

Technische Optik 06

1 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

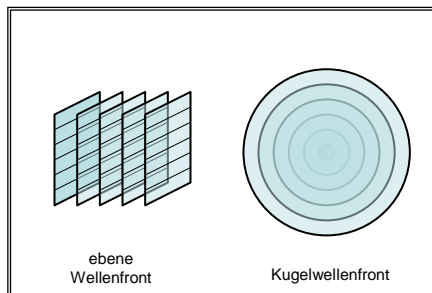
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die Beobachtungen zur Frage der geradlinigen Ausbreitung von Licht lassen sich auf einem Prinzip aufbauen, das auf Christiaan Huygens (1629 – 1695) zurückgeht, dem huygensschen Prinzip:

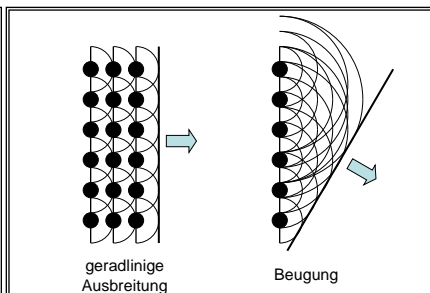
*An der Wellenfront wird jeder Punkt zum Quellpunkt einer Elementarwelle;
die neue Wellenfront entsteht als einhüllende Fläche der unendlich vielen Elementarwellen.*

Die Richtung der Ausbreitung ist dann als senkrecht zur Wellenfront anzusetzen.

Als Spezialfälle werden *ebene Wellenfront* und *Kugelwellenfront* unterschieden.



Quellpunkte und Elementarwellen führen zur neuen Wellenfront.



Technische Optik 06

2 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Unter bestimmten Umständen sind Zweifel an der Geradlinigkeit von Lichtstrahlen berechtigt!
Diese Erkenntnis wurde von zwei jungen Forschern zu Beginn des 19. Jahrhunderts ausgearbeitet.



Technische Optik 06

3 von 27

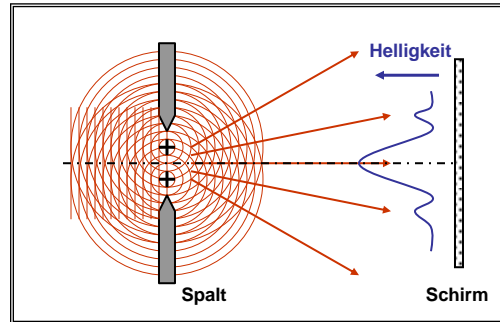
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Betrachten wir von der Seite einen Laserstrahl (monochromatisch und parallel) mit Licht der Wellenlänge λ , der durch einen Spalt auf einen Schirm fällt. Ohne Spalt wird sich die Helligkeit auf dem Schirm nach der Helligkeitsverteilung im einfallenden Strahl richten. Die optische Achse liegt parallel zur Einstrahlrichtung.

Von den unendlich vielen Quellpunkten nehmen wir zwei repräsentative Exemplare; jeder liegt in der Mitte einer Spalthälfte.

Um diese beiden Quellpunkte herum bilden sich kugelförmige Elementarwellen mit derselben Wellenlänge.



Nach rechts zum Schirm hin breitet sich entlang der Kreuzungslinien der sich überschneidenden Kreise Helligkeit aus: „**konstruktive Interferenz**“; dazwischen wird Dunkelheit liegen: „**destruktive Interferenz**“.

Um einen Ausdruck für die Winkel herzuleiten, unter denen konstruktive oder destruktive Interferenz beobachtet wird, sehen wir uns den Bereich um die Spaltmitte noch einmal genau an.

Technische Optik 06

4 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

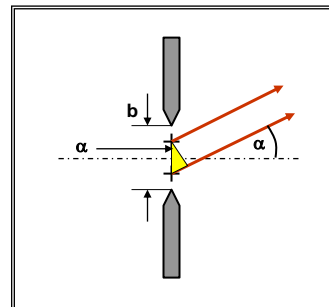
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Damit die von beiden Quellpunkten (Kreuz) ausgehenden Strahlen einen fast unendlich weit entfernten Beobachter erreichen, müssen sie parallel zueinander verlaufen.

Zur Feststellung des Phasenunterschiedes dieser beiden Wellen senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung konstruieren wir ein rechtwinkliges Dreieck (gelb).

Es liegt **konstruktive Interferenz** vor, wenn die in diesem Bild unten liegende Kathete ein ganzzahliges Vielfaches ($m \cdot \lambda$) der Wellenlänge enthält. Daraus können wir für den Winkel α_k berechnen:

$$\sin(\alpha_k) = \frac{2 \cdot m \cdot \lambda}{b} \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots$$



Der Faktor 2 im Zähler rechts vom Gleichheitszeichen tritt auf, weil die Hypotenuse des gelben Dreiecks nur die Länge $b/2$ hat.

Der Parameter m wird als **Beugungsordnung** bezeichnet und nimmt nur ganzzahlige Werte an. Es ist zu erkennen, dass der Winkel α_k für $\lambda = \lambda_0$ und $m = 1$ denselben Wert annimmt wie für $\lambda = \lambda_0/2$ und $m = 2$ oder für $\lambda = \lambda_0/3$ und $m = 3$.

Bei **destruktiver Interferenz** muss die untere Kathete ein halbzahliges Vielfaches einer Wellenlänge haben. Das führt bei den Winkeln α_d zu Minima der Lichtleistung:

$$\sin(\alpha_d) = \frac{(2m-1) \cdot \lambda}{b} \quad m = 1, 2, 3, 4, \dots$$

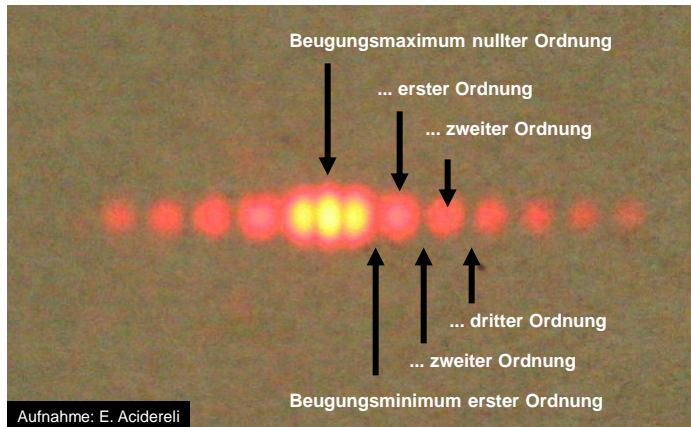
Technische Optik 06

5 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Das Beugungsbild eines vertikal gespannten Drahtes zeigt Beugung nur in horizontaler Richtung; das Beugungsbild ist sehr ähnlich dem eines gleich breiten Spaltes (Babinetsches Prinzip).



Paradoerweise entsteht Helligkeit an der Stelle, wo die optische Achse den Schirm trifft, wo auf geradem Weg eigentlich gar kein Licht hinkommen kann. Dieses nennt man den „*Fresnelschen Fleck*“.

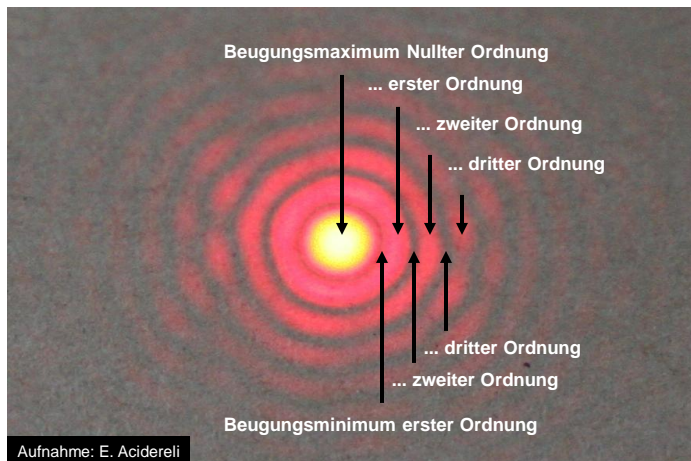
Technische Optik 06

6 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Beim Durchgang eines parallelen Lichtstrahlbündels durch eine kleine, kreisförmige Öffnung wird Helligkeit nicht nur in der Verlängerung des einfallenden Strahls beobachtet, sondern auch in kreisförmigen, hellen Ringen, getrennt durch dunkle Zonen.



Für diese Aufnahme wurde der Strahl eines Helium-Neon-Lasers mittig durch ein kreisförmiges Loch von 0,2 mm Durchmesser geschickt.

Die falsche Farbe im Zentrum dieses Bildes hängt mit der Überbelichtung der Digitalkamera zusammen.

Technische Optik 06

7 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

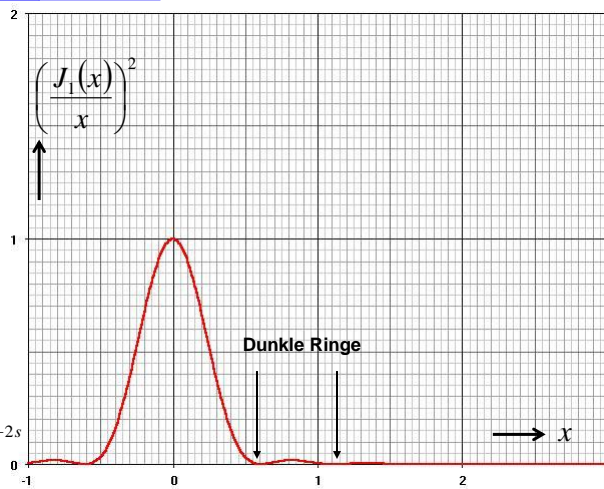
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Eine parallele Lichtwelle geht durch eine kreisförmige Öffnung und beleuchtet einen dahinter aufgestellten Schirm. Die beobachtete Helligkeitsverteilung lässt sich mathematisch modellieren.

Dabei wird $[J_1(x)/x]^2$ gegen x aufgetragen. $J_1(x)$ ist die Besselfunktion zum ganzzahligen Index 1. Der Wert $x = 0$ entspricht der optischen Achse. Die Besselfunktion $J_1(x)$ kann durch eine unendliche, konvergente Reihe dargestellt werden:

$$J_1(x) = \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(-1)^s}{s! \cdot (1+s)!} * \left(\frac{x}{2}\right)^{1+2s}$$

Für kleine Werte von x konvergiert diese alternierende Reihe sehr schnell, und man kann ohne großen Fehler mit $s = 10$ aufhören, anstatt bis Unendlich zu summieren. Helligkeit entsteht in Ringen von bestimmtem Abstand, die von dunklen Ringen getrennt sind.



Technische Optik 06

8 von 27

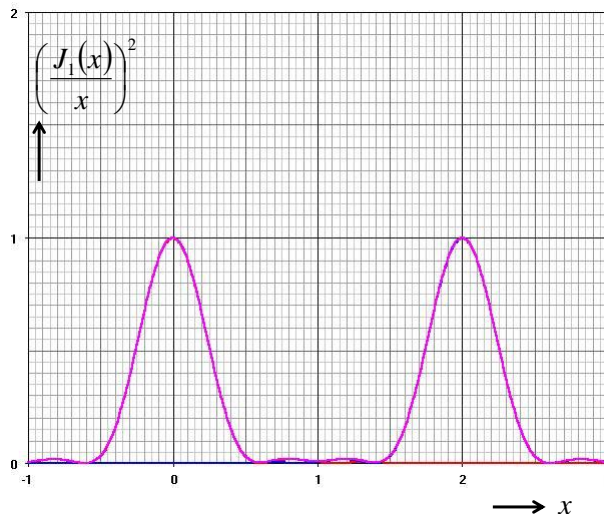
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die entstehende Helligkeitsverteilung bei zwei Löchern wird berechnet, indem man die beiden einzelnen Helligkeiten addiert.

In der Darstellung werden eine rote und eine blaue Kurve zur violetten Summenkurve addiert.

Bei genügend großem Abstand kann man im Ergebnis zwei helle Punkte gut erkennen.



Technische Optik 06

9 von 27

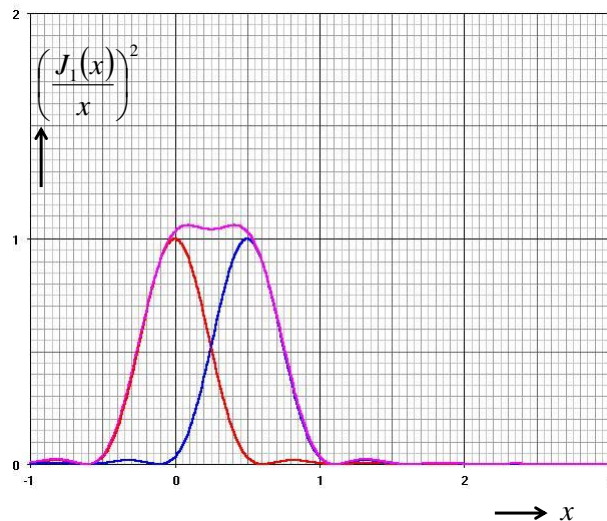
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bei zu kleinem Abstand verschmelzen beide Punkte zu einem einzigen Helligkeitsmaximum.

Das Auflösungsvermögen reicht nicht aus, um ein getreues Bild zu erzielen, in dem man die beiden Punkte trennen kann.

Es sieht so aus, als wäre nur ein Punkt vorhanden.



Technische Optik 06

10 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

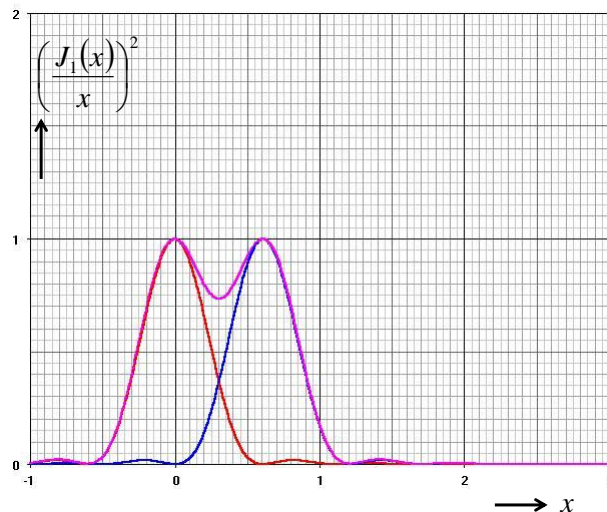
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Die **Grenze der Auflösung** ist für zwei gleich helle Punkte erreicht, wenn das Maximum des einen Punktes in der ersten Dunkelzone des anderen liegt; dann liegt zwischen den beiden hellen Punkten ein dunklerer Bereich von ca. 74 % der Maximalhelligkeit.

Dies ist die Rayleighsche Beugungsbegrenzung. Sie ist festgelegt als:

$$d = \frac{0,61 \cdot \lambda}{NA}$$

NA ist die numerische Apertur (s. „Linsen“), die auch schon bei optischen Fasern auftrat.



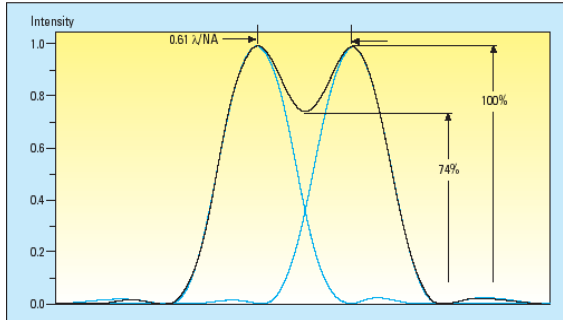
Technische Optik 06

11 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Zwei gleich helle Objekte können gerade noch aufgelöst werden, wenn der Bildabstand gleich dem Abstand vom Beugungsmaximum nullter Ordnung zum Beugungsminimum erster Ordnung ist („beugungsbegrenzte Auflösung“).



"This rule is convenient on account of its simplicity, and it is sufficiently accurate in view of the necessary uncertainty as to what exactly is meant by resolution."



Bildquelle: www.nobelprize.org

Lord Rayleigh (1842 – 1919),
Physik-Nobelpreis für 1904
"for his investigations of the densities of the most important gases and for his discovery of argon in connection with these studies".

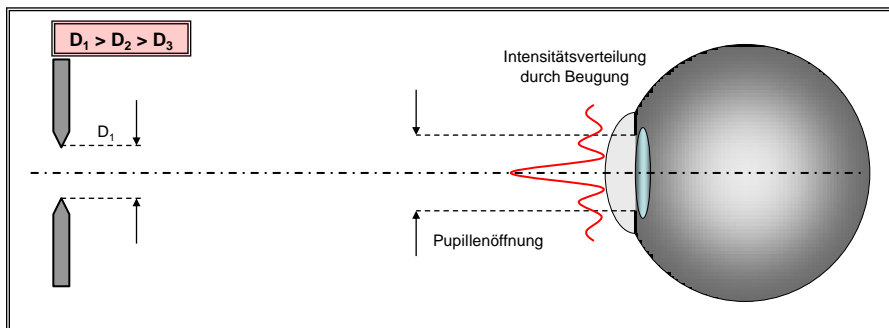
Technische Optik 06

12 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Zur detailgetreuen Rekonstruktion eines Bildes muss vom optischem System (hier ein Auge) möglichst viel von dem Beugungsmuster in den Bildbereich übertragen werden. Für ein großes beugendes Objekt D_1 ist die Intensitätsverteilung durch Beugung auf kleine Ausdehnung begrenzt.



Solange das Beugungsmaximum nullter Ordnung durch die Pupille vollständig hindurchgeht (bis zu den Minima erster Ordnung oder darüber hinaus), wird die Größe des Bildes proportional zur Größe D_1 des Objekts (= Spaltbreite) sein können: Die Größenverhältnisse im Objekt sind gleich den Verhältnissen im Bild. Dann ist das Bild maßstabsgetreu.

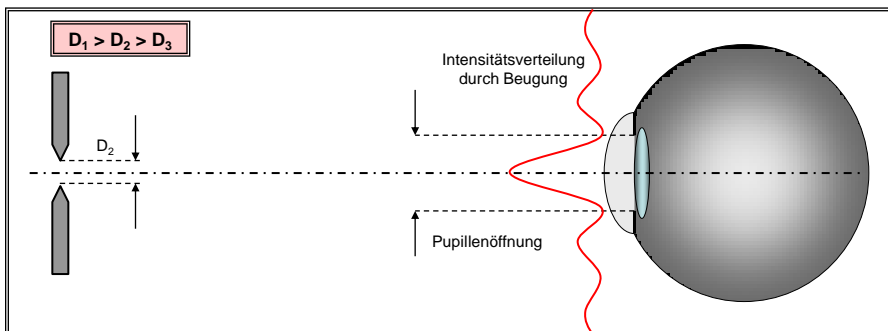
Technische Optik 06

13 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bei engerem Spalt $D_2 < D_1$ liegen die Beugungsminima erster Ordnung weiter außen. Die vom optischen System übertragene Helligkeit besteht im gezeigten Beispiel nur aus dem Beugungsmaximum nullter Ordnung; sie wird am Rand durch die Pupille abgeschnitten.



Wenn die Pupille mit den beiden Beugungsminima erster Ordnung zusammen fällt, kann durch das optische System für die Bilderzeugung nur diese durch die Pupille eintretende Lichtmenge genutzt werden. Wenn das optische System gut genug ist („beugungsbegrenzte Qualität“), dann entsteht so das für dieses abbildende System kleinstmögliche Bild mit richtigem Maßstab.

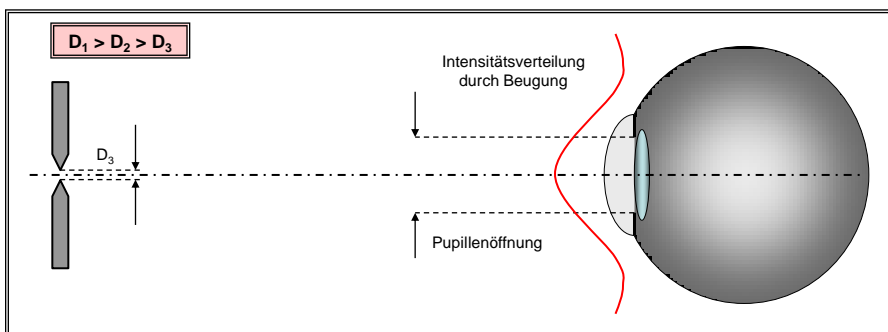
Technische Optik 06

14 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bei noch engerem Spalt $D_3 < D_2$ liegen die Beugungsminima erster Ordnung noch weiter außen. Die vom optischen System übertragene Helligkeit besteht nur aus einem Teil des Beugungsmaximums nullter Ordnung; sie wird am Rand durch die Pupille abgeschnitten.



Das vom optischen System rekonstruierte Bild kann nicht „wissen“, ob die Intensität durch die Pupille oder durch das Beugungsminimum erster Ordnung am Rand begrenzt ist. Das Bild kann nicht kleiner werden, und für alle kleineren Spalte $D_3 < D_2$ bleibt das Bild gleich groß.

Die Größenverhältnisse im Bild sind verschieden von den Größenverhältnissen im Objekt.

Technische Optik 06

15 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wenn man mit einem Fernrohr einen Doppelstern beobachtet, sieht man eventuell nur einen kreisförmigen Fleck. Durch Vergrößerung des für die Abbildung benutzten Strahlquerschnitts wird dieselbe Lichtleistung auf kleinere Flecken gebündelt, und in einigen Fällen stellt sich heraus, dass es zwei Lichtquellen sind.

Dafür verantwortlich ist die Beugung.-



Zunehmende Größe des für die Abbildung verwendeten Strahlbündels.
(Bildquelle: Astrophysik I, Arnold Hanslmeier, Uni Graz, 27. Februar 2005, S. 4)

Technische Optik 06

16 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Besonders deutlich wird dies bei Bildern astronomischer Objekte. Die Abbildung zeigt den Kugelsternhaufen M13 (Sternbild Herkules). Er ist ungefähr 23 000 Lichtjahre entfernt.

Die ca. 100 000 Sterne stehen nicht so eng beieinander, wie es aussieht.

Ihre Durchmesser sind im Verhältnis zu ihren Abständen zu groß wiedergegeben. Das liegt an der begrenzten optischen Auflösung. Eine Vergrößerung der Pixelanzahl bringt gar nichts.



Copyright 2002 Michael Richmann

Technische Optik 06

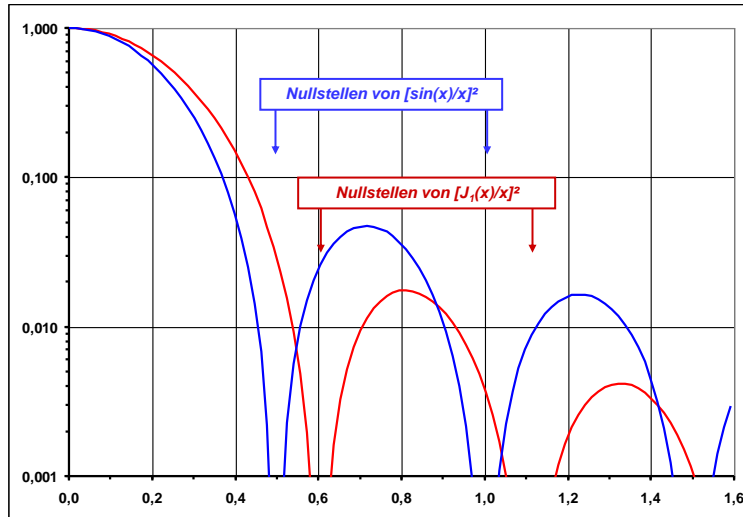
17 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Welchen Fehler begehen wir, wenn wir für eine kreisförmige Öffnung statt der Bessel-Funktion $[J_1(x)/x]^2$ einfach Fraunhofersche Beugung ansetzen $[\sin(x)/x]^2$?

Der Unterschied ist klein: Rot ist der Verlauf mit der Bessel-Funktion $J_1(x)$, blau mit der Sinus-Funktion gezeigt. Daher ist für eine grobe Abschätzung die trigonometrische Funktion ausreichend.



Technische Optik 06

18 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

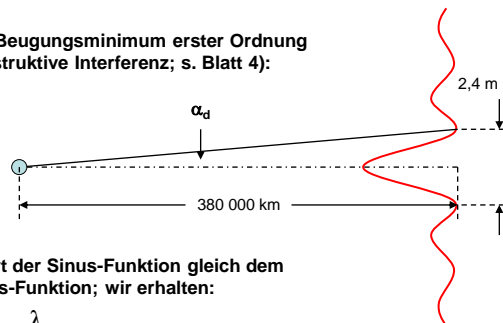
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Beispiel:

Das Hubble-Space-Teleskop HST hat einen Hauptspiegel-Durchmesser von 2,4 m. Wie groß ist der kleinste Brocken, der auf der Mondoberfläche (380 000 km entfernt) aufgelöst werden kann, wenn die Lichtwellenlänge $\lambda = 550$ nm verwendet wird und Beugungsbegrenzung vorliegt?

Wir berechnen den Winkel, unter dem das Beugungsminimum erster Ordnung gegen die optische Achse zu sehen ist (destruktive Interferenz; s. Blatt 4):

$$\sin(\alpha_d) = \frac{(2 \cdot 1 - 1) \cdot \lambda}{b}$$



Für kleine Winkel im Bogenmaß ist der Wert der Sinus-Funktion gleich dem Argument und gleich dem Wert der Tangens-Funktion; wir erhalten:

$$b \approx \frac{\lambda}{\alpha_d} = \frac{\lambda}{1,2m / 380000km} = \frac{\lambda}{3 \cdot 10^{-9}} \approx 200m$$

Dies ist die ungefähre Größe der kleinsten „Brocken“, die auf der Mondoberfläche zu sehen sind, wenn das HST beugungsbegrenzt abbilden kann (das kann es!). Um die Landefähre „Eagle“ (Apollo 11 von 1969) sehen zu können (ca. 5 m), müsste der Spiegel wesentlich größer sein.

Technische Optik 06

19 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Beispiel:

Schätzen Sie mit Hilfe der Beugung am Spalt das Auflösungsvermögen des HST (Hubble space telescope) ab. Der Hauptspiegel hat einen Durchmesser von 2,4 m und benutzt sichtbares Licht von 500 nm Wellenlänge. Welche Objektgröße ist dann auf der Erdoberfläche 570 km tiefer noch zu erkennen? Dazu muss das Beugungsminimum erster Ordnung noch auf den Spiegel treffen.

Wenn paralleles Licht auf ein kleines Objekt fällt, wird unter einem Winkel α_d destruktive Interferenz geschehen:

$$\sin(\alpha_d) = \frac{(2m-1) \cdot \lambda}{b}$$

Damit das Beugungsminimum erster Ordnung noch auf den Spiegel fällt, muss gegen die optische Achse folgender Winkel auftreten:

$$\alpha_d = \frac{1,2m}{5,7 \cdot 10^5 m} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$$

Dann stellen wir um und erhalten:

$$b = \frac{0,5 \cdot 10^{-6} m}{2,1 \cdot 10^{-6} \text{ rad}} = 0,24 m$$

Objekte kleiner als 0,24 m werden ein gleich großes Beugungsscheibchen in der Bildebene erzielen; dann ist die Abbildung nicht mehr maßstabsgetreu.

Hinweis: Bei sehr kleinen Winkeln in rad haben Winkel, Sinus und Tangens denselben Wert.

Technische Optik 06

20 von 27

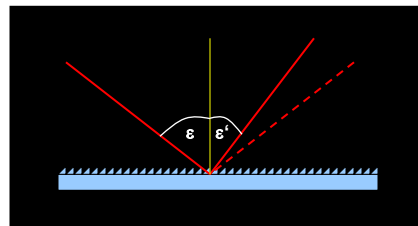
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Bisher haben wir Beugung an einzelnen Objekten betrachtet. Beugung an vielen Strukturen (Gitterlinien) führt dazu, dass die Richtung, in der konstruktive Interferenz auftritt, viel schärfer definiert wird als für Beugung an einer einzelnen Struktur. Diese Eigenschaft ist dann sehr nützlich zur Trennung dicht nebeneinander liegender Wellenlängen.

Gezeigt ist eine unter dem Winkel ε einfallende Welle. Unter dem Winkel ε' wird das m-te Beugungsmaximum ($m = 0, 1, 2, \dots$) auftreten, wenn dieser Winkel der Gitter-Gleichung (g = Gitterkonstante, d. h. der Abstand der Gitterlinien) gehorcht:

$$\sin(\varepsilon') = \sin(\varepsilon) + \frac{m \cdot \lambda}{g}$$



Das Bild zeigt die von links oben unter dem Winkel ε auf ein Gitter einfallende Welle, gestrichelt die für $m = 0$ (Nullte Beugungsordnung) reflektierte Welle und eine unter dem Winkel ε' in m-ter Beugungsordnung auftretende Welle. Wenn ein paralleles Bündel unter dem Winkel ε einfällt, wird ein paralleles Bündel nach ε' gebeugt.

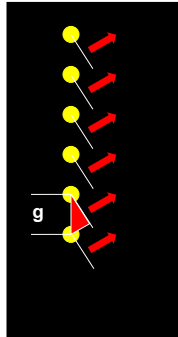
Technische Optik 06

21 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Zum Verständnis der Verhältnisse betrachten wir viele Quellpunkte im gleichen Abstand g auf einer geraden Linie. So etwas entsteht bei Bestrahlung eines ebenen Gitters mit Furchen im Abstand g und mit dem Einfallswinkel $\varepsilon = 0^\circ$.



Dann beobachten wir konstruktive Interferenz in der Richtung ε' :

$$\sin(\varepsilon') = \frac{m \cdot \lambda}{g}$$

Hier steht m für die Beugungsordnung ($m = 0, +1, +2, \dots$).

Die Schärfe der Maxima lässt sich durch eine relative Wellenlängen- Ungenauigkeit $\Delta\lambda / \lambda$ ausdrücken:

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} \approx N$$

Dabei ist N die Anzahl der beleuchteten Gitterlinien. Eine große Zahl der Gitterlinien ist daher vorteilhaft, wenn dicht nebeneinander liegende Wellenlängen getrennt werden sollen.

Wichtig: Bei einem Beugungsgitter tritt in der Gleichung zur Berechnung des Winkels für die konstruktive Interferenz anders als bei der Beugung am Spalt kein Faktor 2 auf!

Technische Optik 06

22 von 27

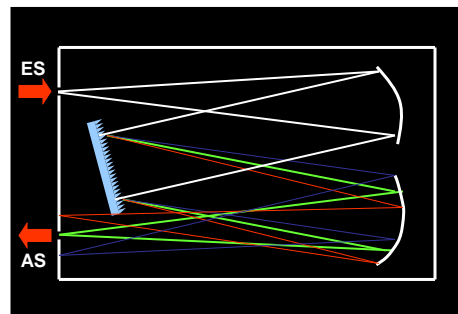
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Es werden Reflexionsgitter-Monochromatoren mit ebenen Gittersubstraten und mit gekrümmten Substraten eingesetzt. Ein oft verwendeter Typ (Konfiguration: Czerny-Turner) ist in folgender Abbildung skizziert.

In einem innen geschwärzten Gehäuse mit einem Eintritts- und einem Austrittsspalt (ES, AS) sind zwei sphärische Hohlspiegel (Brennweite = Abstand zu den Spalten) aufgestellt, die das Licht aus dem ES parallelisieren und nach Reflexion vom Gitter auf den AS abbilden.

Wenn das Gitter um eine Achse in der Vorderfläche gedreht wird, gelangt eine andere Wellenlänge durch den Austritts-Spalt.



Damit sich die Wellenlänge mit einem Antrieb linear ändert, muss wegen der Gleichung auf der vorangehenden Seite der Winkel des Gitters über einen Sinusantrieb eingestellt werden.

Technische Optik 06

23 von 27

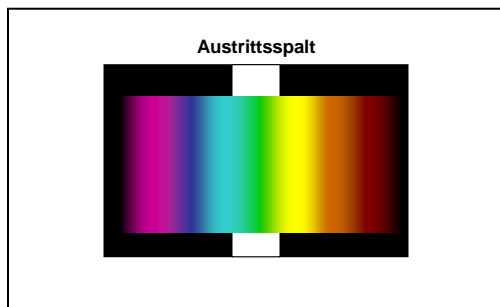
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Welche Rolle spielen die Breiten von Ein- und Austrittsspalt in einem Gitter-Monochromator?
Experiment: Wir lassen Licht mit einem kontinuierlichen Spektrum durch den Eintrittsspalt fallen.

Das Licht einer Glühlampe wird auf den Eintrittsspalt eines Czerny-Turner-Monochromators gegeben. Der Eintrittsspalt wird auf den Austrittsspalt mit zwei Hohlspiegeln im Maßstab 1 : 1 abgebildet. Zwischen beiden ist das ebene Beugungsgitter angebracht.

Für jede Wellenlänge entsteht dadurch das Bild neben dem Bild einer benachbarten Wellenlänge.



Wenn die Abbildung durch die beiden Hohlspiegel im Monochromator perfekt ist, wird eine Wellenlänge auf die Breite des Austrittsspalts gebracht. Das Bild einer benachbarten Wellenlänge ist geringfügig verschoben. Der rechte oder linke Rand wird dann abgeblendet. Eine Verschiebung, die größer ist als die Spaltbreite, wird vom Austrittsspalt nicht mehr durchgelassen.

Technische Optik 06

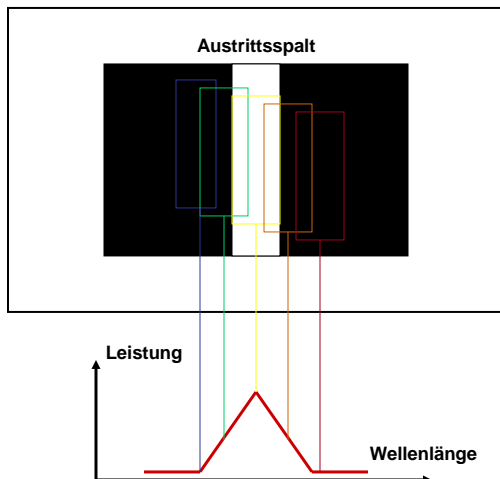
24 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Wir wollen abschätzen, welche Wellenlängen mit welcher Leistung aus dem Austrittsspalt herauskommen.

Für die durch Drehung des Beugungsgitters eingestellte Wellenlänge gelangt das Rechteck durch den Austrittsspalt nach draußen. Das Bild kürzerer oder längerer Wellenlängen wird linear nach links oder rechts verschoben sein. Solange seine Breite kleiner ist als die Verschiebung, gelangt noch etwas von dieser eigentlich gar nicht eingestellten Wellenlänge nach draußen.



Die Leistung als Funktion der Wellenlänge sollte in diesem idealen Fall die Form eines Dreiecks haben.

Technische Optik 06

25 von 27

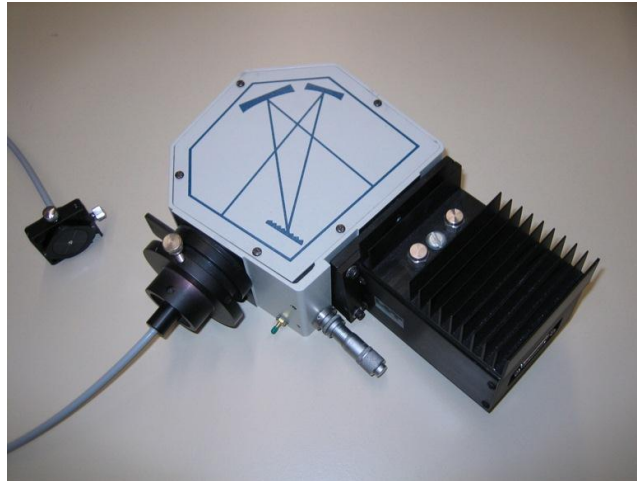
Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Um das aus dem Austrittsspalt austretende Licht zu analysieren, muss man ein Beugungsgitterspektrometer mit höherem Auflösungsvermögen verwenden.

Es wurde ein System eingesetzt, bei dem **kein Austrittsspalt** benutzt wird, sondern durch eine Diodenzeile alle nebeneinander liegenden Bilder des Eintrittsspalt es gleichzeitig erfasst werden (System „Instaspec“ von Oriel). Das Licht gelangt durch ein Glasfaserbündel in das Gerät.

Das Beugungsgitter kann mit einer Mikrometerschraube auf einen bestimmten Wellenlängen-Bereich eingestellt werden.



Technische Optik 06

26 von 27

Prof. Dr. Ulrich Sowada
Institut für Mechatronik
Fachhochschule Kiel

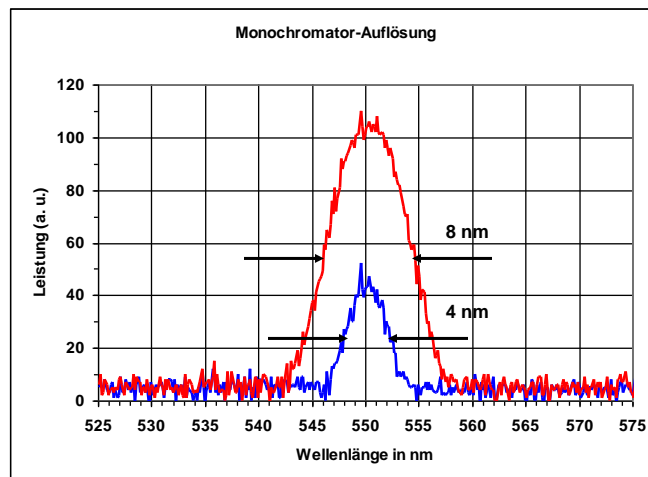
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Das Ergebnis dieser Messung ist in folgender Grafik gezeigt (rot: 1 mm Spalte, blau: 0,5 mm Spalte).

Der Monochromator war auf 550 nm eingestellt. Die Breite des Wellenlängenbereichs beträgt für 0,5 mm Spalte 4 nm, für 1 mm Spalte 8 nm.

Die doppelte Spaltgröße führt zu doppelter Amplitude, wegen der doppelten spektralen Breite also zu vierfacher Leistung.

Für einen Czerny-Turner Monochromator mit 10 cm Brennweite der beiden Hohlspiegel lässt die Theorie einen Wert von 8 nm / (1 mm) erwarten.



Technische Optik 06

27 von 27

 Prof. Dr. Ulrich Sowada
 Institut für Mechatronik
 Fachhochschule Kiel


1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
2.1 Dispersion	2.2 Interferenz	2.3 Beugung	2.4 Polarisation	

Beispiel:

Die Beugung spielt auch eine große Rolle in der Lasertechnik. Wie groß ist die Parallelität der Teilstrahlen im beugungsbegrenzten Fall? Gehen Sie von einem Argon-Ionen-Laser aus (Wellenlänge $\lambda = 488 \text{ nm}$, Strahldurchmesser $w = 0,75 \text{ mm}$). Als Divergenz δ bezeichnen wir den Winkel, der die Beugungsminima erster Ordnung einschließt.

Nehmen wir das Modell der Beugung am Spalt. Für eine kreisförmige Öffnung ist es zwar ungenau, aber die Größe der Winkel ist einfach abzuschätzen; dann können wir als Quellpunkte einen in der Mitte der oberen und einen zweiten in der Mitte der unteren Spalthälfte wählen. Der Winkel α_d , unter dem das Minimum erster Ordnung erscheint, erfüllt dann die Gleichung:

$$\sin(\alpha_d) = \frac{\lambda}{b} = \frac{0,488 \cdot 10^{-6} \text{ m}}{0,75 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 0,651 \cdot 10^{-3}$$

Der Winkel zwischen den beiden Minima beträgt dann $\delta = 1,3 \text{ mrad}$. Er lässt sich dadurch verkleinern, dass man den Strahldurchmesser optisch vergrößert.

Daher spielen optische Komponenten, mit denen man den Strahl unter Beibehaltung der Strahlparallelität optisch aufweitet, in der Lasertechnik eine wichtige Rolle. Sie sind ähnlich aufgebaut wie die ältesten zweilinsigen Systeme (Lipperhey, Galilei).