

4. Lichtquellen und Beleuchtungssysteme

- 4.1 Wiederholung Radiometrie / Photometrie**
- 4.2 Grundlagen Beleuchtungssysteme**
- 4.3 Grundlagen Lasersysteme**

Motivation



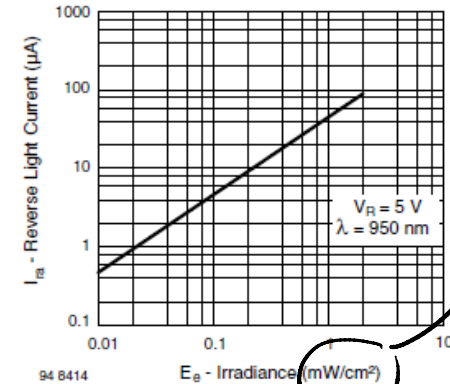
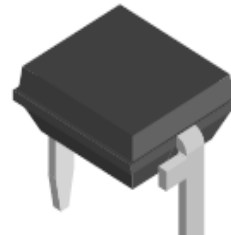
Detektoren

- nur die Zapfen bleiben aktiv
 - ab 10 cd/m^2
 - photonisches Sehen



www.vishay.com

Silicon PIN Photodiode



W/cm^2

Lichtquellen

	Incandescent	CFL	LED
			
Wattage	40W	9W	7W
Lumens	550 lumens	550 lumens	400 lumens
Lumens/Watt (efficacy)	14 lm/W	61 lm/W	57 lm/W

Lumen

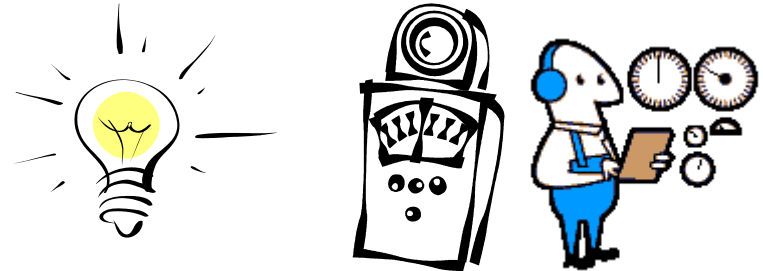
Man unterscheidet:

Radiometrie:

Strahlungsphysikalische (radiometrische) Größen.

Diese kennzeichnen die Strahlungsenergie bei allen Wellenlängen.

Angabe in physikalischen SI-Einheiten (J, W)



Photometrie:

Beschränkung auf das sichtbare Spektrum.

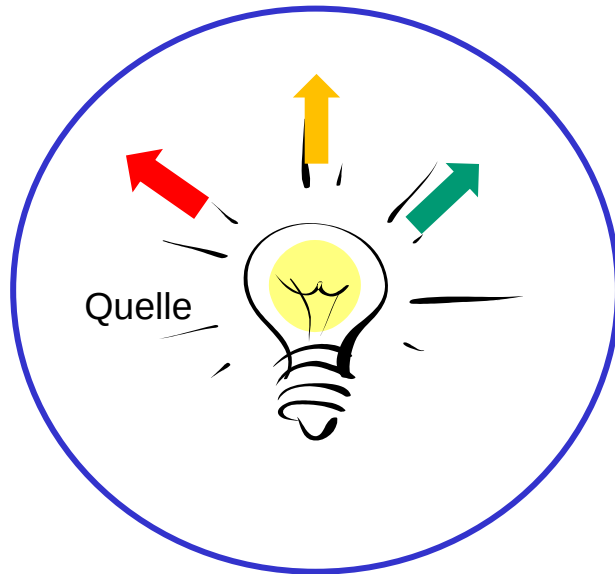
Auge ist der Detektor (physiologisch).

Gewichtung der Strahlung mit der Empfindlichkeit des Auges bei unterschiedlichen Wellenlängen.

Angabe in speziellen Einheiten
(Lumen, Lux, Candela)

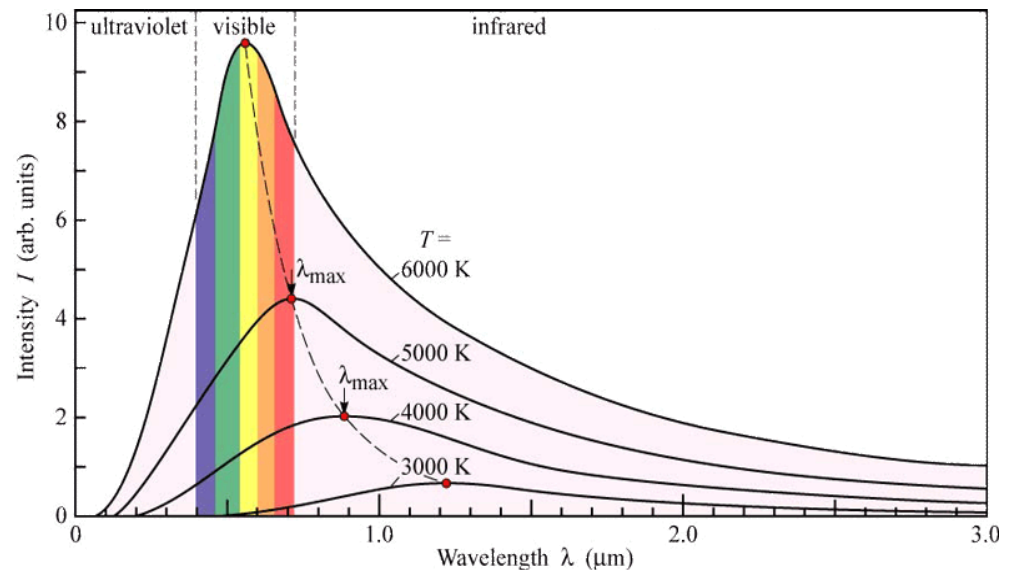


Kugel-Detektor



Strahlungsleistung (Strahlungsfluss)
= Energie pro Zeiteinheit (Leistung [W]) die als elektromagnetische Strahlung emittiert wird (integriert über Wellenlänge, Richtungen und Quelloberfläche)

$$\Phi = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) \cdot d\lambda \quad [W]$$



Strahlungsleistung: Radiometrie / Photometrie



Gesamte “sichtbare” Strahlungsleistung → **Photometrie**

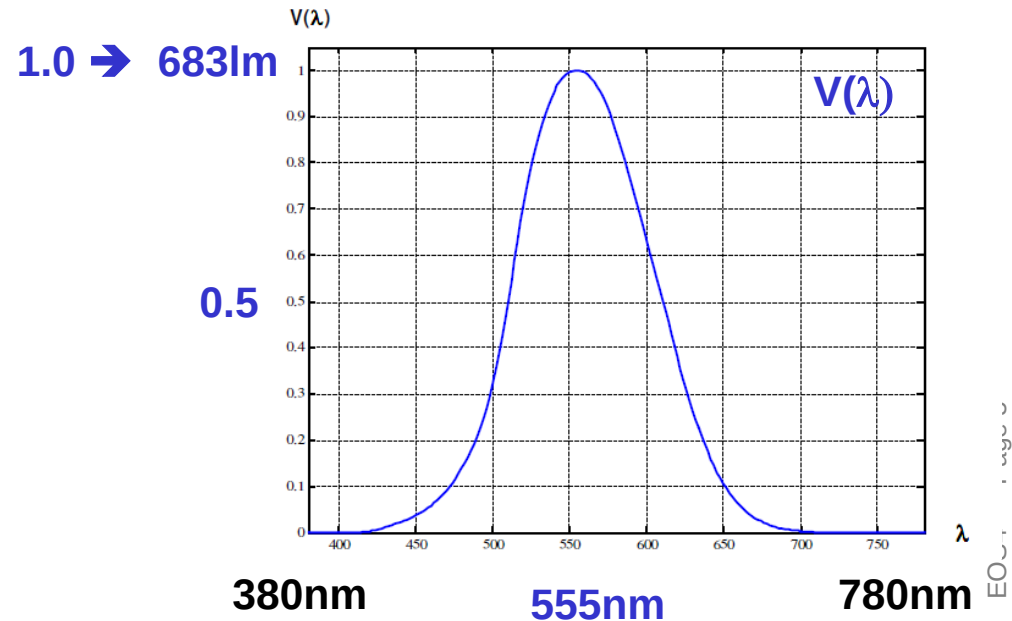


DIN 5031 (Definition Candela) →
ein **radiometrischer Fluss Φ von 1W** bei **555nm** ist
equivalent zu einem **photometrischen Fluss Φ_v von 683 lm (Lumen)**

$$\Phi_v(\lambda) = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \cdot V(\lambda) \cdot \Phi(\lambda)$$

[Lumen] ↔ [Watt]

$$\Phi_v = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}} \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$



Weitere Lichttechnische Größen



Größe	Formel	Radiometrisch		Photometrisch	
		Bezeichnung	Einheit	Bezeichnung	Einheit
Energie		Energie	Ws	Lichtmenge luminous energy	Lm s
Leistung Strahlungsfluß	Φ		W	Lichtstrom luminous flux	Lumen Lm
Leistung pro Fläche und Raumwinkel	$L = \frac{d^2\Phi}{\cos\theta d\Omega dA}$	Strahldichte radiance	W / sr / m ²	Leuchtdichte luminance	cd / m ² Stilb
Leistung pro Raumwinkel	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = \int L dA_{\perp}$	Strahlstärke radiant intensity	W / sr	Lichtstärke luminous intensity	Lm / sr, cd
Ausgesandte Leistung pro Fläche	$E = \frac{d\Phi}{dA} = \int L \cdot \cos\theta d\Omega$	Ausstrahlung radiant excitance	W / m ²	luminous excitance	Lm / m ²
Einfallende Leistung pro Fläche	$E = \frac{d\Phi}{dA} = \int L \cdot \cos\theta d\Omega$	Bestrahlungsgstärke Intensität irradiance	W / m ²	Beleuchtungs- stärke illuminance	Lux = Lm / m ²
Zeitintegral der Leistung pro Fläche	$H = \int E dt$	Bestrahlung radiant exposure	Ws / m ²	Belichtung light exposure	Lux s

Strahlstärke	$I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$	$[W / sr]$
--------------	-----------------------------	------------

Lichtstärke	$I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$	$[lm / sr = cd]$
-------------	---------------------------------	------------------

Leistung pro Raumwinkel

→ Raumwinkel

in Kugelkoordinaten

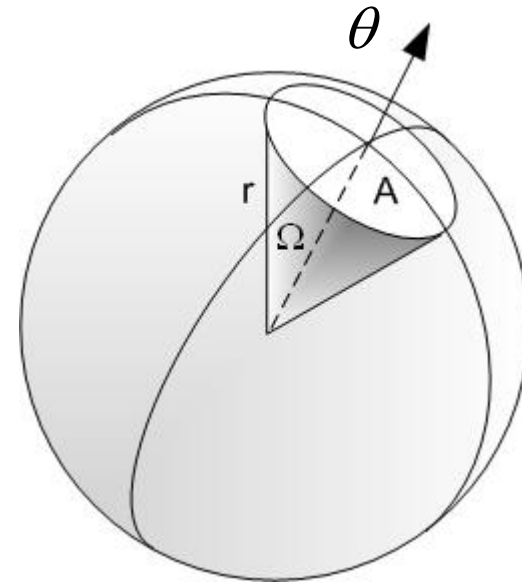
$$d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad [sr]$$

$$\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta} \sin \theta \cdot d\theta$$

$$\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos \theta)$$

$$\Omega = 2\pi \quad \text{Halbraum}$$

$$\Omega = 4\pi \quad \text{Vollraum}$$



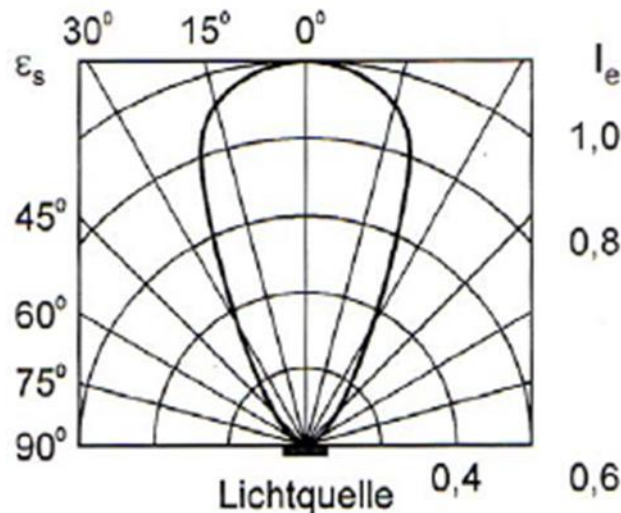
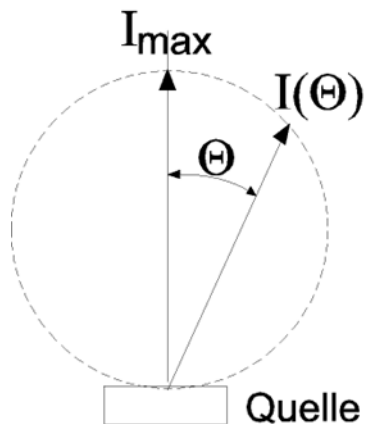
In der Regel strahlen Lichtquellen nicht in alle Richtungen gleich ab:

Richtcharakteristik:

Abhängigkeit der Strahl/Lichtstärke vom Beobachtungswinkel

$$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = I(\theta, \varphi)$$

Angabe typischerweise im Polardiagramm



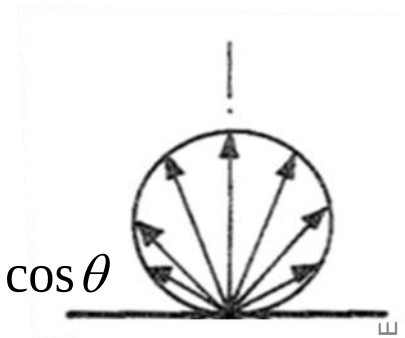
Isotrop

$$I(\theta) = \text{const}$$



Lambert

$$I(\theta) \propto \cos \theta$$



Spezifische Ausstrahlung $M = \frac{d\Phi}{dA}$ $[W / m^2]$

Spezifische Lichtausstrahlung $M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$ $[lm / m^2 = Lux]$

Leistung pro Fläche

“Wieviel Leistung wird von welchem Ort emittiert ?”

Einheit: “Lux” [lx]

Beispiel:

LED = Flächenemitter

→ Angabe von Leistung pro Fläche,
z.B. W/mm^2



Bestrahlungsstärke / Beleuchtungsstärke



Ausstrahlung ist Quellen-bezogen (emittierte Strahlung pro Fläche)

Für beleuchtete Flächen (Empfänger-bezogen) spricht man von:

Bestrahlungsstärke	$E = \frac{d\Phi}{dA}$	$[W / m^2]$
--------------------	------------------------	-------------

Beleuchtungsstärke	$E_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$	$[lm / m^2 = Lux]$
--------------------	----------------------------	--------------------

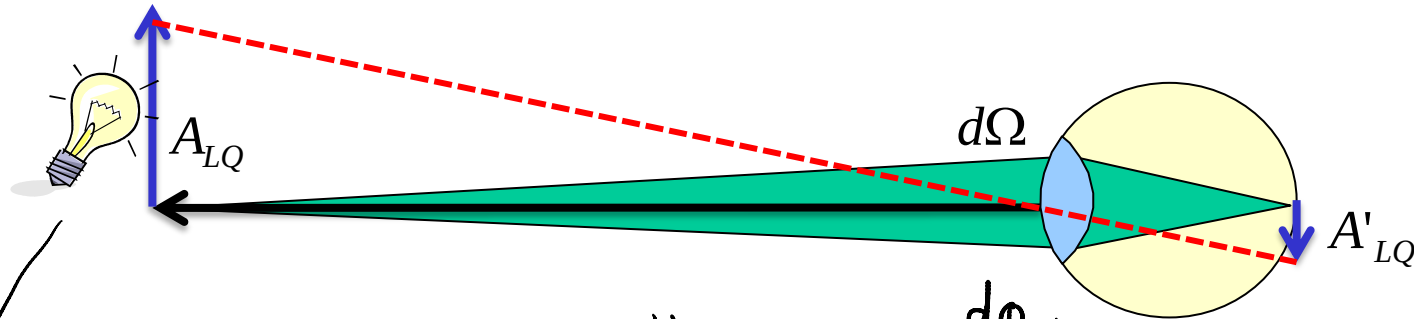
Leistung pro Fläche

“Wieviel Leistung fällt auf welche Fläche ?”

ausgewählte Beleuchtungsstärken

1	Lux	gerade noch erkennbar
10^5	Lux	helle Sonne auf weißem Papier
50-100	Lux	für grobe Arbeiten
100-300	Lux	für feine Arbeiten
1000	Lux	für feinste Arbeiten
min. 100	Lux	für Leinwandprojektion

→ Empfänger = Auge (Pupillenöffnung $d\Omega$, Abbildung der LQ auf die Netzhaut)



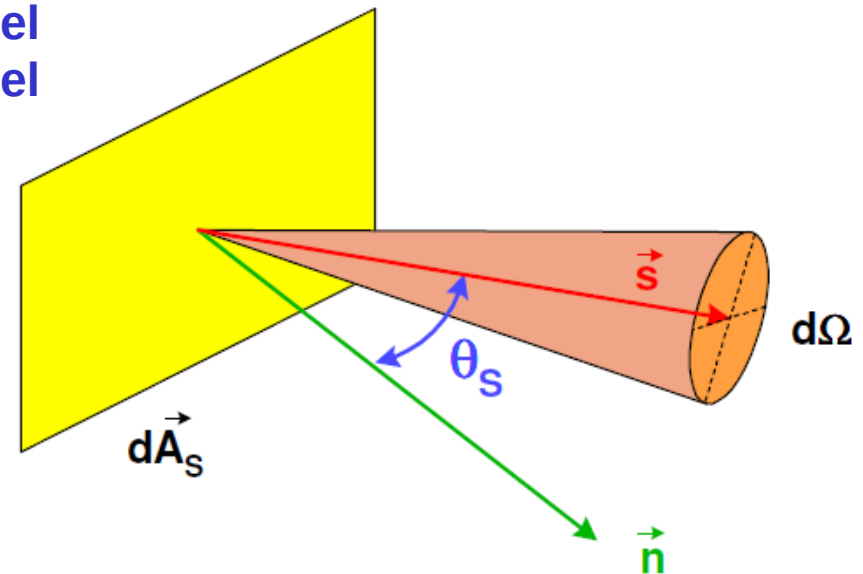
Ausgedehnte Lichtquelle $E = \frac{d\phi}{dA} \text{ (lux)}$
 $\Rightarrow$ Lichtfluss in das Auge hängt von Fläche ab
 Aber Lichtfluss hängt auch vom Winkel-
 Spektrum $I(\Omega)$ ab. $d\phi = I(\Omega) \cdot d\Omega$
 $\Rightarrow$ "Helligkeit" ist $L = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \Omega \cdot dA \cos \theta} \text{ Proj}$

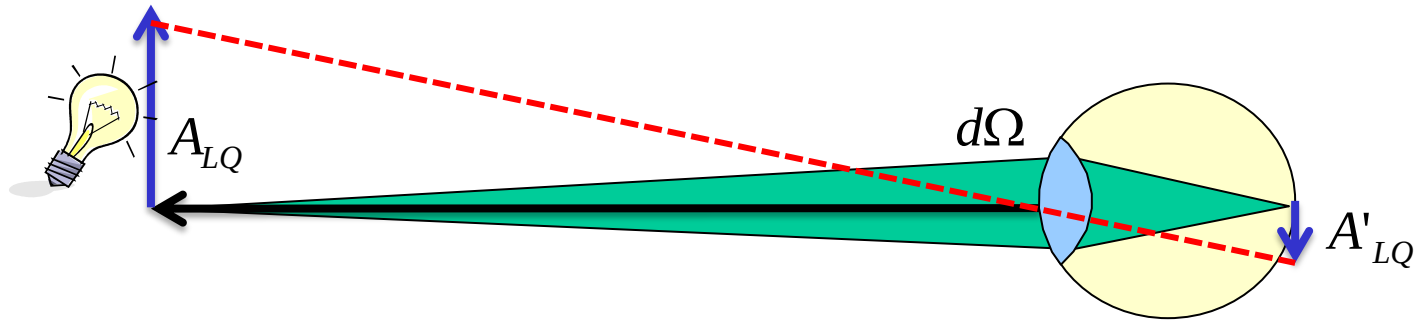
Strahldichte	$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$	$[W / m^2 sr]$
--------------	---	----------------

Leuchtdichte	$L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$	$[cd / m^2]$
--------------	---	--------------

Leistung pro Fläche und proj. Raumwinkel
Leistung pro proj. Fläche und Raumwinkel

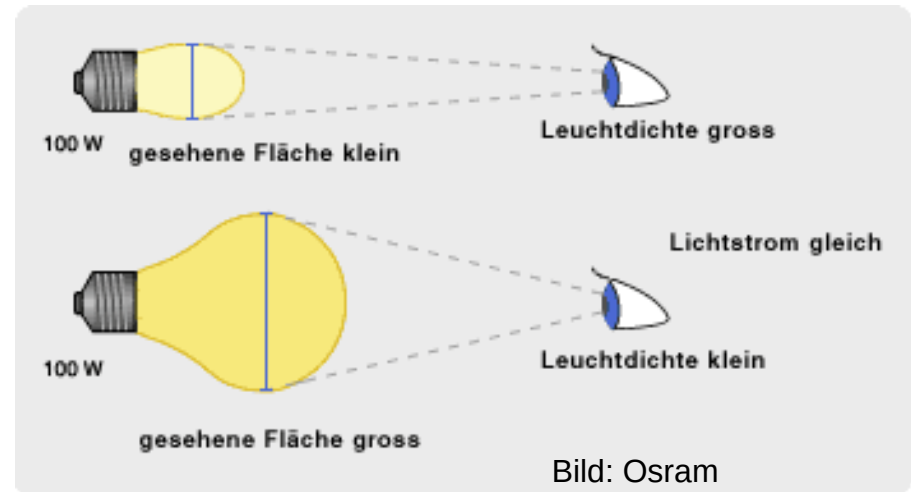
→ Maß für die Helligkeit





$$L_{LQ} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot A_{LQ}} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega' \cdot A'_{LQ}} = L_{\text{Auge}}$$

- Die Leuchtdichte der Quelle ist gleich der Leuchtdichte im Auge
- Je kleiner die Lichtquelle (bei gl. Leistung) desto heller (größere Leuchtdichte)



**Strahldichte
(Leuchtdichte)**

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos \theta}$$

$$L = \frac{d\Phi}{dH}$$

Den Nenner bezeichnet man als
Lichtleitwert / Etendue H

$$dH = dA \cdot \cos \theta \cdot d\Omega$$

Der Lichtleitwert/Etendue beschreibt die Orts- und Winkelausdehnung der Quelle.
Für Quelle der Größe A mit numerischer Apertur NA folgt:

$$H = \iint \cos \theta \cdot dA \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = \pi \cdot A \cdot \sin^2 \theta$$

$$H = \pi \cdot A \cdot NA^2 \quad [m^2 \cdot sr]$$

Etendue

$$H = H'$$

$$A \cdot \pi \cdot NA^2 = A' \cdot \pi \cdot NA'^2$$

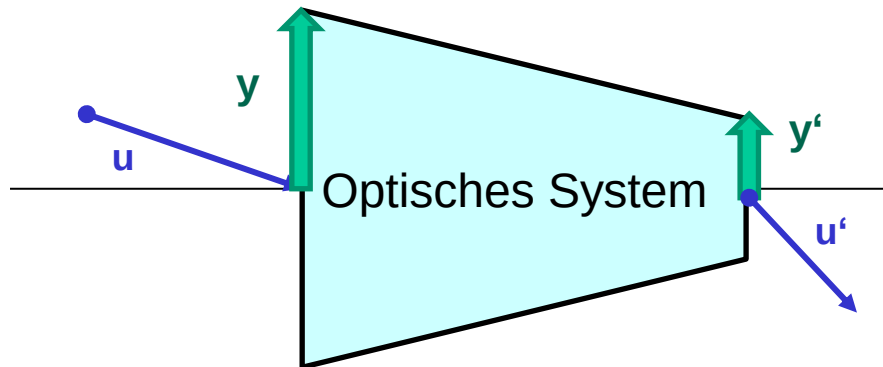
Etendue bleibt erhalten

→ Produkt aus Fläche und Abstrahlwinkel bleibt erhalten

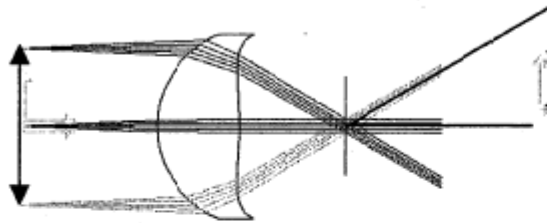
→ Helligkeit bleibt erhalten

→ In verlustfreien Systemen:

- Verkleinerung der Strahlwinkel bedingt Vergrößerung der Fläche
- Verkleinerung der Fläche bedingt Vergrößerung der Winkel



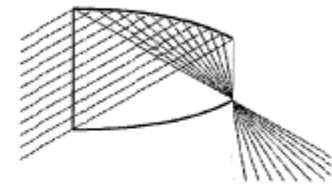
Examples of Nearly Etendue Preserving Systems



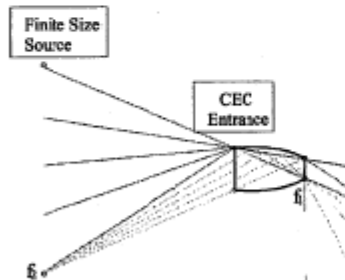
Singlet
(Beam Transformer)



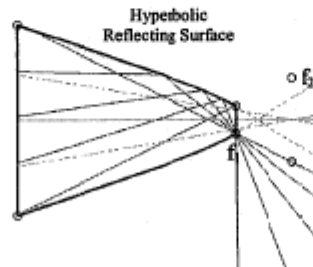
Relay



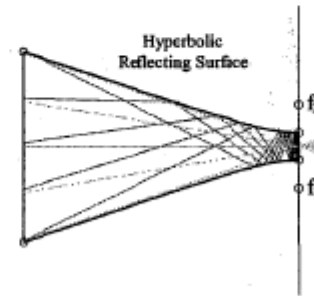
Compound Parabolic
Concentrator
CPC



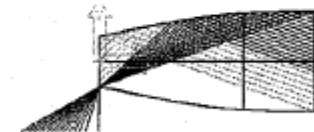
Compound Elliptical
Concentrator
CEC



Compound Hyperbolic
Concentrator
CHC

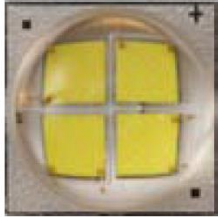


Trumpet



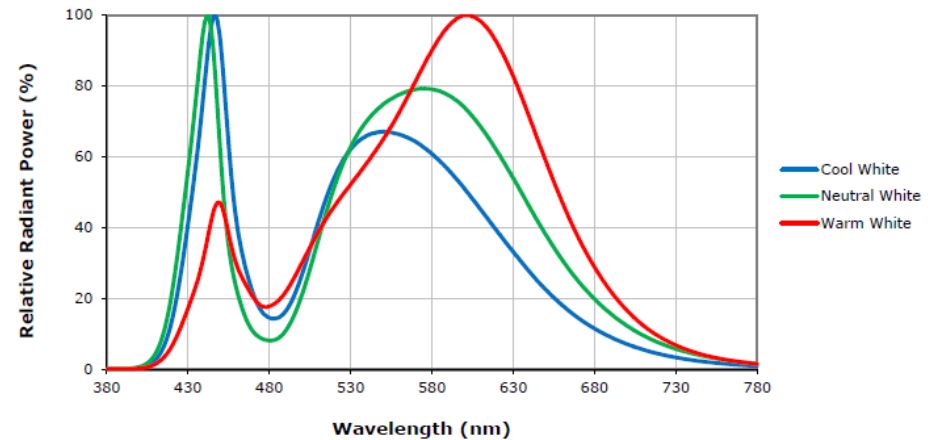
Dielectric $\theta_1 - \theta_2$
30 - 90

Cree® XLamp® MK-R LEDs

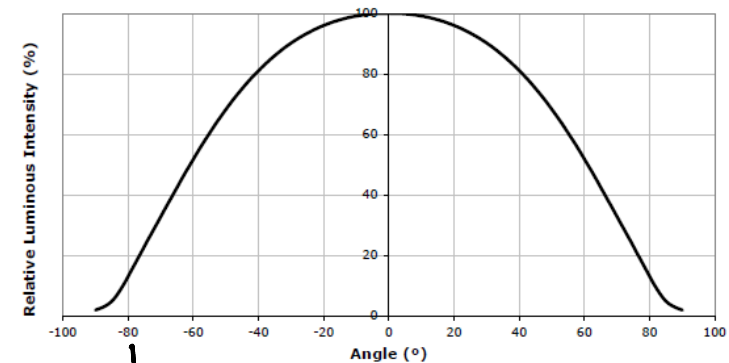


⇒ Fläche A

Group Code	Min. Luminous Flux	Max. Luminous Flux
D2	510	550
D4	550	590
E2	590	635
E4	635	680
F2	680	730
F4	730	780
G2	780	840
G4	840	900
H2	900	970
H4	970	1040
J2	1040	1120
J4	1120	1200
K2	1200	1290



PICAL SPATIAL DISTRIBUTION



Flux Φ

⇒ $H = A \cdot \Omega / L = \frac{\Phi}{H}$

Raumwinkel Ω

Lichtquelle - Etendue: $H = A \cdot \Delta\Omega_p$ $[\text{mm}^2 \cdot \text{sr}]$

Fluß: Φ $[\text{W}]$

Vergleich mit Nutz - Etendue:

Leuchtfeld - Fläche: A'

Beleuchtungs - Winkel (NA): $\Delta\Omega' = \pi \text{NA}'^2$

$$\Rightarrow H' = A' \Delta\Omega'$$

2 Fälle :

$$H < H'$$

⇒ alles Licht (ϕ)
sollte verwendet
werden

$$H > H'$$

⇒ da H nicht
verkleinert werden
kann

⇒ Verlust

$$\Rightarrow \text{Wirkungsgrad } \eta = \frac{H'}{H}$$

Etendue

$$H = \pi \cdot A \cdot NA^2$$

- **Etendue der Quelle H_{LQ}** definiert 4dimensionale Größe der Quelle
- **Etendue des Systems H_{sys}** besagt wieviel genutzt wird
- Die Quelle muss entsprechend der Beleuchtungsaufgabe angepasst sein !
Vergleich der Etendue Quelle zu System ist wichtig ! – **Etendue-Bilanz**

Beispiel:

Quelle = LED: aktive Fläche 1mm x 1mm , Abstrahlung in den Halbraum

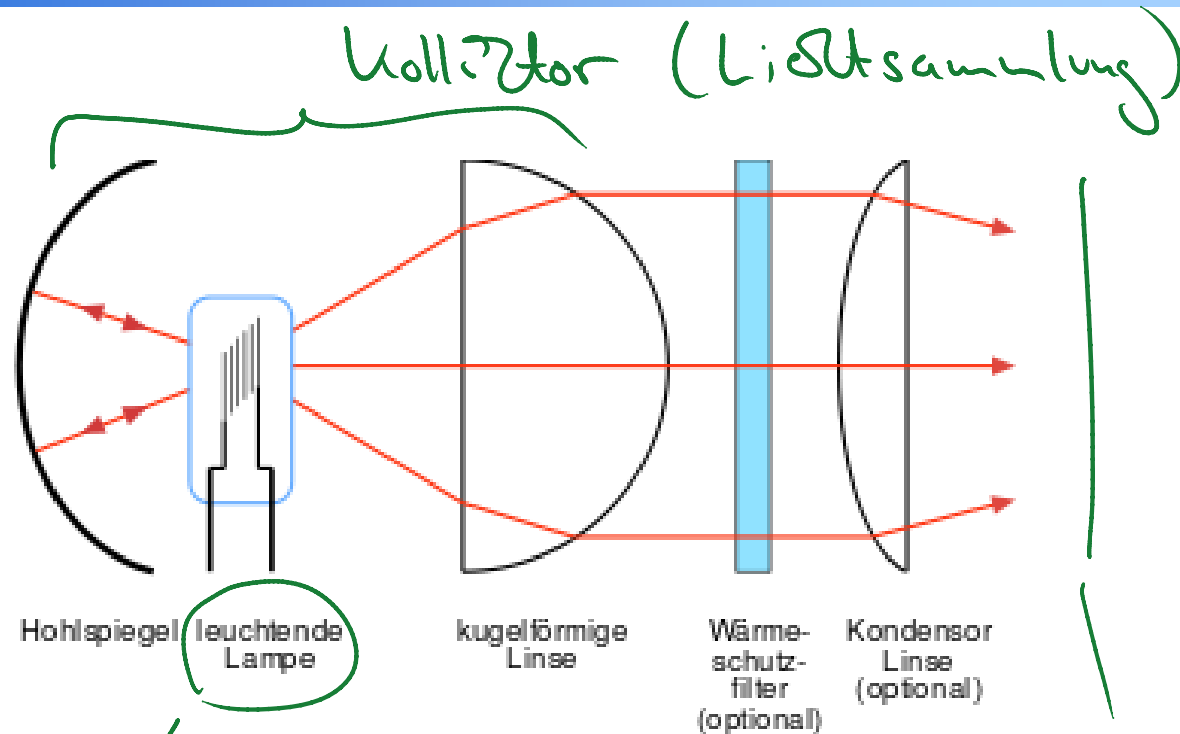
Etendue Quelle $H_{LQ} = A \cdot \pi = 1mm^2 \cdot \pi = 3.14mm^2sr$

System: Mikroskop mit NA=0.75, Bildfeld 0.5mm (kreisförmig)

Etndue System $H_{System} = \pi \cdot (d / 2)^2 \cdot \pi \cdot NA^2 = 0.35mm^2sr$

- Etendue der Quelle ist zu groß
- Nicht die komplette Leistung der LED kann/muss verwendet werden !
- **Unvermeidlicher Lichtverlust – bzw. maximaler Wirkungsgrad 11% !!**

Typisches Beleuchtungssystem



Bedarf
Eindue H'

$H' < H \Rightarrow$ nur ein Anteil η muss
gesammelt werden

$H' \approx H \Rightarrow$ möglichst viel Eindue ($A \cdot \Omega$)
muss gesammelt werden

⇒ kleine Lichtquelle (Plasmaflamme A) + großer Winkel Ω

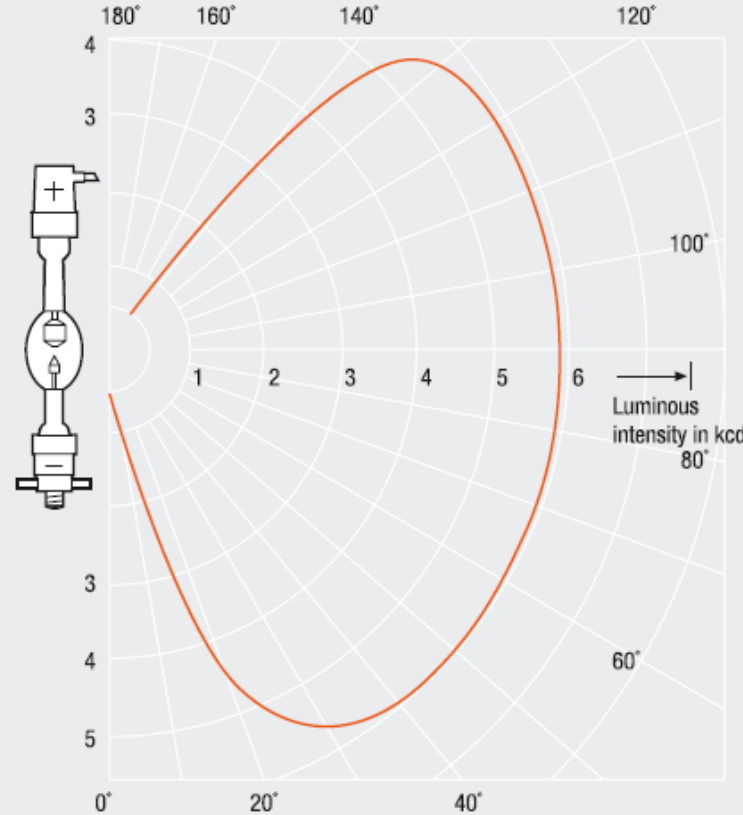


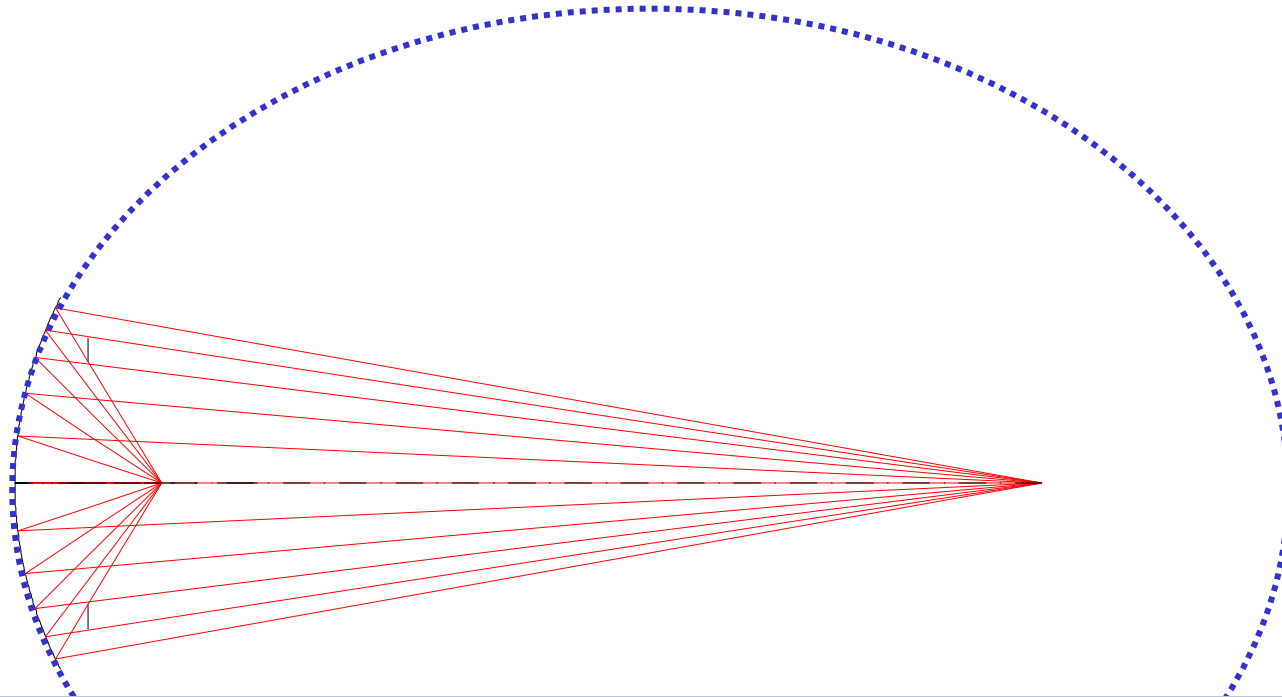
Fig. 10 Typical distribution of luminous intensity of an XBO® lamp.

⇒ Hohe NA
muss gesammelt
werden um
viel Leistung
zu nutzen

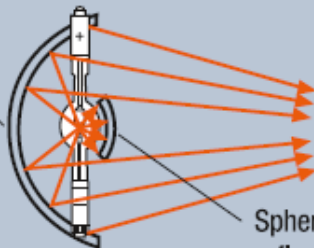
$$\Omega_p = \pi \cdot NA^2$$

$$\Phi = L \cdot A \cdot \Omega_p$$

Elliptischer Reflektor

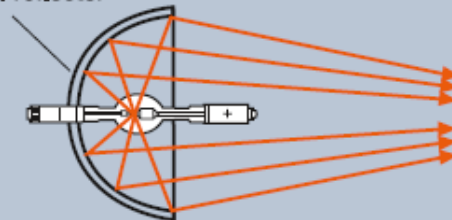


Elliptical main reflector

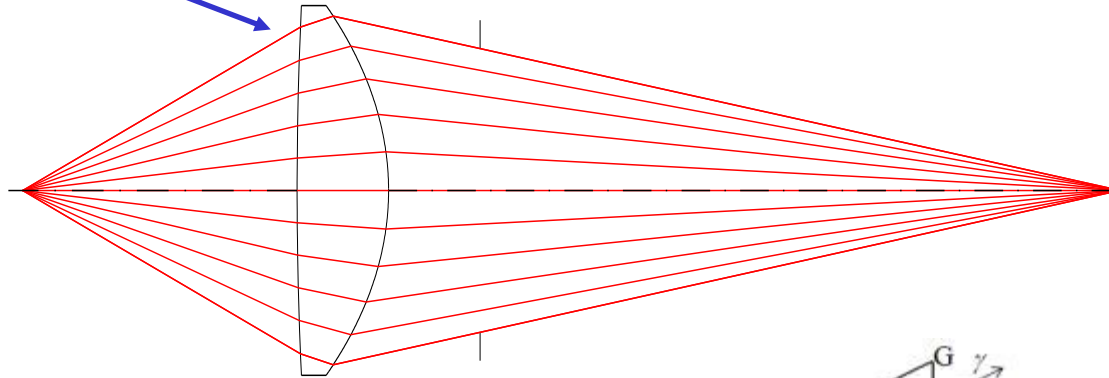


Spherical auxiliary reflector

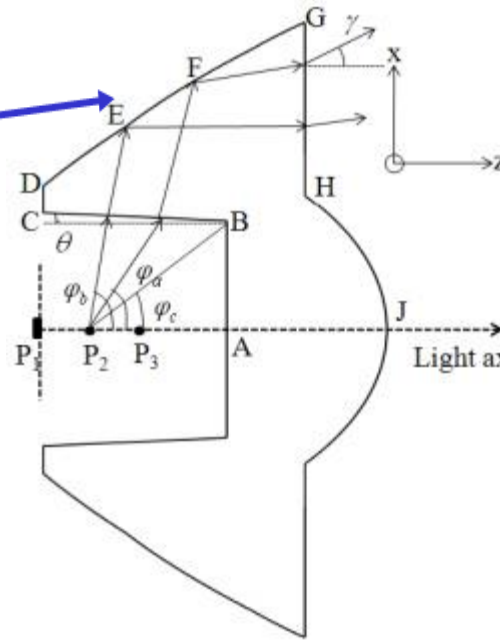
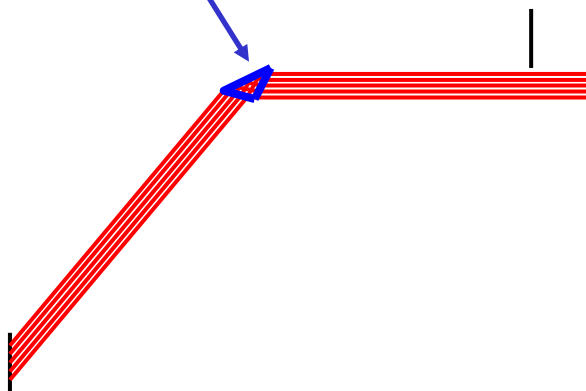
Deep-dish ellipsoidal reflector



Asphärische Linse

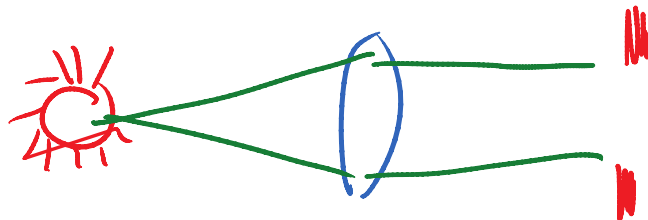
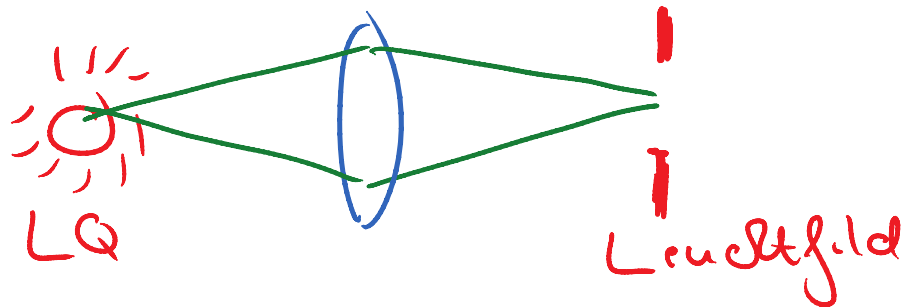


Totalreflexions-Fläche (TIR)

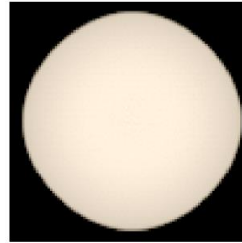
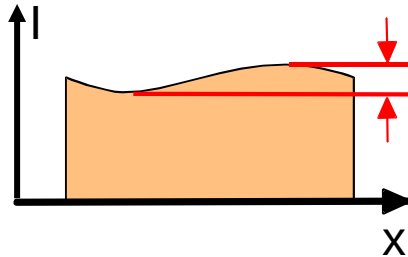


Di Xin, Hua Liu, Lei Jing, Yao Wang, Wenbin Xu, Zhenwu Lu, Opt. Express 21, 1113-1120 (2013).

In der Regel wird entweder die
Lichtquelle selbst (kritisch) oder
das Winkelspstrahl (Köhler) auf das
Leuchtfeld abgebildet:



Bei vielen Beleuchtungssystemen reicht es nicht aus die Quelle (= kritische Beleuchtung) oder das Winkelspektrum der Quelle (= Köhlersche Beleuchtung) abzubilden, da dieses zu inhomogen ist (insbesondere Ränder)



→ In diesen Fällen muss das Licht homogenisiert / gemischt werden

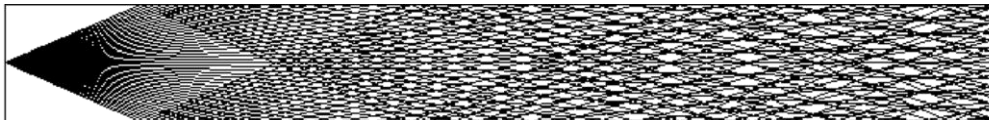
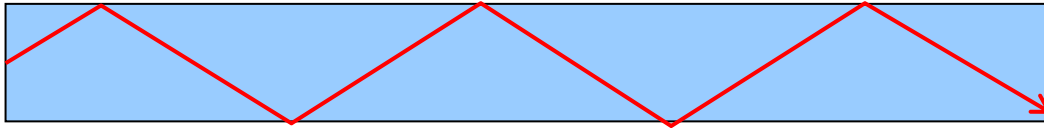
→ Typische Mischelemente sind z.B. :

- **Streuscheiben / Diffusoren**
- **Lichtmischstäbe**
- **Mikrolinsen-Arrays (Wabenkondensoren)**

Prinzip von Lichtmischstäben



Lichtmischung basiert auf Totalreflexion in einem Glasstab
(vgl. Lichtleitfaser, oder Kaleidoskop)

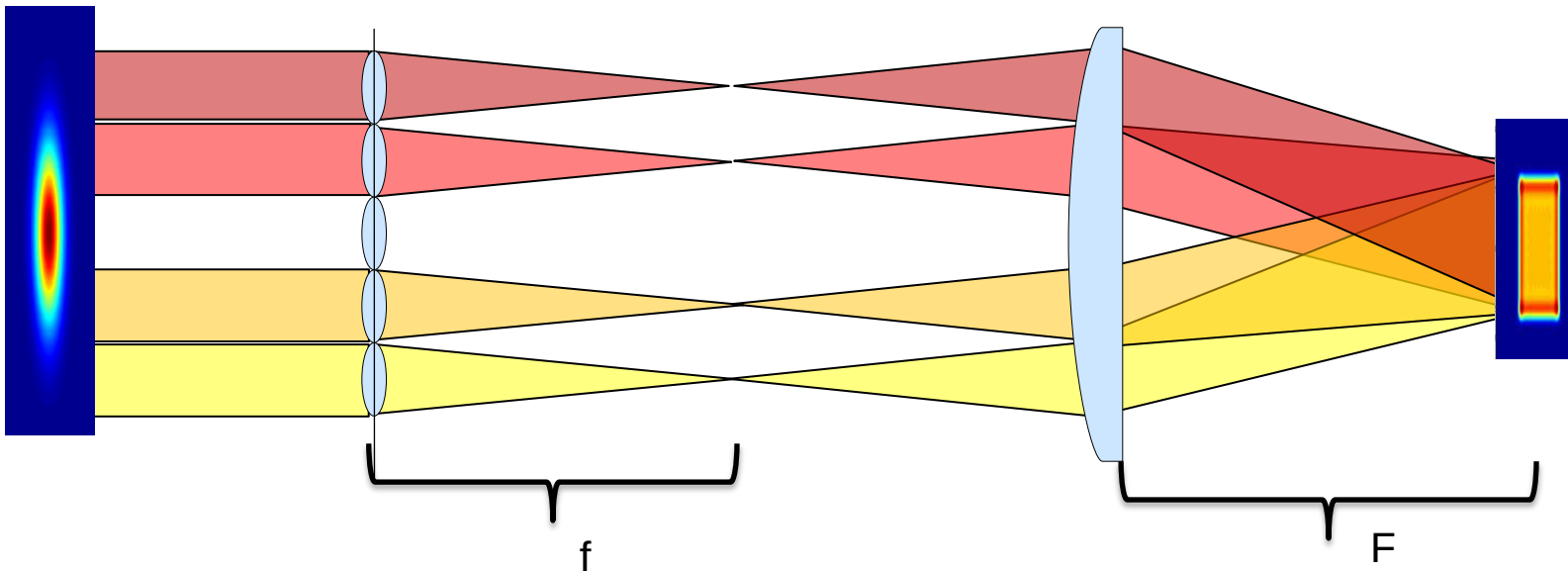


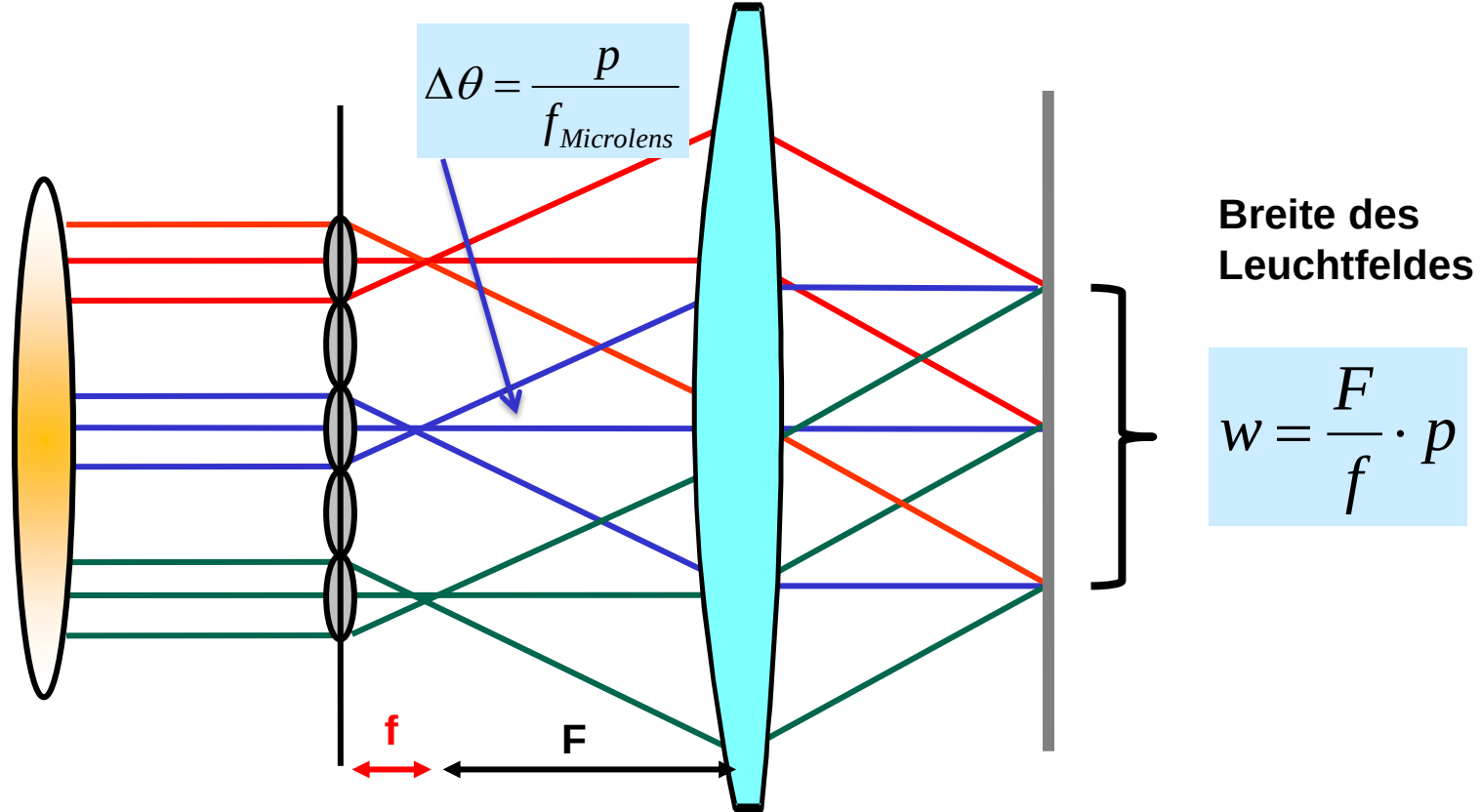
Mikrolinsen-Arrays sind periodische Anordnungen von identischen kleinen Linsen (Durchmesser p , Brennweite f)

Die Linsen zerteilen das Licht

Überlagerung mit Hilfe einer „Integratorlinse“ (Brennweite F)

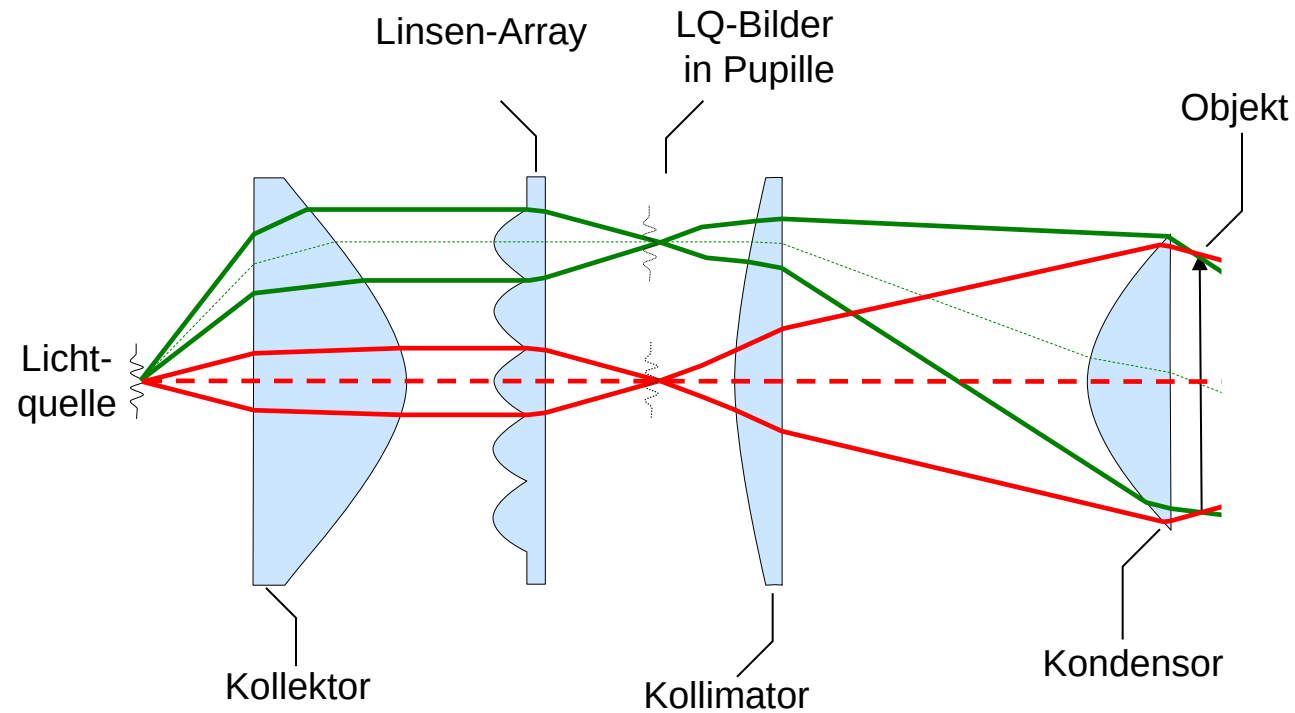
→ Homogenes Lichtfeld
im Fokus der
Integratorlinse

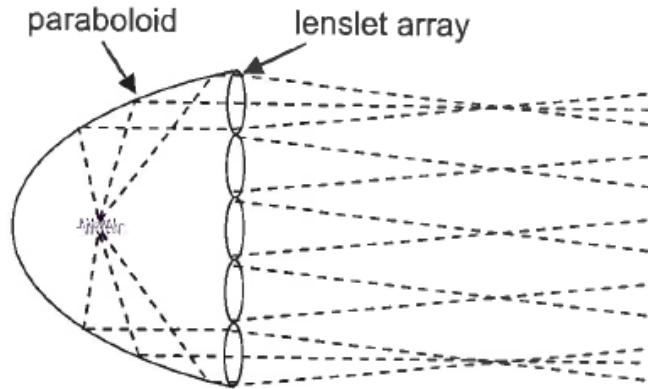




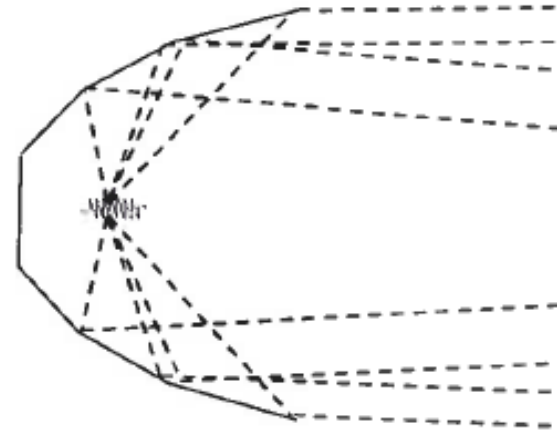
- Jede Mikrolinse form einen „Kanal“
- Jeder Kanal füllt das gesamte Leuchtfeld
- Die Kanäle werden durch die „Integrator-Linse“ überlagert

Mikrolinsen-Arrays für Köhlersche Beleuchtung





Spiegel & Array



→ Facettierter Reflektor



Z.B. LED : Fläche 1 mm^2
"Lambert" $\Delta\Omega = 2\pi$

Leistung 1 W

$$\Rightarrow \text{Etendue } H = 2\pi \text{ mm}^2 \cdot \text{sr}$$

$$\text{Helligkeit } L = \Phi / H = 0.14 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{sr}}$$

Laser : Strahlquerschnitt $\approx 1 \text{ mm}^2$

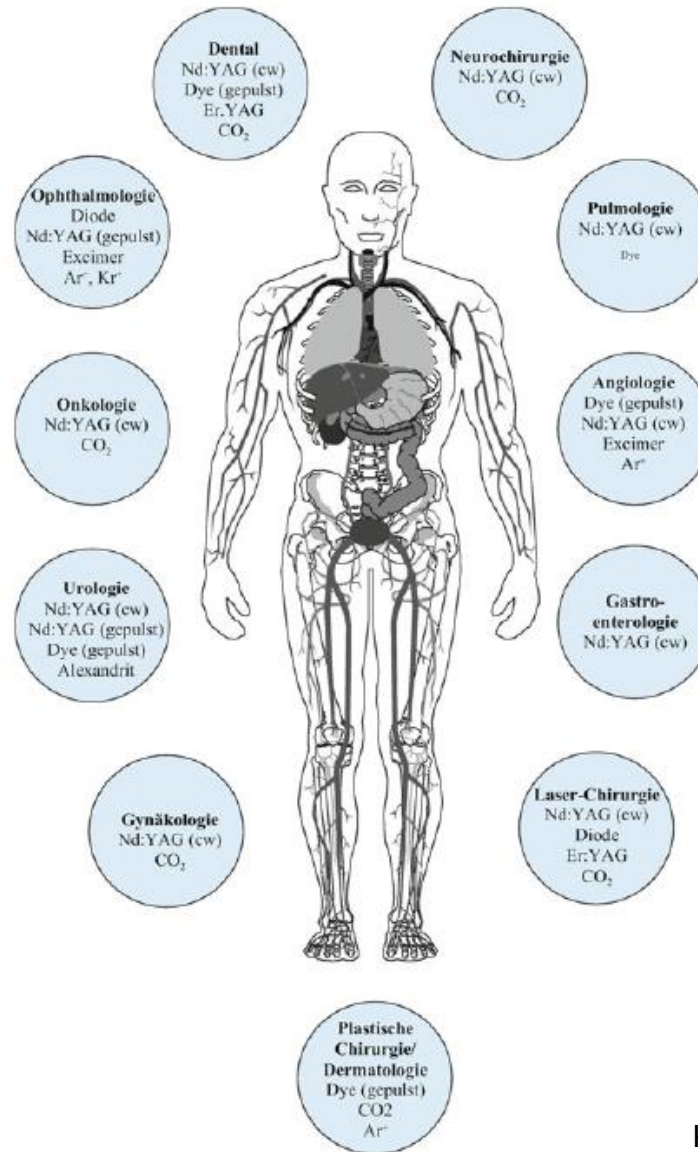
$$\text{Divergenz} \approx 1 \text{ mrad} \times 1 \text{ mrad} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ sr}$$

Leistung 1 W

$$\Rightarrow \text{Etendue } H = 1 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2 \text{ sr}$$

$$\text{Helligkeit} = L = \Phi / H \approx 10^6 \frac{\text{W}}{\text{mm}^2 \text{sr}}$$

Laser-Anwendungen

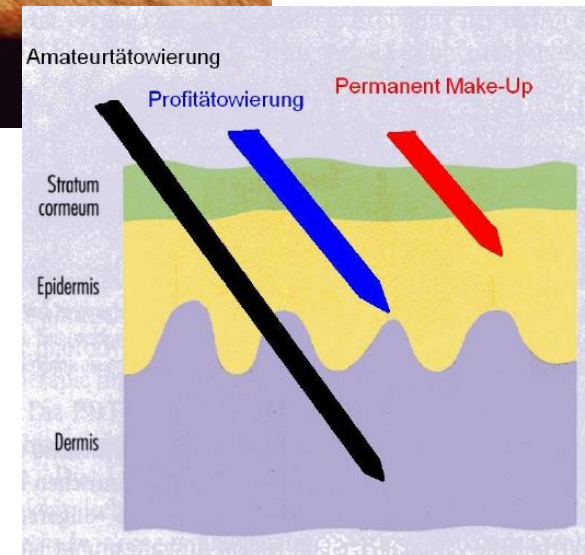
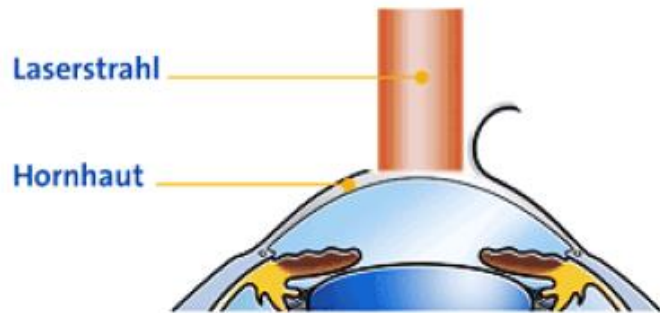
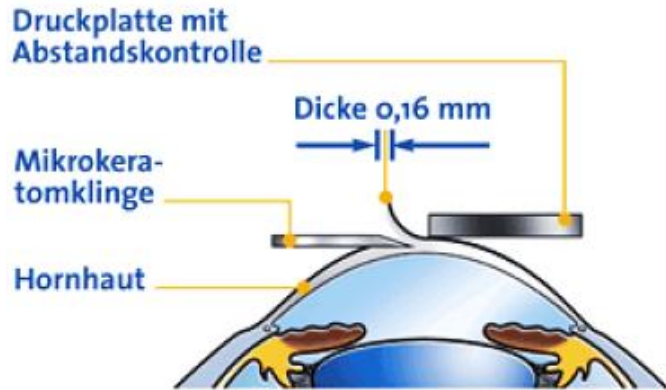


Laser-Anwendungen



Laser	Modus	Medizinisches Anwendungsfeld
Ar ⁺ , (Kr ⁺)	cw	Dermatologie, Ophthalmologie, HNO
KTP	gepulst	Plastische Chirurgie, Dermatologie
FDL	gepulst	Dermatologie (585 nm), Urologie (504 nm)
Nd:YAG	cw	Chirurgie, Urologie, Gynäkologie, Neurochirurgie, Gastroenterologie, Pulmologie
Nd:YAG	gepulst	Ophthalmologie, Lithotripsie
CO ₂	cw	Chirurgie, Dermatologie, HNO, Gynäkologie, Neurochirurgie, plastische Chirurgie
Er:YAG	gepulst	Dermatologie, plastische Chirurgie, Zahnmedizin
Diode	cw	Chirurgie, Dermatologie (810, 940, 980 nm); PDT (630 nm); Dermatologie (800 nm)
Excimer	gepulst	Angiologie, Ophthalmologie
Rubin	gepulst	Dermatologie
Alexandrit	gepulst	Dermatologie

Laseranwendungen



Spezifikation Laser



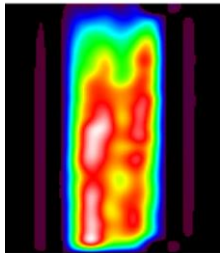
$$P = 500 \frac{1}{s} \cdot 1 \text{ mJ} = 0.5 \text{ Watt}$$

Specifications	
Wavelength (nm)	157
Max. Repetition Rate (Hz)	200/500
Max. Pulse Energy (mJ)	2
Stabilized Pulse Energy (mJ)	1
Average Pulse Power ¹	0.2/0.5
Energy Stability ¹ (sigma, %)	2/3
Beam Dimensions (FWHM, V x H, mm ²)	6 x 3
Beam Divergence (FWHM, V x H, mrad ²)	3 x 1.5
Pulse Duration (ns)(typ.)	5
Wavelength (nm)	157



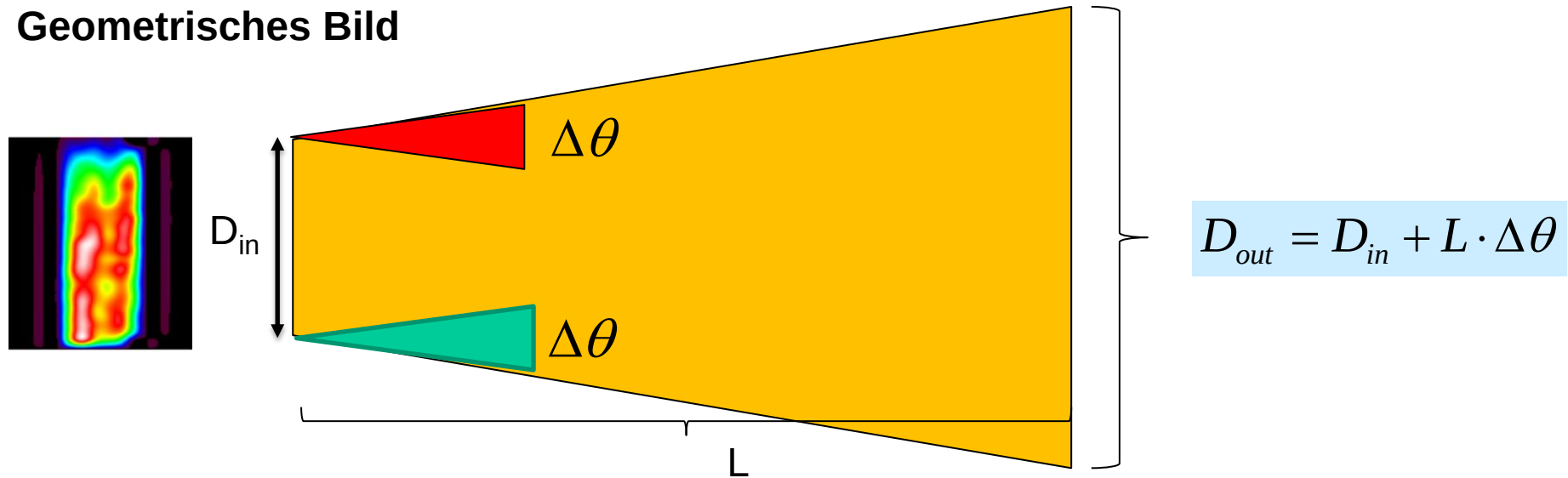
ExciStar XS

Excimer Lasers

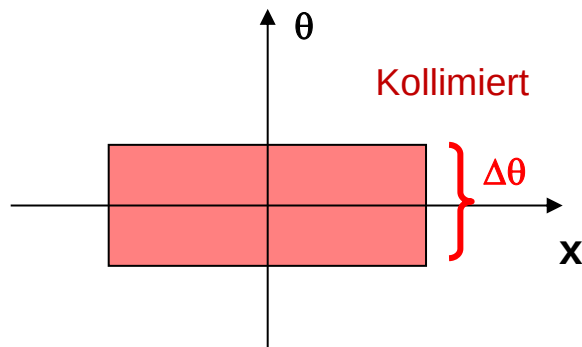


Strahlquerschnitt $3 \times 6 \text{ mm}^2$
 Divergenz $3 \times 1.5 \text{ mrad}^2$

Geometrisches Bild



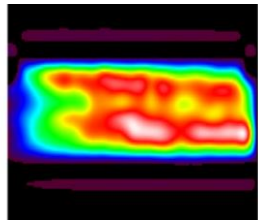
- ➔ Strahlprofil und Divergenz sind relevant
- ➔ X- θ -Diagramme: Gemessene Breiten und Divergenzen



Strahlausbreitung Laser – Einfache Betrachtung

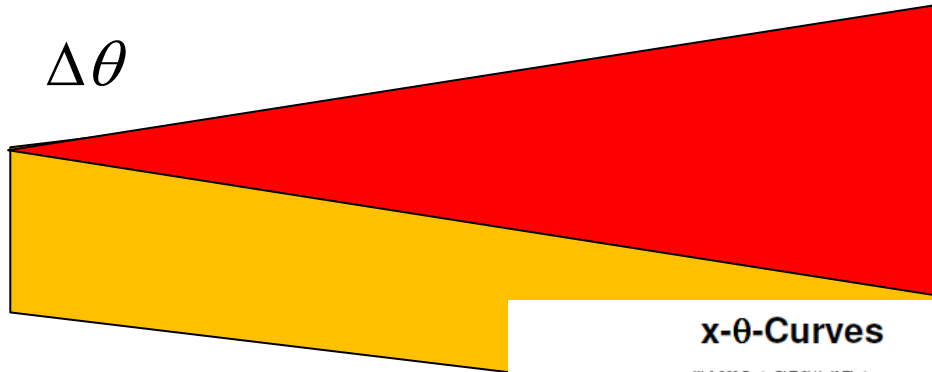


Nahfeld (Profil)



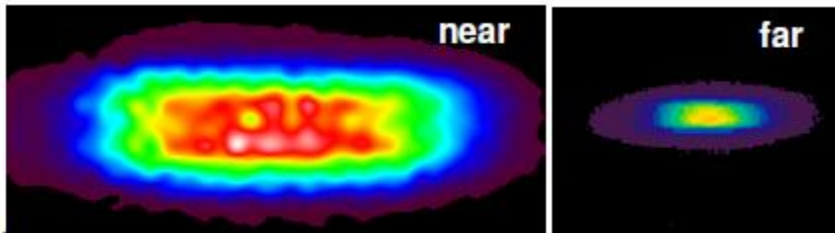
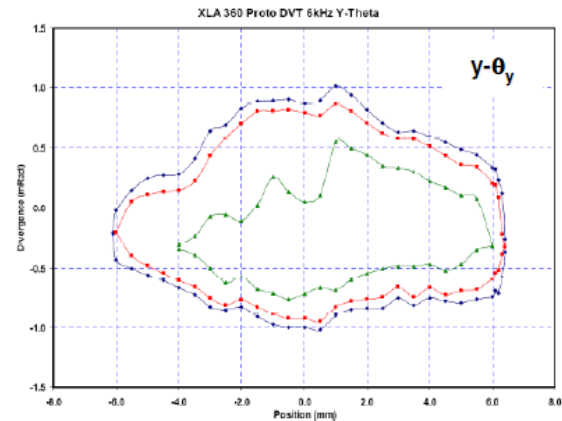
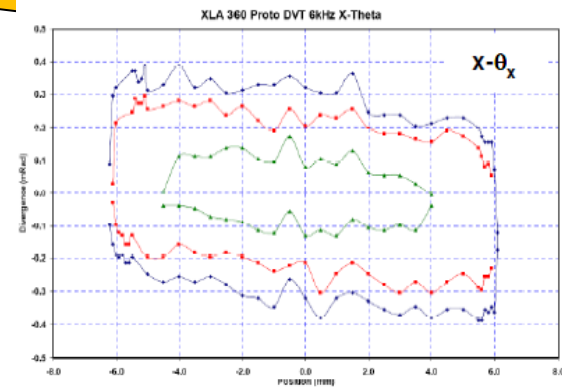
x_{in}

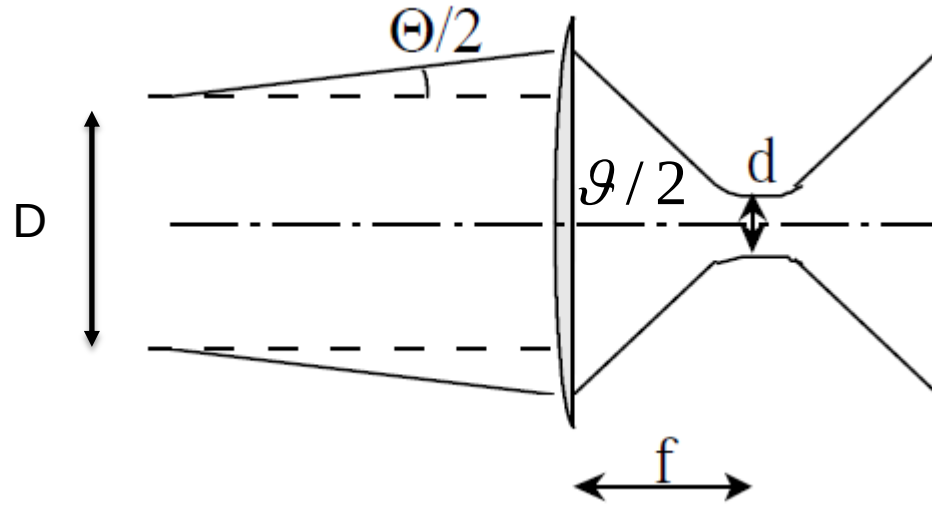
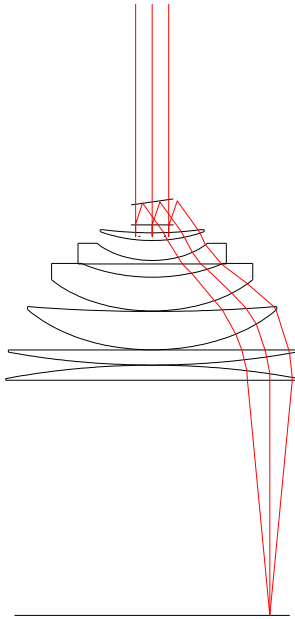
$\Delta\theta$



Fernfeld
(Divergenz)

x- θ -Curves





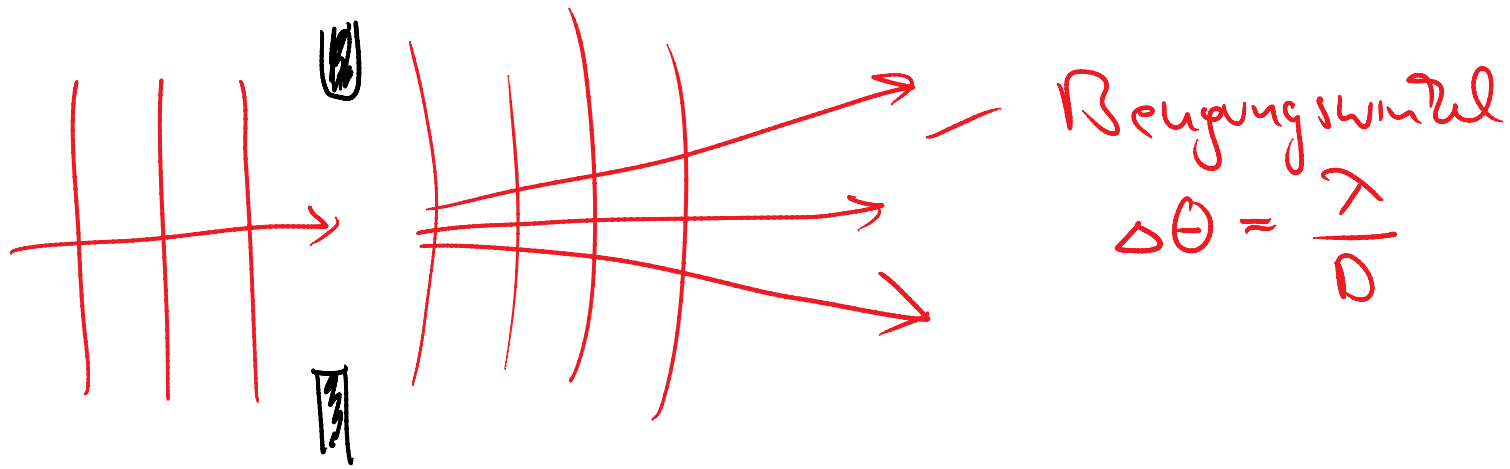
Strahlparameterprodukt

$$d_{Focus} \cdot \mathcal{G}_{Focus} = D_{in} \cdot \Delta\theta_{in} \propto M^2$$

$$d_{Focus} = f \cdot \Delta\theta_{in}$$

$$\mathcal{G}_{Focus} = 2 \cdot NA = \frac{D_{in}}{f}$$

Idealer Strahl = Ebene Welle



Begrenzung D

⇒ Strahlparameterprodukt
 ≙ "Beugungsbegrenzter" Laser
 Exakt gilt $M^2 \Rightarrow$

$$D \cdot \Delta\theta = \lambda$$

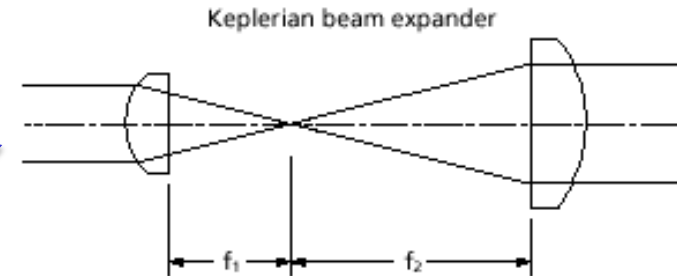
$$M^2 = 1$$

$$\left(\frac{D}{2}\right) \cdot \left(\frac{\Delta\theta}{2}\right) = \frac{\lambda}{\pi} \cdot M^2$$

Oft muss der Strahldurchmesser angepasst werden:

Stahlaufweitung: **Kepler Teleskop**

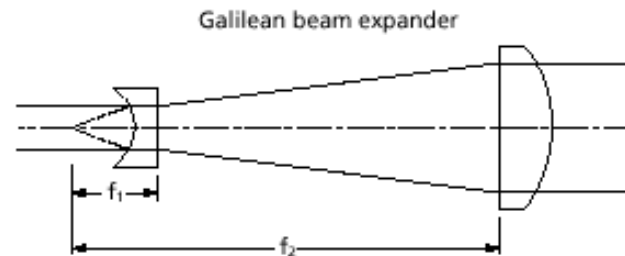
$$\text{Aufweitung} = \frac{f_2}{f_1}$$



www.cvimellesgriot.com

Für hohe Leistung ist der Zwischenfokus evtl. ungünstig

Galilei Teleskop

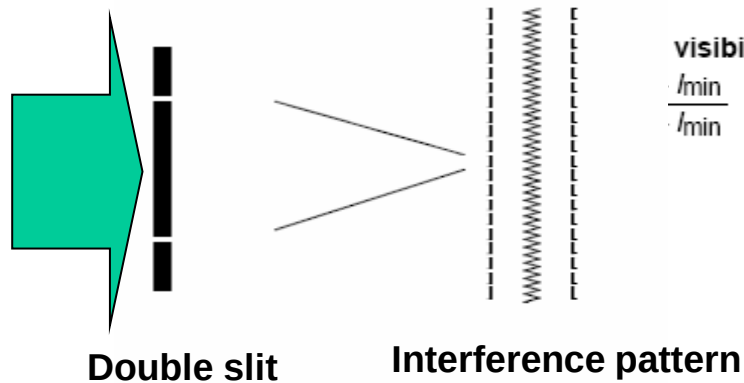


Note: **Das „Strahlparameterprodukt“ bleibt gleich (Etendue-Erhaltung)**
→ Aufweitung reduziert Divergenz

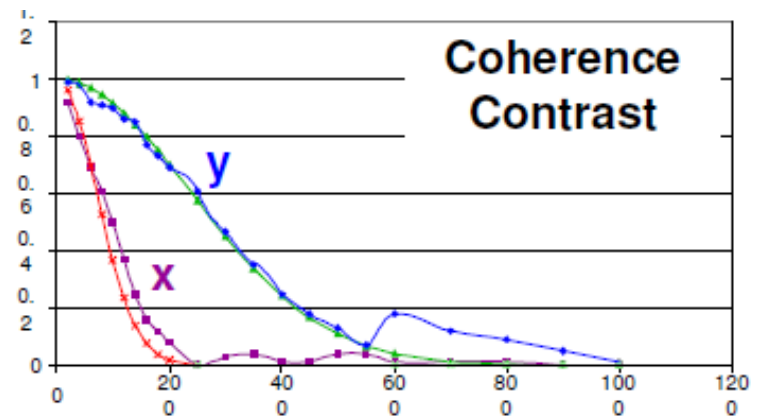
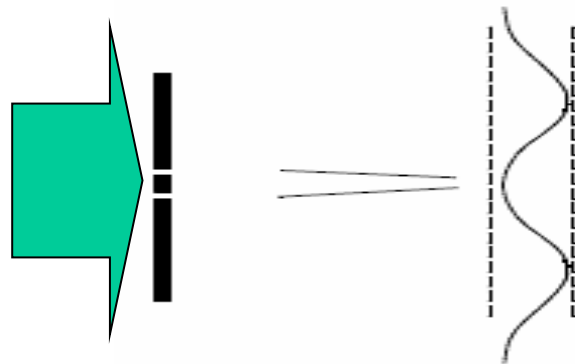
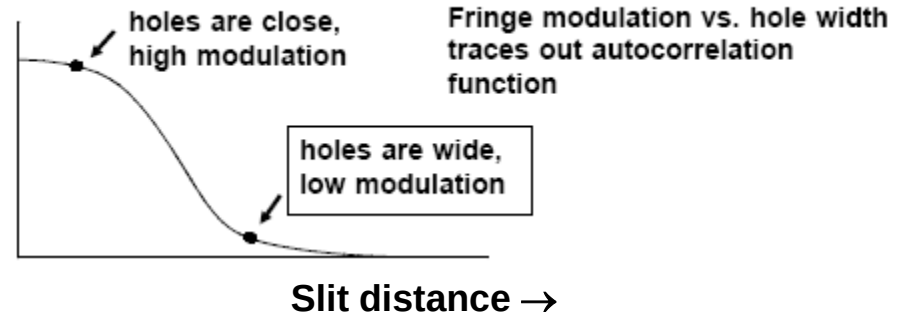
$$\Delta\theta \cdot \Delta x = \text{const.}$$

Räumliche Kohärenz:

Interferenz-Fähigkeit zwischen lateralen Position im Strahl



$$\text{visibility} = \frac{I_{\text{max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{max}} + I_{\text{min}}}$$

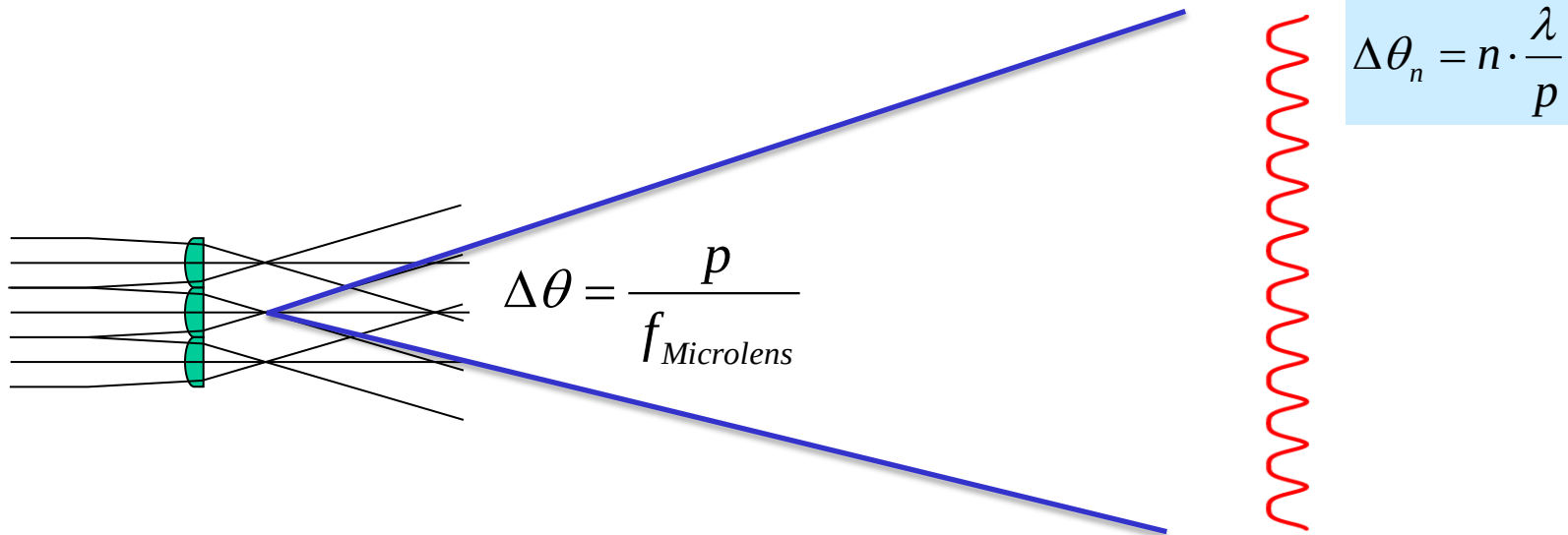


→ Z.B. Einfaches Mikrolinsen-Array (Periode p , Brennweite f)

Jeder Kanal erzeugt Divergenz → Überlagerung = Mischung (erwünscht)

$$\Delta\theta = \frac{p}{f_{\text{Microlens}}}$$

Aber: Periodisches Gitter erzeugt Interferenz (unerwünscht)



→ Räumliche Kohärenzlänge sollte $< p$ sein

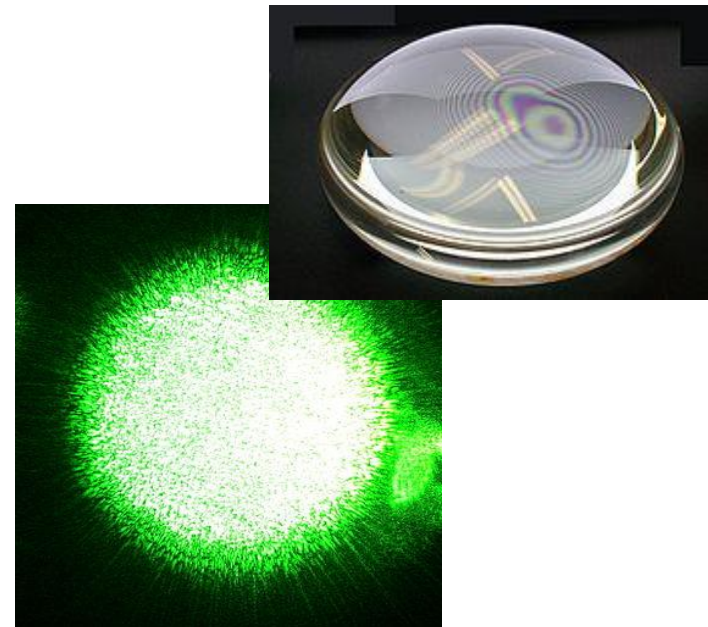
Zeitliche Kohärenz:

Interferenz-Fähigkeit zwischen zeitlich (in Ausbreitungsrichtung) verschobenen Wellenzügen



→ Effekte:
Interferenz (z.B. Newtonsche Ringe
- Wegunterschied)

Speckle (statistischer Effekt)



Erinnerung Fourier - Transformation (Zeit - Frequenz)

$$\Delta t = \frac{2\pi}{\Delta \omega} \Rightarrow \tau_{\text{coh}} = \frac{2\pi}{\Delta \omega}$$

$$\omega = c \cdot \frac{2\pi}{\lambda} \Rightarrow \frac{d\omega}{d\lambda} = -c \cdot \frac{2\pi}{\lambda^2}$$

$$\Rightarrow \tau_{\text{coh}} = \frac{\lambda^2}{c \cdot \frac{d\lambda}{d\lambda}}$$

Im Ort : $\Delta x = \frac{2\pi}{\Delta \varphi}$ $\Delta \varphi = |\varphi| \cdot \sin \theta$
 $= \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta \theta$

$$\Rightarrow \Delta x_{\text{coh}} = \frac{\lambda}{\Delta \theta}$$

$\Rightarrow$ Räuml. Kohärenz ist verwandt zu Divergenz
Zeitl. Kohärenz ist verwandt zu Bandbreite $\Delta \omega$

Was ist der Unterschied zwischen radiometrischen und Photometrischen Größen (..und wie rechnet man um)

- Radiometrisch: Watt (Energie)
- Photometrisch: Lumen (Augen-basiert)

Wie sind Beleuchtungsgrößen definiert ?

- Bestrahlungsstärke, Strahlstärke, Helligkeit

Was sind Grundlagen bei der Auslegung von Beleuchtungs-Systemen

- Etendue-Bilanz
- Kollektroptik, Homogenisierungsmethoden
- Kohärenz-Effekte

Was sind grundlegende Laser-Charakteristika und Laser-System-Komponenten

- Divergenz, Strahlprofil, Strahlparameterprodukt
- Kollektroptik, Strahlaufweitung