

Natur freihand- Optische Naturphänomene in Freihandexperimenten

H. Joachim Schlichting Westfälische Wilhelms- Universität Münster

Motivation

Naturphänomene spielen in die Schulphysik eine untergeordnete Rolle. Als Argument wird häufig der experimentelle und mathematische Aufwand genannt. Man beschränkt sich daher auf Idealsituationen, in denen das zugrundeliegende physikalische Prinzip des Phänomens demonstriert werden kann. Dabei geht aber gerade die ästhetische und oft auch emotionale Wirkung vor allem auf nicht physikalisch ausgerichtete Menschen verloren, die als Motivation für die physikalische Auseinandersetzung dienen könnte.

Im folgenden sollen exemplarisch einige Möglichkeiten skizziert werden, wie man sich mit Hilfe einfacher Experimente, die gewissermaßen freihand gelingen [1], wesentlichen Aspekten von Naturphänomenen anzunähern vermag. Über die Anregung, derartige Freihandexperimente in den Unterricht mit aufzunehmen, soll auf diese Weise dafür plädiert werden, einfache physikalische Prinzipien wie die Ausbreitung des Lichtes in homogenen Medien, Schattenbildung, Brechung und Reflexion – im Rahmen von Naturphänomenen zu diskutieren, bei denen die Verständnisschwierigkeiten weniger im physikalischen Anspruch liegen, als vielmehr im ungewohnten Kontext. Aber nur in einem solchen Kontext machen physikalische Zusammenhänge für die meisten Schülerinnen und Schüler Sinn.

Filigrane Lichtnetzwerke im Wasser

Bei direkter Sonneneinstrahlung kann man auf dem Grund eines leicht bewegten Gewässers oft ein feines Lichtnetz erblicken, das in ständig wechselnden, bezüglich "Maschenweite" und "Fadendicke" ähnlich bleibenden Mustern zeigt. Wie kommt es zu diesen Lichtgeweben? Ein einfacher Freihandversuch bringt uns der Sache schlagartig näher. Man legt eine Glasscheibe mit gewellter Oberfläche wie man sie z.B. von Badezimmerfenstern kennt, auf den Overheadprojektor, der bei richtiger Scharfstellung auf der Projektionswand ein ähnliches, wenn auch statisches Muster entwirft.



Bild 1: Wellenförmig strukturiertes Glas (wie es z. B. für Badezimmerfenster verwendet wird), zeigt in Durchsicht ähnliche Reflexmuster wie die wellenförmige Oberfläche eines flachen Gewässers auf dem hellen Grund (Bild 1).

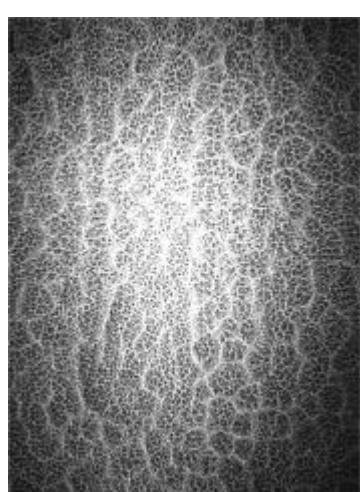


Bild 2: Reflexe des Strukturglasses, wie sie von einem Overheadprojektor entworfen werden.

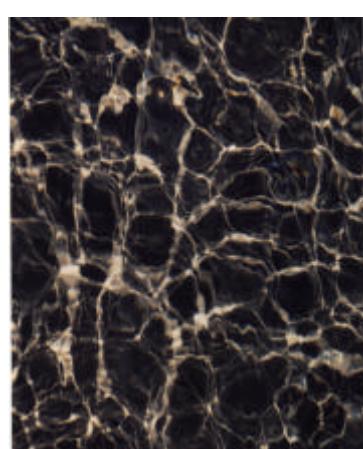


Bild 3: Lichtnetze vor verschiedenen Hintergründen. Häufig haben die Lichtnetze auch noch farbige Ränder

Die Erklärung liegt auf der Hand.

Das Licht durchdringt eine unregelmäßig gewellte Glasscheibe und wird den unterschiedlichen Krümmungen entsprechend lokal unterschiedlich gebrochen. Die sich über die Scheibe schlängelnden konvexen Bereiche (Wellenberge) wirken wie Sammellinsen und fokussieren das Licht entsprechend auf entsprechenden Brennlinien, die in ihrer Gesamtheit das leuchtende Netzwerk ausmachen. Die konkaven Bereiche der Scheibe (Wellentäler) zerstreuen das Licht und sorgen dafür, daß die Lichtintensität in diesen Bereichen

abnimmt und zu einer Verdunklung führt, wodurch das helle Lichtgewebe um so stärker hervorgehoben wird.

Die Übertragung dieses Befundes auf die Phänomene am Grunde des flachen Gewässers liegt auf der Hand. Die gewellte Oberflächenstruktur des bewegten Wassers verhält sich in jedem Augenblick ähnlich wie die Glasscheibe, in der die Bewegung gewissermaßen eingefroren wird. Die Bewegung des Wassers ist jedoch langsam genug, so daß unser Auge die sich wechselnden Muster noch als solche zu identifizieren vermag.

Die strukturelle Ähnlichkeit der sich abwechselnden Muster unterstützt den Eindruck, daß man ein konkretes Muster sieht. Entscheidend für die Brennweite ist die Stärke der Krümmung der Oberfläche. Sie hängt also von der Art der Wellen, insbesondere von der mittleren Wellenlänge ab. Danach richtet sich auch die mittlere Entfernung der Brennebene. Man kann davon ausgehen, daß die Abbildung des Brennliniennetzes am deutlichsten zu sehen ist, wenn der Abstand etwa dem fünffachen des Abstandes der Wellenspitzen, also der halben Wellenlänge entspricht.

Sonnentaler im Klassenzimmer

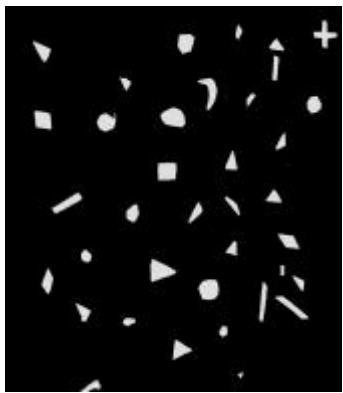


Bild 4: Dieser Karton mit beliebig geformten Löchern wird in den Strahlengang der verschiedenen geformten Lichtquellen gehalten.

Sonnentaler sind ein häufig wahrzunehmendes Naturphänomen, obwohl - oder besser - weshalb es meist übersehen wird (siehe z.B. [5] und [4]). Im Unterricht wird es selten behandelt. Ein Grund dafür dürfte im Fehlen geeigneter ausgedehnter Lichtquellen liegen, die zu ihrer "Herstellung" unabdingbar sind. Eine einfache und kostengünstige Möglichkeit besteht darin, einen Diaprojektor entsprechend zu präparieren. Dazu versieht man schwarze Pappe, aus der man die gewünschte Form der Lichtquelle (kreisförmig, sichelförmig, dreieckig, y-förmig, etc.) geschnitten hat mit Diarähmchen und überklebt die Öffnungen mit mattscheibenartigem, halbtransparentem Papier (z.B. dünnes Pergamentpapier, wie es zum Zeichnen benutzt oder in manchen "Fenstern" von Briefumschlägen verwendet wird). Schiebt man diese Rähmchen in den Projektor, dessen Objektiv man vorher entfernt hat, so verfügt man über eine ausgedehnte Lichtquelle mit variabler Form.

Wenn man in den Strahlengang dieser Lichtquelle Pappkarton mit kleinen beliebig geformten Löchern (Bild 4) einbringt, so erscheinen an der da-

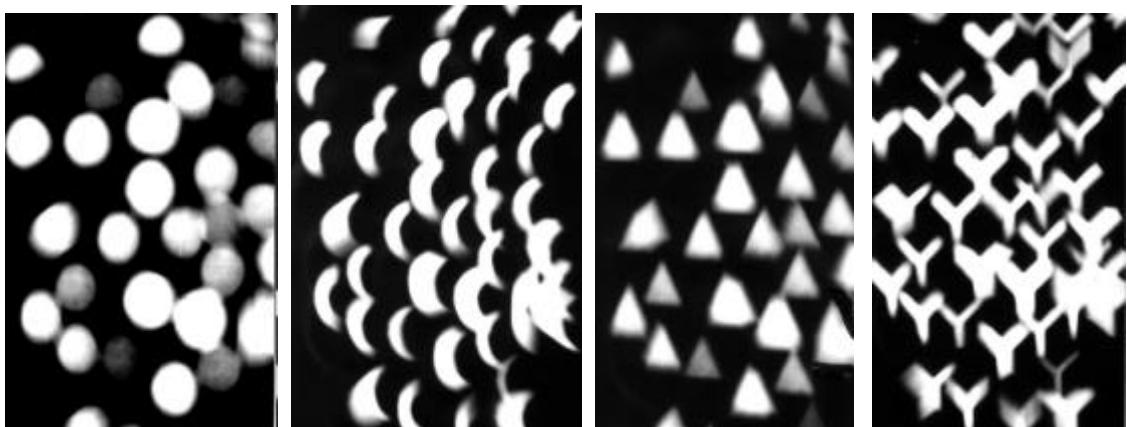


Bild 5: Bilder die sich für verschiedene geformte Lichtquellen ergeben, wenn man einen Karton mit beliebig geformten Löchern in den Strahlengang hält.

hinterliegenden Leinwand Lichtflecken nicht von der Form der Löcher, sondern von der Form der Lichtquelle (Bild 5). Um die Demonstration besonders eindrucksvoll zu gestalten, sollte man die Pappblende mit den Löchern zunächst mit dem Overheadprojektor projizieren und dann dieselbe Pappblende in den Strahlengang des Diaprojektors halten. Dasselbe Lochmuster ruft beim Wechsel der Lichtquelle, der so einfach ist, wie der Wechsel eines Dias, völlig verschiedene Lichtformen auf der Leinwand hervor.

Bei manchen unsymmetrischen Formen der Lichtquelle (z.B. die Form eines Y) erreicht man einen weiteren eindrucksvollen Effekt dadurch, daß man die Blende im Strahlengang der Lichtquelle dreht. Wegen der

unveränderten Form der Lichtquelle und des unwillkürlichen Bezugs des Beobachters auf das mitbewegte Bezugssystem scheinen sich die Lichtfiguren auf der Leinwand zu drehen. Dabei können sich die Bilder dicht beieinander liegender Löcher in eindrucksvoller Weise gegenseitig durchdringen.

Ähnlich wie Blenden schneiden auch kleine Spiegel Lichtbündel aus dem Strahlengang einer Lichtquelle heraus und projizieren sie dem Reflexionsgesetz entsprechend zurück. Kleine rechteckige Spiegel entwerfen im Licht der Sonne kreisrunde Lichtflecken. Diese listige "Quadratur des Kreises" ist zwar nur eine Variante des obigen Versuchs. Aus der Sicht der Schülerinnen und Schüler handelt es sich aber insofern um ein neues Phänomen, als der physikalisch triviale Transfer von Loch auf Spiegel nicht ohne weiteres nachvollzogen wird. Erst wenn sie sich klargemacht haben, daß ein kleiner Spiegel insofern wie ein Loch wirkt, als er aus dem von einer Lichtquelle ausgehenden Licht ein Bündel von der Querschnittsform des Spiegels ausblendet und in eine andere Richtung sendet, wird die prinzipielle Übereinstimmung erkennbar. Eine schülergemäße Krönung dieses Versuchs besteht darin, daß man eine mit winzigen Spiegeln versehene Kugel, wie man sie aus Diskotheken kennt, mit dem Licht verschieden geformter Lichtquellen (hier leistet wieder der oben beschriebene Diaprojektor gute Dienste) bestrahlt und entsprechend geformte Lichtflecken in großer Zahl kollektiv über die Wände laufen sieht. Wenn der Blick für diese Phänomene erst einmal geschärft ist, wird einem auch die folgende Variante dieses Versuchs nicht entgehen. Die oft zu beobachtende Ablenkung des Sonnenlichtes durch das Glas einer Armbanduhr, die man zuweilen als kreisrunden Lichtfleckan an beschatteten Wänden beobachtet, erweist sich – bei genügendem Abstand zur Wand – als unabhängig von der Form des Uhrglases. Das wird man zum Beispiel dann entdecken, wenn die Uhr ein quadratisch oder anders geformtes Glas besitzt oder mit dem Finger bzw. einer Papierschablone teilweise abgedeckt wird.

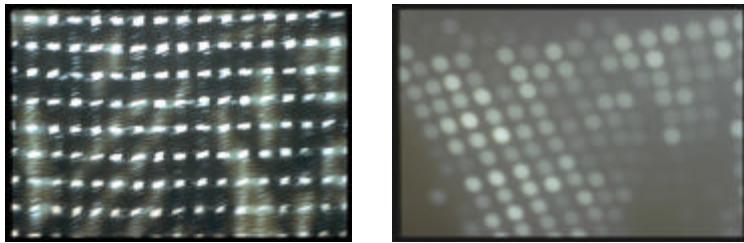


Bild 6: Links: Ausschnitt aus einem luftigen Freizeithemd. Rechts: Das Schattenmuster, das sich ergibt, wenn man das Hemd in die Sonne hängt.

davon entwirft. Ich bin auf dieses Phänomen durch Zufall aufmerksam geworden, als ich bei jemandem, der dieses Hemd trug, am Hals ein Gitter runder Lichtflecken entdeckte, für die es zunächst keine erkennbare Ursache gab.

Das in Bild 7 dargestellte Haushaltssieb ruft ein ähnliches Sonnentalmuster hervor. Es fallen aber außerdem noch zwei weitere Effekte ins Auge. Das Schattensieb ist nicht mehr einfach zusammenhängend. Die einzelnen Sonnentaler scheinen in Verbindung zu stehen. (Diese Entdeckung machte übrigens eine Schülerin: "Das ist gar kein richtiges Sieb mehr. Es besteht aus Licht."). Außerdem nehmen die materiellen Zwischenräume, die etwa gleich groß sind wie die Löcher, ebenfalls die

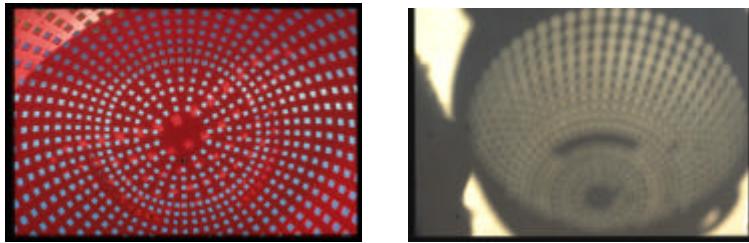


Bild 7: Links: Ausschnitt aus einem Plastikhaushaltssieb. Rechts: Das Schattenmuster, das sich im Lichte der Sonne ergibt.

Kreisform der Sonne an. Wie man sich durch eine ähnliche geometrische Überlegung wie in [5] klarmacht, nimmt der Schatten eines kleinen Gegenstandes in hinreichender Entfernung ebenfalls die Form der Lichtquelle an. Dieses Phänomen läßt sich in der Natur seltener beobachten als echte Sonnentaler. Manchmal sieht man jedoch wie der Schatten der Blätter eines Baumes gewissermaßen von den Ästen getrennt eine Kreisform besitzen. Wenn man im Flugzeug die Gelegenheit hat, den Schatten des Flugzeugs auf dem Boden oder auf einer Wolkendecke in großer Entfernung zu beobachten, sieht man daß die Form des Flugzeugschattens ebenfalls Kreisform annimmt. Die Krönung dieser Beobachtung besteht daran, daß der

Für weitere Variationen der Sonnentalerdemonstration bieten sich auch anders durchlöcherte Gegenstände an, wie etwa grob gewebte Stoffe oder Haushaltssiebe. In Bild 6 ist ein Ausschnitt aus einem luftigen Hemd dargestellt. Daneben das Schattenbild, das die den Stoff durchstrahlende Sonne aufgrund der Kleinheit der rechteckigen Löcher schon in geringem Abstand geworden, als ich bei jemandem, der

geworden, als ich bei jemandem, der

Schatten auf den Wolken oft auch noch von einem farbigen Halo umgeben ist. Im verdunkelten Klassenraum lassen sich auch die "Schattentaler" mit der oben beschriebenen Vorrichtung freihandmäßig erzeugen.

Farbige Sonnentaler

Schließlich sei auf eine weitere Variation der Sonnentaler hingewiesen, die auch noch Farbe in die bisherige Schwarzweißphänomenologie hineinbringt. Erstmalig beobachtet habe ich das folgende Phänomen durch Zufall. An der Wand im Schattenbereich eines Zimmers, entdeckte ich auf der Rauhfaser tapete eine Ellipse von einander überlappenden farbigen Lichtflecken (siehe Bild 14 auf der Umschlagseite). Sie entstanden

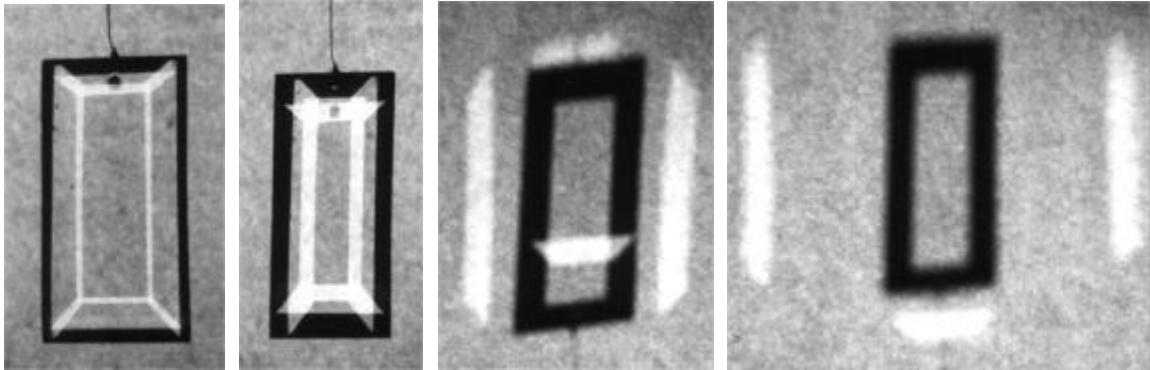


Bild 8: Schatten und durch die schrägen Kanten gebrochenes Licht hinter einem von der Sonne durchstrahlten Glasobjekts in zunehmenden Abstand (von links nach rechts). Die Bilder wurden mit einem weißen Blatt Papier aufgefangen.

durch einen prismatischen Glasgegenstand der als Windspiel im Fenster von der Sonne durchstrahlt wurde. Die vier trapezförmigen nach außen spitz zulaufenden Randelemente des Windspiels (Bild 8) brechen das hindurchtretende Licht, wodurch es von der Einstrahlrichtung abgelenkt wird und einen entsprechenden Schatten hinterlässt (Bild 8 ganz links). Die abgelenkten Lichtstreifen, die in geringer Entfernung noch die Form des Glases besitzen, nehmen in großer Entfernung schließlich die Form der Lichtquelle, also in diesem Fall der Sonne an. Ähnlich wie ein Spiegel "schneiden" die brechenden Kanten aus dem Sonnenlicht Strahlenbündel heraus und lenken sie ab. Der Unterschied zum Spiegel besteht nicht nur darin, daß das Licht nicht zurückgeworfen wird, sondern das Glas durchdringt und zur Seite hin abgelenkt wird. Hinzu kommt, daß der Rand der Lichtflecken aufgrund der leicht unterschiedlichen Ablenkung für die einzelnen Farben des weißen Lichtes in Regenbogenfarben zerfällt, die auf der Schwarz-weiß- Abbildung (Bild 8 ganz rechts) leider nicht zu sehen sind. Bei großer Entfernung runden sich die Kanten der Lichttrapeze immer mehr ab und nehmen schließlich die Kreisform der Sonne an (siehe farbiges Bild 14 auf der Umschlagseite). Es handelt sich hier um auseinander gefaltete farbige Sonnentaler, die im Überlappungsbereich der einzelnen Farben aufgrund der additiven Farbmischung wieder weiß werden.

Abgesehen vom Sonnentalerproblem erweist sich das Windspiel, das - in Bewegung - die farbigen Lichtflecken über die Wände flitzen läßt, als eigenes optisches Studienobjekt. Wie Bild 8 bereits andeutet, lassen sich damit interessante Fragen zur geometrischen Optik untersuchen. Dieser ebenfalls freihandmäßig zugängliche Aspekt kann hier aus Platzgründen nicht weiter verfolgt werden.

Lichtverstärkung bei Regenbogen und Nebensonnen

Wenn man den Faden des obigen Windspiels verdrillt und es dann in die Ausgangslage zurückdrehen läßt, beobachtet man ein weiteres interessantes Phänomen, das für die Illustration von wichtigen Teilespekten anderer Naturphänomene von Bedeutung ist: Links und rechts von der Stelle, an der der rahmenförmige Schatten des Windspiels auftreten würde erscheinen zwei stationäre farbige Lichtflecken (Bild 9 (schwarz weiß) und Bild 13 (Umschlagseite, farbig)). Obwohl der durch das gebrochene Licht hervorgerufene Lichtfleck der Rotation des Windspiels entsprechend an den

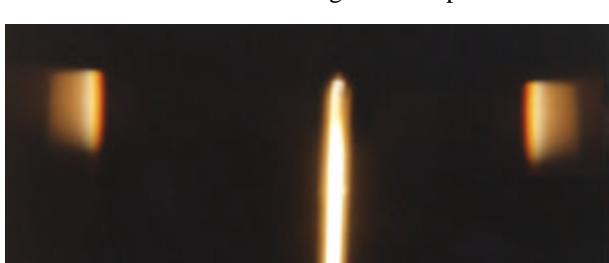


Bild 9: Links und rechts des schnell rotierenden gebrochenen Lichtflecks erscheinen stationäre Spektren.

Wänden umläuft, wovon man nur einen vagen Eindruck gewinnt, scheint es an zwei bestimmten Stellen unabhängig von der Drehgeschwindigkeit fixiert zu sein. Erst kurz bevor es zur Ruhe kommt, kann man die Bewegung der Bilder im einzelnen verfolgen.

Wie kommt es zu dieser "Dauer im Wechsel"? Wenn sich das prismatische Objekt im einfallenden Licht dreht, werden alle möglichen Einfallswinkel nacheinander durchlaufen. Verfolgt man den Ablenkungswinkel in Abhängigkeit vom Einfallwinkel des Lichtes, so nimmt, von kleinen Winkel beginnend der Ablenkungswinkel zunächst zu bis zu einem maximalen Wert. Mit weiter steigendem Einfallwinkel nimmt der Ablenkungswinkel wieder ab. In der Nähe dieses maximalen Winkels werden besonders viele Lichtstrahlen abgelenkt, die in anderen Winkelbereichen fehlen. Es kommt zu der beobachteten Lichtverstärkung (aus Symmetriegründen) an zwei Stellen. Deshalb sieht man das abgelenkte Licht, das mit der Frequenz des drehenden Glases umläuft, an dieser Stelle mit eben dieser Frequenz aufblitzen, was wegen der Trägheit unserer Augen einen nahezu kontinuierlichen Lichteindruck erzeugt. Eine entsprechende Verstärkung des Lichtes ist entscheidend für den Regenbogen und für das weniger häufig zu beobachtende Phänomen der Nebensonnen (siehe z.B. [2] und [3]). Dieses Freihandexperiment kann daher zur Illustration eines ansonsten nur schwer zu veranschaulichenden Effektes ausgenutzt werden. Dazu muß man sich nur klarmachen, daß das schnelle Nacheinander der von einem (möglichst schmalen) Lichtbündel durchlaufenden Winkel dem gleichzeitigen Durchdringen von Wassertropfen (Regenbogen) und prismatischen Eiskristallen (Nebensonnen) durch ein entsprechend breites Lichtbündel entspricht.

Man kann das Experiment natürlich auch mit einem beliebigen prismatischen Objekt durchführen, das man beispielsweise an einem dünnen Faden an den Spiegel eines Overheadprojektors hängt und im Lichte eines durch Abdeckung der Projektorfläche erzeugten schmalen Lichtbündels rotieren läßt. Vor dem Hintergrund z.B. einer Wandtafel kann man sogar den Ablenkungswinkel ausmessen und für quantitative Untersuchungen ausnutzen.

Schwert der Sonne

Unter dem *Schwert der Sonne* wird im folgenden die je nach der Sonnenhöhe dreieckige, ovale oder langgestreckte Lichtbahn auf dem welligen Wasser des Meeres verstanden (siehe z.B.: [6] und [7]). Sie kommt dadurch zu stande, daß aufgrund der unterschiedlichsten Orientierungen einzelner reflektierender Elemente einer Wasseroberfläche das Sonnen- oder Mondlicht auf zahlreichen Wegen zum Auge des Betrachters reflektiert wird und daher insgesamt den Eindruck einer mehr oder weniger großen leuchtenden Fläche hervorruft (Bild 19.), die zwar aus einzelnen (i.a. deformierten) Bildern der Sonne zusammengesetzt ist (andeutungsweise in Bild 10 zu erkennen), durch ihre globale Form aber kaum an die Sonne erinnert



Bild 11: Ein Topfdeckel zeigt infolge von gerichteten Herstellungsspuren Lichtstraßen, die nicht unbedingt auf den Beobachter zeigen.

Ein direkter Freihandzugang zum Schwert der Sonne besteht beispielsweise darin, daß man flach über eine wellenartig strukturierte Oberfläche auf die Reflexe einer Lichtquelle (z.B. einer Taschenlampe) blickt. Es lassen sich auf diese Weise zumindest grob dieselben Umrisse der Reflexe ausmachen, wie bei der Sonne auf dem Wasser. Geeignete Oberflächen sind die bereits oben in einem anderen Zusammenhang benutzten strukturierten Scheiben. Sie ähneln den Wasserwellen nicht nur dadurch, daß sie eine wellenförmig strukturierte Oberfläche aufweisen, sondern auch dadurch daß sie durchsichtig sind und einen Teil des Lichtes durchlassen. Das Problem, statische mit dynamischen Lichtstraßen (auf dem Wasser) zu vergleichen erscheint dann als gelöst, wenn deutlich geworden ist, daß es in beiden Fällen auf das Vorhandensein von unterschiedlich orientierten Flächenelementen ankommt, die das Licht einer Lichtquelle aus verschiedenen Richtungen ins Auge reflektieren. Dabei ist es gleichgültig, ob die reflektierenden Stellen bewegte Wellenflanken sind oder unbewegte Herstellungs- oder Gebrauchsspuren auf Flächen fester Körper, die auf den ersten Blick als perfekt glatt und eben erscheinen.



Bild 10: Hier sind einzelne Reflexe des Sonnenlichtes an unterschiedlichen Neigungen der Wellenflanken zu erkennen.

Hat man den Übergang vom bewegten flüssigen zum unbewegten festen Substrat einmal gedanklich nachvollzogen, so wird verständlich, daß sich der Oberflächenbereich, in dem Reflexe auftreten können, mit Hilfe kleiner Spiegel eingrenzen und abscannen läßt (Einzelheiten sind in [6] skizziert). Auf diese Weise können die Schülerinnen und Schüler darauf vorbereitet werden, das Phänomen in einem sehr allgemeinen Kontext wahrzunehmen und die Strukturen von Glanzerscheinungen auf den verschiedensten Oberflächen als Lichtstraße zu interpretieren. Nur einige Beispiele seien genannt: Man betrachte blanke Oberflächen wie sie u.a. auf Plastik- und Aluminiumfolien, Edelstahlplatten, ja selbst auf Edelstahltöpfen u.ä. auftreten, im Lichte einer Punktlichtquelle. Indem der Winkel zwischen Lichtquelle und Beobachter systematisch variiert wird, erkennt man die Veränderung der Struktur des Reflexbereiches wie sie von der Lichtstraße auf dem Wasser in Abhängigkeit vom Sonnenstand vertraut sind.



Bild 12: Obwohl von Punktlichtquellen (siehe Decke) beleuchtet, sind die Edelstahltafeln mit langen Lichtstraßen übersäht.

In vielen Fällen (z.B. bei Edelstahloberflächen) kann man die mikroskopisch feine Strukturierung gar nicht anders erkennen als indirekt durch das Auftreten der Lichtstraßen. In diesem Fall verhält man sich ähnlich wie ein Physiker, der atomare Oberflächenstrukturen dadurch untersucht, daß er die Reflexe untersucht, die aus der Strahlung bekannter Herkunft hervorgehen.

Eine systematische Herstellung von mehr oder weniger regelmäßig strukturierten Oberflächen ist leicht möglich, wenn man glatte Flächen, z.B. Glasscheiben in geeigneter Weise mit einer dünnen Fettschicht bestreicht, deren Strukturierung die Lichtstraße hervorruft. Streicht man beispielsweise eine Glasplatte in einer Richtung mit Fett ein, so wird man feststellen, daß der Reflex beim Drehen der Platte nicht mehr stets auf den Beobachter zeigt. Damit hat man ein Analogon

zu den Lichtstraßen, auf fließenden Gewässern, aber auch zu Reflexen auf Edelstahlplatten, bei denen die "Wellen" in Form von Herstellungsspuren eine Vorzugsrichtung aufweisen.

Schließlich sei auch noch darauf hingewiesen, daß die kreisförmigen Riefen der Schallplatten und CDs Lichtbahnen hervorrufen, die sich demselben Mechanismus verdanken. Bei der CD kommen außerdem farbige Dispersions- und Interferenzeffekte hinzu, die durch die als Reflexionsgitter fungierende Scheibe hervorgerufen werden. Bei sorgfältiger Betrachtung eines auf diese Weise auf einer CD erzeugten Lichtstreifens kann man sogar einen räumlichen Holographieeffekt erkennen: der Lichtstreifen scheint aus der Ebene der Scheibe herauszutreten und im Raum zu stehen.

Literatur

- [1] H. J. Schlichting, „Freihandversuche. Probleme und Möglichkeiten experimenteller Minimalversuche.,Physik in der Schule 34/4, 141 (1996)
- [2] R. Tammer, V. Vollmer: Regenbögen in Wasser und edleren Tropfen. Praxis der Naturwissenschaften 46/3, 15 (1997)
- [3] R. Tammer, E. Tränkle, D. Karstädt, M. Vollmer: Spektakel bei Sonnenschein. Praxis der Naturwissenschaften 46/3, 24 (1997)
- [4] H. J. Schlichting: Sonnentaler - Abbilder der Sonne. Praxis der Naturwissenschaften Praxis der Naturwissenschaften - Physik 43/4, 19 (1994)
- [5] H. J. Schlichting: Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 48/4, 199 - 207 (1995)
- [6] H. J. Schlichting: Das Schwert der Sonne- Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. I. Lichtbahnen auf dem Wasser. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 51/7 387 (1998)
- [7] H. J. Schlichting: Das Schwert der Sonne- Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. II. Lichtbahnen in alltäglichen Situationen Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht (im Druck)

Vorschlag für Umschlagseite

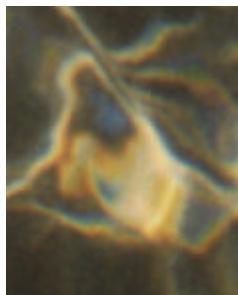


Bild 17: Die Brennstrahlen unter Wasser weisen oft durch Dispersion des weißen Lichtes hervorgegangene farbige Ränder auf.



Bild 14: Spektral zerlegter und auseinandergezogener Sonnentaler, wie er in hinreichender Entfernung entsteht, wenn das Sonnenlicht durch –ein Element des schräg geschliffenen Randes

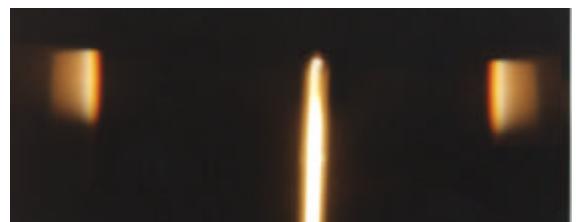


Bild 13: Links und rechts des schnell rotierenden gebrochenen Lichtflecks erscheinen stationäre Spektren.



Bild 15: Typisches Postkartenmotiv mit Lichtstraßen künstlicher Lichtquellen.

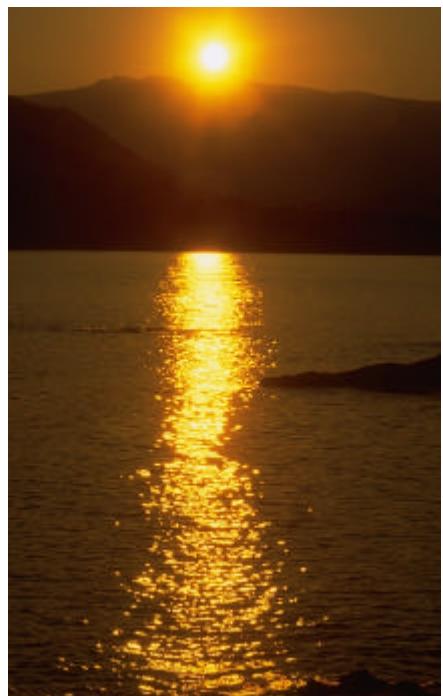


Bild 18: Typisches Schwert der Sonne



Bild 16: Lichtstraße auf einem Drahtgeflecht.



Bild 20: Welchen Ursprung hat diese Lichtstraße?



Bild 21: Auch indirekte Lichtquellen, wie hier ein heller Turm, rufen Lichtstraßen auf dem Wasser hervor.

