

---

# Was ist Licht?

---

---

|   |    |
|---|----|
| Übersicht   | 1  |
| Vorgehen  | 1  |
| Lernziele von Kapitel 1                           | 2  |
| 1.1 Wie stellten sich unsere Vorfahren Licht vor? | 3  |
| 1.2 Teilchen und Wellen am Doppelspalt            | 4  |
| 1.3 Preisfrage: Teilchen oder Welle?              | 10 |
| 1.4 Das Licht-Mikroskop                           | 19 |
| Lernkontrolle                                     | 24 |
| Lösungen zu den Aufgaben                          | 26 |

---

## Übersicht

Das Thema dieses ersten Kapitels ist das Licht. Über das Licht wissen Sie bereits einiges aus dem Physikunterricht. Dieses Bild ist aber noch nicht vollständig. Deshalb hat dieses Kapitel zum Ziel, Ihnen eine neue Anschauung über das Licht zu vermitteln. Dabei wird Ihnen zum erstenmal die Quantenphysik begegnen. In diesem Kapitel geht es vor allem darum, dass Sie ein Gefühl für die Denkweise entwickeln. Aus diesem Grunde enthält dieser Teil nur wenig Formeln und Rechnungen.

Das Kapitel ist in vier Abschnitte gegliedert: Der erste Abschnitt gibt Ihnen einen kurzen Einblick, welche Ideen die Menschen im Laufe der Geschichte über die Natur des Lichtes entwickelt haben. Dann folgt eine kurze Repetition über die Eigenschaften von Teilchen und Wellen. Im dritten Abschnitt werden Sie das Licht von einer ganz neuen Seite kennen lernen, und schliesslich werden Sie im vierten Abschnitt verstehen, warum auch im stärksten Lichtmikroskop Atome unsichtbar bleiben.

## Vorgehen

Am besten gehen Sie wie folgt vor: Zuerst studieren Sie die Lernziele. Dann arbeiten Sie den Stoff durch. Er ist mit Experimenten, Aufgaben und Gruppenarbeiten aufgelockert. Am Schluss des Kapitels finden Sie die Lösungen zu den Aufgaben.

Wenn Sie die Lernkontrollen mit eigener Anstrengung erledigt haben, gehen Sie zu Ihrem Lehrer, Ihrer Lehrerin oder der Tutorin, dem Tutor, um einen Kapiteltest zu absolvieren. Sollten Sie sich im Stoff aber noch unsicher fühlen, dann studieren Sie zuvor unbedingt nochmals die entsprechenden Abschnitte.

Genug jetzt mit den organisatorischen Dingen! Blättern Sie um und begeben Sie sich auf Entdeckungsfahrt in die Quantenphysik.

## Lernziele von Kapitel 1

- Es ist Ihnen klar, dass im Laufe der Zeit immer wieder konkurrenzierende Modelle über das Wesen des Lichts entstanden sind.
- Sie sind in der Lage, das Verhalten von Teilchen und Wellen an einem Einzelspalt und einem Doppelspalt zu beschreiben.
- Sie wissen, wie sich Licht an einem Doppelspalt verhält.
- Sie können Ihrer Nachbarin erläutern, was ein Quantenobjekt ist.
- Sie können Ihrem Biologielehrer begründen, warum man mit einem Lichtmikroskop keine Atome betrachten kann.

## 1.1 Wie stellten sich unsere Vorfahren Licht vor?

Können Sie sich noch an Ihre erste Physikstunde erinnern? Sicher hat Ihnen Ihr Lehrer oder Ihre Lehrerin erklärt, was Physik ist. Vielleicht mit folgenden Worten: "Die Physik ist eine exakte Wissenschaft. Sie versucht, Naturerscheinungen zu beschreiben und zu erklären. Dies geschieht anhand von Experimenten und Messungen. Die Gesetzmässigkeiten werden mathematisch festgehalten. Mit Hilfe der gefundenen Naturgesetze lassen sich dann Vorgänge im nachhinein oder im voraus bestimmen. Die Physiker entwickeln Theorien, in denen die Gesetze in einen grösseren Zusammenhang gestellt werden. Dies nennt man Modellbildung."

Schon früh in der Geschichte hatten Menschen begonnen, Physik zu betreiben. Dabei faszinierte sie immer wieder das Licht. Sie versuchten, diese Naturerscheinung zu erklären und machten sich Vorstellungen davon: Sie entwickelten *Modelle* des Lichtes. Hier zwei berühmte Beispiele solch antiker Modelle:

- Der Grieche Empedokles vertrat 444 v. Chr. die Idee der "Augenstrahlen": Sie besagt, dass vom Auge eine Art "Fühler" ausgeht. Dieser tastet den Gegenstand ab, so dass ihn unser Auge buchstäblich erfasst. (Noch heute spricht man in der darstellenden Kunst von "Sehstrahlen", die vom Auge ausgehen.)
- Um dieselbe Zeit war hingegen Pythagoras der Meinung, dass alle Gegenstände kleine Teilchen abschiessen. Diese treffen das Auge, so dass wir den Gegenstand erblicken können.

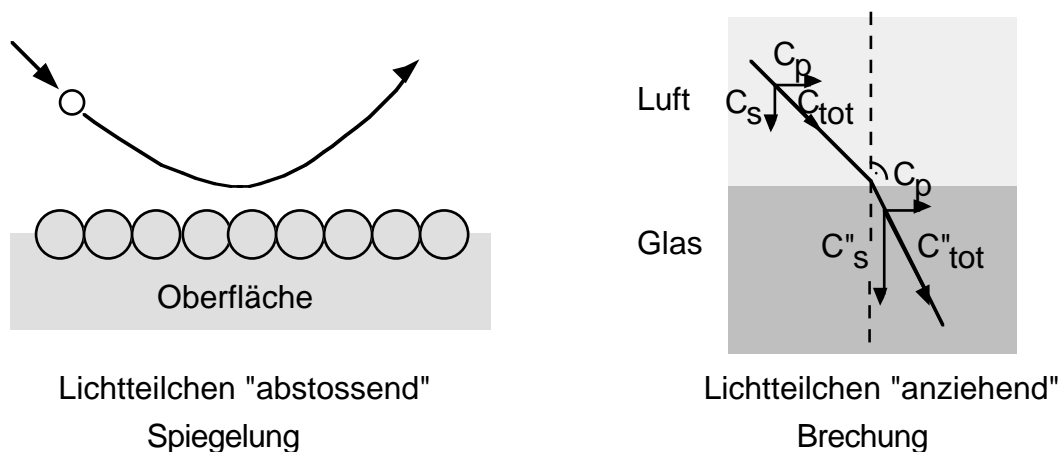
Aber auch viele Jahrhunderte später befassten sich berühmte Physiker mit dem Wesen des Lichts. In der zweiten Hälfte des 17. Jahrhunderts vertraten Newton und Huygens zwei unterschiedliche Modellvorstellungen vom Licht:

- Newton nahm an, dass von jeder Lichtquelle kleine Lichtteilchen geradlinig fortgeschleudert werden. Wenn diese in unsere Augen gelangen, rufen sie eine Lichtempfindung hervor: Wir sehen die Quelle. Die Energie des Lichtes würde sich also zusammen mit einer Masse fortbewegen.
- Huygens hingegen war der Ansicht, dass Licht eine Welle sei. In einer Welle wird zwar Energie transportiert, aber keine Masse. Denken Sie an ein Stück Holz, dass in den Wellen auf einer Wasseroberfläche schaukelt. Das Holz bewegt sich nur auf und ab, während die Wasserwellen unter ihm durchziehen. Würde sich mit diesen Wasserwellen Masse (hier also Wasser) mitbewegen, müsste sich auch das Holz mitbewegen.

Beide Forscher versuchten mit ihren Modellen die damals bekannten Eigenschaften des Lichtes zu erklären. Bekannt waren die Reflexion und die Brechung. Newton erklärte sich die Reflexion und die Brechung folgendermassen: Lichtteilchen existierten seiner Ansicht nach in zwei Zuständen. Befindet sich ein Lichtteilchen in Zustand "abstossend", wird es von der Oberfläche abgestossen, es wird reflektiert. Ein Lichtteilchen im Zustand "anziehend" aber wird in den Körper hinein "gesogen" (Figur 1.1). Dabei erfährt die Geschwindigkeitskomponente  $C_s$  (senkrecht zur Trennfläche) im Medium eine Zunahme um  $\Delta C_s$ :

$$C'' = C_s + \Delta C$$

Die Geschwindigkeitskomponente parallel zur Oberfläche bleibt unverändert. Der Lichtstrahl wird also von der Oberfläche weg gebrochen. Dies führt zu einer Flugbahn, wie sie auf dem Bild der Figur 1.1 dargestellt ist.



Figur 1.1: Licht im Teilchenmodell

Reflexion und Brechung in der Erklärung von Huygens haben Sie bereits im Physikunterricht behandelt.



### Aufgabe 1.1

Diskutieren Sie kurz mit Ihrer Banknachbarin oder Ihrem Banknachbarn diese beiden Gesetze von Huygens. Es genügt, wenn Sie sich die Grundzüge dieser Theorie wieder in Erinnerung rufen. Wenn Sie sich nicht mehr sicher sind, holen Sie sich aus der Handbibliothek das Buch "Metzler Physik" (Grehn 92). Auf Seite 133 und 134 sind Reflexion und Brechung nach Huygens' Theorie erklärt. Vielleicht gefällt Ihnen aber die Erklärung im Buch "Einführung in die Physik", Band 2, S.52 und S.53 besser (Sextl 91).

Am Ende des 17. Jahrhunderts stand also die Wissenschaft vor der Frage: Ist Licht eine Welle oder besteht es aus Teilchen? Welches der beiden Lichtmodelle ist das richtige? Es scheint, dass Huygens recht gehabt hat: Sein Brechungsmodell findet man in allen Physiklehrbüchern, nicht dasjenige von Newton. Ist damit die Antwort klar? Seien Sie sich nicht zu sicher. Das vorliegende Leitprogramm wird zeigen, dass die Natur immer wieder gut ist für Überraschungen in der Physik.

## 1.2 Teilchen und Wellen an einem Doppelspalt

In diesem Leitprogramm sollen Sie selber die historische Frage beantworten: Ist Licht eine Welle oder besteht es aus Teilchen? Diese Frage lässt sich mit einem Doppelspaltexperiment klären. Damit Sie selber die Antwort geben können, müssen Sie jedoch das nötige Rüstzeug präsent haben. Deshalb repetieren Sie in diesem Kapitel kurz die Fragen:

1. Wie verhalten sich Teilchen, die durch Spalten fliegen?
2. Wie verhalten sich Wellen, die durch Spalten hindurchlaufen?

Damit der repetierte Stoff nicht zu farblos und zu trocken wird, werden Sie zwei Experimente machen: Das eine mit einer Farbspraydose, das andere mit der Wellenwanne.

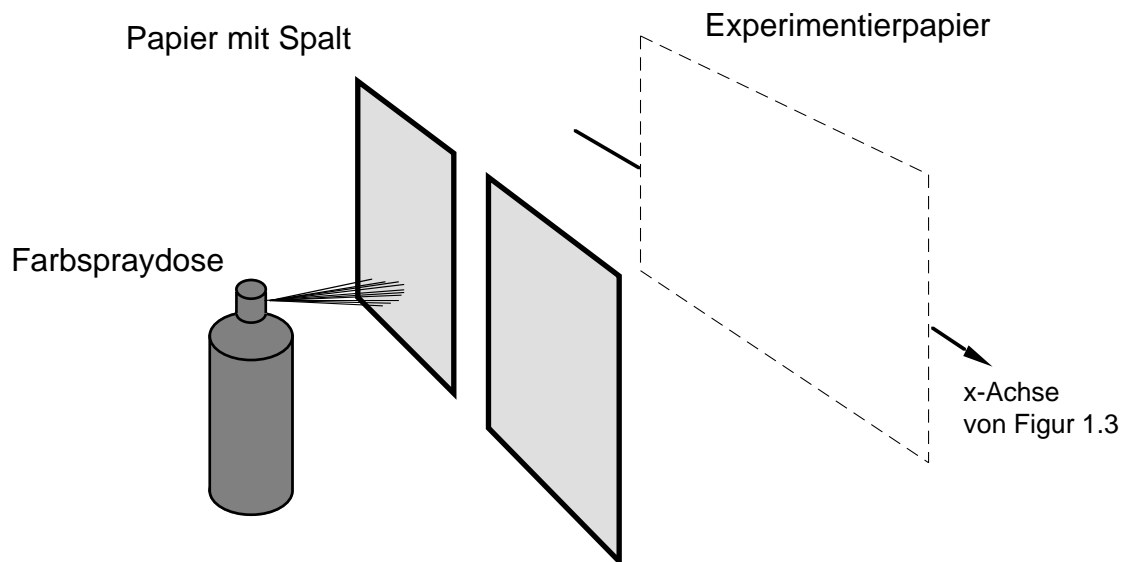


### Experiment 1.1: Teilchen am Spalt

Nehmen Sie die Anleitung zum Experiment "Teilchen am Spalt" hervor. Studieren Sie sie und führen Sie das Experiment durch. Danach fahren Sie im Leitprogramm weiter.

### Das Verhalten der Teilchen (hier Farbtröpfchen) am Einzel- und Doppelspalt

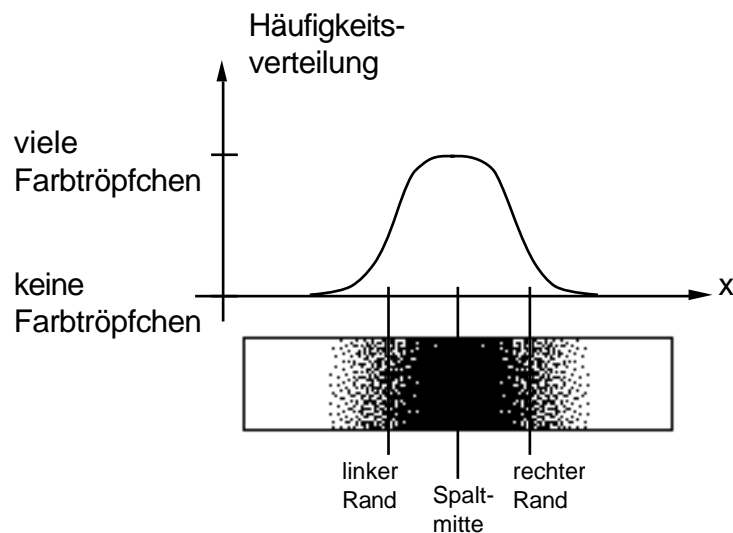
Auf Ihrem besprayten Blatt befindet sich ein Parallelogramm. Schneiden Sie es aus. Dann kleben Sie es in das gestrichelte Feld der Figur 1.2 ein. Schere und Leim dazu finden Sie auf dem Lehrerpult.



Figur 1.2: Skizze des Experimentes mit der Farbspraydose.

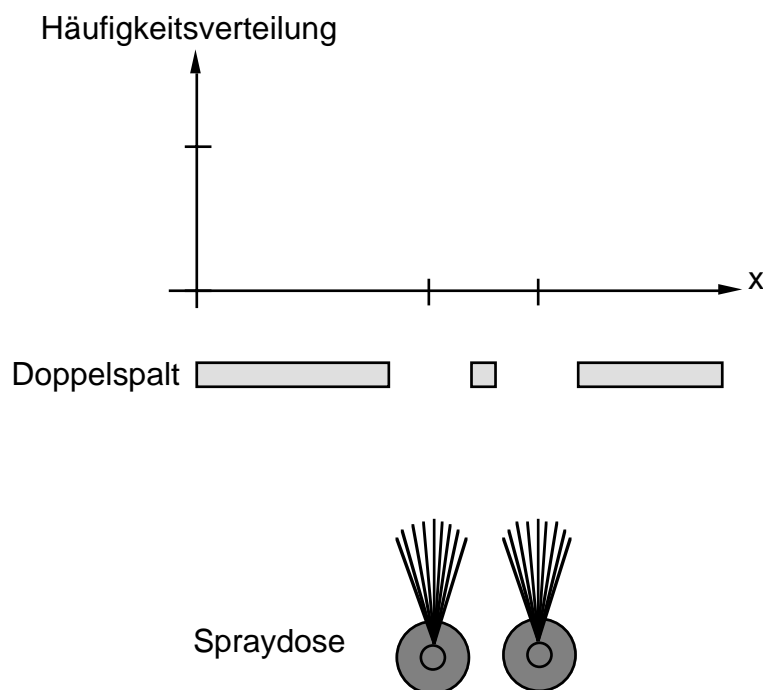
Betrachten Sie Ihr eingeklebtes Bild ganz aus der Nähe. Eventuell verwenden Sie dazu die Lupe, die auf dem Lehrerpult liegt. Konzentrieren Sie sich vor allem auf den Randbereich der Farbe. Sie stellen fest: Die Grenze zwischen dem farbigen Gebiet und dem Hintergrund ist nicht scharf. Der Übergang ist "fliessend". Ganz aussen sind nur noch einzelne Farbtröpfchen zu sehen.

Wie immer in der Physik, möchte man auch hier die Verhältnisse quantitativ - zahlenmässig - erfassen. Das geht im Prinzip ganz einfach: Sie zählen die Anzahl Tröpfchen pro Quadratmillimeter und tragen diese Zahl als Funktion des Ortes  $x$  auf. Natürlich ist das im konkreten Fall eine mühsame Zählerei, aber grundsätzlich geht es. Wenn Sie jetzt die Häufigkeit der Farbtröpfchen des Sprayversuchs in einem Diagramm darstellen, erhalten Sie das Bild der Figur 1.3.



Figur 1.3: Die Häufigkeitsverteilung der Farbtröpfchen hinter einem einfachen Spalt.

Diese Figur wird *Häufigkeitsverteilung* genannt. Sie sagt aus, wie häufig die Farbtröpfchen in einem Gebiet sind. Oder umgekehrt: Wenn Sie die Häufigkeitsverteilung im voraus kennen, dann können Sie vorhersagen, wie gross die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Farbtröpfchen in einem bestimmten Gebiet landet. Die Häufigkeitsverteilung ist ein geeignetes Hilfsmittel, um das Verhalten von Teilchen an Spalten zu beschreiben. - Wie wär's mit zwei Spalten?



Figur 1.4: Häufigkeitsverteilung der Farbteilchen hinter einem Doppelspalt. (Der Abstand Spraydose-Spalt ist viel grösser als die Spaltbreite und der Abstand Spalt-Papier)



## Aufgabe 1.2

Machen Sie das vorgeschlagene *Gedankenexperiment*:

Anstatt eines Spaltes haben Sie nun zwei Spalten vor sich, die eng beieinander liegen. Sie sprayen nacheinander durch beide Spalten hindurch. Der andere Spalt wird jeweils mit einem Papier abgedeckt. Sie sprayen jedesmal exakt gleich lang.

Zeichnen Sie die resultierende Häufigkeitsverteilung der Farbtröpfchen in Figur 1.4 ein. (Die Lösung finden Sie am Ende des Kapitels.)

Jedesmal, wenn Sie auf die Spraydose drücken, werden die Tröpfchen nach der gleichen Häufigkeitsverteilung verteilt. Die *gesamte Häufigkeitsverteilung* nach zweimaligem Sprayen ergibt sich aus der *Summe der beiden einzelnen Häufigkeitsverteilungen*. Die gleiche Häufigkeitsverteilung erhalten Sie auch, wenn Sie mit einer Spraydose gleichzeitig durch beide Spalten sprühen.



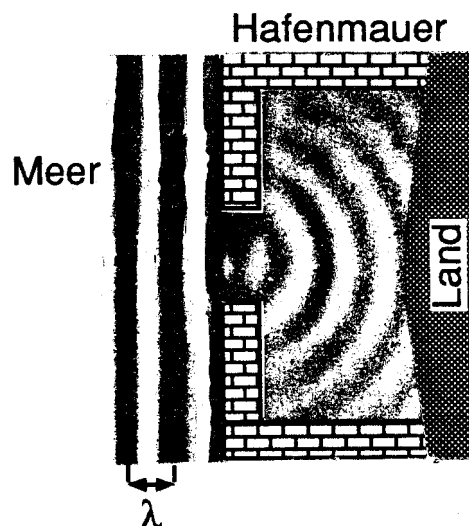
## Wir fassen zusammen:

Das Verhalten von Teilchen an einem Doppelspalt wird mit der Häufigkeitsverteilung beschrieben. Sie hält fest, wie häufig Teilchen in einem Gebiet anzutreffen sind.

Bei mehreren Spalten erhalten Sie die totale Häufigkeitsverteilung, wenn Sie die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Spalte addieren.

## Das Verhalten von Wellen (hier Wasserwellen) am Einzel- und Doppelspalt

Analoge Experimente zu denen, die Sie mit den Farbtröpfchen gemacht haben, lassen sich auch mit Wellen durchführen. Das Verhalten von Wellen an einem einzelnen Spalt lässt sich sehr schön an einer Hafeneinfahrt am Meer beobachten:

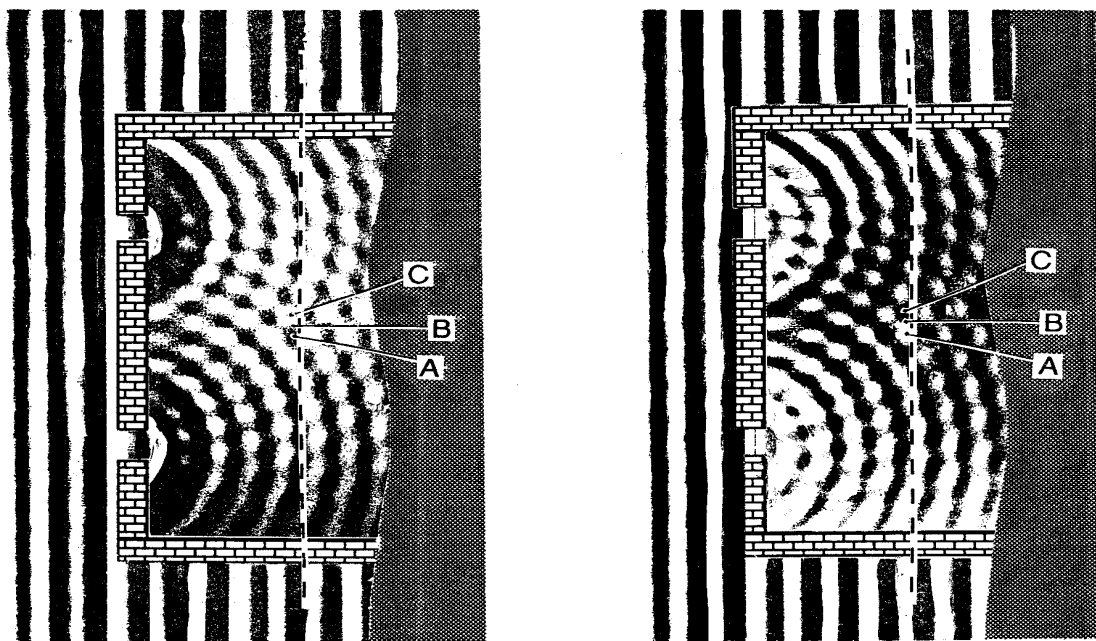


Figur 1.5:

Hafen am Meer  
mit einer  
Hafeneinfahrt

Die Wellenberge sind auf dem Bild durch die dunklen Zonen markiert. Der Abstand zwischen zwei Wellenbergen heisst *Wellenlänge*  $\lambda$ . Nach der Hafeneinfahrt pflanzen sich die Wellenzüge halbkreisförmig fort. Man sagt, die Wellen werden *gebeugt*. Deutliche Beugungserscheinungen treten dann auf, wenn die Hafeneinfahrt etwa die Grössenordnung der Wellenlänge hat.

Besitzt der Hafen zwei Einfahrten, so überlagern sich die beiden halbkreisförmigen Wellenzüge (Figur 1.6). An einigen Stellen treffen zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler aufeinander: Sie verstärken sich gegenseitig. An anderen Orten treffen jeweils ein Wellental und ein Wellenberg zusammen: Sie heben sich gegenseitig auf. Auf dem Wasser entsteht ein *Interferenzmuster*. Dies ist auf den beiden folgenden Bildern zu sehen. Das rechte Bild ist ein wenig später aufgenommen als das linke. Die Wellenfronten haben sich schon weiterbewegt.



Figur 1.6.: Meerhafen mit zwei Einfahrten. Das rechte Bild zeigt die Wellenfronten zu einem späteren Zeitpunkt, nachdem sich z. B. die einfallende Welle um eine halbe Wellenlänge weiterbewegt hat.

Auf der gestrichelten Linie gibt es Punkte, an denen sich die beiden halbkreisförmigen Wellen immer gegenseitig verstärken. Die Punkte A und C gehören zum Beispiel dazu. Hier treffen jeweils gleichzeitig zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler aufeinander. Der Wasserspiegel bewegt sich somit heftig auf und ab.

Zwischen den beiden Punkten A und C liegt ein Punkt B. Hier treffen stets zwei Wellenzüge zusammen, deren Auslenkungen gerade um eine halbe Periode gegeneinander verschoben sind. Die beiden Wellen heben sich also zu jedem Zeitpunkt auf. Der Wasserspiegel bewegt sich praktisch nicht. So kann für jeden Punkt auf der gestrichelten Linie bestimmt werden, wie heftig sich der Wasserspiegel bewegt.

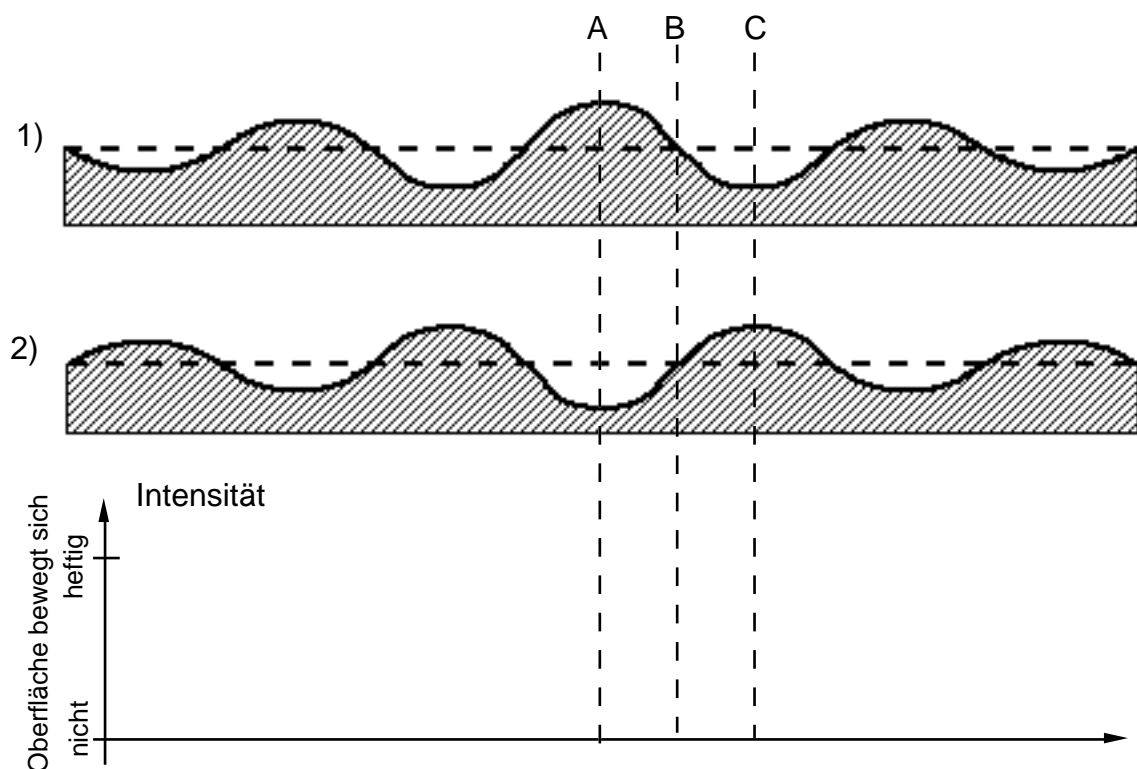


### Aufgabe 1.3

In Figur 1.7 stellt 1) den Wasserspiegel entlang der gestrichelten Linie zum Zeitpunkt des linken Bildes von Figur 1.6 dar, 2) den Wasserspiegel etwas später, zum Zeitpunkt des rechten Bildes von Figur 1.6.

Zeichnen Sie in Figur 1.7 den Intensitätsverlauf ein, mit der sich der Wasserspiegel offenbar auf und ab bewegt. Die Kurve muss nicht exakt sein. Sie sollte aber qualitativ stimmen.

Schauen Sie am Schluss nochmals, wo die Punkte A, B und C in Figur 1.6 liegen.



Figur 1.7: Intensitätsverlauf entlang der gestrichelten Linie in Figur 1.6.



### Experiment 1.2: Interferenz mit Wasserwellen

Wenn Sie die Aufgabe gelöst und mit der Lösung verglichen haben, gehen Sie zum Experiment mit der Wellenwanne. Ihre Physiklehrerin oder Ihr Physiklehrer hat es bereits vorbereitet. Versuchen Sie, die drei Punkte A, B und C in der Wellenwanne zu finden. Sie müssen auf einer Linie liegen. Dann fahren Sie mit dem Stoff weiter.

Übrigens: Als Erfinder der Wellenwanne gilt das Universalgenie Thomas Young, der auch als Arzt innovativ war und mitgeholfen hat, die Hieroglyphen zu entziffern. Mit den Wasserwellen erläuterte er das Verhalten des Lichts in einer für jedermann verständlichen Weise.

Der Verlauf dieser Intensitätskurve ist typisch für jede Art von Welle, die durch einen Doppelspalt läuft. Es gibt Punkte, an denen die Intensität Null ist. An anderen Punkten wird sie maximal. Dies nennt der Physiker Interferenzerscheinung. Mit ihrer Hilfe lässt sich das Verhalten von Wellen an einem Doppelspalt beschreiben. Die Intensitätskurve ist ein geeignetes "Hilfsmittel", um das Verhalten von Wellen an Spalten zu beschreiben.



### Wir fassen zusammen:

Gerade Wellenfronten pflanzen sich hinter einem engen Spalt, der ungefähr die Breite der Wellenlänge hat, halbkreisförmig fort. Sie werden gebeugt.

Läuft eine gerade Welle durch zwei Spalten, entsteht hinter den Spalten ein Interferenzmuster: An bestimmten Orten heben sich die beiden halbkreisförmigen Wellen auf, an anderen verstärken sie sich.

Wellen, die durch einen Doppelspalt laufen, können durch die Intensitätskurve entlang einer Linie beschrieben werden.

## 1.3 Preisfrage: Teilchen oder Welle ?

Wie ist es nun beim Licht: "Ist Licht eine Welle, oder besteht es aus kleinen Teilchen?" Vielleicht haben Sie im Physikunterricht gehört, dass Licht eine Welle sei. Das stimmt zwar, ist aber nur die halbe Wahrheit. Sie werden sehen, dass Licht etwas Neuartiges ist, etwas, das Sie noch nicht kennen.

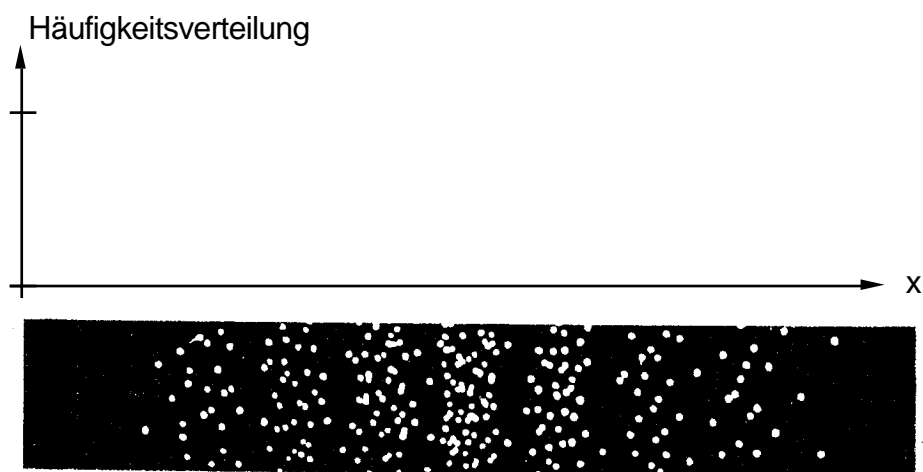
*Frage:* Wie kann man herausfinden, ob Licht Welleneigenschaften besitzt?  
*Antwort:* Mit einem Doppelspaltversuch.

Eigentlich müssten Sie das Experiment mit dem Doppelspalt selber machen. Der benötigte Aufbau ist aber aufwendig und diffizil. Damit Sie trotzdem eine Antwort auf die Frage finden, sind in diesem Leitprogramm Resultate aus einem Doppelspaltversuch enthalten. Der amerikanische Physiker Albert H. Taylor hat sie 1909 mit Hilfe einer Fotoplatte aufgezeichnet. Er verwendete folgende Versuchsanordnung:

Das Licht fällt zuerst durch ein Rauchglasfilter, passiert danach den Doppelspalt und belichtete anschliessend die dahinterliegende Fotoplatte. Mit dem Rauchglasfilter kann die Lichtintensität bis auf sehr kleine Werte reduziert werden. Zwei Ergebnisse seiner Experimente sind in der Figur 1.8 wiedergegeben.

**Erstaunlich, nicht wahr?**

(a) Versuch mit wenig Licht. Rauchglasfilter wenig durchlässig.



(b) Versuch mit extrem wenig Licht. Das Rauchglasfilter war so eingestellt, dass nur extrem wenig Licht auf die Fotoplatte fiel. Die Fotoplatte wurde über mehrere Stunden dem Licht ausgesetzt.

Figur 1.8: Resultate von Taylors Doppelspalt-Experimenten (Schwaneberg 80)

**Aufgabe 1.4**

Betrachten Sie die beiden Bilder der Figur 1.8. Lassen Sie sich Zeit. Versuchen Sie eine möglichst umfassende Antwort auf die Preisfrage zu finden: "Teilchen oder Welle?"

Zeichnen Sie zum Bild 1.8 (a) den Verlauf der Lichtintensität (Hell-Dunkel-Verlauf). Benutzen sie dazu das Achsenkreuz. Die Kurve kann nicht exakt sein; auf den qualitativen Verlauf kommt es an.

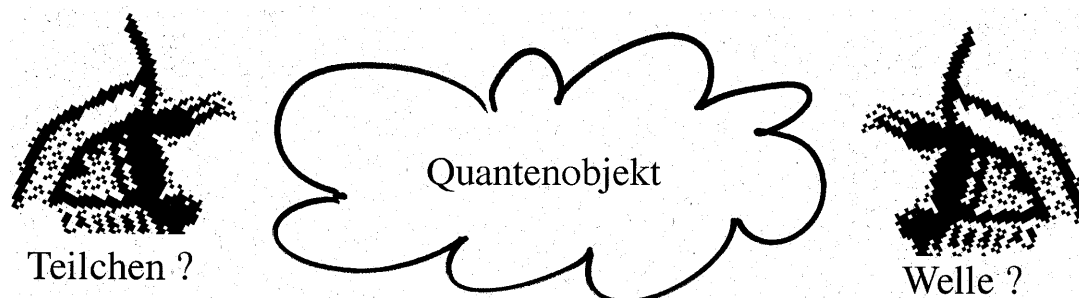
**Wir stossen auf einen Widerspruch:**

- Betrachten wir das obere Bild in Figur 1.8 und die dazu aufgezeichnete Intensitätskurve, dann sind wir geneigt zu behaupten: "Licht ist eine Welle. Die Intensitätskurve weist deutlich eine Interferenzerscheinung auf, wie sie nur bei Wellen vorkommt."
- Betrachten wir hingegen das untere Bild, kommen wir zum Schluss: "Das Licht besteht aus Teilchen. Die einzelnen Pünktchen auf der Fotoplatte markieren die Auftreffpunkte dieser Teilchen." Hatte Newton etwa doch recht?

Ja, was ist nun Licht? Teilchen oder Welle? Wir sehen aus den Experimenten von Taylor, dass nur eine Antwort übrigbleibt: "Weder - noch!". Die klassische Physik mit ihren beiden sich gegenseitig ausschliessenden Modellen vom Teilchen und von der Welle versagt! Wir benötigen also "eine neue Art von Physik", die diese Resultate beschreiben kann, eine Physik, die das Widersprüchliche verbindet. Diese Physik ist die *Quantenphysik*. Dinge, die ein solch "mysteriöses" Verhalten wie das Licht in den Taylor-Versuchen zeigen, heissen *Quantenobjekte*.

Quantenobjekte zeigen sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften.

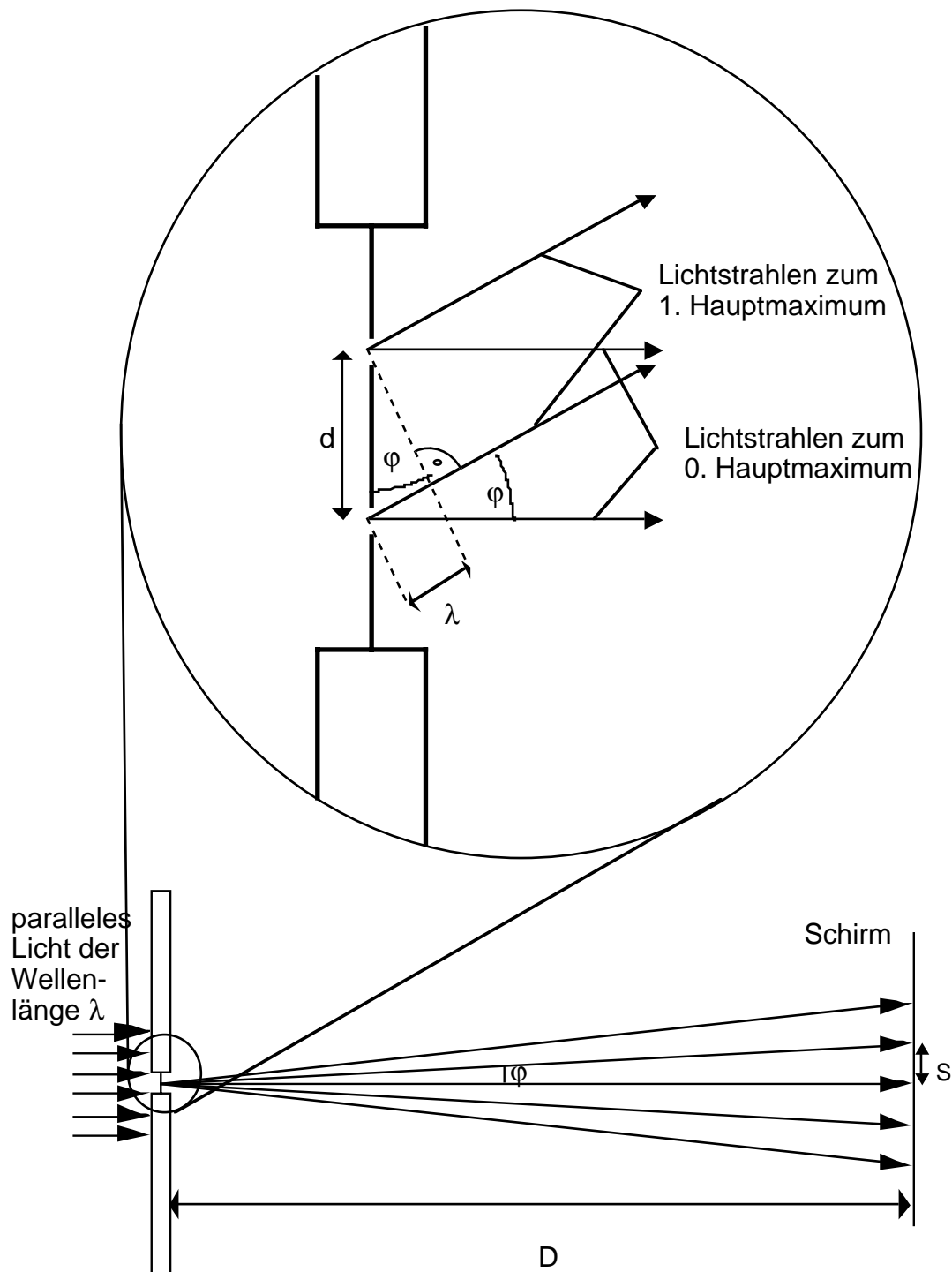
Licht ist ein Quantenobjekt. Bei einem Quantenobjekt hängt es anscheinend ausschliesslich von der Betrachtungsweise ab, ob es sich wie ein Teilchen oder eine Welle verhält.



Es gibt neben der elektromagnetischen Strahlung (Licht, Radio- und Mikrowellen, Röntgenstrahlung, ...) noch ganz andere Dinge, die sich so verhalten. Sie werden im Verlauf dieses Leitprogrammes weitere Beispiele von Quantenobjekten kennenlernen.

**Die Welleneigenschaften des Lichts**

Licht hat gewisse Eigenschaften, wie sie sonst nur Wellen aufweisen. Auf den beiden Bildern von Figur 1.8 sieht man ganz deutlich eine Interferenzerscheinung, wie sie bei Teilchen niemals vorkommen würde. Deshalb ordnet man Licht eine *Wellenlänge*  $\lambda$  zu. Licht mit unterschiedlichen Wellenlängen hat unterschiedliche Farben. Welche Wellenlänge zu welcher Farbe gehört, kann man mit einem Doppelspalt bestimmen. Wissen Sie noch, wie das geht?



Figur 1.9: Interferenzerscheinungen auf dem Schirm hinter dem Doppelspalt.

Hinweis: In der Vergrößerung des Doppelspalt wurde der Winkel  $\phi$  zur Verdeutlichung viel grösser gewählt, als er in Wirklichkeit ist. Die Strecke  $s$  auf dem Schirm wird vom 0. Hauptmaximum aus gemessen. Es liegt auf der Symmetrieachse. Die Bezeichnung der Stellen mit grösster Intensität ist nicht in allen Büchern gleich: "Beugungsmaximum" weist auf die Entstehung hin. "Hauptmaximum" deutet an, dass es auch noch "Nebenmaxima" gibt. Sie werden bei starker Vergrößerung der Interferenzerscheinung als Feinstruktur zwischen den Hauptmaxima sichtbar. Diese Finesse spielt für uns hier keine Rolle.



### Aufgabe 1.5

Wenn Ihnen die Figur 1.9 nichts (mehr) sagt, dann nehmen Sie aus der Handbibliothek das Buch von Sexl "Einführung in die Physik", Band 2, S.69 -71. Halten Sie das Wichtigste für sich fest. Vielleicht fertigen Sie auch eine Skizze an. Sie müssen nur soviel festhalten, dass Sie zur Vorbereitung auf die nächste Prüfung nicht mehr im Buch nachschauen müssen.

Oder Sie wissen noch, wie man die Wellenlänge aus einem Experiment bestimmt. Dann fertigen Sie eine Skizze des Doppelspaltes an und zeigen, wie die Wellenlänge aus den Messgrössen bestimmt wird.

Eine weitere Grösse, die die Welleneigenschaft von Licht beschreibt, ist die *Frequenz*  $f$ . Sie hängt über die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  (hier die Lichtgeschwindigkeit) mit der Wellenlänge  $\lambda$  zusammen:

$$c = \lambda \cdot f$$

Sowohl die Frequenz  $f$  als auch die Wellenlänge  $\lambda$  sind Grössen, mit denen Welleneigenschaften beschrieben werden.

### Die Teilcheneigenschaften des Lichts

Die Welleneigenschaften waren Ihnen aus dem Unterricht bereits bekannt. Doch woher kommen die weissen Punkte auf den beiden Bildern von Figur 1.8? Wellen zeigen doch keine solchen Eigenschaften.

Betrachten wir zuerst die Vorgänge auf der Fotoplatte: Die Fotoplatte enthält eine chemische Substanz. Diese verändert sich, sobald ihr eine gewisse Menge an Lichtenergie zugeführt wird. Die Aufzeichnungen von Taylor legen den Schluss nahe, dass die Lichtenergie *portionenweise* kommt! Offenbar treffen kleine *Energiepakete* die Fotoplatte, so dass sich die entsprechende Stelle weiss färbt. Die Physiker nennen diese Energiepakete auch *Lichtquanten* oder *Photonen*. Sie bewegen sich stets mit Lichtgeschwindigkeit.

Die *Energiemenge* eines solchen Paketes kann man genau angeben. Alle Experimente bestätigen, dass die Energie proportional zur Frequenz ist. Es gilt:

$$E_{\text{Photon}} = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Dabei bedeuten:

|                     |   |
|---------------------|---|
| $E_{\text{Photon}}$ | Energie des Photons                                   |
| $\lambda$           | Wellenlänge des Lichtes                               |
| $c$                 | Lichtgeschwindigkeit                                  |
| $h$                 | Proportionalitätskonstante = $6.63 \cdot 10^{-34}$ Js |

Die Konstante  $h$  heisst "Planck'sches Wirkungsquantum". Den angegebenen, winzigen Zahlwert können Sie im Additum 3 selber messen.  $h$  wird Ihnen im Folgenden immer wieder begegnen, denn es ist die charakteristische Grösse der Quantenphysik. Beachten Sie bitte die Masseinheit Js. So ein Produkt aus Energie und Zeit (nicht etwa aus Leistung und Zeit, wie bei den kWh) haben Sie wohl noch nicht angetroffen.

Nicht nur Licht, sondern jede elektromagnetische Strahlung kommt portionenweise vor. Man sagt, die Strahlung sei *gequantelt*. Allgemein heissen die Energiepakete *Quanten*.

Die folgende Tabelle gibt einige Beispiele:

| Bezeichnung | Frequenz                         | Wellenlänge                | Energie   |
|-------------|----------------------------------|----------------------------|---|
| UKW:        | $f = 1 \cdot 10^8 \text{ Hz}$    | $\lambda = 3 \text{ m}$    | $E = 6.6 \cdot 10^{-26} \text{ J} = 4.1 \cdot 10^{-7} \text{ eV}$ |
| NeHe-Laser: | $f = 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ | $\lambda = 600 \text{ nm}$ | $E = 3.3 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 2.1 \text{ eV}$               |
| Röntgen:    | $f = 3 \cdot 10^{19} \text{ Hz}$ | $\lambda = 10 \text{ pm}$  | $E = 2.0 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 124 \text{ keV}$              |

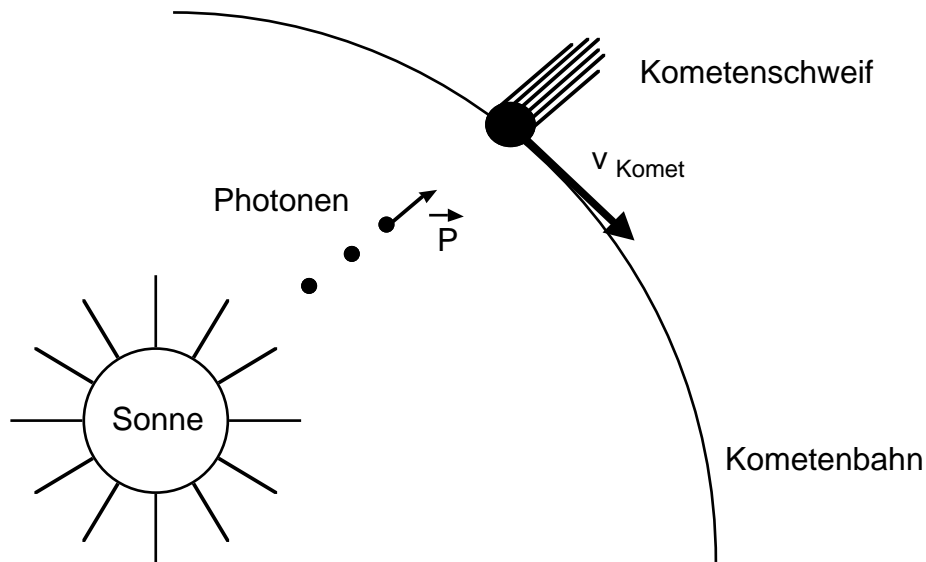
Sie sehen: Bei Röntgenstrahlung handelt es sich um energiereiche, bei UKW-Strahlung um energiearme Quanten.

Wer war es eigentlich, der 1905 auf den Gedanken kam, dem Licht erneut Teilchennatur zuzuordnen, nachdem dessen Welleneigenschaften seit hundert Jahren nachgewiesen waren? Wer prägte den Begriff des Lichtquants, des Photons? Wer erhielt 1921 für diesen fundamentalen Beitrag zur modernen Physik den Nobelpreis? - Niemand anderes als *Albert Einstein*, den Sie möglicherweise im Bild nur deshalb nicht erkannt haben, weil es ihn als jungen Forscher portraitiert. Natürlich begann Einstein nicht bei Null. Aber er setzte einen von Max Planck angefangenen Gedankenzug in kühner Weise fort: Die Energie von Strahlung tritt immer portionenweise auf. Mit dieser Quantenhypothese gelang es ihm, verschiedene Wesenszüge bekannter Erscheinungen (Photoeffekt, Fluoreszenz) theoretisch zu erklären. Und bald wurde diese Hypothese zusätzlich durch die Wärmelehre und die Atomphysik bestätigt.

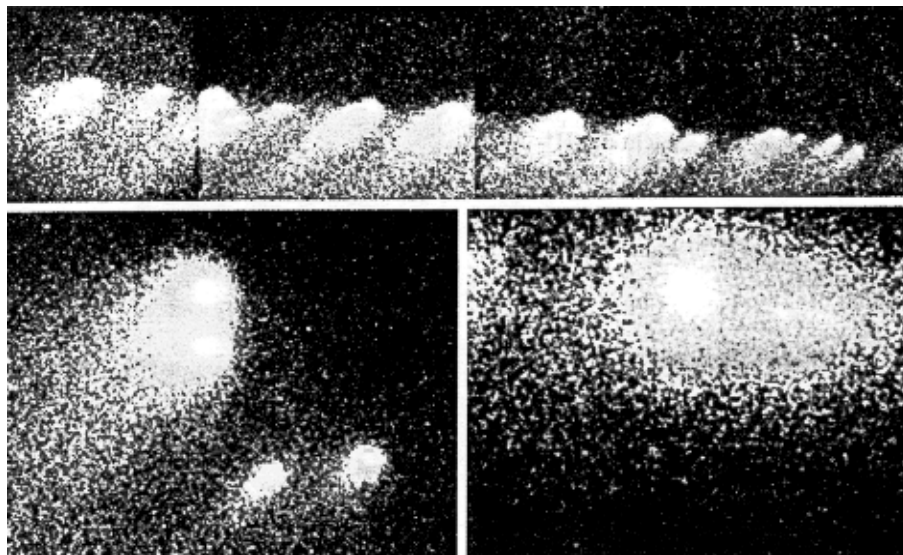


Albert Einstein ca. 1908

Doch wenden wir uns wieder den Lichtquanten zu! Sie besitzen auch einen *Impuls*. Das wird sehr schön sichtbar beim Schweif der Kometen (Figur 1.10 b). Dieser glühende Staub ist stets von der Sonne weggerichtet. Weshalb? - Der Photonenstrom von der Sonne transportiert mit der Energie auch Impuls, den er auf die Staubteilchen überträgt. Er bläst die Staubteilchen sozusagen weg. Schematisch ist dies in Figur 1.10 a dargestellt. (Verwechseln Sie den Photonenstrom nicht mit dem Sonnenwind, der aus Protonen usw. besteht und insgesamt weit weniger Impuls mit sich trägt.)



Figur 1.10 a: Von der Sonne abgewandter Kometenschweif, schematisiert.



Figur 1.10 b: Von der Sonne (oben rechts stehend) abgewandte Kometenschweife.

Der Komet Shoemaker-Levy ist auf seiner exzentrischen Ellipsenbahn um die Sonne dem grossen und massenreichen Planeten Jupiter zu nahe gekommen: Durch die unterschiedlich wirkenden Gravitationskräfte ist er in Stücke zerbrochen. Die Bruchstücke markieren den Bahnverlauf des Kometen, die Schweife weisen alle von der Sonne weg. Im Juli 1994 stürzten einzelne Bruchstücke auf den Jupiter ab und verursachten dort riesige Lichtblitze und Änderungen des "Jupiterwetters".

Zurück zum Photon. Sein Impuls ist ebenfalls von der Wellenlänge abhängig.

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

Licht weist offenbar auch solche Eigenschaften auf, die Sie bisher nur von Teilchen kannten. Deshalb sagt man: Licht zeigt neben den *Welleneigenschaften* auch *Teilcheneigenschaften*. Diese "Zwitterartigkeit" ist charakteristisch für Quantenobjekte.

Wieso merken wir im Alltag nichts von der Portionierung des Lichtes? - Die einfache Antwort lautet: Weil das Wirkungsquantum  $h$  so extrem klein ist ( $h \approx 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js). Nehmen wir einmal an,  $h$  wäre  $10^{20}$  mal grösser als in Wirklichkeit. Das neue  $h^*$  sieht zwar immer noch klein aus, aber ein Photon des gelben Lichts ( $\lambda = 580$  nm) hätte dann eine Energie

$$\text{von } E_{\text{photon}} = \frac{h^* c}{\lambda} = \frac{6.63 \cdot 10^{-14} \text{ Js} \cdot 3.0 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}}{5.8 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 34 \text{ J}$$

Oder anders gesagt: Eine ganz normale 60 W-Glühlampe würde pro Sekunde nur noch ein bis zwei helle Lichtblitze aussenden!

Woher hat die Konstante  $h$  ihren Namen, werden Sie sich vielleicht gefragt haben. - Unten sehen Sie Max Planck, eine Generation älter als Albert Einstein. Er hat im Jahr 1900 die Konstante gefunden. Er dachte sich bei der theoretischen Begründung des eben entdeckten, komplexen Gesetzes über die Wärmestrahlung, dass deren Energie portioniert sei. Lange hielt er seine geniale Idee nur für einen "Rechentrick" und die Quanten für eine Fiktion. Er blieb der Quantenphysik gegenüber stets skeptisch. Auch Einstein bekundete später Mühe mit seinem Kind. Mehr zum Streit über die Interpretation der Quantenphysik finden Sie im Additum 2.



Max Planck, der Gründervater der modernen Physik

### Aufgabe 1.6



Wird Licht von einem Spiegel reflektiert, so üben die Photonen einen Druck auf ihn aus, denn sie erfahren ja eine Impulsänderung pro Zeit.

Mit den Grössen der Mechanik wird:

$$\text{Leistung} = \text{Energie pro Zeit} \quad P = \Delta E / \Delta t$$

$$\text{Druck} = \text{Kraft pro Fläche} \quad p = F / A$$

$$\text{Kraft} = \text{Impulsänderung pro Zeit} \quad F = \Delta p / \Delta t$$

Bei der Reflexion findet eine Impulsumkehr statt, also ist  $\Delta p = 2p$

Weil beim Photon  $p = E / c$  gilt, und weil die Intensität  $I$  als Quotient von Leistung  $P$  und bestrahlter Fläche  $A$  definiert ist ( $I = P / A$ ), ergibt sich schliesslich eine einfache Beziehung für den Strahlungsdruck:

$$p_s = 2 \frac{I}{c} \quad (\text{Sie dürfen diese Beziehung für den Strahlungsdruck durch Substitution aus den oben angegebenen Grössen selber herleiten...})$$

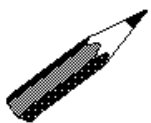
$I$  = Intensität in Watt pro  $\text{m}^2$ ,

$c$  = Vakuum-Lichtgeschwindigkeit  $\approx 3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

Berechnen Sie den Druck, welchen die Sonne an einem schönen Tag auf einen gegen sie gerichteten Spiegel ausübt ( $I \approx 1000 \text{ W/m}^2$ ). Vergleichen Sie diesen Wert mit dem Druck eines normalen Papierbogens ( $80 \text{ g/m}^2$ ), den man auf den waagrechten Spiegel legt.

### Merkwürdige Dinge, diese Photonen!

Wenden wir uns nochmals den Aufzeichnungen von Taylor zu. Die Punkte sind nicht regellos über die ganze Fotoplate verstreut. Betrachtet man das Bild von rechts nach links, variiert die Häufigkeit der Punkte.



### Aufgabe 1.7

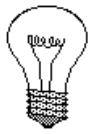
Zeichnen Sie zum Bild in Figur 1.8 (b) der Taylor-Aufzeichnungen die Häufigkeitsverteilung. Sie können dazu das darüberliegende Achsenkreuz benutzen. Die Kurve muss wiederum bloss qualitativ stimmen.

Die Häufigkeitskurve des unteren Bildes und die Intensitätsverteilung des oberen Bildes stimmen sehr gut überein. In Wahrheit sagen beide das gleiche aus: Sie beschreiben, wie gross die *Wahrscheinlichkeit* dafür ist, dass an einer bestimmten Stelle der Fotoplate ein Photon (Energiepaket) auftrifft. In hellen Regionen wurden viele Photonen registriert, in den dunklen wenige oder keine.

Die Auftreffpunkte der Photonen sind *zufällig*. Wiederholt man das Experiment, treten die weissen Punkte jedesmal an einem andern Ort auf. Die Häufigkeitsverteilung bleibt dabei aber dieselbe.

Weil der Auftreffpunkt zufällig ist, kann man nicht sagen, was das Photon zwischen dem Doppelspalt und der Fotoplatte macht. Oder anders gesagt: Man kann nicht berechnen, wo die einzelnen Photonen einer Lichtquelle auf der Fotoplatte auftreffen werden, auch wenn der Impuls vor dem Spalt in Betrag und Richtung bekannt ist! Dies ist eine experimentelle Tatsache. Nur die Wahrscheinlichkeit, wo sie auftreffen, lässt sich anhand der Häufigkeitsverteilung voraussagen.

Sie sehen, Quantenobjekte sind merkwürdige Gebilde. Vieles ist unfassbar, und vieles kann man sich nicht richtig erklären. Wer bestimmt denn, wo die Teilchen landen? - Über diese Frage streiten sich die Fachleute. Einstein wollte nicht an das Wirken des Zufalls in der Natur glauben und soll gesagt haben: "Gott würfeln nicht." Wenn Sie mehr über diesen Streit wissen möchten, müssen Sie das Additum 2 bearbeiten!



### Wir fassen zusammen:

Licht ist keine Welle und besteht auch nicht aus Teilchen. Licht ist ein Quantenobjekt.

Die Energie, die von Quantenobjekten transportiert wird, kommt portionenweise. Beim Licht heissen diese Portionen Photonen. Die Häufigkeitsverteilung der Photonen hinter einem Doppelspalt zeigt die gleiche Interferenzerscheinung wie die Intensitätskurve bei einer Welle. Deshalb ordnet man Licht eine Wellenlänge und eine Frequenz zu.

Photonen sind Energiepakete, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Sie besitzen einen Impuls und eine bestimmte Energie. Beide sind umgekehrt proportional zur Wellenlänge des Lichtes.

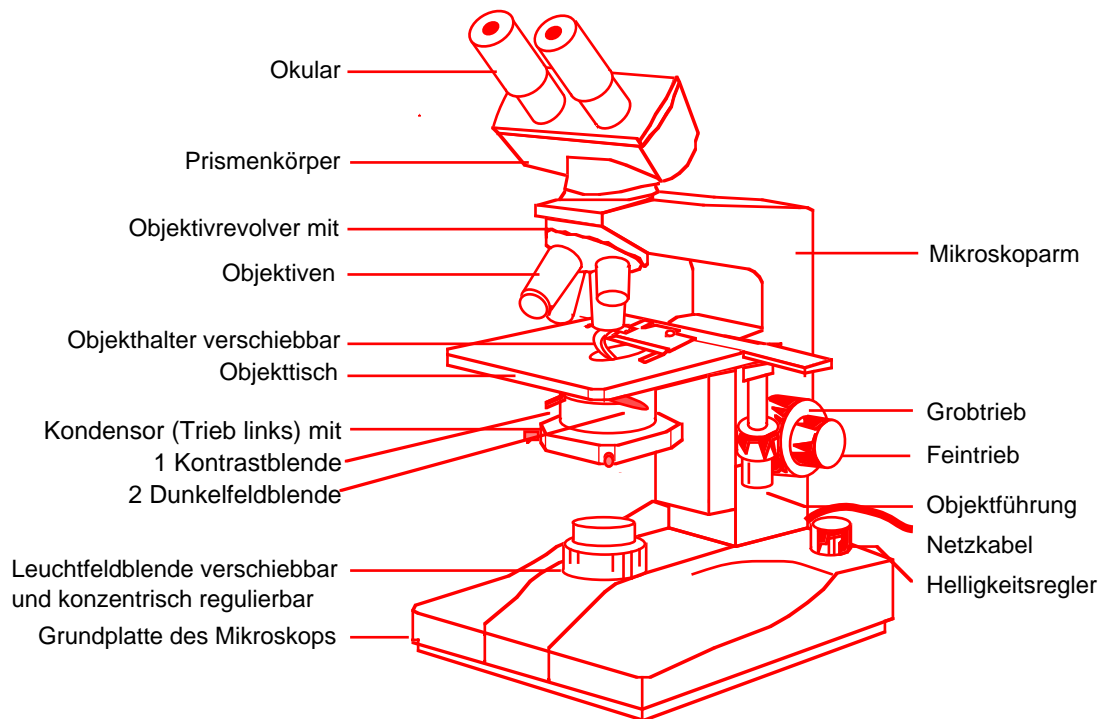
Die Auftreffpunkte von Photonen hinter einem Spalt können nicht vorausberechnet werden, auch wenn ihr Impuls vor dem Spalt in Betrag und Richtung bekannt ist! Nur die Häufigkeit, mit der die Photonen in einem bestimmten Gebiet auftreffen werden, lässt sich voraussagen.

## 1.4 Das Licht-Mikroskop

In diesem Kapitel werden Sie das Lichtmikroskop "unter die Lupe" nehmen. Wenn Sie sich schon einmal gefragt haben, wie gross die kleinsten sichtbaren Teilchen sind, dann werden Sie hier eine Antwort erhalten.

Sie sehen in Figur 1.11 die Darstellung eines Lichtmikroskops. Es ist nicht nötig, dass Sie die Bezeichnungen für die Teile auswendig lernen. Sie müssen nur die beiden Begriffe Okular und Objektiv voneinander unterscheiden können.

- Das *Objektiv* erzeugt im Mikroskop ein reelles Bild (wie ein Photoobjektiv).
- Das *Okular* dient als Lupe, um dieses Bild zu betrachten.



Figur 1.11: Beispiel eines modernen Lichtmikroskops

## Zwei Gesichtspunkte zur Beurteilung eines Mikroskops:

1) *Vergrößerung*: Die Vergrößerung gibt an, wievielfach grösser das Objekt dem Betrachter erscheint als es in Wirklichkeit ist. Ein einfaches Mikroskop besitzt zwei Linsen, eine im Objektiv und eine im Okular. Die Objektivlinse besitzt die stärkere Vergrößerung. Üblich sind Werte von 4 bis 400. Die Okularlinse hat normalerweise eine Vergrößerung von 10. Das ergibt für das Mikroskop eine totale Vergrößerung von  $4 \times 10 = 40$  bis  $400 \times 10 = 4000$ .

2) *Auflösungsvermögen*: Das Auflösungsvermögen gibt an, wie nahe zwei Objekte nebeneinander liegen dürfen, damit sie gerade noch getrennt wahrgenommen werden können.

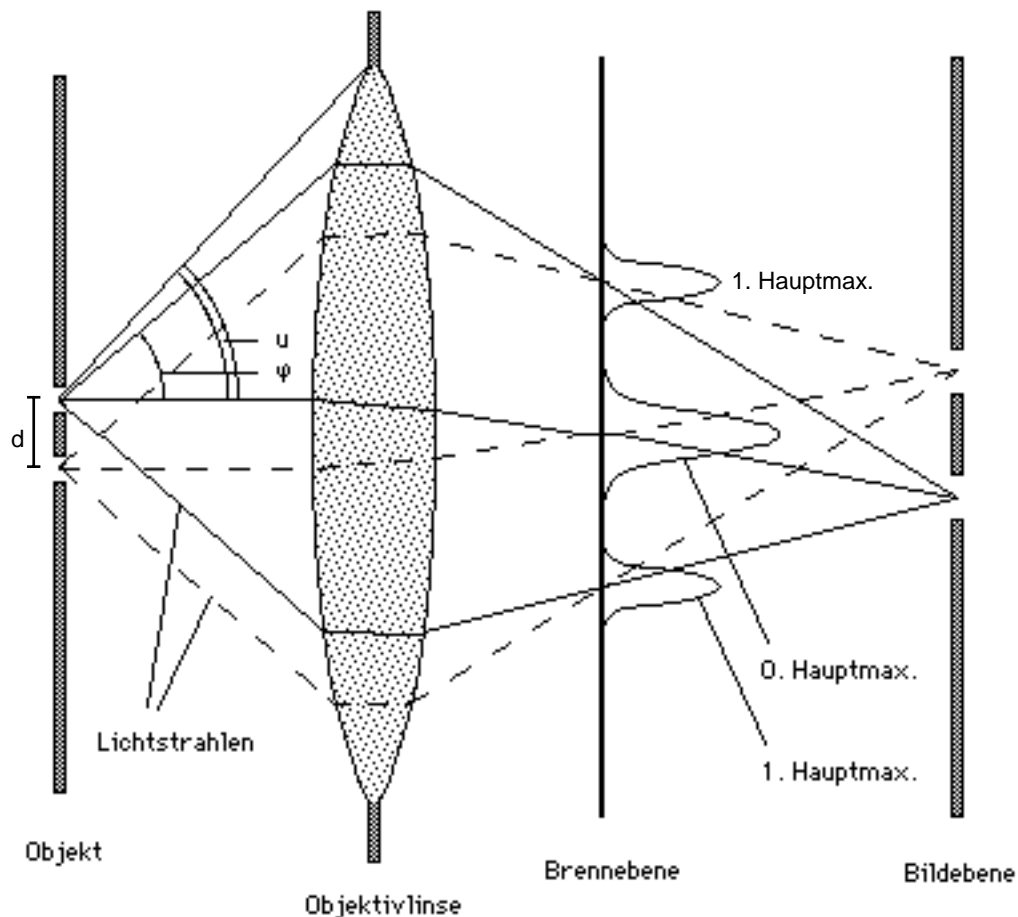
Diese beiden Merkmale bestimmen zusammen, wie gross die kleinsten Teilchen sind, die man sehen kann. Doch wie gross sind diese Teilchen? Sie meinen vielleicht, es käme nur darauf an, wie gross die Vergrößerung gemacht werden kann?

Damit haben Sie teilweise recht. Will man nämlich immer stärker vergrössern, so müssen die Linsen immer exakter geschliffen werden. Schon kleine Fehler in den Linsen liefern bei starken Vergrößerungen ein unscharfes Bild. Deshalb gibt es *technische Grenzen* bei der Produktion von immer stärkeren Linsen. (In der Praxis ist der Linsendurchmesser mindestens 1 mm.)

Der hauptsächliche Grund, wieso man nicht beliebig kleine Teilchen sehen kann, liegt aber woanders: Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops ist nämlich grundsätzlich begrenzt. Dabei handelt es sich um eine *physikalische, also um eine von der Natur gesetzte Grenze*, die prinzipiell nicht überschritten werden kann. Sie wollen wir etwas genauer untersuchen.

Zuerst müssen wir uns genauer anschauen, wie ein Lichtmikroskop funktioniert: Die Probe, die man betrachten will, liegt auf dem durchsichtigen Objektisch. Von unten wird sie von einer starken Lichtquelle durchleuchtet. Die Objektivlinse erzeugt ein vergrössertes Bild in der Bildebene. Man könnte es direkt betrachten. Ein modernes Mikroskop besitzt aber noch eine zweite Linse, das Okular: Wenn Sie am Mikroskop arbeiten, betrachten Sie das Bild durchs Okular, das wie eine Lupe funktioniert und nochmals etwa zehnfach vergrössert.

Als Objekt mit einer besonders einfachen Struktur nehmen wir einen Doppelspalt; für die Teile komplexerer Objekte gelten dieselben Überlegungen sinngemäss: Wie nahe ( $d$  in Figur 1.12) dürfen zwei Spalte in der Probe sein, damit sie noch als getrennte, helle Linien erscheinen?



Figur 1.12: Abbildung eines Doppelspalts im Lichtmikroskop (schematisch).

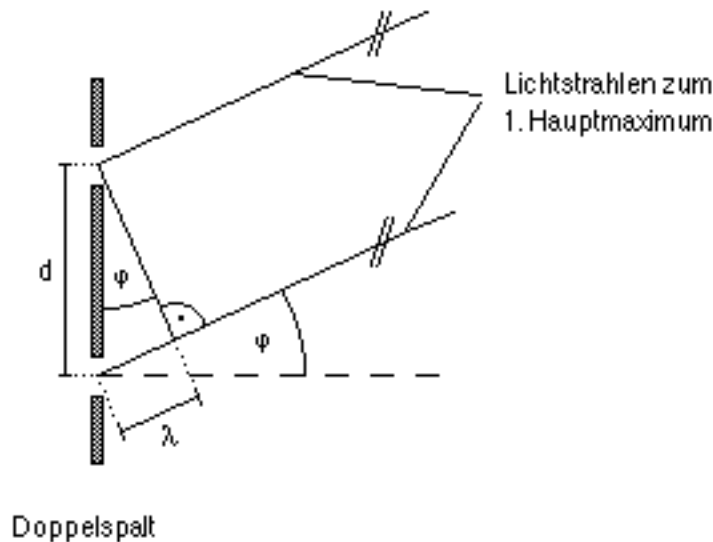
In Figur 1.12 sehen Sie schematisch die Abbildung eines Doppelspalts durch ein Lichtmikroskop. Die Brennebene hier entspricht der Schirmebene des "linsenlosen" Doppelspaltversuchs von Figur 1.9. Von den Spalten kommt das Licht nicht gleichmässig, sondern bildet die Hauptmaxima, wobei die Linse die Ausbreitungsrichtung ablenkt. (Hier sind nur das 0. und die beiden 1. Hauptmaxima eingezeichnet, weil das Licht der übrigen nicht mehr die Linse trifft.)

Die Einsicht in das Grundprinzip der Bildentstehung stammt vom Physiker und Mitbegründer der Zeiss-Werke *Ernst Abbé* (1840-1905), ist also relativ neu: Das Bild entsteht in der Bildebene durch Überlagerung der Lichtwellen, die am Objekt gebeugt und vom Objektiv abgelenkt worden sind. Die Hauptlichtmenge stammt natürlich von den verschiedenen Beugungsmaxima.

Versuchten Sie beispielsweise in der Figur 1.12 das Bild schon in der Brennebene zu betrachten, sähen Sie statt eines Doppelspalts drei helle Streifen, die vom 0. und den zwei 1. Hauptmaxima herrühren. Erst in der weiter entfernten Bildebene fügt sich das Licht wieder zum Bild des

Doppelspaltes zusammen. Nach Abbé ist es unbedingt notwendig, dass mindestens zwei Hauptmaxima von der Objektivlinse erfasst werden, damit ein Bild entsteht. Das führt zu einer Forderung für den Öffnungswinkel  $u$ , unter dem die Objektivlinse vom Objekt aus erscheint: *Der Öffnungswinkel  $u$  muss grösser sein als der Winkel  $\varphi$  des Lichts zum 1. Hauptmaximum.*

Folgendermassen können Sie Abbés Bedingung begründen: Stellen Sie sich vor, Sie wählen die Linse so klein, dass  $u < \varphi$  gilt. Sie blendeten also gewissermassen die 1. Hauptmaxima, und erst recht alle übrigen, aus. Dann wäre in der Brennebene nur noch ein Intensitätsbuckel vom 0. Hauptmaximum. Das ist aber dasselbe Bild, das Sie von einem Einzelspalt kriegten (Figur 1.3). Sie hätten dann die gesamte Information über die Distanz  $d$  und damit über die Struktur des Objekts, das Sie untersuchen möchten, verloren!



Figur 1.13: Strahlen zum 1. Hauptmaximum beim Doppelspalt.

Der Winkel  $\varphi$  soll nun quantitativ ausgedrückt werden. Es gilt nämlich (Figur 1.13) :

$$\sin \varphi = \frac{\lambda}{d}$$

wobei  $\lambda$  die Wellenlänge des einfallenden Lichtes ist. Damit kann man die Bedingung für das Auflösungsvermögen umformen:

$$u > \varphi \Rightarrow \sin u > \sin \varphi = \frac{\lambda}{d} \quad \text{und damit wird:} \quad \sin u > \frac{\lambda}{d}$$

Diese Bedingung beschränkt das Auflösungsvermögen des Mikroskops. Da  $u$  in der Realität nie  $90^\circ$  werden kann, ist  $\sin u$  immer kleiner als 1. Damit kann man die Abschätzung machen:  $d > \lambda$ . Dies bedeutet: Ist der Abstand zwischen den Spalten kleiner als die Wellenlänge des Lichtes, dann können wir die Spalten nicht mehr im Mikroskop erkennen. Wir können sogar noch allgemeiner werden und prägnant sagen:

Wenn ein Objekt kleiner ist als die Wellenlänge des Lichtes,  
dann können wir es im Lichtmikroskop nicht sehen.

In der Praxis heisst das beispielsweise: Wenn der Durchmesser eines Virus' kleiner als  $\lambda$  ist, kann es in einem Lichtmikroskop nicht mehr gesehen werden.

Eine Bemerkung muss man noch anfügen. Wir haben uns bei der Herleitung nur auf die von unten durchfallenden Strahlen abgestützt. Das ist richtig für die sogenannten Transmissions-

mikroskope. Es gibt aber auch Mikroskope, die mit Licht arbeiten, das von der Probe reflektiert wird. Die Lichtquelle ist dann oberhalb der Probe. Solche Geräte nennt man Reflexionsmikroskope. Die Formel für das Auflösungsvermögen gilt auch für diesen Typ. Die Herleitung ist aber noch anspruchsvoller.



### Aufgabe 1.8

Wie muss ich ein Mikroskop gestalten, damit das Auflösungsvermögen möglichst gross wird? Überlegen Sie sich eine Antwort. Diskutieren Sie sie anschliessend mit einem Kollegen oder einer Kollegin, der oder die gleich weit ist wie Sie. Vergleichen Sie Ihre Lösung mit der Lösung des Leitprogrammes. Erst dann fahren Sie mit dem Stoff weiter.

Wie sieht es aber in der Praxis aus? Durchmesser des Objektivs, Wellenlänge und Abstand der Probe zum Objektiv können nicht beliebig gewählt werden:

- Der Durchmesser der Objektivlinse ist durch die Grösse des Lichtmikroskopes beschränkt.
- Unsere Augen können nur Licht bis zu einer Wellenlänge von etwa 400 Nanometer (violett) sehen. Geringere Wellenlängen liegen im unsichtbaren Ultraviolett-Bereich.
- Der Abstand zum Objektiv ist durch den Schliff der Linse (im Extremfall Kugelform) fix vorgegeben ( $\text{Abstand} \geq \text{Brennweite}$ ).

Das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskopes ist dadurch beschränkt. Es kann nicht beliebig verbessert werden. Das ist der Grund, warum wir Atome (Durchmesser 0.1 bis 0.5 nm) mit dem Lichtmikroskop nicht sehen können.

Ein Trost bleibt Ihnen: Im Verlaufe dieses Leitprogrammes werden Sie andere Möglichkeiten kennenlernen, mit denen Objekte dargestellt werden können, die kleiner als die Wellenlänge des sichtbaren Lichtes sind.



### Wir fassen zusammen:

Das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops ist beschränkt.

Das Licht der Mikroskoplampe wird vom betrachteten Objekt gebeugt. Die Stärke dieser Beugung begrenzt also das Auflösungsvermögen.

Abbé hat herausgefunden: Nur wenn das Objektiv Licht vom 0. und vom 1. Hauptmaximum erfasst, kann die Struktur eines Objektes durch das Mikroskop aufgelöst werden.

Objekte, die kleiner sind als die Wellenlänge des verwendeten Lichtes, können im Lichtmikroskop nicht betrachtet werden.

## Lernkontrolle

So! Dieses Kapitel hat Ihnen viel Neues beschert. Wenn Sie noch etwas unsicher sind, studieren Sie ruhig nochmals die betreffenden Abschnitte. Dann gehen Sie durch die folgenden Aufgaben. Bedenken Sie: Wenn Sie etwas wirklich nicht verstehen, scheuen Sie nicht den Weg zu Ihrem Lehrer oder Ihrer Lehrerin. Sie werden Ihnen bestimmt weiterhelfen.



### Aufgabe 1.9

Nehmen Sie an, Sie würden nochmals das Experiment mit der Farbspraydose und einem Doppelspalt machen. Dabei würden Sie jedoch durch den rechten Spalt viel länger spraysen als durch den linken. Skizzieren Sie die Häufigkeitsverteilung.



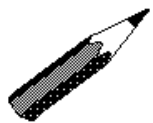
### Aufgabe 1.10

Wenn eine Welle durch einen Doppelspalt läuft, entsteht ein Interferenzmuster. Warum?



### Aufgabe 1.11

Was sagt die Intensitätskurve aus? Erklären Sie am Beispiel einer Wasserwelle.



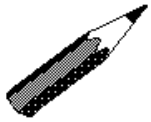
### Aufgabe 1.12

Halten Sie schriftlich mit einfachen Worten aber in vollständigen Sätzen fest, was ein Quantenobjekt ist.

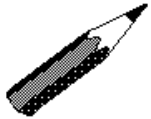


### Aufgabe 1.13

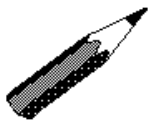
Nennen Sie vier Eigenschaften von Photonen.

**Aufgabe 1.14**

Die geringste Lichtintensität, die das menschliche Auge wahrnehmen kann, beträgt  $I = 10^{-10} \text{ W/m}^2$ . Angenommen, das Licht hätte eine Wellenlänge von  $\lambda = 5.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ ; die Pupillenöffnung besitze eine Fläche von  $A = 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ . Wieviele Photonen treffen dann pro Sekunde die Pupille? (Seite 371 im Buch "Metzler Physik" (Grehn 92)).

**Aufgabe 1.15**

Erklären Sie mit einfachen Worten, warum nicht beliebig kleine Objekte unter einem Lichtmikroskop gesehen werden können.

**Aufgabe 1.16**

Sie sind Physikerin oder Physiker und kriegen den Auftrag, ein Mikroskop zu entwickeln. Sie sollen dabei Viren von der Grösse von ca. 100 nm untersuchen können. Was tun Sie ?

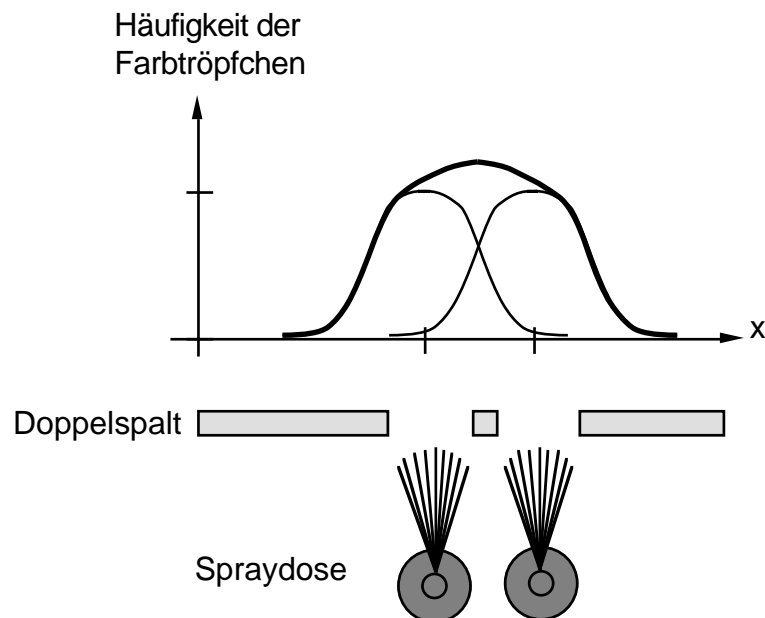
Hinweis: Studieren Sie die Erläuterungen zum Mikroskop, und notieren Sie in drei Sätzen eine Idee für ein solches Mikroskop. Verlieren Sie nicht zuviel Zeit! Wenn Sie keine Idee haben, studieren Sie die Lösung.

Hatten Sie Schwierigkeiten bei den Aufgaben der Lernkontrolle? Wenn ja, dann studieren Sie am besten nochmals die betreffenden Abschnitte. Bei grösseren Problemen können Sie sich auch an Ihren Tutor wenden. Es ist wichtig, dass Sie den Stoff im grossen und ganzen verstanden haben. Er dient als Grundlage für die folgenden Kapitel.

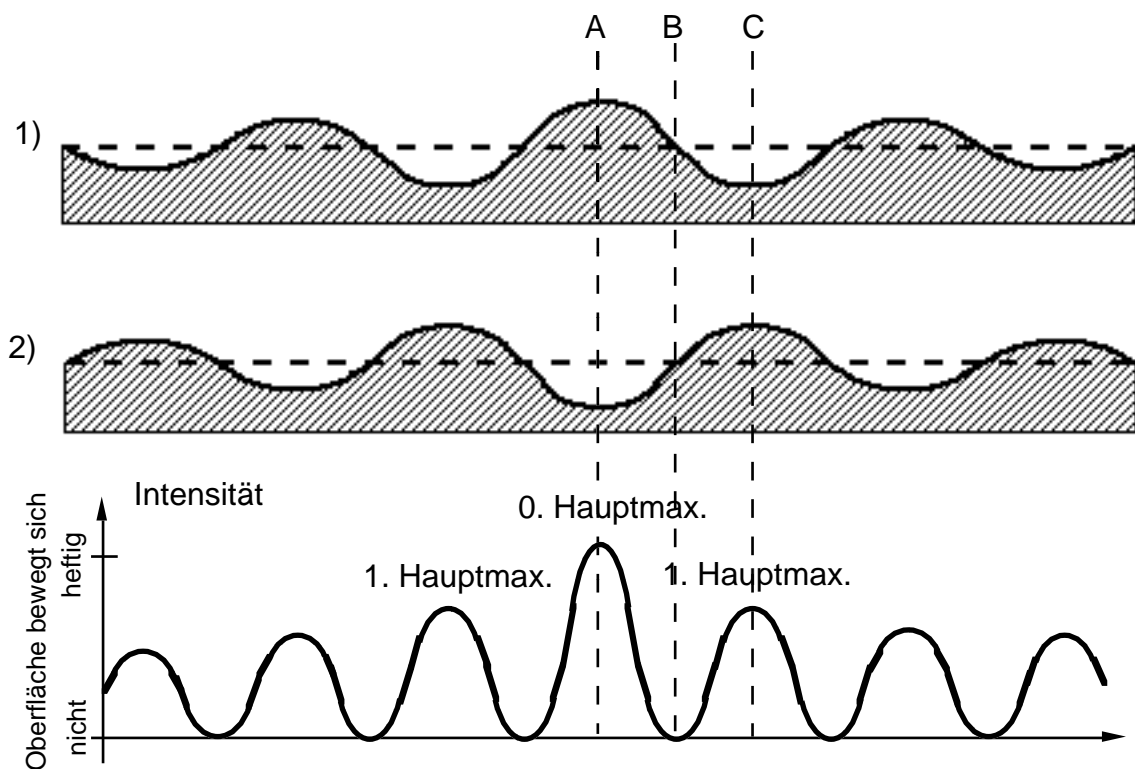
Beherrschen Sie den Stoff des ersten Kapitels vollkommen? - Wenn ja: Dann gehen Sie jetzt zum Kapiteltest. - Wenn nur bedingt... Ja, dann müssen Sie sich durch erneute Lektüre oder durch Erkundigungen bei Expertinnen und Experten ins Bild setzen. Die folgenden Teile bauen auf dem Kapitel 1 auf.

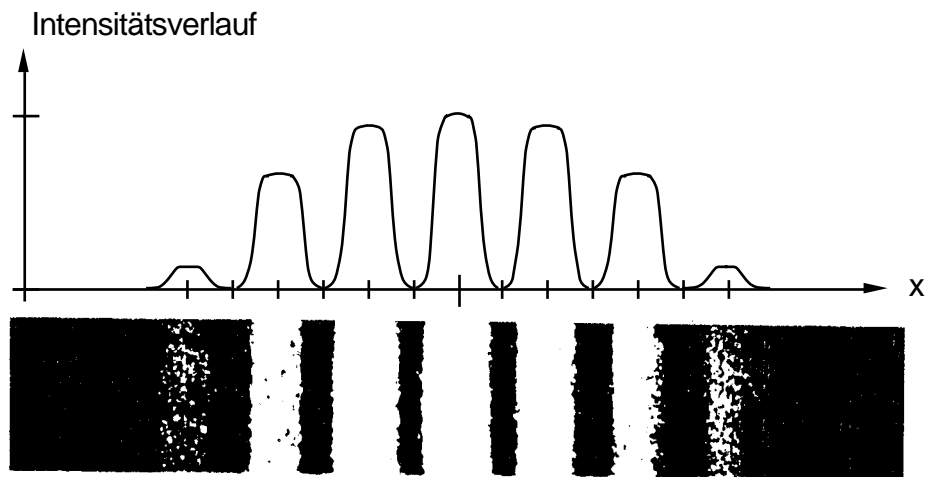
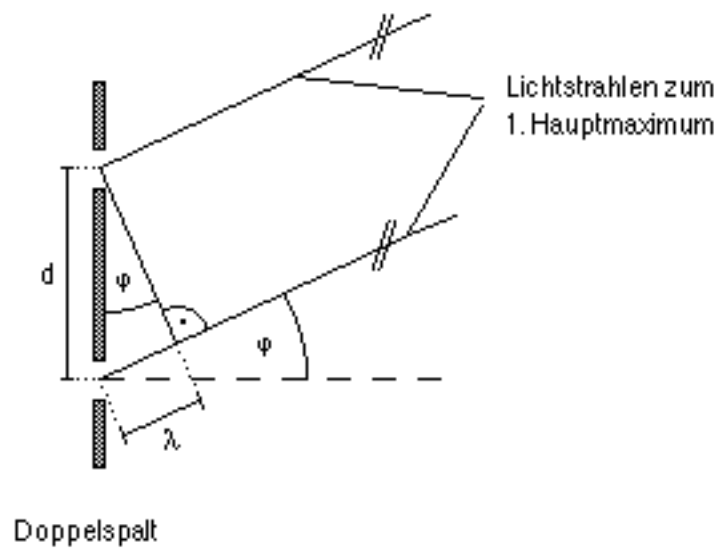
## Lösungen zu den Aufgaben

### Lösung 1.2



### Lösung 1.3



**Lösung 1.4****Lösung 1.5**

$$\frac{\lambda}{d} = \sin \varphi \approx \varphi \quad (\text{für kleine } \varphi)$$

Daraus folgt:

$$\frac{\lambda}{d} \approx \frac{S}{D} \quad (\text{für kleine } \varphi)$$

oder:

$$\lambda \approx \frac{S \cdot d}{D} \quad (\text{für kleine } \varphi)$$

Wir können die Wellenlänge also bestimmen, falls wir folgende Größen kennen:

- den Abstand  $S$  von einem Hauptmaximum zum nächsten auf dem Schirm
- den Abstand  $D$  vom Doppelspalt zum Schirm
- den Abstand  $d$  der zwei Spalte

Bemerkung:

Damit die Hauptmaxima weiter auseinanderzuliegen kommen, intensiver und schärfer werden, ersetzt man in Präzisionsexperimenten den Doppelspalt durch einen "Vielspalt", ein sogenanntes Beugungsgitter. Das Prinzip bleibt aber das gleiche.

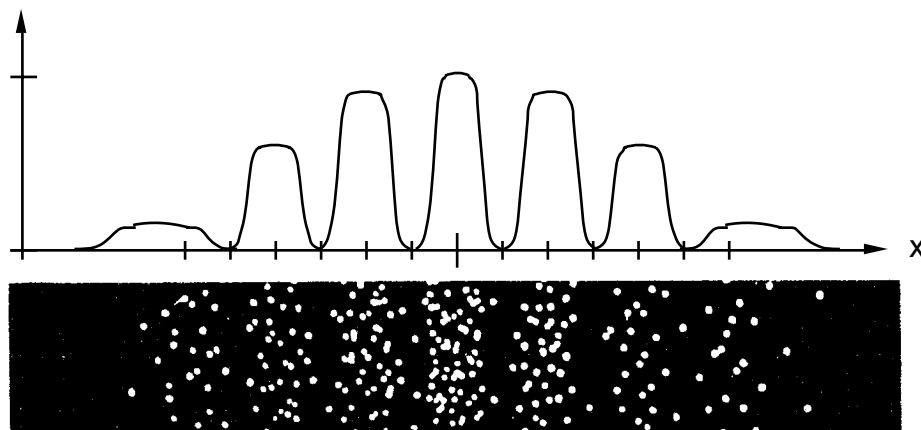
### Lösung 1.6

$$p_s = 2 \frac{1 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2}{3.0 \cdot 10^8 \text{ m/s}} = 6.7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Ws}}{\text{m}^3} = 6.7 \text{ } \mu\text{Pa}$$

$$p_{\text{Papier}} = \frac{mg}{A} = g \frac{m}{A} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0.08 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} = 0.8 \text{ Pa}$$

### Lösung 1.7

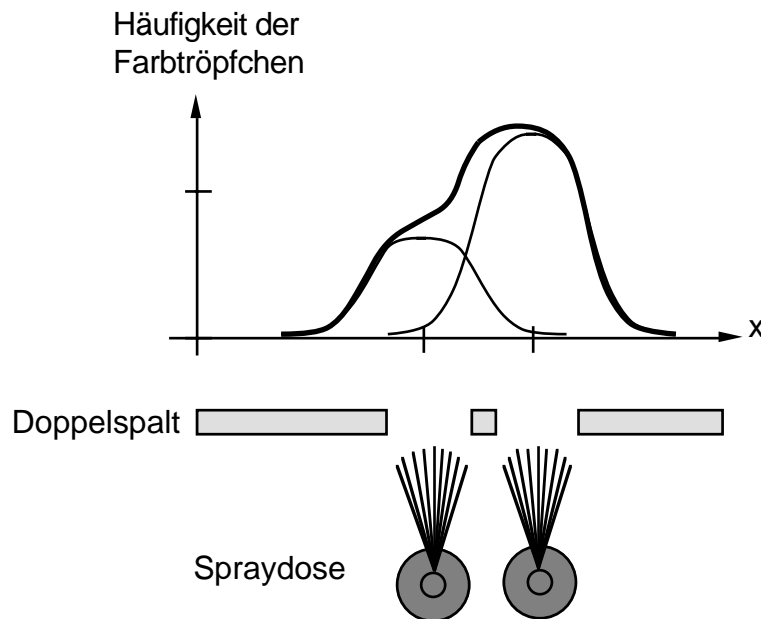
Häufigkeitsverteilung



### Lösung 1.8

Das Auflösungsvermögen wird möglichst gross, wenn man folgendes berücksichtigt:

- Man verwendet Licht mit einer möglichst kleinen Wellenlänge  $\lambda$ .
- Man macht den Abstand Objektiv-Probe im Vergleich zum Durchmesser der Objektivlinse möglichst klein. Dadurch wird  $\sin u$  möglichst gross ( $\sin u \rightarrow 1$ ).

**Lösung 1.9****Lösung 1.10**

Die beiden Spalten verhalten sich wie zwei Zentren von Kreiswellen. Durch die Überlagerung dieser beiden Kreiswellen ergeben sich Orte mit gegenseitiger Verstärkung und Orte mit gegenseitiger Auslöschung. Das nennt der Physiker Interferenzmuster.

**Lösung 1.11**

Die Intensitätskurve sagt aus, wie heftig sich der Wasserspiegel an den verschiedenen Punkten bewegt. Ist die Intensitätskurve bekannt, kann daraus die Wellenlänge berechnet werden.

**Lösung 1.12**

Quantenobjekte besitzen sowohl Eigenschaften von Wellen als auch Eigenschaften von Teilchen. Eine Welleneigenschaft ist die Fähigkeit, Interferenzerscheinungen hervorzurufen. Damit kann man dem Licht eine Wellenlänge und eine Frequenz zuordnen. Eine Teilcheneigenschaft ist die Portionierung von Energie und Impuls. Beim Licht heissen die Portionen Photonen.

**Lösung 1.13**

Die Photonen besitzen eine bestimmte *Energie* und einen *Impuls*. Beide hängen von der Wellenlänge ab. Photonen bewegen sich stets mit *Lichtgeschwindigkeit*. Ihr *Auftreffpunkt* ist *zufällig* und kann nicht vorausberechnet werden.

**Lösung 1.14**

Einfallende Leistung (Energie pro Zeiteinheit):

$$P_{\text{ein}} = I \cdot A$$

Energie eines einzelnen Photons:

$$E_{\text{Photon}} = \frac{hc}{\lambda}$$

Photonenrate (Anzahl Photonen pro Zeiteinheit):

$$\begin{aligned} \frac{\Delta N}{\Delta t} &= \frac{P_{\text{ein}}}{E_{\text{Photon}}} = \frac{I \cdot A \cdot \lambda}{h \cdot c} \\ &= \frac{10^{-10} \text{ W / m}^2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 5.6 \cdot 10^{-7} \text{ m}}{6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3.0 \cdot 10^8 \text{ m / s}} \\ &= 1.4 \cdot 10^4 \text{ Photonen pro Sekunde} \end{aligned}$$

**Lösung 1.15**

Der Durchmesser eines Objektes (z. B. Zellkern) kann mit dem Abstand  $d$  zweier Spalten verglichen werden. Das Licht der Mikroskoplampe wird also vom betrachteten Objekt auf beiden Seiten gebeugt. Das Ausmass dieser Beugung wird durch den Winkel  $\varphi$  angegeben, der zwischen dem 0. Hauptmaximum und dem 1. Hauptmaximum gemessen wird. Er ist von der Wellenlänge und vom Durchmesser des Objektes abhängig:  $\sin \varphi = \lambda/d$ . Nach Abbé muss der Anteil des 1. Hauptmaximums vom Objektiv erfasst werden, sonst können wir das Objekt nicht auflösen. Dies führt auf die Bedingung  $d > \lambda$ . Objekte, die kleiner sind als die Wellenlänge, können somit nicht mit dem Lichtmikroskop aufgelöst werden.

**Lösung 1.16**

Die Geometrie des Mikroskops kann man so arrangieren, dass  $\sin u \approx 1$  wird. Man erhält dann die Bedingung  $d \approx \lambda$ , wobei  $d$  die gerade noch auflösbare Länge und  $\lambda$  die Wellenlänge des verwendeten Lichts ist. Es gibt nur etwas, was Sie tun können um 100 nm aufzulösen: Sie müssen Strahlung nehmen mit  $\lambda < 100 \text{ nm}$ ! Diese liegt aber im unsichtbaren UV-Bereich. Man braucht also noch einen Detektor, der diese Strahlung sichtbar machen kann. Es gibt z.B. UV-empfindliche Fotoplatten.

Fazit: Sie können zwar die Viren nicht "live" mit diesem Lichtmikroskop sehen, Sie können sie aber dennoch untersuchen.

Aber auch dieses Verfahren hat Grenzen. Je kürzer die Wellenlänge, desto energiereicher ein Photon. Ab ungefähr  $\lambda = 100 \text{ nm}$  reicht die Energie eines Photons aus, einzelne Atome der Probe zu ionisieren. Damit wird die Probe aber beschädigt oder gar zerstört.