

Was sieht man eigentlich bei Interferenzversuchen? Interferenzerscheinungen und Farbwahrnehmung^{*)}

H. Dittmann, W. B. Schneider

Physikalisches Institut - Didaktik der Physik, Universität Erlangen

1. Einleitung

Die prächtigen Farberscheinungen bei Interferenzversuchen mit weißem Licht führen zu Fragen, die nur dann einigermaßen befriedigend beantwortet werden können, wenn man die engeren Grenzen der Physik überschreitet und - zumindest kurz - auf die Physiologie der Farbwahrnehmungen eingeht. Im folgenden wird an zwei äußerlich verschiedenen, aber formal gleich zu behandelnde Interferenzversuche erinnert, anhand deren unser Anliegen besonders deutlich gemacht werden kann. Die farbigen Interferenzerscheinungen werden mit Hilfe einer Computersimulation gedeutet, die sich auf die Theorie von Young und Helmholtz stützt und die Möglichkeiten der Farbdarstellung moderner Bildschirme verwendet. Die entsprechenden Programme sind auf der CD-Version im Ordner Programme zusammengestellt (s. auch [1]).

2. Zwei klassische Interferenzversuche

Es gibt zwei besonders eindrucksvolle Interferenzversuche, die lichtstark, ohne größeren Justieraufwand auch einem größerem Zuschauerkreis vorgeführt werden können, die sich trotz äußerlicher Verschiedenheit durch einen gemeinsamen Formalismus beschreiben lassen und deren Farbenpracht durch das gleiche Modell zur Farbwahrnehmung gedeutet werden kann. Es sind dies die Interferenzen, die an einer dünnen Seifenlamelle (Keilplatte) im reflektierten Licht auftreten und die Interferenzen im polarisierten Licht, die man im durchfallenden Licht bei gekreuzter oder paralleler Polarisator-Analysatorstellung und einem dazwischengeschalteten, doppelbrechenden Material beobachten kann.

2.1 Interferenzen an einer dünnen Seifenlamelle

Bei diesem Experiment an einer dünnen Seifenlamelle handelt es sich um eine „Zweistrahlinterferenz“. Die Aufspaltung der einfallenden Welle geschieht durch Reflexion an der Vorder- und an der Rückseite der dünnen Seifenhaut. Die Phasenverschiebung wird durch den unterschiedlichen optischen Weg und durch den Phasensprung bei der Reflexion an der Grenzschicht Seifenhaut-Luft verursacht. Bei dieser Aufspaltung sind die Amplituden der beiden an unterschiedlichen Grenzschichten reflektierten Wellen nahezu gleich [2].

Zur Erzeugung einer ebenen Seifenlamelle biegt man aus einem ca. 15cm langen Stück Kupferlackdraht von 2mm Stärke einen Ring von etwa 3cm Durchmesser mit einem Stiel von ca. 5cm Länge, der zur Befestigung in einem Halter dient. Der Ring muß mit einem Tropfen Lötzinn geschlossen werden, da die Seifenhaut sonst an der Nahtstelle abreißt. Es empfiehlt sich die Lötstelle durch Feilen oder Schmirgeln an den Verlauf des Drahts anzugleichen. Die Seifenlösung mischt man sich aus destilliertem Wasser, dem man ein handelsübliches Spülmittel und Glycerin zugibt. Eine Zugabe von etwa 30% Glycerin erhöht zwar die Haltbarkeit der Lamelle, vergrößert aber auch die Dicke der Lamelle, so daß dann die Farben ausbleiben oder nur sehr blaß werden (siehe auch [2], [4]). Zur Projektion leuchtet man die in vertikaler Ebene gehaltene Seifenlamelle mit einer Experimentierleuchte (Glüh- oder Bogenlampenlicht!) voll aus, stellt sie dabei aber etwas schräg, so daß das reflektierte Licht durch ein Projektionsobjektiv (z.B. $f = 15\text{cm}$) fällt. Mit dem Kondensator bildet man wie üblich die Wendel der Lampe über die Seifenlamelle auf die Eingangsebene des Abbildungsobjektivs ab, so daß die Lamelle gut ausgeleuchtet, vergrößert auf einem ca. 3m entfernt aufgestellten Schirm abgebildet wird.

Kurz nach dem Eintauchen Seifenlamellen zeigen sich meist noch keine Farben; die Schicht ist zu dick. Die Schwerkraft sorgt jedoch dafür, daß die Schicht dünner wird und zwar so, daß sie die Form eines Keils annimmt. Das dickere Ende befindet sich unten. Es zeigen sich bald waagrechte Interferenzstreifen (Streifen gleicher Dicke) mit unterschiedlicher Farbe. Die Übergänge zwischen den Streifen können kontinuierlich oder auch sprunghaft erfolgen. Scharfe Farbgrenzen deuten darauf hin, daß die Schicht an den entsprechenden Stellen ihre Dicke auch sprunghaft ändert. Man beobachtet solche Sprünge hauptsächlich an den Rändern in der Nähe des Drahtringes. Oft zeigen sich innerhalb mancher Zonen heftige, turbulente Bewegungen mit überraschenden Farbfolgen, von denen man immer wieder fasziniert ist. An den dünnsten Stellen schimmert die Schicht bläulich-silbern mit einem scharfen Rand zu einer schwarz erscheinenden Zone, die den Eindruck erweckt, als sei dort die Schicht überhaupt nicht mehr vorhanden. Tatsächlich ist sie dort nur so dünn geworden, daß der optische Weg im dichteren Medium vernachlässigbar klein wird. Es spielt somit nur noch der Phasensprung bei der Reflexion an der Vorderseite eine Rolle, so daß für alle Wellenlängen Auslöschung auftritt.

2.2 Interferenzversuch mit polarisiertem Licht

Bei diesem Interferenzversuch wird die für das Auftreten der Interferenzerscheinung notwendige Phasenverschiebung mit Hilfe doppelbrechender Kunststofffolien (z.B. in Blumengeschäften als Verpackungsmaterial für Blumen erhältlich) erreicht. Er ist in den gängigen Optiklehrbücher beschrieben (z.B. [2], [4], [5]). Wir nutzen in Abwandlung der in den Lehrbüchern beschriebenen Anordnung den Overheadprojektor aus. Der Versuch läßt sich ohne Justieraufwand leicht durchführen. Der Vorteil unserer Anordnung besteht darin, daß wir großflächige Folien zur Polarisation und zur Doppelbrechung verwenden können, so daß es zu einer lichtstarken, vergrößert darstellbaren Interferenzerscheinung kommt. Polarisator und Analysator sind aus einer 0,8 mm starken Polarisationsfolie (Bezugsquelle in [9]) hergestellt.

Damit kein direktes Licht auf die Leinwand fällt, sollten die Folien die Schreibfläche ausfüllen bzw. in einem formatfüllenden Papprahmen so gehalten werden, daß kein unpolarisiertes Licht auf die Leinwand fällt. Damit die Interferenzerscheinung großflächig erscheint, sollten die Folien mindestens eine Fläche von $15 \times 15 \text{ cm}^2$ besitzen.

Der Versuch wird folgendermaßen durchgeführt: Man deckt die Schreibfläche des Projektors mit dem Polarisator ab. Legt man den Analysator unter 90° gedreht darüber, so wird das Gesichtsfeld in der Projektion dunkel. Schiebt man aber zwischen Polarisator und Analysator ein Stück dünner Kunststoffolie (z.B. Folie zum Einpacken von Blumen), so hellt es sich farbig auf. Die Farbe hängt davon ab, wie die Richtung der Folie zur Richtung des Polarisators steht. Verdoppelt oder verdreifacht man die Kunststoffschicht, indem man die Folie mehrfach übereinanderlegt, so sieht man jedesmal eine andere Farbe. Besonders lehrreich wird der Versuch, wenn man auf einen Karton, der ein längliches rechteckiges Fenster aufweist, mehrere Stücke der Kunststoffolie so aufklebt, daß nebeneinander liegende Felder der 1fachen, 2fachen, ..., 8fachen Foliendicke entstehen. Die Folien müssen auf dem Karton (z.B. mit einem Klebestreifen) so befestigt werden, daß ihre optischen Vorzugsrichtungen parallel sind. Bei Folien, die von einer Rolle abgewickelt wurden, kann man sich zu diesem Zweck an der Schnittkante orientieren. Die eine Hauptachse der Doppelbrechung ist parallel zu dieser, die andere senkrecht dazu (genauere Hinweise zur Herstellung solcher Folienanordnungen in [7]).

Die folgenden Betrachtungen gelten für den Fall, daß das Fenster mit den Folienschichten so zwischen Polarisator und Analysator geschoben wird, daß die Schnittkanten aller aufgeklebten Kunststofffolien einen Winkel von 45° gegen den Polarisator bilden. In der Projektion zeigt sich dann eine Reihe von 8 verschiedenfarbigen Feldern, die später dazu dient, die Hypothesen zur Farbwahrnehmung zu testen und zu bestätigen. Sind Polarisator und Analysator in Parallelstellung, so beobachtet man die zur ersten komplementäre Farberscheinung.

3. Deutung der Interferenzerscheinungen

Obwohl die Phasenverschiebung bei den beiden oben beschriebenen Versuchen auf recht unterschiedliche Weise zustande kommt, läßt sie sich für den Fall des senkrechten Lichteinfalls durch den gleichen mathematischen Formalismus beschreiben, und führt daher zu den gleichen quantitativen Ergebnissen. In einer guten Näherung gilt der Formalismus auch noch für Einfallswinkel kleiner als 10° , wie sie bei unseren Experimenten immer gegeben sind.

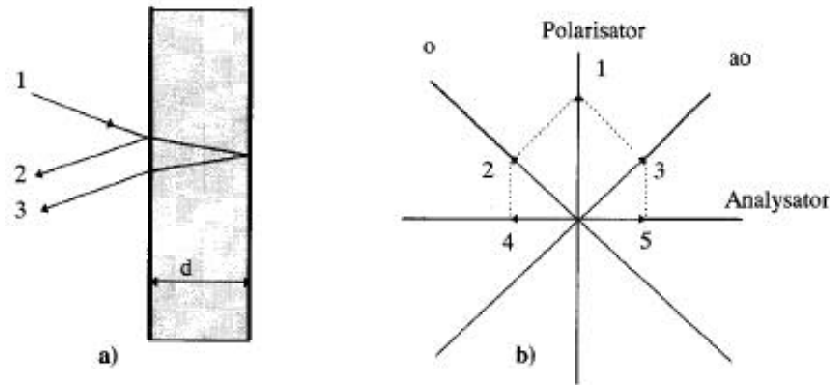


Abb. 1: Bezeichnungen zur Erläuterung des Zustandekommens eines Phasenunterschieds in a) für die Interferenz bei einer Seifenhaut (1: einfallende, 2 u. 3: reflektierte Welle, d: Dicke der Seifenhaut) und in b) für die Interferenz bei polarisiertem Licht und einem doppelbrechenden Medium (o, ao: Richtung der zwei optischen Achsen des linear doppelbrechenden Materials, 1: Amplitude der einfallenden Welle, 2: und 3: Amplitude des in Richtung von a bzw. ao schwingenden Anteils der Welle, 4: und 5: Projektion der Amplituden 2 und 3 auf die Richtung des Analysators).

In Abb. 1a ist der Seifenhautversuch (s. Kap. 2.1) skizziert. Die einfallende Welle 1 wird in den direkt reflektierten Anteil 2 und in den nach Eindringen in die Haut an deren Rückseite reflektierten Anteil 3 aufgespalten. Die Haut hat die Dicke d und die Brechzahl n . Die Welle 1 soll nahezu senkrecht auf die Haut auftreffen. Der optische Weg in der Seifenhaut beträgt dann für die Welle 3 insgesamt $2dn$. Durch die Reflexion beim Übergang ins dichtere Medium erfährt die Welle 2 einen Phasensprung von π (bzw. $\lambda/2$). Insgesamt ergibt sich zwischen Welle 2 und 3 der Gangunterschied $2dn + \lambda/2$ mit dem zugehörigen Phasenwinkel φ :

$$\varphi = 2\pi 2nd / \lambda + \pi \tag{1}$$

In Abb. 1b ist erläutert, wie der Gangunterschied im zweiten Interferenzversuch (s. 2.2) durch die Verwendung von polarisiertem Licht und einem doppelbrechenden Material zustande kommt. Der Polarisator läßt nur Licht der Schwingungsrichtung 1 durch. Im linear doppelbrechenden Medium kann man sich dieses Licht in zwei zueinander senkrecht schwingende Anteile mit den Schwingungsrichtungen der Achsen o und ao zerlegt vorstellen, wobei diese Achsen wegen der oben beschriebenen besonderen Lage der Folien mit dem Polarisator 45° einschließen und die Amplituden daher gleich sind.

Beim Eintritt ins doppelbrechende Medium schwingen beide Wellen noch phasengleich; wegen der unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten des Lichtes, die zu den Richtungen o und ao gehören, haben aber beim Austritt beide Schwingungsanteile einen zur Dicke d der doppelbrechenden Schicht proportionalen optischen Wegunterschied: $n_o d - n_{ao} d = \Delta n d$.

Der zum Polarisator gekreuzte Analysator läßt von diesen Anteilen nur die Komponenten 4 und 5 mit gleichen Amplituden durch. Aus den entgegengesetzten Richtungen der Pfeile 4 und 5 in Abb. 1b erkennt man, daß bereits ohne den durch die Doppelbrechung verursachten Wegunterschied schon ein solcher von $\lambda/2$ besteht (Polarisator und Analysator gekreuzt!). Insgesamt

ergibt sich also ein Gangunterschied $\Delta nd + \lambda/2$ zwischen den beiden in der Schwingungsebene des Analysators interferierenden Anteilen. Der Phasenwinkel beträgt daher:

$$\varphi = 2\pi\Delta nd / \lambda + \pi \quad (2)$$

Die Formeln (1) und (2) für den Phasenwinkel werden identisch, wenn man in der ersten den Term $2dn$ und in der zweiten Δnd durch δ ersetzt. Sie lauten dann

$$\varphi = 2\pi\delta / \lambda + \pi \quad (3)$$

In beiden Fällen ist δ zur Schichtdicke proportional; wir wollen δ deswegen hier der Einfachheit halber als *effektive Schichtdicke* bezeichnen.

Die Aufgabe lautet, zwei parallele harmonische Schwingungen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude (wir können sie gleich $1/2$ setzen), aber mit der Phasenverschiebung φ zu addieren. Dabei entsteht wieder eine harmonische Schwingung der gleichen Frequenz, wobei die Amplitude A der Überlagerung zwischen den Extremwerten 0 (Auslöschung) und 1 (maximale Verstärkung) liegt. Das Quadrat der Amplitude, also A^2 , gibt die Intensität I an. Am einfachsten läßt sich die Berechnung von A durch Vektoraddition der Zeiger beider Schwingungen durchführen.

Die beiden Zeiger haben hier die Längen $1/2$ und schließen den Winkel φ ein. Nach dem Cosinus-Satz ergibt sich dann für I :

$$I = A^2 = (1/2)^2 + (1/2)^2 - 2(1/2)(1/2)\cos(\pi - \varphi) = (1/2)(1 - \cos(2\pi\delta/\lambda)) \quad (4)$$

In Abb. 2 ist der Verlauf von $I(\lambda)$ nach Glg. 4 als Funktion der Wellenlänge dargestellt, wobei die effektive Schichtdicke als jeweils konstanter Parameter in die Rechnung eingeht.

Der Verlauf der Kurve in Abb. 2 bestimmt nun wesentlich die Farberscheinung, die für beide Interferenzversuchen zu erwarten sind. Die Kurve stellt im übertragenen Sinn die Transmissionskurve eines Filters dar, das mit weißem Licht durchstrahlt wird. Sie gibt an, welche Wellenlängenbereiche bei einer vorgegebenen effektiven Schichtdicke herausgefiltert werden. Der Verlauf ist durch unendlich viele Minima gekennzeichnet, die bei $\lambda = \delta/n$, $n = 1, 2, 3, \dots$ liegen, sich also für große Interferenzordnungen gegen 0 häufen. Je nach Wahl der effektiven Schichtdicke δ fallen 0 bis beliebig viele Minima in den sichtbaren Bereich; für $\delta = 2000$ nm sind es z.B. drei, nämlich 667 nm, 500 nm, 400 nm. Insgesamt kann man bei beiden Anordnungen Interferenzen niedrigster Ordnung beobachten, so daß sie selbst noch mit Glühlicht auftreten.

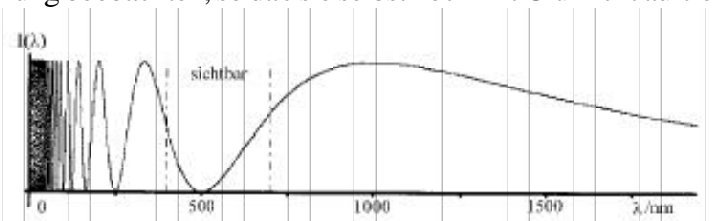


Abb.2: Verlauf von I als Funktion der Wellenlänge nach Glg. 4 für die effektive Schichtdicke von $\delta = 500$ nm. Für wachsendes δ bleibt die typische $\sin(1/x)$ -Form der Kurve erhalten. Sie wird jedoch von 0 ausgehend nach rechts gestreckt, für $\delta = 1000$ nm z.B. um den Faktor 2, so daß dann mehr Minima in den sichtbaren Bereich fallen. Entsprechend wird für $\delta = 250$ nm die Kurve um den Faktor $1/2$ gestaucht, so daß dann kein scharfes Minimum mehr im Sichtbaren liegt. Zur Deutung der Farbwahrnehmung genügt es hier den im sichtbaren liegenden Wellenlängenbereich von 400 - 700 nm zu betrachten (s. Programm IntFunkt.exe).

Der Verlauf der Kurve in Abb. 2 bestimmt nun wesentlich die Farberscheinung und Struktur der Interferenzerscheinungen. Zur Deutung der sich jeweils insgesamt ergebende Farberscheinung muß man allerdings auf die Besonderheiten der Farbwahrnehmung durch unser Auge genauer eingehen.

4. Computersimulation zur Farbwahrnehmung

Nach der Dreifarben­theorie, die schon auf Young und Helmholtz [4] zurück­geht, und die heute durch physiologische Untersuchungen weitestgehend gesichert ist, kommt die Farbwahrnehmung durch die Erregung von Farbrezeptoren (sog. Zäpfchen) auf der Netzhaut unseres Auges zustande. Von diesen Rezeptoren gibt es drei verschiedene Sorten mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit.

Die Abbildungen 3a und 3b zeigen exemplarisch Ergebnisse der Computersimulation, die die Farbwahrnehmung nach der Dreifarben­theorie veranschaulichen sollen. Das breite Fenster oben zeigt die relativen Empfindlichkeiten $e_b(\lambda)$, $e_g(\lambda)$ und $e_r(\lambda)$ der drei Rezeptorarten (es sind die drei glockenförmigen niedrigeren Kurven, die im Original entsprechende Farben haben). Sie sind über der Wellenlänge des erregenden Lichtes aufgetragen. Die Maxima der Erregungskurven liegen bei Wellenlängen, die dem blauen, dem grünen und dem roten Licht entsprechen, etwa jenen Farben, die auch von den Farbmonitoren zur Darstellung der Farben durch additive Mischung verwendet werden.

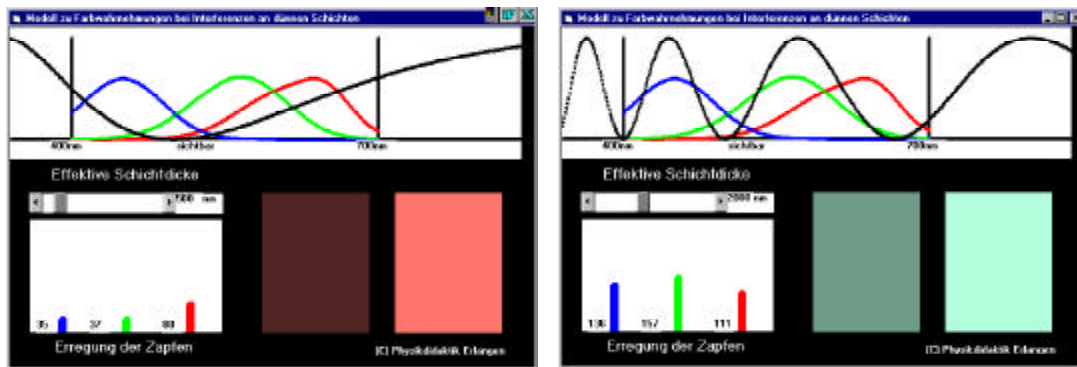


Abb.3: Zur Erläuterung der Computersimulation zur Farbwahrnehmung nach der Dreifarben­theorie: Oben: Die drei Kurven stellen von links nach rechts die relativen Empfindlichkeiten $e_b(\lambda)$, $e_g(\lambda)$ und $e_r(\lambda)$ für die drei Rezeptorarten des Auges dar, im Original in den entsprechenden Farben. Die tief­schwarze Kurve stellt den Verlauf von I bei der vorgegebenen Schicht­dicke von 500 nm dar und gibt an, welcher Frequenzbereich dem Auge angeboten wird. In den Fenstern links unten sind die Erregungszustände der drei Rezeptorarten dargestellt, in den Fenstern rechts daneben der sich daraus ergebende Farbeindruck in zwei verschiedenen Helligkeitsstufen. Das rechte Bild gilt für die effektive Schicht­dicke $\delta = 2000$ nm. (Die Bilder wurden mit dem Programm ModTheo.exe [1] erzeugt).

Weiter sieht man im oberen Fenster eine über den sichtbaren Bereich hinausgehende Kurve, die sogenannte „Filterkurve“ $I(\lambda)$ nach Glg. 4. Sie gilt für die effektive Schicht­dicke $\delta = 500$ nm. Mit Hilfe eines Schiebereg­lers, der unter dem Fenster zu sehen ist, kann man auch andere effektive Schicht­dicken einstellen, z.B. $\delta = 2000$ nm (vgl. Abb.5). Das einfallende Licht erregt die drei Rezeptorarten mehr oder weniger stark, je nach dem, ob ein größerer oder ein kleinerer Flächenanteil der Intensitätskurve auf die Kurve der relativen Empfindlichkeit des entsprechenden Rezeptors fällt. Das Programm errechnet die jeweiligen Erregungszustände b , g und r der Rezeptoren durch Integration über die Produkte aus relativer Empfindlichkeit und Intensität des einfallenden Lichtes:

$$r = c_r \int e_r(\lambda) I(\lambda) d\lambda ; \quad g = c_g \int e_g(\lambda) I(\lambda) d\lambda ; \quad b = c_b \int e_b(\lambda) I(\lambda) d\lambda .$$

Die Integration erstreckt sich dabei über den sichtbaren Teil des Spektrums. Die Faktoren c_r , c_g und c_b dienen der Normierung und sorgen dafür, daß die zu weißem Licht gehörige Intensitäts­verteilung ($I(\lambda) = \text{const.} = 1$, entsprechend maximaler Helligkeit über alle Wellenlängen) für den Computer hellstes Weiß ergibt, was $r = g = b = 255$ bedeutet.

Das Ergebnis der drei Integrationen, also die Erregungszustände r , g und b wird in dem Fenster links unten durch Balken veranschaulicht. So wie unser Gehirn aus den drei Erregungszuständen der Rezeptoren eine Farbwahrnehmung "errechnet", so errechnet der Computer einen Farbvektor r, g, b und stellt dann im RGB-Modus auf dem Bildschirm durch additive Mischung von drei Primärfarben (Rot, Grün, Blau) eine Farbe dar, die tatsächlich auch unserem Auge (wenigstens annähernd) so erscheint, wie das ursprüngliche Licht mit der Intensitätsverteilung $I(\lambda)$. Die vom Computer ermittelte Farbe erscheint in den Fenstern rechts unten in zwei Helligkeitsstufen, aus folgendem Grund: Nach der Normierung (d.h. der Berechnung der Werte c_r , c_g und c_b), ergibt die Intensitätsverteilung $I(\lambda) = \text{const.} = 1$ für weißes Licht die hellste Farbe des Bildschirms mit $r = g = b = 255$. Jede andere Verteilung mit kleineren Intensitätswerten ergibt auch für r , g und b kleinere Werte, also dunklere Farben; meist erscheinen die Farben auf dem Bildschirm so dunkel, daß man sie kaum noch beurteilen kann. In diesem Punkt unterscheidet sich das Computermodell vom wirklichen Auge, bei dem noch eine Regelung dafür sorgt, daß bei geringerer Gesamthelligkeit die relativen Empfindlichkeiten der Rezeptoren und damit auch die wahrgenommene Helligkeit vergrößert wird. Diese beim Auge stark ausgeprägte Adaptionsfähigkeit wird in unserem Computermodell durch folgenden Trick nachempfunden: Die durch Integration gefundenen Werte r , g , b werden nachträglich proportional vergrößert, und zwar so weit, daß wenigstens einer der drei Werte das Maximum 255 erreicht (unteres rechtes Teilbild in Abb. 3). Die damit im RGB-Modus dargestellte Farbe hat nach den Regeln der additiven Farbmischung den gleichen Farbton wie die ursprüngliche, sie erscheint aber nun so hell, daß sie sich gut beurteilen läßt. Die nachträgliche proportionale Vergrößerung von r , g , b hat den gleichen Effekt, als würde man die Werte der relativen Empfindlichkeiten vergrößern und dennoch die alte Normierung benutzen. Licht mit der Intensitätsverteilung "weiß" könnte dann allerdings vom Bildschirm nicht mehr adäquat dargestellt werden.

5. Test der Computersimulation und deren Grenzen

Natürlich möchte man am Ende gerne wissen, wie gut das Computermodell in der Lage ist, eine gegebene Intensitätsverteilung in einen Farbeindruck umzuwandeln. Zum Vergleich könnte man Filter verwenden, deren Transmission über das gesamte sichtbare Spektrum bekannt ist. Schickt man weißes Licht durch ein solches Filter, so hat man Licht mit einer bekannten Intensitätsverteilung, die der Transmissionskurve entspricht. Unser Augenmodell müßte nun über eine Eingabe verfügen, die es gestattet, die Intensitätsverteilung punktweise einzugeben, um die Werte r , g und b zu berechnen. Eine solche Eingabe ist aber nicht vorgesehen, da der Test einfacher durch Vergleich mit den durch Doppelbrechung erzeugten Interferenzfarben geschehen kann. Allerdings besteht da zunächst eine Schwierigkeit: Verwendet man irgend eine Verpackungsfolie, so kennt man zunächst die effektive Schichtdicke δ nicht. Man kann sie aber leicht bestimmen, wenn man sich mit der Folie Proben der einfachen, doppelten, ..., k -fachen Schichtdicke herstellt, wie in Abschnitt 2 beschrieben. Zu diesen Proben gehören dann auch die effektiven Schichtdicken $k\delta$ ($k = 1, 2, \dots, 8$) und eine typische Folge von 8 Farben. Gibt man im Computermodell irgend eine effektive Schichtdicke ein und verdoppelt diese dann, so wird man im allgemeinen zwei Farben sehen, die nicht zu der typischen Folge passen. Aber nach wenigen Versuchen wird es gelingen, ein δ so zu finden, daß nicht nur die ersten zwei, sondern auch weitere aufeinanderfolgende Farben gut übereinstimmen. (Eine Tabelle, welche den Zusammenhang zwischen Gangunterschied und der Interferenzfarbe wiedergibt, findet sich z.B. in [4].) Z.B. fanden wir für eine Verpackungsfolie aus dem Blumengeschäft $\delta = 320$ nm. Mit zunehmender Ordnung k werden die Intensitätsverteilungen komplizierter und es treten dann stärkere Abweichungen zwischen dem Computermodell und den tatsächlichen Interferenzfarben auf. Diese Abweichungen haben zwei Gründe:

Erstens sind die verwendeten Kurven der relativen Empfindlichkeit sicher nicht ganz richtig. Das

Modell verwendet Gaußkurven, bei denen es eine Reihe von Parametern gibt, die man passend wählen kann. Im Programm wurden folgende Funktionen verwendet:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(\lambda) &= 3.2 \text{ Exp}(-(\lambda - 650)^2/1000) + 6.5 \text{ Exp}(-(\lambda - 610)^2/4000) \\ \varepsilon_g(\lambda) &= 4.8 \text{ Exp}(-(\lambda - 550)^2/4000) + 4.0 \text{ Exp}(-(\lambda - 580)^2/3000) \\ \varepsilon_b(\lambda) &= 8.0 \text{ Exp}(-(\lambda - 450)^2/3000) \end{aligned}$$

Insbesondere reagieren die zu größeren k-Werten gehörigen Farben recht kritisch auf die Parameter. Verbesserungen in der Farbwiedergabe wären sicher möglich, wenn man die Parameter noch etwas abändert oder die Empfindlichkeiten durch eine noch größere Anzahl von Gaußkurven zusammensetzt. Vom physikalischen Standpunkt ist das wenig reizvoll, interessant wäre höchstens, daß sich auf diese Weise eine Möglichkeit auftut Genaueres über die Empfindlichkeitskurven zu erfahren, die man in der einschlägigen Literatur nur grob angedeutet findet (z.B. [4], [8]). Eine zweite Ursache für die Abweichungen ist grundsätzlicher Art: Das Modell geht davon aus, daß der durch den Vektor r, g, b gegebene Erregungszustand der drei Rezeptorarten bei uns den gleichen Farbeindruck hervorruft, den das Licht des im RGB-Modus arbeitenden Bildschirms in unserem visuellen System hervorbringt. Dies ist sicher nicht ganz richtig, wie man allein schon daran erkennt, daß der Bildschirm voll gesättigten Spektralfarben zwar einigermaßen nachmachen kann, aber eben doch nur so, daß man deutliche Unterschiede erkennt. An solchen Farben muß das Modell daher scheitern.

6. Computersimulation und Interferenzversuche

Die Computersimulation wurde an die Besonderheiten der beiden Interferenzversuche angepaßt. Die Ergebnisse leben von der farbigen Darstellung, die hier nicht möglich ist. Daher beschränken wir uns nur auf die Diskussion der Simulation für die Farberscheinungen bei einer dünnen Seifenhaut.

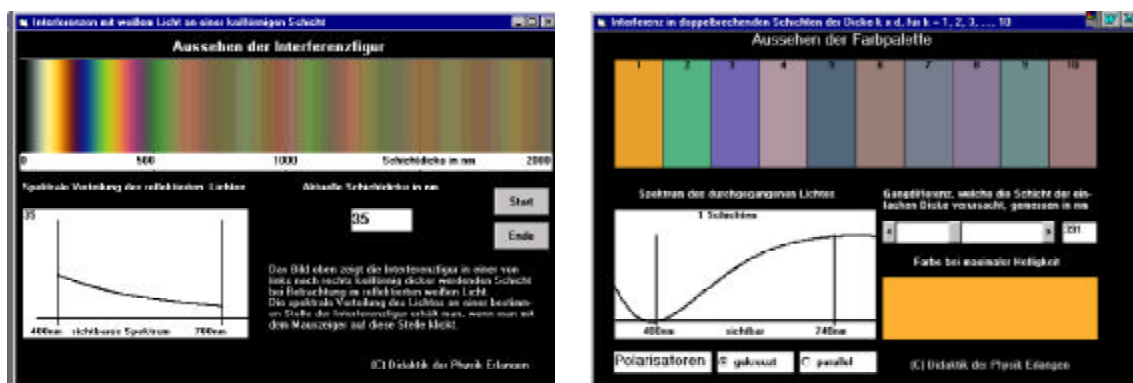


Abb.4: Farberscheinung hervorgerufen durch Interferenz bei einer Seifenlamelle nach Kap 2.1 (links) und bei einer Anordnung von Verzögerungsplatten ansteigender Dicke und gekreuztem Polarisa- tor und Analysator nach Kap. 2.2 (rechts). Die Bilder sind mit dem Programm IntKeil.exe bzw. IntPol.exe [1] erzeugt. Durch Anklicken der entsprechenden Farbe wird im unteren linken Teilbild jeweils die zugehörige Durchlaßfunktion (passend zur verantwortlichen Schichtdicke) nach Gl. 4 und im rechten unteren Bild die zugehörige Farbempfindung nach dem Modell zur Farbwahrnehmung dargestellt.

In Abb. 5 ist das Ergebnis zu der Farberscheinung bei einer dünnen Seifenhaut gezeigt. In dem oberen Fenster erscheinen die Farben in der gleichen Reihenfolge, wie in der keilförmig dicker werdenden Schicht der Lamelle. Darunter ist die tatsächliche Schichtdicke d (also nicht die effektive $\delta = 2dn$) aufgetragen. Die vom Computermodell angezeigten Farben stimmen in ihrer Folge gut mit den tatsächlichen im Versuch überein. Bei größeren Schichtdicken werden die Farben zunehmend ungesättigter. Klickt man mit der Maus auf eine beliebige Stelle des Interferenzstreifenmusters, so erscheinen in den darunter liegenden Fenstern die aktuelle Schichtdicke d und die Intensitätsverteilung $I(\lambda)$ nach Glg. 4.

Das Programm gestattet auch Rückschlüsse auf die Dicke der Seifenhaut an interessanten Stellen, z. B. wo sie im reflektierten Licht unsichtbar wird. Die gerade noch schwach sichtbare daran angrenzende Interferenzfarbe wirkt silbrig mit einem Stich ins Blaue. Die Abbildung 5 zeigt, daß das für diese Farbe verantwortliche Intensitätsspektrum und die Schichtdicke $d = 35 \text{ nm}$ in guter Übereinstimmung mit den Abbildungen in [3] sind. Auch die in der Interferenzfigur auftretenden Farbinseln mit scharfen Rändern, die besonders bei höheren Glyzerinzugaben zu beobachten sind, lassen sich deuten: Es handelt sich gewissermaßen um "Tafelberge" in dem sonst flachen und in der Dicke kontinuierlich ansteigenden Gelände der Seifenhaut. Die Höhe der Tafelberge läßt sich aus dem auftretenden Farbensprung schätzen.

7. Zusammenfassung

Die Interferenzversuche "Seifenhaut" und "doppelbrechende Folien" sind in der vorgestellten Form besonders geeignet, in die Problematik der Deutung der Farberscheinungen bei Interferenzversuchen einzuführen. Sie sind einmal leicht vorzuführen und lassen sich zum anderen mit der gleichen Computersimulation deuten. Sie führen in eine farbige Welt ein, die voller Faszination ist und die es Wert ist, den Schülern nicht vorenthalten zu werden.

**) Aktualisierte Fassung eines Beitrags gleicher Thematik erschienen in der Reihe „Wege in der Physikdidaktik Band 4“ (Hrsg. W. B. Schneider) S. 93 -104, Erlangen, Jena 1998*

8. Literatur und Bezugsquellen

- [1] Die vorgestellten Programme laufen unter Windows ab Version 3.11, falls eine Grafikkarte von 24 bit Farbtiefe installiert ist. Sie sind auf der CD im Ordner Programme zusammengestellt. Sie sind auch unter (<http://www.physik.uni-erlangen.de/didaktik/didaktik.html>) abrufbar.. Im Einzelnen handelt es sich um folgende exe-Dateien:
ModFilt.exe: Computermodell zur Farbwahrnehmung für verschiedene Erregungen (s. Kap. 4). Die Erregung kann durch eine Filterfunktion, deren Breite und Lage im sichtbaren Spektrum einstellbar ist, modifiziert werden. Die dadurch hervorgerufene Farbempfindung ist in den beiden Teilbildern dargestellt.
ModTheo.exe: Hier wird die Filterfunktion durch die Funktion nach Glg. 4 ersetzt. Die Schichtdicke kann über einen Schieberegler eingestellt werden (s. Abb. 3).
IntFunkt.exe: Mit diesem Programm kann der Graph nach Glg. 4 für einstellbare Schichtdicken wie in Abb. 2 erzeugt werden.
IntKeil.exe und **IntPol.exe:** Simulation der Farberscheinung im Fall der Interferenz an einer keilförmigen Platte (Kap. 2.1) und für den Fall der Interferenz im polarisierten Licht (Kap. 2.2), siehe auch Abb. 4.
- [2] Hecht, E.: „Optics“, Addison-Wesley, 1987
- [3] Isenberg, C.: „The Science of Soap Films an Soap Bubbles“, Dover Publication, Inc., New York 1992
- [4] Bergmann-Schäfer: „Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3 Optik“, Berlin 1978
- [5] Falk, D.S., Brill, D.R., Stork, D.G.: „Ein Blick ins Licht“, Birkhäuser Verlag, Springer-Verlag, Basel, Boston, Berlin 1990
- [6] Pohl, R. W.: „Einführung in die Physik Band 3, Optik und Atomphysik“, Springer Verlag, Heidelberg, z.B. 1958
- [7] Becker, J.: „Anregungen für den Unterricht“, Stark Verlag, Lose-Blatt-Sammlung o.J.
- [8] Treitz, N.: „Farben“, Klett Studienbücher Physik, Ernst Klett Verlag, Stuttgart 1985
- [9] Bezugsquellen für Polarisationsfilter:
 B+W Filterfabrik, Postfach 2463, 55513 Bad Kreuznach

