

Von der gehobenen Münze zur Vermessung der optischen Hebung

Anregungen für exploratives Experimentieren

KLASSENSTUFEN: 7, 10, 11

ZEITUMFANG: 2 Doppelstunden

THEMA: Optik: Brechung, optische Hebung

KOMPETENZEN: Erkenntnisgewinnung: exploratives Experimentieren

METHODEN: Phänomenreihen, Schülerversuche

WEITERE MATERIALIEN: Praktikumshft mit allen Versuchen sowie Vorlagen für die Maßstäbe im 3. Schritt können beim Autor angefordert werden.

Wo wird das Bild einer unter Wasser liegenden Münze gesehen? Phänomene der optischen Hebung begegnen uns z. B. beim Abwaschen, beim Spaghetti-Kochen oder beim Baden.

Dass sich für die Hebung ebenso Bedingungen angeben lassen wie für die Brechung und wie diese mit jener zusammenhängt, ist Gegenstand des hier skizzierten Unterrichts.

Vorgestellt wird eine explorative Er-schließung der optischen Hebung

(s. **Kasten 1** zum explorativen Experimentieren), die genutzt werden kann, um das Thema Lichtbrechung zu ergänzen. Der Bogen spannt sich dabei von qualitativen Beobachtungen über eine Vermessung der Hebung bis zur Formulierung des Hebungsgesetzes. Auf dieser Basis kann abschließend eine einfache Vorschrift für die Konstruktion der Hebungskurven beliebig geformter Bodenprofile angegeben werden.

INFORMATIONEN 1

Exploratives Experimentieren

Als exploratives Experimentieren wird ein offenes, weitgehend theoriefreies und zugleich methodisch geführtes Erkunden von Phänomenen und Erschließen regelhafter Zusammenhänge bezeichnet ([4]–[5]). Charakteristisch für exploratives Vorgehen ist:

- genaues und selbstständiges Beobachten;
- Erkunden funktionaler Zusammenhänge zwischen beobachtbaren Merkmalen eines Phänomens: „Wie hängt dies mit dem zusammen?“;
- systematisches Variieren verschiedener Parameter;
- Bestimmen notwendiger und hinreichender Bedingungen;
- Suche nach stabilen Regeln und
- Finden geeigneter Darstellungen, um solche Regeln zu formulieren.

Die Möglichkeiten dieses Vorgehens als Weg zu soliden Kenntnissen über Phänomene werden bisher im Physikunterricht unterschätzt. Oft wird Explorieren auf ein kurzes Vorspiel zum „eigentlichen“, Hypothesen testenden Verfahren verkürzt.

Potenziale

Merkmale, die exploratives Experimentieren als sinnvolle Erweiterung bzw. notwendige Vorstufe zum theoriegeleiteten Verfahren erscheinen lassen, sind:

- *Aufbau von Erfahrungswissen über Zusammenhänge von Phänomenen:* Exploratives Experimentieren kann Schülerinnen und Schülern helfen, ein weniger aus isolierten Einzel-fakten und theoretischen Modellen bestehendes, sondern stärker erfahrungsbasiertes, immanent strukturiertes und handlungsorientiertes Wissen zu entwickeln, in dem jedes Experiment und jede Beobachtung mit anderen verbunden ist.
- *Verknüpfung subjektiver und objektiver Bedingungen von Beobachtungen und Einüben des damit verbundenen Perspektivwechsels:* Ihren Naturzugang nicht nur als externe Beobachter, sondern auch als aktive Teilnehmer an der Entstehung von Phänomenen zu erleben, kann Schülerinnen und Schülern helfen, mehr Selbstvertrauen in einen eigen-

ständigen Erkenntniszugang zu Phänomenen ihrer natürlich-technischen Umwelt zu entwickeln.

Hinweise für die Unterrichtsplanung

Wie geeignet das explorative Vorgehen als Lernweg im Physikunterricht ist, hängt auch vom Thema ab. Der hier vorgestellte Erkundungsgang besteht aus vier aufeinander aufbauenden Schritten, die aber nicht zwangsläufig auseinander folgen. Der jeweils folgende Schritt ergibt sich aus dem vorangehenden durch vertiefende Fragen an das Phänomen, etwa: „Was können wir verändern, um dies und jenes noch genauer zu beobachten?“ Welche Fragen gestellt werden, hängt davon ab, was einem auffällt und fragwürdig erscheint. Oftmals eröffnen sich mehrere mögliche Untersuchungswege. In diesem Fall muss eine Wahl getroffen werden. Insofern ist der vorgestellte Gang kein kanonischer, sondern einer von vielen, die im Netz des Bedingungsgefüges der optischen Hebung möglich sind.

Optische Hebung – ein Thema für die Optik?

Das Thema Lichtbrechung ist fester Bestandteil des Kernlehrplans der Physik (Jahrgangsstufe 7/9). Ob dabei die optische Hebung thematisiert wird, ist der Lehrkraft überlassen. Zu den Gründen, weshalb auf sie gerne verzichtet wird, obwohl sie als Alltagsphänomen allgegenwärtig ist, gehört nicht nur der Mangel an brauchbaren curricularen Ideen zu diesem Thema.

Man begegnet immer wieder dem Vorurteil, dass die Frage, wo das gehobene Bild einer unter Wasser liegenden Münze gesehen wird, nicht objektiv zu beantworten sei und das Phänomen folglich nicht in die Physik, sondern als angebliche „optische Täuschung“ eher in den Bereich der Wahrnehmungspsychologie gehöre.

Dass sich der Ort, an dem für einen gegebenen Einblickwinkel in Wasser eine Münze gehoben gesehen wird, exakt berechnen, vorhersagen und vermessen lässt, kann in der Fachliteratur nachgelesen werden (s. [1]–[3]). Die optische Lage der Münze aus der Sicht eines Auges ist demnach weitgehend in demselben Sinne objektivierbar wie die haptische Lage der Münze – unabhängig davon, ob es sich um ein menschliches oder ein technisches Auge (z. B. eine Kamera) handelt. Eine Gelegenheit, sich davon durch eigene Beobachtung zu überzeugen, bietet der hier vorgestellte Untersuchungsgang.

Konzeption des Unterrichts und Voraussetzungen

Der Untersuchungsgang besteht aus vier aufeinander aufbauenden Schritten mit jeweils mehreren Beobachtungen:

1. Eimerversuch,
2. Beobachtungen am Wassertrog,
3. Vermessung der Hebung im Spiegelraum,
4. Konstruktion der Bildkurven der Hebung.

Der Zeitaufwand beträgt etwa zwei Doppelstunden. Erprobt wurden folgende Durchführungsvarianten:

- Jahrgangsstufe 7: Schritte 1–2 (1 Doppelstunde);

- Jahrgangsstufe 10: Schritte 3–4 (1 Doppelstunde);
- Jahrgangsstufe 11: Schritte 1–4 (2 Doppelstunden, Projektunterricht).

Damit der Zusammenhang mit der Lichtbrechung hergestellt werden kann, sollten die Schülerinnen und Schüler das Brechungsgesetz, den Begriff der optischen Dichte transparenter Medien sowie die Brechzahlen von Luft und Wasser kennen.

1. Der Eimerversuch

Der Eimerversuch ist so einfach wie spektakulär: Er zeigt, wie sich *Hebung von Sicht (Teil 1)* und *Brechung von Licht (Teil 2)* gegenseitig bedingen. Eine miniaturisierte Variante als Tassenversuch zeigt **Abbildung 1**.

Teil 1: Hebung von Sicht

Ein Baustellen- oder Putzeimer (10 l), in dem eine Kachel liegt, wird auf den Boden gestellt. Die Schülerinnen und Schüler stellen sich so darum, dass sie gerade nichts vom Boden des Eimers sehen und behalten ab jetzt ihren Abstand zum Eimer und damit ihren Blickwinkel bei. Dann wird der Eimer in mehreren Etappen bis zum Rand mit Wasser gefüllt.

Beobachtungen

- Mit steigendem Wasserstand wird bei unveränderter Blickrichtung der vorher im Verborgenen liegende Eimerboden mit Kachel zunehmend sichtbar: Boden und

Kachel erscheinen angehoben, und zwar umso stärker, je höher der Wasserstand im Eimer ist. Für jeden, der dieses Phänomen zum ersten Mal sieht, kann dies eine erstaunliche Erfahrung sein. Spekulationen über mögliche Ursachen sollten vorerst noch zurückgehalten werden.

- Nun tritt man an den gefüllten Eimer heran – und bemerkt dabei, dass sich der Boden leicht senkt. Die Stärke der Hebung hängt also offenbar vom Blickwinkel und damit vom Standort ab. Um sich von dieser Abhängigkeit zu überzeugen, geht man abwechselnd in die Knie und steht wieder auf: Man sieht, wie sich dabei der Boden des Eimers hebt und senkt. Wie stark diese Änderung ist, lässt sich abschätzen, indem man jemanden bittet, senkrecht in den Eimer zu blicken und dabei mit der flachen Hand außen am Eimer zu zeigen, auf welcher Höhe der Boden gesehen wird – das sind immerhin einige Zentimeter! Dann geht man in die Knie, blickt folglich ganz flach auf die Wasseroberfläche und sieht den Eimerboden nun deutlich höher als die senkrecht blickende Kollegin!

Zwischenfazit und Fragen

Die bisherigen Beobachtungen bringen die optisch hebende Wirkung des Wassers eindringlich zur Geltung. Zudem wurde zumindest qualitativ die Abhängigkeit der Hebung vom Blickwinkel erfahrbar. Gleichzeitig



1 | Hebung und Brechung zugleich – der Tassenversuch. Bei gleich bleibenden Blick- und Beleuchtungswinkeln wird Wasser in eine Tasse gefüllt. Mit zunehmendem Wasserstand erscheint der Boden optisch gehoben: Eine vorher verborgene Münze wird sichtbar (*Hebung*). Gleichzeitig wird der Tassenboden, der ohne Wasser im Schatten lag, mit steigendem Wasserstand zunehmend beleuchtet: Wie der Verlauf der Schattenkante an der Tassenwand zeigt, knickt die Beleuchtungsrichtung an der Wasseroberfläche nach unten ab (*Brechung*).

wünscht man sich verbesserte Bedingungen, um die Beobachtungen gezielt zu wiederholen und sich der Art des Zusammenhangs zwischen Hebungsstärke und Blickwinkel zu vergewissern. Fraglich ist ferner: In welche Richtung relativ zur durchblickten Grenzfläche erfolgt die Hebung genau? Kann man das Maß der optischen Hebung für senkrechten Einblick genauer bestimmen?

Antworten auf diese Fragen werden im zweiten Teil dieses Versuchs durch die Beobachtungen am großen Wassertrog erarbeitet.

Teil 2: Brechung von Licht

Der Eimerversuch wird mit einer entscheidenden Änderung wiederholt: Anstelle der Schülerinnen und Schüler „blickt“ eine Halogenleuchte in den leeren Eimer, und zwar so, dass der Boden mit der Kachel gerade im Schatten liegt. Die *Blickbedingung* wird also durch eine *Beleuchtungsbedingung* ersetzt. Dadurch ist man außenstehender Beobachter und kann sich dementsprechend seinen Beobachtungsstandort aussuchen: Manche blicken in den Eimer, manche verfolgen den Verlauf der Schattenkante an der halbtransparenten

Außenseite des Eimers. Nun wird der Eimer wieder aufgefüllt.

Beobachtung

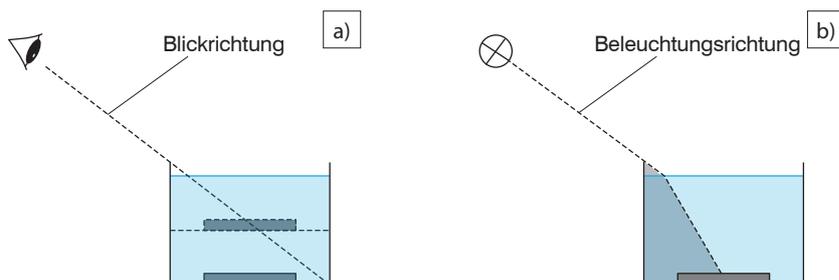
Mit steigendem Wasserstand wird bei unveränderter Beleuchtungsrichtung der vorher im Schatten liegende Eimerboden und mit ihm die Kachel zunehmend beleuchtet. Für diejenigen, die von oben in den Eimer blicken, ist offensichtlich: Je mehr der Boden angehoben erscheint, desto mehr wird er beleuchtet.

Denjenigen, die von der Seite auf die Außenwand des Eimers blicken, fällt auf, dass die Schattengrenze, die vom Eimerrand in den Eimer fällt, an der Wasseroberfläche nach unten abknickt (s. **Abb. 2**). Füllt man den Eimer weiter mit Wasser auf, sieht man, dass die Richtung dieser abknickenden Schattenkante gleich bleibt, dass sich aber ihr Beginn in Richtung Leuchte verschiebt – und dadurch ein größerer Teil des Bodens beleuchtet wird.

Die Leuchte beleuchtet, was sie „sieht“ – so könnte man die Bedingungen der Hebung von Sicht aus dem 1. Teil des Eimerversuchs mit denen der Brechung von Licht aus dem zweiten Teil des Versuchs verknüpfen.



2 | Eimerversuch, Teil 2: Die Schattenkante knickt an der Wasseroberfläche nach unten ab, sodass mit steigendem Wasserspiegel ein zunehmender Teil des Eimerbodens beleuchtet wird.



3 | Schema zum Eimerversuch: a) eingebundene Perspektive – Hebung von Sicht; b) abgelöste Perspektive – Brechung von Licht

Zwischenüberlegung und Fragen

Um den Verlauf der Schattenkante am Übergang von Luft zu Wasser genauer beobachten, vielleicht sogar vermessen und mit dem Brechungsgesetz vergleichen zu können, wäre es wünschenswert, den Eimer gegen ein Gefäß mit geraden Seitenwänden einzutauschen, etwa ein Aquarium, dessen Seitenwände von außen mit Papier beklebt sind, sodass sie den Verlauf der Schattenkante zeigen.

Folgende Fragen wäre damit u. a. zu klären: Wie ändert sich der Verlauf der Schattengrenze bei Variation des Beleuchtungswinkels? Wie hängt das Maß dieser Richtungsänderung (der Brechungswinkel) am Übergang von Luft zu Wasser von der Beleuchtungsfarbe ab?

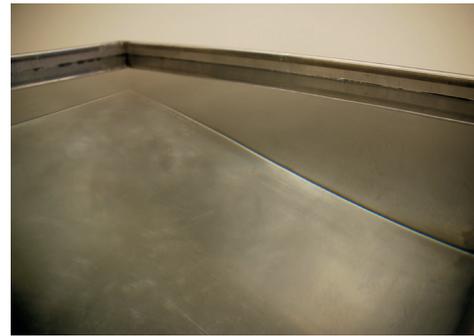
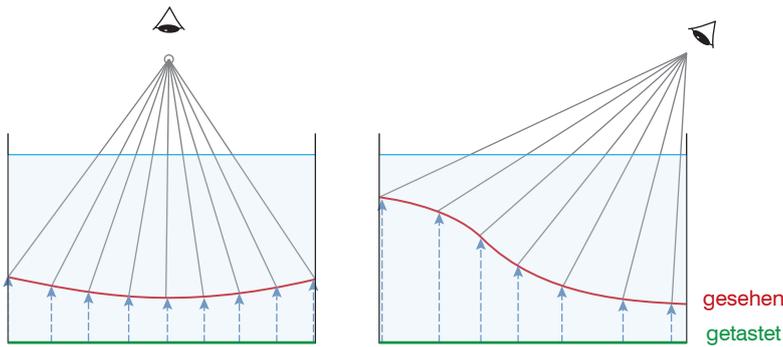
Kommentar

Die beiden Teile des Eimerversuchs (der übrigens auf Goethe zurückgeht) zeigen, wie sich Brechung und Hebung bedingen und durch den Perspektivwechsel zusammenhängen, der sich durch das Vertauschen von Auge und Leuchte ergibt (s. a. **Abb. 3**). Die Dualität von *Sichtbedingung* und *Beleuchtungsbedingung* führt zu der Frage, ob es so etwas wie ein *Hebungsgesetz* gibt, das die Verhältnisse der optischen Hebung beschreibt, so wie das *Brechungsgesetz* die Verhältnisse der Lichtbrechung beschreibt. Interessant wäre dann zu zeigen, dass beide Gesetze im Kern identisch sind, denn schließlich beschreiben sie dasselbe Phänomen – nur aus verschiedenen Perspektiven.

Der mit **Teil 2** des Eimerversuchs eröffnete Untersuchungsweg zu den Bedingungen der Lichtbrechung wird allerdings im Rahmen dieses Unterrichtsgangs nicht weiterverfolgt. Dieser widmet sich stattdessen der weniger bekannten Hebung.

2. Beobachtungen am Wassertrog

Die folgenden Beobachtungsschritte werden an einem großen, wassergefüllten Trog aus Edelstahl ($L \times B \times H$: 60 cm \times 35 cm \times 30 cm) durchgeführt



4 | Qualitativ skizzierter Verlauf der Hebungskurven (rot) einer Bodenkante (grün), gesehen von zwei verschiedenen Standpunkten

[6]. Man kann auch ein Aquarium verwenden. Dann empfiehlt es sich allerdings, die Seiten zuzukleben; andernfalls wird die Fülle der sich bietenden Ansichten unüberschaubar. (Der Trog hat zusätzlich den Vorteil, keine Totalreflexion an den Innenflächen zu zeigen.)

Es bietet sich an, die folgenden Beobachtungsaufgaben in Kleingruppen bearbeiten zu lassen. Dazu ist es von Vorteil, mindestens zwei Wassertröge zur Verfügung zu haben.

Rundgang

Zunächst macht man einen gemeinsamen Rundgang um den Trog und lässt die Eindrücke wirken. Erstaunlich stark sind die hebungsbedingten Verwandlungen der Ansichten des Wasservolumens bei verschiedenen (steileren/flacheren) Blickwinkeln auf die Wasserfläche: Das Wasservolumen erscheint gestaucht, der Boden aufgewölbt, Bodenkanten verziehen sich zu Kurven – alles in schwankender Bewegung, während man den Trog umkreist.

Besonders eindrucksvoll ist es, wenn man einen gefüllten und einen leeren Trog nebeneinander stellt. Dadurch wird der Kontrast zwischen der haptischen Struktur des leeren Trogs, d. h. seiner tastbaren Tiefe, und der massiven optischen Stauchung des Wasservolumens erfahrbar.

Beobachtungsaufgabe 1: Hebung und Blickwinkel

Wie verändert sich die Hebung des Trogbodens in Abhängigkeit vom Blickwinkel? Die am Eimer gemachten Beobachtungen bezüglich der Abhängigkeit zwischen Hebung und

Blickwinkel lassen sich hier bestätigen und zu folgender Regel zusammenfassen:

- *Je flacher der Blickwinkel auf die Wasserfläche, desto stärker erscheint der Trogboden gehoben.*

Beobachtungsaufgabe 2: Hebungskurven

Wie sieht der Verlauf der gegenüberliegenden Bodenkante aus, wenn man mit den Augen knapp über den Trogrand geht? Zeichnet man den jeweils gesehenen Verlauf der Bodenkante qualitativ in die Skizzen ein (s. Abb. 4), sieht man die vorausgehende Beobachtung zum Zusammenhang zwischen Blickwinkel und Stärke der Hebung bestätigt. (Die Skizze in Abb. 3a ist demnach eine Näherung für großen Abstand des Betrachters.)

Beobachtungsaufgabe 3: Hebungsrichtung

In welche Richtung, bezogen auf die durchblickte Grenzfläche, erfolgt die Hebung des Trogbodens bzw. eines beliebigen unter Wasser befindlichen Objekts genau? Bisher sieht es so aus, als ob die Stauchung des Wasservolumens in vertikaler Richtung erfolgt: Die unter Wasser liegenden vertikalen Trogkanten werden im Übergang von steileren zu flacheren Blickwinkeln *in sich* gestaucht, d. h. lediglich verkürzt, ohne dabei außerdem noch verbogen auszusehen.

Für eine Prüfbeobachtung hängt man einen dünnen Stativstab von ca. 30 cm Länge an einem Faden ins Wasser, sodass er etwa 10 cm eintaucht. Lenkt man diesen Stab etwas aus und lässt ihn los, sieht man, dass der eingetauchte Teil im Spiegelbild des

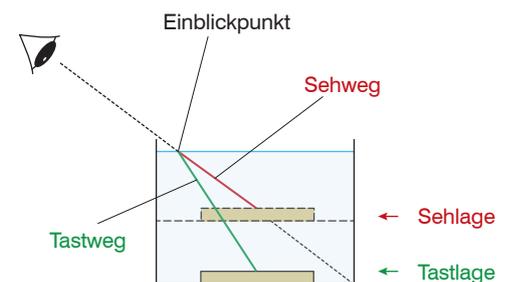
herausragenden Teils hängt, wenn der Stab in die Ruhelage zurückgependelt ist. Nun geht man langsam in die Knie und beobachtet dabei, wie sich der eingetauchte Teil des Stabs verkürzt, indem er *innerhalb* des gespiegelten Lotes bleibt. Wir nehmen dies als Indiz dafür, dass unter den bisherigen Bedingungen der Beobachtung mit zwei Augen und horizontaler Augenstellung die Hebung senkrecht zur durchblickten Grenzfläche erfolgt.

Bezeichnungen: Seh- und Tastweg

Zur Verständigung werden folgende Begriffe eingeführt (s. Abb. 5):

- haptische Lage eines Objekts unter Wasser: *Tastlage*;
- hebungsbedingt verschobene optische Lage: *Sehlage*.

Entsprechend werden die Verbindungsgeraden zwischen dem Einblickpunkt auf der Wasseroberfläche und der Sehlage bzw. der Tastlage als *Sehweg* (l_s) bzw. als *Tastweg* (l_t) bezeichnet. Das Verhältnis von Tastweg und Sehweg l_t/l_s nennen wir *Hebungsmaß*. Wie sich zeigen wird, ist es identisch mit der Brechzahl n .



5 | Zusammenhang von Sehlage und Tastlage eines unter Wasser liegenden, gehoben gesehenen Objekts

Kommentar

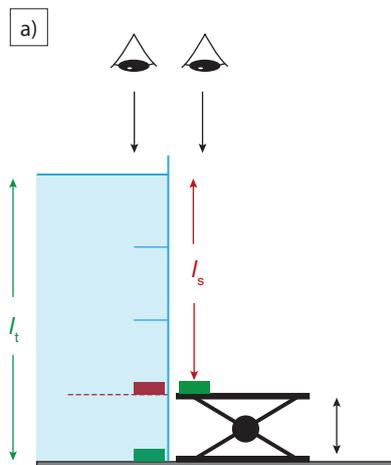
Die bisherigen Beobachtungen haben gezeigt, dass die Hebung des Trogbodens für senkrechten Aufblick auf die Wasserfläche am geringsten ist. Dabei fällt eine Besonderheit auf (s. **Abb. 4**): Für alle Blickwinkel fallen Seh- und Tastweg, d. h. die Richtung, in der ein gegebener Bodenpunkt gehoben gesehen wird, und die Richtung, in der sich die zugehörige Tastlage des Punktes befindet, auseinander – mit einer Ausnahme: Im Falle des senkrechten Einblicks fallen Seh- und Tastweg zusammen. Der Boden wird hier lotrecht über seiner Tastlage, d. h. dem Auge entgegengehoben, gesehen. Dies eröffnet die Möglichkeit, die hebungsbedingte Verkürzung des Sehweges gegenüber dem zugehörigen Tastweg als Teil desselben zu messen.

Beobachtungsaufgabe 4: Bestimmung des Hebungsmaßes von Wasser

Die Aufgabe besteht darin,

- eine Münze (2-Euro-Stück) an der Außenseite des Troges mit einer gehoben gesehenen Münze an der Innenseite des Troges bei lotrechtem Blick in den Trog optisch auf gleiches Niveau¹⁾ zu bringen (s. **Abb. 6**),
- die zugehörigen Tast- und Sehwege zu messen und miteinander zu vergleichen.

Als Auflage für die Münze an der Außenwand (also in Luft) eignet sich



- 6 |** Bestimmung des Hebungsmaßes von Wasser als Verhältnis von haptischer (l_t) und optischer (l_s) Tiefe bei senkrechtem Einblick: a) Schema des Versuchsaufbaus; b) ohne Wasser, rechte Münze 7 cm erhöht ($l_s = 21$ cm), aufgenommen mit Blende f20; c) mit Blende f6,3; d) mit $l_t = 28$ cm Wasserstand über der linken Münze, Blende f6,3

ein kleiner, höhenverstellbarer Labortisch.

Die Vermessung des Wasserstandes im Trog (Tastweg l_t) und des Abstands der Münze an der Außenwand vom Niveau der Wasseroberfläche (Sehweg l_s) liefert ein Verhältnis nahe 4:3 – was der Brechzahl von Wasser entspricht ($n = 1,33$). Auf dieser Grundlage können wir als Vorstufe zum Hebungsgesetz folgende Hebungsregel formulieren:

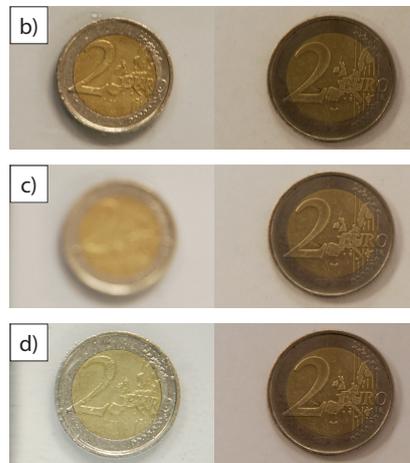
- *Ein unter Wasser liegender Gegenstand erscheint bei senkrechtem Einblick um ein Viertel seiner Eintauchtiefe gehoben.*

Zwischenüberlegung

Die Bestimmung des Hebungsmaßes von Wasser gelang unter der Voraussetzung, dass Seh- und Tastweg bei senkrechtem Einblick ins Wasser zusammenfallen und dadurch die Länge des hebungsbedingt verkürzten Sehweges entlang des Tastwegs gemessen werden konnte.

Dies ist jedoch für nicht-senkrechte Einblicke nicht möglich, weil in diesem Fall die Richtungen von Seh- und Tastweg auseinanderfallen. Unsere Vermutung ist:

- Eine unter Wasser liegende Münze erscheint zwar umso stärker gehoben, je flacher der Aufblickwinkel ist. Dies ist aber gerade eine Folge davon, dass das Verhältnis der jeweils zugehörigen Seh- und Tastwege unabhängig vom Blickwinkel *konstant* ist.



Das Experiment im **3. Schritt** dient dazu, dies zu zeigen.

3. Die Vermessung der Hebung im Spiegelraum

Der entscheidende Trick (s. a. die „Hinweise zum Versuchsaufbau“ unten) bei diesem Experiment beruht darauf, dass man hier einen hebungsbedingt gestauchten Maßstab M_H mit einem gespiegelten Maßstab M' vergleicht (s. **Abb. 7b–c**).

Dazu fixiert man an der Trogwand einen Maßstab M_H , dessen Nullmarke genau auf der Höhe des Wasserspiegels liegt. In Verlängerung seiner Skalenkante stellt man oberhalb der Wasseroberfläche einen zweiten, kopfstehenden Maßstab M so auf, dass dessen Nullmarke ebenfalls auf Höhe des Wasserspiegels liegt und dass dessen Spiegelbild M' exakt neben dem gestauchten Maßstab M_H gesehen wird (s. **Abb. 7b–c**).

Über eine Kimme x_k werden für verschiedene Blickwinkel α die Wertepaare y_t und y_s der gestauchten und der gespiegelten Skala abgelesen (s. **Kasten 2** und **Abb. 7a**), dann die jeweils zugehörigen Tast- und Sehwege bestimmt

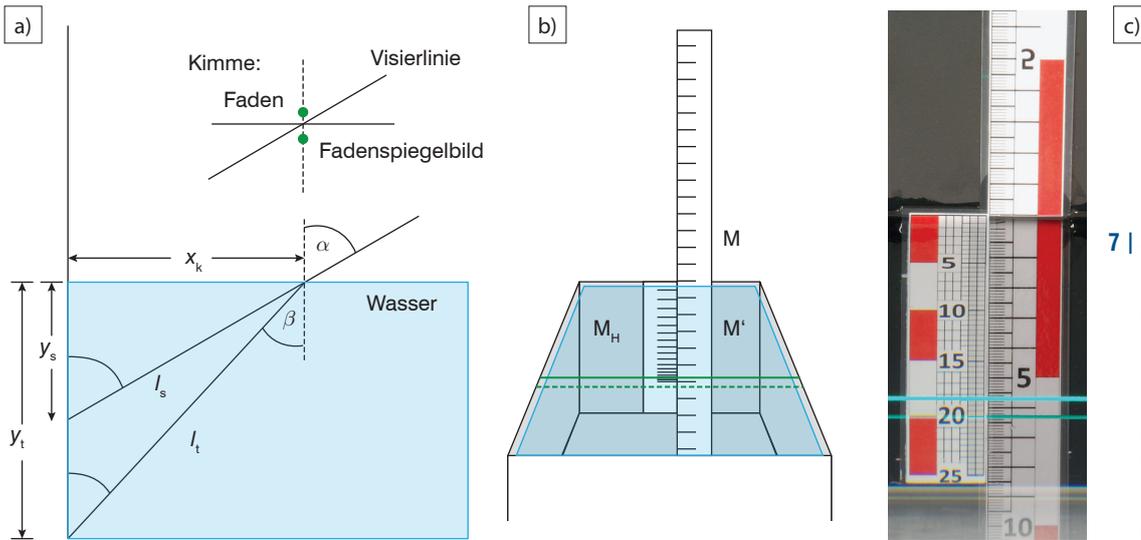
$$l_t = \sqrt{x_k^2 + y_t^2} \quad \text{und} \quad l_s = \sqrt{x_k^2 + y_s^2}$$

und die Messdaten in eine Tabelle eingefügt (s. **Tab. 1** in **Kasten 2**). Es zeigt sich, dass das Verhältnis l_t/l_s und damit das Hebungsmaß unabhängig vom Einblickwinkel konstant ist.

An einem Wassertrog mit einem Füllstand von 28 cm wurde mit $x_k = 19,6$ cm und zehn verschiedenen Blickrichtungen das Hebungsmaß im Licht einer Natriumdampflampe ($\lambda = 589$ nm) zu $n = 1,329 \pm 0,001$ bestimmt [1].

Hinweise zum Versuchsaufbau

- Als Kimme zum Anvisieren dienen ein wenige Millimeter über der Wasseroberfläche gespannter Faden und sein Spiegelbild.
- Bewährt hat sich, digitale Maßstäbe zu bearbeiten (den oberen Maßstab zu spiegeln erleichtert das Ablesen seines Spiegelbildes), Ausdrucke davon zu laminieren und in der



7 | a) Experimentieraufbau zur Bestimmung der optischen Hebung von Wasser (nach [7]); b) Beobachterperspektive auf den gestauchten und den gespiegelten Maßstab M_H und M' ; c) Blick auf das Experiment

beschriebenen Anordnung auf eine Kunststoffplatte zu kleben, die dann lotrecht in den Trog gestellt wird (s. Abb. 7c; Vorlagen können beim Autor angefordert werden).

- Der gestauchte und der gespiegelte Maßstab müssen exakt nebeneinander und in derselben Ebene lotrecht zur Wasseroberfläche liegen.

Vertiefungsmöglichkeit

Je genauer man arbeitet, desto mehr zeigt sich neben der Dispersion der Astigmatismus des gehobenen Maßstabs: Versucht man, die Maßstäbe mit kleiner Blende zu fotografieren, stellt man fest, dass die horizontalen Skalenteile von M_H stets etwas vor denjenigen von M' scharf gesehen werden. Deshalb sollte M_H zusätzlich mit vertikalen Linien versehen werden, und es empfiehlt sich die Arbeit mit einer Natriumdampfleuchte.

Ergebnisse

Die Eigenschaften der optischen Hebung lauten zusammengefasst: Beim Einblick in ein optisch klares Medium wie Wasser erscheint das Volumen des Mediums senkrecht zur durchblickten Grenzfläche gestauch, und zwar umso stärker, je größer der gegen das Flächenlot gemessene Blickwinkel ist.

Für den senkrechten Blick in Wasser gilt:

- Ein unter Wasser liegender Gegenstand erscheint um ein

Viertel seiner Eintauchtiefe optisch gehoben.

Das Verhältnis der haptischen zur optischen Tiefe wird als *Hebungsmaß* bezeichnet; es charakterisiert die optische Dichte von Wasser und ist identisch mit der Brechzahl ($n = 4/3$).

Allgemein gilt für den Einblick in optische Medien das *Hebungsgesetz*:

- Das Verhältnis von Sehweg und Tastweg ist unabhängig vom Einblickwinkel konstant.

Drückt man diese Bedingung über

die beteiligten Richtungswinkel aus (s. Abb. 8), gelangt man zur bekannten Formulierung des Brechungsgesetzes an optischen Grenzflächen, wodurch die formale Gleichwertigkeit beider Formulierungen gezeigt ist:

$$n = \frac{l_t}{l_s} = \frac{x}{l_s} \cdot \frac{l_t}{x} = \frac{x}{l_s} \cdot \frac{l_t}{x} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$$

Hebungsgesetz
Brechungsgesetz

Zur eingangs gestellten Frage nach dem gesehenen Ort einer unter Was-

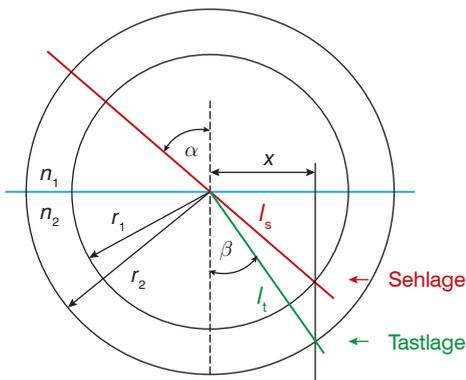
AUFGABEN 2

Blickwinkel und Hebungsmaß

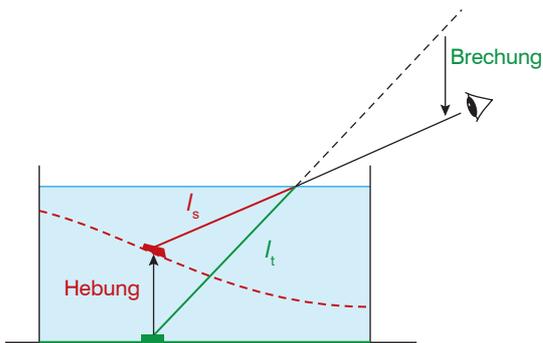
- Peile in der Mitte zwischen dem Faden und seinem Spiegelbild einen gut erkennbaren Skalenstrich des gestauchten Maßstabs an.
- Lies den direkt danebenstehenden Wert der gespiegelten Skala ab.
- Trage 4 Wertepaare dieser Art (für verschiedene Blickwinkel) in die Tabelle ein.
- Berechne (über Pythagoras) die zugehörigen Tast- und Sehwege. Aus deren Verhältnis ergibt sich das Hebungsmaß.

	beobachtet		berechnet		Hebungsmaß l_t/l_s
	gehobener Maßstab y_t	gespiegelter Maßstab y_s	Tastweg l_t	Sehweg l_s	
1. Einblick					
2. Einblick					
3. Einblick					
4. Einblick					

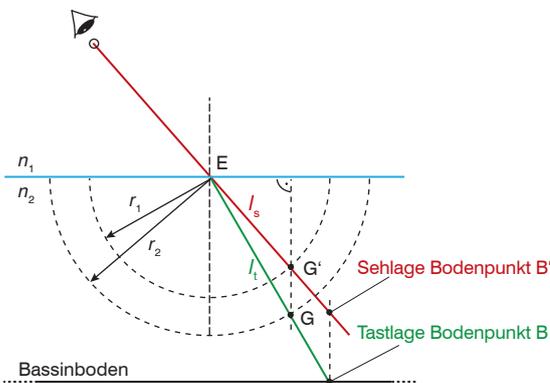
Tab. 1 | Messwertetabelle



8 | Geometrischer Zusammenhang von Hebungsgesetz und Brechungsgesetz



9 | Die Münze im Trog ohne Wasser wird dem Auge von der Trogwand verdeckt. Mit Wasser wird sie binokular an dem Ort gesehen, für den sich Tastweg (I_t) und Sehweg (I_s) verhalten wie 4 : 3.

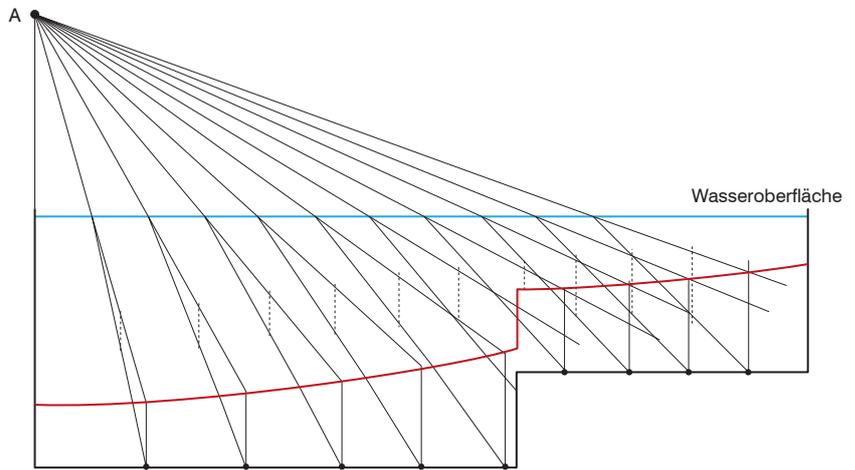


10 | Punktweise Konstruktion der Bildkurve eines gegebenen Bodenprofils

ser liegenden Münze lässt sich damit für die binokulare Beobachtung folgende Antwort geben (s. a. Abb. 9):

- Die Münze wird, unabhängig vom Blickwinkel, stets so stark gehoben gesehen, dass sich Tastweg und Sehweg verhalten wie 4 : 3.

Vor diesem Hintergrund lassen sich auch die bekannten Knickphänomene der optischen Hebung (geknickte Stäbe, Speerfischen etc.) einordnen.



11 | Bildkurve eines Bodenprofils mit einer Stufe, gesehen von A aus (s. AB1–2)

4. Bildkurven der Hebung konstruieren

Auf der Grundlage des Hebungsgesetzes lässt sich ein einfaches Verfahren zur Konstruktion von Bildkurven der Hebung nach Snellius angeben (s. AB1), das hier exemplarisch für das Bodenprofil eines Bassins mit einer Stufe (s. AB2) durchgeführt wird.

Der von einem gegebenen Augpunkt A aus gesehene Verlauf des Bodenprofils wird punktweise konstruiert (s. Aufgaben in AB1); die entsprechende Konstruktion muss also für jede Visierlinie einzeln ausgeführt werden (s. Abb. 10). Ein mögliches Ergebnis zeigt Abbildung 11.

Ausblick: Astigmatismus

Ein Experiment, das den Rahmen dieses Artikels übersteigt, die hier beschriebene Reihe aber fortsetzt, betrifft die Untersuchung des Astigmatismus: Mithilfe einer geeigneten Linsen Kombination lassen sich meridionales und sagittales Bild eines unter Wasser liegenden Kreuzgitters trennen. Man erkennt sie daran, dass nur die vertikalen (sagittal) bzw. die horizontalen (meridional) Linien des Strichgitters scharf, wobei das meridionale Bild vor dem sagittalen gesehen wird, d. h. näher beim Betrachter.

Der Abstand dieser Bilder kann optisch bestimmt werden. Er beträgt in guter Übereinstimmung mit der Theorie bei einer Tiefe des Objektpunktes von 30 cm und einem Blickwinkel von $\alpha = 45^\circ$ etwa 8 cm (s. [1] und [8]).

Ein Praktikumsheft, in dem alle hier vorgestellten Versuche beschrie-

ben sind, kann beim Autor angefordert werden.

Anmerkung

- 1) Erfahrungsgemäß kann es etwas dauern, bis sich eine Schülergruppe darauf geeinigt hat, dass beide Münzen bei senkrechtem Blick von oben auf gleicher Höhe gesehen werden.

Literatur

- [1] Quick, T.; Grebe-Ellis, J.; Passon, O.: Ein genauer Blick auf die optische Hebung. In: PhyDid A 14 (2015), Nr. 1, S. 26–44.
- [2] Yang, P.-K.; Liu, J.-Y.; Ying, S.-P.: Experimentally determining the locations of two astigmatic images for an underwater light source. In: American Journal of Physics 83 (2015), S. 403–408.
- [3] Theilmann, F.: Der Blick ins Becken. PhyDid A 9 (2010), Nr. 1, S. 45–53.
- [4] Steinle, F.: Exploratives Experimentieren. Charles Dufay und die Entdeckung der zwei Elektrizitäten. In: Physik Journal 3 (2004), Nr. 6, S. 47–52.
- [5] Rincke, C.: Experimente in ihren Funktionen für das Lernen. Regensburg: Universität Regensburg, 2016. – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:355-epub-364106> [13.1.2020].
- [6] Bezugsquelle für Wassertrog aus Edelstahl: <http://www.lehrerseminar-forschung.de/shop/geraete/wasserbecken-edelstahl.html> [13.1.2020].
- [7] Grebe-Ellis, J.; Sommer, W.; Vogt, J.: Abituraufgaben zur Hebung, Beugung und Polarisation. Kassel: Pädagogische Forschungsstelle, 2002.
- [8] Quick, T.: Phänomenologie der optischen Hebung. Berlin: Logos-Verlag, 2015.

Name: _____

Datum: _____

OPTISCHE HEBUNG

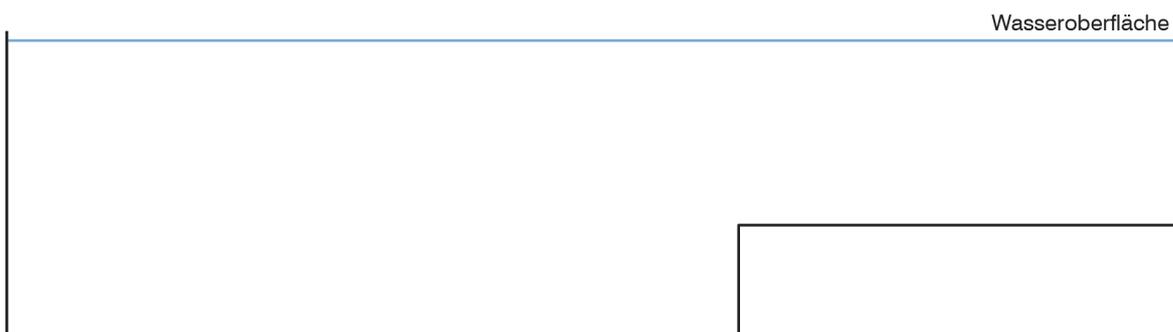
Konstruktion der Bildkurve eines Bodenprofils

1. **Schritt:** Ziehe auf **Arbeitsblatt 2** eine Visierlinie von A ausgehend ins Wasser hinein, sodass sich mit der Wasseroberfläche der Schnittpunkt E ergibt.
2. **Schritt:** Schlage um E zwei Kreisbögen, deren Radien sich verhalten wie die Brechzahlen von Wasser und Luft ($r_2/r_1 = n_2/n_1 = 4:3$), also z. B. $r_1 = 6$ cm und $r_2 = 8$ cm.
→ *Es genügt, wenn die Kreisbögen im Bereich der unter Wasser verlaufenden Visierlinie geschlagen werden.*
3. **Schritt:** Der kleinere Kreis schneidet die Visierlinie in G'. Fülle das Lot auf die Wasserfläche durch G' und verlängere es nach unten, sodass sich der Schnittpunkt G mit dem größeren Kreis (r_2) ergibt.
→ *G' ist das von A aus gehoben gesehene Bild von G.*
4. **Schritt:** Ziehe von E eine Gerade durch G und verlängere sie so, dass sich der Schnittpunkt B mit dem Bassinboden ergibt. Die Strecke EB ist der zugehörige Tastweg.
5. **Schritt:** Der von A aus gehoben gesehene Ort B' des Bodenpunktes B ergibt sich als Schnittpunkt des Lotes durch B mit der über G' hinaus verlängerten Visierlinie AG'.

Name: _____

Datum: _____

OPTISCHE HEBUNG

Vorlage: einstufiges Bodenprofil eines WasserbeckensA
•

1 | Bodenprofil eines Wasserbeckens mit einer Stufe