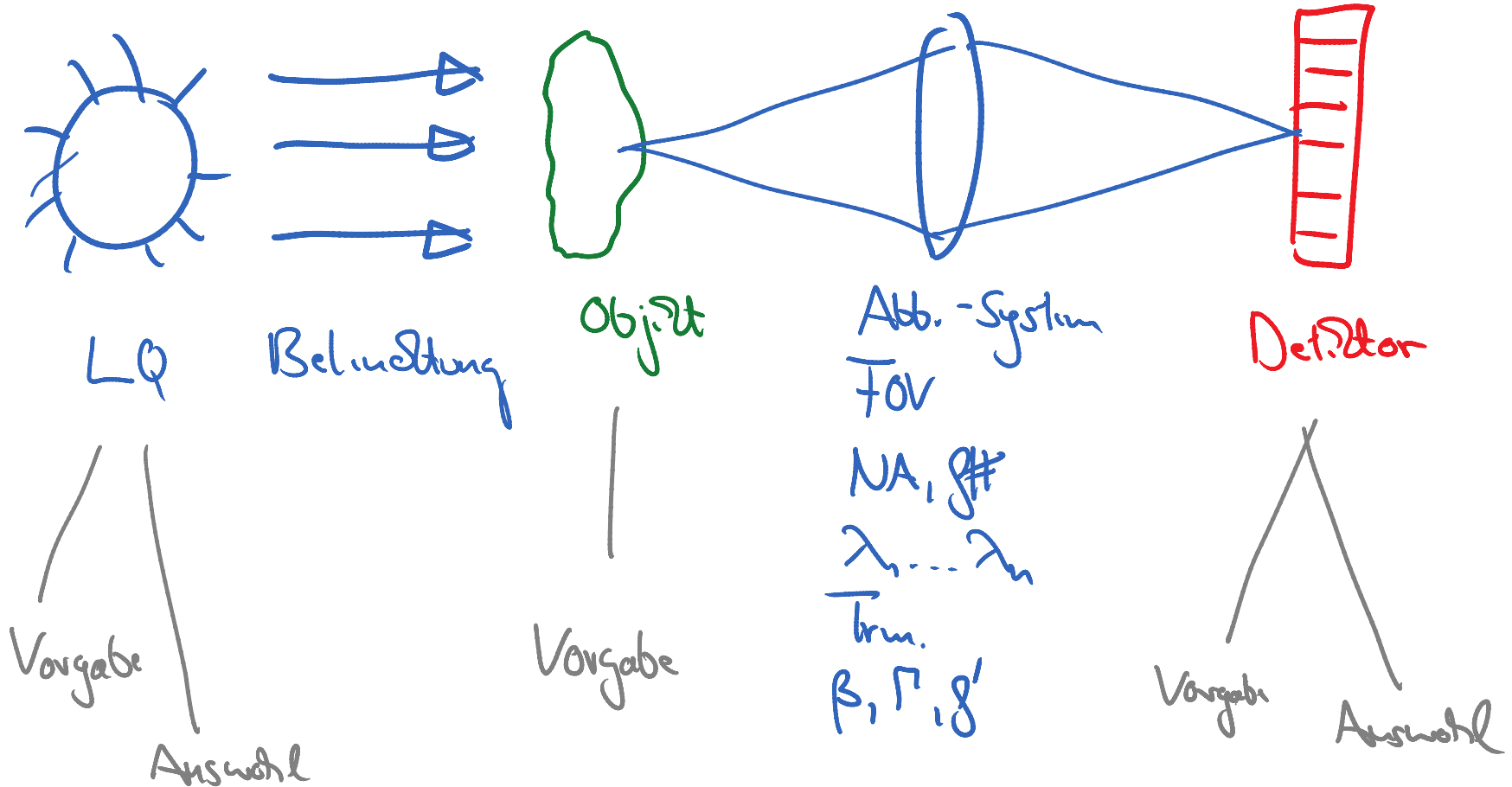
Zusätzliche Eigenschaften: Geometrie / Umgebung
3D / plan Wasser, Luft, Vakuum

Auflösungsanforderung $\Rightarrow$ NA (theoretische Grenze)
Bildfilter, Kontrast (MTF)
 $\hookrightarrow$ reale Grenze

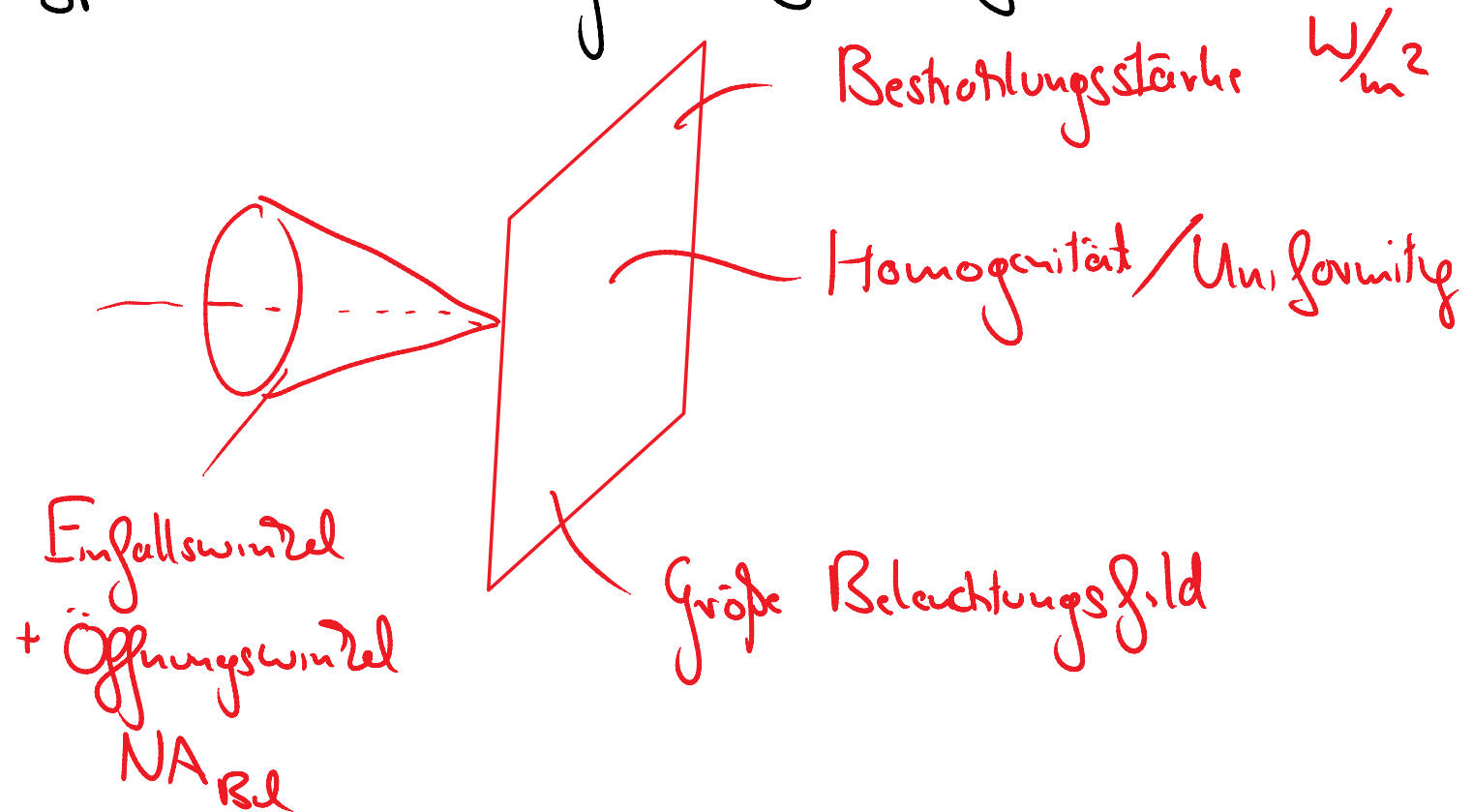
+ Objekteigenschaften $\Rightarrow$ Beleuchtungsanforderungen:
- Phasenkontrast
- Dunkelfeld

+ Diffusionskoeffizienten $\Rightarrow$ Wieviel Licht ist notwendig
 $\hookrightarrow$ Lichtquelle

Systemüberblick und Zusammenhänge



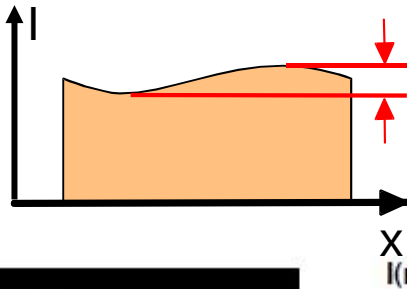
Typische Beleuchtungs-Anforderungen



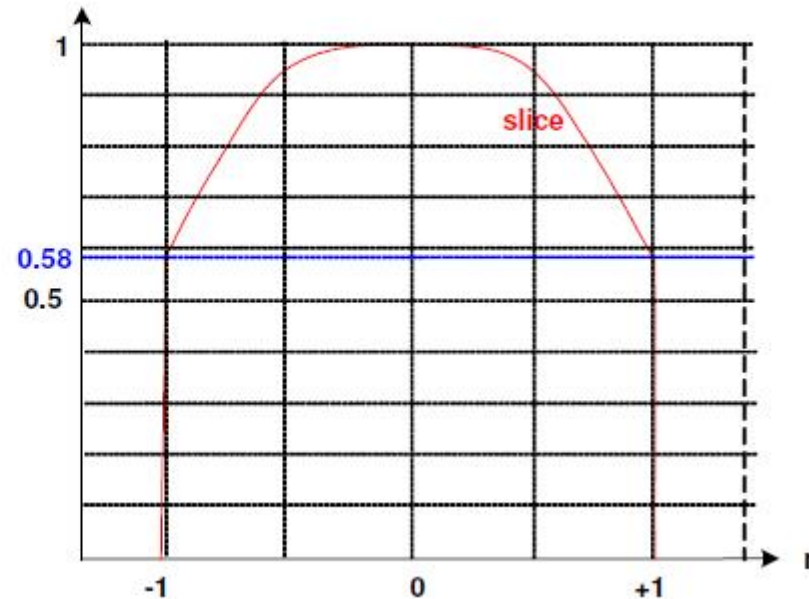
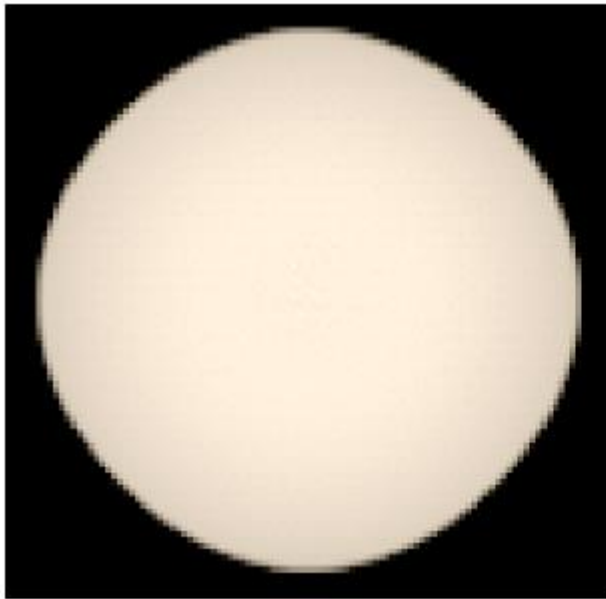
Homogenität (Uniformity) Beleuchtung



Oft wird die Gleichmäßigkeit (Uniformity)
der Beleuchtung im Feld oder Winkel (Pupille)
gefordert.



Typ. Spec = ΔI relativ zum
Maximum z.B. $\Delta I = 20\%$



Spezifikation	Beispiel
Größe beleuchtetes Feld	in mm oder Grad [°]
Mindest-Bestrahlungsstärke	W/m oder Lux
Beleuchtungs-NA	NA_{Bel}
Telezentrie / Lage der Austrittspupille	Winkel-Vorgabe
Uniformität	x% -Abfall
Wellenlänge und/oder Spektrum	Sichtbar Infrarot Laserwellenlänge

Übersicht Anforderungen



Anforderungen Abbildung	Spez.
Abbildungsmaßstab	

— Abb

Anforderungen <u>oder</u> Information Beleuchtung	Spez.
Lichtquelle	
Bestrahlungsstärke	

— Bel.

Information zum Objekt	Spez.
Transmission	
Oberfläche	

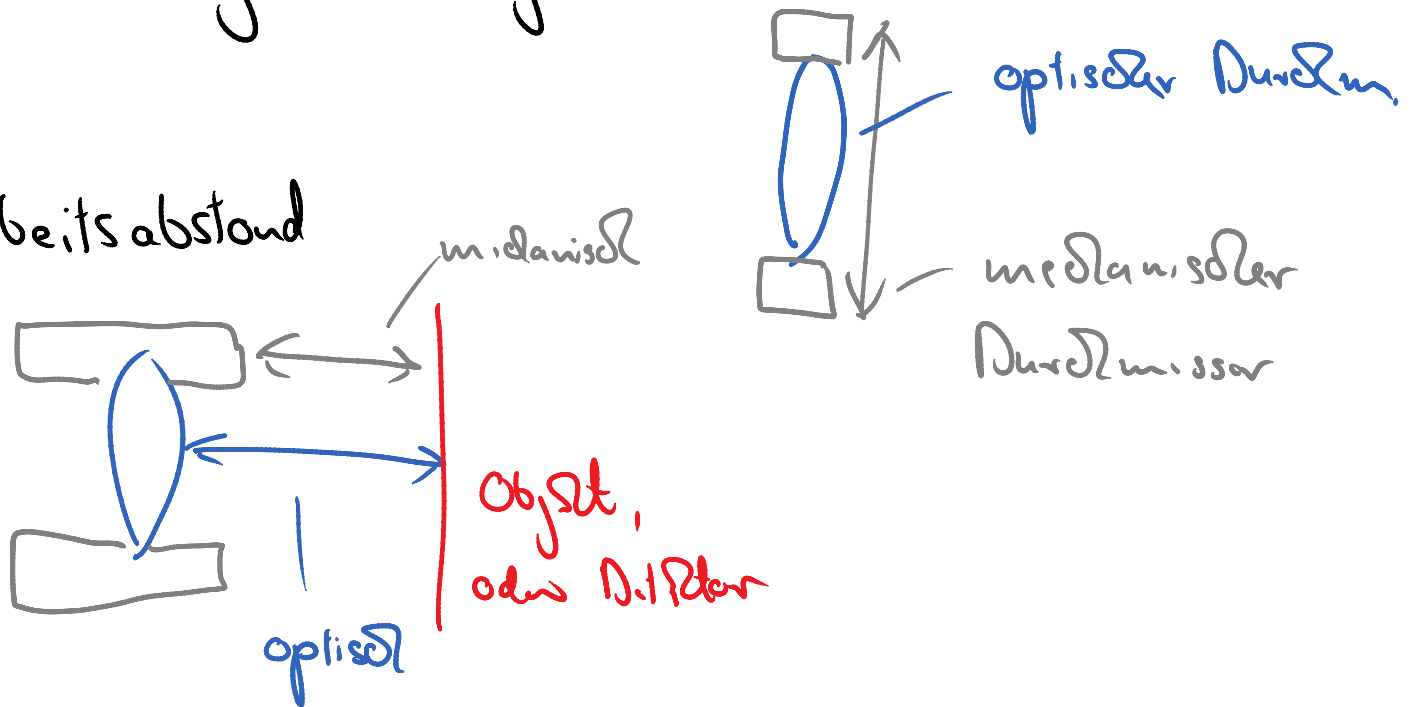
— Objekt

Anforderungen <u>oder</u> Information Detektor	Spez.
Pixelgröße	
Empfindlichkeit	

— Detektor

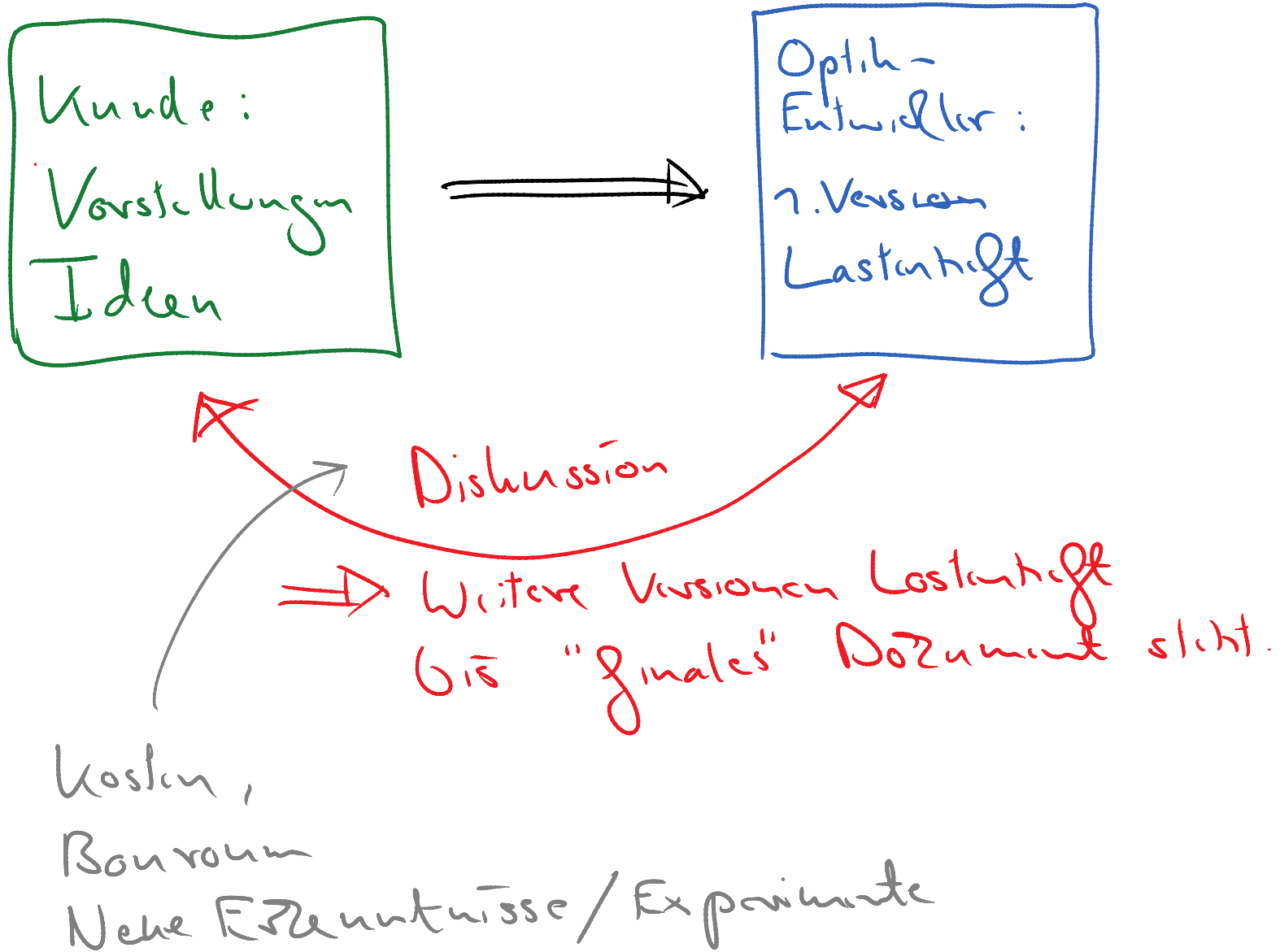
- Längen- und Volumen-Vorgaben
z.B. Gesamtlänge, Durchmesser

Arbeitsabstand



- Kosten : Material (glas)
Mechanik
- Modularer Aufbau : z.B. wigm Service
- Sicherheit : z.B. Laser
- Dichtung , Reinigung (z.B. Endoskope)
- Umwelt : Temperatur , Druck

Finales Lastenheft ist ein Prozess



Welche Komponenten tauchen typischerweise in einem optischen Lastenheft auf und werden dort beschrieben/spezifiziert:

- ➔ Abbildungssystem, Beleuchtungssystem
Detektor, Objekteigenschaften

Was sind typischen Spezifikationen in einem optischen Lastenheft ?

- ➔ NA, Maßstab, Abbildungsqualität, Beleuchtungsstärke, Abstände, Bauraum, etc.

Wie hängen Anforderungen im Abbildungssystem zusammen

- ➔ MTF-Grenzfrequenz vs. NA, Einfluss-Größen
- ➔ Lichtstärke und $f\#$
- ➔ Abbildungsqualität, Spot, RMS, Strehl
(wann ist ein System beugungsbegrenzt ?)