

Heinrich Hertz führte mit dem von ihm konstruierten Sender Versuche zur Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen durch, wie wir das im vorherigen Kapitel mit Mikrowellen getan haben. Als er dabei gerade die Phänomene darstellen konnte, die bereits von Licht bekannt waren (Reflexion, Brechung), schrieb er 1899: „Die Wellentheorie des Lichts ist, menschlich gesprochen, Gewissheit ...“

Dieser Zusammenhang motiviert uns, beim Licht auch nach typischen Wellenphänomenen wie Beugung und Interferenz zu suchen (historisch waren die übrigens schon 100 Jahre vor Hertz von Young entdeckt worden). **Zeichne in den oberen Bildchen den Verlauf des Laserstrahls hinter dem Spalt ein, der sich aus dem Strahlmodell (links) bzw. dem Wellenmodell ergibt.** → Lösung
Wir führen den Versuch für verschiedene Spaltbreiten durch. **Zeichne in das Kästchen „Schirmbild“ das Bild, das sich jeweils auf dem Beobachtungsschirm zeigt! Beschreibe rechts davon jeweils den Effekt (mit Fachbegriffen)! → Lösung**
Das Phänomen, das sich für mittlere Spaltbreiten ergibt, nehmen wir hier nur zur Kenntnis. Eine vollständige Erklärung liegt außerhalb des Lehrplans.

Die Interferenz am Einfachspalt wird mit Hilfe einer Animation erklärt auf Leifiphysik unter **Teilgebiet Optik – Beugung und Interferenz – Einzelspalt Grundwissen**.

Das ist der Grund dafür, dass wir in Alltagssituationen (z.B. an einem Türspalt) die Beugung in der Regel nicht beobachten können. Interessant sind in diesem hier auch die von Aristoteles beschriebenen Beugungsscheibchen.

5.5 Versuche mit Licht

Zusammenhang zwischen Radiowellen und Licht

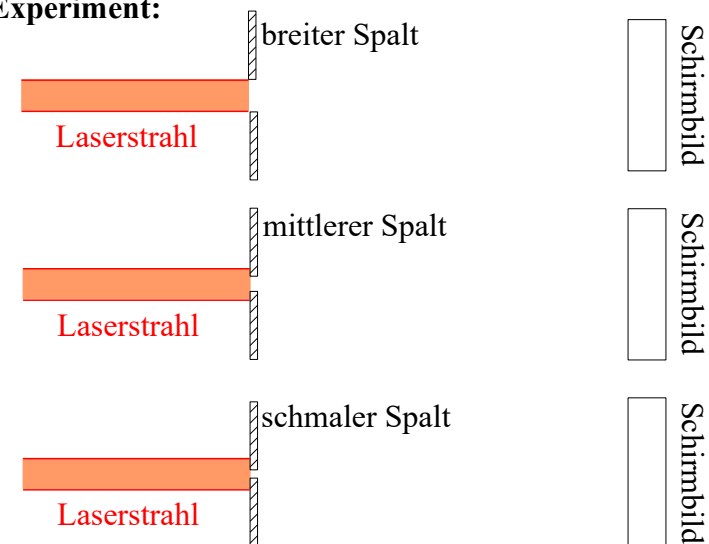
Beachte die Versuche in Kap. 5.4 →

Elektromagnetische Wellen und Licht zeigen auffallende Gemeinsamkeiten in der Ausbreitung. Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich bei Licht um eine elektromagnetische Welle handelt.

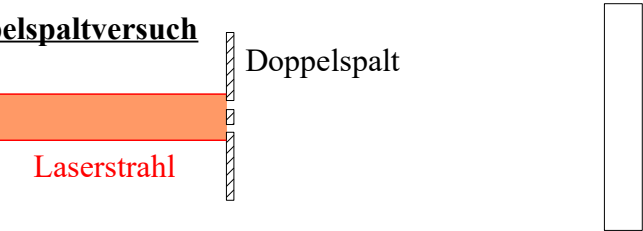
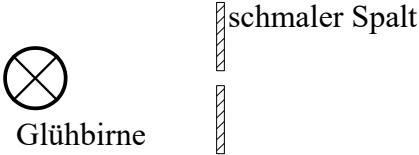
Beugung



Experiment:



Auch bei Licht können wir an Spalten Beugung beobachten. Die Entstehung dieses Phänomens setzt aber Spaltbreiten voraus.

<p>Mit der Erkenntnis, dass sich Licht hinter engen Spalten auch in den geometrischen Schattenraum hinein ausbreiten kann, bietet sich nun ein Doppelspaltversuch an, um zu untersuchen, ob die beiden Wellen hinter den Spalten miteinander interferieren.</p> <p>Zeichne das Schirmbild und erkläre seine Entstehung!</p> <p>Wie nennt man das zugrundeliegende Phänomen?</p> <p>Welche Forderung ist an die Spaltbreite zu stellen?</p> <p>Welchen Einfluss hat eine Veränderung des Spaltabstandes auf das entstehende Muster? → Lösung</p> <p>Eine quantitative Betrachtung erfolgt in der folgenden Stunde. Ein gute Simulation gibt's von der University of Colorado (phet.colorado.edu/de/simulations oder Suchbegriff „phet simulation“) unter dem Titel „Wellen Interferenz“. Die App läuft ohne Installation im Browser.</p>	<p><u>Doppelspaltversuch</u></p> 
<p>Ende des 18. Jahrhunderts war der Laser noch nicht erfunden. Die Forscher arbeiteten mit Sonnenlicht.</p> <p>Erläutere am gezeichneten Beispiel (mit Glühbirne), warum unser einfacher Versuchsaufbau so für den Beugungs- oder Doppelspaltversuch nicht funktioniert.</p> <p>→ Lösung</p>	<p><u>Ein ungeeigneter Versuchsaufbau</u></p> 
<p>Selbst-Check:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Beugung von Licht • Doppelspaltversuch mit Licht • Notwendigkeit raffinierter Versuchsaufbauten 	<p>Eine kleine aber feine Formel (die auch für Licht gilt) wiederholst Du mit den Aufgaben S.186/36 oder 37. Eine Menge Aufgaben gibt's auf Leifiphysik unter Teilgebiet Optik – Beugung und Interferenz – Doppelspalt Aufgaben. Du solltest mit den grünen Übungsaufgaben anfangen.</p>

Die rechnerische Bearbeitung funktioniert genauso wie bei den Mikrowellen. Allerdings messen wir hier nicht den Winkel unter dem ein Maximum auftritt, sondern seinen Abstand von der Achse (auf dem Schirm).

1. Ermittle zunächst noch einmal den Zusammenhang zwischen dem Wegunterschied Δs und dem Winkel α , unter dem der Punkt E auf dem Schirm erscheint! Ergänze dafür (dünn) die Zeichnung!
2. Wie lässt sich der Winkel α aus den hier messbaren Größen a (Abstand Doppelspalt – Schirm) und d (Abstand des Punktes E von der Achse) berechnen?

Mit diesen beiden Formeln hätte man prinzipiell das Experiment im Griff.

Die Zusammenführung der beiden Formeln führen wir gemeinsam durch. → Lösung

Was lässt sich an Hand der gefundenen Formel über den Abstand der Maxima untereinander folgern?

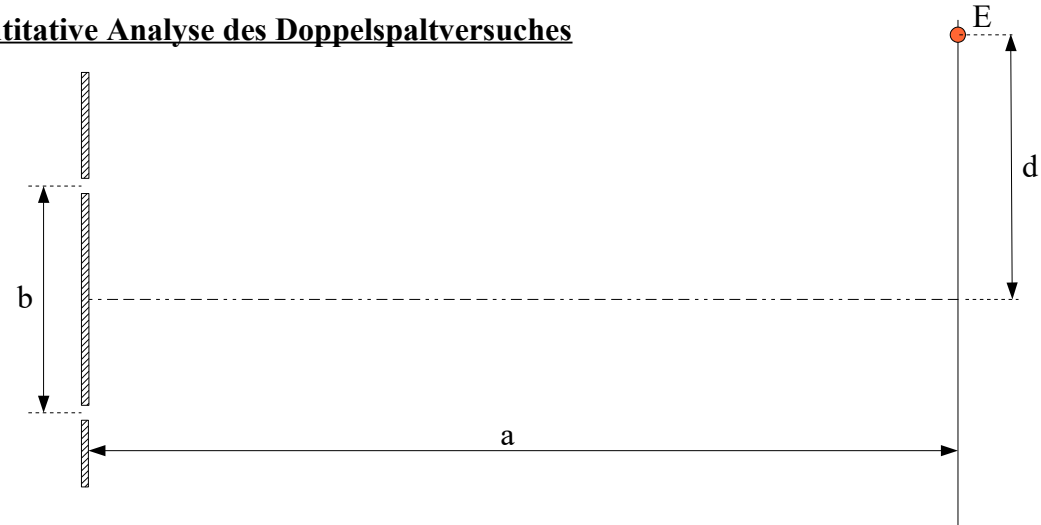
Um die Ablesegenauigkeit zu verbessern, messen wir im Experiment den Abstand vom 4. Maximum links bis zum 4. Maximum rechts.

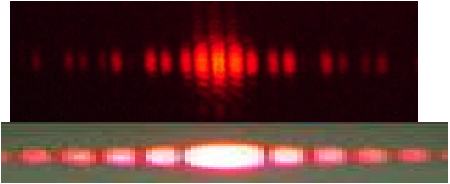
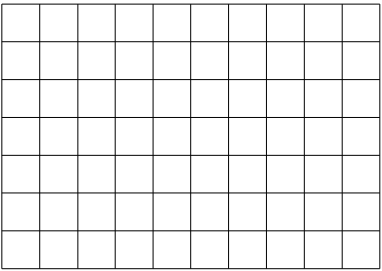
Berechne daraus die Wellenlänge des Lasers!
(Tipp: Wie groß ist Δs für das 4. Maximum?)

Versuchsdaten: $a = \dots\dots\dots$, $b = \dots\dots\dots$

Abstand 4. Maxima = $\dots\dots\dots$ → $d = \dots\dots\dots$

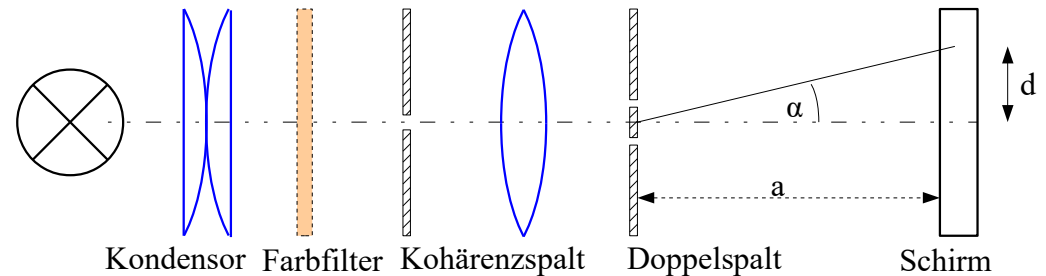
Quantitative Analyse des Doppelspaltversuches



<p>Der eben hergeleitete Zusammenhang ist das zentrale Werkzeug, um sowohl quantitative, wie qualitative Fragestellungen zum Doppelspalt zu bearbeiten. Ergänze die Lücken mit Hilfe der Formel! Die jeweils nicht genannten Versuchsparameter bleiben dabei unverändert.</p> <p>Ein Applet dazu gibt's auf Leifiphysik unter Teilgebiet Optik – Beugung und Interferenz – Versuche – Beugung und Interferenz am Doppelspalt (Simulation).</p>	<p>Interpretation der Ergebnisse</p> <div style="border: 1px solid red; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p>Für die Position d_k des k-ten Maximums ergibt sich der Zusammenhang $k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{a}$.</p> </div> <p>Wenn man den Abstand a zum Schirm vergrößert, dann sich d_k.</p> <p>Wenn man den Spaltabstand b vergrößert, dann sich d_k.</p> <p>Wenn man die Wellenlänge vergrößert, dann sich d_k.</p>
<p>Aus dem Interferenzmuster am Doppelspalt lässt sich also gleich noch das Interferenzmuster eines Einfachspaltes (mit gleicher Spaltbreite) ablesen.</p>	<p>Einfluss der Spaltbreite</p> <p>Im Interferenzmuster am Doppelspalt tritt innerhalb der Reihe der Maxima zusätzlich eine Schwankung der Intensität zu Tage (siehe Bild). Dieser Effekt rührt vom Einfachspalt her. Die Maxima am Doppelspalt sind genau dort schwach ausgeprägt, wo beim entsprechenden Experiment mit dem Einfachspalt ein Minimum auftreten würde.</p> 
<p>Aufgabe:</p> <p>Der Schulversuch wird nochmals durchgeführt (nun mit $a = 4,5 \text{ m}$, $b = 0,5 \text{ mm}$), zunächst mit rotem Licht der Wellenlänge $\lambda_r = 660 \text{ nm}$, dann mit grünem Licht der Wellenlänge $\lambda_{gr} = 440 \text{ nm}$. Berechne jeweils den Abstand d zwischen den einzelnen Maxima und zeichne die beiden Interferenzmuster (als Abfolge von kurzen farbigen Strichen) untereinander (0. Max in der Mitte) in den Karo-Bereich. → Lösung</p>	
<p>Selbst-Check:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Doppelspalt: Herleitung der Formeln • Kleinwinkelnäherung • Toleranzen 	<p>Aufgabe S.186/40a passt genau zur Stunde. Auf Leifiphysik gibt's weitere Aufgaben an der Fundstelle vom vorherigen Blatt.</p>

Verwendet man eine Glühbirne, dann wird der Versuchsaufbau komplizierter, da die Glühbirne kein paralleles Lichtbündel liefert. Der Kondensor konzentriert das Licht auf den Kohärenzspalt. Dieser stellt die eng begrenzte Lichtquelle dar, die für Beugungsversuche nötig ist (siehe „ein ungeeigneter Versuchsaufbau“). Die Linse übernimmt dann die Abbildung dieses Spaltes auf den Schirm. Der Doppelspalt führt zu der gewünschten Interferenz. Farbfilter für farbiges Licht.

Versuch mit weißem Licht



Das weiße Licht einer Glühbirne besteht bekanntlich aus allen Farben des Spektrums (allen Wellenlängen). Welche Konsequenz hat dies für die Position des 1. Maximums auf dem Schirm? (Vergleiche Aufgabe letzte Std.). Warum ist das 0. Max aber weiß?

Der Versuch wird mit einem Schirmabstand $a = 300 \text{ cm}$ und einem Spaltabstand $b = 0,4 \text{ mm}$ durchgeführt. Berechne die äußere Grenze des 1. Max und die innere des 2. Max ! ($390 \text{ nm} \leq \lambda \leq 780 \text{ nm}$) Welches Bild ergibt sich bei der Beobachtung? → Lösung

Bilder und Animation gibt's auf Leifiphysik unter **Teilgebiet Optik – Interferenz – Versuche – Doppelspalt**.

Spektrale Zerlegung der Maxima

Selbst-Check:

- **Versuchsaufbau für Glühbirne (grob)**
- **spektrale Zerlegung beim Doppelspaltversuch**

Aufgabe S.187/46 passt ebenso zum Thema wie die alten Abituraufgabe der aktuellen Fundstelle auf Leifiphysik (**Teilgebiet Optik – Beugung und Interferenz – Doppelspalt Aufgaben**).

Die Entwicklung von optischen Gittern ist eine logische Konsequenz aus den Schwächen, die der Doppelspalt vor allem bei der spektralen Auflösung von weißem Licht offenbart hat. Die ersten Transmissions-Gitter wurden von Joseph Fraunhofer Anfang des 19. Jahrhunderts entwickelt und sehr erfolgreich eingesetzt (z.B. Fraunhofer-Linien im Sonnenspektrum). Der Besuch seiner Glashütte in Benediktbeuern ist ein netter und informativer Sonntagsausflug. Sehr erfolgreich werden mittlerweile auch Reflexionsgitter eingesetzt, bei denen das Licht nicht durch die Gitterspalte hindurchgeht, sondern an der Gitterstruktur reflektiert wird. Von solchen Gittern hast Du eine Menge zuhause (CD-Sammlung).

Eine komplette Darstellung des Übergangs vom Doppelspalt über Mehrfach-Spalte zum Gitter findest Du auf Leifiphysik unter **Teilgebiet Optik – Beugung und Interferenz – Vielfachspalt und Gitter Grundwissen**.

Rechentechnisch geht alles wie gehabt, für jedes einzelne Paar von Spalten ergibt sich dieselbe

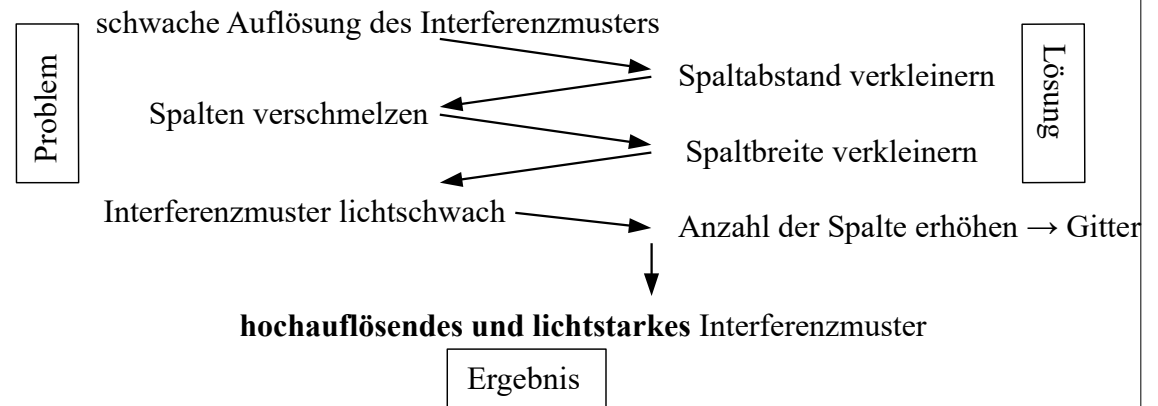
Geometrie wie beim Doppelspalt: $k \cdot \lambda = b \cdot \frac{d_k}{a}$.

Beachte allerdings:

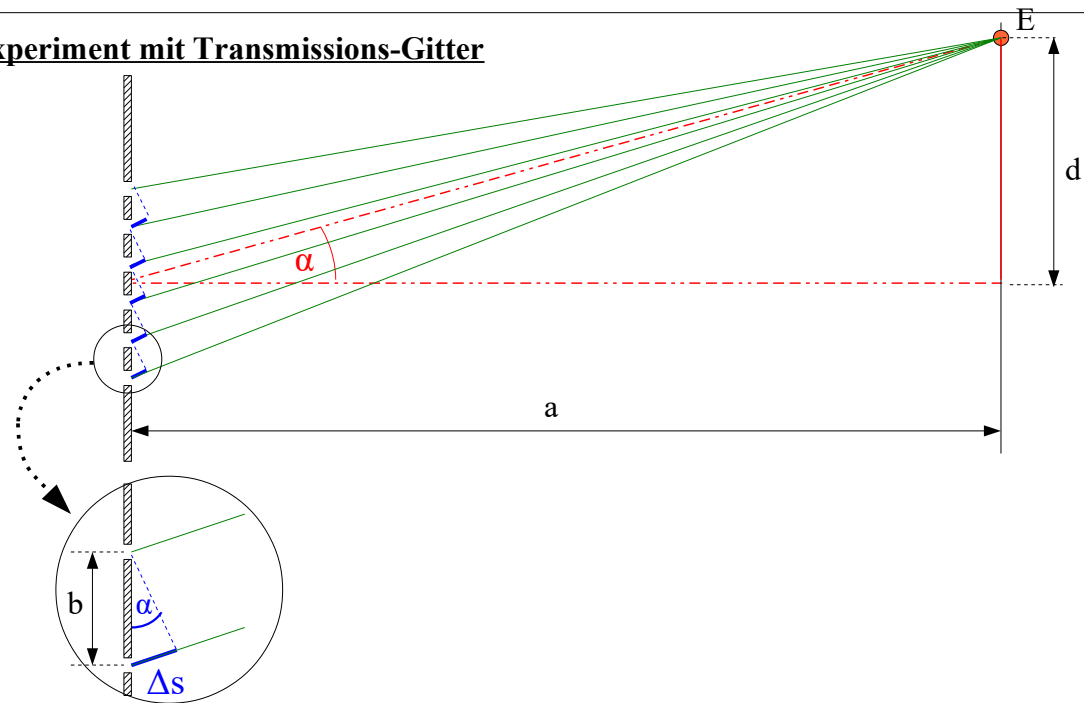
- in der Literatur findet man für den Spaltabstand beim Gitter oft die Bezeichnung Gitterkonstante g (b ist dann die Spaltbreite)
- bei Gittern erreicht man oft größere Winkel, dann muss man separat mit $\sin \alpha$ und $\cos \alpha$ rechnen (Formeln siehe Doppelspalt)

Wir führen den Versuch durch mit $a=4,0 \text{ m}$, $\lambda=625 \text{ nm}$ und einem Gitter mit 80 Strichen pro cm. Berechne den Abstand d der Interferenzmaxima untereinander.

Vom Doppelspalt zum Gitter



Experiment mit Transmissions-Gitter



<p>Bei hochauflösenden Gittern (Ende 19. Jhdt. entwickelte Henry Rowland die ersten hochauflösenden Reflexionsgitter) erreicht man sehr schnell große Winkel, die die Kleinwinkelnäherung nicht mehr zulassen. Dann wird die Berechnung etwas umständlicher. Für die Berechnungen beachte die Skizze auf der vorhergehenden Seite.</p> <p>Wir wiederholen den letzten Versuch, verwenden aber ein Gitter mit 570 Strichen pro mm. Berechne zunächst die Position d des ersten Maximums genauso wie vorher. Ermittle dann aus a und d den theoretischen Winkel α.</p> <p>Für so große Winkel ist die Näherung $\tan \alpha \approx \sin \alpha$ nicht korrekt, der berechnete Wert für d also falsch. Berechne nun zuerst mit Hilfe des kleinen blauen Dreiecks (vorherige Seite) den Winkel α, dann mit Hilfe des gestrichelten roten Dreiecks den Wert für d.</p> <p>Welchen Wert kann $\sin \alpha$ maximal erreichen? Welche Einschränkung ergibt sich damit für die höchste Ordnung k eines Maximums, das mit der Versuchsanordnung dargestellt werden kann? → Lösung</p>	<p><u>Versuch mit Rowland-Gitter (hochauflösend)</u></p>
<p>Selbst-Check:</p> <ul style="list-style-type: none"> • vom Doppelspalt zum Gitter • Berechnung mit Kleinwinkelnäherung • Berechnung für große Winkel – max. Ordnung 	<p>Hier eignen sich die Aufgaben S.186/41 – 44 (dabei muss man selbst entscheiden, ob die Kleinwinkelnäherung zulässig ist). Abituraufgaben gibt's hierzu natürlich auch, auf Leifiphysik unter Teilgebiet Optik – Beugung und Interferenz – Vielfachspalt und Gitter Aufgaben.</p>

<p><i>Wir führen den Versuch aus der letzten Stunde nun mit weißem Licht durch, der Versuchsaufbau entspricht dem Abschnitt „Versuch mit weißem Licht“ (Gitter statt Doppelspalt). Die spektrale Zerlegung des weißen Lichts gelingt damit wesentlich besser als beim Doppelspalt. Wir verwenden ein Gitter mit 570 Strichen pro mm und einen Schirmabstand von 30 cm. Das erste Maximum erstreckt sich über einen Bereich von etwa 7 bis 15 cm.</i></p> <p>a) Bestimme damit den Wellenlängenbereich von sichtbarem Licht.</p> <p>b) Kann man mit dieser Anordnung auch noch ein Maximum 3.Ordnung darstellen? → Lösung</p>	<p><u>Spektrale Zerlegung von weißem Licht am Gitter</u></p>
<p><i>Diese Aufgabe dient der Vorbereitung des entsprechenden Praktikumsversuches, soweit eine Gelegenheit zum Schülerpraktikum besteht.</i></p> <p><i>Wir verwenden ein Gitter mit 500 Strichen pro mm, der Schirm steht 20 cm davon entfernt. Erstelle am oberen Rand dieses Blattes für das spektrale Zerlegung des 1. Maximums eine symmetrische Skala für den Schirm, die für die jeweilige Position (bezogen auf das 0. Max.) die zugehörige Wellenlänge angibt. Berechne hierzu die Positionen von 400 nm bis 800 nm in 50 nm-Schritten (arbeite geschickt im Team und kontrolliere gegenseitig). → Lösung</i></p>	<p><u>Praktikumsversuch</u></p>
<p>Selbst-Check:</p> <ul style="list-style-type: none"> • spektrale Zerlegung von weißem Licht am Gitter • Berechnung von Wellenlänge bzw. Position 	<p>Die Aufgabe S.187/48 übersteigt wohl das angestrebte Niveau, da man hier noch die Veränderung der Wellenlänge im Medium berücksichtigen muss. Siehe außerdem die Fundstelle auf dem vorherigen Blatt.</p>