

# Physik für Studierende der Medizin im 1. Fachsemester

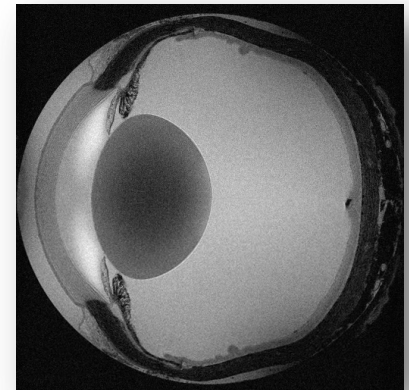
(PFMF-V); 09410100

Dienstag mit Freitag 8.15-9.00

## Optik Teil 5 Am 21.05.2021

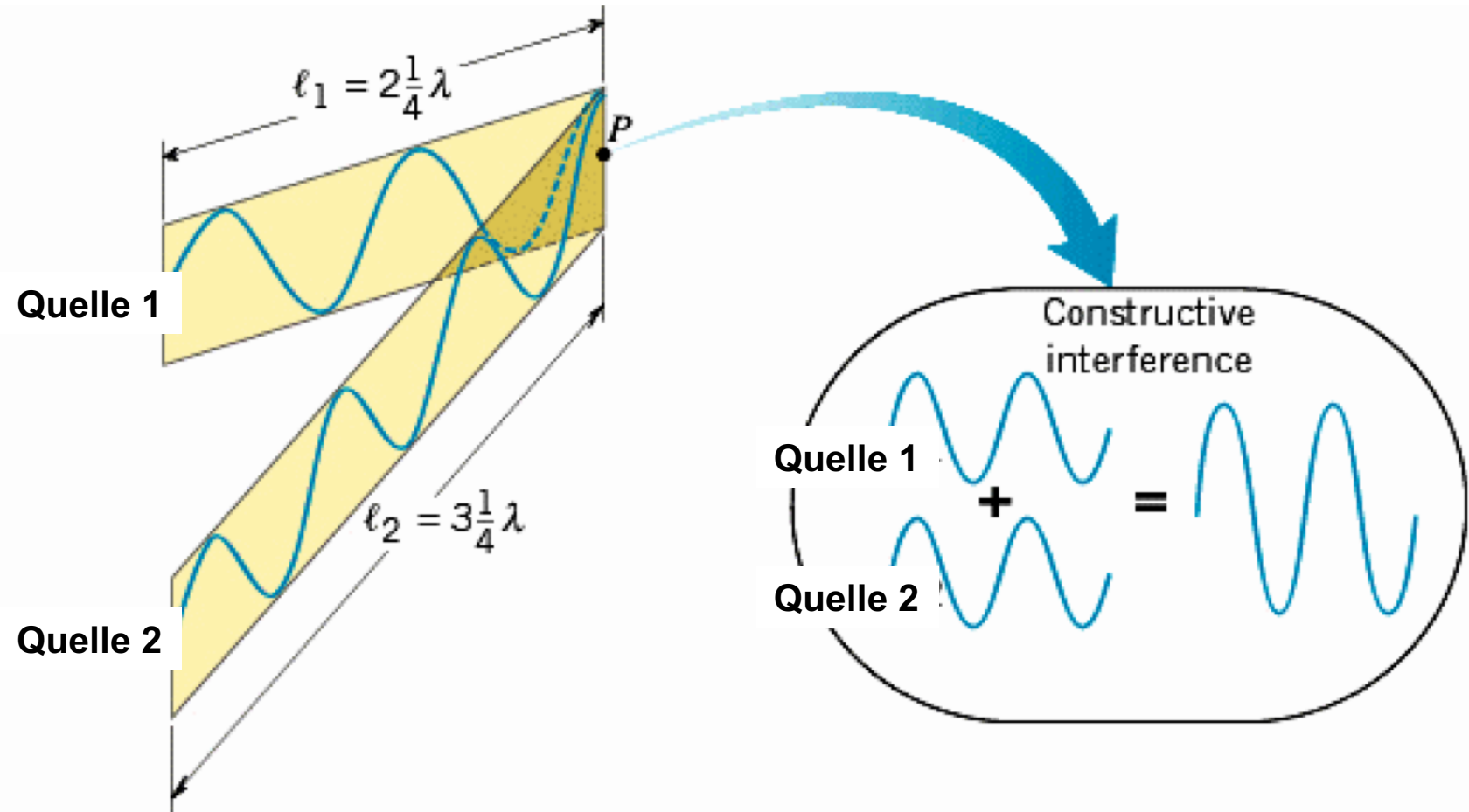


Dr. Simon Moser  
Lehrstuhl für Exp. Physik IV,  
Universität Würzburg  
[simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de](mailto:simon.moser@physik.uni-wuerzburg.de)



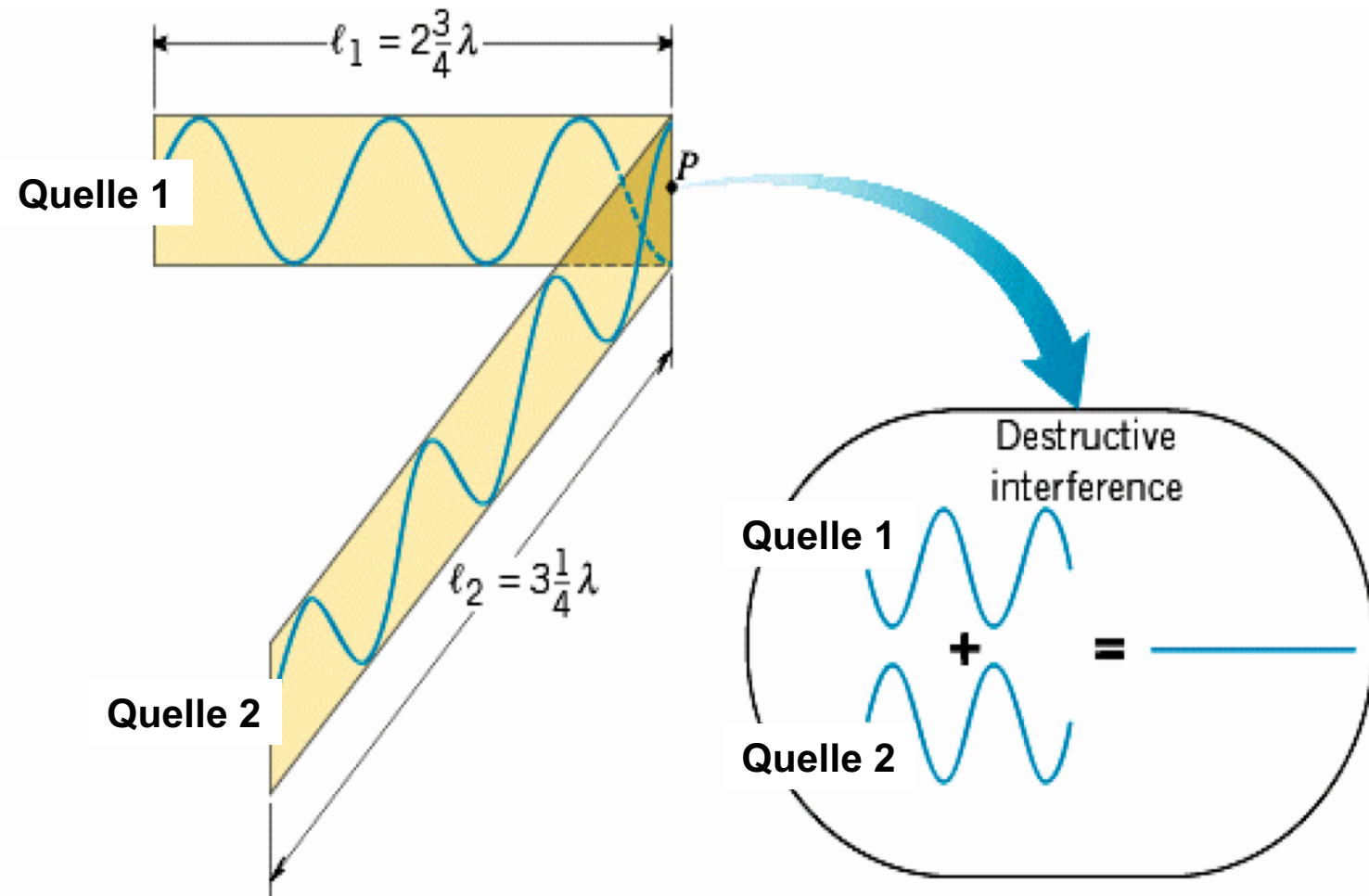
# Wdh. Konstruktive Interferenz

## Maxima



# Wdh. Destruktive Interferenz

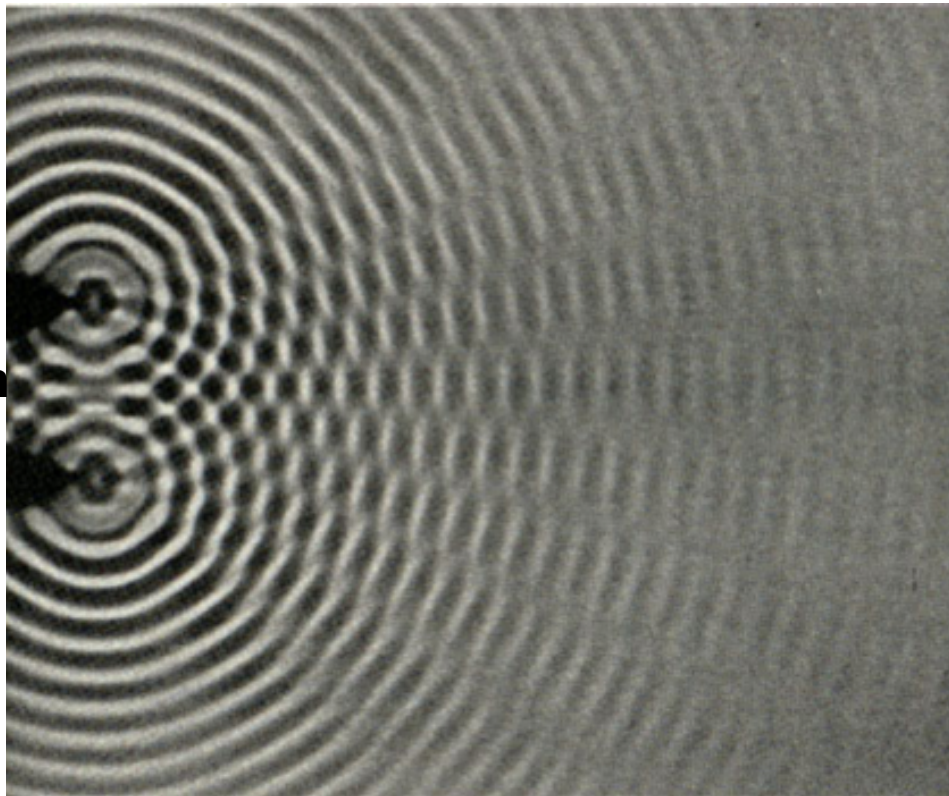
## Minima



# Superpositionsprinzip

## Konstruktive & destruktive Überlagerung von Wellen

**Bsp.:**  
**Wasserwellen**



# Beugung

Beugung ist die Ablenkung von Wellen um Hindernisse oder Öffnungsränder.

# Beugung

## Definition:

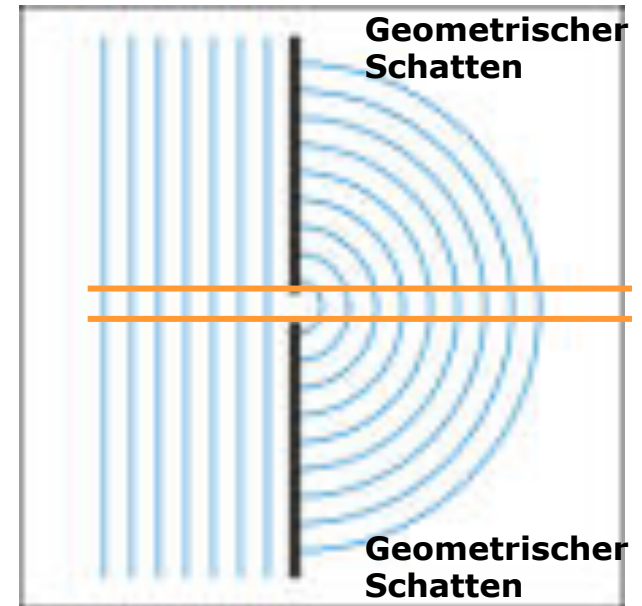
Diejenigen Gebiete des Raums, die eine Welle bei geradliniger Ausbreitung hinter einem Hindernis nicht erreichen kann, heißen **Gebiete des geometrischen Schattens**.

## Definition:

Unter **Beugung** versteht man die Wellenausbreitung hinter einem Hindernis, dessen Ausdehnung von gleicher Größenordnung oder kleiner ist als die Wellenlänge.

## Ergebnis der Beugung:

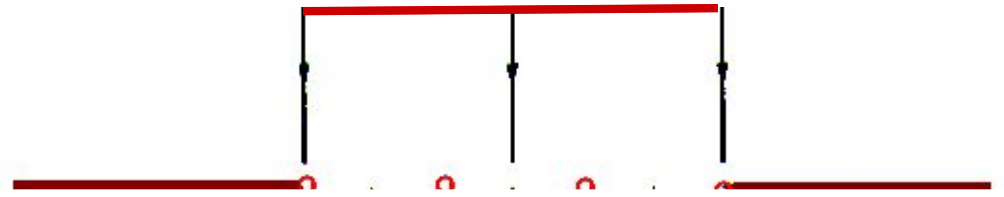
*Man beobachtet die Welle auch im Gebiet des geometrischen Schattens!*



# Beugung

**Beugung:** Wellenflächen werden durch Hindernisse unterbrochen. Die an den Enden entstehenden Elementarwellen bewirken, dass Wellen auch in *geometrische Schattengebiete* eindringen.

Abweichung von der geradlinigen Ausbreitung in den **geometrischen Schattenraum**.

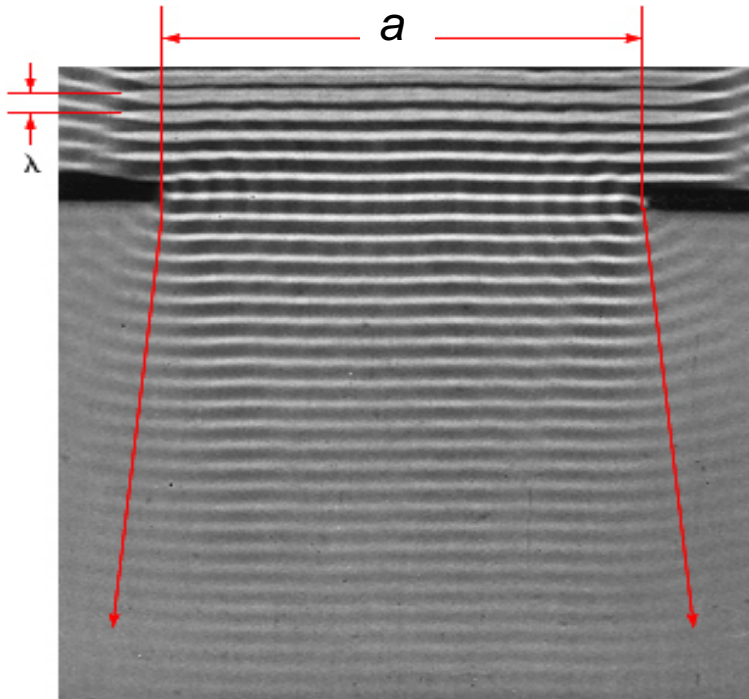


**Huygensches Prinzip**

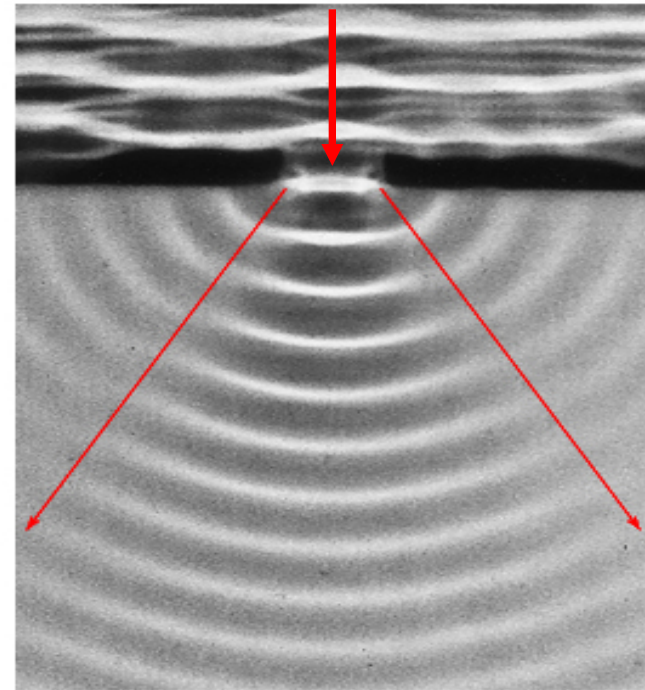


# Huygensches Prinzip

# Wann gibt es Beugung?



$$\lambda \ll a$$



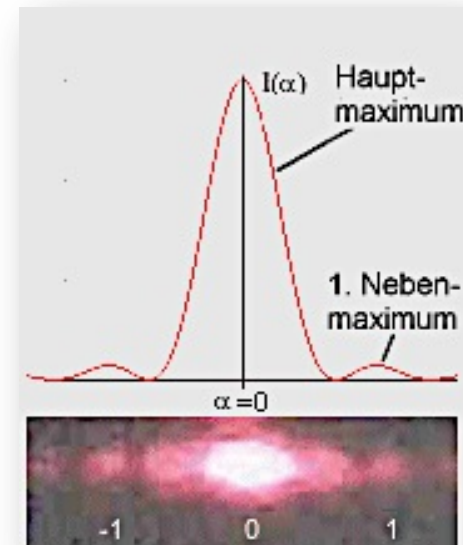
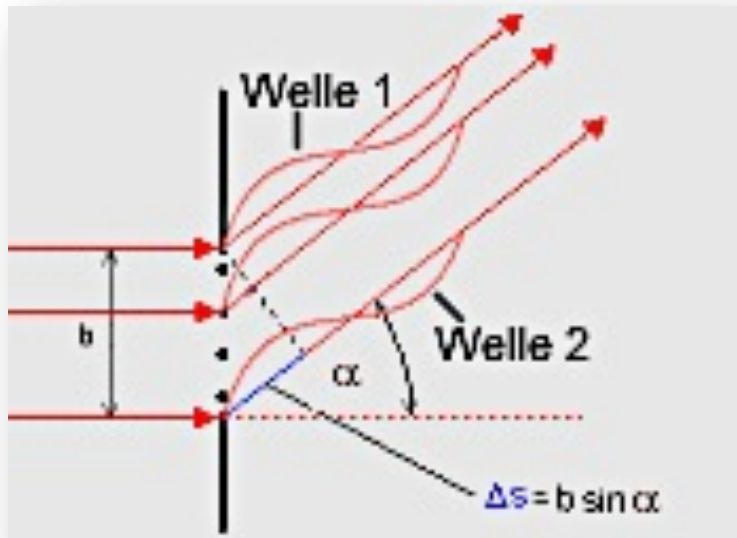
$$\lambda \sim a$$

**WICHTIG:** Beugungseffekte treten immer auf, aber nur dann merklich, wenn die Größe der Hindernisse oder Öffnungen vergleichbar mit der Dimension der Wellenlänge ist.

# Beugung am Einzelspalt

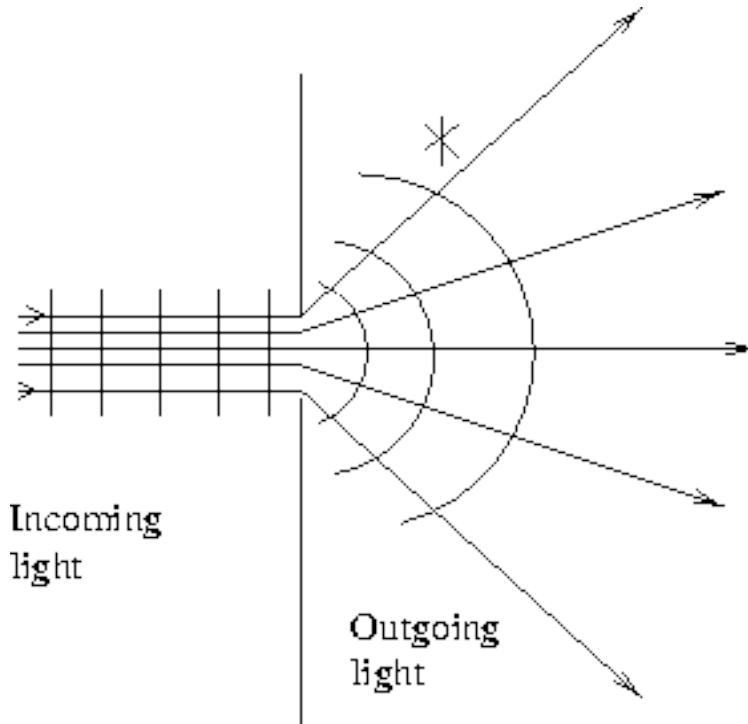
Trifft eine Welle auf ein Hindernis mit einer sehr kleinen Öffnung, deren Größe in etwa der Wellenlänge der ankommenden Welle entspricht, so wirkt diese wie eine Punktquelle für neue Wellen (**Huygenssches Prinzip**).

Jeder Raumpunkt im Spalt ist somit Ausgangspunkt einer neuen Kreiswelle.

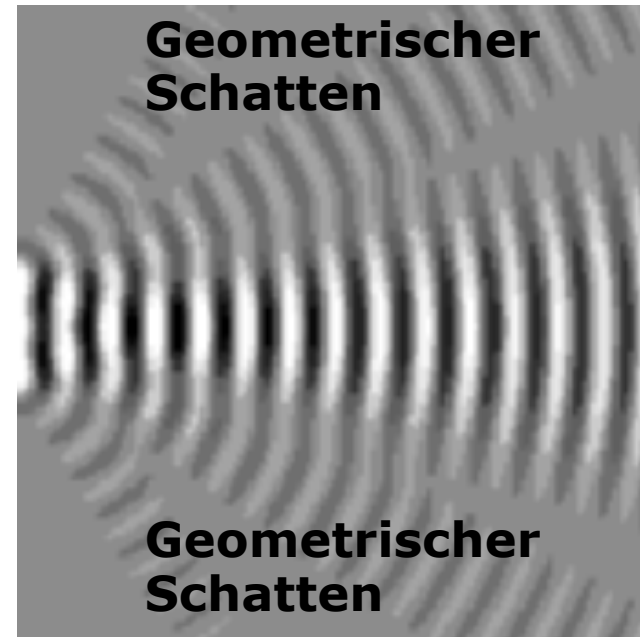


# Beugung am Einzelspalt

Einzelspalt



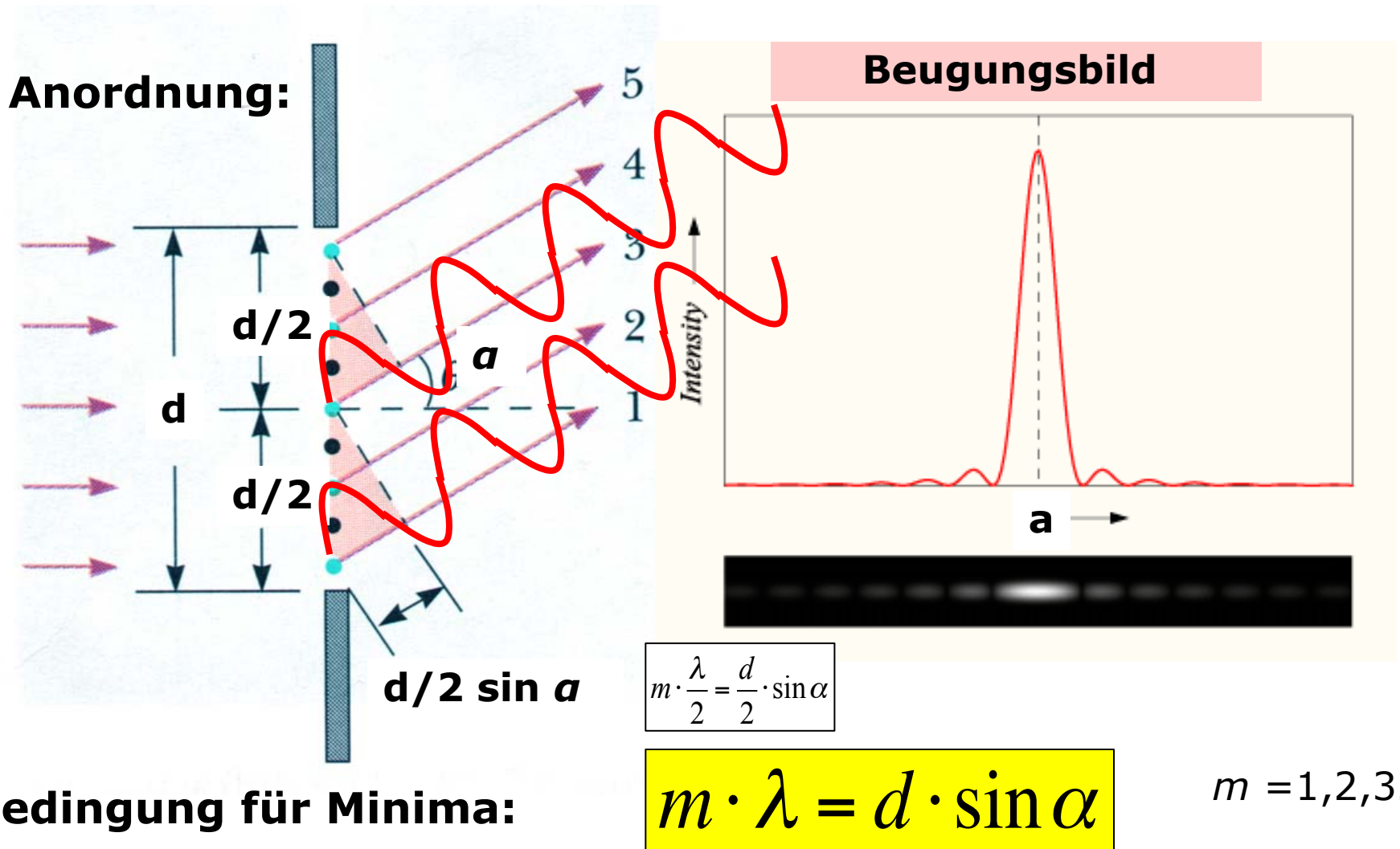
Beugungsfigur



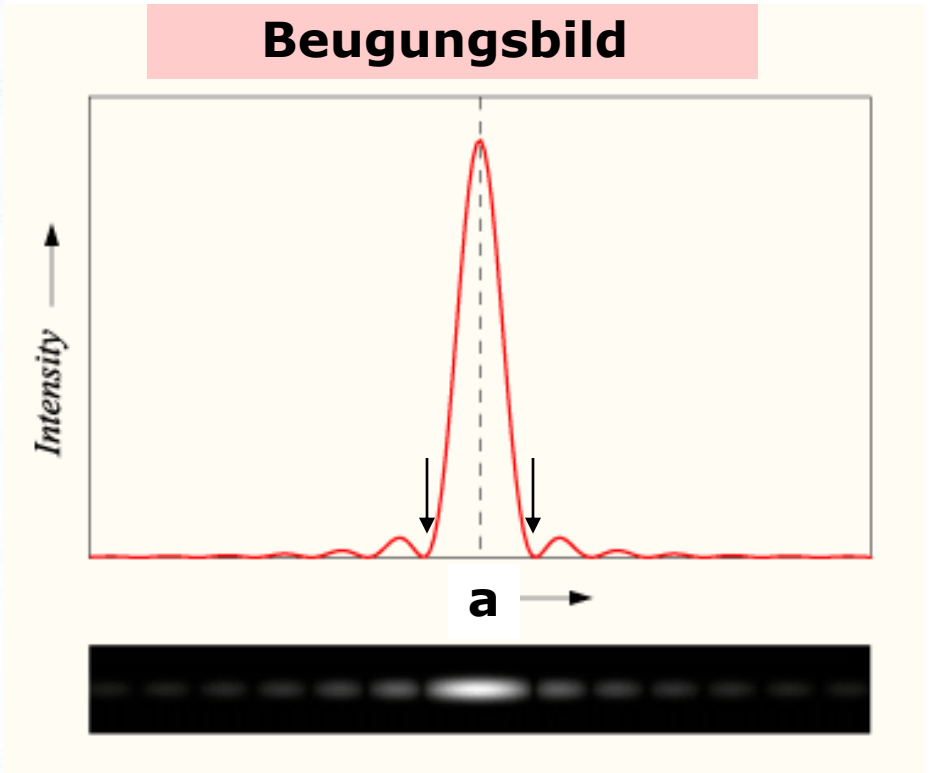
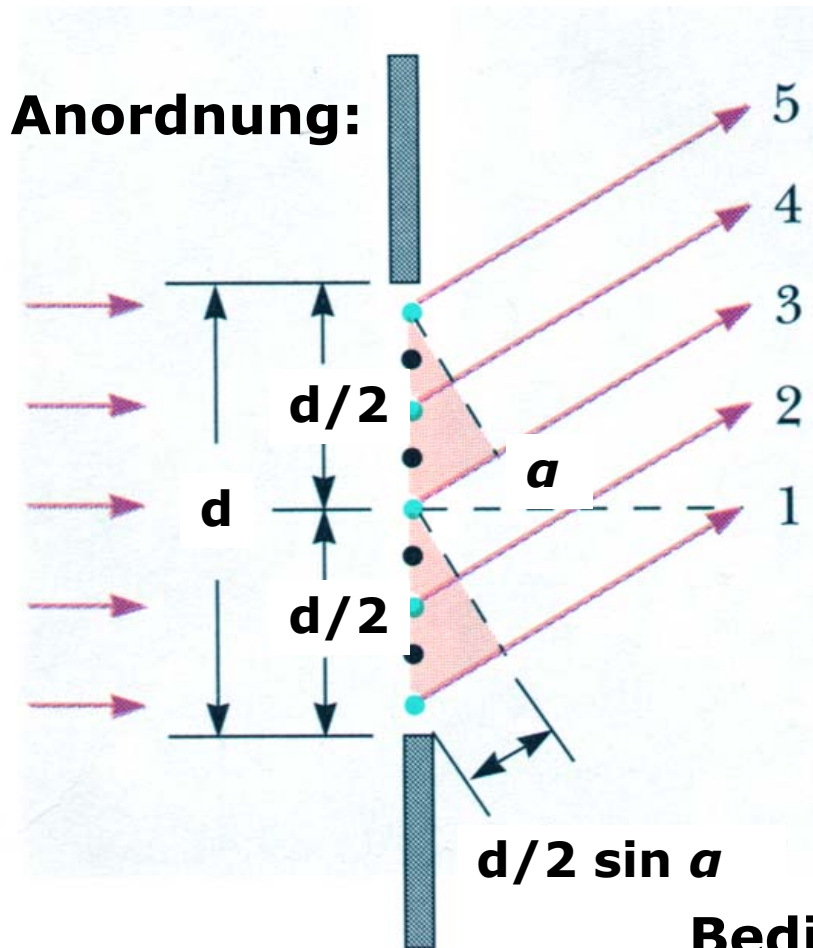
## Huygen'sches Prinzip:

Jeder Punkt ist Ausgangspunkt einer Elementarwelle (Kugelwelle)

# Beugung am Einzelspalt



# Beugung am Einzelspalt



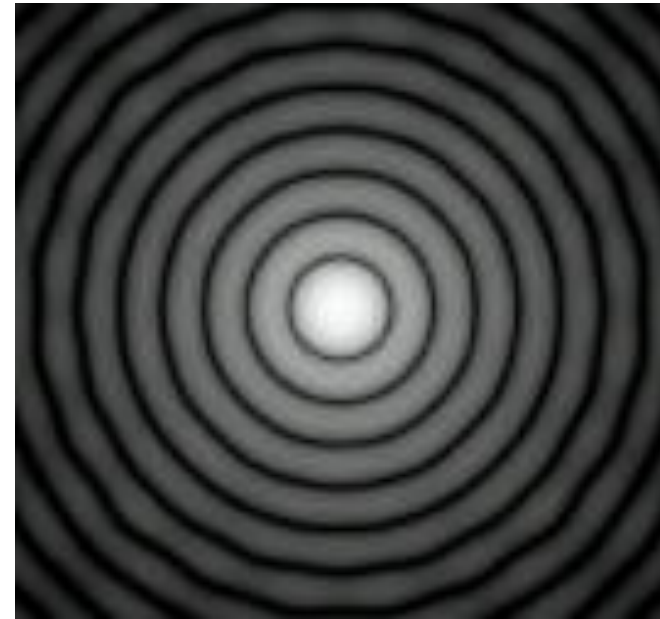
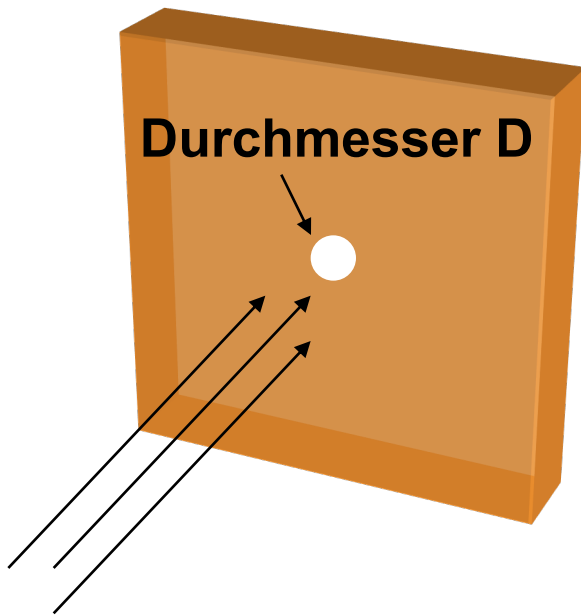
Bedingung für  
1. Minimum:

$$\lambda = d \cdot \sin \alpha$$

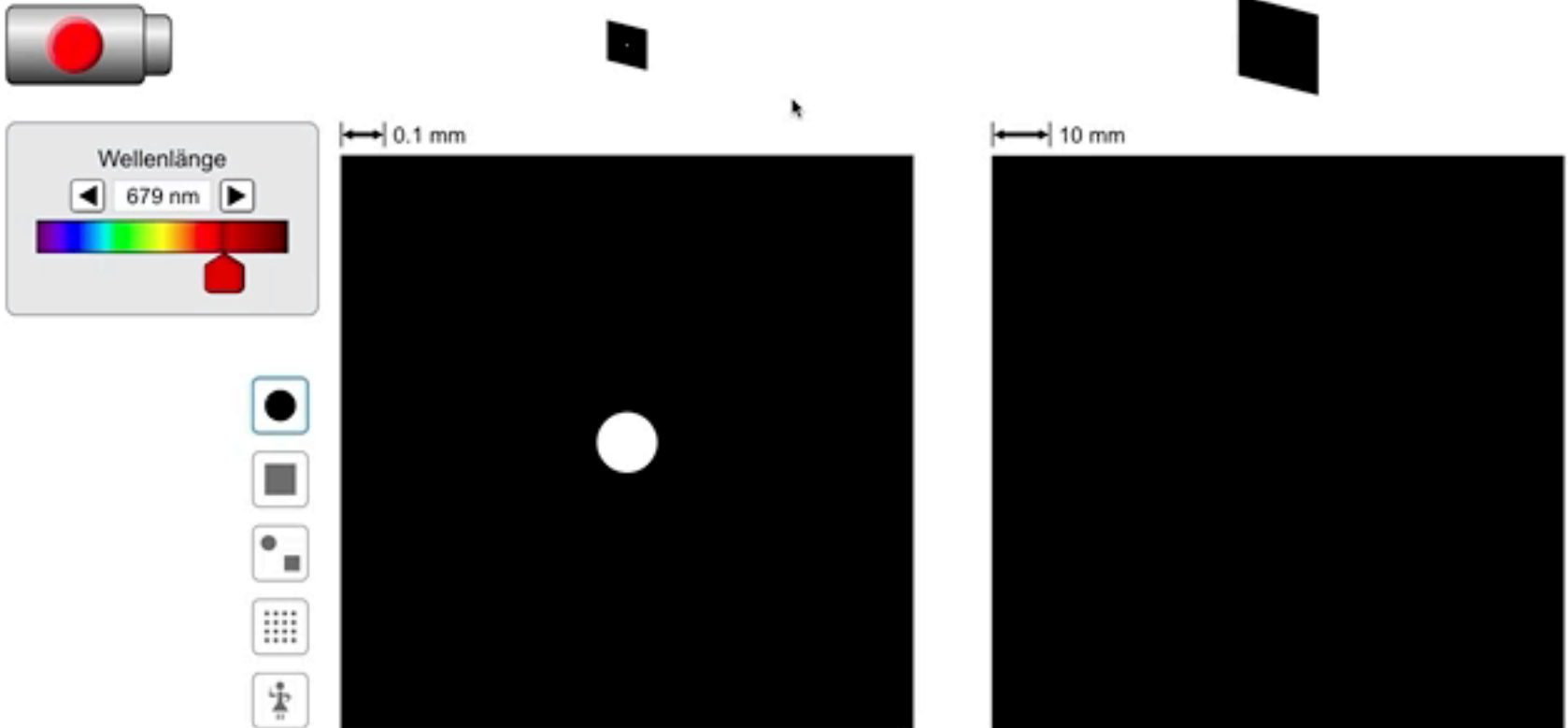
# Beugung an Kreisscheibe

## Airy-Scheibchen

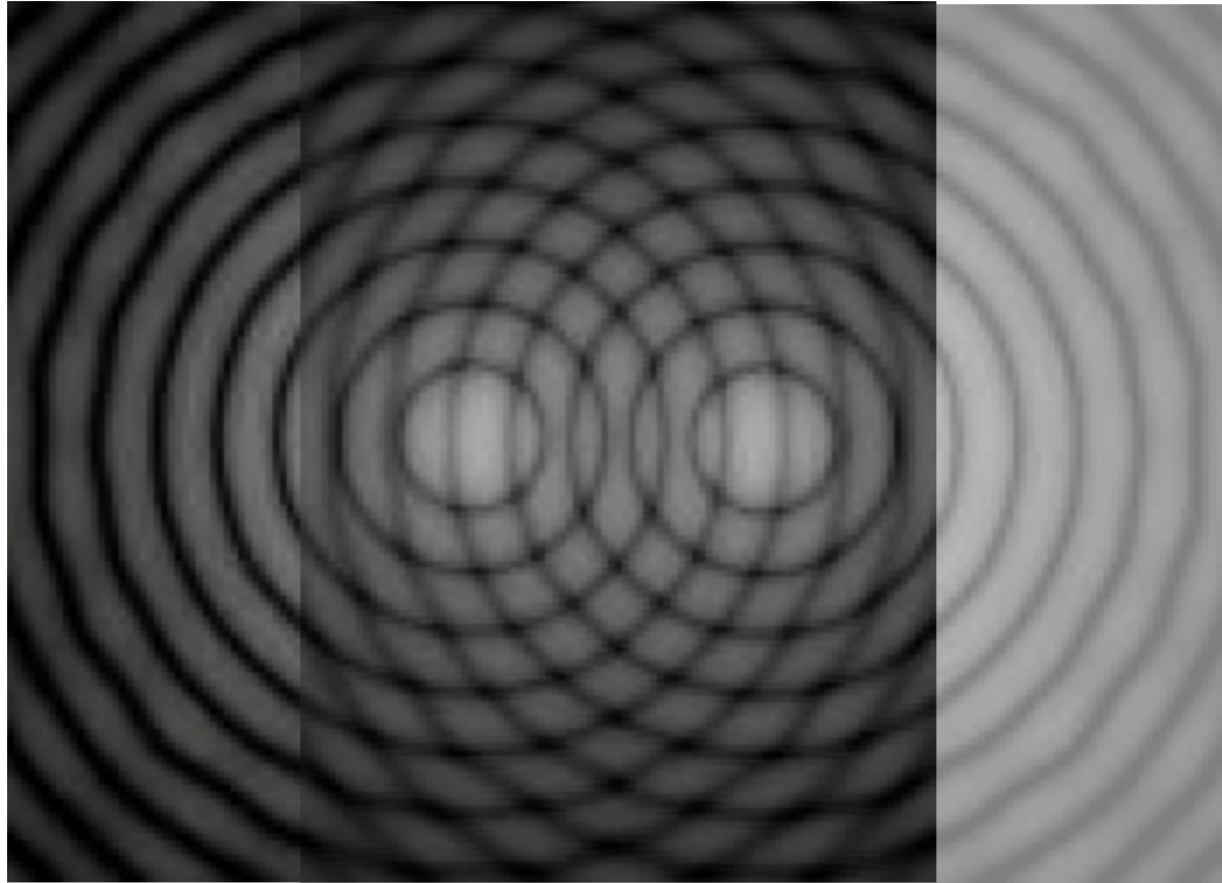
= Beugungsbild einer kreisförmigen Apertur



# Beugung an Kreisscheibe



# Beugung an Kreisscheibe



# Auflösung abbildender Systeme



(a)



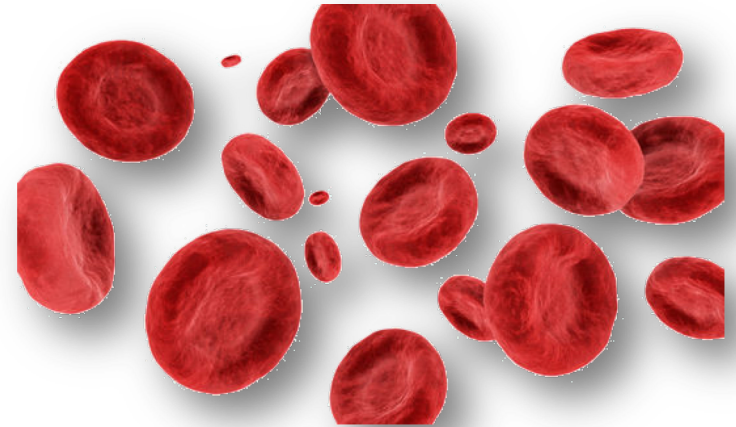
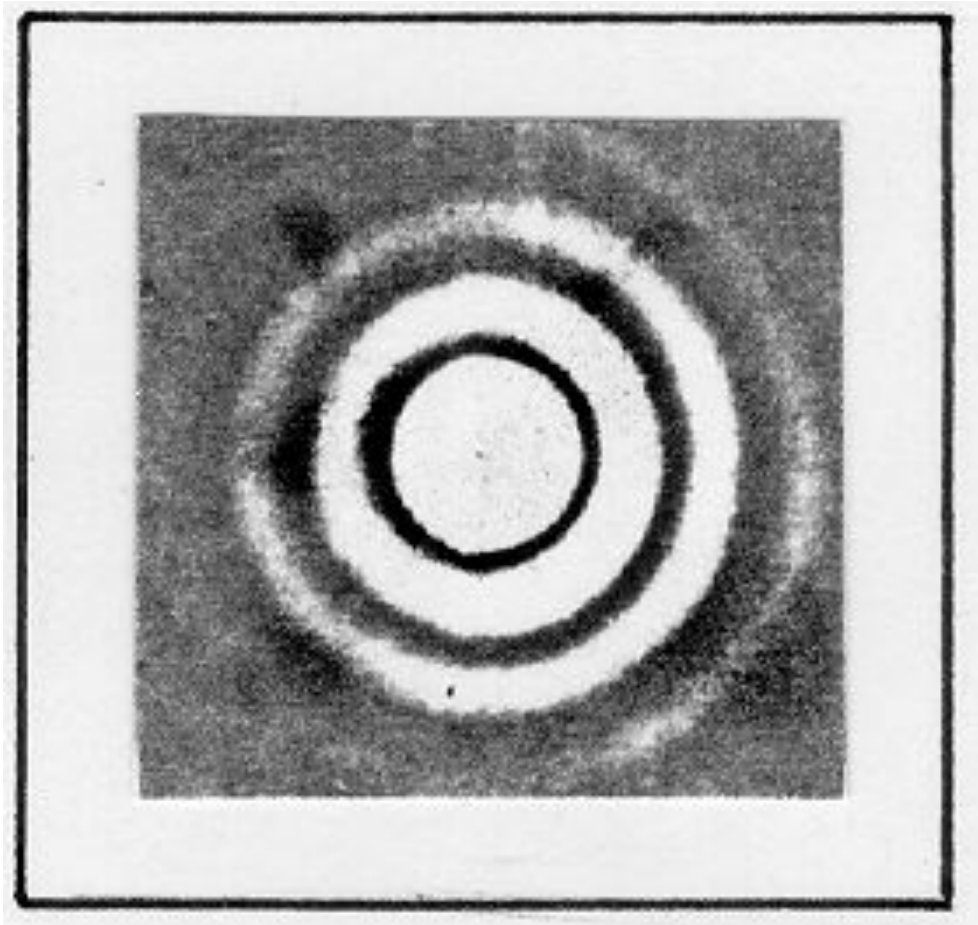
(b)



(c)

Scheinwerfer fotografiert in unterschiedlichen Abständen von der Kamera. In Bild c sind die Scheinwerfer so weit entfernt, dass sie kaum mehr getrennt erkannt werden können.

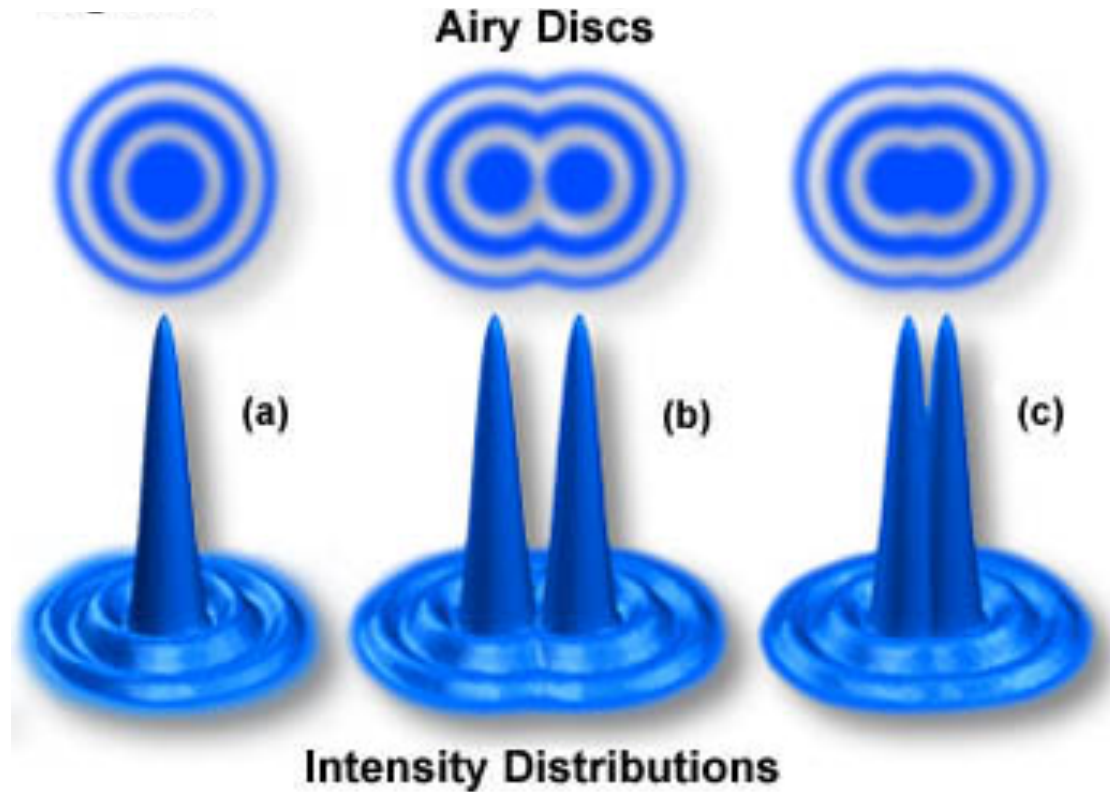
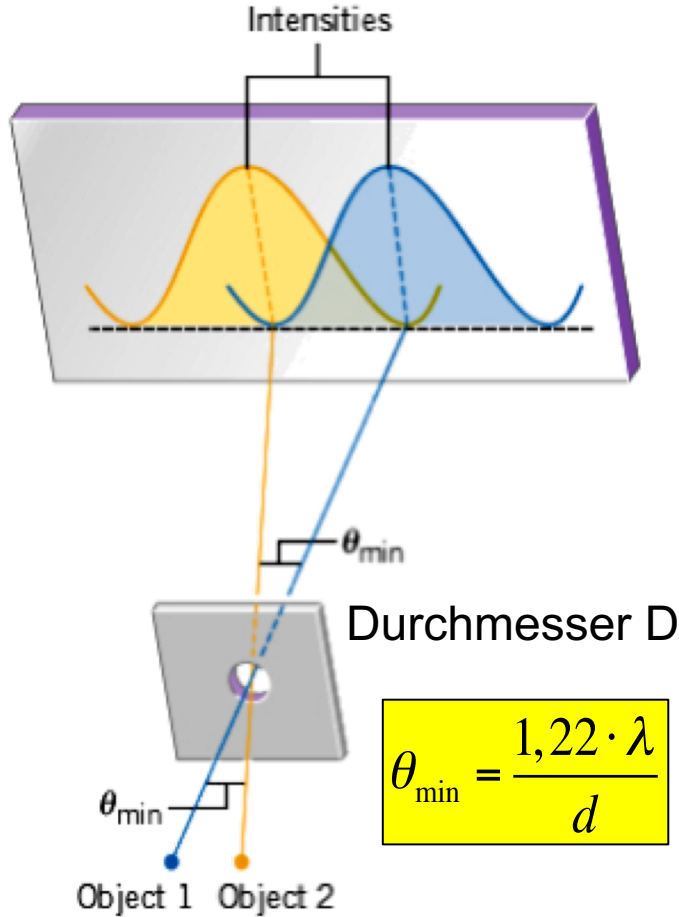
# Beugung an Kreisscheibe



**Rote Blutkörperchen:**  
Durchmesser 8,4  $\mu\text{m}$

**Beugungsfigur eines roten Blutkörperchens**

# Auflösung abbildender Systeme

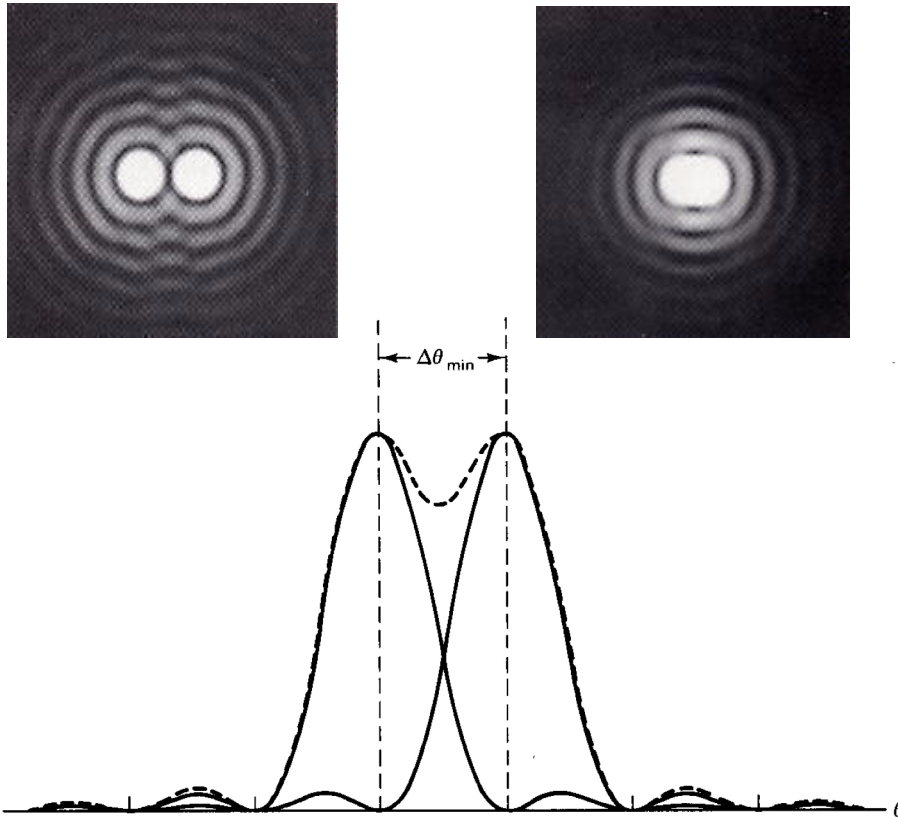


Zwei Objekte sind aufgelöst, wenn der erste dunkle Ring eines Bildes mit dem mittleren hellen Ring des anderen Bildes zusammenfällt.

# Rayleigh-Kriterium

## Rayleigh-Kriterium

für gerade noch aufzulösende Bilder\*:



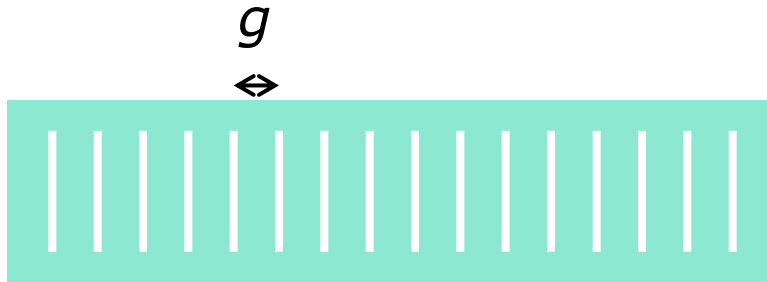
Die Abstände der Bildmuster dürfen nicht näher als der Durchmesser der Airy-Scheibe sein.

$$d_{\min} = \frac{1,22 \cdot \lambda}{\sin \alpha}$$

**Auflösungsvermögen:** Die Fähigkeit einer Linse Bilder von 2 punktförmigen, dicht benachbarten Objekten zu erzeugen

# Interferenz am Gitter

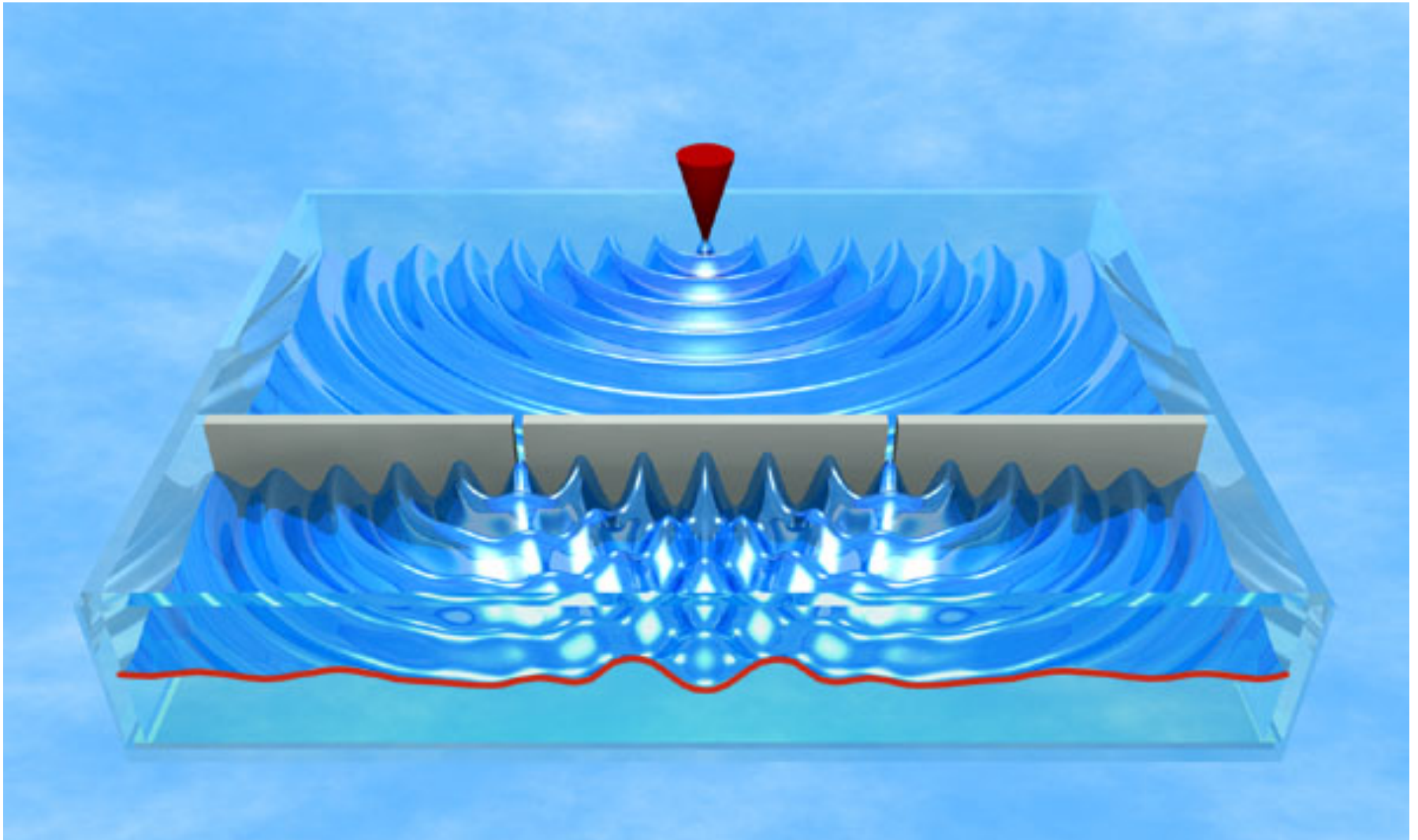
Unter einem Gitter versteht man eine periodische Abfolge von lichtdurchlässigen und lichtundurchlässigen „Strichen“.



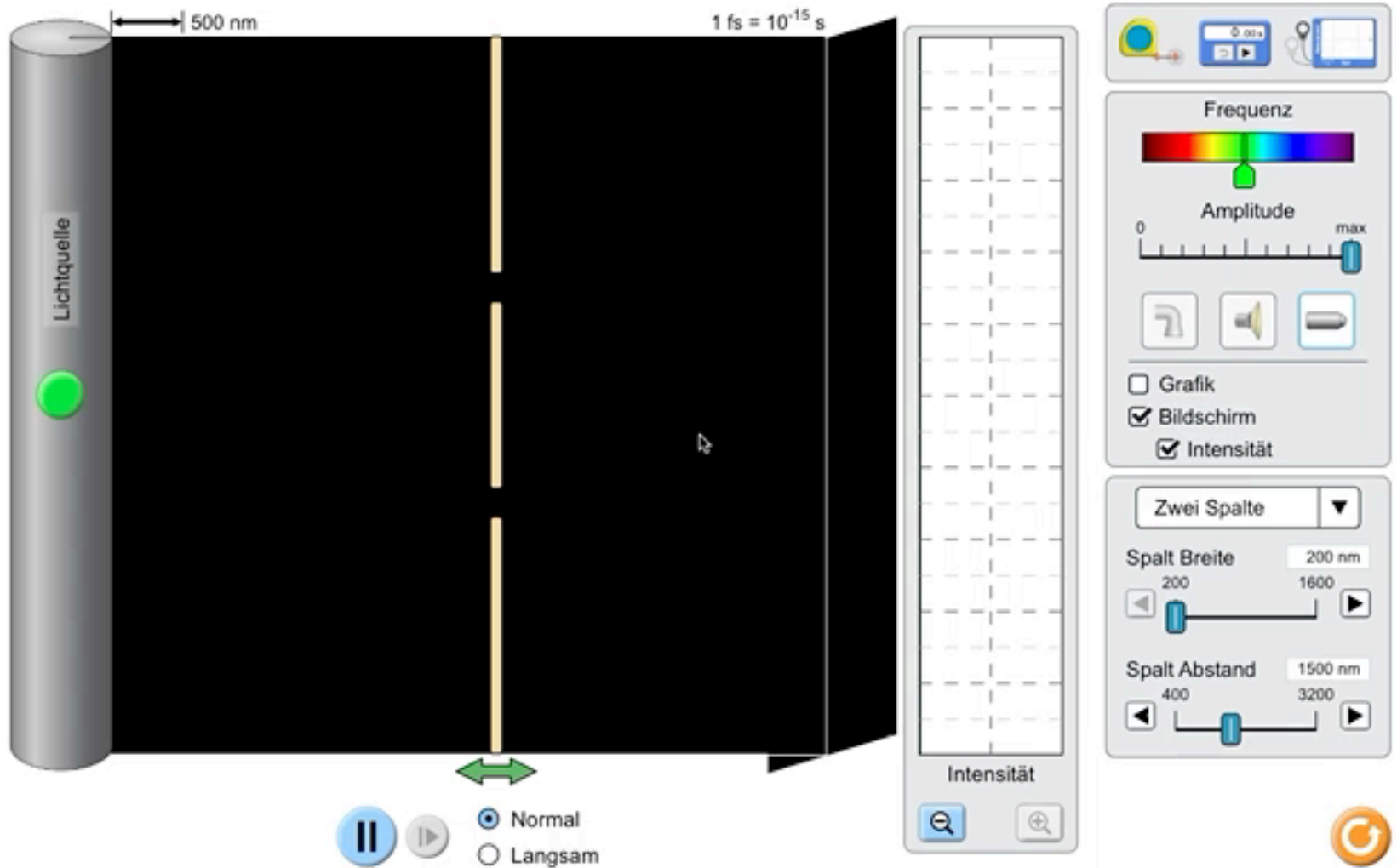
**Gitterkonstante  $g$ :**

Abstand zweier benachbarter Spalte ( $X$  Striche/cm)

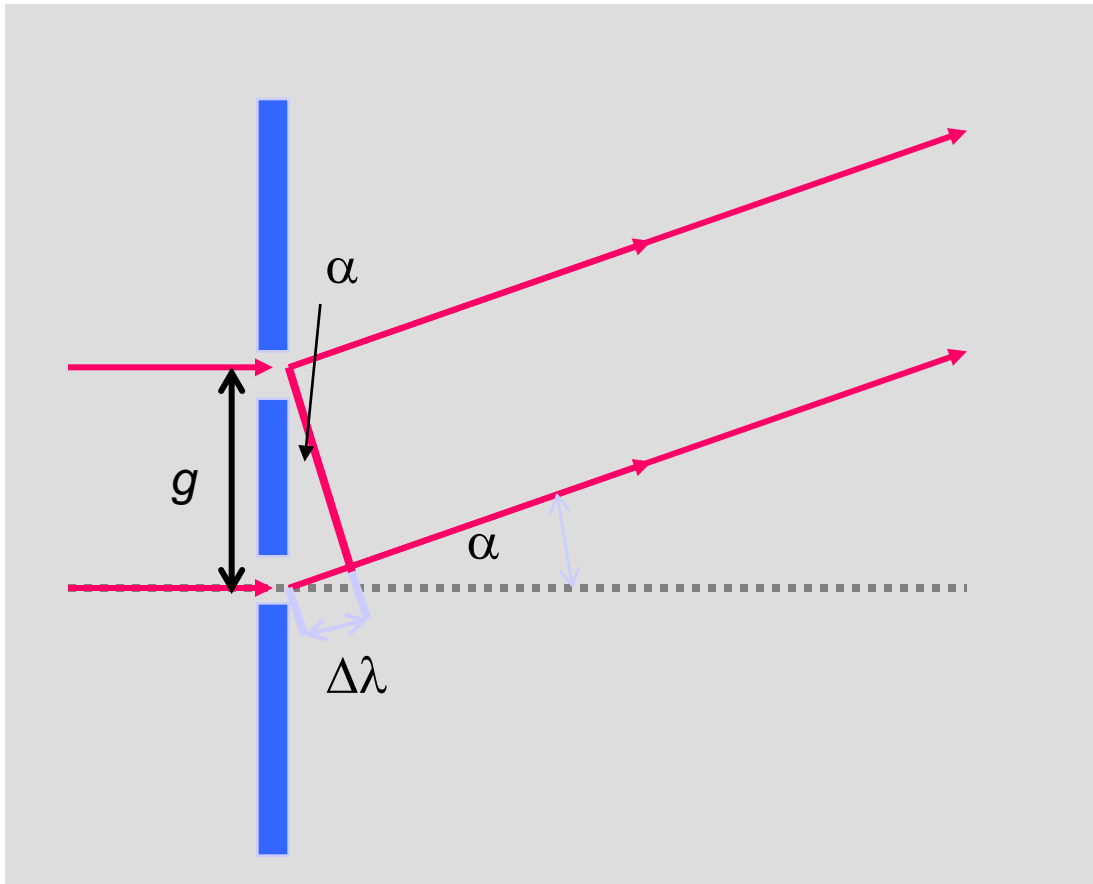
# Interferenz am Doppelspalt



# Interferenz am Doppelspalt



# Interferenz am Doppelspalt



**Gangunterschied  $\Delta\lambda$**   
zweier benachbarter Wellen:

$$\Delta\lambda = g \cdot \sin\alpha$$

**Maxima für:**

$$\Delta\lambda = m \cdot \lambda$$

Ordnung  $m = 0, 1, 2, 3$

**Bedingung für Maxima:**

$$m \cdot \lambda = g \cdot \sin\alpha$$

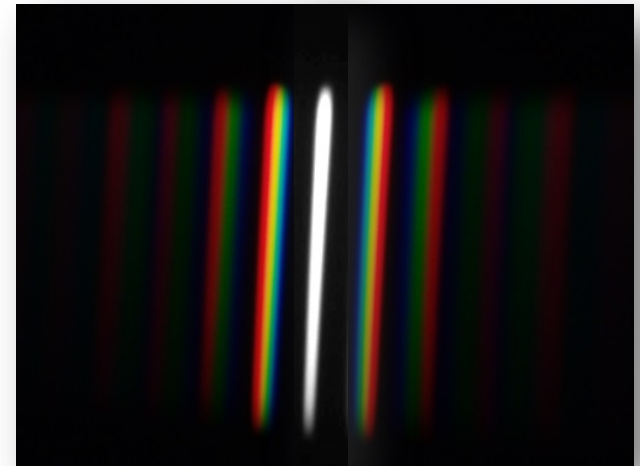
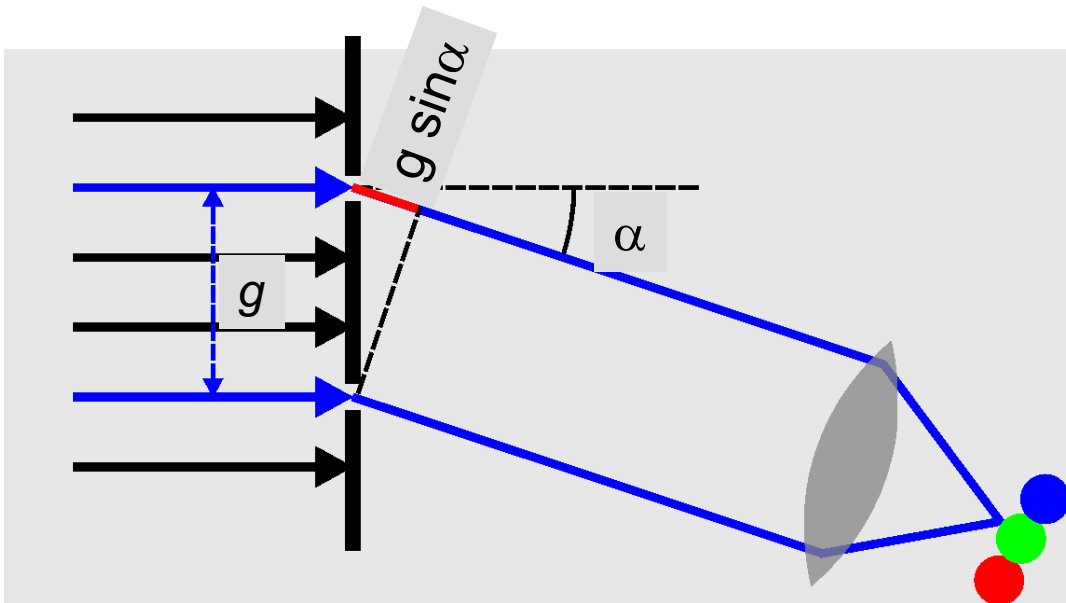
# Interferenz am Gitter

Bedingung für Maxima:

$$m \lambda = g \cdot \sin \alpha$$

D.h. Licht größerer Wellenlänge hat seine Maxima bei einem größeren Winkel als Licht kleinerer Wellenlänge.

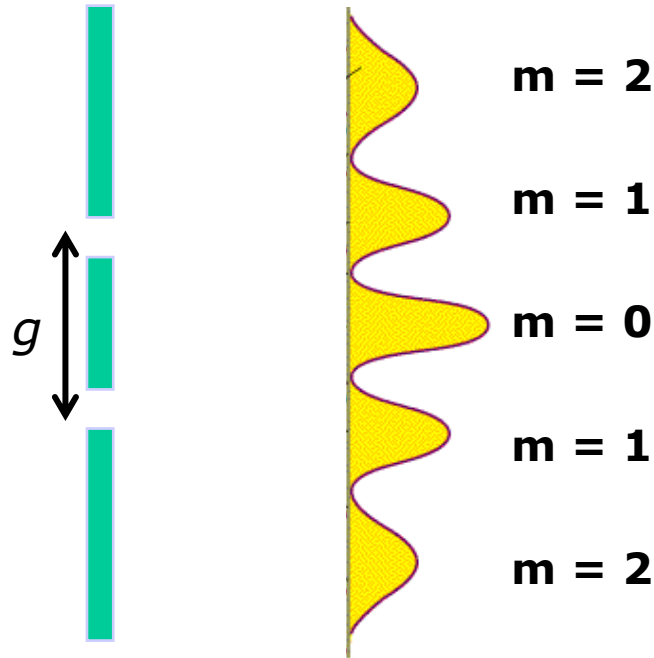
D.h. umgekehrte „Dispersion“ im Vergleich zur Brechung.



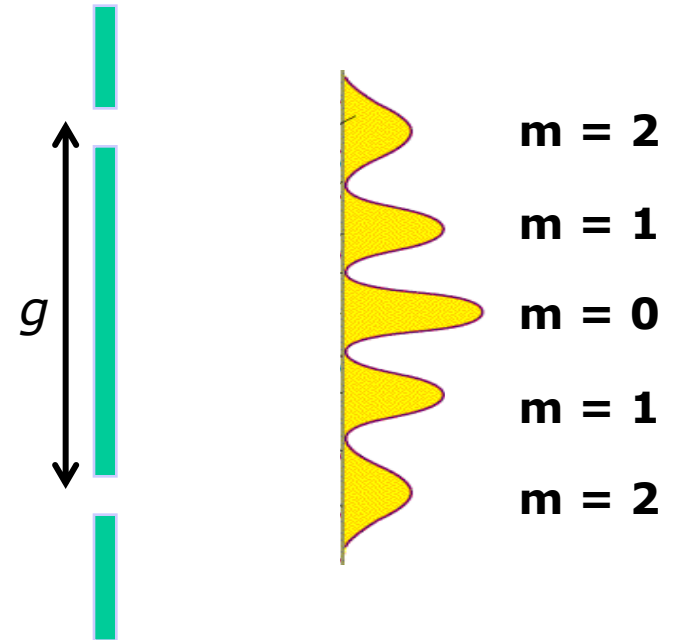
Beugung mit Weißlicht  
am Gitter

# Interferenz am Gitter

Bedingung für Maxima:  $m \lambda = g \cdot \sin \alpha$



**$g$  klein, Ablenkung ( $\sin \alpha$ ) groß**

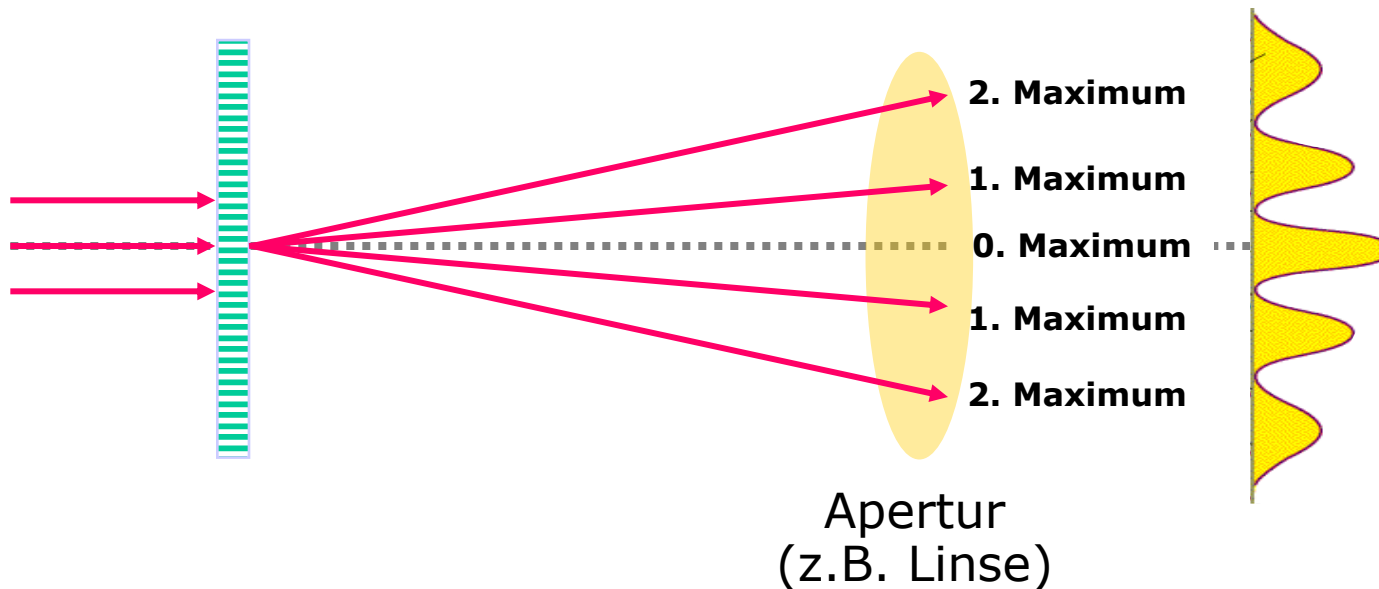


**$g$  groß, Ablenkung ( $\sin \alpha$ ) klein**

# Abbesche Theorie: Numerische Apertur/Auflösung

Bedingung für 1. Maxima (m=1):  $\lambda = g \cdot \sin \alpha$

**Gitter  $g$**

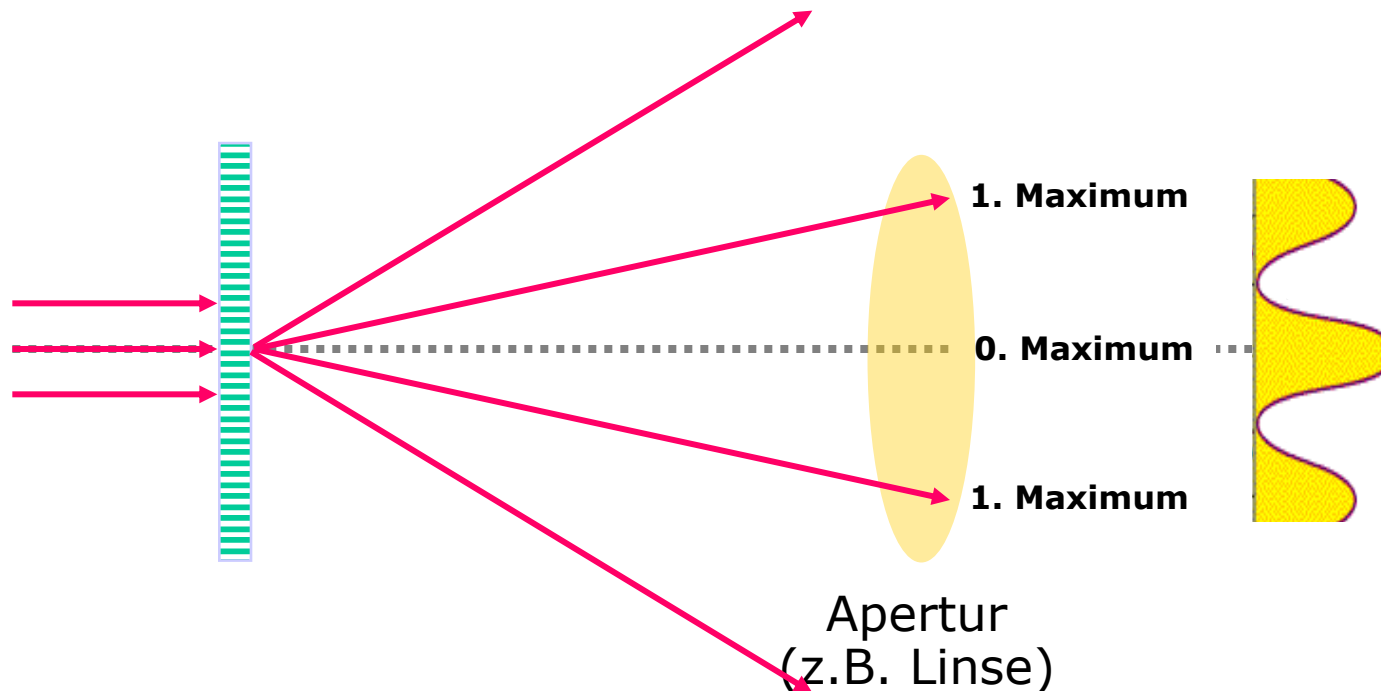


Versuch:  $g = 100\mu\text{m}$

# Abbesche Theorie: Numerische Apertur/Auflösung

Bedingung für 1. Maxima (m=1):  $\lambda = g \cdot \sin \alpha$

Gitter  $g'$  ( $g' < g$ )



Versuch:  $g' = 20,0\mu\text{m}$

# Abbesche Theorie: Numerische Apertur/Auflösung

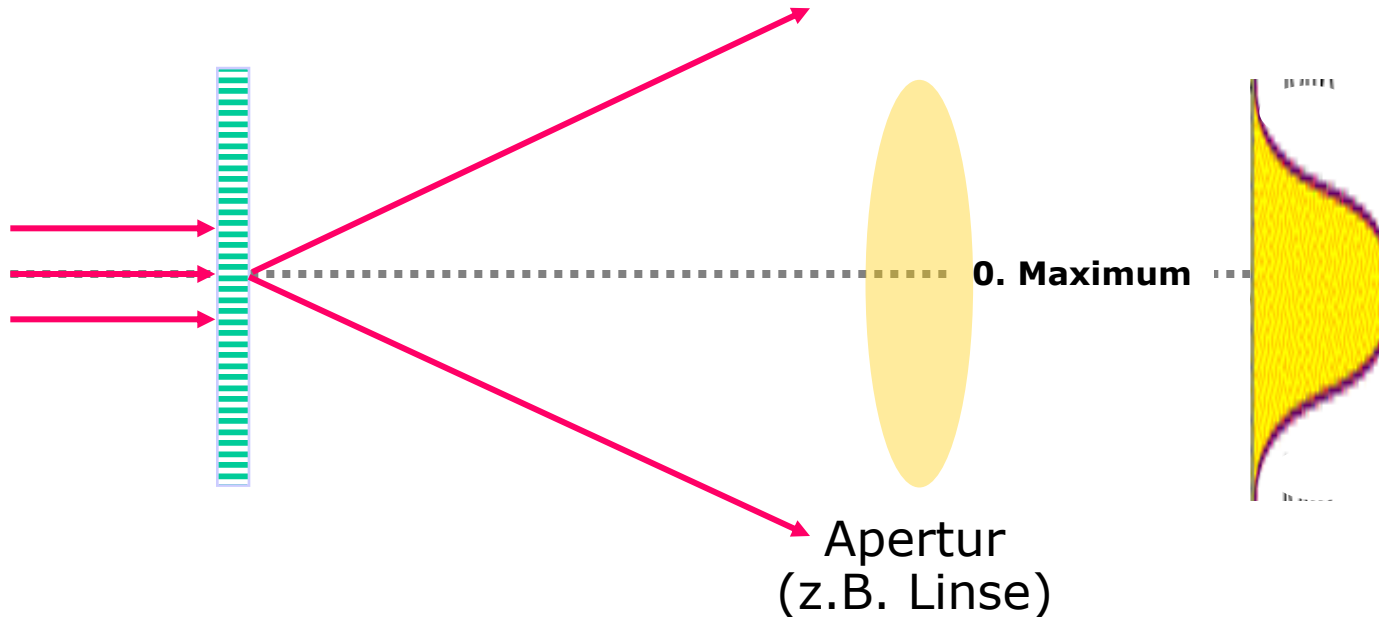
Bedingung für 1. Maxima (m=1):

$$\lambda = g \cdot \sin \alpha$$



$$g_{\min} = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$$

**Gitter  $g''$**  ( $g'' < g'$ )



Versuch:  $g'' = 1,75 \mu\text{m}$

# Numerische Apertur & Auflösungsvermögen

**Minimale Gitterkonstante**, die noch aufgelöst werden kann:

$$g_{\min} = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$$

**Auflösungsvermögen A:**

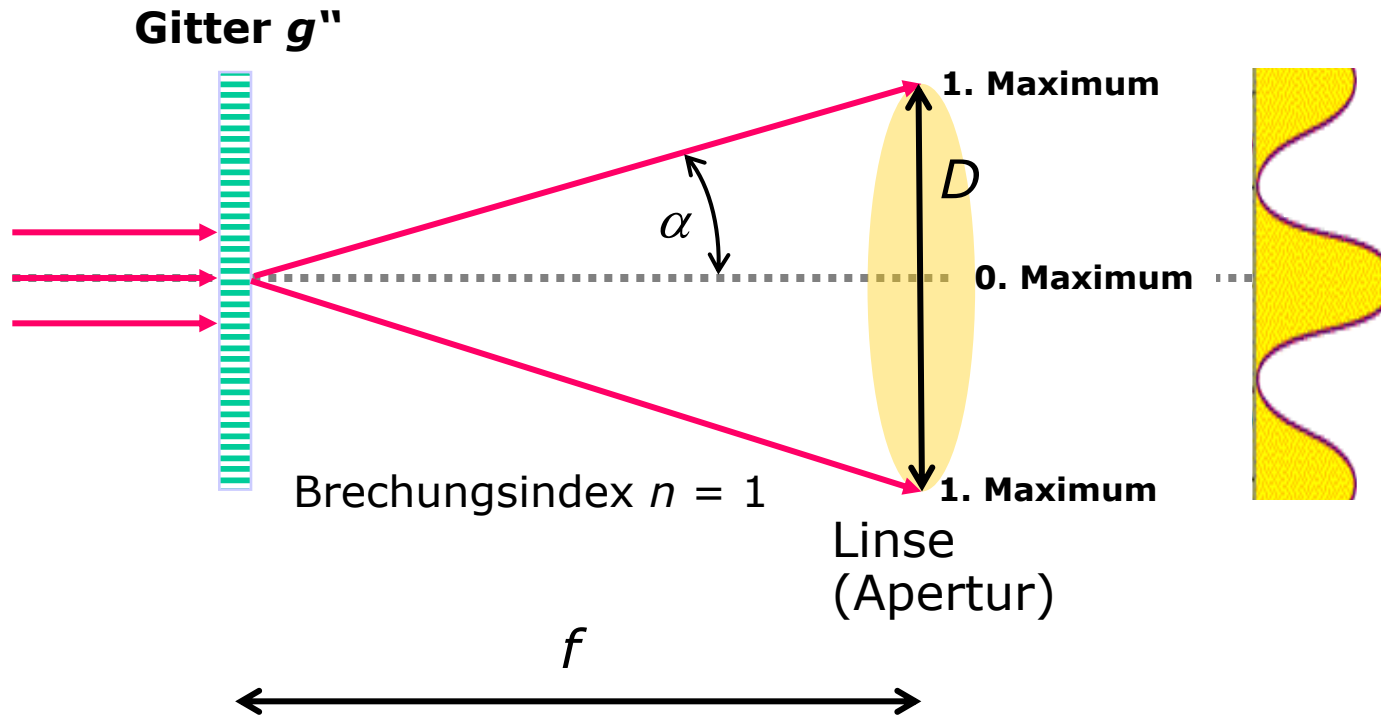
$$A = \frac{1}{g_{\min}} = \frac{\sin \alpha}{\lambda}$$

Ein Mikroskop löst also umso besser auf, je kleiner  $\lambda$   
und je größer  $\alpha$ !

# Numerische Apertur & Auflösungsvermögen

Der **maximal mögliche Winkel**  $\alpha$  ist bei gegebener Brennweite  $f$  durch den Objektivdurchmesser  $D$  gegeben:

$$\alpha = D/2f$$



# Numerische Apertur & Auflösungsvermögen

Eine Verbesserung kann durch Immersionsöl ( $n > 1$ ) zwischen Objekt und Objektiv erzielt werden, **da dadurch die Wellenlänge auf  $\lambda/n$  verringert wird:**

$$A = \frac{1}{g_{\min}} = \frac{n \cdot \sin \alpha}{\lambda} = \frac{NA}{\lambda}$$

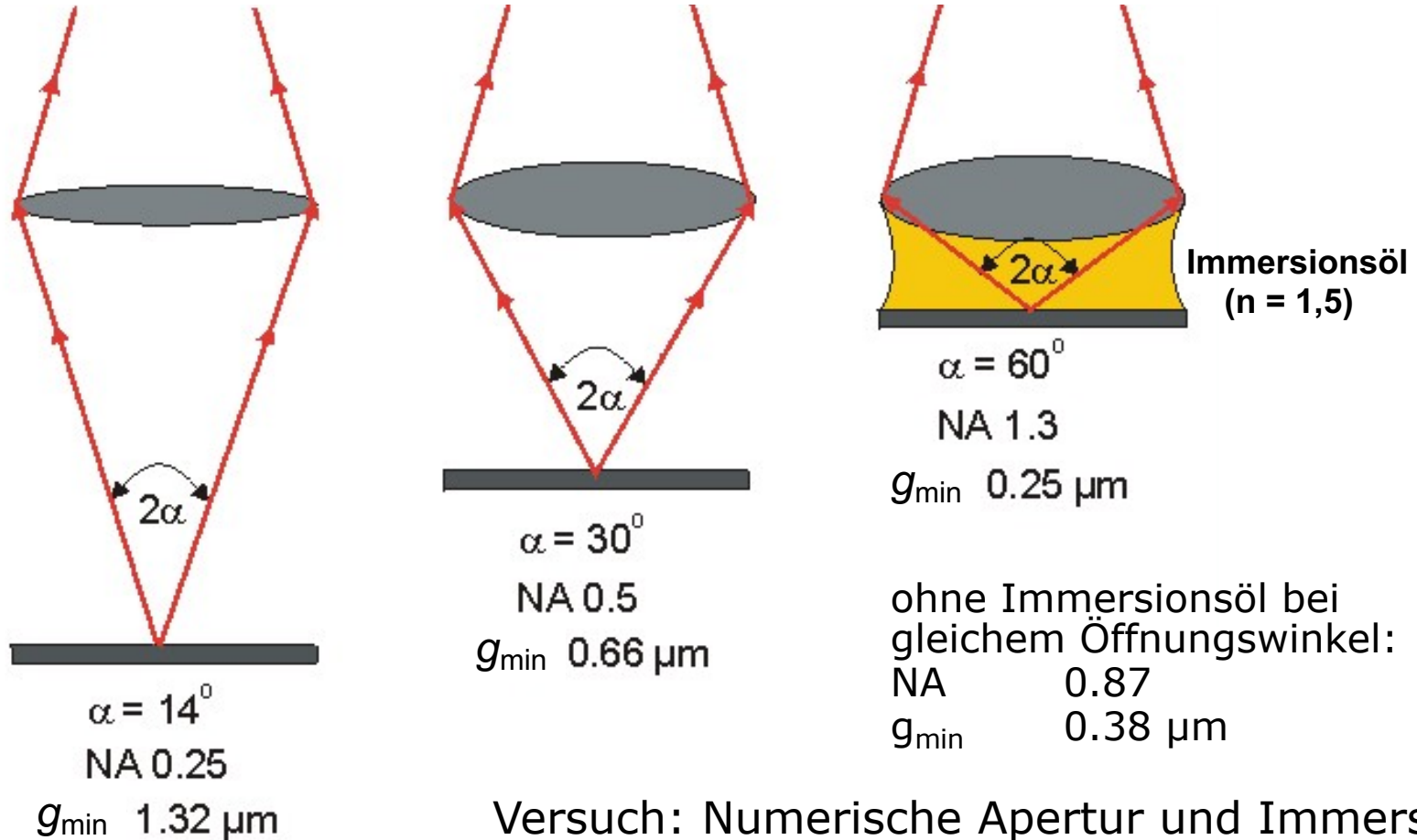
$NA$  = numerische Apertur

## NUMERISCHE APERTUR

- $NA$  ist eine Maß für die Fähigkeit Licht zu sammeln und feine Strukturen aufzulösen.
- $NA = n \cdot \sin \alpha$
- $n$  = Brechungsindex zwischen Objekt und Objektiv
- Bestes rein theoretisch mögliches Auflösungsvermögen für  $\alpha=90^\circ$

# Numerische Apertur & Auflösungsvermögen

Eine Verbesserung kann durch Vergrößerung des Öffnungswinkels  $\alpha$  oder Immersionsöl ( $n > 1$ ) zwischen Objekt und Objektiv erzielt werden, da dadurch die Wellenlänge auf  $\lambda/n$  verringert wird:



Versuch: Numerische Apertur und Immersion

# Auflösungsvermögen

**Wichtige Beziehung:**

$$g_{min} = \lambda / n \sin \alpha$$

$\lambda$  minimieren!

$NA$  maximieren!

**Typischer Zahlenwert:**

$$g_{min} = 0,24 \mu\text{m}$$

# Zusammenfassung Auflösung

Bedingung für 1. Maxima ( $m=1$ ):  $\lambda = g \cdot \sin \alpha$

## Zusammenfassung:

- 1) Detektion des 1. Hauptmaximum muss gewährleistet sein, damit gemäß obiger Gleichung die Gitterkonstante  $g$  berechnet und damit Information über die Struktur des Gitters erhalten werden kann.
- 2) Ist lediglich die Lage des 0. Maximums bekannt, so lässt sich damit allein die Gitterkonstante  $g$  nicht bestimmen, da  $\alpha_0 = 0$  von  $g$  unabhängig ist. Hauptmaximum 0. Ordnung liefert keinen Aufschluss über die Gitterstruktur.
- 3) Wenn  $g < \lambda$ , kommt bei der Beugung des Lichts kein Maximum 1. Ordnung zustande, d.h. Strukturen, die kleiner als  $\lambda$  sind, können nicht getrennt sichtbar gemacht werden.