

4. Feinstaub durch Interferenz von Licht.

Inhalt

4.1. Ein Spiel mit vielen Farben.....	1
4.2. Beugungsfarben sind keine Interferenzfarben	3
4.3. Ein erstes Experiment	3
4.4. Ein zweites Experiment.....	4
4.5. Ein drittes Experiment.....	5
4.6. Thomas Youngs „Zwei-Spalt-Experiment“	6
4.7. I. Die Newtonschen Ringe	9

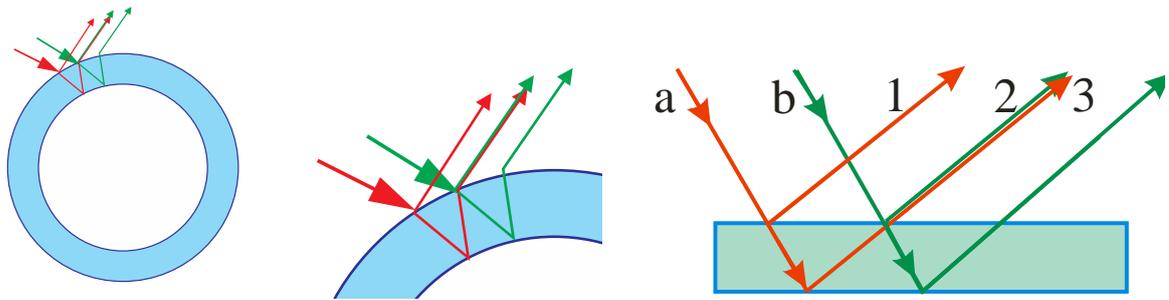
4.1. Ein Spiel mit vielen Farben

Bei der Durchführung des M&M-Experiments wurde zum ersten Mal in der Geschichte die Interferenz des Lichts genutzt, sagten wir. Der Begriff „Interferenz“ mag uns ein wenig erschrecken, aber wir werden fast täglich mit der Materie selbst konfrontiert. Meistens jedoch, ohne darüber nachzudenken. Versuchen wir zunächst einmal, das Phänomen zu erklären.

Das Farbenspiel einer Seifenblase oder eines Ölfilms auf einer Wasserpfütze zum Beispiel ist das Ergebnis optischer Interferenz, des Zusammenspiels vieler Lichtstrahlen.

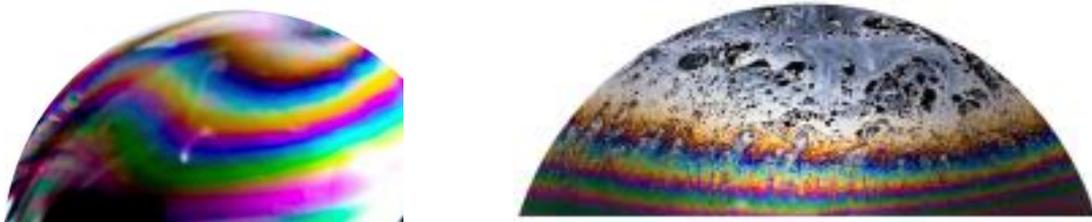


Wir versuchen, das zu verdeutlichen. Die Zeichnung unten links stellt eine Blase dar. Die zweite Zeichnung zeigt uns ein Detail davon. Das blaue Rechteck in der Zeichnung rechts stellt ebenfalls ein Stück der Seifenblase dar, oder ein Stück einer Ölschicht auf Wasser oder einer hauchdünnen transparenten Substanz auf unserem Handy. Wir beleuchten es schräg mit den Lichtstrahlen a und b.



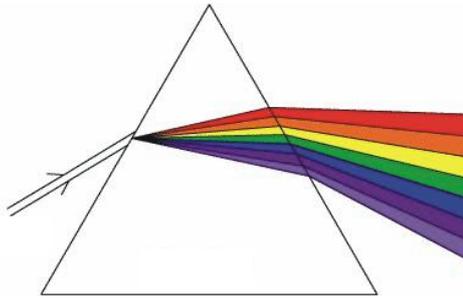
Betrachten Sie die Zeichnung oben rechts. Die Lichtstrahlen von a (in roter Farbe) und von b (in grüner Farbe), die darauf fallen, können teilweise an der Oberseite der Schicht reflektieren, aber auch an der Unterseite. Betrachten wir nun den Weg, den die einfallenden Strahlen a und b nehmen können. Die Strahlen (a)1 und (b)3 reflektieren an der Oberseite, die Strahlen (a)2 und (b)4 an der Unterseite der Schicht. Es ist zu erkennen, dass die reflektierten Strahlen 2 (grün) und 3 (rot) miteinander zusammenfallen. Allerdings hat der Strahl a2 einen längeren Weg zurückgelegt als der Strahl b3. Dieser minimale Unterschied in der Weglänge führt jedoch zu einem deutlichen Farbunterschied. Und dieser Vorgang wiederholt sich für die vielen Lichtstrahlen, die auf die Schicht treffen, daher die schönen Farbeffekte.

Schauen wir uns unsere Blase noch genauer an. Wir beobachten in ihrem so kurzen und bunten Leben, dass sich ihre Farbtöne ständig verändern. Diese Veränderungen werden durch die Schwerkraft verursacht.



Das Wasser in der Blase wird allmählich bis zum tiefsten Punkt gesaugt, wodurch manchmal fast horizontale Bänder in verschiedenen Farben entstehen. Schließlich hat sich zu viel Wasser am Boden der Blase angesammelt und an anderer Stelle ist sie so dünn geworden, dass sie platzt. Vorbei sind unsere schönen Farben. Unsere Blase könnte ihre Existenz möglicherweise verlängern und wir könnten ihre Farbveränderungen noch etwas länger studieren, wenn man sie in einem schwerkraftfreien Feld aufbläst. Ein Experiment, das man in einer Raumkapsel durchführen könnte? Die zusätzlichen Kosten für ein Rohr und etwas Seifenlauge werden das Weltraumbudget vermutlich nicht allzu sehr belasten.

4.2. Beugungsfarben sind keine Interferenzfarben



Beachten Sie den Unterschied zwischen Beugung und Interferenz. Ein Regenbogen ist ein Beugungsphänomen, das Licht zerfällt dort in seine einzelnen Farben. Die vielen Regentropfen sind wie viele Prismen, die das Licht in reine Farben „zerlegen“.

Interferenz ist so etwas wie das Gegenteil: kohärente Lichtstrahlen, die von derselben Lichtquelle, z. B. der Sonne, kommen, vereinen sich zu einem Zusammenspiel, einer Mischung aus vielen Farben.

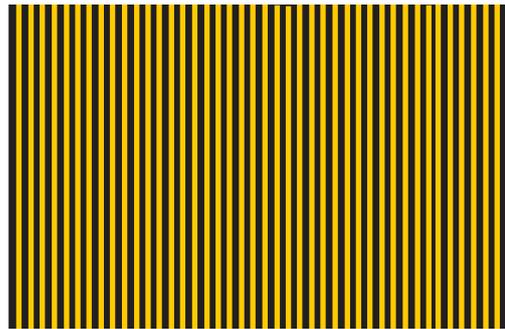


Ein Regenbogen zeigt uns reine Farben, die Interferenz gibt uns eine Mischung von Farben.

4.3. Ein erstes Experiment

Vor Jahren haben wir unser allererstes Interferenzexperiment durchgeführt. Wir wollten das Zwei-Spalt-Experiment von Young wiederholen (siehe unten) und verwendeten eine alte Natriumlampe, d. h. eine monochromatische Lichtquelle mit einfarbigem Licht. Das war der Typ, der damals auf unseren Autobahnen üblich war. Die Lampe selbst ist bis zu einem Meter

hoch und verbraucht kaum 90 Watt. Wir haben sie komplett mit Silberpapier umwickelt. Dann haben wir mit einer feinen Nadel zwei Löcher auf der hellen Seite im Abstand von knapp einem Millimeter hineingestochen. Dann haben wir den Raum verdunkelt. Und siehe da, an der Wand, etwa 5 Meter entfernt, tauchten Tausende von gelben Linien auf, die sich alle parallel zueinander verschachtelten. Wir stellten fest, dass die Lichtwellen extrem klein sind; es gibt zweitausend davon auf einem einzigen Millimeter.



4.4. Ein zweites Experiment

Als Nächstes haben wir mit weißem Licht experimentiert, also mit Licht, das noch alle Farben des Regenbogens enthält. Eine Glasfaser leitete das Licht von unserer Lichtquelle, einer einfachen Lampe, zu unserer „Punktlichtquelle“, einer Metallplatte mit einem Loch darin, die sich direkt vor einem Strahlenteiler Bs1 befand. Dort wurde das Licht in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Ein Teilstrahl ging über den flachen Spiegel m1 zu einem zweiten Strahlteiler, Bs2. Der zweite Teilstrahl ging über m2 zu Bs2.

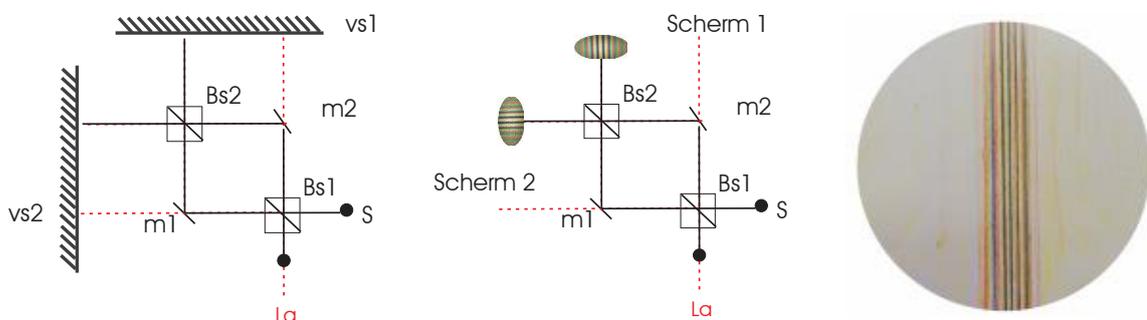
Auf den ebenen Bildschirmen vs1 und vs2 erwarteten wir, dass wir auch Interferenzlinien sehen würden, Linien in Farben. Schließlich haben wir mit weißem Licht gearbeitet. Aber nichts davon. Unser Aufbau war überhaupt nicht ausgerichtet. Also fangen wir noch einmal an, mit einem Laser, und ersetzen die flachen Bildschirme durch flache Spiegel. Dann entfernen wir die Spiegel m1 und m2 und positionieren die Planspiegel vs1 und vs2 so, dass der reflektierte Laserstrahl genau auf Bs1 zurückfällt. Dann positioniert man m1 so, dass das an vs1 reflektierte Laserlicht ebenfalls zum Laser zurückgelangt. Danach das Gleiche für den Spiegel m2 auf vs2.

Lege dann ein Stück Papier vor die Spiegel vs1 und vs2, damit sie das Laserlicht nicht reflektieren. Erst dann kann der Teiler Bs2 angebracht werden. Jede freie Seite von Bs2 reflektiert etwa 4 % des Lichts. Auch diese Reflexionen müssen sehr genau auf den Laser gerichtet werden. Wenn dies alles sehr genau gemacht wird, sieht man eine Reihe von Interferenzlinien im Laserlicht auf beiden Bildschirmen. Wenn Sie den Laser ausschalten und

weißes Licht verwenden, werden Sie tatsächlich mehrere farbige Linien sehen, die sauber nebeneinander liegen, wie in der Zeichnung rechts dargestellt.

Es funktioniert einfach nicht, alle Teile mit der Hand richtig zu platzieren. Sie müssen jedes optische Bauteil mit Hebeln mit Stellschrauben versehen, damit Sie seine Bewegungen entsprechend den drei Achsen genau verlangsamen und steuern können. Es ist also wirklich keine leichte Aufgabe, den Aufbau wie unten schematisch dargestellt nachzubauen. Es regt zum Nachdenken darüber an, mit welchem Grad an Genauigkeit wir unsere weiteren Aufbauten bauen müssen.

Wir nennen einen solchen Interferometertyp einen „offenen“ Typ. Die beiden Teilstrahlen nehmen jeweils einen anderen Weg. Man kann nie wirklich sicher sein, ob der Weg Bs1, m1, Bs2 tatsächlich die gleiche Länge hat wie der Weg Bs1, m2, Bs2, und zwar auf einen mm genau. Wir fragen uns, ob eine Art Interferometer existiert oder entwickelt werden kann, bei dem die beiden Teilstrahlen in gewisser Weise getrennt bleiben und dennoch denselben Weg zurücklegen. Das scheint ein Widerspruch zu sein, aber vielleicht ist da ja etwas dran? Wir suchen also nach einer „geschlossenen“ Art von Interferometer.



4.5. Ein drittes Experiment

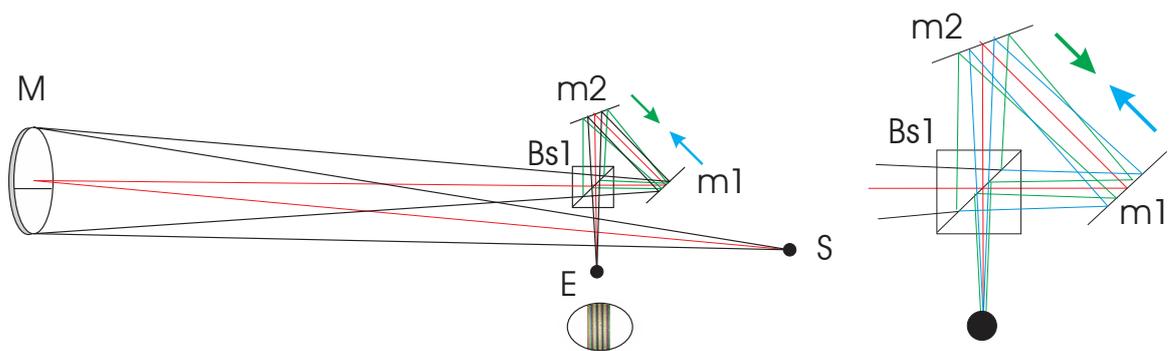
Betrachten Sie die Zeichnung unten links. Die punktförmige Lichtquelle S beleuchtet den Spiegel M. Der reflektierte Strahl erreicht den Teiler BS, wo sich der Lichtstrahl in zwei Teilstrahlen aufteilt.

Schauen wir uns die detaillierte Zeichnung auf der rechten Seite an. Ein Teilstrahl geht im Uhrzeigersinn über die Planspiegel m2 und m1 zurück zu Bs, und schließlich zum Beobachter in E.

Das andere Teilbündel geht gegen den Uhrzeigersinn über die Planspiegel m1 und m2 wieder nach Bs und schließlich zum Beobachter in E.

Tatsächlich legen beide Teilstrahlenbündel den gleichen Weg zurück, aber in entgegengesetzter Richtung. Das bedeutet, dass sie per Definition gleich lang sind. Damit haben wir aber nicht mehr eine „offene“ Anordnung, bei der sich die Teilbündel in der Länge um einen Teil eines Millimeters unterscheiden können, sondern eine „geschlossene“ Anordnung. Das bedeutet, dass es nicht mehr so schwierig sein kann, ein Interferenzbild zu erhalten.

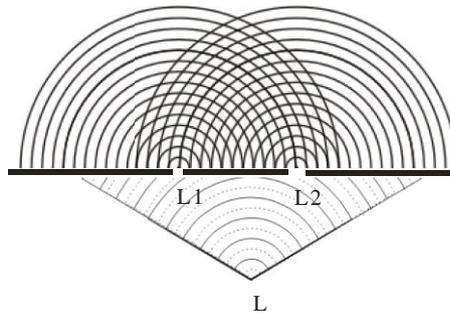
Wir konstruieren diese Anordnung tatsächlich und stellen fest, dass sich in E tatsächlich eine Reihe von Interferenzlinien zeigen. Die Aufgabe ist also erfolgreich. Vielleicht können wir eine solche „geschlossene“ Anordnung, eine Anordnung in Form eines Dreiecks - B1, m2, m1 - später noch nutzen.



4.6. Thomas Youngs „Zwei-Spalt-Experiment“.

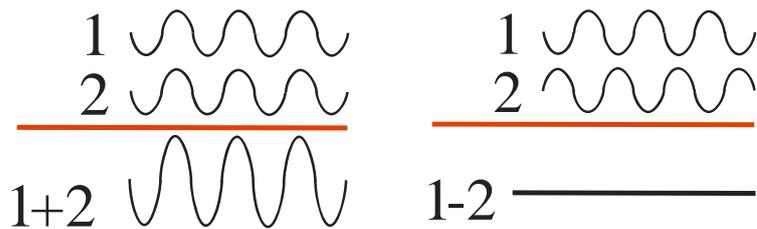
Beziehen Sie sich auf unser erstes Interferenzexperiment, bei dem wir eine große monochromatische Lampe verwendet haben. Zwei nebeneinander liegende Nadellöcher im Silberpapier dienten jeweils als Lichtquelle und projizierten Tausende von dünnen Interferenzstreifen auf eine etwa fünf Meter entfernte Wand.

Es handelt sich um eine Abwandlung des Doppelspaltexperiments von Thomas Young aus dem Jahr 1805. In der Zeichnung unten können wir die Lichtquelle L mit der Natriumlampe und die beiden Lichtquellen L1 und L2 mit unseren Nadellöchern im Silberpapier vergleichen.



Die Zeichnung stellt all dies in einer flachen Ebene dar. In Wirklichkeit handelt es sich jedoch um Teile einer Reihe von konzentrischen Kugeln, die sich ständig ausdehnen und deren Wellen von einer Lichtquelle ständig in eine andere eindringen.

Vergleichen Sie es mit Wellen im Wasser. Wirft man zwei Steine gleichzeitig und in geringem Abstand voneinander ins Wasser, so sieht man, wie die von einem Stein verursachten Wellen die Wellen des anderen „durchdringen“.



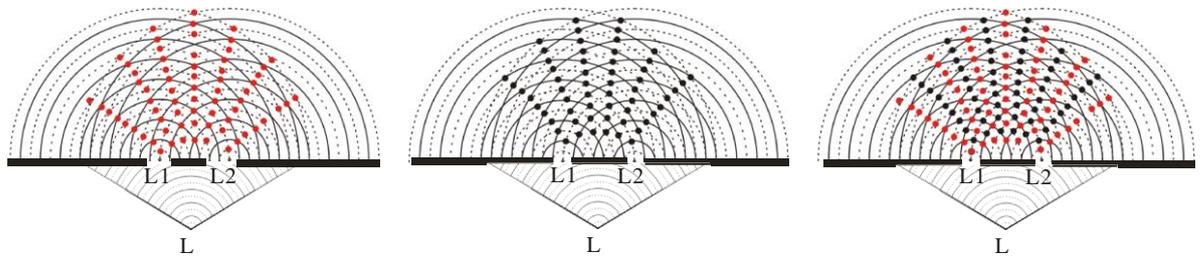
Wo zwei Wellenkämme zusammenlaufen, entsteht ein höherer Kamm, wo zwei Wellentäler zusammenlaufen, ein tieferes Tal. Wo ein Scheitel ein Tal füllt, bleibt das Wasser auf seinem ursprünglichen Niveau.

Licht ist auch eine Wellenbewegung, aber zweitausend Wellen gehen in einen Millimeter über. Hat man hier zwei zusammenfallende Wellenberge oder zwei zusammenfallende Täler, ist das Licht doppelt so stark. Wenn aber ein Scheitelpunkt mit einem Tal zusammenfällt, dann hat man das merkwürdige Phänomen, dass Licht zu Licht addiert zu ... Dunkelheit führt.

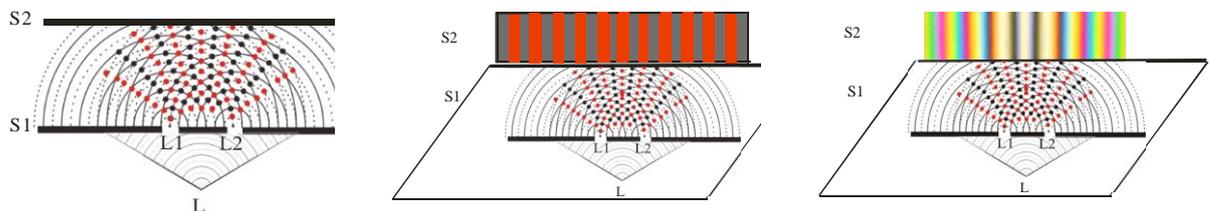
Sehen Sie sich die Zeichnung unten links an. Die gestrichelten Wellen zeigen die Täler, die durchgezogenen Wellen die Gipfel. Wo zwei Wellenberge oder zwei Wellentäler zusammentreffen, wurde ein roter Punkt gesetzt. Die Lichtintensität ist dort doppelt so hoch.

Die schwarzen Punkte auf der Zeichnung in der Mitte zeigen ganz analog die Stellen an, an denen eine Spitze ein Tal füllt. Dort heben sie sich gegenseitig auf und es gibt kein Licht.

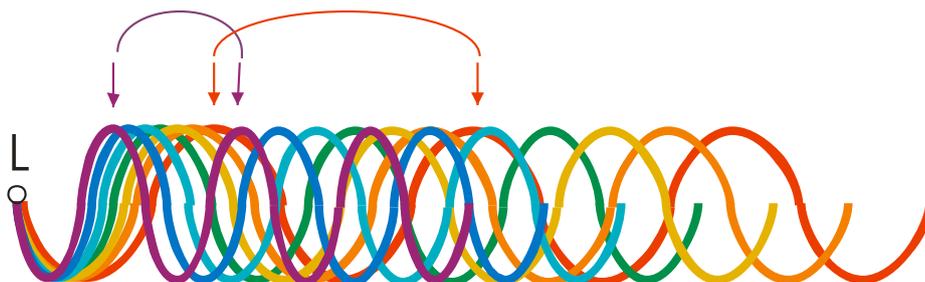
Die Zeichnung ganz rechts führt die beiden vorherigen zusammen.



Denken Sie daran, dass es sich in Wirklichkeit nicht um Kreise, sondern um Kugeln handelt, die sich immer weiter ausdehnen. Stellen Sie sich vor, dass die schwarze Linie oben in der Zeichnung unten links ein Bildschirm ist, den wir in der Draufsicht sehen. Betrachten Sie ihn in der Zeichnung in der Mitte in der Vorderansicht. Wir sehen darauf die Projektionen der verschiedenen Linien, wie wir sie bei dem Experiment mit der großen Natriumlampe an unserer Wand gesehen haben. Wenn wir nicht mit monochromatischem Licht, sondern mit weißem Licht arbeiten, zeigen sich Streifen in Interferenzfarben, wie ganz rechts dargestellt.



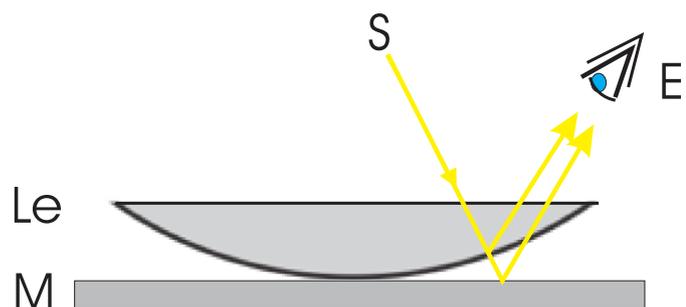
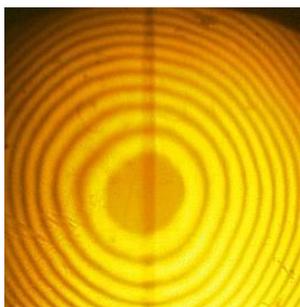
Bei weißem Licht sind nur wenige Interferenzlinien zu sehen. Die verschiedenen Farben haben jeweils eine unterschiedliche Wellenlänge. Zum Beispiel ist die Wellenlänge von rotem Licht fast doppelt so groß wie die von violetterem Licht.



Nach einigen Wellenlängen sind sie schnell nicht mehr synchron zueinander, so dass sich die einzelnen Farben wieder überschneiden. Ihre Farben vermischen sich und ergeben zusammen wieder weißes Licht. Interferenzexperimente mit weißem Licht erfordern daher eine größere Genauigkeit als Experimente mit Licht von nur einer Farbe.

4.7. I. Die Newtonschen Ringe

Die sogenannten Newtonschen Ringe sind ebenfalls ein Interferenzphänomen. Newton berichtete von ihnen, konnte sie aber nicht erklären, weil er das Licht nicht als Wellenbewegung, sondern korpuskular, als kleine Teilchen sah. Das Bild links zeigt eine Draufsicht, die Zeichnung rechts einen Querschnitt. In der Zeichnung sehen wir eine flache konvexe Linse Le , die auf dem Spiegel M liegt. Ein Strahl von der Lichtquelle S beleuchtet den gesamten Spiegel. Nur ein kleiner Teil davon ist dargestellt. Ein Strahl geht durch die Linse und wird an der Unterseite reflektiert. Ein anderer Teil geht durch den Spiegel und wird an ihm reflektiert. Beide Lichtstrahlen werden von dem Auge in E empfangen.



Man muss sich vorstellen, dass zahlreiche Lichtstrahlen auf der gesamten Linsenoberfläche dies tun, und dass Lichtstrahlen, die am Boden der Linse reflektiert werden, mit anderen Lichtstrahlen in der Nähe zusammentreffen, die auf dem Glas direkt daneben reflektiert werden. Diese Strahlen vereinigen sich und bilden die verschiedenen Interferenzkreise.

Wir können dies mit einem Stück Seifenblase vergleichen, bei dem das Licht sowohl von der Oberfläche als auch vom Boden reflektiert wird. Hier wurde das Stück Seifenblase durch den offenen Raum zwischen Linse und Spiegel ersetzt. Das „Stück“ besteht hier aus dem offenen Luftraum zwischen Linse und Spiegel. Das Prinzip bleibt jedoch dasselbe.

¹ <https://nl.wikipedia.org/wiki/Newtonring#/media/Bestand:Newton-rings.jpg>