

Überraschende Abbildung durch eine ebene Grenzfläche

Geknickter Stab mit unerwarteter Krümmung

WERNER B. SCHNEIDER

Blickt man bei geringem Abstand in ein mit Wasser gefülltes Aquarium, so scheinen die hinteren Kanten gebogen zu sein. Dieses Phänomen beruht auf der Abbildung durch eine ebene Grenzfläche, die wir oft nicht bedenken.

Stellen Sie sich vor, Sie sind in der Aquarienabteilung eines Baumarkts. Vor einem der Aquarien steht ein Kind, das begeistert die Fische beobachtet und die Nase fast an die Scheibe drückt. Auf einmal dreht es sich um und fragt, warum die Kanten in dem Aquarium krumm seien. Bei den anderen, leeren Aquarien sei dies nicht so. Sie sind überrascht und schauen selbst nach. Doch nach Ihrem Eindruck sind die Kanten gerade. Hat das Kind nur fantasiert?

So ähnlich erging es dem Autor vor einiger Zeit. Aus dem sich jedoch bald einstellenden Unbehagen – hat das Kind vielleicht doch recht – ergaben sich die Untersuchungen, die manch Überraschendes und auch wenig Bekanntes zu Tage brachten.

Der krumme Stab im Wasserbad

Bei der Analyse der Beobachtung am Aquarium muss man berücksichtigen, dass Erwachsene von einer Reihe von Vorerfahrungen geprägt sind, die den Blick trüben können. Hierzu zählt das altbekannte Experiment im Unterricht der „Knick im Stab“. Dabei stellt man zum Beispiel einen Bleistift in einen Becher. Füllt man diesen mit Wasser, so erscheint der Stift geknickt (Abbildung 1).

Im Unterricht wird die Beobachtung des „Knicks“ mit Hilfe der Strahlenoptik gedeutet. Vom Stab wird dann in Analogie auf den Weg optischer Strahlen beim Passieren der Grenzschicht geschlossen. Das Experiment ist weitläufig bekannt, hat schon viele Schüler beeindruckt und ist in fast jedem Naturkunde- oder Physikbuch zu finden.

Abbildung 2 wurde ausgewählt, da sie eine – offensichtlich unbeabsichtigte – überraschende, auf den ersten Blick leicht zu übersehende Erscheinung zeigt. Bei genauerem, unbefangenen Hinsehen erkennt man nämlich, dass der Stab nach dem Knick im Wasser eine leichte Krümmung auf-

weist. Diese übersieht man normalerweise, weil man sich auf den Knick konzentriert, der eigentlich demonstriert werden soll. Kann diese Erscheinung der Schlüssel zu dem sein, was das Kind im Aquarium gesehen hat?

Um dieser Idee genauer nachzugehen, wurde das Verhalten eines Stabs, der in ein Aquarium eintaucht, genauer beobachtet und fotografiert. Bei der eigenen Beobachtung am Aquarium muss man jedoch die Beobachtungsbedingungen des Kindes nachstellen. Es steht direkt an der Scheibe, die Beobachtungen müssen also aus nächster Nähe erfolgen, und die Blickrichtung muss unter Beibehalten des nahen Beobachtungsstandpunkts variiert werden. Der Stab kann entsprechend durch die Kanten des Aquariums ersetzt werden. Damit geht man auf die Beobachtungsbedingungen des Kindes ein.



Abb. 1 Ein Bleistift scheint nach dem Einfüllen von Wasser einen Knick zu haben.

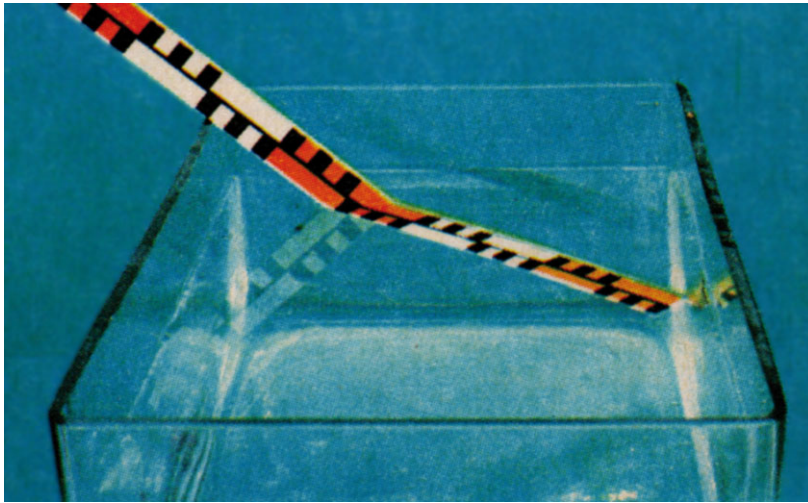


Abb. 2 Ein geknickt erscheinender Stab in einem Wasserbehälter. Es lohnt sich, das Bild genauer zu betrachten.

Abbildungen 3 und 4 zeigen, dass das Kind Recht hatte. Aufgrund seiner besonderen Beobachtungsposition musste es die gekrümmten Kanten sehen. Da es offensichtlich noch nicht vorgeprägt und ein guter Beobachter war, ist ihm diese Erscheinung aufgefallen. Erstaunlich ist, dass es die Krümmung der Kanten im Vergleich mit denen der ungefüllten Aquarien realisierte.

Zeigt man die Bilder, so glauben die Angesprochenen zunächst den Darstellungen nicht. Selbst Physiker hielten die Bilder für eine Täuschung und glaubten nicht an einen echten physikalischen Effekt. Es wurden meistens Abbildungsfehler des Foto-Objektivs zur Deutung herangezogen. Doch dem ist nicht so.

Deutung der Erscheinung

Bei der Suche nach einer Deutung liegt es zunächst auf der Hand, dass die ebene Grenzfläche die beobachteten Erscheinungen bewirken muss. Denn ohne Wasser war der Stab wie der Bleistift in der Kaffeetasse gerade. Die Grenzfläche muss eine abbildende Wirkung besitzen, die nur un-

ter meist unüblichen Beobachtungsbedingungen sichtbar wird. Durch mühsames Zeichnen vieler Strahlenverläufe kamen wir dem Problem näher. Schneller kommt man mit einem Computerprogramm zur Abbildung durch ebene Flächen zum Ziel.

Das Programm „Abbildung durch ebene Fläche“ lässt sich inklusive Erklärungen auf www.solstice.de/physikprogramme/Abbildung/ durch ebene Fläche herunterladen. Zum Installieren muss der Ordner mit dem Setup-Programm in das Hauptverzeichnis kopiert werden. Das Programm ist für Windows XP bis Windows 10 lauffähig.

Es ist auch in einer Erweiterung mit dem Namen „Bündeloptik“ integriert (www.solstice.de/physikprogramme/buendeloptik/). Zudem ist es ein wesentlicher Bestandteil eines neuen Unterrichtsgangs zur Optik, in dem gezeigt wird, wie mächtig die Bündelvorstellung zur Deutung und zum Verständnis optischer Phänomene ist. Die Bedeutung von Bündeln in der Optik ist zwar bekannt, aber umständlich umzusetzen. Mit Hilfe des Computerprogramms werden optische Bündel auch dem Unterricht zugänglich, was zu einem leichteren Verständnis vieler optischer Phänomene führen kann.

In dem Programm startet von einem Objektpunkt ein schlankes Lichtbündel, das die Grenzfläche Luft-Wasser passiert. Die einstellbare Option „rückwärtige Verlängerung“ der Bündel erlaubt sofort die Lage des Bildpunktes (Schnittpunkt der Bündelstrahlen) im Medium des Startpunktes zu erkennen. Entscheidend an dieser Analyse ist die Tatsache, dass man ein Lichtbündel betrachtet, nicht einzelne Strahlen.

Die Screenshots (Abbildung 5) zeigen die jeweilige Simulation zu den in den Fotos gewählten Beobachtungsbedingungen. Sie sind nur ein Ausschnitt des vom Computer erzeugten Bildschirmbildes. Der horizontale Strich stellt die Grenzfläche dar. In dieser Simulation haben wir als Medien oberhalb der Grenzschicht Luft ($n = 1$) und unterhalb Wasser ($n = 1,33$) gewählt. Das Programm erlaubt die Einstellung der Brechzahl von 1 bis 2 für beide Medien.

Der Startpunkt des Bündels ist schwarz, der Bildpunkt rot gekennzeichnet. Der Bildpunkt ergibt sich als Schnittpunkt der rückwärtigen Bündelstrahlen. Eine andere im Pro-

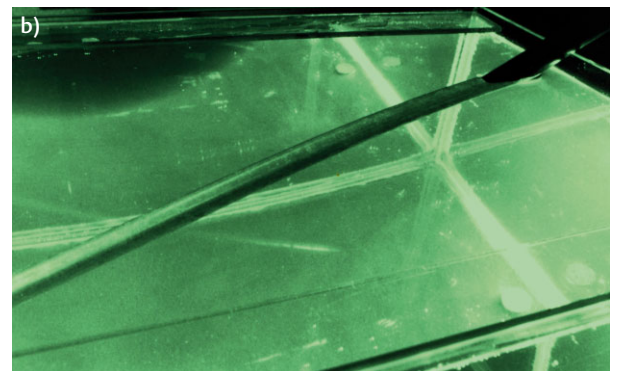
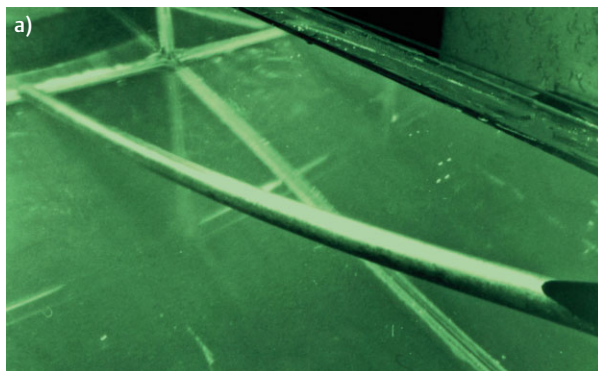


Abb. 3 Ein Stab steht schräg in einem mit Wasser gefüllten Aquarium (60 cm × 40 cm × 40 cm) und wird zweimal fotografiert: a) etwa in Richtung des Stabes und b) etwa senkrecht zum Stab. Der Abstand zur Grenzfläche beträgt circa 10 cm, entsprechend einem Drittel der eingetauchten Stablänge.

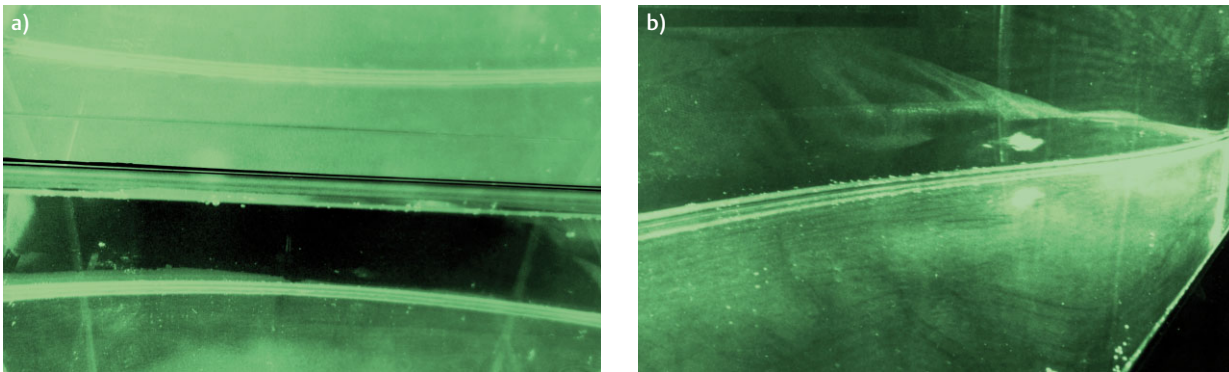
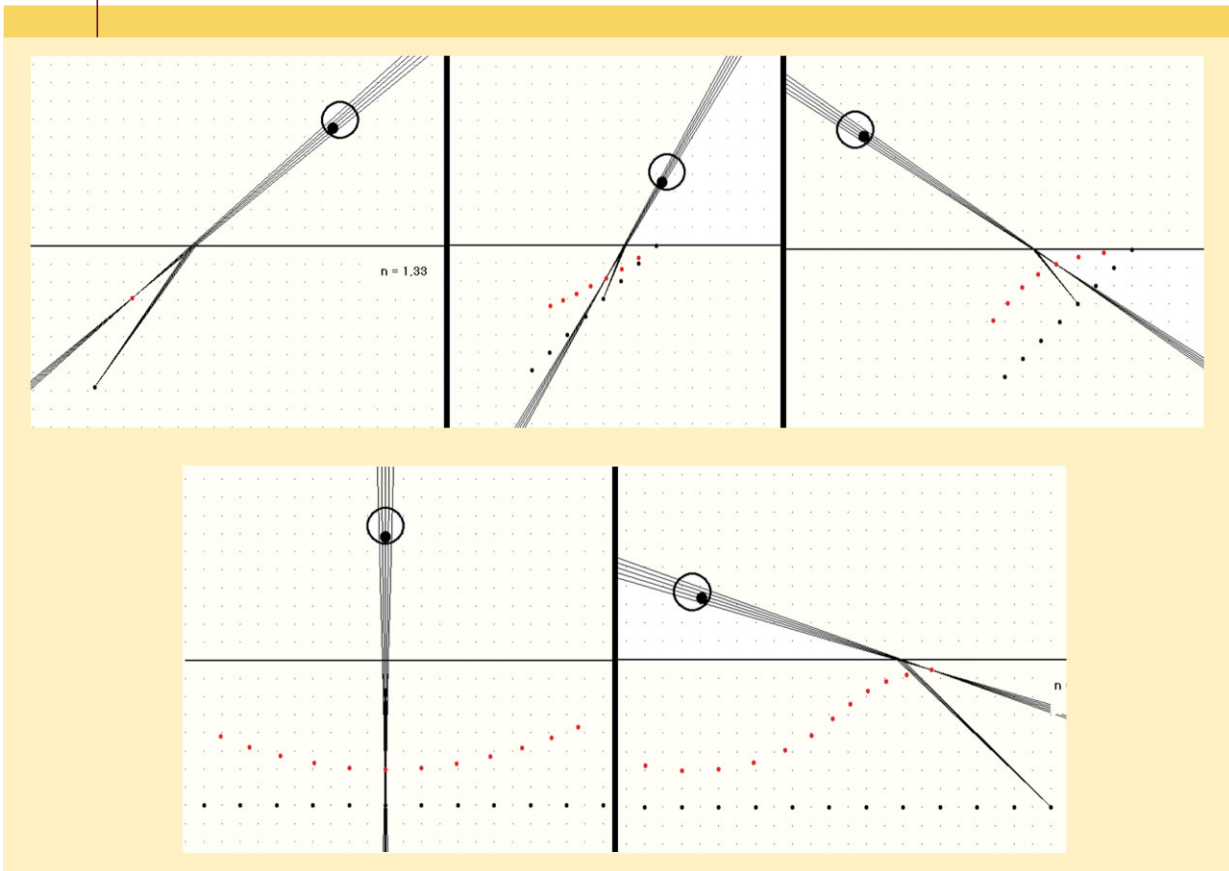


Abb. 4 Aufnahmen der hinteren Kante des Aquariumbodens: a) Beobachtungsrichtung senkrecht zur unteren Kante; b) Beobachtungsrichtung schräg auf die Ecke der unteren Kante des Aquariumbodens. Abstand der Kamera etwa 5 cm vor der vorderen Scheibe.

gramm wählbare Option ist die Möglichkeit, die Bewegung der Maus mit der des Auges zu koppeln. Dabei folgt das Bündel automatisch dem Auge. Der Startpunkt kann jeweils frei gewählt werden. Um Erfahrung mit dem Programm zu sammeln, kann man zunächst für einfache Situationen die Abhängigkeit zwischen Lage des Startpunktes, der Beobach-

tungsrichtung und der Lage des Bildpunktes untersuchen. Als weitere Option sind im Programm Punktreihen wählbar. Dabei bleiben die Bildpunkt jeweils erhalten, wenn man zum nächsten Punkt der Reihe wechselt. Damit entsteht das Bild der Punktreihe, die Stellvertreter für Stab und Kanten ist.

ABB. 5 | LUFT-WASSER-GRENZSCHICHT



Beispiel für die Abbildung eines Punktes durch die ebene Grenzschicht zwischen Luft und Wasser. Der Startpunkt des Bündels ist schwarz, der Bildpunkt rot gekennzeichnet. Screenshots zur Simulation des Verhaltens eines in Wasser eingetauchten Stabs (schwarze Punkte) für die Beobachtungsrichtungen, wie sie in den Abbildungen 3 und 4 gewählt waren. In der Simulation ist der Abstand zur Grenzfläche ein Bruchteil der Länge der Punktreihe (Stablänge).

Die Screenshots bestätigen die in den Fotografien dokumentierten Beobachtungen der gekrümmten Kanten im mit Wasser gefüllten Aquarium. Es ist generell bemerkenswert, dass eine ebene Grenzfläche auch abbildend wirkt. Im Unterricht wird man in der Regel anders geprägt. Dort werden nur die abbildenden Eigenschaften gekrümmter Grenzflächen demonstriert und mit der Strahlenoptik gedeutet.

Das Programm ist so vielseitig, dass man weiteren Phänomenen rund um die Abbildung durch eine ebene Grenzfläche nachgehen kann: Wie sieht ein Fisch einen Angler? Wie ändert sich die optische Hebung bei Beobachtung von 0 bis 90°? Welchen Einfluss hat der Beobachtungsabstand auf die entstehenden Bilder und vieles mehr.

Die hier vorgestellten optischen Erscheinungen kann jeder nachvollziehen, mit dem Programm analysieren und sich umgekehrt durch das Computerprogramm zu neuen Blickweisen leiten lassen. Die dokumentierten Beobachtungen rund um ein Aquarium gehören in der Regel nicht zur Alltags- und Unterrichtserfahrung. Sie spielen jedoch in vielen technischen, optischen Anwendungen eine wichtige Rolle – oft nicht augenscheinlich.

Im erweiterten Sinn können die Beobachtungen dazu ermuntern, bewusster im Alltag nach Überraschendem oder Unerklärlichem zu suchen und unvoreingenommen zu beobachten. Hierfür ist unsere Aquariumsgeschichte ein Musterbeispiel.

Zusammenfassung

Ebene optische Grenzflächen können gegenüber landläufigen Vorstellungen auch abbildend wirken. Die daraus folgenden Konsequenzen werden besonders bei Beobachtungen an einem Aquarium sichtbar, die zunächst überraschen. Sie können jedoch leicht mit einem Computerprogramm zur Strahlenoptik gedeutet werden.

Stichwörter

Brechung, Luft-Wasser-Grenzschicht, optische Abbildung.

Der Autor



Werner Schneider war langjähriger Leiter der Abteilung Didaktik der Physik am Physikalischen Institut Erlangen und ist Professor für Didaktik der Physik im Ruhestand. Bis 2009 war er Kurator dieser Zeitschrift.

Anschrift

Prof. Werner Schneider, Aurachweg 26,
91056 Erlangen
werner.schneider@gmail.com
www.solstice.de