

Experiment des Monats

Die Schatten am Boden einer Pfütze haben oft helle Ränder. Untersuchungen an einer schwimmenden Rasierklinge zeigen, wie sie durch Lichtbrechung entstehen.

Von Jearl Walker

Wie Schatten zustandekommen, kann man in der Regel leicht erklären. Am Grunde einer Pfütze jedoch sehen Schatten oft ungewöhnlich aus: So wirft zum Beispiel ein schwimmendes Blatt bei einer Wassertiefe von einem bis zwei Zentimetern einen normalen Schatten – in etwas tieferem Wasser jedoch hat der Schatten einen eigenartigen hellen Rand.

Ebenso seltsam sind die flüchtigen Schatten am Grunde einer flachen Pfütze, die ein durch das Wasser gezogener und dann herausgenommener Gegenstand hinterläßt: Obwohl sich nichts Undurchsichtiges mehr im Wasser befindet, tanzen dunkle, hell umrandete Kreise am Boden umher. Auch ein Bleistift kann einen ungewöhnlichen Schatten erzeugen, wenn man ihn teilweise ins Wasser taucht und ihn dann in verschiedene Richtungen neigt. Bei vielen Richtungen besteht der Schatten aus zwei wurstähnlichen Teilen, die durch einen Lichtstreifen getrennt sind.

Brechung von Licht an einer Grenzfläche

Die erstaunlichen Eigenschaften dieser Schatten entstehen durch die Brechung des Lichts an der Luft-Wasser-Grenzfläche (Bild 1 links). Dort ändert sich die Geschwindigkeit und damit die Ausbreitungsrichtung des Lichts. Im Vakuum breitet sich das Licht mit einer Geschwindigkeit von 3×10^8 Metern pro Sekunde aus, der größtmöglichen Geschwindigkeit überhaupt. In Luft ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit etwas niedriger, weil das Licht auf seinem Weg zuweilen mit Luftmolekülen wechselwirkt. In Wasser wird es durch Wechselwirkungen mit wesentlich dichter gepackten Molekülen noch weiter abgebremst; seine Geschwindigkeit beträgt dort nur drei Viertel derjenigen im Vakuum.

In Lehrbüchern wird Licht im allgemeinen als eine Welle mit einer Folge von geradlinigen Wellenfronten be-

schrieben; die Ausbreitungsrichtung wird durch einen senkrecht zu den Wellenfronten stehenden Strahl dargestellt. Wenn das Licht beim Übergang von einem Medium in ein anderes gebrochen wird, bezeichnet man den ursprünglichen als einfallenden und den entstehenden als gebrochenen Strahl.

Die Richtung des einfallenden Strahls mißt man als seinen Winkel relativ zur Senkrechten auf die Grenzfläche zwischen den Medien, der sogenannten Normalen. Bei einer gekrümmten Grenzfläche steht die Normale senkrecht auf einer Tangente am Übergangspunkt des Strahls. Der Winkel zwischen der Normalen und dem einfallenden Strahl heißt Einfallswinkel.

Wenn Licht aus der Luft auf eine flache Wasserpfütze trifft und der einfallende Strahl parallel zur Normalen ist, verlangsamt sich jede Wellenfront beim Durchtritt durch die Grenzfläche gleichmäßig – die Richtung des Lichts ändert sich deshalb nicht. Bei jeder anderen Neigung des einfallenden Strahls überquert dagegen jede Wellenfront die Grenzfläche nur allmählich. Der zuerst in das Wasser eintretende Teil der Wellenfront wird eher langsamer als der Rest. Diese fortschreitende Verringerung der Geschwindigkeit ändert die Ausbreitungsrichtung der Wellenfront: Das Licht wird gebrochen – und zwar um so stärker, je größer der Einfallswinkel ist.

Von einer ebenen Wasseroberfläche wird ein Bündel paralleler Strahlen einheitlich gebrochen; die Strahlen erhellen den Grund der Pfütze gleichmäßig. An einer gekrümmten Wasseroberfläche jedoch ist die Brechung nicht einheitlich. Die einzelnen Strahlen haben

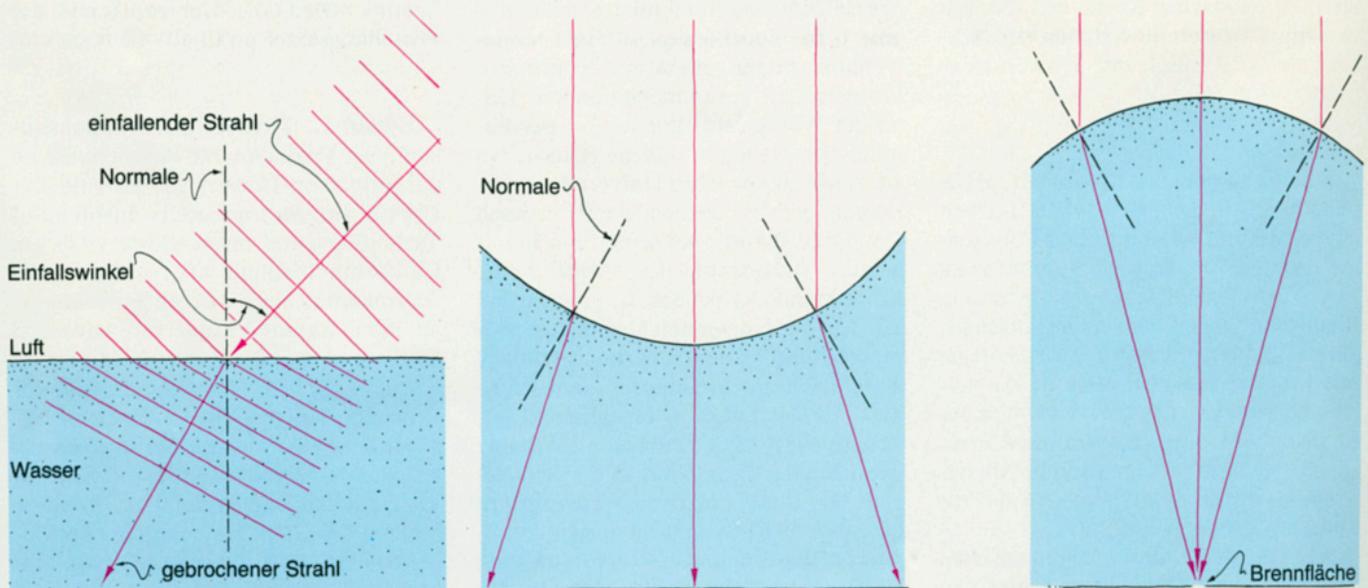


Bild 1: Lichtbrechung (links) sowie Auseinanderlaufen (Mitte) und Zusammenlaufen (rechts) gebrochener Strahlen.

unterschiedliche Einfallswinkel, weil die Normalen an jeweiligen Eintrittspunkten unterschiedliche Richtungen haben. Aufgrund der uneinheitlichen Brechung wird der Grund der Pfütze ungleichmäßig erhellt.

Eine nach innen gewölbte Wasseroberfläche läßt die Lichtstrahlen auseinanderlaufen und verringert dadurch die Helligkeit an der Stelle auf dem Grund, auf welche die Strahlen normalerweise fallen würden (Bild 1 Mitte). Eine nach außen gewölbte Oberfläche dagegen läßt die Strahlen zusammenlaufen; den Fleck, in dem sich die Strahlen kreuzen und der deshalb heller ist, bezeichnet man als Brennfläche (Bild 1 rechts). Je nach Form der Wasseroberfläche kann diese Brennfläche ein Punkt, eine Linie oder ein dreidimensionales Gebiet sein. Wenn der Grund der Pfütze in der Brennfläche liegt, sieht man dort einen hellen Punkt oder eine helle Linie. Treffen die Strahlen entweder vor oder hinter der Brennfläche auf den Boden, ist dieser nur leicht erhellt.

Kleine Wellen sind gekrümmte Oberflächen, die tanzende, komplexe Lichtmuster auf den Grund der Pfütze werfen. Diese Muster jedoch bewegen sich so schnell, daß man sie nicht verfolgen kann. Die Brechung an einer gekrümmten Wasseroberfläche läßt sich besser untersuchen, wenn man einen kleinen Gegenstand auf dem Wasser treiben läßt, dessen Ränder die Oberfläche nach innen oder nach außen krümmen. Dort, wo ein Rand etwas über der normalen Wasserhöhe liegt, wird Wasser zu einer nach innen gekrümmten Oberfläche hochgezogen; an den Stellen, an denen der Rand tiefer liegt, wird Wasser zu einer nach außen gebogenen Oberfläche heruntergezogen.

Die schwimmende Rasierklinge

Im Jahre 1983 beschrieben Michael V. Berry und J. V. Hajnal von der Universität Bristol, wie die gekrümmten Wasseroberflächen um einen schwimmenden Gegenstand dessen Schatten beeinflussen. Um ihre Versuche zu wiederholen, füllt man einen weißen Behälter teilweise mit Wasser. Dann legt man eine gewöhnliche Rasierklinge vorsichtig auf das Wasser. Die Klinge schwimmt, wenn sie waagrecht bleibt und die Oberfläche nicht durchbrochen wird. Die Wasseroberfläche wird durch das Gewicht der Klinge eingedrückt und entlang ihrer Kante nach innen gekrümmt (Bild 2).

Klinge und Wasser beleuchtet man mit einer mindestens einen Meter darüber hängenden Lampe. Bei weniger

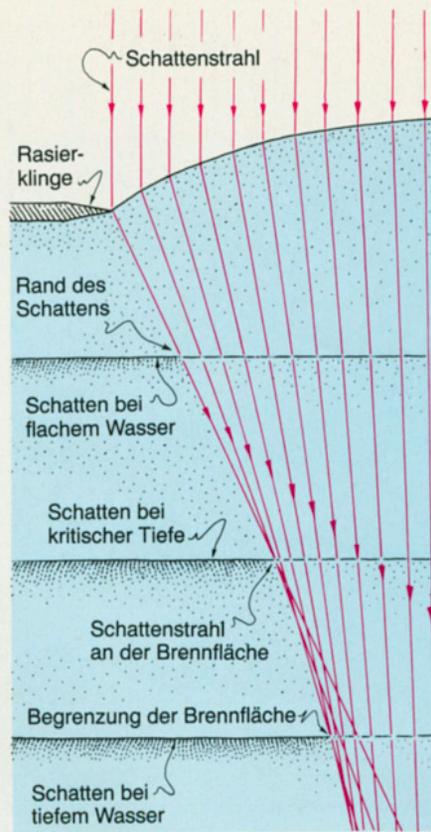


Bild 2: Der Schatten einer auf der konvexen Wasseroberfläche schwimmenden Rasierklinge.

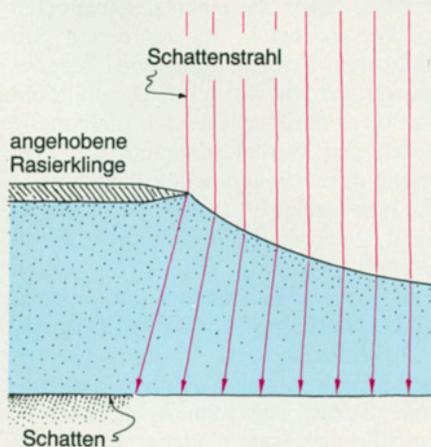


Bild 3: Der Schatten einer auf der konkaven Wasseroberfläche angehobenen Rasierklinge.

als etwa drei Zentimeter tiefem Wasser ist der Schatten auf dem Behälterboden ein dunkles Abbild der Klinge. Ist das Wasser tiefer, hat der Schatten einen hellen Rand.

Berry und Hajnal beschreiben, wie man schnell von der einen Schattenart zur anderen zu wechseln kann: Man füllt Wasser bis auf eine Höhe von fünf Zentimetern ein und legt ein Blatt weißes Papier auf den Boden des Behälters, das man dann stufenweise oder stetig anhebt, bis es sich einen oder zwei Zentimeter unterhalb der Klinge befindet.

Ich selbst ziehe es vor, den Schatten durch Hinzugießen oder Ablassen von

Wasser zu verändern. Die Klinge wird bei vorsichtigem Eingießen normalerweise nicht gestört; und zum Verringern der Tiefe sauge ich Wasser mit einem Trinkhalm ab.

Entlang der gekrümmten Wasseroberfläche an der Klingenkante werden die Strahlen so gebrochen, daß sie zusammenlaufen; aber ihr Brennpunkt hängt davon ab, wo sie durch die Oberfläche gehen. Die Oberflächenkrümmung ist unmittelbar an der Klinge am stärksten. Deshalb laufen die dort in das Wasser eintretenden Strahlen früher zusammen als die ferneren.

Der Strahl, der genau an der Klingenkante in das Wasser eintritt, heißt Schattenstrahl; wäre kein Wasser da, würde dieser Strahl immer die Grenze des Schattens darstellen. Ein etwas weiter von der Rasierklinge entfernter Strahl wird mit dem Schattenstrahl auf einer Brennfläche in einer bestimmten Tiefe unter der normalen Wasseroberfläche – der sogenannten kritischen Tiefe – vereinigt. (Im Bild 2 wird der Boden des Behälters bei drei verschiedenen Tiefen gezeigt, wobei die mittlere die kritische ist).

Man beginnt den Versuch mit etwa zwei Zentimetern Wassertiefe (die kritische Tiefe liegt in meinen Experimenten bei etwa drei Zentimetern). Dann fängt der Behälterboden den Schattenstrahl und den daneben liegenden Strahl ab, bevor sie sich kreuzen. Der Schatten der Klinge ist normal, und der Schattenstrahl stellt in diesem Fall seine Begrenzung dar.

Während man den Schatten beobachtet, füllt man nun langsam Wasser in den Behälter. Erreicht der Wasserstand die kritische Tiefe, entwickelt sich am Rand des Schattens eine Brennlinie, weil sich dort die Schatten – und ihre Nachbarstrahlen vereinen.

Gibt man noch mehr Wasser in den Behälter, bleibt zwar immer noch eine Brennfläche am Rand des Schattens zurück, aber sie wird nicht durch die Schatten- und deren Nachbarstrahlen erzeugt, sondern von zwei eng zusammenliegenden Strahlen, die etwas weiter von der Rasierklinge entfernt durch die Wasseroberfläche treten. Da die Oberflächenkrümmung dort geringer ist als am Rand der Klinge, laufen die Strahlen erst in größerer Tiefe zusammen als der Schatten- und sein Nachbarstrahl. Der Schattenstrahl fällt nun in das ohnehin erleuchtete Gebiet auf dem Behälterboden. Die Größe des Schattens legen immer weiter von der Klinge einfallende Strahlen fest.

Natürlich hängt die kritische Tiefe vom Gewicht der Klinge ab. Eine schwerere Klinge übt einen größeren Druck auf das Wasser aus und vergrößert

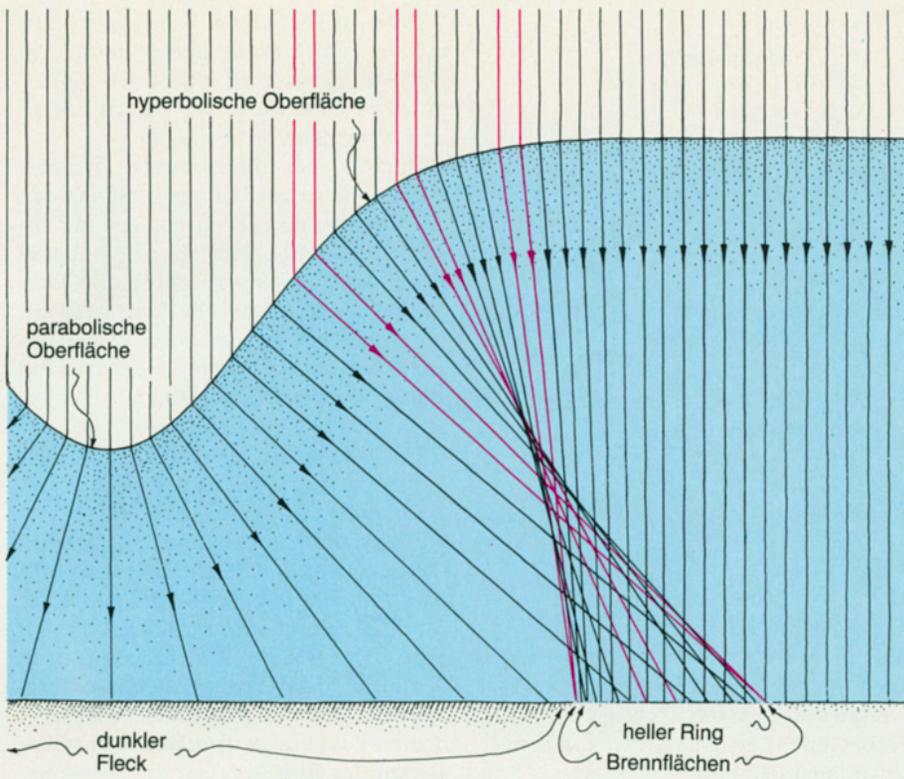


Bild 4: Der von einem Wirbel geworfene Schatten.

bert so die Krümmung der Wasseroberfläche am Klingensrand. Der Schattenstrahl und sein Nachbar kreuzen sich also früher, das heißt in einer geringeren kritischen Tiefe. Man kann dies auch überprüfen, indem man auf die schwimmende Klinge vorsichtig eine zweite legt.

Berry und Hajnal wiesen auch darauf hin, daß viele treibende Gegenstände – zum Beispiel Blätter und Insekten – die Wasseroberfläche anheben, so daß diese nach innen gewölbt ist. Dann haben die Schatten normale Ränder, weil die Lichtstrahlen auseinanderlaufen und daher keine Brennfläche bilden.

Die Schatten haben auch andere Größen als bei nach außen gewölbter Wasseroberfläche. Eine treibende Rasierklinge erzeugt einen Schatten, der größer ist als sie selbst. Wenn man die Klinge anhebt, so daß sie die Wasseroberfläche nach innen wölbt, ist der Schatten kleiner als die Klinge – die auseinanderlaufenden Strahlen breiten sich in den Raum unter der Klinge aus (Bild 3).

Auch Wirbel im Wasser werfen Schatten

Berry und Hajnal zeigten auch, wie Schatten mit Brennflächen an den Rändern durch die gekrümmten Seiten eines Wirbels im Wasser erzeugt werden können (Bild 4). Sie erzeugten einen

Wirbel, indem sie einen Stabmagneten ins Wasser legten, der von einem sich unter dem Behälter drehenden Magneten mitgedreht wurde. Fiel nun Licht von einer darüberliegenden Lichtquelle durch den Wirbel, erzeugte die Brechung einen breiten hellen Ring um ein dunkles Gebiet im Inneren. Die Innen- und Außenränder des Ringes waren Brennflächen.

Vor einigen Monaten beschrieben M. H. Sterling, Michael A. Gorman, P. J. Widmann, S. C. Coffman und Robert M. Kiehn von der Universität Houston (Texas) und John A. Strozier jr. vom Empire State College in Saratoga Springs (New York), wie sich ähnliche Wirbelschatten auf simpelste Weise erzeugen lassen: in der Badewanne. Nachdem das Wasser sich nach dem Einlaufen beruhigt hat, zieht man einen Gegenstand schnell durch die Oberfläche und nimmt ihn dann heraus. Einige Sekunden lang sieht man dunkle, hell geränderte Kreise auf dem Boden der Wanne umhertanzen. Die Ränder entsprechen dem von Berry und Hajnal beobachteten hellen Ring.

Die Untersuchungen der Arbeitsgruppe wurden durch eine Beobachtung Kiehns in einem Freibad angeregt: Dort, wo er aus dem Wasser herauskam, blieben zwei dunkle Kreise auf dem Beckengrund, jeder umgeben von einem schmalen hellen Ring. Die Schatten hielten sich zehn Minuten lang. Kiehn kam zu dem Schluß, daß er zwei

recht dauerhafte Wirbel erzeugt hatte. Welche Wirbelform war nun aber für diese Schatten- und Ringbildung verantwortlich?

Gekrümmte Wasseroberflächen erzeugen helle Flecken

Die Gruppe zog zwei Formen in Betracht, eine nach innen gewölbte (konkave oder parabolische) und eine nach außen gewölbte (konvexe oder hyperbolische). Im Falle eines vollkommen parabolischen Strudels würden die Lichtstrahlen auseinanderlaufen; das Gebiet unter dem Wirbel wäre dann vielleicht ziemlich dunkel, das Auseinanderlaufen aber würde keinen hellen Ring erzeugen. Bei einem vollkommen hyperbolischen Wirbel hingegen würden die Strahlen zu einem hellen Ring zusammenlaufen, aber die Wasseroberfläche müßte dann in der Mitte des Wirbels einen spitzen Winkel bilden – eine physikalisch eher unwahrscheinliche Situation.

Die Gruppe schloß demzufolge, daß das beste Modell für den Wirbel eine Mischung aus beiden Formen ist: Er hat eine parabolische Mitte, umgeben von einer hyperbolischen Wasseroberfläche.

Das parabolische Zentrum erzeugt die dunkle, runde Fläche des Schattens. Der helle, die Kreisfläche eingrenzende Ring wird von den eng nebeneinanderliegenden Strahlen erzeugt, die durch die hyperbolische Oberfläche gehen und auf dem Boden zusammenlaufen. Die Strahlen, die näher an der Mitte durch die hyperbolische Oberfläche gehen, tragen zum Ring nicht bei, da sie zu früh zusammenlaufen und sich über das erhellte Gebiet außerhalb des Ringes verteilen. Die Schatten, die in größerer Entfernung von der Mitte durch die Oberfläche treten, können nicht zusammenlaufen und bleiben ebenfalls außerhalb des Ringes.

Von der Wassertiefe hängt es ab, welche Strahlen die Brennfläche erzeugen. Bewegt sich der Wirbel durch seichter werdendes Wasser, wird die Brennfläche nacheinander von immer näher an der Mitte liegenden Strahlen gebildet; der dunkle Kreis wird immer kleiner und verschwindet schließlich. Bewegt sich der Wirbel dagegen durch tiefer werdendes Wasser, vergrößert sich die Kreisfläche. Der Ring kann sogar so breit werden, daß man die Brennflächen an seinen Rändern ohne weiteres erkennen kann.

Ich habe herausgefunden, daß man einen ähnlichen Schatten auf dem Boden eines Behälters mit Wasser erzeugen kann, wenn man mit einem Stroh-

halm die Wasseroberfläche anbläht. Die so erzeugte Vertiefung wirft normalerweise einen kreisrunden Schatten mit einem hellen Ring. Blase ich jedoch fast waagrecht, entwickeln sich interessante Verzerrungen.

Bleistiftspiele im Wasser

Wird ein Bleistift etwa zur Hälfte schräg in Wasser eingetaucht, sieht man einen seltsamen geteilten Schatten (Bild 6). Diesen Effekt hat im Jahre 1967 Cyrus Adler aus New York beschrieben. Er entdeckte ihn, als er beim Baden gedankenverloren mit einem Bleistift spielte, und nannte ihn den „Schattenwurst-Effekt“. Den erhellten Spalt zwischen den Würsten erklärte er korrekt mit der nach innen gewölbten Wasseroberfläche an den Seiten des eingetauchten Stiftes.

Gefesselt von Adlers Beobachtung vollzog ich das Spiel nach. Ich hatte einen Behälter etwa sechs Zentimeter hoch mit Wasser gefüllt und direkt unter eine Lichtquelle gestellt. Dann tauchte ich einen ungespitzten Bleistift zunächst senkrecht in das Wasser. Zuerst sieht man vielleicht einen großen Schatten mit hellem Rand, weil der Stift die Wasseroberfläche eindellt. Hebt man den Stift etwas an, so daß sich die Wasseroberfläche um ihn herum nach innen wölbt, laufen die Strahlen, die zu Seiten des Stiftes durch die Wasser-

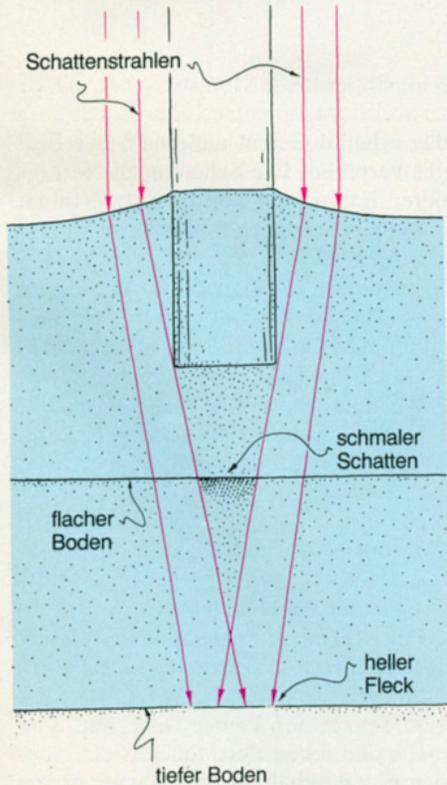


Bild 5: Schatten eines senkrechten Bleistiftes.

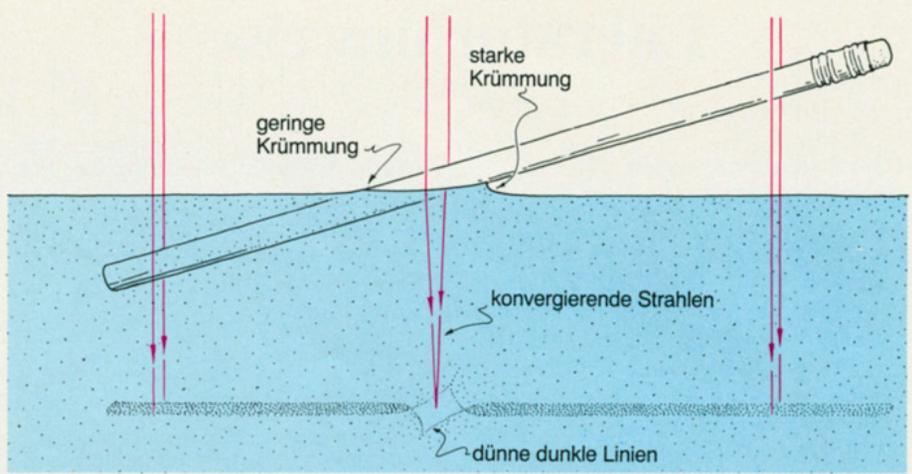


Bild 6: Der „Schattenwurst-Effekt“.

oberfläche treten, unter ihm zusammen; die am dichtesten vorbeistreichenden werden allerdings vom eingetauchten Teil des Stiftes abgefangen. Jene Strahlen, die gerade noch am Stiftende vorbeilaufen, sind natürlich die Schattenstrahlen (Bild 5).

Taucht man den Stift mehrere Zentimeter tief ein, kreuzen sich die Schattenstrahlen nicht, bevor sie den Boden des Behälters erreichen; der Schatten des Stiftes ist in diesem Fall schmaler als der Stift selbst. Zieht man nun den Stift langsam höher, wird der Schatten zunächst noch schmaler und verschwindet dann; an seine Stelle tritt ein heller Fleck. Die Schattenstrahlen kreuzen sich nun, bevor sie auf den Behälterboden treffen. Der helle Fleck wird von weiter vom Stift entfernten gebrochenen Lichtstrahlen erzeugt, die sich am Boden des Behälters überlagern. Hebt man den Stift ganz leicht über die normale Wasseroberfläche, bleibt der helle Fleck, solange die Flüssigkeitsbrücke am Stiftende hält. Wird der Stift zu weit angehoben, zerfällt die Brücke, und sofort erscheint wieder der normale Schatten des Stiftes.

Um den Schattenwurst-Effekt zu erzeugen, taucht man einen Stift unter einem Winkel von etwa 20 Grad ein und zieht ihn leicht nach oben. Die Wasseroberfläche direkt am Stift ist nun wiederum nach innen gewölbt; die Stärke der Krümmung ist jetzt jedoch an den Seiten des Stiftes nicht mehr einheitlich, sondern dort am größten, wo der Stift einen 20-Grad-Winkel mit dem Wasser bildet, am kleinsten hingegen am stumpfen Winkel auf der gegenüberliegenden Seite.

Sowohl der trockene als auch der untergetauchte Abschnitt des Stiftes werfen einen normalen Schatten, nicht jedoch der kurze, von der gekrümmten Wasseroberfläche umgebene Abschnitt. Die Schattenstrahlen, die durch die

zwei Bereiche mittlerer Krümmung an den gegenüberliegenden Seiten des Stiftes in das Wasser eintreten, laufen in dem Gebiet auf dem Boden zusammen, das zwischen dem Schatten des trockenen und dem des untergetauchten Stiftabschnittes liegt.

Ist das Wasser seicht genug, erreichen die Schattenstrahlen den Boden, bevor sie sich kreuzen; in diesem Fall verbindet ein schmaler Schatten die zwei breiteren. Ist das Wasser jedoch tiefer, kreuzen sich die Schattenstrahlen und löschen den Verbindungsschatten aus. Zwischen den beiden Schatten sieht man – wie in Bild 6 skizziert – eine erhellte Lücke.

Adler bemerkte, daß diese Fläche aus vielen hellen und dunklen Gebieten zusammengesetzt war; diejenigen in der Nähe der Schatten waren heller als das Innere der Lücke, die grünlich war. Von den Spitzen der Schatten gingen zwei dunkle Linien aus – so, als würden „Antibrennflächen“ erzeugt.

Ich goß eine dicke Schicht Maisöl auf das Wasser in meinem Behälter und tauchte einen Stift durch beide Flüssigkeiten unter einem Winkel von 45 Grad ein. Nun bestand der Schatten des Stiftes aus drei durch erhellte Lücken voneinander getrennten Abschnitten. Eine Lücke wurde von der Brechung an der Luft-Wasser-Grenzfläche verursacht, die andere hingegen entstand durch die Brechung an der Grenzfläche zwischen Öl und Wasser.

Welche Schatten erzeugen andere Gegenstände am Boden einer seichten Wasserpfütze? Ein treibendes Haar beispielsweise erzeugt eine Kette aus verschiedenen Schatten. Einige sind dunkel und andere haben helle Ränder. Kann man aus der Art des Schattens darauf schließen, welche Abschnitte eines Haars völlig eingetaucht sind und welche über dem normalen Wasserspiegel liegen?