Brechungsgesetz einmal anders

Aufgabentyp: selbstständige Erarbeitung und Transfer

Zielgruppe: 8. Schulstufe, SEK I

Zeitrahmen: 1-2 Unterrichtseinheiten

Inhaltliche Voraussetzungen: Längen- und Zeitmessung

Zusätzliche Informationen zu Räumlichkeiten, Sozialform, Methodik: Partner*innenarbeit, großer Raum für das Experiment (Turnsaal, Aula, Pausenhof)

Arbeitsmaterialien, Hilfsmittel: Metronom bzw. App

Abstract

Das Brechungsgesetz soll mit Hilfe des Fermatschen Prinzips qualitativ erarbeitet werden. Dazu wird ein Analogieexperiment in der Klasse bzw. im Turnsaal durchgeführt (Details dazu im Anhang), und dann werden die Ergebnisse auf Lichtstrahlen übertragen.

1. Ist der kürzeste Weg immer der schnellste?

Um diese Frage zu beantworten, stellen wir uns eine Situation am Strand vor. Betrachte Abbildung 1. Du sitzt am Punkt A am Strand und schaust aufs Meer hinaus. Ein Schrei lässt dich hochschrecken. Du siehst dich um und erkennst eine Person in Seenot. Sie befindet sich bei Punkt B.

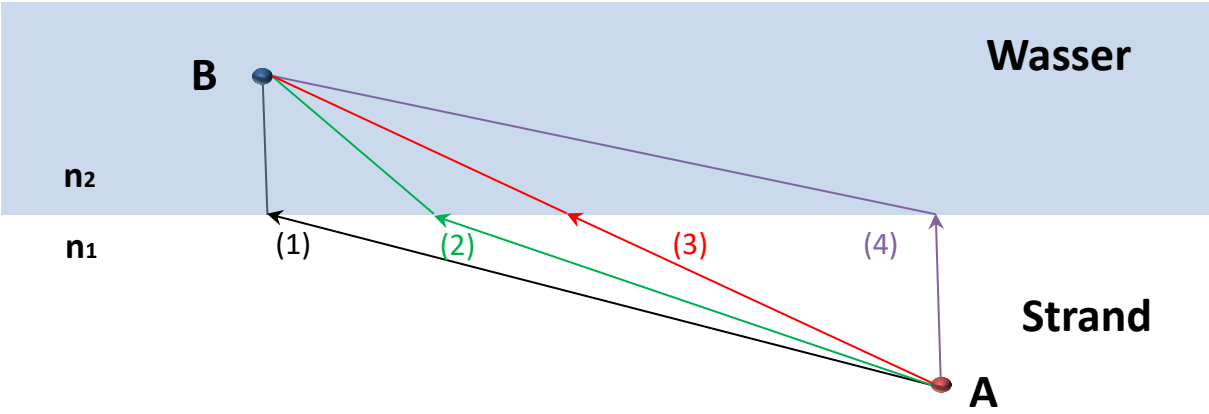


Abbildung 1: Mögliche Wege

Ziel: Herausfinden, wie du am schnellsten zur Person in Seenot gelangen kannst.

Partner*innenarbeit:

Welchen Weg würdest du zuerst an Land und dann im Wasser wählen? Diskutiere mit deinem Nachbarn bzw. deiner Nachbarin.

Schreibt eure Antwort auf und begründet diese.

Die verschiedenen Lösungen werden im Plenum gesammelt. Ausgewählte Gruppen stellen ihre Begründung vor.

2. Experiment

Gemeinsam überprüfen wir nun die verschiedenen Vermutungen mit Hilfe eines Experiments in der Klasse bzw. im Pausenhof. Dazu stellen wir die Situation am Strand nach. In der Abbildung 1 (siehe Aufgabe 1) sind vier mögliche Wege dargestellt. Diese werden der Reihe nach ausprobiert.

Materialien:

- Metronom (z.B. Handy-App)
- Maßband/Meterstab
- Ausreichend Platz, z.B. im Pausenhof oder im Turnsaal
- Etwas zum Markieren (Kreide, Hütchen, Federpennal)

Versuchsdurchführung:

- Wir wissen, dass wir am Strand schneller sind als im Wasser. Um das nachzustellen nehmen wir ein Metronom und stellen eine Zeit von 2s zwischen zwei „Ticks“ ein.
- Die Versuchsperson macht am Strand bei jedem „Tick“ einen kleinen Schritt.
- Im Wasser darf sie nur bei jedem zweiten „Tick“ einen Schritt machen.
- Achte darauf, dass die Schritte jeweils gleich groß sind. Am besten setzt ihr Fuß an Fuß.

Tipp: Beachte dabei die Hinweise zur Standortwahl in den Anmerkungen zur Aufgabe. Andernfalls sind die Ergebnisse aufgrund von Messungenauigkeiten kaum bis gar nicht zu unterscheiden.

2.1 Führt das Experiment und die notwendigen Messungen gemeinsam durch. Halte die Messwerte im Leerfeld fest.

Beantworte damit folgende Fragen. Gib für alle Aufgaben möglichst ausführliche Begründungen an.

a) Welcher Weg ist der kürzeste?

b) Auf welchem Weg bist du am schnellsten bei der Person in Seenot?

c) Welchen Weg würdest du wählen? – den schnellsten oder den kürzesten?

a)

b)

c)

2.2 Wir untersuchen nun, welchen Einfluss die Geschwindigkeiten auf den optimalen Weg (den mit der kürzesten Zeit) haben. Dazu betrachten wir verschiedene Fälle:
(v_1 ist die Geschwindigkeit an Land und v_2 ist die Geschwindigkeit im Wasser)

- Du bist an Land und im Wasser gleich schnell, $v_1 = v_2$.
- Du bist an Land doppelt so schnell wie im Wasser, $v_1 = 2v_2$.
- Du bist an Land dreimal so schnell wie im Wasser, $v_1 = 3v_2$.

a) Stellt in Partner*innenarbeit Vermutungen auf, wie der optimale Weg in den einzelnen Fällen aussieht.

Fertigt dazu eine Skizze an (Für die Online-Bearbeitung: Geht entweder im Acrobat Reader auf Werkzeuge – Kommentieren – Stift (zwischen T und Radiergummi) oder verwendet ein Blatt Papier).

b) Überlegt in Partner*innenarbeit, wie ihr die unterschiedlichen Geschwindigkeiten im Experiment nachstellen könnt. Haltet eure Gedanken dazu im Leerfeld fest.

a)

b)

2.3 Im Plenum werden Vermutungen und Lösungsvorschläge vorgestellt und besprochen.

3. Übertragung auf die Optik – Brechungsgesetz

Die gewonnenen Erkenntnisse werden nun auf die Optik übertragen.

Licht breitet sich in unterschiedlichen Materialien unterschiedlich schnell aus. Wie schnell es sich ausbreitet, wird durch den sogenannten Brechungsindex n bestimmt.
Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v wird mit dieser Formel berechnet:

$$v = \frac{c}{n}$$

Mit c wird die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bezeichnet.

Der französischer Physiker Fermat hat das sogenannte Fermatsche Prinzip aufgestellt. Diesem Prinzip zufolge nimmt ein Lichtstrahl immer den Weg, für den er die kürzeste Zeit benötigt.

Wir stellen uns nun folgende Situation vor: Ein Lichtstrahl wechselt von Luft in ein anderes Material (z.B. Glas oder Wasser). Luft hat einen Brechungsindex von $n_1 = 1$. Das andere Material hat einen größeren Brechungsindex mit $n_2 > 1$.

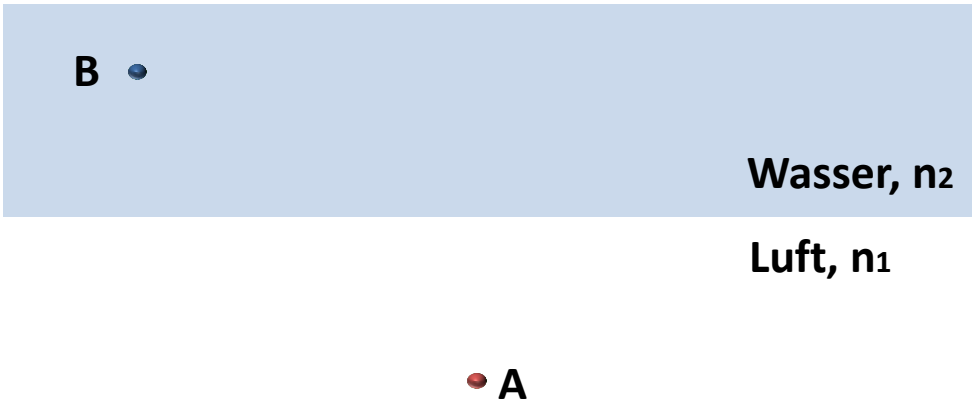
Weiter auf der nächsten Seite bzw. auf der Rückseite.

3.1 Wir betrachten dazu wieder zwei Punkte A und B. Überlege dir, welchen Weg der Lichtstrahl von A nach B nehmen wird.

a) Zeichne ein, in welche Richtung der Lichtstrahl abgelenkt wird.
Fertige dazu eine Skizze an (Für die Online-Bearbeitung: Gehe im Acrobat Reader auf Werkzeuge – Kommentieren - Zeichenwerkzeuge – (verbundene) Linie oder verwende ein Blatt Papier).

b) Schreibe deine Überlegungen auf und begründe, warum du den Lichtstrahl so eingezeichnet hast. Nimm Bezug auf das durchgeführte Experiment und auf die Formel für die Ausbreitungsgeschwindigkeit $v = \frac{c}{n}$.

a)



b)

3.2 Im Anschluss werden die Lösungsvorschläge im Plenum diskutiert.

Fachlicher Hintergrund:

Das Fermatsche Prinzip besagt, dass ein Lichtstrahl den optisch kürzesten Weg nimmt, also jenen Weg, für den das Licht die kürzeste Zeit benötigt. Dies ist ein Extremalprinzip, wie man es auch in vielen anderen Gebieten der Physik wiederfindet. Für die Reflexion innerhalb eines (homogenen) Mediums ist die kürzeste Zeit gleichzusetzen mit dem kürzesten Weg zwischen zwei Punkten. Dies entspricht einer Geraden, die entweder direkt verläuft oder wie bei der Reflexion an einem Spiegel, so dass Einfalls- und Ausfallswinkel gleich groß sind. Spannender wird dies im Zusammenhang mit dem Brechungsgesetz, wo unterschiedliche Geschwindigkeiten in den einzelnen Medien berücksichtigt werden müssen. Das Brechungsgesetz kann man mit Hilfe des Fermatschen Prinzips sehr anschaulich und einfach herleiten. Gefragt ist jener Weg zwischen zwei Punkten, für den die kürzeste Zeit benötigt wird. Die beiden Punkte befinden sich in unterschiedlichen Medien und der Brechungsindex bestimmt dabei die Geschwindigkeit des Lichtstrahls im entsprechenden Medium. Je größer der Brechungsindex ist, desto langsamer breitet sich der Lichtstrahl aus. Innerhalb eines Mediums ist die Gerade der optimale Weg mit kürzester Laufzeit. Die Frage ist als nur noch, an welchem Punkt der Übergang von Medium 1 zu Medium 2 stattfinden soll. Optimal ist dabei nicht, dass im optisch dichteren Medium (also dem mit großem Brechungsindex) die Strecke minimal wird, sondern dass ein bestimmter Winkel der Lichtstrahlen zum Lot vorliegt – $n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2$.

Analog kann man den Sachverhalt auch mit einem Rettungsschwimmer betrachten, der versucht einen untergehenden Schwimmer zu retten. Der Retter muss dabei zuerst ein Stück am Strand laufen, und dann durchs Wasser schwimmen, wobei er am Strand klarerweise schneller ist als im Wasser. Dabei ist es weder optimal, direkt auf den Schwimmer zuzusteuern, noch zuerst auf kürzestem Weg zum Ufer zu laufen. Der optimale Weg ist durch das Brechungsgesetz gegeben, wobei v=c/n.

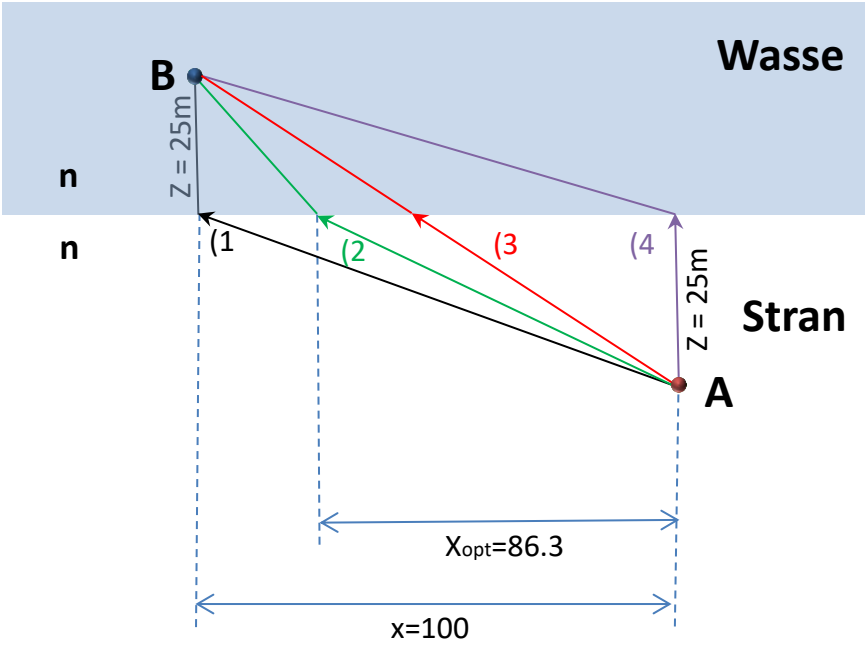
Bei dem Fermatschen Prinzip handelt es sich um ein Extremalprinzip. Das bedeutet, dass die Ausbreitung von Licht so vonstattengeht, dass sie „optimal“ ist – in diesem Fall heißt das, dass der Lichtstrahl jenen Weg wählt, für den er die kürzeste Zeit benötigt. Das bedeutet jetzt aber nicht, dass der Lichtstrahl weiß, was er machen soll bzw. tatsächlich alle Möglichkeiten ausprobiert - wir beschreiben das nur so. Diese Beschreibung hilft uns zu verstehen, was vor sich geht.

Solche Extremalprinzipien kommen immer wieder in der Natur vor bzw. können physikalische Gesetzmäßigkeiten so formuliert werden. Z.B. gibt es das Prinzip der minimalen Energie: In einer Schale nimmt eine Kugel jene Position ein, für die ihre (potentielle) Energie minimal ist (also ganz unten). Wasser bildet kugelförmige Tropfen, weil dadurch die Oberflächenenergie minimal wird (eine Kugel hat bei gegebenem Volumen von allen möglichen Körpern die kleinste Oberfläche – so wie ein Kreis bei gegebener Fläche den kleinsten Umfang hat). Auch die Form von durchhängenden Hochspannungsleitungen kann man so bestimmen. Diese ist dadurch gegeben, dass das Seil eine minimale (potentielle) Energie besitzt.

Anmerkungen zur Aufgabe

Für das Experiment wird ein Ort mit ausreichend Platz benötigt – z.B. der Pausenhof, die Aula oder die Turnhalle. Es können immer auch zwei Möglichkeiten miteinander verglichen werden. Authentisch kann das Experiment auch im Schwimmunterricht durchgeführt werden.

Je flacher der Winkel ist, also je geringer der Vertikalabstand der beiden Punkte zur Grenzebene ist, desto weiter verschiebt sich der optimale Weg nach rechts. Dadurch ist insbesondere die Zeit für den direkten Weg (3) und für den optimalen Weg (2) besser unterscheidbar – die Zeit für den Weg (4) mit minimaler Distanz im 2. Medium wird aber schlechter unterscheidbar. Eine recht gute Konfiguration für $n_2=2n_1$ ist durch $z=2.5m$, $x=10m$ gegeben – dann ist $x_{opt}\approx 8.63m$ (dies entspricht der in der Skizze abgebildeten Konfiguration im Maßstab 1:10). In diesem Fall ist die relative Abweichung der Zeiten für den optimalen Weg (2) und jener für den direkten Weg (3) ca. 12.5%. Die Abweichung zum Weg (1) mit minimaler Distanz in Medium 2 beträgt nur ca. 4% und ist damit im Experiment nur schwer messbar (Ungenauigkeit der Schrittlängen, Messungenauigkeiten). Die Unterscheidbarkeit der Wege (2) und (3) wird für größeres n_2 (also geringere Geschwindigkeit v_2 im Wasser) besser – allerdings wird die Unterscheidbarkeit der Wege (1) und (2) schlechter.



Es gibt eine Reihe von Alternativen, wie die unterschiedlichen Geschwindigkeiten am Strand und im Wasser berücksichtigt werden können. So kann man z.B. die Schrittgröße variieren – große Schritte an Land, kleine (halb so große) Schritte im Wasser, wobei in diesem Fall bei jedem „Tick“ ein Schritt gemacht werden darf. Weitere Möglichkeiten: Gehen vs. Kriechen/Robben/Krabbeln; Laufen vs. Hindernislauf etc.

Klassifikation

1	E2 W3	Ich kann einzeln oder im Team zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen und Vermutungen aufstellen Ich kann einzeln oder im Team Vorgänge und Phänomene in Natur, Umwelt und Technik in verschiedenen Formen (Grafik, Tabelle, Bild, Diagramm …) darstellen, erklären und adressatengerecht kommunizieren
2.1	E3 E 4	Ich kann einzeln oder im Team zu Fragestellungen eine passende Untersuchung oder ein Experiment planen, durchführen und protokollieren Ich kann einzeln oder im Team Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren (ordnen, vergleichen, Abhängigkeiten feststellen) und interpretieren
2.2 2.3	E2	Ich kann einzeln oder im Team zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen und Vermutungen aufstellen
3	W3 E4	Ich kann einzeln oder im Team Vorgänge und Phänomene in Natur, Umwelt und Technik in verschiedenen Formen (Grafik, Tabelle, Bild, Diagramm …) darstellen, erklären und adressatengerecht kommunizieren Ich kann einzeln oder im Team Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren (ordnen, vergleichen, Abhängigkeiten feststellen) und interpretieren