

Farbenprächtige Interferenzringe auf einer Wasseroberfläche

– in einfachen Modellexperimenten nachgestellt –

Verstaubte Wasseroberflächen können farbenprächtige Ringsysteme aufweisen, die nicht nur exzentrisch zum Spiegelbild der Sonne orientiert sind, sondern sich der Änderung des Beobachterstandpunktes entsprechend verschieben. Mit der Sonne im Rücken umgeben die Farbringe wie eine Glorie den Kopfschatten des Beobachters. Auf der Suche nach einer Erklärung für dieses merkwürdige Verhalten werden Modellexperimente beschrieben, die zu dem Schluss führen, dass es sich bei diesem Naturphänomen um eine bemerkenswerte Variante quételetscher Ringe handelt.

Den schönsten Farbenschmuck erzielt die Natur durch Interferenzfarben ...

Welche Aussichten würden sich der Malerei eröffnen, wenn es gelänge, eine handliche Interferenzfarben-Technik auszubilden!

ARNOLD SOMMERFELD

1 Farbige Bögen auf einem Teich

An einem sonnigen Spätsommertag waren auf der Wasseroberfläche eines ansonsten eher unscheinbaren Teiches spektralfarbene Bögen zu sehen, deren fiktives Zentrum außerhalb des Teiches lag (Abb. 1) und die außerdem in keiner direkten Beziehung zu der auf dem



Abb. 1. Farbige Ringsysteme exzentrisch zum Reflex der Sonne, aber mit entgegengesetzter Farbreihenfolge oberhalb und unterhalb des Reflexes

Teich gespiegelten Sonne zu stehen schienen. Dieser Eindruck wurde noch dadurch verstärkt, dass die relative Lage von Sonnenreflex und Farbringen durch die Veränderung der Beobachterposition geändert wurde. Allerdings deuteten die folgenden Beobachtungen darauf hin, dass die Lage des Spiegelbildes der Sonne und das Ringsystem in einem engen Zusammenhang stehen:

- Bewegte man sich in einer bestimmten Richtung vom fiktiven Zentrum des Ringsystems weg, so verschob sich der Sonnenreflex in die entgegengesetzte Richtung.
- Es zeigte sich, dass die Farben der Ringe diesseits und jenseits des Sonnenreflexes stets in umgekehrter Reihenfolge auftreten (schwach zu erkennen in Abbildung 1).

Eine weitere, nicht minder merkwürdige Erscheinung trat auf, wenn man mit der Sonne im Rücken auf den Teich blickte. Dann sah man den eigenen Kopfschatten auf der Techoberfläche von – diesmal konzentrischen – Ringen umgeben (Abb. 2), die einen wesentlich kleineren Radius aufwiesen als die mit Blick auf den Sonnenreflex zu sehenden Ringe.

Wir haben es also einerseits mit einem zum Spiegelbild der Sonne exzentrisch und andererseits mit einem zum Gegenpunkt der Sonne konzentrisch orientierten System farbiger Ringe zu tun, die offenbar in einer engen Beziehung zueinander stehen.

2 Eine Wasseroberfläche mit Leinwand

Mit dem auf den ersten Blick an einen Heiligenschein erinnernden Ringsystem [1] um den Kopfschatten stellt sich zunächst die Frage, wie eine an sich transparente Wasseroberfläche überhaupt einen Schatten auffangen kann. Bei der Beantwortung dieser Frage wird man an Phänomene erinnert, bei denen Schatten *auf* dem Wasser – oder besser – *im* Wasser zu beobachten sind. Getrübbtes Wasser ist in der Lage, zumindest schemenhafte Schatten aufzufangen. Denn hineingelanges Licht wird an den Schwebeteilchen gestreut. Im Bereich des

Schattens fehlen diese aufhellenden Streuungen und es entsteht ein dunkler durch den Umriss des Schattengebers gezeichneter Bereich im Wasser [2]. (Der Schatten sollte nicht mit den sehr viel häufiger zu beobachtenden Spiegelungen verwechselt werden, die auf keine Trübung des Wassers angewiesen sind.)

Im vorliegenden Fall hatte der Schatten jedoch eine andere Ursache. Der Teich war mit einer dünnen Schicht vermutlich organischen Ursprungs (Algen) bedeckt, die wie eine halbtransparente Leinwand wirkte. Rührte man mit einem Stab im Wasser, so wurde diese Schicht zerstört und es zeigte sich außerdem, dass an dieser Stelle auch die Farben verschwanden (Abb. 2 rechts neben dem Schatten der Person, vergrößert in Abb. 3).



Abb. 2. Der Kopfschatten des Beobachters von einem farbigen Ringsystem umgeben.

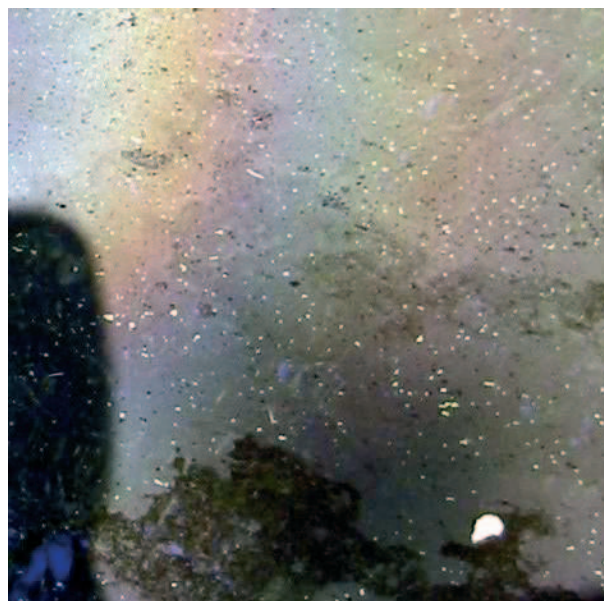


Abb. 3. Im Vordergrund wurde die dünne organische Schicht auf der Wasseroberfläche zerstört. In diesem Bereich treten keine Farben auf.

3 Koronen und Glorien

Farbige Ringsysteme entweder direkt um eine Lichtquelle oder um das reflektierte Bild der Lichtquelle kennt man in Gestalt verschiedener Naturphänomene. Als *Koronen* bezeichnet man farbige Ringe, die gelegentlich Sonne oder Mond in einem Winkelbereich von wenigen Grad umgeben. Sie werden durch Beugung an einer Vielzahl kleiner Wassertröpfchen hervorgerufen. Es handelt sich dabei um Fraunhofer-Beugung, die stark vereinfacht gesehen dadurch zustande kommt, dass ein auf ein kleines Teilchen, etwa ein Wassertröpfchen oder ein Staubkorn, auftreffendes Lichtbündel gestreut und in Teilstrahlen aufgespalten wird. Die Teilstrahlen laufen in unterschiedliche Richtungen weiter und überlagern sich z. B. auf einem Schirm oder im Auge des Betrachters.

Bis auf Strahlen, die sich in der ursprünglichen Richtung ausbreiten und sich bei Teilchen mit kreisförmigem Querschnitt zu einem hellen Zentrum überlagern, erfahren alle anderen Strahlen aufgrund des Umweges einen mehr oder weniger großen Gangunterschied. Je nachdem ob bei einer Überlagerung solcher (monochromatischer) Teilstrahlen der Gangunterschied eine ganze oder eine halbe Wellenlänge beträgt, verstärken sie sich oder löschen sich aus. Infolge dessen gruppieren sich abwechselnd dunkle und helle konzentrische Ringe um das helle Zentrum.

Da weißes Licht aus Strahlen unterschiedlicher Wellenlänge besteht, zerfallen die Ringe in einzelne »Regenbögen«. Das kurzwellige blaue Licht bildet den inneren und das langwellige rote Licht den äußeren Rand der einzelnen Ringe. Jeder der zufällig verteilten Teilchen trägt zur Verstärkung der Lichtintensität des Ringsystems bei und

zwar umso mehr, je genauer ihre Radien übereinstimmen. Daher lassen farblich wohl differenzierte Kränze bei Sonne und Mond auf eine einheitliche Tröpfchengröße schließen. Stark differierende Radien oder unterschiedliche Formen führen zu einer Verwischung der Farben bis hin zu einer Entartung in einen weißlichen Hof.

Koronen treten in der Regel bei bestimmten Wolkentypen auf, die vor der Sonne oder dem Mond vorbeiziehen. In seltenen Fällen können aber auch bei wolkenlosem Himmel farbige Ringsysteme beobachtet werden. Dies ist – wie Bishop 1893 zuerst beobachtet hat – dann der Fall, wenn etwa durch einen Vulkanausbruch Gas- und Staubeilchen in die Atmosphäre geschleudert wurden oder wenn eine Wolke aus Pollen zwischen Sonne und Beobachter geweht wird (Abb. 4).

Farbige Koronen können auch auf einer Wasseroberfläche beobachtet werden, wenn auf ihr driftende Pollen, z. B. von Bäumen, die Rolle der das Licht beugenden Wassertröpfchen übernehmen. Die im Wasser gespiegelte Lichtquelle, in der Regel die Sonne, erscheint dann von konzentrischen Ringen in Spektralfarben umgeben (Abb. 5).

Aber auch ringgesäumte Kopfschatten lassen sich in der freien Natur beobachten. Wenn beispielsweise der Schatten einer Person auf eine Nebel- oder im Gebirge auf eine Wolkenwand geworfen wird, kann es vorkommen, dass diese Person ihren Kopfschatten ähnlich wie in Abbildung 2 von farbigen Ringen, einer so genannten Glorie, gesäumt erlebt. Dieser Schatten wird auch Brockengespenst genannt, weil sich die ersten Beschreibungen auf Beobachtungen beziehen, die auf dem Brocken im Harz gemacht wurden. Das Gespenstische liegt in der vermeintlichen Größe des Schattens, die durch die Überschätzung der Entfernung der Projektionswand bedingt ist.

Für unser wissenschaftlich-technisches Zeitalter typischer ist die Glorie, die den Schatten eines Flugzeugs auf einer Wolke umgibt, auf die man aus dem Flugzeugfenster hinaus blickt. Da sie auch in diesem Fall den Schatten des Beobachters bzw. der Kamera säumt, kann man auf einem entsprechenden Foto sofort erkennen, an welchem Fenster der Fotograf saß (Abb. 6).

Die physikalische Deutung der Glorie ist schwierig. Stark vereinfacht gesprochen trägt hauptsächlich der Saum des tangential in die Wassertropfen eintretenden und teilweise durch Totalreflexion zurückgeworfenen Lichts zur Entstehung des farbigen Ringsystems bei. Denn nur das eng um die Vorwärts- oder Rückwärtsrichtung von diesem Saum ausgehende Licht ist in Phase, sodass es zur Interferenz kommen kann [3].

4 Die wesentlichen Unterschiede

Kränze und Glorien sind auf winzige Partikel, Wassertröpfchen, Pollen u. Ä. angewiesen, an denen das Licht gebeugt wird. Was entspricht diesen Teilchen im Falle der farbigen Ringe auf dem Teich?

Wenige Tage vor der Beobachtung der Ringe, war der Teich in eine Staubwolke gehüllt. Sie rührte von Mähdrechern her, mit denen die umliegenden Felder abgeerntet wurden. Die Staubeentwicklung war so intensiv, dass die hoch stehende Sonne wie eine schwach rötlich schim-

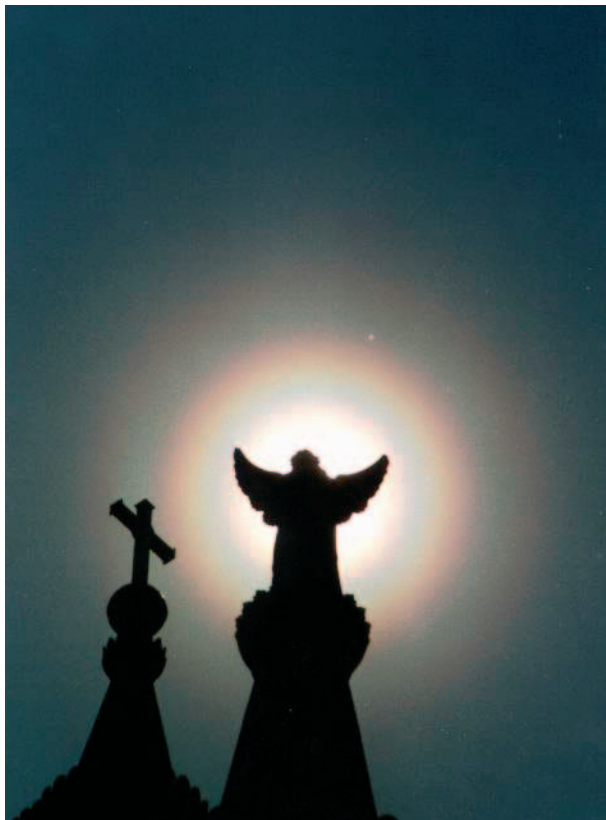


Abb. 4. Pollenkorona (Foto: JÜRGEN RENDTEL)

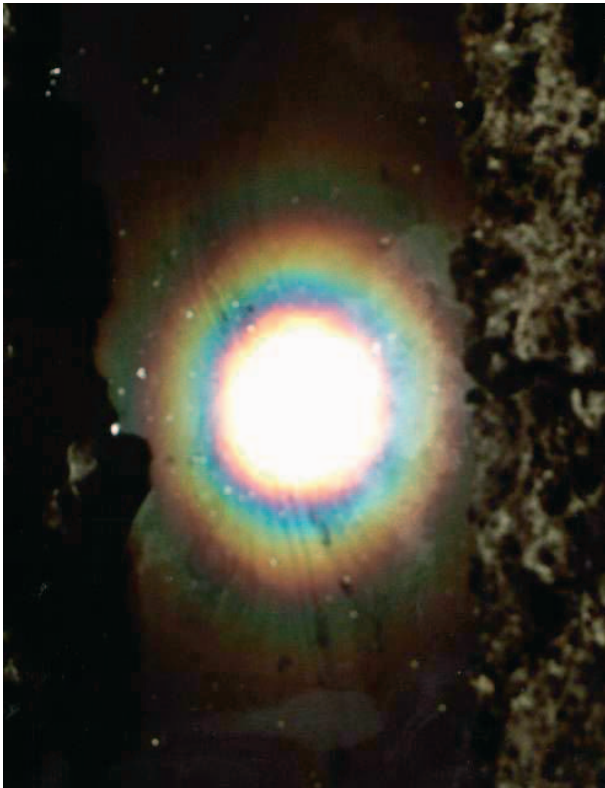


Abb. 5. Pollenkorona um das Spiegelbild der Sonne im Wasser (Foto: HEINO BARDENHAGEN)

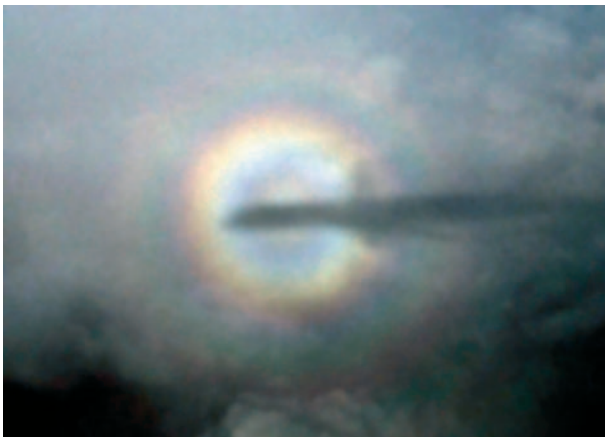


Abb. 6. Glorie auf einer Wolkenschicht aus einem Flugzeug beobachtet. Der Schatten des Flugzeugs ist zu einem winzigen dunklen Punkt im hellen Zentrum geschrumpft.

mernde Scheibe zu sehen war. Sollte der auf der dünnen Algenschicht sedimentierte Staub die Rolle von Wassertropfchen oder Pollen übernommen haben und als streuendes bzw. beugendes Medium in Frage kommen?

Man weiß, dass farbenprächtige Glorien und Kränze auf Teilchen in etwa gleicher Größe und einheitlicher Gestalt angewiesen sind, wie sie durch Pollen und unter einheitlichen Bedingungen entstandene Wassertropfchen gegeben sind. Diese Voraussetzungen dürften im vorliegenden Fall eher nicht erfüllt gewesen sein. Von dieser Schwierigkeit abgesehen werden bei Kränzen niemals exzentrische, von der Lage des Beobachters abhängige Ringe beobachtet.

5 Quételetschen Ringe

Schon aus diesen Gründen handelt es sich im vorliegenden Fall weder um eine Korona bei dem einen noch um eine Glorie bei dem anderen Ringsystem auf dem Wasser. Sowohl die Art der möglichen Streuzentren (von Form und Größe uneinheitliche Staubteilchen, die zu keiner Fraunhofer-Beugung führen) als auch die Exzentrizität der Ringe bezogen auf den Sonnenreflex sprechen deutlich dagegen. Das gleichzeitige Vorhandensein der Ringsysteme in beiden Blickrichtungen (zur Sonne bzw. zum Sonnenreflex und entgegengesetzt zur Sonne) verweist außerdem auf ein und dieselbe Ursache.

Ein optisches Interferenzphänomen, das in Abhängigkeit von der Beobachterposition exzentrische Farbringen in Gegenwart von zufällig sedimentierten Staubteilchen zeigt, sind die so genannten quételetschen Ringe. Sie sind allerdings – wenn überhaupt – eher aus einem akademischen Laborexperiment als aus der freien Natur bekannt.

Entscheidend für das Zustandekommen von quételetschen Ringen ist eine reflektierende Fläche vor der sich in einem gewissen Abstand streuende Partikel befinden. Das ist zum Beispiel bei einem bestaubten Spiegel der Fall.

Die Entstehung der quételetschen Ringe kann folgendermaßen erklärt werden: Man betrachte zwei parallele und kohärente¹ Strahlen, die an einem Staubkorn auf der Spiegeloberfläche gestreut werden (Abb. 7). Wenn jetzt einer der Strahlen zuerst am Staubkorn gestreut und dann an der Rückseite des Spiegels reflektiert wird und der andere zuerst reflektiert und dann am selben Staubkorn gestreut wird, so haben beide Strahlen einen unterschiedlich langen Weg zurückgelegt, wenn sie im Auge des Betrachters ankommen. Je nachdem wie groß die dadurch entstandene Phasendifferenz ist, kann es zu einer positiven oder negativen Interferenz kommen. Die Überlagerung von gestreuten Lichtstrahlen an vielen Teilchen führt zu dem beobachteten Ringsystem.

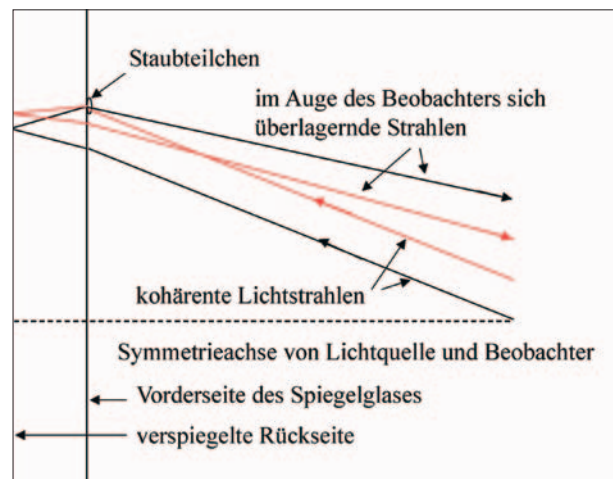


Abb. 7. Schematische Darstellung zur Interferenz: Lichtstrahlen, die an einem Staubkorn reflektiert und an der Spiegelmückwand reflektiert werden

¹ Obwohl Sonnen- und Kerzenlicht im Unterschied etwa zum Laser inkohärentes Licht aussenden, sind die Wellenpakete in einem hinreichend eng begrenzten Raumgebiet genügend kohärent (Kohärenzbedingung) [5].

6 Quételetsche Ringe im Freihandversuch

Bevor wir die Vermutung, dass es sich um quételetsche Ringe handelt, im Modellversuch nachgehen, führen wir uns das Phänomen in einem einfachen Freihandversuch vor Augen. Dazu wird eine brennende Kerze in etwa 1 m Entfernung vor einen verstaubten Haushaltsspiegel aufgestellt. Blickt man dann aus einem Abstand von etwa 1,5 m zur Kerze durch die Flamme hindurch auf den Spiegel, so beobachtet man farbige Ringe, die große Ähnlichkeit mit den oben beschriebenen Ringen auf dem Wasserspiegel aufweisen (Abb. 8). Insbesondere ist zu erkennen, dass sich die Ringe nur dann konzentrisch um den Reflex der Flamme legen, wenn die Kerzenflamme das eigene Spiegelbild verdeckt, was sich naturgemäß kaum fotografieren lässt. Daher wurde in Abbildung 8 eine leicht exzentrische Position gewählt. Man erkennt im Vordergrund die Kerze und das leicht nach oben verschobene, perspektivisch verkleinerte Spiegelbild der Kerze. Außerdem ist zu sehen, dass sich einerseits das Ringsystem entgegengesetzt zur Änderung der Position des Beobach-



Abb. 8. Farbringe um den Reflex einer Kerzenflamme auf einem verstaubten Spiegel (Flamme und Zentrum des Ringsystems fallen fast zusammen.)



Abb. 9. Farbringe wie in Abb. 8. Allerdings weicht das Zentrum des Ringsystems stark vom Reflex der Kerzenflamme ab.

ters verschiebt, der in Abbildung 9 von oberhalb der Kerze auf den Spiegel blickt. Andererseits vergrößert sich der Krümmungsradius der Farbringe aufgrund der Annäherung an die Kerze (von 1,5 m auf 1 m). Die Bilder geben in etwa die beiden Beobachtungssituationen am Teich wieder. Die Situation in Abbildung 8 unterscheidet sich nur insofern von der Situation in Abbildung 2 als in Letzterer die Lichtquelle hinter dem Beobachter liegt und wegen der fehlenden Parallaxe der Sonne stets kollinear mit dem Auge des Betrachters bzw. der Kamera bleibt. Daher kann man aus der Blickrichtung mit der Sonne im Rücken überhaupt keine exzentrische Position einnehmen. Dies gelingt nur, wenn man sich aus der Gegenrichtung dem Reflex der Sonne annähert (Abb. 1). Genau in Reflexionsrichtung ist allerdings wegen völliger Überstrahlung nichts zu sehen.

7 Modellversuche zu den farbigen Ringen

Der Freihandversuch lässt jedoch einige Fragen offen, denen in den folgenden Modellversuchen nachgegangen wird:

Zum einen fragt man sich, wie sich das Phänomen verändert, wenn kein Staub, sondern Pollen als Streupartikel vorliegen. Wird man in diesem Fall vielleicht sowohl eine Pollenkorona als auch quételetsche Ringe beobachten? Zum anderen wäre interessant zu wissen, ob die sehr dünne Trägerfläche der Streupartikel auf der Wasseroberfläche des Teiches überhaupt einen genügend großen Abstand der Staubeilchen zur reflektierenden Wasseroberfläche hervorruft. Denn im Freihandversuch mit dem verstaubten Spiegel liegt immerhin ein Abstand von der Dicke des Spiegelglases vor.

7.1 Bärlappsporen statt Staub

Zur Beantwortung der ersten Frage wird in einem Versuchsaufbau gemäß Abbildung 10 ein gleichmäßig mit Bärlappsporen verstaubter Spiegel mit weißem Licht bestrahlt. Lichtquelle und Spiegel sind etwa 2 m entfernt zueinander aufgestellt. Das durch eine Lochblende erzeugte Strahlenbündel fällt durch eine im Winkel von 45° zum Strahlengang aufgestellte Glasscheibe. Dadurch wird ein ungestörter Blick senkrecht auf den Spiegel ermöglicht.

Das Ergebnis ist eindrucksvoll: Trotz des mit diesem Versuchsaufbau verbundenen erheblichen Intensitätsverlustes beobachtet man ein farbenprächtiges Ringsystem, das das helle Spiegelbild des Lichtbündels umgibt (Abb. 11). Handelt es sich dabei um eine Pollenkorona, um quételetsche Ringe oder um beides?

Die Antwort erhält man dadurch, dass die Kamera aus der Richtung des Lichtes heraus bewegt und damit exzentrisch auf den Spiegel gerichtet wird. Dabei beobachtet man, dass sich das ursprüngliche Ringsystem in zwei verschiedene Ringsysteme aufspaltet (Abb. 12). Während ein Ringsystem in der ursprünglichen Lage zurückbleibt, verschiebt sich ein zweites Ringsystem infolge der Bewegung der Kamera entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung. Beim Letzteren handelt es sich offenbar um die schon auf dem mit Hausstaub verstaubten Spiegel

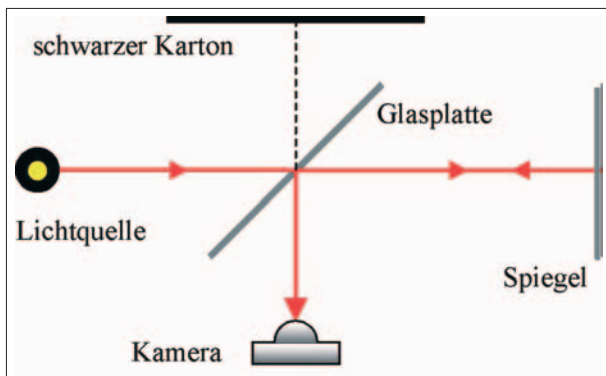


Abb. 10. Versuchsanordnung. Die Strahlteilung ermöglicht die queteletschen Ringe zentrisch zu fotografieren.

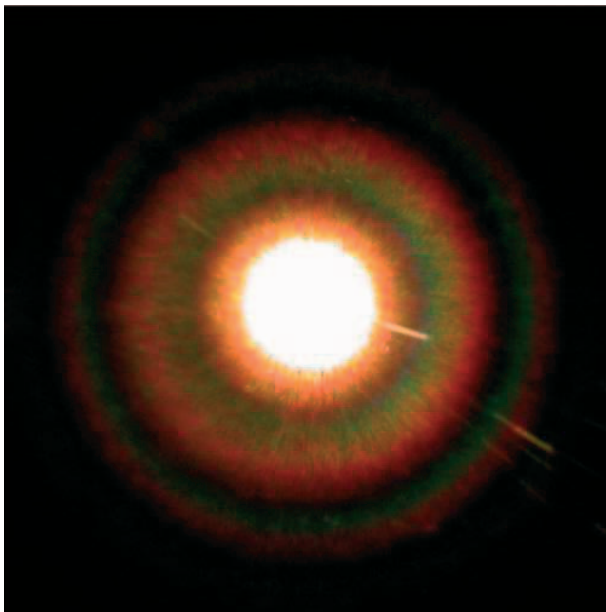


Abb. 11. Überlagerung von zwei Ringsystemen, von denen das eine durch Fraunhofer-Beugung, das andere durch queteletsche Interferenz hervorgebracht wird

zen wir eine oberflächenverspiegelte Glasplatte, auf die eine dünne Haushaltsfolie mit einer Dicke von 15 mm fixiert wird. Die Folie soll die dünne Schicht organischen Ursprungs auf dem Teich modellmäßig erfassen. Als Ersatz für den auf diese Schicht sedimentierten Erntestaub dient uns Gipspulver, nachdem wir uns anhand von Mikroskopaufnahmen davon überzeugt haben, dass die Gipsteilchen ähnlich wie Staubteilchen in Größe und Form variieren (siehe Anhang 9.2, Abb. 19).

Der Versuchsaufbau erfordert ein gewisses experimentelles Geschick, was durch beeindruckende Ergebnisse belohnt wird (Abb. 14). Im Rahmen der hier vorgenommenen Modellierung bestätigen sie die Vermutung, dass es sich bei den Farberscheinungen auf dem Teich um queteletsche Ringe handelt. Denn hier wie

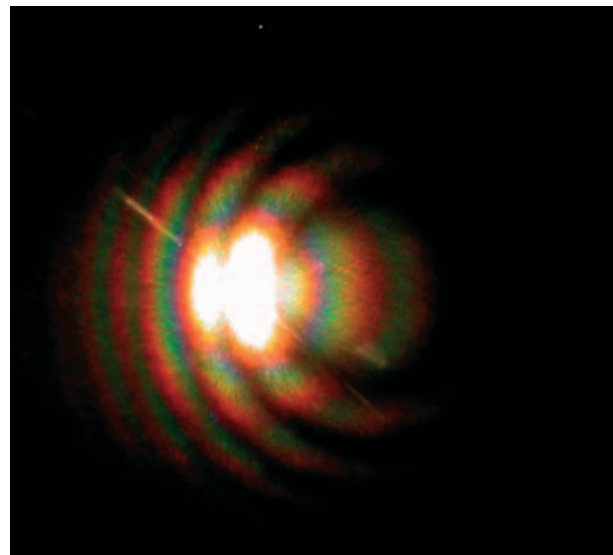


Abb. 12. Durch Verschieben der Kamera wird das Zentrum des queteletschen Ringsystems verschoben. Die durch Fraunhofer-Beugung hervorgerufene Pollenkorona bleibt davon unberührt.

beobachteten queteletschen Ringe, deren Zentrum und Krümmungsradius von der Blickrichtung abhängen. Im ersteren erkennt man die durch Fraunhofer-Beugung hervorgebrachte Pollenkorona, die bei Hausstaub aufgrund der über viele Größenordnungen variierenden Größe und der uneinheitliche Form der Staubteilchen nicht zustande kommt (vgl. Mikroskopaufnahmen im Anhang 9.2, Abb. 19). Beide Ringsysteme überlagern sich zu einem einzigen, wenn Beobachterrichtung und Richtung des einfallenden Lichts zusammenfallen, und können daher nur in einer exzentrischen Beobachterposition voneinander getrennt wahrgenommen werden. Schaut man noch schräger auf den Spiegel bzw. verschiebt man die Kamera noch weiter, dann verlässt das Zentrum der queteletschen Ringe sogar den Spiegel (Abb. 13).

7.2 Oberflächenverspiegelung mit dünner Folie

Um zu zeigen, dass eine dünne Schicht auf dem Wasser überhaupt zu queteletschen Ringen führen kann, benut-

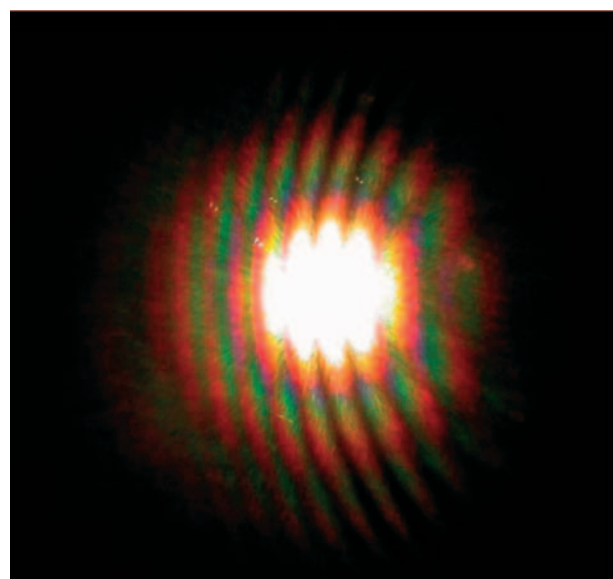


Abb. 13. Bei weiterem Verschieben der Kamera verlässt das Zentrum der queteletschen Ringe den Spiegel.

dort liegt das Zentrum des Ringsystems außerhalb des Spiegelbildes der Lichtquelle. Auch das auf dem Teich beobachtete Phänomen, wonach sich die Farbreihenfolge der Ringe diesseits und jenseits des Spiegelbildes der Lichtquelle umkehrt, ist deutlich zu erkennen: In dem sich innen und außen anschließenden Ring wird das Farbspektrum jeweils von Blau nach Rot durchlaufen. Diese Farbreihenfolge setzt sich in den weiter außen und weiter innen liegenden Ringen fort.

Je weiter man nach innen kommt, desto mehr nimmt der Radius der Ringe ab. Schließlich enden sie in einem kreisscheibenförmigen Zentrum des quételetschen Ringsystems, das jeweils die Farbe annimmt, die sich aufgrund der Farbreihenfolge des angrenzenden Ringes natürlicherweise ergibt.

Je weiter das Spiegelbild vom Zentrum des quételetschen Ringsystems wegrückt, desto schmaler werden die einzelnen Ringe. Das könnte zu der Vermutung Anlass geben, es handele sich hier um höhere Ordnungen der Interferenz. Dagegen spricht jedoch die Tatsache, dass das Hauptmaximum mit der Ordnung $m = 0$ immer dem Ring entsprechen muss, der durch das Spiegelbild der Lichtquelle geht. Da nur das Hauptmaximum unabhängig von der Wellenlänge ist, muss dieser Ring immer hell, im Idealfall weiß sein. Die sich nach innen und außen anschließenden Ringe repräsentieren die Maxima der Ordnungen $m = \pm 1, \pm 2, \pm 3$ etc. und durchlaufen »symmetrisch« zum Maximum 0-ter Ordnung die Farben in derselben Reihenfolge. Dadurch wird die Beobachtung verständlich, dass vom Zentrum des quételetschen Ringsystems nach außen gehend die Farbreihenfolge nach dem Spiegelbild der Lichtquelle umgekehrt erscheint.

Wenn der Beobachter es einrichtet, nur unter einem kleinen Winkel γ zum Lot auf das Ringsystem zu blicken, so kann er erkennen, dass das Zentrum der quételetschen Ringe nicht etwa in der Verlängerung der durch Beobachter O und Lichtquelle L festgelegten Geraden liegt. Vielmehr trifft diese den Spiegel außerhalb des Zentrums im Punkte F, wie man sich anhand von Abbildung 15 klarmachen kann: Wenn sich der Beobachter nach unten bewegt, verschiebt sich das Zentrum des Ringsystems nach oben bzw. wandert das Spiegelbild der Lichtquelle nach unten. Dies lässt sich durch Verallgemeinerung der im Anhang 9.1 skizzierten theoretischen Überlegungen auch quantitativ begründen [4].

8 Fazit

Es wurde ein auf einem Teich beobachtetes farbenprächtiges und wohl selten beobachtetes Ringsystem beschrieben. Jedenfalls fanden wir keine Hinweise auf dieses Phänomen in der Literatur vor. Ausgehend von der Vermutung es könnte sich um die bisher aus Laborexperimenten und als Freihandversuch mit einem bestaubten Spiegel bekannten quételetschen Ringe handeln, wurden entsprechende Modellversuche mit Mitteln der Schulphysik durchgeführt [4]. Dabei wurde den Besonderheiten des Naturphänomens (sehr dünner weitgehend transparenter Belag auf der Wasseroberfläche und darauf sedimentierter Staub, der von Erntetätigkeiten in der Nachbarschaft des Teiches herrührte)

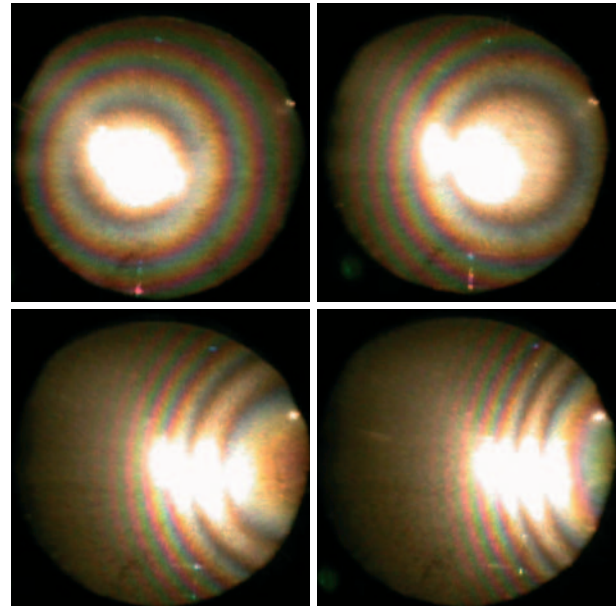


Abb. 14. Quételetsche Ringe, wie sie auf einer oberflächenverspiegelten Glasplatte entstehen, vor der sich eine mit Gips bestaubte Haushaltsfolie befindet. (Der runde Ausschnitt entsteht aufgrund einer Schablone aus schwarzem Karton.)

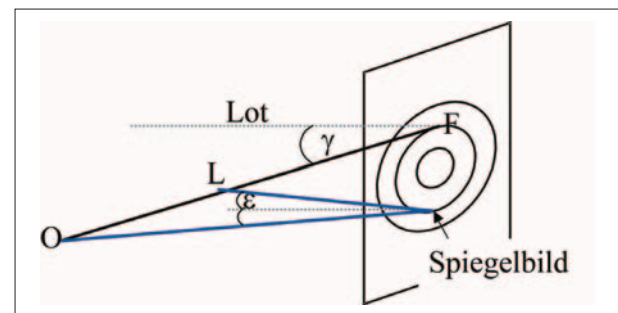


Abb. 15. Die durch Beobachter O und Lichtquelle L festgelegte Gerade trifft außerhalb des Zentrums der quételetschen Ringe auf das Ringsystem im Punkte F auf.

Rechnung getragen, indem ein oberflächenvergüteter Spiegel mit einer 15 μm dünnen Haushaltsfolie versehen wurde. Als Ersatz für den Staub diente Gipspulver, das ein in Größe und Form ähnlich variierendes Substrat darstellt (Abb. 18).

Die Ergebnisse sind sehr überzeugend:

- Es ließ sich sowohl die Exzentrizität des Ringsystems bezüglich der Lichtquelle als auch die Tatsache demonstrieren, dass sich die Ringe nach innen und außen in ihrer Farbreihenfolge »symmetrisch« bezüglich des Spiegelbildes fortsetzen.
- Die Verschiebung des Ringsystems entgegengesetzt zur Verschiebung des Beobachterstandpunktes war deutlich zu erkennen.
- Mithilfe einer dünnen Haushaltsfolie konnte gezeigt werden, dass der beobachtete sehr dünne Belag auf der Wasseroberfläche durchaus geeignet sein sollte, das quételetsche Phänomen hervorzurufen.
- Durch die Verwendung von Bärlappsporen, deren Teilchen sich durch einheitliche Größe und Form

auszeichnen, konnte neben dem quèteletschen Ringsystem ein fraunhofersches Ringsystem erzeugt werden. Beide Systeme überlagern sich für den Fall, dass Beobachter und Lichtquelle auf einer Geraden liegen. Durch Veränderung der Beobachterposition ließen sich beide Systeme separieren.

Außerdem sollte exemplarisch gezeigt werden, wie man sich auch auf den ersten Blick erstaunlich erscheinenden und »einmaligen« Naturphänomenen mithilfe von einfachen Modellexperimenten annähern kann, die im vorliegenden Fall zudem eine ausgezeichnete Möglichkeit darstellen, in die traditionellerweise auf recht künstliche Weise behandelte Problematik der Interferenz einzuführen. Die ästhetische Dimension des Phänomens dürfte ihrerseits zu einer erheblichen Motivation beitragen.

Kurz vor Fertigstellung dieser Ausführungen machte uns EVA SEIDENFADEN [6] auf ein Farbphänomen aufmerksam, das durch einen Autoscheinwerfer auf einer Fensterscheibe hervorgerufen wurde (Abb. 16). Das Phänomen weist alle Merkmale von quèteletschen Ringen auf. Sie werden offenbar durch eine verstaubte vordere Fläche der Scheibe und durch Reflexion des Lichts an der hinteren Grenzfläche der Scheibe hervorgerufen. Die Intensität des reflektierten Lichts wird im vorliegenden Fall vermutlich dadurch unterstützt, dass die Scheibe leicht verspiegelt zu sein scheint. Eilig durchgeführte Freihandexperimente mit normalen Scheiben deuten jedoch darauf hin, dass eine solche Teilverspiegelung nicht nötig ist, wenn die Lichtquelle stark genug ist und ansonsten so gut wie kein störendes Streulicht anfällt. Über ein ähnliches, leider nur in einer schlechten Schwarzweißfotografie dargestelltes Ringsystem berichtet CRAIG F. BOHREN [7]. Er führt das Phänomen zunächst auf Farben dünner Schichten zurück, die durch einen Belag auf der Fensterscheibe hervorgeru-

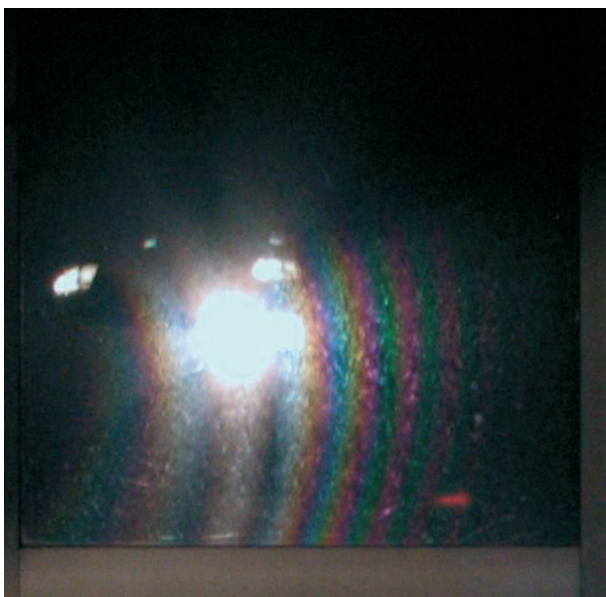


Abb. 16. Durch den Scheinwerfer eines Autos an einer Fensterscheibe hervorgerufene Farberscheinung, die sehr stark an quèteletsche Ringe erinnert (Foto: EVA SEIDENFADEN [7])

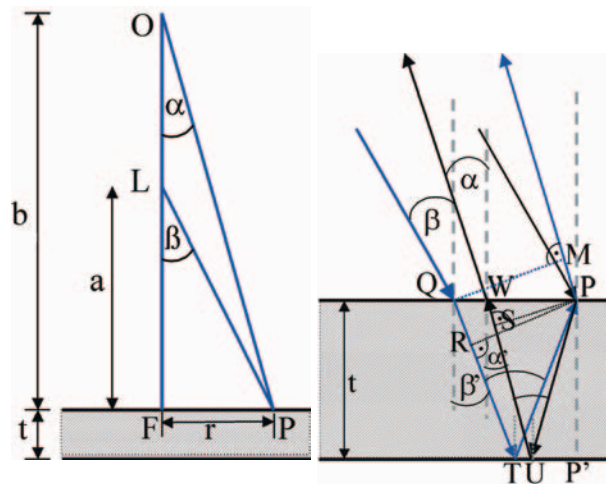


Abb. 17. Zur Herleitung der Formel für die Intensitätsmaxima

fen würden. Als Beweis für diese Vermutung führt er insbesondere an, dass durch Reinigen der Scheibe das Phänomen verschwand. Weil bei dieser Erklärung Fragen offen blieben, kam er mit der Hilfe von Kollegen schließlich auch zu der Überzeugung, dass er quèteletsche Ringe beobachtet hatte.

9 Anhang

9.1 Theoretische Überlegungen

Um sich dem Phänomen auch quantitativ anzunähern, sei für monochromatisches Licht der Wellenlänge λ eine kurze Ableitung des mathematischen Ausdrucks für die Interferenzringe skizziert.

Wir gehen gemäß Abbildung 17 (linkes Bild) von dem Spezialfall aus, dass der Beobachter O im Abstand b und die Lichtquelle L im Abstand a zum Fußpunkt F auf einer Linie liegen. Dieser Fall lässt sich leicht mit Hilfe des in Abbildung 10 dargestellten Versuchsaufbaus realisieren. Der Spiegel habe die Dicke t . Im Abstand r von F befinde sich ein Streuteilchen P. Der Winkel zwischen OF und OP sei α und der zwischen LF und LP β . In einem vergrößerten Ausschnitt (Abb. 17, rechtes Bild) betrachten wir ein Paar Lichtstrahlen gleicher Phase, die jeweils in umgekehrter Reihenfolge an der verspiegelten Schicht (bei T und U) reflektiert und an P gestreut werden. Durch den unterschiedlich langen Weg ergibt sich eine Phasendifferenz Δs . Wenn

$$m\lambda = \Delta s, \text{ mit } m = 1, 2, 3, \dots$$

interferieren die beiden Lichtstrahlen konstruktiv.

Δs ergibt sich schließlich aus der Differenz zwischen den ausfallenden, Δs_2 , und den einfallenden Strahlen, Δs_1 . Weil a und b im Vergleich zu t groß sind und die Winkel α und β sehr klein, können wir des Weiteren von parallelen Lichtstrahlen ausgehen.

Für Δs_1 ergibt sich

$$\Delta s_1 = n(QT + TP) - MP = n(RT + TP).$$

mit $RT = TP \cos 2\beta'$ folgt

$$\Delta s_1 = nTP(\cos 2\beta' + 1) = 2n TP \cos^2 \beta'.$$

Dabei wurde $\cos 2\beta' = \cos^2 \beta' - \sin^2 \beta'$ und $\cos^2 \beta' = 1 - \sin^2 \beta'$ ausgenutzt. Mit $TP \cos \beta' = PP' = t$ erhält man

$$\Delta s_1 = 2nt \cos \beta'.$$

Auf analoge Weise kommt man zu:

$$\Delta s_2 = 2nt \cos \alpha',$$

sodass sich schließlich als gesamter Gangunterschied ergibt:

$$m\lambda = \Delta s = \Delta s_2 - \Delta s_1 = 2nt |\cos \alpha' - \cos \beta'|. \quad (*)$$

Dieser Ausdruck lässt sich leicht mit den einfach zu messenden Größen a , b und r ausdrücken, wenn man $\sin \alpha = n \sin \alpha'$ und $\cos \alpha' = (1 - \sin^2 \alpha / n^2)^{1/2} \approx 1 - \alpha^2 / 2n^2$ benutzt. Die letzte Näherung gilt für sehr kleine Winkel α' .

Auf analoge Weise erhält man $\cos \beta' \approx 1 - \beta^2 / 2n^2$.

Setzt man außerdem $\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha \approx r/b$ und analog dazu $\beta \approx r/a$, so erhält man durch Einsetzen in Gleichung (*)

$$m\lambda = \frac{r^2 t}{n} \left[\frac{b^2 - a^2}{a^2 b^2} \right].$$

Mithilfe dieser Formel wurde aus den mit einer monochromatischen Lichtquelle bekannter Wellenlänge ermittelten Radien r und einer mit Gipspartikeln eingestaubten Folie vor dem Hintergrund eines oberflächenvergüteten Spiegels die Dicke der Folie berechnet [4]. Dazu wurde die Formel nach t aufgelöst:

$$t = \frac{mn\lambda}{r^2} \left[\frac{a^2 b^2}{b^2 - a^2} \right].$$

Mit einem Brechungsindex von $n = 1,53$ für die Hausfolie ergibt sich ein Wert von $t = (14,92 \pm 2,09) \mu\text{m}$ (Herstellerangabe $15 \mu\text{m}$).

9.2 Form und Größe von Streuteilchen

Die Größe und Form der Streuteilchen ist entscheidend für die Entstehung der Farbringe. Es zeigt sich, dass für das Auftreten von Koronen sehr kleine Teilchen einheitlicher Größe und Form wichtig sind. Diese Bedingung wird z. B. von Wassertröpfchen erfüllt, die z. B. durch das Beschlagen eines vorher gekühlten Spiegels entstehen (Abb. 18, rechts). Auch Bärlappsporen sind ideale Streuteilchen zur Erzeugung von Koronen (Abb. 18, links). Ihre fast sphärische Form führt zu sphärischen Koronen. Anders geformte Pollen rufen der Form entsprechend deformierte Koronen hervor. Für die Entstehung von queteletschen Ringen reichen Hausstaub oder ähnliche Substanzen aus. Sie unterscheiden sich von Wassertröpfchen und Pollen durch uneinheitliche Größe und Form der Teilchen. Es zeigt

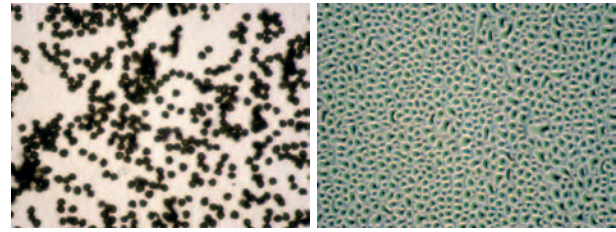


Abb. 18. Mikroskopaufnahmen von Bärlappsporen (links) und Wassertröpfchen (rechts)

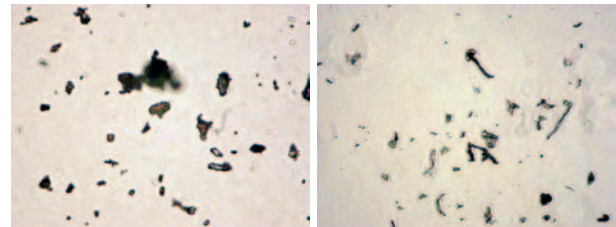


Abb. 19. Hausstaub- (links) und Gipsteilchen (rechts) variieren sehr stark in Größe und Form.

sich, dass Haus- und Erntestaub durch Gips ersetzt werden kann, deren Partikel eine ähnliche Variation von Größe und Form aufweisen (Abb. 19).

Das Freihandexperiment wurde von SUSANNE ANLAUF, die Laborexperimente wurden von KEVIN ZADDACH [4] durchgeführt und von CARSTEN BRUNS fotografiert. Dafür sei ihnen gedankt.

Literatur

- [1] H. J. SCHLICHTING: Jedem sein Heiligenschein. – Physik in unserer Zeit **30** (1999) Nr. 4, S. 173.
- [2] H. J. SCHLICHTING: Der Strahlenkranz im sonnigen Wasser. – Physik in unserer Zeit **31** (2000) Nr. 2, S. 86.
- [3] W. SCHNEIDER: Wege in die Physikdidaktik, Band 5. – Erlangen, Jena: Palm & Enke 2002, S. 1 ff.
- [4] K. ZADDACH: Physikalische Untersuchungen ausgewählter Streuexperimente. – Münster (unveröffentlicht) 2004.
- [5] R. W. POHL: Optik und Atomphysik, 12. Aufl. – Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1967.
- [6] <http://www.paraselene.de>. EVA SEIDENFADEN zeigt auf dieser Homepage eindrucksvolle Fotos von Natur- und Alltagsphänomenen.
- [7] C. F. BOHREN: What light through yonder window breaks? – New York: Wiley 1991, p. 13–23.
- [8] C. A. SAWICKY: Easy and Inexpensive Demonstration of Light Interference. – The physics teacher **39** (2001) January S. 16–19.

Dr. H. JOACHIM SCHLICHTING, Universität Münster, Institut für Didaktik der Physik, Wilhelm-Klemm-Str. 10, 48149 Münster, schlichting@uni-muenster.de, ist Professor für Didaktik der Physik. Die physikalische und fachdidaktische Erschließung von Alltags- und Naturphänomenen gehört zu einem seiner Arbeitsgebiete. Zur Unterstützung der Belange der Didaktik der Physik und der Schulphysik ist er seit Jahren in Gremien der Deutschen Physikalischen Gesellschaft aktiv. Er war u. a. Leiter des Fachverbandes Didaktik der Physik.