

## Wissenschaft in die Schulen – Zusatzinformationen für Lehrer

### Thema: Auflösungsvermögen und Interferometer – wie man Himmelsbeobachtungen immer mehr Details entlocken kann

Autor: Dr. Oliver Schwarz, Universität Koblenz-Landau

Befragt man Lehramtsstudenten in den ersten Semestern, wodurch bestimmt wird, ob man bei weit entfernten Gegenständen noch Details auflösen kann, so antworten viele von ihnen, dies hänge einfach davon ab, ob man „gute“ oder „schlechte“ Augen habe. Wie diese durch die Alltagserfahrung geprägte Antwort ziemlich eindeutig demonstriert, sind diese Studenten während ihrer Schulzeit kaum oder nur unzureichend darüber informiert worden, dass es neben den strahlenoptischen Ursachen für unscharfe Abbildungen auch wellentheoretische Gründe gibt, die das Auflösungsvermögen von optischen Geräten (und eben auch des Auges) begrenzen. Schade, denn eines der ganz großen Hauptthemen, die sich wie ein roter Faden durch die Physik des Großen (Astrophysik) und des ganz Kleinen (Mikrophysik) ziehen, ist eben die Frage nach den Grenzen des Auflösungsvermögens. In der Astronomie kann diese Frage für die Himmelsbeobachtung mithilfe der klassischen Wellenoptik geklärt werden. Schüler höherer Klassenstufen, die im Unterricht die Wellenoptik behandeln, wird man an das Thema zweckmäßig heranzuführen, indem man es ihnen als interessante Anwendung der Wellenlehre präsentiert. Schüler niedrigerer Klassenstufen kann man zumindest anhand einiger einfacher Experimente demonstrieren, dass sowohl das menschliche Auge als auch optische Geräte nicht beliebig kleine Details zeigen können. Mit der Erläuterung dieser einfachen Experimente beginnt die folgende Darstellung.

### Das Auflösungsvermögen der Augen und von optischen Geräten sowie das Problem der Blendenöffnung

Damit das menschliche Auge zwei Gegenstände gerade noch getrennt wahrnehmen kann, müssen sie mindestens einen Winkelabstand von  $1'$  aufweisen. Die Existenz einer unteren Sichtbarkeitsgrenze für die menschliche Wahrnehmung kann man in einem einfachen Experiment demonstrieren.

**Experiment 1:** Zwei gleich helle (aber nicht zu stark leuchtende, damit keine zusätzlichen Helligkeitseffekte auftreten,  $P = 1 \text{ W!}$ ) Glühlampen werden 5 cm versetzt auf einer Leiste angebracht, die man beispielsweise im Fenster des Klassenraumes aufstellen kann. Bei Dunkelheit (etwa eine frühe Schulstunde in den Wintermonaten auf dem Schulhof) sollen sich die Schüler immer weiter von der Doppellichtquelle entfernen und dort stehen bleiben, wo sie beide Lampen nicht mehr getrennt wahrnehmen. Wesentlich weiter als bis zu einer Distanz von etwa 150 m – 180 m werden sich die Schüler nicht wegbewegen können.

Womöglich ist die Fähigkeit der getrennten Abbildung von Gegenständen lediglich ein Problem der menschlichen Wahrnehmung, das bei technischen Geräten nicht auftritt? Um diese Frage zu klären, wird nun ein Versuch an dem einfachsten denkbaren optischen Instrument, der Lochkamera, bzw. der Spaltblende, durchgeführt.

**Experiment 2:** Für den Versuch benötigt man eine regulierbare Blende, die es gestattet, Öffnungen bis hin zu Bruchteilen von 1 mm einzustellen. Schulübliche Irisblenden schaffen dies nicht. Um den Kauf einer Präzisionskreisblende zu umgehen, sollte man entweder sehr feine Löcher mit Stecknadeln in Pappe stanzen oder aber besser eine regulierbare Spaltblende mit Metallschlitz nutzen. Der Wechsel von der Kreis- zur Spaltgeometrie wirft jedenfalls keine großen Verständnisprobleme auf.

**Geräte:** Zwei Laser (im Zeitalter der Laserpointer auch für Schulen kein Problem mehr!), Auffangschirm, sehr gute Spaltblende, Stativmaterial

**Aufbau:** Für unsere Zwecke ist ein sehr großer Raum erforderlich, am Besten dürfte wohl der Schulflur geeignet sein. Durch die Verwendung von Lasern ist die Justierarbeit recht gering. Aus etwa 10 m Entfernung leuchtet man mit zwei Lasern durch den weit geöffneten Spalt. Der Abstand zwischen den beiden Lichtöffnungen der Laser soll rund 5 cm betragen. Ca. 5 m hinter dem Spalt montiert man den Schirm, auf dem die „Laserflecken“ zu erkennen sind (siehe Abb. 1a, b).



Abb. 1 a



Abb. 1 b

Man beginnt mit der wohlbekanntesten Standarddemonstration der Wellenoptik. Man schaltet nur einen Laser ein und zeigt: Je kleiner der Spaltabstand ist, desto „verwaschener“ erscheint das nullte Hauptmaximum des Beugungsbildes (Abb. 2 a – c).

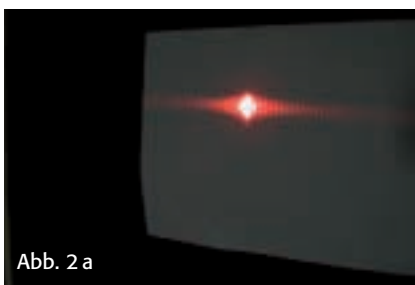


Abb. 2 a

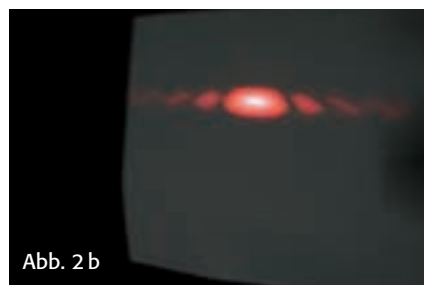


Abb. 2 b



Abb. 2 c

Anschließend schaltet den zweiten Laser hinzu. Das Licht beider Laser ist auf dem Schirm hauptsächlich in den zwei Beugungsmaxima 0. Ordnung wahrzunehmen. Verkleinert man nun den Spaltabstand, so waschen die 0. Intensitätsmaxima der Beugungsbilder immer weiter aus und fließen ineinander über. Für die oben gegebene Versuchsgometrie sind beide Laserbilder bei etwa 1/10 mm Spaltabstand nicht mehr getrennt wahrzunehmen (Abb. 3a – c). Die Abbildungen 3a – c sind unter Verwendung des Lichtes eines 5 mW- und des eines 1 mW- Lasers entstanden, die modellhaft einen Doppelstern, bestehend aus zwei Komponenten unterschiedlicher Helligkeit, simulieren sollten (Achtung: Leistungsbergrenze für Schullaser beachten! Sie beträgt 1 mW).



Abb. 3 a

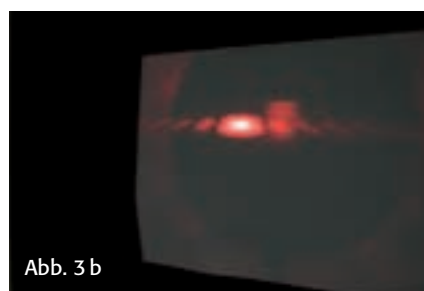


Abb. 3 b

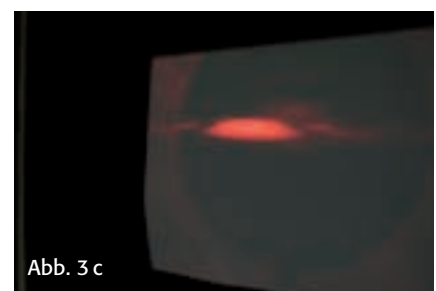


Abb. 3 c

Als Ergebnis des Versuches erhält man die Aussage: *Je kleiner die Spaltöffnung  $d$  ist, desto geringer ist das Auflösungsvermögen.* Versteht man unter dem Auflösungsvermögen den Sehwinkel  $\alpha$ , unter dem man zwei Punkte gerade noch getrennt erkennen kann, dann gilt die Proportionalität:

$$\alpha \sim \frac{1}{d}$$

Da nun aber alle optischen Instrumente (und das Auge) über eine oder mehrere blendenartige Öffnungen verfügen, lässt sich der im Versuch gezeigte Effekt grundsätzlich nicht umgehen. Diese Erkenntnis charakterisiert in etwa das Maximum, welches man durch phänomenologische Betrachtung anhand der vorangehenden Versuche bei Schülern erzielen kann, die noch keine systematischen Kenntnisse zur Wellenoptik besitzen.

### Einige Hinweise zur beugungsbegrenzten Auflösung von Teleskopen

Der für die Schüler optimale Zeitpunkt zur Behandlung des Auflösungsvermögens optischer Instrumente liegt natürlich unmittelbar nach der unterrichtlichen Behandlung der Beugungs- und Interferenzphänomene am Einzelspalt. Die Schüler kennen dann insbesondere die Gleichung zur Berechnung des ersten Minimums des Interferenzbildes. Sie lautet:

$$\sin \alpha \approx \alpha \approx \pm \frac{\lambda}{d} \quad (1)$$

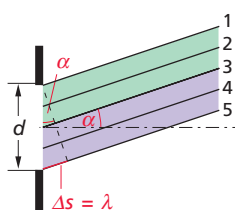


Abb. 4

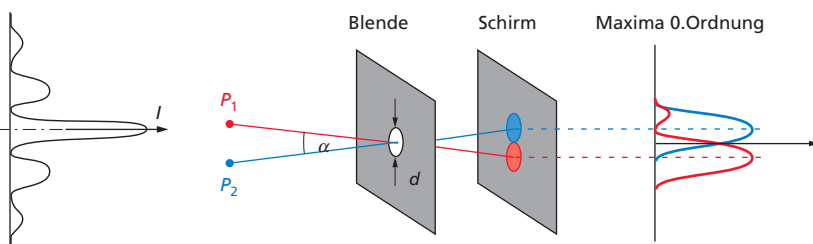


Abb. 5

Das bei der Beugung am Einzelspalt entstehend Interferenzmuster zeichnet sich durch ein Hauptmaximum hoher Intensität und Nebenmaxima mit geringer Intensität aus (Abb. 4). Tritt durch den Spalt gleichzeitig das Licht verschiedener Quellen, dann überlagern sich die Beugungsbilder dieser Quellen. Punktförmige Lichtquellen (wie die Laser oder aber Sterne) können unterschieden werden, wenn deren Hauptmaxima auf der Empfängerfläche deutlich voneinander getrennt sind (Abb. 5). Für die Definition der Auflösung hat man sich darauf geeinigt, die minimale Verschiebungsweite so festzulegen, dass das 0. Maximum des Beugungsbildes des einen Punktes gerade im 1. Minimum des anderen Punktes liegt.

Mit der Gleichung (1) folgt dann für das Auflösungsvermögen eines Spaltes:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \quad (2)$$

Tatsächlich kann man aber beide Beugungsbilder – wie auch anschaulich verständlich ist – schon bei kleineren Abständen trennen. Die Kreisgeometrie einer Lochblende bedingt einen nicht ganz leicht herzuleitenden zusätzlichen Faktor  $k = 1,22$  in der Gleichung (2):

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (3)$$

## Öffnungsdurchmesser oder Basislänge – die Größe macht's!

Die Gleichung (3) suggeriert einen einfachen Weg zur Erhöhung des Auflösungsvermögens von Fernrohren. Das Rezept lautet: Vergrößere die Öffnung ( $d$ ) und schon wird  $\alpha$  kleiner, d. h. die Auflösung höher. Prinzipiell stimmt dies zwar, doch die Luftunruhe (Seeing) begrenzt das Auflösungsvermögen selbst der größten herkömmlichen Teleskope auf etwa 1". Um feinere Details am Firmament erkennen zu können, stehen zwei Wege offen:

Entweder passt man durch den Einsatz einer adaptiven Optik das Beobachtungssystem aktiv an die durch die Szintillation ausgelösten Veränderungen des Lichteinfalls an – dann lohnt sich der Einsatz von immer größeren Teleskopöffnungen – oder man überlagert kurzzeitig das Licht verschiedener Teleskope bzw. Öffnungsblenden eines Teleskop so, dass es zur Interferenz kommt. Dies geschieht bei Interferometern (nebenstehende Abbildung).

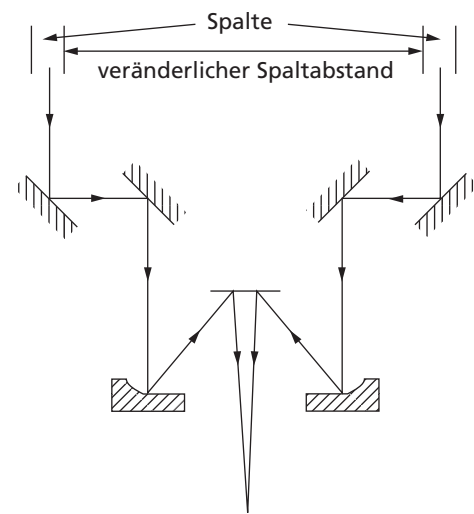


Abb. 7 a



Abb. 7 b

Das entstehende Bild setzt sich dann aus zwei Komponenten zusammen. Die erste Komponente ist das im Teleskop entstehende Beugungsscheibchen (Abb. 7 a). Dieser Komponente überlagert ist dann das Interferenzmuster eines Doppelspalt (Abb. 7 b).

Für den Winkelabstand der Maxima am Doppelspalt gilt:

$$\alpha = \frac{\lambda}{b} \quad (4)$$

Mit  $b$  ist die Basislänge, also der Abstand der beiden Interferometeröffnungen, bezeichnet. Je größer  $b$  ist, desto kleiner ist der Abstand zwischen den Interferenzstreifen.

Die Information über das Beobachtungsobjekt steckt nun im beobachteten Interferenzmuster. So erzeugt ein kleiner, dstanter und daher nahezu punktförmiger Stern ein anderes Interferenzmuster als ein sehr ausgehntes Objekt oder ein Doppelstern. Je größer man die Basislänge  $b$  des Interferometers wählt, desto feiner ist das Interferenzmuster, desto kleinere Winkelabstände können aufgelöst werden.

## **Wissenschaft in die Schulen - Bildquellen**

Abbildung 1a - 3c: Eigene Bilder

Abbildung 4: Eigenes Bild

Abbildung 5: Eigenes Bild

Abbildung 7a,b: Astronomie Gymnasiale Oberstufe-Grundstudium, Duden-Paetec-Verlag, S. 169  
ISBN: 978-3-89517-798-9