

Das „Schwert der Sonne“ -

Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens.

Teil 1: Überblick und Phänomene

Verfasser: H. Joachim Schlichting, Universität GH Essen

Ob man die silbrig blendenden, manchmal auch golden schimmernden Lichtstraßen der Sonne, die an Kometenschweife erinnernden Lichtspuren von Straßenlaternen und Autoscheinwerfern auf dem nassen Asphalt oder die konzentrischen Ovale auf einem Eßlöffel betrachtet, stets hat man es mit einem einfachen optischen Phänomen zu tun, dessen teilweise komplexe und subtile Erscheinung zu einer Schulung des physikalischen Sehens Anlaß geben kann. Es wird beabsichtigt, auf derartige Lichtstrukturen aufmerksam zu machen, und an ausgewählten Beispielen einen physikalischen Zugang zu skizzieren.

*Der Sonnenreflex auf dem Meer wird ein schimmerndes Schwert,
das sich vom Horizont heran bis zu ihm erstreckt.*

Italo Calvino

*Die einsame Sonne, das einsame Meer.
Sonne, flutest und wogst du ebenso mit deinen Flammen, wie unten das Meer?*

Friedrich Hebbel

1 Das Phänomen

Schwert, Brücke, Delta, Obelisk der Sonne, Lichtbahn, Glitzerpfad (glitter path) oder - wie es in Rußland auch genannt wird - *Straße des Glücks*, sind nur einige der Namen, unter denen ein Lichtphänomen in literarischen Darstellungen den jeweiligen Eindrücken entsprechend beschrieben wird, das jeder schon einmal gesehen, sich dadurch aber wohl nur selten zu einer Erklärung veranlaßt gesehen hat. Nimmt man die Häufigkeit der Beschreibungen von Schriftstellern und Dichtern sowie künstlerischen Darstellungen von Malern und Fotografen als Maß



Abb. 1: Mit sinkender Sonne zieht sich die Lichtbrücke in (hier nur schwer zu erkennen-) Dreiecksform zum Horizont hin zurück.



Abb. 2: Das „Dreieck“ verjüngt sich mit weiter sinkender Sonne, was jedoch aufgrund der Perspektive kaum zu erkennen ist.



Abb. 3: Die klassische Brückenform bei tiefstehender Sonne. Die Perspektive einbezogen, handelt es sich auch hier um ein langgezogenes Dreieck.

für die Auffälligkeit und Bedeutung des Phänomens, so stellt man mit Erstaunen fest, daß dem im Physikunterricht, in Lehr- und Schulbüchern kaum Rechnung getragen wird. Woher kommt diese Zurückhaltung, die bei anderen manchmal physikalisch viel schwieriger zugänglichen Naturphänomenen, wie etwa dem Regenbogen oder der Fata Morgana nicht in gleicher Weise festzustellen ist? Man kann nur vermuten, daß den Lichtbahnen aufgrund ihrer Alltäglichkeit wie anderen alltäglichen Dingen auch ihre Fragwürdigkeit abhanden gekommen ist und sie mit dem selbstverständlichen Hintergrund unserer Wahrnehmungen verschmelzen. Um das Phänomen aus der physikalischen Perspektive betrachten zu können, muß man erst einmal lernen, es überhaupt wahrzunehmen. Man wird dadurch schließlich vielleicht den Blick so schärfen, daß einem Lichtstraßen auch in zahlreichen anderen Situationen und Varianten entgegenscheinen, die mit dem ursprünglichen Phänomen nur noch physikalisch zusammenhängen. Vielleicht

wird dem Alltag auf diese Weise mit Hilfe der physikalischen Sehweise ein nicht ganz so alltäglicher Reiz abgewonnen.

Bevor wir uns dem Schwert der Sonne physikalisch annähern, sollen zunächst einige Äußerungen von Schriftstellern und Künstlern zitiert werden:

„Der Reflex auf dem Meer entsteht, wenn die Sonne sich neigt: Vom Horizont her schiebt sich ein blendender Fleck zum Ufer, ein Streifen aus tanzenden Glitzerpunkten; dazwischen verdunkelt das Mattblau des Meeres sein Netz..., und der Sonnenreflex auf dem Meer wird ein schimmerndes Schwert, das sich vom Horizont heran bis zu ihm erstreckt...Während die Sonne tiefer sinkt, färbt der Reflex sich von schimmerndem Weiß zu kupfergoldenem Rot. Und wohin Herr Palomar sich auch wendet, stets ist er selber die Spitze des schlanken Dreiecks. Das Schwert folgt ihm und deutet auf ihn wie ein Uhrzeiger mit der Sonne als Zapfen“ (ITALO CALVINO)

„In Körnchen, Adern, ganzen Flözen von Meeresgold widerspiegelte und vervielfältigte“ sich die Sonne auf der Lagune (GUILLERMO CABRERA INFANTES).

„Die sinkenden Sonnen/ überkleiden die Felder,/ die Kanäle, die ganze Stadt/ mit hyazinthenem und goldenem Dufte;/ die Welt entschlummert/ in einem warmen Lichte“ (CHARLES BAUDELAIRE).

„Diese zuckenden Schwerter im Strom, von roten oder gelben Brückenlaternen ins Wasser geschlängelt, diese bleichen Monde der Bogenlampe in schwarzglänzend spiegelnder Feuchte“ (CHRISTIAN MORGENSTERN)

Labt sich die liebe Sonne nicht,/ der Mond sich nicht im Meer?/ Kehrt wellenatmend ihr Gesicht / nicht doppelt schöner her? (JOHANN WOLFGANG VON GOETHE)

Es war einer von den Abenden, an denen das Meer glatt und still dalag. Die untergehende Sonne spiegelte sich im Ozean und baute mit ihrem Licht eine goldene glitzernde Straße vom Horizont bis vor die Füße des Lokomotivführers Lukas. Lukas schaute auf diese Straße, die in weite Ferne führte, in unbekannte Erdteile, niemand konnte sagen, wohin. Er sah zu, wie die Sonne langsam unterging und wie die Straße aus Licht immer schmaler und schmaler wurde und zuletzt verschwunden war (MICHAEL ENDE).

Eine Aufstellung der "undinglichen" Dinge wie die "mannigfach gemischten Lichteffekte im Wasser, im Dampf, im nassen Asphalt, im Straßendunst, vom Einbruch der Dämmerung bis zum Aufgang des Mondes. Dieses Irisieren der Flußoberfläche in den letzten Krisen des Lichtes, diese zuckenden Schwerter im Strom, von roten oder



Abb. 4: Lichtbrücke des Mondes als typisches Postkartenmotiv



Abb. 5: Das Schwert der Sonne ist auch ein beliebter Gegenstand in der Malerei. Hier von Edvard Munch.

gelben Brückenlaternen ins Wasser geschlängelt, diese bleichen Monde der Bogenlampen in schwarzglänzend spiegelnder Feuchte..."(CHRISTIAN MORGENSTERN).

Er lehnte sich mit den Unterarmen auf die Reling und blickte auf die Straße des Mondlichts auf dem Meer, schwimmend wie silberne Schuppen auf dem Rücken einer gigantischen Seeschlange (PATRICIA HIGHSMITH).

Es ist die schaukelnde Welle, die mit dem Licht spielt, die eckig glitzert wie ein Kristall, die sich nicht überschlägt, weder Kamm noch Schaum bildet und nie im Sand verläuft. Deren Geschichte nicht in Fortbewegungen zählt, sondern in Reflexen und Windmalen und in den Besuchen der Insekten auf ihrer gespannten Haut (BOTHO STRAUß).

In den Beschreibungen werden stets einzelne oft unterschiedliche Aspekte des Phänomens hervorgehoben und teilweise auf verblüffend einleuchtende Weise veranschaulicht. Was ist so faszinierend an diesem Zusammenspiel von Licht und Wasserwellen? Ist es die *Dauer im Wechsel* (JOHANN WOLFGANG VON GOETHE), bei der die ständige Veränderung, die Unruhe des komplexen Flimmerns zahlreicher einzelner Lichtreflexe in der gleichbleibenden und namensgebenden Form auf eine irritierend „entspannende“ Weise zur Ruhe gebracht wird? Oder wird in den Reflexen die Wirkung der Sonne auf sinnlich zugängliche Weise multipliziert, indem uns - mit MARTIN WAGENSCHNEIDER zu sprechen - aus dem Wasser die Sonnenbilder viel bezaubernder anblicken als das blendende Selbst der Sonne, „weil ihr Licht so milde ist, indem die Strahlenflut, die sie auf das Wasser niedergießt, dort etwas hergeben muß, ehe sie umkehrt“?¹ [3]

Wer sich auf das Spiel des Lichtes und des Wassers einläßt, wird bald entdecken, daß er nicht nur Beobachter, sondern selbst zum Bestandteil des Phänomens wird. Ehe er sich versieht, bemerkt er, daß er offenbar ein eigenes nur ihm gehörendes Schwert der Sonne besitzt², und das kann nun wiederum, wie ITALO CALVINO mit seinem Herrn Palomar vorführt, zu tiefschürfenden Fragen führen: Existiert das Schwert der Sonne nur, weil ich da bin? Geschieht das alles „gar nicht auf dem Meer, auch nicht in der Sonne...sondern nur in meinem Kopf... in meinen Gedanken... existiert dieses Schwert aus Licht“ nur dort? Wie erleichtert wäre man angesichts dieser Fragen, wenn es einem gelänge, „sein partielles und zweifelndes Ich in der Gewißheit eines generellen Prinzips aufzulösen! Eines einzigen absoluten Prinzips aus dem sich alle Taten und Formen herleiten?“ [4].

2 Lichtbahnen geometrisch betrachtet

Bevor wir uns durch geometrische Betrachtungen diese Erleichterung verschaffen, soll der Blick noch etwas verallgemeinert werden. Obwohl das Schwert der Sonne i.a. die größte Aufmerksamkeit findet, werden ähnliche Lichtbahnen auch durch andere Lichtquellen hervorgerufen, die allerdings aufgrund des enormen Intensitätsunterschiedes nicht bei Tage, sondern vor allem Nachts zur Geltung kommen. Der Mond ist hier ebenso zu nennen



Abb. 6: Lichtbahnen der Straßenbeleuchtung am Arno in Florenz.



Abb. 7: Lichtbahnen auf einem Gemälde Sternennacht über der Rhone von Vincent van Gogh.

wie künstliche Lichtquellen, deren Licht auf bewegte Gewässer fällt. So manches Panorama einer Großstadt findet in den Lichtbahnen der zahlreichen auf der Wasseroberfläche von Kanälen, Hafenbecken und Flüssen abgespiegelten Lichtquellen eine wirkungsvolle Untermauerung (siehe Abb. 6 und Abb. 7)³. Die folgenden Überlegungen beziehen sich daher auf Sonne Mond und künstliche Lichtquellen.

Bereits LEONARDO DA VINCI beschreibt die Lichtbahn mit verblüffend einfachen Worten: „*Das auf der Oberfläche des Wassers abgeprägte Bild der Sonne erzeugt sowohl außerhalb als innerhalb des Wassers helle Strahlen, die weithin leuchten, als ob ein wirkliches Licht da sei. ...Der zahllosen Meereswellen zahllose Abbilder, die von den Sonnenstrahlen, die auf diese Wellen treffen, zurückgeworfen werden, bewirken das fortwährende und weit ausgedehnte Glänzen der Meeresoberfläche*“ [5]. Das Glänzen tritt nicht überall auf, sondern nur in einem Be-

¹ Was hier „hergegeben“ werden muß, ist gleichfalls nicht verloren. Komplementär zu dem, was sich oberhalb des Wassers tut, läßt sich nicht selten auf dem Grund des Wassers ein ähnlich bezauberndes Spiel wechselnder Lichtgestalten beobachten, die hier aber nicht betrachtet werden können.

² Das Schwert der Sonne wird daher zuweilen auch „persönlicher Strahl“ genannt.

³ Die Lichtbahnen erscheinen auf den ersten Blick parallel, also nicht auf den Beobachter gerichtet. Dies ist jedoch ein perspektivischer Effekt, der vor allem darauf beruht, daß der Beobachter im Vergleich zur Größe des Bildausschnitts weit entfernt ist.

reich für den gilt: „Wo immer die Sonne das Wasser sieht, da sieht das Wasser auch die Sonne und kann daher überall das Bild der Sonne dem Auge wiedergeben“ [5].

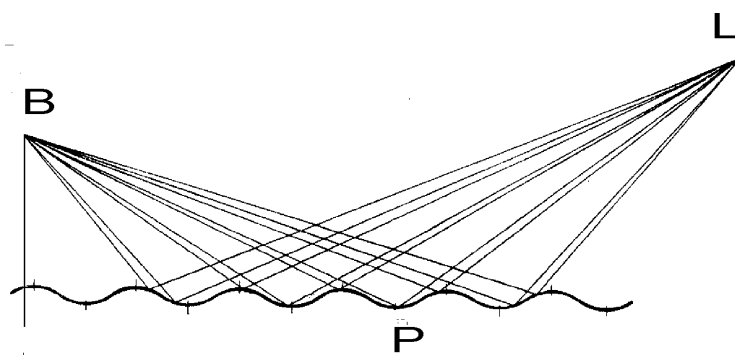


Abb. 8: Bei welliger Oberfläche gibt es zahlreiche Flächenelemente, die Licht der Lichtquelle L zum Beobachter B reflektieren.

Licht entsprechend in die unterschiedlichsten Richtungen streuen. Darunter befinden sich auch solche, die das Reflexionsgesetz bezüglich des Sonne- Beobachter- Systems erfüllen und folglich einen Lichtreflex, aufgrund der Wölbung der Wasseroberfläche ein mehr oder weniger stark deformiertes Bild der Sonne, zum Auge des Betrachters schicken. Wie entsteht der Eindruck, daß die Punkte einer relativ großen Fläche gleichzeitig zu reflektieren scheinen? An jeder Stelle der welligen Wasseroberfläche werden innerhalb eines bestimmten Zeitraums alle möglichen Neigungswinkel durchlaufen, darunter auch solche, die das Licht zum Beobachter reflektieren. Jede Stelle, von der der Reflex nur häufig genug zum Auge oder zur Kamera gelangt, trägt zum Gesamteindruck einer flimmernd leuchtenden Lichtfläche bei, zum Schwert der Sonne⁵.

Entscheidend für das Zustandekommen der Lichtbahn ist die wellenartige Deformation der Wasseroberfläche. Ein Gewässer mit einer glatten, ebenen Oberfläche, entwirft genau ein Spiegelbild der Lichtquelle⁴, so daß diese an einer bestimmten Stelle (die mit P bezeichnete Stelle in Abb. 8) aus der Tiefe des Teiches herauszuscheinen scheint. In diesem Fall kann also keine Lichtbahn auftreten. Wenn die Wasseroberfläche jedoch durch Wellen aufgeraut ist, ergeben sich Flächenelemente der unterschiedlichsten Orientierungen, die das auftreffende

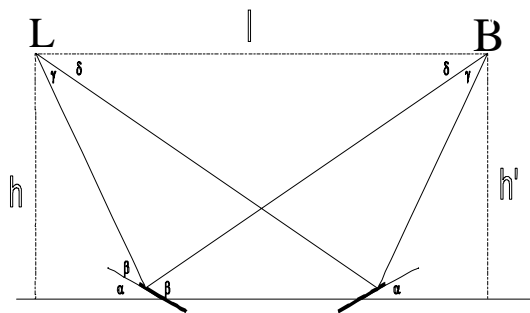


Abb. 10: Der Beobachter B sieht gleichzeitig an zwei Stellen ein Bild der Lichtquelle L.

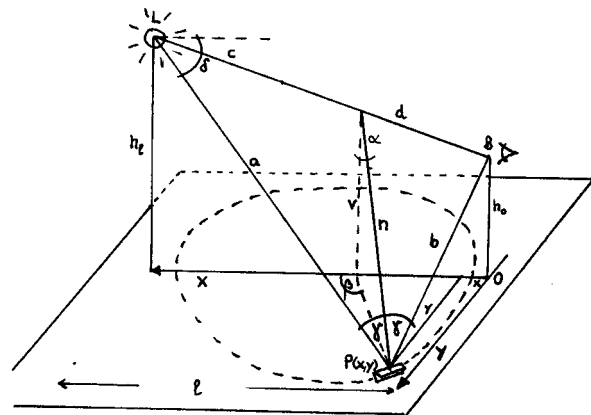


Abb. 9: Durch das Loch O läßt sich längs der gestrichelt gezeichneten Kurve auf dem Spiegel R das Bild der Lichtquelle L sehen.

Wie es zur Schwertform kommt, kann man sich mit Hilfe einer einfachen Anordnung ebener Spiegel klarmachen (Abb. 9). Der „Mittelpunkt“ der Lichtbahn liegt an der Stelle, von der das Licht zum Auge reflektiert wird. An von diesem Punkt entfernten Stellen trifft das Licht nur dann ins Auge, wenn der Spiegel eine passende Neigung aufweist. Die Neigung muß um so größer sein, je weiter er vom Mittelpunkt entfernt wird. Verschiebt man ihn in Blickrichtung, so muß der Spiegel mit wachsender Annäherung zum oder Entfernung vom Beobachter zunehmend in der einen oder anderen Richtung geneigt werden (Abb. 10). Die maximale Neigung bestimmt die Länge der Lichtbahn. Auch die Ausdehnung senkrecht zur Blickrichtung läßt sich auf diese Weise ausmessen, wenn man den Spiegel entsprechend zur Seite neigt. In diesem Fall bestimmt der Maximalwinkel der seitlichen Neigung die Breite der Lichtbahn. Wie man sich mit Hilfe des Spiegels leicht überzeugt, muß man im selben Abstand vom Mittelpunkt senkrecht zur Blickrichtung den Spiegel i.a. stärker neigen als in Blickrichtung. Geht man von einer richtungsunabhängigen Verteilung der Wellenneigungen mit einem Maximalwinkel aus, so folgt daraus unmittelbar die Schwertform.

Für die Annahme eines Maximalwinkels spricht die deutliche Begrenzung der Lichtbahn. Trotzdem muß man davon ausgehen, daß es aufgrund der Gaußverteilung der Neigungen der Wellen vereinzelte Reflexe außerhalb des

⁴ Die folgenden Überlegungen beziehen sich auf beliebige Lichtquellen. Damit wird das Phänomen des Schwertes der Sonne insofern verallgemeinert, als die Lichtstrahlen als divergierend angenommen werden.

⁵ Hier spielt die Irradiation, die den reflektierenden Fleck größer erscheinen läßt als er ist, eine wichtige Rolle.

glitzernden Bereichs gibt. Weil sie i.a. zu selten und zu weit voneinander getrennt aufblitzen, vermitteln sie jedoch keinen andauernden Lichteindruck und werden rein visuell nicht mehr zur Lichtbahn hinzugerechnet.

Eine genauere Vorstellung von der Form der Lichtbahn kann man sich experimentell mit der in Abb. 9 dargestellten Vorrichtung verschaffen. Eine helle Punktlichtquelle (z.B. Halogenlampe) wird in einer bestimmten Höhe über einem Tisch angebracht. Ein kleiner Spiegel (dessen spiegelnde Fläche mit einem Filzstift zusätzlich auf ein mit einer fest einstellbaren Neigung und einem Schreibstift versehen wird so über ein auf dem Tisch liegendes Blatt Papier verschoben, daß die Lichtquelle - durch einen in einer bestimmten Höhe fixierten Sucher betrachtet - stets sichtbar bleibt. Sowohl die Höhe der Lichtquelle als auch des Suchers sollten leicht variierbar sein. Man zeichnet auf diese Weise den Rand des Reflexbereiches für eine konkrete (durch die Höhe von Lichtquelle und Sucher sowie der Neigung des Spiegels gegebenen) Situation auf. Ein Beispiel eines auf diese Weise gewonnenen Bildes einer Lichtbahn ist in Abb. 12 dargestellt. Daneben in Abb. 11 zum Vergleich eine Computersimulation derselben Situation⁶.



Abb. 12: : Experimentell ermittelter Umriss einer Lichtbahn (Entfernung Beobachter- Lichtquelle 50 cm, Beobachterhöhe 4 cm, Höhe der Lichtquelle 23 cm, Spiegelneigung 17°).

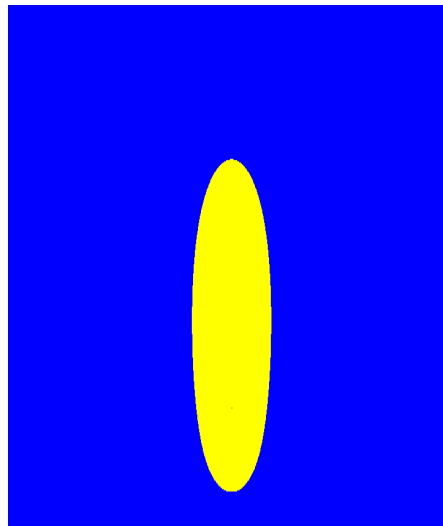


Abb. 11: Lichtbahn aus Bild 11 als Ergebnis einer Computersimulation.

Alternativ läßt sich mit Hilfe unterschiedlich strukturierter Folien und Scheiben (aus Glas und Kunststoff), die man im Alltag vorfindet oder mit wenigen Handrissen präpariert auf unmittelbar anschauliche Weise der Einfluß der unterschiedlichen Welligkeit demonstrieren, wenn man die Objekte zwischen Lichtquelle (L) und Beobachterloch plaziert. Beispielsweise kann mit einer zerknüllten Aluminiumfolie, die anschließend mehr oder weniger glatt gestrichen wird, um eine

mehr oder weniger starke Welligkeit simulieren, ein sehr eindrucksvolles und realistisch wirkendes Bild der Lichtbahn hervorrufen.

Mit regelmäßig oder nur in einer Richtung geriffelten bzw. gewellten Platten können auch in der Natur vorkommende systematische Einflüsse wie Wasserströmungen oder von Winden getriebene Wellen demonstriert werden. Betrachtet man die Lichtstraße beispielsweise auf einer Doppelstegplatte oder auf einer mit parallelen Fettstreifen versehenen Scheibe, die man zunächst quer zur Einfallsebene des Lichtes orientiert und anschließend verdreht, so erscheint die Bahn seitlich abgelenkt, womit sie eine ihrer Haupteigenschaften einbüßt, nämlich stets auf den Beobachter hin gerichtet zu sein⁷. Ein solches Phänomen läßt sich unter gegebenen Voraussetzungen auch in der Natur beobachten, wenn die Reflexe durch die Wellen fließenden Wassers hervorgebracht werden.



Abb. 13: : Das nach links abfließende Wasser ruft eine leichte Ablenkung der Lichtbahn aus der Einfallsebene hervor.

Bei der Beurteilung der in der Natur wahrgenommenen Schwertform aufgrund der im Modellversuch experimentell hervorgerufenen oder im Rahmen eines mathematischen Modells berechneten Formen sollten jedoch noch folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Wenn das Auge mit einem festen Sehwinkel die Wasserfläche überblickt, so wächst die durch den Sehwinkel erfaßte Wasserfläche mit der Entfernung. Damit nimmt aber auch die Zahl der Lichtblitze zu, die von Wellen größerer Neigung stammen, mit

⁶ Weitere Einzelheiten zur Berechnung und Simulation der Lichtbahn werden in einer späteren Arbeit dargestellt.

⁷ Siehe Anmerkung 4.

dem Effekt, daß die kritische Lichtblitzfrequenz, oberhalb derer ein kontinuierlicher Lichteindruck entsteht, überschritten und die Lichtbahn als dementsprechend verbreitert wahrgenommen wird. Eine konkave Krümmung der Flanken der Lichtbahn ist die Folge.

- Bei sehr großen Wasserflächen macht sich der Einfluß der Erdkrümmung darin bemerkbar, daß die Lichtstraße in der Ferne auseinandergezogen erscheint.
- Schließlich sollte bei der Beurteilung der Helligkeit der Lichtbahn berücksichtigt werden, daß der Abnahme der Intensität aufgrund des schrägen Einfalls des Sonnenlichtes die Zunahme der Intensität der reflektierten Strahlung entgegenwirkt. Denn der Anteil der absorbierten Strahlung ist um so größer, je steiler das Sonnenlicht auf die Wasseroberfläche trifft⁸. Daher ist das Phänomen der Lichtbahn bei hochstehender Sonne trotz der höheren Lichtintensität verhältnismäßig unauffällig, während es sich bei niedrigstehender Sonne durch eine erstaunliche Lichtintensität bemerkbar macht. Die Intensität einer Lichtbahn kann so groß sein, daß sie zusätzlich zum direkten Schatten des Beobachters einen etwas verschobenen und deformierten Konkurrenzschatten hervorruft. Um dieses Phänomen zu beobachten, muß für den höher liegenden Schatten aufgrund des Sonnenreflexes im Wasser eine geeignete Projektionsfläche beispielsweise in Form von Bäumen oder einer Steilküste vorhanden sein.

3 Lichtbahnen im weiteren Sinne

Lichtbahnen findet man nicht nur auf Gewässern. Ein manchmal aus dem Flugzeug oder von einem hohen Berg zu beobachtendes Phänomen ist die auch Lichtfeder genannte Lichtsäule oberhalb oder unterhalb der Sonne. Sie ist am besten dann zu beobachten, wenn die helle Sonne ausgeblendet wird. Dieses Phänomen kommt dadurch zustande, daß das Sonnenlicht an unzähligen langsam fallenden Eisplättchen reflektiert wird. Diese Eisplättchen werden durch den Luftwiderstand während ihres langsamen Falls horizontal ausgerichtet. Aufgrund einer leichten Neigung um einen maximalen Winkel δ erfahren die reflektierten Strahlen alle möglichen Ablenkungen kleiner δ und entwerfen wie auf einer gewellten Wasseroberfläche ein mehr oder weniger längliches Lichtfeld oberhalb oder unterhalb der Sonne (Abb. 14).

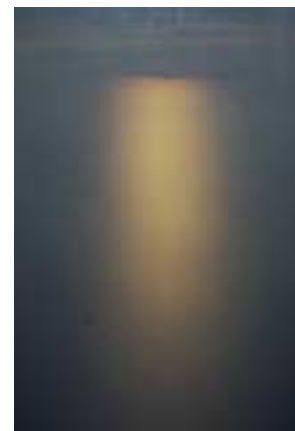


Abb. 14: Lichtfeder unterhalb der Sonne.

Wie durch die oben erwähnten Modellversuche mit Spiegeln und Spiegelfolie bereits angedeutet wurde, kommt letztlich jede unebene oder aus unterschiedlich orientierten ebenen Flächen bestehenden, spiegelnden Objekte als Kandidaten für derartige Phänomene in Frage. Hat man dies einmal erkannt, so begegnet man Lichtbahnen auf Schritt und Tritt.

- Bei Regenwetter werden die Straßen im wahrsten Sinne des Wortes zu Lichtstraßen. Die Scheinwerfer und Rücklichter der Kraftfahrzeuge rufen Lichtsäulen hervor, die perspektivisch gesehen aus der Tiefe der Straße hervorzugehen scheinen. Aber nicht nur bei Regenwetter! Bei extremer Trockenheit, wenn sich die Luft-



Abb. 15: : Lichtsäulen von Autolampen auf dem nassen Asphalt. Wenn sich - wie im Vordergrund- eine Wasserlache mit horizontaler Wasserfläche ausbildet, sieht man keine Säule, sondern ein Spiegelbild der Lichtquelle.



Abb. 16: Lichtsäule durch Luftspiegelung.

schicht über der Straße aufheizt, wird das Scheinwerferlicht aufgrund der mit der Er-

⁸ Wie das Verhältnis von absorbierter zu reflektierter Strahlung unter den gegebenen Bedingungen ist, läßt sich mit Hilfe der Fresnelschen Formeln berechnen.

wärmung einhergehenden Dichteabnahme der Luft total reflektiert. Da die Straßen auch ohne Feuchtfilm ein gewisses Reflexionsvermögen besitzen, sind fast immer besonders bei Dunkelheit zumindest andeutungsweise Lichtsäulen zu beobachten.

- Nasse Gehwegplatten oder verflieste Häuserfronten zeigen das Lichtsäulenphänomen gleichsam in diskretisierter Form. Die an sich ebenen Platten oder Fliesen sind gegeneinander in unregelmäßiger Weise leicht geneigt und zeigen als Ensemble ein vervielfachtes Bild der Lichtquelle. Hierher gehören auch die Lichtbahnen, die



Abb. 17: Lichtbahn auf den trockenen Fliesen einer Kirche. Normalerweise nicht sichtbare feine Riefen sorgen für vielfältige Reflexionen.



Abb. 18: Aufgrund des fast senkrechten Einfalls des Lichts auf die Jalousie hat man wie auf dem Meer in der Mittagszeit eine fast kreisförmige Lichtbahn.

an den Elementen von Fensterjalousien (Abb. 18), Heizkörpern u.ä. hervorgerufen werden. Wenn man abends beispielsweise an geschlossenen Jalousien im Lichte einer Laterne vorbeigeht, kann man eine kreisförmig gekrümmte Lichtbahn darüberlaufen sehen. Ursache für die Form ist der fast senkrechte Einfall des Lichts. Glatte, aber durch starken Gebrauch unebene gewordene Fliesenböden zeigen meist die vertraute Schwertform (Abb. 17).

- Manchmal sieht man von einem höheren Stockwerk eines Hochhauses aus eine eindrucksvolle Lichtbahn auf einem großen Parkplatz, die durch die glatte

Karosserie und die Scheiben der Autos

Flugzeug aus sieht man unter günstigen Bedingungen eine mehr oder weniger fragmentierte Lichtbahn über die Erdoberfläche hinweglaufen, die durch die zahlreichen reflektierenden Flächen, wie sie vor allem in Ortschaften in den unterschiedlichsten Orientierungen vorhanden sind, hervorgerufen wird. Auch die Reflexe auf dem Gewirr von Schienensträngen an Bahnhöfen zeigen Ausschnitte aus Lichtbahnen.

- Das Glitzern mancher Kleidungsstoffen (z.B. Satin) läßt sich mit Hilfe einer Punktlichtquelle ebenfalls als Lichtbahneffekt entlarven. Die Ursache dafür ist in der wellenartigen Struktur zu sehen, in der die reflektierenden Fasern gewebt sind (Abb. 19). Darauf macht wohl nicht ganz zufällig William Bragg aufmerksam [9]. Bragg hat sich bekanntlich u.a. dadurch verdient gemacht, daß er aus den Reflexen elektromagnetischer Strahlungen die Gitterstruktur der bestrahlten Kristalle ermittelte.

- Jede glatte Fläche kann eine Lichtbahn hervorbringen, wenn ihre Oberfläche - und sei es nur ganz leicht - aufgeraut wird. Wischt man beispielsweise einen glatten Tisch (z.B. Marmorplatte) mit einem feuchten Tuch ab, so kann das Spiegelbild einer Kerzenflamme durch Reflexionen an den Wischstreifen zu einer Lichtsäule entarten.



Abb. 20: Sogar frisch gepflügte Felder mit ihren wellenförmigen durch den Flugschar geglätteten Furchen weisen manchmal auffallend deutlich Lichtbahnen auf.

- Spiegelnde Metallplatten (z.B. Edelstahl, Abb. 21) besitzen oft winzige parallele Riffelungen, die auf den Herstellungsprozeß zurückzuführen sind. Darauf wird man meist erst durch die Lichtbahnen aufmerksam, die besonders eindrucksvoll durch Punktlichtquellen darauf hervorgerufen werden. Wenn eine Metallplatte so

sauber gearbeitet ist, daß man die Lichtbahn nicht sieht, kann man sie dadurch erzeugen, daß man mit einem fettigen Tuch darüberwischt oder die Oberfläche mit Schmirgelpapier leicht zerkratzt. Fein strukturierte Edelstahlplatten werden beispielsweise auch von dem Lichtsculptor PAUL FRIEDLANDER benutzt, um mit Hilfe winziger farbiger Punktlichtquellen eindrucksvolle Lichtfiguren hervorzubringen.

Wenn man auf eine durch Schlittschuhspuren zerkratzte Eisfläche (Abb. 23) oder auf einen Löffel (Abb. 6) mit Gebrauchsspuren blickt, beobachtet man manchmal außer der Lichtbahn ein weiteres Phänomen: Konzentrische Lichtkreise scheinen die Stelle zu umgeben, an der bei einer spiegelnden Fläche das Spiegelbild der Lichtquelle liegen würde. Im Falle einer ebenen Fläche muß man relativ steil auf die Lichtbahn blicken, bei der konvex geformten Fläche des Löffels kann der Blick auch weitaus flacher sein. Es blitzen dann alle diejenigen Abschnitte der durch Gebrauch statistisch verteilten Kratzer auf, die tangential zu gedachten konzentrischen Kreisen um das fiktive Spiegelbild der Lichtquelle ausgerichtet sind. Denn jeder „Kreis“ ist der geometrische Ort für eine bestimmte Neigung der reflektierenden Fläche, an der das Reflexionsgesetz bezüglich Beobachter und Lichtquelle



Abb. 21: : Die gekrümmte Oberfläche des Metaldeckels besitzt zwei „günstige“ Reflexionsbereiche und weist daher zwei Lichtbahnen auf, die aufgrund der Krümmung ebenfalls gekrümmt erscheinen.



Abb. 22: Der Löffel zeigt außer mehreren Lichtbahnen konzentrische Lichtringe um den Hauptreflex der Lichtquelle. Aus den statistisch verteilten Gebrauchsspuren blitzen nur diejenigen auf, die bezüglich Lichtquelle und Beobachter die Reflexionsbedingung erfüllen.



Abb. 23: Lichtsäule auf einer durch Schlittschuhspuren zerkratzten Eisfläche [13].

erfüllt ist (siehe auch unten). Obwohl es uns so erscheint, müssen die sichtbaren Lichtreflexe nicht wirklich auf konzentrischen Kreisen liegen. Es ist ein subjektiver Eindruck, der durch das Bemühen des Gehirns hervorgerufen wird, die verschieden weit vom Zentrum gelegener Kratzerabschnitte auf Kreisen anzuordnen. Das gelingt allerdings nur dann wenn sie in genügender Zahl vorhanden sind.

- Schallplatten bieten ideale Bedingungen für das Auftreten von Lichtbahnen. Je nach Blickwinkel kann man sowohl einfache Säulen als auch gekrümmte Lichtbahnen hervorrufen und sie durch entsprechende Drehung der Platte in eindrucksvoller Weise zum Laufen bringen. In Abb. 24 rechts oben blickt man so auf die Platte, daß der Reflex der Lichtquelle im Zentrum erscheinen würde (wenn da nicht das Loch wäre). Links daneben ist die Platte etwas nach links, links unten außerdem zum Beobachter hin, rechts unten nur vom Beobachter weg geneigt [10]. Eine analytische Rechnung zeigt, daß Beobachter und Lichtquelle in den Brennpunkten eines gedachten Ellipsoids liegen, der durch die Schallplatte je nach Orientierung geschnitten wird [11]. Ähnliche Phänomene treten an Plastikdeckeln (z.B. von Honiggläsern) oder am Boden von manchen Kochtöpfen auf, die aufgrund ihres Herstellungsverfahrens eine entsprechende Ringstruktur aufweisen. Bei der Compact Disk (CD) sind die Abstände zwischen den ringförmig angeordneten reflektierenden Stellen so klein, daß das Phänomen der Lichtbahn durch farbige Beugungserscheinungen überlagert wird. Im Lichte einer punktförmigen Quelle tritt dabei übrigens ein interessanter Holographieeffekt auf. Die Lichtbahn scheint aus der Ebene der CD hinauszutreten und wie ein „Lichtfahl“ im Raume zu stehen.

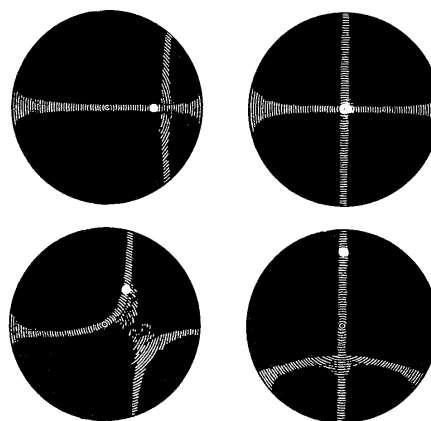


Abb. 24: Lichtbahnen auf einer Schallplatte.

- Ruhige Gewässer, insbesondere Wasserpfützen zeigen meist perfekte Reflexionen. Wenn jedoch Regentropfen auf die Wasseroberfläche fallen, laufen bekanntlich ringförmige Wellen über die Fläche. Das an diesen Wellen reflektierte Licht ruft Ringstrukturen hervor, die wegen der radialen Bewegung nach außen den Eindruck eines strahlenförmigen Kranzes um das Bild der Lichtquelle vermitteln [6].

4 Lichtbahnen im Durchblick

Wenn man die Lichtbahnen an den verschiedensten Licht reflektierenden Objekten beobachtet hat, ist man meist darauf vorbereitet, eine zunächst ganz anders erscheinende Klasse von Phänomenen zu sehen und physikalisch zu verstehen. Es handelt sich um Phänomene, bei denen ein transparentes Medium von Licht durchstrahlt wird und dabei durch Reflexion bedingte Lichtablenkungen hervorruft, die den obigen Phänomenen erstaunlich ähnlich sind.



Abb. 25: Ein Baum im Lichte einer dahinter stehenden Laterne.

nimmt, verknüpft man die Schwänze unwillkürlich mit der Lichtquelle. Bei Lampen, die man durch das Fenster eines Hauses leuchten sieht, setzen sich die Lichtbahnen außerhalb des Zimmers auf der Hauswand oder sogar darüber hinaus fort. Auf diese Weise scheinen die Perspektiven wie auf einem Trompe l'oeil - Bild merkwürdig durcheinander zu geraten.

- Einen ähnlichen Effekt kann man beobachten, wenn man eine Punktlichtquelle durch transparente Plastikfolien betrachtet. Die Schweife drehen sich mit der Folie mit und zeigen damit, daß sie nicht an der Lichtquelle hängen.



Abb. 27: : Nur die annähernd konzentrisch zur Sonne orientierten Abschnitte der Spinnenfäden leuchten auf⁹



Abb. 26: Andeutungsweise erkennt man die konzentrischen Kreise (hier nur ausschnittsweise) auch bei trockenen Bäumen im Lichte der Sonne.

ten zuweilen unwirklich erscheinende Effekte auf. Da man die Scheiben, durch die man blickt, als solche nicht bewußt wahr-

- Auch wenn man durch die Scheiben eines Flugzeugfensters eine ferne Lichtquelle (z.B. die Sonne) betrachtet, so stellt man fest, daß die äußere Scheibe mit winzigen, glitzernden Kratzern übersät ist. Merkwürdigerweise erscheinen die Kratzer nicht - wie man erwarten würde - statistisch verteilt, sondern konfokal um die Lichtquelle herum orientiert. Wir haben es hier mit einem ähnlichen Phänomen zu tun wie bei den Kratzerkreisen auf dem Löffel (siehe oben), mit dem kleinen Unterschied, das es hier in Durchsicht erscheint. Es werden also nur jene Kratzer sichtbar, die das Licht der Lichtquelle in das Auge des Beobachters reflektieren.

• Konzentrisch erscheinende Kreise werden unter günstigen Bedingungen auch vom (möglichst nassen) Geäst eines Baumes hervorgerufen, wenn man auf eine hinter dem Baum leuchtende Laterne blickt (Abb. 25). Die reichlich vorhandenen reflektierenden Astabschnitte fungieren ähnlich wie die Kratzer auf der Fensterscheibe eines Flugzeugs. Solche Astabschnitte, die zufällig tangential zu gedachten Kreisen um die Lichtquelle orientiert sind, reflektieren das Licht der Laterne in das Auge des Beobachters. Auch bei ungeordneten Spinnennetzen tritt zuweilen ein ähnliches Phänomen Abb. 27).

- Laternen und andere nahezu punktförmige Lichtquellen zeigen einen stachelförmigen Heiligenschein, auch wenn sie durch keine zerkratzte transparente Scheibe hindurch betrachtet werden. Ursache für dieses Phänomen ist die das Auge bedeckende Tränenflüssigkeit, die einen ähnlichen Effekt hervorruft wie zerkratzte Glasscheiben. Auch die Zacken der an sich runden Sterne verdanken sich diesem Effekt. Obwohl von der individuell verschiedenen und zeitlich in unkontrollierbarer Weise schwankenden physiologischen Befindlichkeit des Auges abhängig, ist auch dieses Phänomen insofern objektiv, als es nicht nur eingebildet, sondern physikalischen Ursprungs ist. Die Frage, inwieweit die Beobachtungsorgane und ihre Verfassung zur Außenwelt gerechnet werden oder nicht, kann hier nicht weiter verfolgt werden.

⁹ Dieses Foto stammt von Jochim Lichtenberger.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Schwert der Sonne wird mit seinen zahlreichen natürlichen und technischen Varianten physikalisch durch das Reflexionsgesetz zusammengehalten. Dennoch dürften die obigen Ausführungen gezeigt haben, daß es um weit mehr geht. Auf einige Punkte sei zusammenfassend und ergänzend hingewiesen:

1. Das Phänomen ist stets dort anzutreffen, wo Lichtquellen und reflektierende Flächen vorhanden sind. Doch ohne einen (nicht unbedingt menschlichen Beobachter - es kann auch eine Kamera sein), ist es so nicht existent. Es handelt sich gewissermaßen um eine Wechselwirkung zwischen Lichtquelle und reflektierender Fläche, die erst im Auge des Beobachters zu einer optischen Struktur kondensiert. Jeder Beobachter hat zwar seine eigene Lichtbahn, die von keinem zweiten Beobachter gleichzeitig wahrgenommen wird. Er kann jedoch, wenn er sich in dieselbe Position begibt, die gleichen Netzhautbilder empfangen. Die Lichtbahnen liegen nicht wie ein ausgerollter Teppich vor einem, und die Lichtschweife hängen nicht wirklich an den Lichtquellen wie das Laub an den Bäumen. Sie entfalten ihre Wirklichkeit im wörtlichen Sinne durch ihre Wirkung.
2. Liegen im Falle der ursprünglichen Lichtbahn auf dem Wasser die einzelnen Reflektoren in Form unterschiedlich geneigter Wellenflanken offen vor uns, so sind wir später durch das oft unerwartete Auftreten des Phänomens überhaupt erst auf das mögliche Vorhandensein entsprechender Reflektoren aufmerksam gemacht und veranlaßt worden, aus der Form der Lichtbahn auf die innere Struktur des reflektierenden Körpers zu schließen (z.B. Kratzer auf Fahrzeugscheiben). Das Licht einer bekannten Lichtquelle dient uns gewissermaßen dazu, die dem normalen Blick verborgene oder nur schwierig zugängliche „Mikrostruktur“ eines Gegenstandes zu identifizieren. Damit haben wir an sehr einfach nachzuvollziehenden Beispielen eine für physikalische Untersuchungen typische Methode kennengelernt. Einerseits wird das Schwert der Sonne tatsächlich benutzt, auf die Welligkeit des Wassers und damit auf das Vorhandensein möglicher Luft- und Wasserströmungen zu schließen, indem man die z.B. von Flugzeugen aus aufgenommenen Fotografien von Reflexen auswertet [12]. Andererseits ist das Verfahren in der physikalischen Forschung sehr verbreitet. Nicht nur bei der Untersuchung von Oberflächen ist es üblich, Mikrostrukturen von Gegenständen aus den Reflexen einer bekannten Strahlung zu ermitteln.
3. Wir haben uns in der vorliegenden Arbeit auf den statischen Aspekt der Lichtbahnen beschränkt. Darüber hinaus ist es in vielen Fällen interessant, die Dynamik des Phänomens in den Blick zu nehmen. So kann ein am Strand spazierender Mensch beobachten, wie das auf ihn gerichtete Schwert der Sonne mühelos über das Wasser gleitet. Vom Flugzeug kann man zuweilen eine nicht minder eindrucksvolle Lichtdynamik erleben. Entlang eines unsichtbaren Bandes, das wie von Zauberhand über das tief unten liegende Land gezogen wird, blitzen Fensterscheiben, die Hochglanzkarosserien von Autos, Teiche, Flüsse und andere reflektierende Objekte auf, um anschließend wieder im verhältnismäßig dunklen Hintergrund zu versinken. Aber auch wenn der Beobachter sich relativ zur Scheibe des Busses bewegt, durch die er die Lichtschweife der Laternen wahrnimmt, wird er interessante Verschiebungen und Drehungen wahrnehmen können. Schließlich sei noch hingewiesen auf die Formveränderungen, die das Sonnenschwert im Laufe eines Tages durchmacht. Die steigende oder sinkende Sonne „buchstabiert“ gewissermaßen auf unmittelbar „einleuchtende“ Weise die verschiedenen Bezeichnungen wie Delta, Schwert, Säule, Bahn oder Brücke durch. Darüberhinaus können Änderungen der Strömungen oder Luftbewegungen das Wellenmuster so modifizieren, daß der Beobachter zu völlig neuen Namensgebungen inspiriert wird. Die tageszeitlichen Veränderungen spricht beispielsweise Astrid Lindgren an: *„Es war eine Brücke, so hoch und so lang, daß man nicht sah, wo sie zu Ende war. Sie glänzte in der Sonne, als wäre sie aus goldenen Strahlen erbaut.../ Als die Sonne aufging, erreichten wir die Brücke des Morgenlichts, die gerade von den Brückennächten für den Tag ausgeschwenkt wurde“*.
4. Um das Phänomen der Lichtbahn physikalisch zu beschreiben, benötigen wir lediglich das Reflexionsgesetz. Lohnt es sich also, einem derart einfachen Zusammenhang eine so große Aufmerksamkeit zu schenken? Diese Frage spielt auf die weit verbreitete Ansicht an, daß physikalisch einfache Zusammenhänge auch schlechthin einfach sind. Diese Unterstellung ist aber schon deshalb problematisch, weil die physikalische Einfachheit für physikalische Laien und also auch für unsere Schülerinnen und Schüler sehr voraussetzungsvoll sein kann. Denn sie beruht letztlich darauf, daß die Komplexität des Realtextes in einem mehr oder weniger subtilen Netzwerk aus Begriffen und Theorien aufgehoben wird, das auf diese Weise als stillschweigende Voraussetzungen in der physikalischen Sehweise aufgeht [1].

Wie die vorangegangenen Ausführungen außerdem gezeigt haben dürften, kann eine reale Situation auch physikalisch äußerst verwickelt sein. Das ist für den forschenden Physiker meist uninteressant, weil die Situation mit der Angabe des physikalischen Gesetzes unter idealen Laborbedingungen im Prinzip geklärt ist. Wer aber mit Hilfe der physikalischen Sehweise lebensweltlich nur unzulänglich zugängliche Phänomene erschließen möchte, muß das Gesetz aus der konkreten Situation herausarbeiten: Das ist die wesentliche didaktische Aufgabe des Lehrenden: Der zunächst überhaupt nicht physikalisch aussehenden Situation durch aktives Handeln den physikalischen Aspekt abzurufen. Physik können und Physik anwenden können sind zweierlei und gehen

nicht automatisch Hand in Hand. M.a.W.: Da die Natur die physikalischen Zusammenhänge nicht gleichsam ablesbar an sich hat, geht es darum, die Schülerinnen und Schüler anzuleiten, physikalisch sehen zu lernen und dadurch vielleicht überhaupt erst auf Phänomene aufmerksam zu werden, die ohne dies nie „sichtbar“ geworden wären. Auf diese Weise macht Physik selbst Altbekanntes zu einer neuen Realität und trägt gegebenenfalls dazu bei, dem Alltäglichen einen nicht ganz so alltäglichen Reiz abzugewinnen.

Literatur

- [1] H. J. SCHLICHTING: Physik - eine Perspektive der Realität. Probleme des Physikunterrichts. Physik in der Schule 34/9 und 34/10(1996) 283 und 339
- [2] H. J. SCHLICHTING: Sonnentaler fallen nicht vom Himmel. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 48/4 (1995) 199.
- [3] M. WAGENSCHN: Naturphänomene sehen und verstehen. Stuttgart: Klett 1980, S.113.
- [4] I. CALVINO: Herr Palomar. München: dtv (1988) S.18.
- [5] L. DA VINCI: Tagebücher und Aufzeichnungen. Leipzig: Paul List Verlag (1940) S. 162.
- [6] M. MINNAERT: Licht und Farbe in der Natur. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser 1992 (dort zahlreiche weitere Literaturangaben).
- [7] M.S LONGUET- HIGGINS: Reflection and Refraction at a Random Moving Surface. Journal of the Optical Society of America 50/90 (1960) 838.
- [8] M. MINNAERT: The Reflection of Light in Rippled Surfaces. Physica IX/9 (1942) 925.
- [9] W. BRAGG: Die Welt des Lichtes. Braunschweig: Vieweg 1935.
- [10] J. WALKER: The Amateur Scientist. What do phonograph records have in Common with windshield wipers? Scientific American, (July 1989), p.88.
- [11] J.B. LOTT: Reflections on a Gramophone Record. Mathematical Gazette 47/360 (1963) 113.
- [12] Ch. COX; W. MUNK: Measurement of the Roughness of the Sea Surface from Photographs of the Sun's Glitter. Journal of the Optical Society of America 44/11 (1954) 838.
- [13] Foto: Jochim Lichtenberger (Kiel).