

Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

Gruppenarbeit von Sebastian Hiller Odermatt

Inhalt und Lernziel:

Physik als reine Theorie zu betreiben, ist für Schüler oft langweilig und demotivierend. Durch Anwendung auf Alltagsbeispiele wird der Wert und Nutzen einer Theorie ersichtlich. Nach der Partnerarbeit wissen die Schüler, wie das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges mit der Wellentheorie des Lichts zusammenhängt und können diesen Zusammenhang erklären.

Unterrichtsmethode:

Es handelt sich um eine Partnerarbeit.

Fachliches Review:

Markus Sigrist, Institut für Quantenelektronik, ETH Zürich

Fachdidaktisches Review:

Martin Lieberherr, Mathematisch-naturwissenschaftliches Gymnasium, Zürich

Publiziert auf EducETH:

25. September 2007

Rechtliches:

Die vorliegende Unterrichtseinheit darf ohne Einschränkung heruntergeladen und für Unterrichtszwecke kostenlos verwendet werden. Dabei sind auch Änderungen und Anpassungen erlaubt. Der Hinweis auf die Herkunft der Materialien (ETH Zürich, EducETH) sowie die Angabe der Autorinnen und Autoren darf aber nicht entfernt werden.

Publizieren auf EducETH?

Möchten Sie eine eigene Unterrichtseinheit auf EducETH publizieren? Auf folgender Seite finden Sie alle wichtigen Informationen: <http://www.educeth.ch/autoren>

Weitere Informationen:

Weitere Informationen zu dieser Unterrichtseinheit und zu EducETH finden Sie im Internet unter <http://www.educ.ethz.ch> oder unter <http://www.educeth.ch>.

ETH Institut für Verhaltenswissenschaft

Gruppenunterricht zum Thema:	Auflösungsvermögen des menschlichen Auges
Fach:	Physik, Wellenoptik
Schultyp:	Kantonsschule / Gymnasium
Adressaten:	Typ C, ein Jahr vor der Matura
Art der Gruppenarbeit:	Partnerarbeit
Dauer der gesamten Unterrichtseinheit:	45 min.
Autor:	Dr. Sebastian Hiller Odermatt
Betreuer:	Dr. Werner Vogel Prof. Markus Sigrist
Fassung vom:	1. September 2007
Schulerprobung:	Noch nicht schulerprobt

Leitidee:

- Physik als reine Theorie zu betreiben, ist für SchülerInnen oft langweilig und demotivierend. Durch Anwendung auf Alltagsbeispiele wird der Wert und Nutzen einer Theorie ersichtlich.
- Oftmals werden Experimente im Schulunterricht so durchgeführt, dass die SchülerInnen gegebene Anleitungen befolgen, um die gewünschten oder geforderten Resultate zu erhalten. Naturwissenschaftliches Vorgehen bedeutet aber auch, alternative Messmethoden gegeneinander abzuwägen.

Dispositionsziele:

- Der Schüler/die Schülerin kennt eine praktische Anwendung der zuvor behandelten Wellentheorie des Lichts.
- Der Schüler weiss, dass es zu einer Fragestellung mehrere mögliche Messmethoden oder Experimente gibt, die nicht richtig oder falsch, sondern besser oder schlechter sind. Er denkt über die Methoden nach, anstatt sie einfach zu benutzen.

Operationale Lernziele:

- Der Schüler/die Schülerin weiss, wie das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges mit der Wellentheorie des Lichts zusammenhängt und kann diesen Zusammenhang anderen erklären.
- Der Schüler/die Schülerin nennt Vor- und Nachteile gegebener oder selbst gewählter Messmethoden und wählt die günstigste aus.

Übersicht über dieses Manual:

- Nötige Vorkenntnisse
- Beschreibung der Unterrichtslektion, bestehend aus:
 - Phase A: Einführender Vortrag der Lehrperson. Dauer: 10 min.
 - Phase B: Partnerarbeit. Dauer: 20 - 25 min.
 - Phase C: Abschlussdiskussion. Dauer 10 – 15 min.

Benötigte Hilfsmittel:

Massbänder, Massstäbe etc. zur Messung von Entfernungen im Meterbereich.
Idealerweise für je zwei SchülerInnen ein solches Messgerät.

Vorkenntnisse

Die Klasse hat in den vergangenen Stunden das Thema Wellenoptik behandelt und als Teil davon die Beugung am Spalt. Zur Beugung am Spalt wurden mindestens drei einfache Beispielaufgaben durchgerechnet. Die SchülerInnen haben das Beugungsbild einer punktförmigen Lichtquelle am Spalt gesehen und als Hausaufgabe auf die hier beschriebene Stunde die Intensitätsverteilung des Beugungsbildes gezeichnet (sinc - Funktion).

Die SchülerInnen können mit Hilfe ihrer Unterlagen angeben, bei welchen Beugungswinkeln vom Hauptmaximum sich die Intensitätsminima und -maxima befinden. Sie kennen die Formel für das erste Minimum auswendig:

$$\sin(\alpha_1) = \frac{\lambda}{a}$$

(mit der Wellenlänge λ , der Spaltbreite a und dem Beugungswinkel α_1). Ergänzend zu Obigem verstehen die SchülerInnen die folgenden Begriffe und können sie definieren: Beugung, Spalt, Schirm, Wellenlänge, Intensität, Intensitätsverteilung, Spaltbreite, Beugungswinkel, Beugungsbild, punktförmige Lichtquelle.

Es ist ausserdem Voraussetzung, dass alle SchülerInnen die Grundlagen der Trigonometrie aus dem Mathematikunterricht beherrschen. Die SchülerInnen können im rechtwinkligen Dreieck aus zwei Seitenlängen die Winkel und aus einem Winkel und einer Seitenlänge die anderen Seitenlängen schnell und sicher berechnen.

Es ist von Vorteil, wenn die Schüler bereits etwas über das Auge und seinen Aufbau wissen, zum Beispiel von der Behandlung der Linse aus der geometrischen Optik oder aus dem Biologieunterricht. Falls nicht, könnte die Lehrperson den Aufbau des Auges in einer vorherigen Stunde erklären und die SchülerInnen z.B. als Hausaufgabe eine Zeichnung mit Beschriftung und Funktion der einzelnen Teile erstellen lassen.

Die Lehrperson kann aber auch der Meinung sein, dass ihre Klasse fähig ist, das in diesem Manual benötigte Verständnis für das Auge intuitiv zu erschliessen, oder dass dieses Wissen zur Allgemeinbildung gehört und somit schon vorhanden sein sollte.

Die vorliegende Lektion könnte den Abschluss des Gebiets Wellenoptik bilden.

Phase A: Einführender Vortrag des Lehrers. Dauer: 10 min.

Übersicht: Die Lehrperson gibt den SchülerInnen den Aufbau der ganzen Lektion bekannt und kündigt die Partnerarbeit an. Sie zeigt den Aufbau des Auges und erklärt, wie der Pupillendurchmesser und das Auflösungsvermögen des Auges zusammenhängen. Die SchülerInnen erhalten eine Zusammenfassung der Theorie für ihre Unterlagen.

Exemplarischer Vortrag (Tafelanschrieb und Regieanweisungen in Klammern):

„So, liebe Schülerinnen und Schüler, in den letzten Lektionen haben wir Wellenoptik behandelt. Heute schliessen wir dieses Thema ab. Dazu werden wir ein praktisches Beispiel behandeln: das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges.

In dieser Lektion werde ich euch zuerst während 10 Minuten zeigen, wie das Auflösungsvermögen des Auges mit der Wellenoptik zusammenhängt. Danach wenden wir dieses Wissen in der Praxis an. Dazu werden wir gleich nach meinem einführenden Vortrag Zweiergruppen bilden. Ihr werdet während 25 Minuten zwei einfache Messungen durchführen, und in den letzten 10 Minuten der Lektion werden wir alles gemeinsam besprechen.

Das Auge ist unser wichtigstes Sinnesorgan. Im Laufe der Evolution hat es sich zu einem wunderbaren Werkzeug entwickelt, um die Welt, in der wir leben, zu erfassen. Natürlich kann auch das Auge nicht gegen die Gesetze der Physik verstossen, und wir werden heute sehen, wie es mit der Wellenoptik fertig wird.

(Folie: Aufbau des Auges) Hier seht ihr, wie ein menschliches Auge aufgebaut ist. Das hier ist ein Querschnitt durch das Auge, hier ist vorne, hier ist hinten, so liegt es im Schädel. Von aussen sichtbar sind nur die Hornhaut, sie ist transparent, die Iris, das ist der farbige Teil des Auges, und die Pupille. Die Pupille ist eigentlich ein Loch, aber sie erscheint uns schwarz, weil durch sie Licht hineingeht, aber keines mehr herauskommt. Wenn wir mit dem Auge etwas sehen, fällt das Licht durch die Pupille ins Innere des Auges. Es geht weiter durch den Glaskörper, der, wie der Name schon sagt, durchsichtig ist, und fällt hinten auf die Netzhaut. Auf der Netzhaut sitzen ganz viele Sehzellen, die dem Hirn melden, wenn Licht auf sie fällt. Das Hirn setzt dann das Bild, das wir sehen, zusammen und interpretiert es.

Was hat das alles mit der Beugung am Spalt zu tun? Die Pupille ist ein Spalt, und das Licht wird daran gebeugt. Hier bekommt ihr alle ein Blatt (Theorieblatt austeilen), worauf das Wichtigste, was ich jetzt erzählen werde, zusammengefasst ist. Natürlich könnt ihr euch auch ergänzende Notizen machen.

Wir haben das letzte Mal gesehen, dass man das gebeugte Licht auf einem Schirm betrachten kann und dort das Beugungsbild sieht. Als Hausaufgabe auf heute habt ihr die Intensitätsverteilung bei der Beugung am Spalt gezeichnet. Ihr wisst, dass es ein Hauptmaximum, mehrere Nebenmaxima und dazwischen Minima gibt. Ebenfalls wisst ihr schon, dass sich das erste Minimum im Beugungswinkel $\sin(\alpha_1) = \frac{\lambda}{a}$ vom Hauptmaximum befindet. λ ist die Wellenlänge des Lichts, und a die Breite des Spalts (An die Tafel: Beugung am Spalt: 1. Minimum bei $\sin(\alpha_1) = \frac{\lambda}{a}$).

Zurück zum Auge. Was passiert, wenn wir ein Objekt sehen? Das wird in der ersten Skizze auf eurem Blatt gezeigt: Das Licht fällt vom Objekt durch die Pupille ein und wird daran gebeugt. Auf der Netzhaut des Auges entsteht dann das Beugungsbild. Die Netzhaut entspricht also dem Schirm und die Pupille dem Spalt.

Ein Unterschied zur Beugung am Spalt besteht aber: Wir haben keinen länglichen Schlitz im Auge, sondern eine kreisrunde Öffnung, die Pupille. Rechts von der Skizze, die den Strahlengang zeigt, ist ein Foto, wie das Beugungsmuster einer runden Öffnung aussieht. Seht ihr, wie es dem Beugungsmuster am Spalt gleicht? Es gibt auch hier ein Intensitätsmaximum in der Mitte und mehrere Minima und Maxima darum herum. Weil die Öffnung jetzt aber anders ist, ist auch die Formel für die Minima ein wenig anders als am Spalt: Das erste Minimum ist hier im Winkel $\sin(\alpha_1) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$ vom Hauptmaximum. λ ist wieder die Wellenlänge, und d ist nun der Durchmesser der Öffnung, also der Pupille. (An die Tafel: Beugung an runder Öffnung: 1. Minimum bei $\sin(\alpha_1) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$).

Jetzt können wir uns überlegen, wie das Auflösungsvermögen des Auges durch die Wellenoptik begrenzt ist. Zunächst müssen wir festhalten, was Auflösungsvermögen bedeutet: Wie nahe können zwei Gegenstände, die ich sehe, nebeneinander sein, so dass ich sie noch voneinander unterscheiden kann? Auf der unteren Skizze seht ihr ein Auge, das gerade zwei Lichtquellen sehen will, die im Winkel ρ voneinander liegen.

Diesen Winkel nennen wir den Sehwinkel. Das Beugungsbild seht ihr daneben. Es ist die Summe der Beugungsbilder zweier einzelner Lichtquellen. Das Auge erkennt ganz klar zwei Lichtquellen. Sind die Lichtquellen aber näher zusammen, wird es kritisch. Das untere Foto zeigt das Beugungsbild von zwei Lichtquellen, die nahe beieinander sind. Man kann nur noch ganz knapp erkennen, dass zwei Lichtquellen existieren. Kommen sich die Lichtquellen noch näher, kann man nicht mehr sagen, ob es eine oder zwei sind. Dieser Sehwinkel heisst der kritische Sehwinkel. Er ist der kleinstmögliche Sehwinkel, bei dem man noch zwei Objekte auflösen kann.

Der kritische Sehwinkel ist genau dann erreicht, wenn das Hauptmaximum einer jeden Lichtquelle im ersten Minimum der anderen liegt. Aus der Skizze kann man leicht erkennen, dass deswegen gilt: $\sin(\rho_{\text{krit}}) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$ (An die Tafel: Kritischer

Sehwinkel: $\sin(\rho_{\text{krit}}) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$).

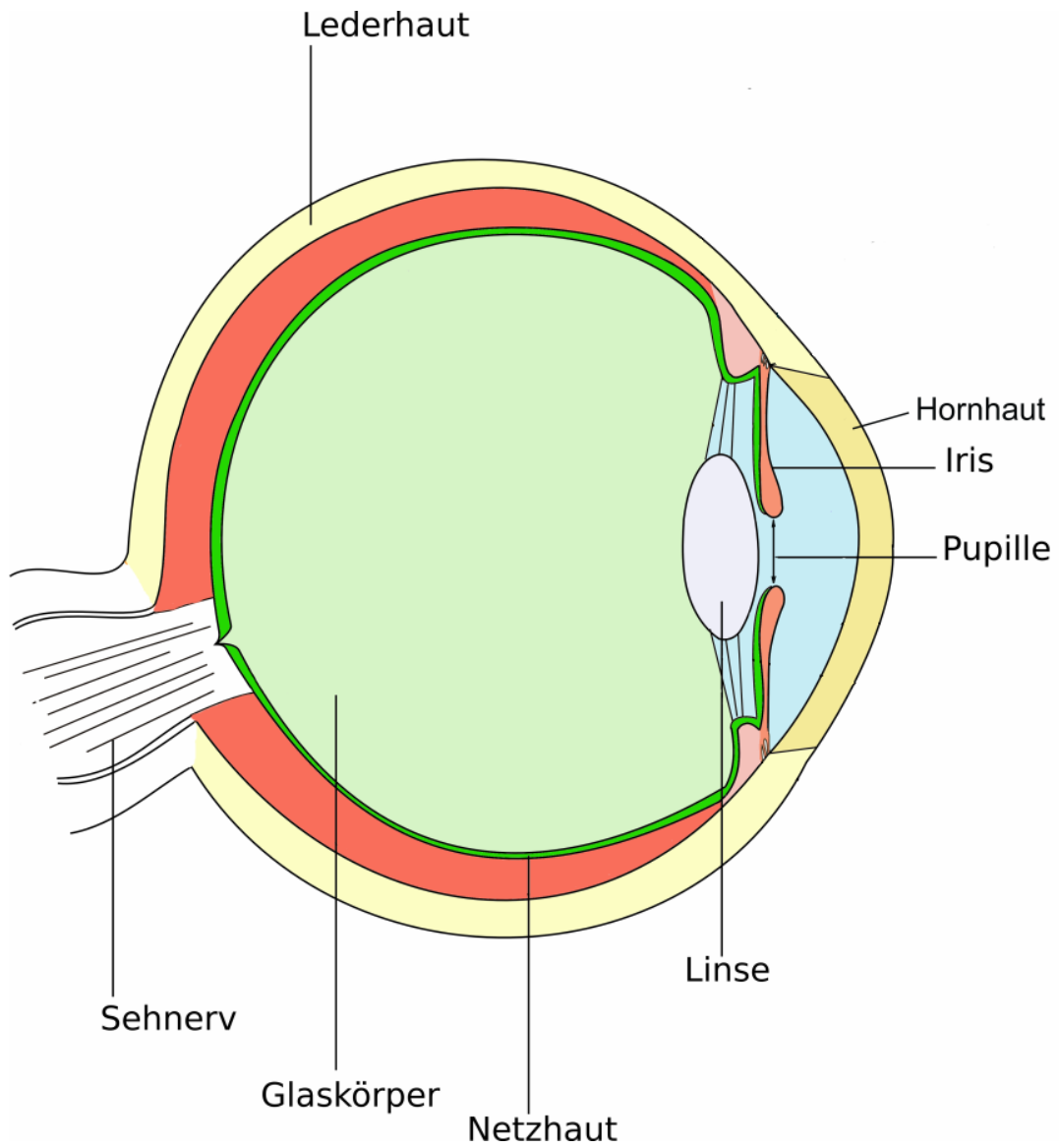
Habt ihr dazu Fragen? Ist euch alles klar? Sonst gehen wir jetzt zur Gruppenarbeit über.“

Es folgt die Kopiervorlage für die Folie und das Theorieblatt.

Quellenangabe des Bildes vom Augenquerschnitt: <http://de.wikipedia.org/wiki/Auge>

Quellenangabe der drei Fotos auf dem Theorieblatt: M. Cagnet, M. Françon, J.C. Thierr, Atlas optischer Erscheinungen, Springer Verlag Heidelberg, 1962.

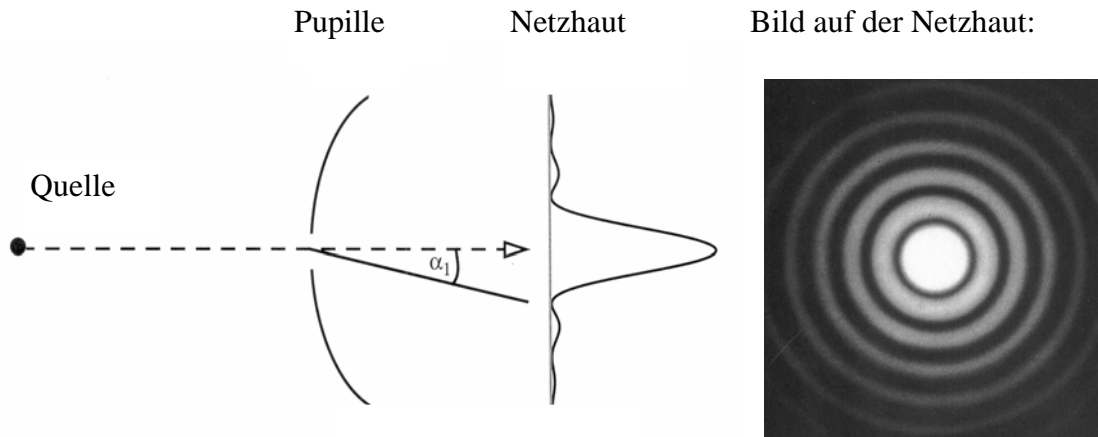
Schematischer Aufbau des menschlichen Auges



Beugung am Spalt und das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

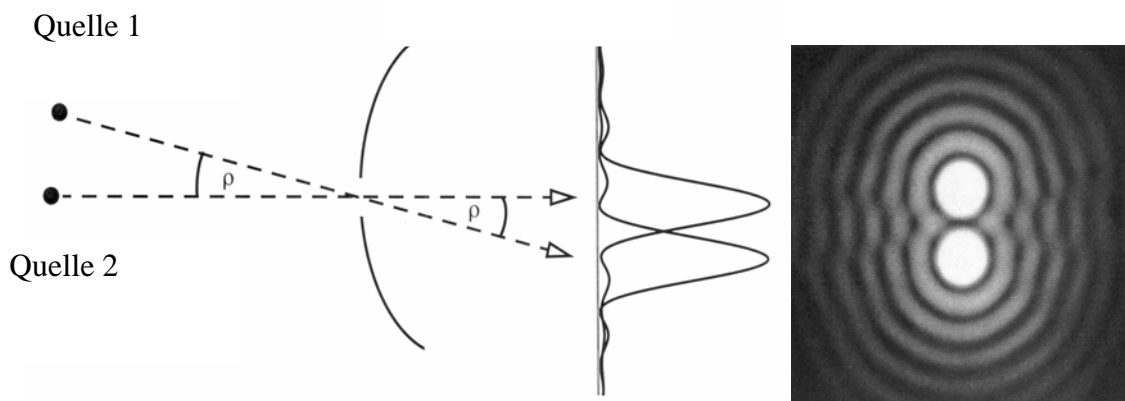
Theorie

Wenn wir mit unseren Augen einen Gegenstand betrachten, fällt Licht von diesem durch unsere Pupille in das Auge ein. Betrachten wir zuerst einmal, wie das Licht einer einzelnen Lichtquelle an einer kreisrunden Öffnung gebeugt wird:



Das erste Minimum im Beugungsbild befindet sich im Winkel $\sin(\alpha_1) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$ zum Hauptmaximum. Dabei ist d der Pupillendurchmesser und λ die Wellenlänge.

Um zu einer Formel für das Auflösungsvermögen des Auges zu kommen, betrachten wir nun die Situation, bei der ein Auge zwei Gegenstände im Sehwinkel ρ gleichzeitig sehen will:

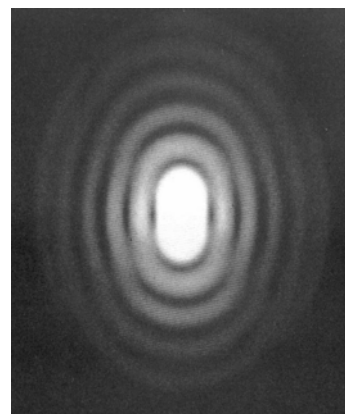


Das Foto rechts oben zeigt das Beugungsbild zweier Lichtquellen, die unter einem grossen Sehwinkel ρ gesehen werden. Man kann sie noch klar voneinander unterscheiden.

Auf dem unteren Foto sind die beiden Quellen näher beieinander, und zwar im kritischen Sehwinkel ρ_{krit} . Man kann gerade noch erkennen, dass das gebeugte Licht von zwei Quellen stammt.

Das Hauptmaximum eines jedes Beugungsmusters liegt nun gerade auf dem ersten Minimum des anderen. Somit gilt:

$$\rho_{\text{krit}} = \alpha_1 \quad \text{und deswegen} \quad \sin(\rho_{\text{krit}}) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$$



Phase B: Partnerarbeit: Bearbeitung des Arbeitsblattes mit Hilfe von Experimenten.

Dauer: 20-25 min

Die Zweiergruppen werden von den SchülerInnen selbst oder von der Lehrperson eingeteilt. In jeder Gruppe sollte mindestens ein Schüler/eine Schülerin sein, der/die die Hausaufgabe gemacht hat. Falls weniger als die Hälfte die Hausaufgaben gemacht haben, kann die Lehrperson einen Abbruch der Übung in Erwägung ziehen. Man könnte in einem solchen Fall auch die Hausaufgabe in der Stunde besprechen und die als Gruppenarbeit vorgesehenen Aufgaben als folgende Hausaufgabe geben.

Die SchülerInnen erhalten je ein Aufgabenblatt, auf dem sich genaue Anweisungen finden und ein Messblatt zum Eintragen der Messergebnisse.

Während der gesamten Partnerarbeit bleibt die Lehrperson weitgehend im Hintergrund und überlässt die Gruppen sich selbst, ermahnt sie jedoch, falls notwendig, zu ruhigem Arbeiten und schlichtet eventuelle Konflikte.

Ein Bewertungssystem auf dem Aufgabenblatt erlaubt den SchülerInnen, die Lernkontrolle selbständig durchzuführen. Die Ergebnisse werden in der Schlussdiskussion besprochen.

Es folgen Kopiervorlagen für die zwei Blätter

Beugung am Spalt und das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

Aufgaben

Die auf dem Theorieblatt gezeigte Formel für den Zusammenhang zwischen kritischem Sehwinkel ρ_{krit} und Pupillendurchmesser d , $\sin(\rho_{\text{krit}}) = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{d}$, wollen wir jetzt experimentell überprüfen.

Führt bitte folgende Aufgaben in gegebener Reihenfolge durch:

- Lest und besprecht mit eurem Partner die Theorie. Erklärt euch gegenseitig die folgenden sieben Begriffe: Pupillendurchmesser, Netzhaut, Beugungsbild, Wellenlänge, Auflösungsvermögen, Hauptmaximum und erstes Minimum des Beugungsbildes. Versucht, über Unklarheiten zunächst nachzudenken, bevor ihr die Lehrperson fragt. Diese Aufgabe sollte etwa 5-10 Minuten dauern.
- Überlegt euch jeweils zwei Methoden, wie man den Pupillendurchmesser d und den kritischen Sehwinkel ρ_{krit} messen könnte und tragt sie auf dem Messblatt ein. Eine Methode der beiden sollte einfach durchführbar sein, die zweite darf beliebig kompliziert und phantasievoll sein. Besprecht die Vor- und Nachteile der von euch genannten Methoden (Durchführbarkeit, Preis, Genauigkeit etc.). Ein Beispiel: Man könnte, um den Pupillendurchmesser zu messen, ein grosses Foto vom Partner machen und auf diesem Foto den Pupillendurchmesser messen. Das kann sehr exakt sein, die Methode ist aber auch aufwendig. Verweilt bei diesem Teil nur 5 Minuten. Falls euch im Moment nur eine Methode einfällt, könnt ihr später hierher zurückkommen.
- Führt eine der beiden Messmethoden zu d und eine zu ρ_{krit} durch und tragt die Ergebnisse in die Tabelle ein. Berechnet jeweils den anderen Wert daraus. Überprüft schliesslich die Übereinstimmung der beiden Resultate. Falls es grosse Unterschiede gibt: Woher kommen diese?
Rechnet bitte mit $\lambda = 600 \text{ nm}$ (gelbes Licht), damit wir die Ergebnisse gut vergleichen können, und achtet auf richtige Einheiten!
Für diese Aufgabe habt ihr 10-15 Minuten, bis zum Ende der Gruppenarbeit, Zeit.
- Gebt euch selbst nach folgendem Massstab Punkte:

Ihr versteht beide, worum es geht	1 Punkt
Ihr könnt beide die sieben Begriffe (siehe oben) dem anderen erklären	1 Punkt
Ihr habt mindestens zwei Methoden gefunden und deren Vor- und Nachteile eruiert	1 Punkt
Ihr habt vier Methoden gefunden und deren Vor- und Nachteile eruiert	1 Punkt
Entweder:	
Die Messergebnisse stimmen in etwa überein	2 Punkte
Oder:	
Die Messergebnisse stimmen nicht überein, aber ihr wisst, warum	2 Punkte

Maximal erreichbar: 6 Punkte.

5 Punkte: **Gut**

6 Punkte: **Sehr gut**

Beugung am Spalt und das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges

Experimente

A) Messung des Pupillendurchmessers d

-Messmethode 1, Beschreibung:

Vorteile:

Nachteile:

-Messmethode 2, Beschreibung:

Vorteile:

Nachteile:

B) Messung des kritischen Sehwinkels ρ_{krit}

-Messmethode 1, Beschreibung:

Vorteile:

Nachteile:

-Messmethode 2, Beschreibung:

Vorteile:

Nachteile:

C) Ergebnisse:

	Verwendete Methode (1 oder 2)	Messergebnis	Berechneter Wert
A) Pupillenweite		$d =$	$\rho_{\text{krit}} =$
B) Kritischer Sehwinkel		$\rho_{\text{krit}} =$	$d =$

Phase C: Abschlussdiskussion, geleitet von der Lehrperson

Dauer: 10–15 Minuten.

Die Leitung der Diskussion sollte der allgemeinen Lage und der Menge der verbleibenden Zeit angepasst werden. Folgende Elemente sollten auf jeden Fall enthalten sein und könnten in folgender Reihenfolge besprochen werden:

1. Welche Gruppen haben 6 Punkte?
2. Welche Gruppen haben 5 Punkte?
3. Alle Gruppen sollen als Hausaufgabe die fehlenden oder falschen Aufgaben bearbeiten, um auf 6 Punkte zu kommen.
4. Welche Messmethoden habt ihr gewählt?
5. Welche machen Sinn, welche nicht, warum?
6. Welche Ergebnisse habt ihr bekommen?
7. Ein typischer Wert für den Pupillendurchmesser ist 5 mm (Quelle: Paul A. Tipler, Physik, Spektrum Verlag Heidelberg, 1984). Daraus berechnen sich mit $\lambda = 600 \text{ nm}$: $0,0084^\circ$ für den kritischen Sehwinkel. Das bedeutet, dass der Mensch die Millimeterstriche auf einem Lineal noch auf 6,8 m Entfernung unterscheiden kann, die Zentimeterkästchen auf dem Schullineal auf 68 m. In der Distanz Erde – Mond (384 000 km), kann man (theoretisch) noch zwei 56 km entfernte Objekte auflösen
8. Kurze abschliessende Zusammenfassung: „Wir haben heute die Beugungstheorie auf das Auge angewandt und gesehen, dass die Wellenoptik hier eine wichtige Rolle spielt. Wir haben gelernt, was das Auflösungsvermögen mit der Pupillenweite zu tun hat, und diesen Zusammenhang selbst an unseren eigenen Augen überprüft. Ihr habt euch Gedanken über verschiedene Messmethoden gemacht. Das ist schwieriger und kommt der Realität eines Wissenschaftlers näher, als einfach einer vorgegebenen Anleitung zu folgen. Vielen Dank für die gute Mitarbeit. Wir sehen uns morgen wieder.“

Falls mehr Zeit bleibt, kann man noch auf folgende praktische Aspekte eingehen:

- Eine biologische Tatsache wurde in dieser Unterrichtseinheit bis hierher vernachlässigt: Im Augapfel befindet sich keine Luft, sondern der „Glaskörper“, eine gelartige, transparente Masse, die im wesentlichen aus Wasser besteht (zu 98%) und die Brechzahl 1,33 hat. Gelbes Licht beispielsweise ($\lambda = 600 \text{ nm}$ in Luft) hat darin also nur noch eine Wellenlänge von 450 nm (und entspricht somit blauem Licht in Luft).
- Wenn die aufzulösenden Objekte sehr klein sind, ist das nicht optimal. Sie sollten etwa dieselbe Grösse haben, wie ihr Abstand voneinander beträgt. Die Millimeterstriche sind also weniger geeignet, da sie dünner sind als die Zentimeterstriche auf dem typischen Tafellineal. Diese sieht man noch auf 40 - 50 m Entfernung.
- Es ist leichter, helle Gegenstände auf dunklem Hintergrund aufzulösen als andersherum.
- Brillenträger müssen mit Brille messen: Scharfes Sehen ist die Grundvoraussetzung, um an die physikalische Grenze der Auflösung zu

stossen (die man aber dennoch nicht erreicht, da der Theoriewert die absolute Grenze bei einer perfekten Optik darstellt).

- Die SchülerInnen werden wahrscheinlich bemerken oder wissen, dass die Pupillenweite mit der Helligkeit variiert. Der Grund: Im Prinzip erlaubt eine weitere Pupille eine bessere Auflösung. Bei zu starker Lichtintensität sind jedoch die Sehzellen überlastet, und die Pupille verengt sich auf Kosten des Auflösungsvermögens. Wir sehen also nachts schärfer als tagsüber.
- Es gibt noch eine spannende Querverbindung zur Evolutionsbiologie: Die Netzhaut ist 2,5 cm von der Pupille entfernt. Beim kritischen Sehwinkel sind daher die Intensitätsmaxima auf der Netzhaut 4 μm voneinander entfernt. Die Sehzellen auf der Netzhaut, die sogenannten Zäpfchen und Stäbchen, sind im Bereich des schärfsten Sehens (*Fovea centralis*) 1 μm voneinander entfernt, an anderen Orten der Netzhaut 3 – 5 μm (Quelle: Paul A. Tipler, Physik, Spektrum Verlag Heidelberg, 1984). Im Laufe der Evolution hat sich also die Dichte der Sehzellen so eingestellt, dass sie gerade an der Grenze des durch physikalisch Möglichen arbeitet. Eine grössere Dichte der Sehzellen wäre eine sinnlose Verschwendung von Ressourcen des Körpers. Eine geringere Dichte verschafft dem Menschen Nachteile beim Überleben, da er weniger scharf sieht, als es möglich wäre.

Anhang zur Gruppenaktivität in Phase C:

Benutzte wissenschaftliche Erkenntnisse:

(2): Klare schriftliche Ausarbeitung

(3): Eng gefasste Aufträge

(5): Arbeit & Ergebnis kritisch durchsprechen

(6): Konflikte lösen

(36): Gemeinsame Enddiskussion

Benutzte Erfahrungen von Coppes:

(4): Am Anfang Diskussion der Partner, keine schriftliche Ausarbeitung

(13): Gewöhnung an leises, rücksichtsvolles Sprechen

(14): Zurückhaltendes Eingreifen in den Kooperationsprozess