# Beugung und Interferenz

## Irisierende Wolken

An dünnen Wolkenschleiern sieht man bisweilen, in nicht zu großem Winkelabstand von der Sonne, perlmuttartige, zarte Farben in unregelmäßigen Flecken. Diese Erscheinung ist nicht besonders selten, wird aber wegen der Blendung häufig nicht bemerkt. In günstigen Fällen bieten die irisierenden Wolken ein Schauspiel von leuchtend buntem Glanz.

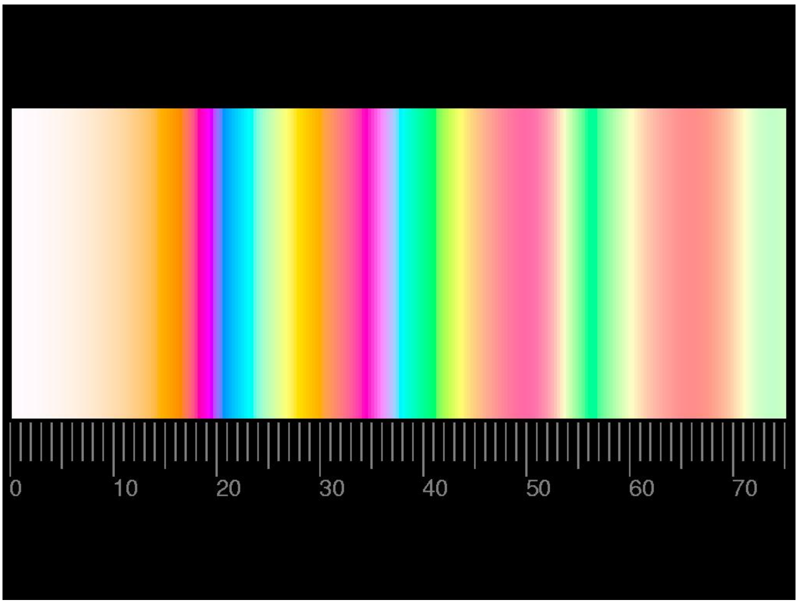


Bild 1: Berechnete Farben irisierender Wolken. Die Skala unter dem Spektrum gibt das Produkt aus Winkelabstand zur Sonne (in Grad) und Tröpfchengröße (in Mikrometern). Die Farben sind jeweils in maximaler auf dem Bildschirm darstellbarer Helligkeit aufgetragen; in Wahrheit nimmt die Helligkeit von links nach rechts stark ab, ähnlich wie in Bild 5 unten von der Mitte zum Rand.

Beugung des Sonnenlichts an winzigen Wassertröpfchen ist die Ursache des Irisierens; notwendige Bedingungen dafür sind über größere Bereiche einheitliche Tropfengrößen (sonst mischen sich alle Farben zu Weiß, wie es meist geschieht), sehr geringe Abmessungen der Tropfen, und eine so geringe Dichte der Wolken, daß die Sonne noch gut durchscheinen kann.

Diese Bedingungen sind in fast idealer Weise über einer Tasse mit heißem schwarzen Tee erfüllt. Der Tee bildet ein hauchdünnes Häutchen an seiner Oberfläche, das Flüssigkeits- und Luftwirbel verhindert. Über der Oberfläche kondensieren aus dem Dampf Tröpfchen, die schweben bleiben und mit freiem Auge gerade noch wahrnehmbar sind. Diese zarte Wolke über dem Tee zeigt im Sonnenlicht das Irisieren mit an Wolken im Freien nur selten gesehener Farbtiefe. Das Spektrum der beobachteten Farben zeigt Bild 1.

Diese Farberscheinungen sind ein Beispiel für das Zustandekommen von Farben durch Beugung des Lichts. Die Möglichkeit der Beugung ergibt sich aus der Wellennatur des Lichtes, die Wellennatur des Lichtes erlaubt uns, viele interessante Phänomene zu deuten und quantitativ zu verstehen. Daher zunächst ein wenig Theorie.

## Lichtwellen: Beugung und Interferenz, das Huygenssche Prinzip

Bild 2 veranschaulicht ein wichtiges Experiment zum Nachweis der Wellennatur des Lichtes. Es handelt sich um ein berechnetes und etwas vereinfachtes Bild; aber in einer Wellenwanne kann man mit Wasser experimentell eine sehr ähnliche Situation erzeugen.

Licht breitet sich hinter einer Blende nicht nur gradlinig weiter aus. Je kleiner die Öffnung, desto größer ist die Aufweitung (Beugung) des „Strahls“ hinter der Blende, und im Fall von zwei sehr kleinen Öffnungen könnte es so aussehen wie in Bild 2 gezeigt. Durch Interferenz

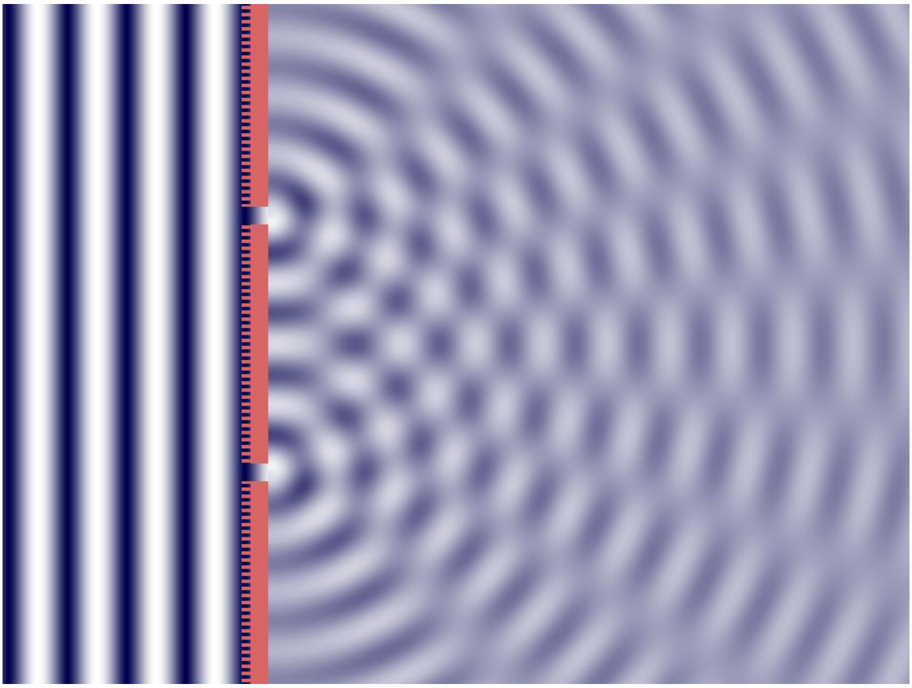

Bild 2: Beugung und Interferenz: von links falle eine Welle auf eine absorbierende Blende ein. Die Blende habe zwei winzige Löcher (Spalte); jenseits der Blende geht von jeder Öffnung eine Kugelwelle aus: das Phänomen der Beugung. Die beiden Kugelwellen überlagern sich, und man sieht, wie sie sich in größerer Entfernung abwechselnd verstärken und abschwächen: dies nennt man Interferenz.

löschen sich die Wellen unter bestimmten Winkeln aus.

Dieses Experiment kann man mit Licht selbst und mit einfachsten Mitteln durchführen: In ein Stück Aluminiumfolie werden mit einer Nähnadel zwei möglichst gleiche kleine Löcher gestochen, und zwar dicht nebeneinander, in etwa 1/2 mm Abstand. Das Folienstück mit den Löchern hält man dicht vor das Auge und beobachtet dadurch den Glühfaden einer klaren Glühbirne aus größerer Entfernung. Ein

Halogen-Birnchen (Lämpchen eines Auto-Scheinwerfers) ohne Reflektor eignet sich sehr gut für diesen Versuch. Man sieht ein Bild ähnlich Bild 3 Hätten wir nur ein Loch gestochen, so würden die feinen Streifen fehlen (Abb. 4).

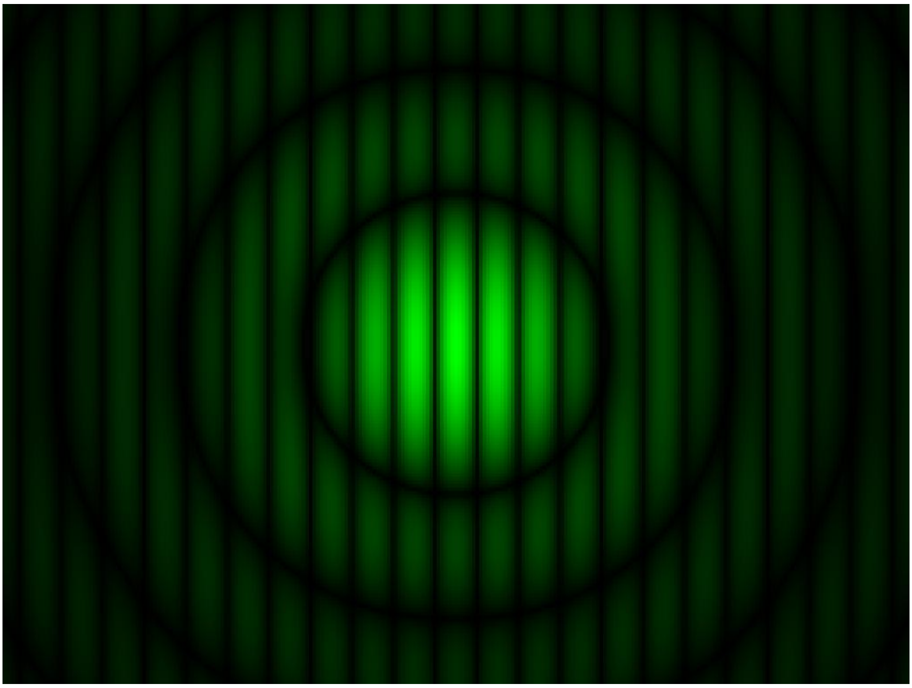

Bild 3: So sieht man eine entfernte, annähernd punktförmige Lichtquelle durch zwei kleine, dicht nebeneinander in eine Alufolie gestochene Löcher. Die Streifen im oberen Bild kommen durch den in Abb. 2 gezeigten Überlagerungseffekt zustande. Das Streifenmuster wird etwas deutlicher gesehen, wenn ein Farbfilter in den Strahl gehalten wird (Rot oder Grün am besten).

Genau so wie in Abb. 3 sieht das Bild auch auf der Netzhaut des Auges aus, nur kleiner; und es ist klar, daß man das Auge auch durch

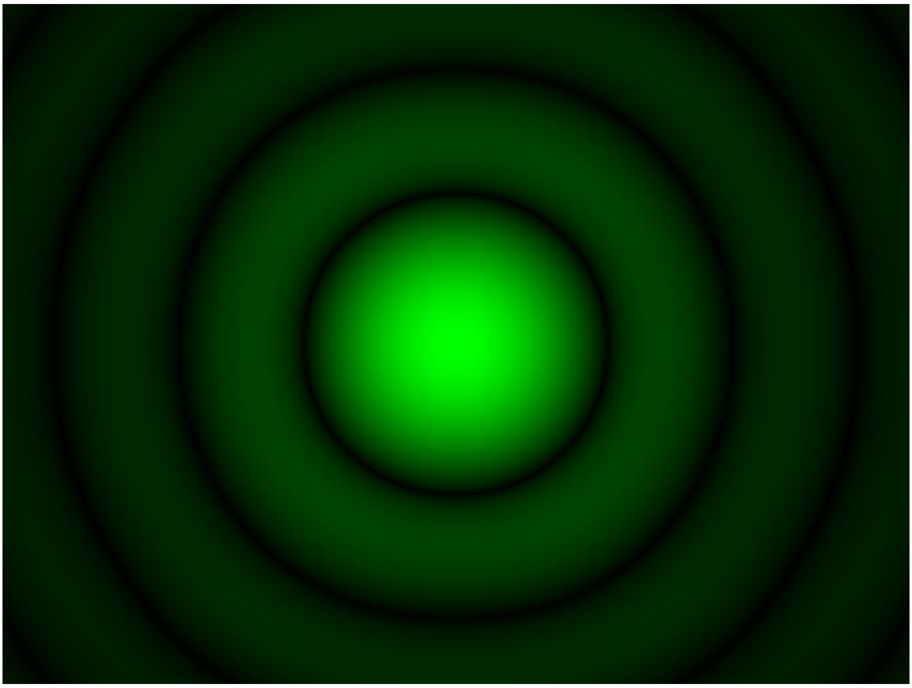

Bild 4: So sieht man eine entfernte, annähernd punktförmige Lichtquelle durch ein einzelnes kleines Loch.

einen Photoapparat ersetzen kann und so die wechselnde Auslöschung und Verstärkung als Schwärzungsstreifen auf dem Film festhalten kann.

Der Grund dafür, daß wir in dem besprochenen Experiment mit der winzigen Doppellochblende mehr Struktur als nur das besprochene Streifenmuster sehen, ist, daß es uns nicht gelungen ist, ein Loch zu stechen, dessen Durchmesser klein gegenüber der Wellenlänge des Lichtes ist.

Untersuchen wir die Beugung an einer Lochblende, diesmal an einer einzigen Öffnung, genauer. In Abb. 4 ist dargestellt, wie sich auf einem weit entfernt dahinter befindlichem Schirm (oder einer Photoplatte, oder der Netzhaut des Auges) das Licht auf konzentrischen Kreisen völlig auslöscht.

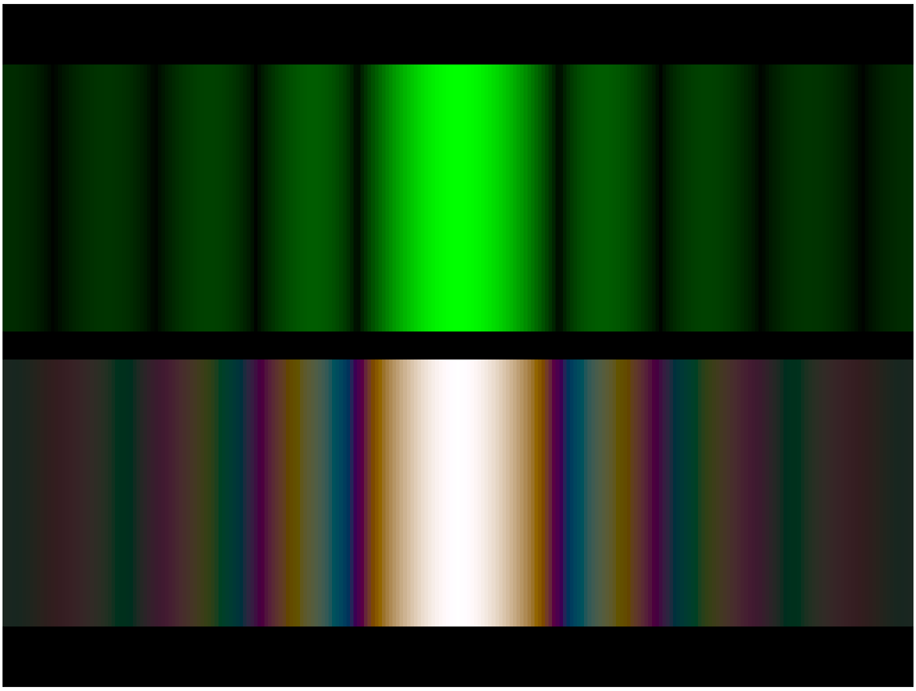

Bild 5: Beugung am Spalt. Oben: monochromatisches Licht, unten: weißes Licht.

Die Berechnung der Radien dieser Kreise führt auf höhere Funktionen (Besselfunktionen), deren Kenntnis wir hier nicht voraussetzen wollen. Wir wollen uns statt dessen überlegen, wie die Auslöschung in einer geometrisch noch einfacheren Situation, bei der Beugung am Spalt, zustandekommt. Abb. 5 zeigt die Helligkeitsverteilung des Beugungsbildes, und wir können mit Recht voraussetzen, daß die Abstände der dunklen Streifen von der Mitte näherungsweise mit den Radien der

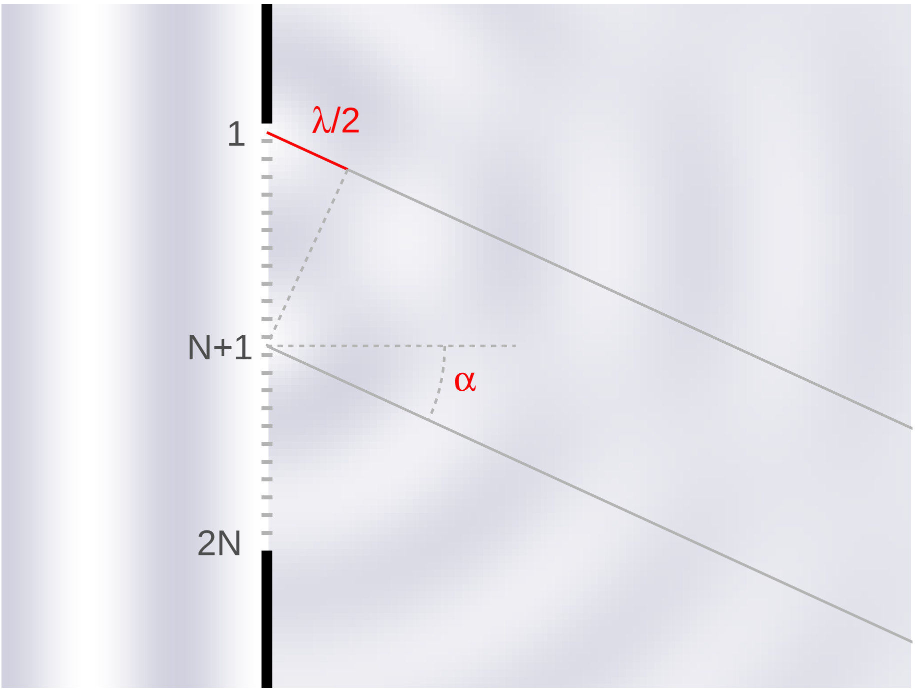


Bild 6: Beugung am Spalt: Von links fällt eine Welle ein. Wir denken uns den Spalt in eine gerade Anzahl $2N$ sehr schmale Bereiche zerlegt, von denen jeweils eine Kreis-(bzw. Zylinder-)welle ausgeht. Hier werden zwei dieser Bereiche betrachtet, der mit der Nummer 1 und der mit der Nummer $N+1$. Nur die von diesen Bereichen ausgehenden Teilwellen sind im Untergrundbild überlagert dargestellt. Unter dem Beobachtungswinkel $\alpha$ beträgt der Wegunterschied der beiden Elementarwellen genau $\lambda/2$ (rot gezeichnet), d. h. unter diesem Winkel löschen sich diese beiden Beiträge gegenseitig aus, wenn sich die Wellen in großer Entfernung (oder im Auge des Beobachters) überlagern. Für die von den Bereichen 2 und $N+2$ ausgehenden Wellen gilt dies genauso und ebenso für alle weiteren, somit gibt die Summe über alle Teilbereiche unter diesem Winkel Null: in Richtung des Winkels $\alpha$ wird kein Licht abgestrahlt.

dunklen Kreise übereinstimmen, wenn Lochdurchmesser und Spaltbreite gleich sind.

Abb. 6 gibt die Verhältnisse für die erste Auslöschung an. Die Wellen entlang der beiden eingezeichneten Strahlen haben einen Gangunterschied von einer halben Wellenlänge und löschen sich daher aus, wenn sie sich in großer Entfernung (im Auge des Betrachters oder auf einem Schirm) überlagern. Der Abstand der beiden herausgegriffenen Bereiche im Spalt ist genau die halbe Spaltbreite. Aus der Skizze entnehmen wir den Winkel für die erste Auslöschung

$$\sin \alpha_{0,1} = \frac{\lambda/2}{d/2} = \frac{\lambda}{d} \tag{1}$$

und $\alpha_{0,1}$ ist auch ungefähr der Winkelabstand der ersten Auslöschung vom Zentrum im Fall der kreisförmigen Blende. (Die exakte Rechnung liefert einen um 22% größeren Wert.)

Die Überlegung, die wir soeben angestellt haben, ist Huygens und Fresnel nachempfunden. Nach Huygens kann man sich alle Punkte einer Wellenfläche als Ausgangspunkte von neuen Kugelwellen denken, deren Einhüllende dann die Wellenfläche zu einem späteren Zeitpunkt darstellt. Fresnel änderte das Verfahren geringfügig ab: wieder ist jeder Punkt einer herausgegriffenen Wellenfläche als Ursprung neuer Wellen zu verstehen, und diese sind an dem betrachteten Ort, unter Berücksichtigung ihrer Phasenverschiebung gegeneinander, zu addieren. Die mathematische Form dieser mehr intuitiv gefundenen Vorschrift stammt von Kirchhoff und ist doch noch ein bißchen komplizierter, als man nach den Fresnelschen Vorstellungen denken würde. (Der daran interessierte Leser findet die Kirchhoffsche Formel in Lehrbüchern der theoretischen Physik, Optik oder Elektrodynamik.)

Hier sei noch ein auf den ersten Blick verblüffendes Theorem erwähnt, das sich mit den Huygens-Fresnelschen Vorstellungen verstehen läßt. Stellen wir uns zwei Blenden vor, die sich zu einer lichtundurchlässigen Fläche ergänzen, wenn man sie ineinanderlegt, also z. B.

eine Lochblende und ein kleines Scheibchen in der Größe des Loches. Das von Babinet gefundene Theorem besagt, daß die Beugungsmuster der beiden Blenden in großem Abstand gleich sind. Zum Beweis betrachten wir in Gedanken eine Folge von vier Experimenten. Ein Lichtbündel komme von einer weit entfernten, annähernd punktförmigen Quelle. Das abgebeugte Licht wollen wir in einem Punkt A messen, der außerhalb des direkten Lichtbündels liegen soll. Im ersten Fall schirmen wir das einfallende Licht durch eine undurchlässige Blende völlig ab. Im Punkt A weit dahinter ist es dunkel. Dann denken wir uns als zweites eine kleine Öffnung in die Blende geschnitten; durch Beugung erhalten wir jetzt eine gewisse Intensität in A. Die elektromagnetische Welle in A ist als Überlagerung der von den Punkten der Blendenöffnung ausgehenden Kugelwellen aufzufassen. Als nächstes wird drittens nur der im zweiten Fall fehlende Teil als Blende angebracht. Wieder ergibt sich die Welle in A als Summe von Kugelwellen, die diesmal von der Fläche außerhalb des Hindernisses kommen. Jm letzten, vierten Fall schließlich halten wir überhaupt keine Blende in den Strahl. Jetzt ist es im Punkt A wieder dunkel, die von der gedachten Blendenfläche ausgehenden Kugelwellen zerstören sich durch Interferenz. Dies sind aber genau die Beugungswellen von Fall 2 und 3 zusammen, die sich zu Null addieren, m. a. W., diese Beugungswellen müssen entgegengesetzt gleich sein. Dies bedeutet aber, daß die Intensitäten, die proportional zu den Amplitudenquadraten sind, in beiden Fällen gleich sind!

Man wundert sich vielleicht, daß Beugungsphänomene nur höchst selten außerhalb des Laboratoriums zu beobachten sind. Dies liegt allerdings zum Teil daran, daß die Erscheinungen nicht als solche erkannt werden, zum Teil aber an der Überdeckung durch andere Effekte.

Nehmen wir als Beispiel die Lochblende: Haben wir mit List und Tücke eine Öffnung von 0,1 mm hergestellt, um die Beugung zu beobachten, und nehmen wir für die Lichtwellenlänge 500 nm = 0,0005 mm, dann erhalten wir $\sin\alpha = 0.005$, und $\alpha = 0.29°$. Verwenden wir

Sonnenlicht statt Licht einer punktförmigen Quelle, dann ist infolge des scheinbaren Sonnendurchmessers von 32' = 0.53° das Beugungsbild völlig verwaschen und ausgeschmiert, denn wir müssen vort jedem Punkt des Sonnenbildes eine Helligkeitsverteilung wie in Abb. 4 bhervorgerufen denken, und all diese Verteilungen dann additiv überlagern, dabei bleibt von den Auslöschungen nichts mehr übrig.

Die Winkelausdehnung der Sonne macht Schatten in einiger Entfernung unscharf und macht auch die Beugungseffekte an den Rändern der Schatten zunichte. Im Gegensatz zur Sonne selbst ist das Spiegelbild der Sonne an einer glänzenden Metallkugel oder einer entsprechend stark gekrümmten hochglänzenden Fläche recht gut als nahezu punktförmig anzusehen.

## Irisierende Wolken II

Zurück zur Frage der irisierenden Wolken: Da beim Tropfen sowohl das reflektierte wie das gebrochene Licht in einen großen Raumwinkel hineingestreut wird, vermuten wir, daß die Interferenz dieser Anteile mit der Beugung, die nur unter kleineren Winkeln beobachtet wird, vernachlässigt werden kann. Wir tun so, als ob durch Reflexion und Brechung einfach Licht aus dem Strahlengang entfernt würde, als ob der Tropfen schwarz und undurchsichtig wäre.

Und damit haben wir die Aufgabe praktisch schon gelöst: Denn das Babinetsche Theorem sagt uns, daß die Beugung an einem Hindernis mit kreisförmigem Querschnitt gleich der an einer kreisförmigen Blende ist, und die kennen wir zumindest qualitativ. Wir haben gesehen, daß die Auslöschungswinkel von der Wellenlänge abhängen, wir erhalten, allgemein ausgedrückt, eine Intensitätsverteilung, die vom Beobachtungswinkel (von der Sonne aus zu zählen) und von der Wellenlänge des Lichts abhängt; bei festgehaltenem Beobachtungswinkel ist das genau die Farbreizfunktion, die wir zur Berechnung der Farbmaßzahlen brauchen.