

BEITRAG AUS DER REIHE:

Karl-Heinz Lotze, Werner B. Schneider (Hrsg.)

Wege in der Physikdidaktik Band 5 Naturphänomene und Astronomie

ISBN 3 - 7896 - 0666 - 9

Verlag Palm & Enke, Erlangen und Jena 2002

Anmerkung:

Die Bände 1 bis 5 sind (Ausnahme Band 5) im Buchhandel vergriffen.
Die einzelnen Beiträge stehen jedoch auf der Homepage

<http://www.solstice.de>

zum freien Herunterladen zur Verfügung.

Das Copyright liegt bei den Autoren und Herausgebern.

Zum privaten Gebrauch dürfen die Beiträge unter Angabe der Quelle
genutzt werden. Auf der Homepage

www.solstice.de

werden noch weitere Materialien zur Verfügung gestellt.

H. Joachim Schlichting

Der Heiligenschein als Naturerscheinung - Physikalische Aspekte einiger unscheinbarer Naturphänomene

*Jeder (kann)... an jedem Frühlings-Morgen, im Glanz der Wiesen
keinen andern vorübergehenden Schattenkopf im Heiligenschein des Tauses umfaßt
erblicken (nach der Optik) als seinen eignen, aber keiner den fremden.*

Jean Paul

Der Heiligenschein schmückt in der Malerei die Köpfe von Heiligen und anderen auserwählten Personen. Man beobachtet hier vor allem zwei Typen, den kranzförmigen und den strahlenförmigen Heiligenschein. Aber auch als normal Sterblicher kann man in den Genuss eines Heiligenscheins kommen und das nicht nur im metaphorischen Sinne, wenn auch mit der kleinen Einschränkung, dass er nur den eigenen Kopfschatten umgibt. Je nachdem, ob der Schatten auf eine feuchte Wiese oder die Oberfläche eines trüben Gewässers fällt, wird ein kranzförmiger oder strahlenförmiger Heiligenschein hervorgebracht.



Abb. 1: Heiligenscheine in der Kunst. Neben dem Strahlenkranz (Mitte) treten vor allem Lichtkreise auf (Ausschnitt aus: *Beweinung Christi*, von Fra Angelico)

In allen Fällen geht die durch den profanen Alltagskontext bedingte Entzauberung des Heiligenscheins mit der auf den ersten Blick irritierend erscheinenden Erkenntnis einher, dass er – anders als bei den künstlerischen Darstellungen – nur von seinem eigenen Träger wahrgenommen werden kann. Insofern ist das Phänomen ziemlich scheinheilig.

Auch wenn der Heiligenschein oft unscheinbar und wenig spektakulär ausfällt, so dass man erst einmal darauf aufmerksam gemacht werden muss, entpuppt er

Aber nicht nur in der Natur, auch in der durch die naturwissenschaftliche Technik geprägten Welt kommen zumindest kranzförmige Heiligenscheine um den Schattenkopf vor. Als Untergrund für den Schatten eignen sich Verkehrsschilder, Kfz-Kennzeichen u.ä. Im Lichte nicht notwendig der Sonne, sondern eines Scheinwerfers oder einer anderen intensiven Lichtquelle wird der Kopfschatten von einer deutlichen Aufhellung umgeben.

sich aus dem Blickwinkel der Physik als ein einfaches, allein mit den Mitteln der geometrischen Optik nachvollziehbares Phänomen.

1 Der Heiligenschein auf der feuchten Wiese

Betrachtet man frühmorgens, wenn die Sonne noch tief steht und der Tau auf den Wiesen noch nicht verdunstet ist, seinen eigenen Schatten auf dem feuchten Gras, so kann man häufig einen hellen Schein um den Kopfschatten herum beobachten. Ist man nicht allein und hat einen Begleiter oder eine Begleiterin dabei, so wird man überrascht erkennen, dass dessen oder deren Schattenkopf eine derartige Aufhellung nicht aufweist. Darauf aufmerksam gemacht, wird er oder sie das Gegenteil behaupten. Diese merkwürdig anmutende Asymmetrie in der Wahrnehmung lässt das Phänomen in einem geradezu geheimnisvollen Licht erscheinen. Dem zu seiner Zeit berühmten Künstler und Goldschmied Benvenuto Cellini (1500-1571) muss es ähnlich gegangen sein, wenn er folgendes berichtet: „Dann muss ich noch eine Sache nicht zurücklassen, die größer ist, als dass sie einem anderen Menschen begegnet wäre, ein Zeichen, dass Gott mich losgesprochen und mir seine Geheimnisse selbst offenbart hat. Denn seit der Zeit, dass ich jene himmlischen Gegenstände gesehen, ist mir ein Schein ums Haupt geblieben, den jedermann sehen konnte, ob ich ihn gleich nur wenigen gezeigt habe... . Diesen Schein sieht man des Morgens über meinem Schatten, wenn die Sonne aufgeht, und etwa zwei Stunden danach. Am besten sieht man ihn, wenn ein leichter Tau auf dem Grase liegt.... ich kann ihn auch anderen zeigen...“ [1].



Abb. 2



Abb. 3



Abb. 4

Abb. 2: Eine deutliche Aufhellung um das Schattenhaupt des Fotografen hier auf einer Wiese mit hohem Gras.

Abb. 3: „Beobachter“ ist hier die Kamera. Deswegen ist auch nicht das Schattenhaupt des Fotografen, sondern die Kamera vom Schein umgeben.

Abb. 4: Nicht nur auf Gras, sondern auch an größeren Pflanzen kann man den Heiligenschein zuweilen entdecken.

Während Cellini noch die Mächte des Himmels bemüht und in dem Lichtkranz um seinen Schattenkopf mehr als eine nur äußere Ähnlichkeit mit dem Heiligenschein

auf Gemälden zu erkennen glaubt, werden wir als aufgeklärte und demokratisch denkende Menschen aus der Auszeichnung des eigenen Kopfschattens nicht auf unsere Auserwählung schließen und den Schein für heilig halten. Vielmehr werden wir natürliche Ursachen vermuten und uns um eine physikalische Aufklärung des Heiligenscheins bemühen.

2 Die physikalische Entzauberung des Scheins

Verfolgt man die Geschichte der physikalischen Aufklärung des Heiligenscheins [4], so erscheint es im Nachhinein gesehen erstaunlich, wie lange es gedauert hat, das an sich einfache physikalische Phänomen zu deuten. Eine Ursache dafür dürfte in einer gewissen Komplexität zu sehen sein, die darin besteht, dass mehrere sich überlagernde Effekte zum Zustandekommen des Heiligenscheins beitragen.

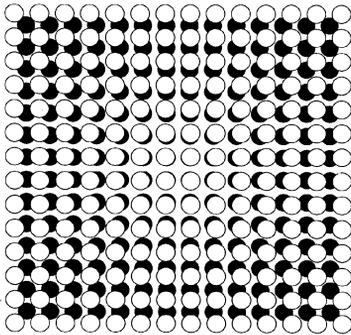


Abb. 5



Abb. 6

Abb. 5: Je weiter der Blick von der Lichtstrahlrichtung abweicht, desto mehr treten die Schatten der bestrahlten Flächen in Erscheinung, wodurch die Flächenhelligkeit abnimmt (nach [3]).

Abb. 6: Eine Glaskugel flammt geradezu in der Farbe der Unterlage auf, wenn sich ihr der Kopfschatten nähert.

In einer der ersten Erklärungen aus dem Jahre 1904 [11] wird davon ausgegangen, dass man in Richtung der Sonnenstrahlen blickend nur die beleuchtete Seite beispielsweise der Grashalme sieht, während bei größerer Abweichung von dieser Richtung immer mehr unbeleuchtete Anteile in den Blick geraten, was zu einer Verminderung der Flächenhelligkeit führt. In Analogie zum Mond, von dem man ja auch um so mehr sieht, je mehr sich die Blickrichtung der Richtung der Sonnenstrahlen annähert, wird der Heiligenschein hier auf die Reflexion des Sonnenlichtes durch die Grashalme und die daran haftenden Tautropfen zurückgeführt. Hinzu kommt, was aber erst später erkannt wurde, dass bei schrägem Lichteinfall der Einfluss der Schatten der vorderen Objekte und die dadurch abgedunkelten hinteren Objekte immer größer wird (Abb. 5). Die Beobachtung, dass der Effekt bei

tiefstehender Sonne besonders ausgeprägt ist, hängt damit zusammen, dass mit großer Entfernung des Schattenkopfes die Abweichung von der Einstrahlrichtung klein ist. Außerdem dürften die Tautröpfchen im Laufe der Zeit und mit steigender Sonne allmählich verdunsten. Aber rechtfertigt die Verdunstung der Tröpfchen, dass das Phänomen zumindest für den normalen Beobachter so gut wie völlig verschwindet? Müsste das Phänomen nicht auch zu beobachten sein, wenn kein Tau vorhanden ist, also beispielsweise wenn die Sonne untergeht? (siehe unten)

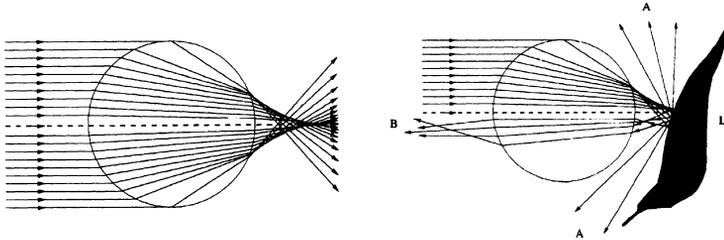


Abb. 7: Das nahezu parallele Sonnenlicht wird nach Durchgang durch den Tropfen fokussiert (links). Befindet sich in der Nähe des Brennpunktes ein Gegenstand, z.B. ein Blatt, so wird ein Teil des Lichtes in den Tropfen zurückgestreut und von diesem so gebrochen, dass das Licht hauptsächlich in Richtung der Lichtquelle zurückgestrahlt wird (rechts).

Offenbar wird bei dieser Erklärung der überragende Einfluss der Wassertröpfchen unterschätzt. Deshalb haben sich spätere Untersuchungen vor allem der Rolle der Tröpfchen angenommen.

Betrachten wir einen Modellwassertropfen in Form einer Glaskugel, die wir auf ein Blatt Papier oder – noch realistischer – auf den Rasen legen. Wenn diese Kugel mit einer künstlichen Lichtquelle oder dem Sonnenlicht bestrahlt wird, so stellen wir keine auffälligen Besonderheiten fest. Erst wenn wir die Kugel mit der Lichtquelle im Rücken betrachten, leuchtet sie um so heller auf, je näher wir der direkten Verbindungslinie Lichtquelle – Kugel kommen (Abb. 6). Dabei verhindert lediglich die Undurchsichtigkeit unseres Kopfes eine weitere Steigerung der Lichtintensität. Offenbar strahlt die Kugel das auffallende Licht hauptsächlich in die 180° - Richtung, also zur Lichtquelle zurück (Abb. 7 rechts). Die Intensität des zurückgestrahlten Lichtes klingt mit zunehmender Abweichung von der 180° -Richtung sehr schnell ab. Der Heiligenschein wird also nur von den geringfügig abweichenden Lichtstrahlen hervorgebracht und ist deshalb um so intensiver, je kleiner der Kopfschatten wird bzw. je weiter man von den reflektierenden Tropfen entfernt ist.

Wie kommt es zu dieser Rückstrahlung des Lichtes durch eine Kugel? Wie man sich anhand von Abb. 7 klarmacht, durchläuft das nahezu parallele Sonnenlicht nach Durchgang durch die Kugel einen Brennpunkt in unmittelbarer Nähe. Da-

von würde man normalerweise gar nichts merken, weil das Licht bis auf geringfügige Reflexionen in der Kugel hinter dem Brennpunkt wieder auseinander läuft¹. Nur wenn sich in der Nähe Materie befindet – im vorliegenden Fall das Gras, auf dem die Kugel liegt oder an dem die Wassertröpfchen hängen – wird das Licht zurückgestreut. Wegen der Nähe des Brennpunktes gelangt dann ein erheblicher Teil des an der Materie gestreuten Lichtes wieder in die Kugel zurück und wird so fokussiert, dass es vor allem in Richtung Lichtquelle reflektiert wird.

Aber warum erscheint uns das von den Tröpfchen auf dem grünen Gras zurückgestrahlte Licht nicht wie im Normalfall grasgrün, sondern weiß? Mit dieser Frage haben sich Wissenschaftler lange auseinandergesetzt [2]. Das Ergebnis dieser Bemühungen ist in Abb. 8 skizziert. Demnach treten vor allem aufgrund der Abweichungen der Wassertröpfchen von der Kugelgestalt zusätzlich zur Reflexion von der bestrahlten Oberfläche (Abb. 8e) und der anschließenden Fokussierung durch die Tropfen weitere Effekte auf. Dies sind vor allem die verschiedenen Möglichkeiten der Totalreflexion an der Rückseite des Tropfens aufgrund der stets vorhandenen mehr oder weniger ausgeprägten Deformationen (Abb. 8a-d).

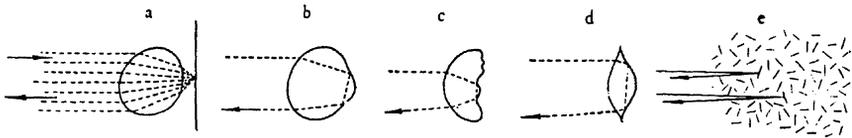


Abb. 8: Den in Abb. 5 und 7 dargestellten Effekten überlagern sich weitere Effekte und rufen in ihrer Gesamtheit den typischen Eindruck des Heiligenscheins hervor (nach [2]).

Legt man eine transparente Glaskugel auf eine farbige (nicht glänzende) Unterlage (z.B. wie in Abb. 6 auf eine grüne Wiese) und betrachtet die Kugel, soweit dies aufgrund der Verdeckung durch den eigenen Kopf möglich ist, aus der Strahlrichtung der weißen Lichtquelle, so flammt die Kugel in der Farbe der Unterlage auf. Denn die Unterlage schickt farbiges Streulicht in die Kugel zurück. Totalreflexionen an der Innenwand der Kugel treten nur in geringem Umfang auf.

Trotz der Dominanz der Wassertröpfchen beim Zustandekommen des Heiligenscheins kann ein geübter Beobachter zuweilen auch dann eine Aufhellung um den Schatten des eigenen Kopfes erkennen, wenn keine Tröpfchen vorhanden sind (Abb. 9). In einem solchen Fall kommt natürlich nur der oben erwähnte Effekt zum Tragen, dass in Richtung der Lichtstrahlen eine vollständige Ausleuchtung gegeben ist, die zu einer größeren Flächenhelligkeit führt als wenn man in andere Richtungen blickt, bei denen seitliche Schatten ins Spiel kommen und die Flächenhelligkeit entsprechend herabsetzen. Begünstigt wird dieser Effekt auch

¹ Allerdings kann auch diese Geringfügigkeit bei einer Vielzahl kleiner Tröpfchen zu einem anderen Naturphänomen führen, zum Regenbogen.



Abb. 9: Bei langen Schatten, wie hier in einer Sandwüste, ist das Gebiet um den Kopfschatten leicht aufgehellt.

lung wahrnimmt, die sofort zu verschwinden scheint oder unscheinbar wird, wenn man stehen bleibt, um das Phänomen genauer in Augenschein zu nehmen oder es zu fotografieren.

3 Technischer Heiligenschein auf Retroreflektoren

Wer mit der Sonne oder auch einer künstlichen Lichtquelle im Rücken, den eigenen Schatten vor sich herschiebend auf ein Verkehrsschild oder Kfz-Kennzeichen zugeht, kann eine deutliche Aufhellung des Schildes unmittelbar bevor der Schattenkopf darauf erscheint beobachten. Schaut man genauer hin, so stellt man fest, dass der Kopfschatten auf dem Schild von einem ähnlichen Lichtschein umgeben ist wie auf der feuchten Wiese in der Morgensonne. Obwohl dieser technische Heiligenschein in jedem Fall deutlich zu sehen ist, während das natürliche Pendant sehr stark von den äußeren Bedingungen, insbesondere vom Vorhandensein geeigneter Wassertröpfchen auf dem Gras abhängt, fällt er kaum häufiger auf. Offenbar ist man in einer meist durch Alltagsgeschäfte bestimmten wissenschaftlich technischen Umwelt nicht gerade darauf eingestellt, von Naturphänomenen beeindruckt zu werden.

Ist man jedoch auf diese technische Spielform des Heiligenscheins aufmerksam geworden, erwartet man meist ebenso wenig, dass dieses Phänomen einen Nutzeffekt haben könnte, wie man das vom Heiligenschein auf der Wiese erwarten würde. Auf ein anderes Naturphänomen bezogen hat Friedrich Hebbel dieses

dadurch, dass die Schatten sehr lang sind (etwa beim Blick vom Fernsehturm auf einen Wald oder unmittelbar nach Sonnenaufgang bzw. vor Sonnenuntergang).

Günstige Bedingungen zur Beobachtung dieses „trockenen“ Heiligenscheins liegen auch dann vor, wenn man den Schatten eines Flugzeuges in dem man selbst sitzt über Wälder oder andere einfarbige Flächen streifen sieht². Hier kommt vermutlich zusätzlich der sinnesphysiologische Effekt hinzu, dass man die durch die Bewegung bedingten Veränderungen in der Helligkeit leichter erkennen kann und daher auch noch geringste Unterschiede in der Helligkeit wahrzunehmen vermag. Diese Beobachtung kann man beispielsweise auch dann machen, wenn man frühmorgens etwa mit dem Fahrrad an einem Getreidefeld entlang fährt und eine gewissermaßen vor dem Schatten des Kopfes hergeschobene Aufhellung

² Die meist farbige Glorie, die den Flugzeugschatten auf Wolken umgibt, hat andere Ursachen.

nicht auf bestimmte Zwecke und Verwertungszusammenhänge ausgerichtete Wirken der Natur folgendermaßen umschrieben: „Am Regenbogen muss man nicht die Wäsche aufhängen wollen“. Dennoch drängt sich die Frage auf, ob es sich hier um den zufälligen „Nebeneffekt“ einer technischen Anwendung handelt, oder ob das Phänomen gewollt ist, um einen bestimmten Zweck zu erfüllen. Wenn man davon ausgeht, dass der künstliche Heiligenschein ebenso wie der natürliche dadurch zustande kommt, dass das Licht von der reflektierenden Fläche nahezu in Richtung der Lichtquelle zurückgeworfen wird, dürfte eine Antwort auf der Hand liegen.



Abb. 10: Der Schatten einer von hinten angestrahlten Person ist von einem hellen Schein umgeben.



Abb.11: Nur der „eigene“ Schatten, hier der Schatten der Kamera, ist vom Heiligenschein umgeben.

Dazu muss man die Konstellation: Beobachter mit der Lichtquelle im Rücken auf den Heiligenschein blickend, nur etwas variieren. Anders als beim (solaren oder lunaren) natürlichen Heiligenschein ist es in diesem Fall nämlich möglich, die Lichtquelle zwischen Beobachter und Reflektor zu stellen. Dann bleibt die Bedingung für die Rückstrahlung, wonach sich Beobachter, Lichtquelle und Reflektor nahezu auf einer geraden Linie befinden müssen, erfüllt mit der Folge, dass der Schein nicht mehr den Kopfschatten des Betrachters schmückt, sondern das Verkehrsschild in voller Pracht erstrahlen lässt und für diejenigen sichtbar macht, die sich darauf zu bewegen. Wem wäre nicht schon aufgefallen, dass Schilder geradezu aus sich heraus „aufzuflammen“ scheinen, wenn sie vom Lichtkegel des eigenen Autoscheinwerfers erfasst werden. Demgegenüber sind sie für einen Fußgänger ohne Lampe meist nur schwer zu erkennen, es sei denn das Schild wird vom Scheinwerferlicht eines nahezu aus derselben Richtung kommenden Kraftfahrzeugs getroffen. Ohne eine derartige Retroreflexion würde das Licht in alle Richtungen gestreut, so dass sich nur ein Bruchteil der Helligkeit ergäbe und man im Sinne einer ausreichenden Sichtbarkeit auf eine eigene „aktive“ Beleuchtungseinrichtung angewiesen wäre.

Die technische Retroreflexion wird ähnlich wie beim natürlichen Heiligenschein auf der Wiese dadurch erreicht, dass man die aufzuhellenden Flächen gewissermaßen mit künstlichen, permanenten „Tröpfchen“ versieht. Dazu werden Plastikfolien verwendet, die mit einer Schicht durchsichtiger Plastik Kügelchen von etwa 0,05 mm belegt wurden. Die Kügelchen sind in die Folien eingebettet und lassen sich mit dem Mikroskop leicht erkennen und ausmessen (Abb. 12).

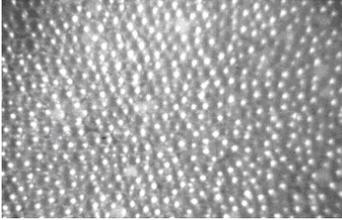


Abb. 12: Mikroskopaufnahme der Oberfläche eines D - Schildes (Nationalitätenkennzeichen). Deutlich zu erkennen sind die in der Folie eingelagerten Plastik Kügelchen.

Die Geometrie der Kugel bedingt, dass die Kügelchen das Licht so brechen und reflektieren, dass es vor allem in Einstrahlungsrichtung zurückgestrahlt wird. Wie beim natürlichen Heiligenschein lässt sich auch hier die exakte Zurückstrahlung nicht direkt beobachten, weil in diesem Fall zwar nicht der Kopf des Beobachters dafür aber die Lichtquelle im Wege ist.

Man kann sich aber eines einfachen Tricks bedienen, um die Retroreflexion zu demonstrieren. Dazu bildet man eine Lichtquelle auf eine Blende ab und lässt das Licht auf einen Retroreflektor, beispielsweise ein reflektierendes Nationalitätenkennzeichen (D-Schild), fallen. Da sich das Bild der Blende nicht auf ihr selbst auffangen lässt, koppelt man zurückgeworfenes Licht mit einem teildurchlässigen Spiegel, etwa einer Glasplatte, aus (Abb. 13 und Abb. 14).

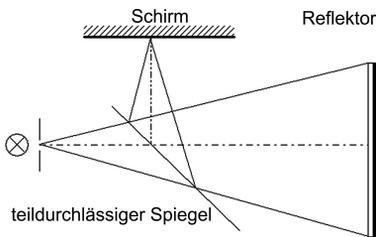


Abb. 13

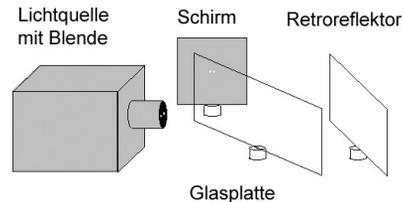


Abb. 14

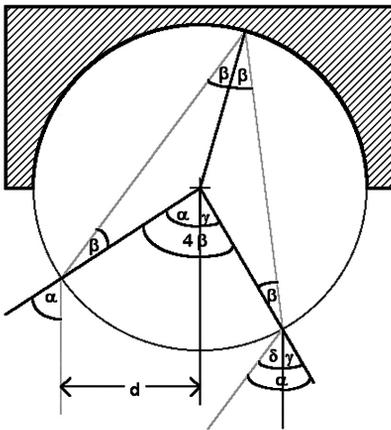
Abb. 13: Mit einer Glasscheibe als Strahlteiler lässt sich das vom Retroreflektor in Richtung auf die Lichtquelle zurückgestrahlte Bild der Lichtquelle auskoppeln und auf einem Schirm auffangen.

Abb.14: Schematischer Versuchsaufbau zur Demonstration, dass das Bild der Blende (hier in Form zweier Lichtpunkte) in Richtung Blende zurückgestrahlt wird.

Aufgrund der Reflexionseigenschaften des Retroreflektors zeigt sich, dass auf dem Schirm genau dann ein scharfes Bild der Blende entsteht, wenn Schirm und Blende den selben Abstand zum Spiegel haben. Nun kann man den Retroreflektor verkippen, seinen Abstand zur Glasplatte variieren oder vor ihn Linsen oder andere transparente Gegenstände stellen, wodurch u.a. die Einstrahlrichtung des Lichtes variiert wird. Nichts von alledem hat jedoch einen merklichen Effekt auf die Lage und die Schärfe des Bildes auf dem Schirm: Der Retroreflektor kehrt den Strahlengang weitgehend unabhängig vom Einfallswinkel um und bildet die Lichtquelle in sich selbst ab. Dies geschieht allerdings nicht exakt, sondern nur ungefähr. Wie beim natürlichen Heiligenschein kommt es jedoch auch hier auf dieses „ungefähr“ ganz wesentlich an. Ohne eine Abweichung von einer exakten Retroreflexion wären weder der Heiligenschein auf der Wiese noch die richtungsunabhängige Aufhellung der Verkehrsschilder u.ä. zu sehen.

4 Auf die Abweichung kommt es an

Da die Kügelchen in eine reflektierende Schicht eingebettet sind, werden die Lichtstrahlen an der Grenzfläche zwischen Kügelchen und Folie reflektiert. Der Verlauf eines beliebigen Lichtstrahls vor und nach der Reflexion ist in Abb. 15 skizziert. Demnach wird der unter dem Winkel α auf der Kugel auftreffende Lichtstrahl nach dem Snelliusschen Brechungsgesetz unter dem Winkel β gebrochen: Mit den Angaben in Abb. 15 folgt:



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_k$$

$$\gamma = 4\beta - \alpha$$

$$\delta = \alpha - \gamma$$

$$\delta = 2\alpha - 4\beta.$$

Wenn das eingestrahelte Licht in 180°-Richtung reflektiert wird, gilt:

$$\delta = 0.$$

Daraus folgt:

$$4\beta - 2\alpha = 0 \text{ oder: } \alpha = 2\beta,$$

d.h. der Einfallswinkel ist gerade doppelt so groß wie der Brechungswinkel.

Die Retroreflexion erfolgt also entgegen der Einfallsrichtung (180°-Richtung). Für alle davon abweichenden Einfallsrichtungen, wovon in der Regel auszugehen ist, ergibt sich eine Ablenkung δ von der 180°-Richtung:

$$\delta_{n_k}(\alpha) = 2\alpha - 4 \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{n_k}\right)$$

Abb. 15: Strahlengang eines an der Rückwand der Kugel reflektierten Lichtstrahls (Die Abweichung von der 180° Richtung wurde übertrieben gezeichnet).

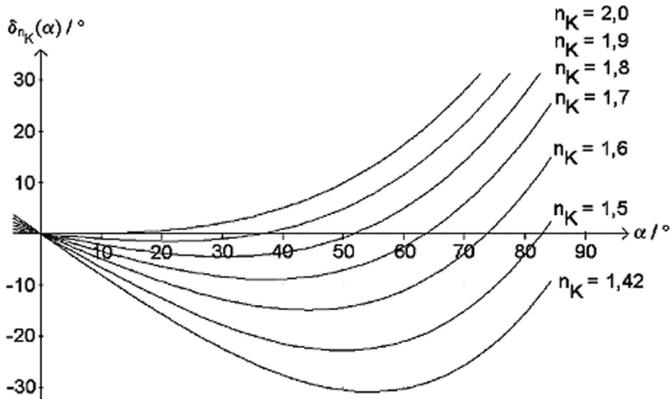


Abb. 16: Abhängigkeit der Lichtablenkung δ vom Einfallswinkel α für verschiedene Brechungsindizes

Wie man Abb. 16 entnimmt, variiert die Lichtablenkung δ nur wenig mit dem Einfallswinkel α . Für Brechungsindizes $1,7 < n_K < 2,0$ ist die Ablenkung minimal. Beim natürlichen Heiligenschein dominiert die Totalreflexion des Lichtes. Deshalb erstrahlt er auch nicht in der Farbe des grünen Grases, sondern eher im weißen Licht der Lichtquelle. Das ist auch bei den Retroreflektoren der Fall. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass die Totalreflexion nicht durch die Deformation der Kugeln bedingt wird, sondern bei perfekt sphärischen Kugeln aufgrund einer reflektierenden Hintergrundmatrix erfolgt, in die die Kugeln eingebettet sind. Die unterschiedliche Farbgebung der Schilder wird durch eine transparente Folie in der gewünschten Farbe erreicht, mit der die Retroreflektorschicht überzogen ist. Für Experimente mit Retroreflektoren ist man nicht auf Verkehrsschilder angewiesen. Retroreflektierende Folien können in Dekorationsgeschäften in verschiedenen Farben als Meterware relativ preiswert erworben werden.



Abb. 17: Technischer Heiligenschein auf Retroreflektorfolie. Der Heiligenschein umgibt stets den Kopf des Fotografierenden (links und rechts) und wird von der Kamera mitgenommen, wenn diese seitlich verschoben wird.

An der Wand befestigt können lebensgroße Heiligenscheine erzeugt werden (Abb. 17). Die Retroreflektoren sind eines von vielen schönen Beispielen dafür, dass Naturphänomene nicht nur in der Natur, sondern auch in der wissenschaftlich technischen Welt, die ja unter anderem auf einer Nutzung der Naturphänomene im weitesten Sinne des Wortes beruht, aufgefunden werden können.

5 Der strahlenförmige Heiligenschein auf dem Wasser

Dichter und Maler sind oft sehr genaue Naturbeobachter. Wer die folgenden Verse von Walt Whitman liest, wird in der Regel nicht viel damit anfangen können. Sie zu verstehen setzt voraus, ein entsprechendes Phänomen mit eigenen Augen gesehen zu haben:

*Sah den Widerschein des Sommerhimmels im Wasser,
Fühlte meine Augen geblendet von der schimmernden Strahlenspur,
Schaute hinab auf die feinen, strahlenden Lichtspeichen
um die Form meines Kopfes im sonnigen Wasser [10].*

Wenn man auf einem trüben Teich, dessen Oberfläche durch den darüber streichenden Wind leicht gekräuselt ist, seinen eigenen Schatten auf der Wasseroberfläche, bzw. genauer: im Wasser betrachtet, so gewinnt man einen Eindruck davon, was Walt Whitman gemeint hat. Der eigene Schattenkopf ist von einem Strahlenkranz umgeben (Abb. 18 links).



Abb. 18: Der Kopfschatten der Person auf dem linken Bild ist von einem ausgeprägten Strahlenkranz umgeben. Das ist ebenso bei der rechten Person auf dem rechten Bild der Fall. Die linke Person geht offenbar leer aus. Auf dem linken Bild ist neben dem Strahlenkranz die Welligkeit des Wassers deutlich zu erkennen. (Foto: J. Lichtenberger).

Wie beim Heiligenschein ist auch dieser strahlenförmige Schein fest an den eigenen Schatten gebunden. Er macht jede Bewegung mit. Dieses Phänomen ist an sich schon so erstaunlich, dass man sich über eine weitere Gemeinsamkeit mit dem Heiligenschein auf der Wiese oder dem Verkehrsschild kaum noch wundert: Wiederum ist nur der eigene Kopf nicht aber der des Begleiters oder der Begleiterin mit der strahlenförmigen „Auszeichnung“ versehen. Zum Ausgleich dafür scheint der Schatten der anderen Person verdoppelt zu sein (Abb. 18 rechts). Wie kommt es zu dieser Erscheinung, und wie lassen sich die Unterschiede zwischen dem linken und dem rechten Schatten erklären?

Offenbar gehört die Strahlenkrone zum Schatten des Fotografen. Unser Blick auf das Bild entspricht seinem Blick, bzw. genauer: dem der Kamera. Deshalb blickt man etwas versetzt von der Seite auf die Lichtstrahlen, die den Schatten des Nachbarn zur Rechten begrenzen. Damit wird aber klar, dass der Schatten auf dem Wasser genau genommen ein Schatten im Wasser ist. Verunreinigungen im Wasser, kleine Schwebeteilchen, streuen das Licht aus verschiedenen Ebenen zur Seite und aus dem Wasser heraus. Dadurch wird der Raum, in den kein direktes Sonnenlicht fällt, als dunkle Säule vom Querschnitt der schattenwerfenden Person, gewissermaßen als Loch im Licht des ansonsten leuchtenden Wassers herausmodelliert.

Die Trübung des Wassers ist eine notwendige Voraussetzung dafür, dass die Strahlenkranzaureole beobachtet werden kann. Diese Trübung ist manchmal nur schwer zu erkennen, insbesondere dann, wenn ein heller Sandboden deutlich zu sehen ist und die hellen Schwebeteilchen das Wasser allenfalls leicht milchig erscheinen lassen.

Außerdem muss das Wasser unregelmäßig gewellt sein. Günstig ist weiterhin eine hochstehende Sonne. Eine in Form von Wasserwellen quasiperiodisch deformierte Oberfläche bietet dem auffallenden Sonnenlicht einerseits vielfältige Gelegenheit, ins Auge des Betrachters reflektiert zu werden. Denn wegen der Krümmung der Wasseroberfläche in einem großen Winkelbereich findet das Sonnenlicht (je nach Sonnen- und Beobachterstand) für einen mehr oder weniger großen Bereich der Wasseroberfläche auf jeder Welle einen passenden Reflexionswinkel vor, so dass von zahlreichen Wellen ausgehend Sonnenlicht ins Auge des Betrachters reflektiert wird. Darin kommt das bekannte Phänomen des *Schwertes der Sonne* bzw. der Lichtstraße zum Ausdruck [8]. Zum anderen wirken die Wellen für das ins Wasser hineingebrochene Licht gewissermaßen wie eine quasiperiodische Anordnung von Hohl- und Wölbspiegeln, die im Falle eines nicht zu tiefen klaren Gewässers auf dem Boden ein Netz von im Rhythmus der bewegten Wellen oszillierenden Kaustiken hervorrufen (Abb. 19).

Diese Kaustiken bilden sich bei einem trüben Gewässer gewissermaßen in jeder Ebene des durchstrahlten Wasservolumens, so dass sich der Weg des Lichts durch das Wasser anhand entsprechender heller und dunkler Säulen verfolgen

lässt. Diese Säulen befinden sich dem Wellengang der Oberfläche entsprechend in einem ständigen Wechsel zwischen Lichtfokussierung und -defokussierung bzw. hellen und dunklen Bereichen. Da dieser Wechsel jedoch durch die ganze durchschaute Wasserschicht hindurch synchron erfolgt, bleibt der Eindruck von Licht- und Schattensäulen erhalten.

Ein ähnliches Phänomen beobachtet man, wenn durch die streuenden Partikel von Nebel oder Rauch Lichtstrahlen durch Öffnungen im Blätterdach von Bäumen entworfen werden. Schon bei diesen Sonnenstrahlen frappt die (scheinbare) Divergenz der Strahlen, die es schwer macht, zu akzeptieren, dass die Sonnenstrahlen nahezu parallel sind (die Abweichung von der Parallelität beträgt kaum

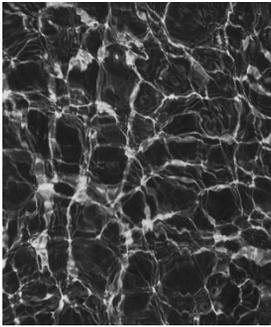


Abb. 19



Abb. 20

Abb. 19: Bei flachem, unregelmäßig gewelltem, klarem Wasser wird ein Netz von bewegten Kaustiken auf den Boden geworfen.

Abb. 20: Die durch die Öffnungen im Blätterdach und leichten Nebel hervorgerufenen „Sonnenstrahlen“ scheinen zu divergieren.

0,5°). Der Eindruck des Auseinanderlaufens der Strahlen ist aber nichts anderes als eine optische Täuschung aufgrund der perspektivischen Verjüngung, wie man sie beispielsweise auch von Eisenbahnschienen kennt, die zum Horizont hin zu konvergieren scheinen. Nur fällt es dann leichter, den perspektivischen Aspekt zu akzeptieren, weil man „weiß“, dass die Schienen parallel sind.

Diese perspektivische Verjüngung ist auch der Grund für den Strahlenkranz im Wasser. Aus der Sicht des Beobachters, der gewissermaßen entlang der optischen Achse blickt, scheinen die von den an sich (fast) parallelen Schattensäulen ausgehenden Lichtstrahlen auf den durch den Kopf verdeckten Antisolarpunkt zuzulaufen, der auch hier durch den Schatten des Kopfes verdeckt ist. Daher scheinen die Schattenstrahlen auf den Schattenkopf zuzulaufen und erwecken auf diese Weise den Eindruck eines den Kopf umgebenden Strahlenkranzes.

Während die Kamera die Dynamik der bewegten Wasseroberfläche fixiert und den Eindruck einer statischen Strahlenkranzaureole hervorruft, nimmt der direkte

Beobachter eine der Wellenbewegung entsprechende Bewegung der Schattensäulen wahr, die den Strahlenkranz darstellen. Diese Bewegung der Strahlen erinnert zuweilen an die Speichen eines rotierenden Rades mit dem Schattenkopf als

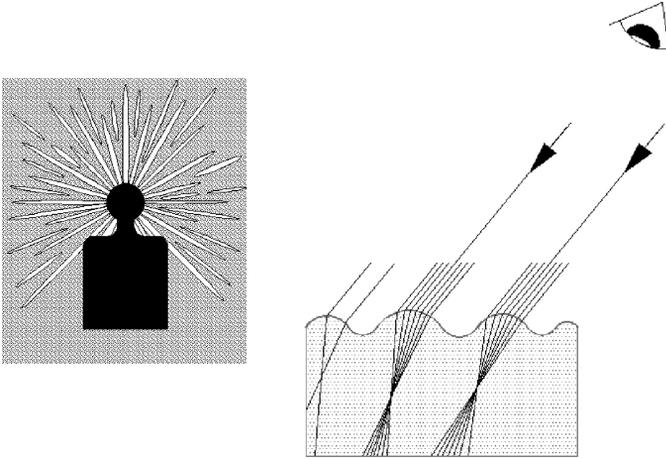


Abb. 21: Die unregelmäßig gewellte Wasseroberfläche erzeugt aus wechselnden Licht- und Schattenstreifen bestehende Säulen im trüben Wasser.

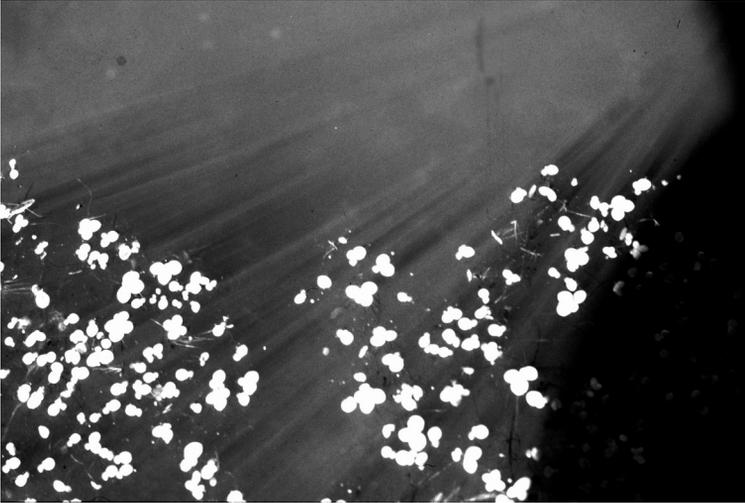


Abb. 22: Die Schattensäulen der Wasserlinsen scheinen radial auf den Schattenkopf des Fotografen am rechten Bildrand zuzulaufen.

Nabe (vgl. den Ausschnitt aus dem Gedicht Walt Whitmans am Ende des Kapitels). Auch wenn die Wellen aus unterschiedlichen Richtungen kommen, kann ein solcher Eindruck durch die Gleichförmigkeit der Wellenbewegung hervorgerufen werden.

Manchmal kann man den Heiligenschein sogar auf ruhigem Wasser beobachten, wenn die Oberfläche durch einzelne schattenwerfende Objekte wie Wasserlinsen und schwimmende Verunreinigungen bedeckt ist. Die Schattensäulen dieser Objekte laufen auf den durch den Kopfschatten verdeckten Antisolarpunkt zu und erzeugen auf diese Weise sogar einen statischen Strahlenkranz. In Abb. 22 ist deutlich zu erkennen, wie die Schattensäulen der Wasserlinsen auf den Schattenkopf am linken oberen Bildrand zulaufen. Auch wenn man aus dem lichtdurchwirkten Schatten eines Baumes auf das ruhige Wasser blickt und seinen eigenen Schattenkopf eher erahnt als tatsächlich sieht, können die ins Wasser eindringenden Lichtsäulen den perspektivischen Eindruck eines strahlenförmigen Nimbus hervorrufen.

Wie beim kreisförmigen Heiligenschein auf der feuchten Wiese oder dem Verkehrsschild beobachten wir auch bei dieser Strahlenkranzaureole die Beschränkung des Phänomens auf den Beobachter bzw. die Kamera. Daher erscheint es gerechtfertigt, auch diesen Strahlenkranz zu den Heiligenscheinen der Natur zu zählen.

Wie bereits eingangs erwähnt, gibt es in der Malerei neben kreisförmigen auch strahlenförmige Heiligenscheine. Diese Übereinstimmung von natürlichen und künstlerischen Phänomenen könnte die Vermutung nahe legen, die natürlichen Phänomene, die wohl schon immer von Menschen beobachtet worden sind, insbesondere zu Zeiten, da die Verbindung von Mensch und Natur noch intensiver war als heute, seien Vorbild für die Darstellung in der Kunst gewesen. Anhaltspunkte für diese Vermutung ließen sich trotz intensiver Literaturrecherchen nicht auffinden. Gesichert ist lediglich, dass der natürliche Heiligenschein auf der Wiese seinen Namen durch die künstlerischen Vorbilder erhielt.

Der strahlenförmige Heiligenschein wird trotz seiner großartigen Wirkung auf den Beobachter erstaunlich wenig beschrieben. Dies mag seine Ursache darin haben, dass man schon einen geschulten Blick haben muss, um ihn zu sehen, sei es nun aus physikalischer oder poetischer Motivation heraus. Walt Whitman, ein naturverbundener Poet aus dem letzten Jahrhundert hatte offenbar diesen Blick, wenn er schreibt:

*„Nimm in dich den Sommerhimmel, du Wasser,
und halte ihn treulich, bis alle herniederschauenden Augen ihn wieder trinken können aus dir!*

*Strahlt, feine Lichtspeichen, um das Spiegelbild meines
Kopfes, oder des Kopfes irgendeines anderen, in dem sonnigen Wasser...“ [10].*

6 Heiligenscheine sehen lernen

Zum Schluss noch ein Wort zu der bei allen Heiligenscheintypen auftretenden Verquickung von beobachtendem Subjekt und beobachtetem Objekt, wie sie durch die Tatsache zum Ausdruck kommt, dass jeder Beobachter nur seinen eigenen Heiligenschein sieht. Sie will nicht so recht zum Credo der klassischen Physik passen, dass Subjekt und Objekt klar voneinander zu trennen sind. Beim Heiligenschein zeigt sich, dass der Beobachter offenbar mit zum „Versuchsaufbau“ gehört, der die Erscheinung hervorbringt. Beruhigend ist allerdings die Kenntnis, dass der Beobachter gar kein Subjekt sein muss. Eine Kamera tut es auch. Auch sie „sieht“ nur einen Schein bei sich, und nicht beim Fotografen, wenn dieser ehrlicherweise dafür sorgt, dass beide genügend weit voneinander getrennt sind und keine Verwechslungen auftreten können (z.B. Abb. 3 und Abb. 11). Vielleicht erinnern wir uns an dieser Stelle daran, dass auch bei anderen optischen Phänomenen, wie etwa bei einem Spiegelbild, einem Regenbogen und einem „Schwert der Sonne“ die Lage ebenfalls von der des Beobachters bzw. des registrierenden Systems abhängt.

„Heiligenscheine überall!“ möchte man nach diesen Ausführungen sagen. Aber man muss lernen, sie zu sehen. Hat man sie aber erst einmal gesehen, so sieht man sie schließlich auch da, wo andere selbst dann Schwierigkeiten haben, etwas zu sehen, wenn sie darauf aufmerksam gemacht werden. Diese Unscheinbarkeit des Heiligenscheins hat aber auch zur Folge, dass Menschen, die auf dieses Phänomen zum ersten Mal aufmerksam gemacht werden, wenig Verständnis für die eigene Begeisterung aufbringen. Ihnen fehlt das Spektakuläre, Eindrucksvolle, das man beispielsweise vom Regenbogen, Blitz und Donner gewohnt ist. Wenn aber einmal die relativ einfachen physikalischen Grundlagen des Phänomens verstanden sind, werden erfahrungsgemäß auch sie – also vor allem unsere Schülerinnen und Schüler – empfänglich für das zur Aureole gestaltete Licht. Denn Phänomene, die sich nicht von selbst erschließen, die vielmehr erarbeitet werden müssen, wirken oft nachdrücklicher und nachhaltiger als alles andere. An dieses Erarbeiten mag auch Goethe gedacht haben, als er die folgenden Verse prägte:

Was ist das Schwerste von allem?

Was dir das Leichteste dünket:

Mit Augen zu sehen,

was vor den Augen dir liegt.

(Johann Wolfgang von Goethe)

Anmerkung: Die Ausführungen beruhen teilweise auf Beiträgen zur „Spielwiese“ der Zeitschrift *Physik in unserer Zeit*[5], [6] und [7].

7 Literaturverzeichnis

- [1] CELLINI, BENVENUTO: Autobiographie übersetzt von Johann Wolfgang von Goethe. In: Goethes Werke. Hamburg: Gutenberg Verlag 1928, S. 236
- [2] MINNAERT, MARCEL: Licht und Farbe in der Natur. Basel usw.: Birkhäuser 1992, S. 416f
- [3] LYNCH, D. K.; LIVINGSTON, W.: *Color and Light in Nature*, Cambridge: University Press 1995
- [4] PERNTNER, J.; EXNER, M., F. M.: *Meteorologische Optik*, Wien und Leipzig: Wilhelm Braumüller 1922
- [5] SCHLICHTING, H. JOACHIM; UHLENBROCK, MARKUS: *Jedem sein Heiligenschein*, Physik in unserer Zeit 30/4 (1999) 173
- [6] SCHLICHTING, H. JOACHIM; UHLENBROCK, MARKUS: *Der Heiligenschein auf dem Verkehrsschild*, Physik in unserer Zeit 30/6 (1999), S. 259
- [7] SCHLICHTING, H. JOACHIM: *Der Strahlenkranz im sonnigen Wasser*. Physik in unserer Zeit 31/2 (2000), S. 86
- [8] SCHLICHTING, H. JOACHIM: *Das „Schwert der Sonne“. Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens*, MNU 51/7 (1998), 387-397.
- [9] WALKER, JEARL: Spektrum der Wissenschaft (Juni 1986), S. 154 (dort weitere Literatur)
- [10] WHITMAN, WALT: *Auf der Brooklyn- Fähre*. In: Grashalme. Zürich 1985, S. 223ff
- [11] WINTERFELD: Gilberts Annalen 18 (1804), 57ff