

## 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:** Partnerarbeit, 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?

Wir betrachten einen Rettungsschwimmer A, der am oberen Ende des Strandes steht (etwa 25m vom Ufer entfernt) und aufs Meer hinausschaut. Etwa 100m rechts von seiner Position beobachtet er, wie ein Schwimmer B, der 25m vom Ufer entfernt ist, unterzugehen droht.

Wir wollen herausfinden, wie er am schnellsten zum Ertrinkenden gelangen kann.

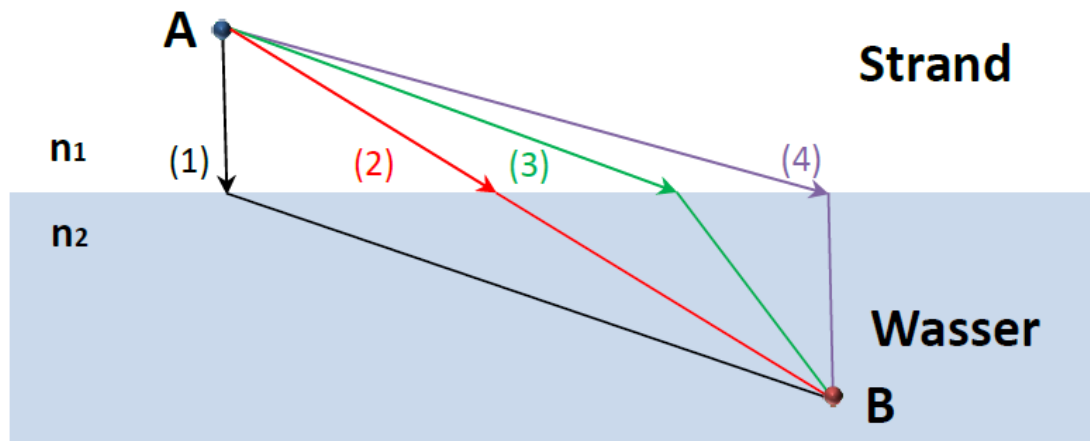


Abbildung 1: Mögliche Wege

#### 1.1 Partnerarbeit:

- Diskutiere mit deinem Nachbarn, welchen Weg der Rettungsschwimmer zuerst am Land und dann im Wasser am besten nehmen soll.
- Schreibt eure Antwort auf und begründet diese!

1.2 Die verschiedenen Lösungen werden im Plenum gesammelt und die Begründungen von ausgewählten Gruppen vorgestellt.

## 2. Experiment

Gemeinsam überprüfen wir nun die verschiedenen Vermutungen mit Hilfe eines Experiments in der Klasse bzw. im Pausenhof. Dazu werden zwei Punkte als Standorte für Retter und Schwimmer gewählt. In der Abbildung 1 (siehe Aufgabe 1) sind vier mögliche Wege dargestellt. Diese werden der Reihe nach ausprobiert.

**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.

Aus unserer Erfahrung wissen wir, dass man am Strand schneller vorankommt als im Wasser. Um dies zu berücksichtigen, nehmen wir ein Metronom und stellen eine Periodendauer von ca. 2s ein. Die Versuchsperson macht am Strand bei jedem „Tick“ einen kleinen Schritt, im Wasser nur bei jedem zweiten „Tick“. Dabei ist darauf zu achten, dass die Schritte jeweils gleich groß sind (am günstigsten Fuß an Fuß).

2.1 Führt nun gemeinsam das Experiment und die notwendigen Messungen durch. Jeder hält die Messwerte im Leerfeld fest und beantwortet 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 beim Ertrinkenden?
- c) Welchen Weg würdest du wählen – den schnellsten oder den kürzesten?

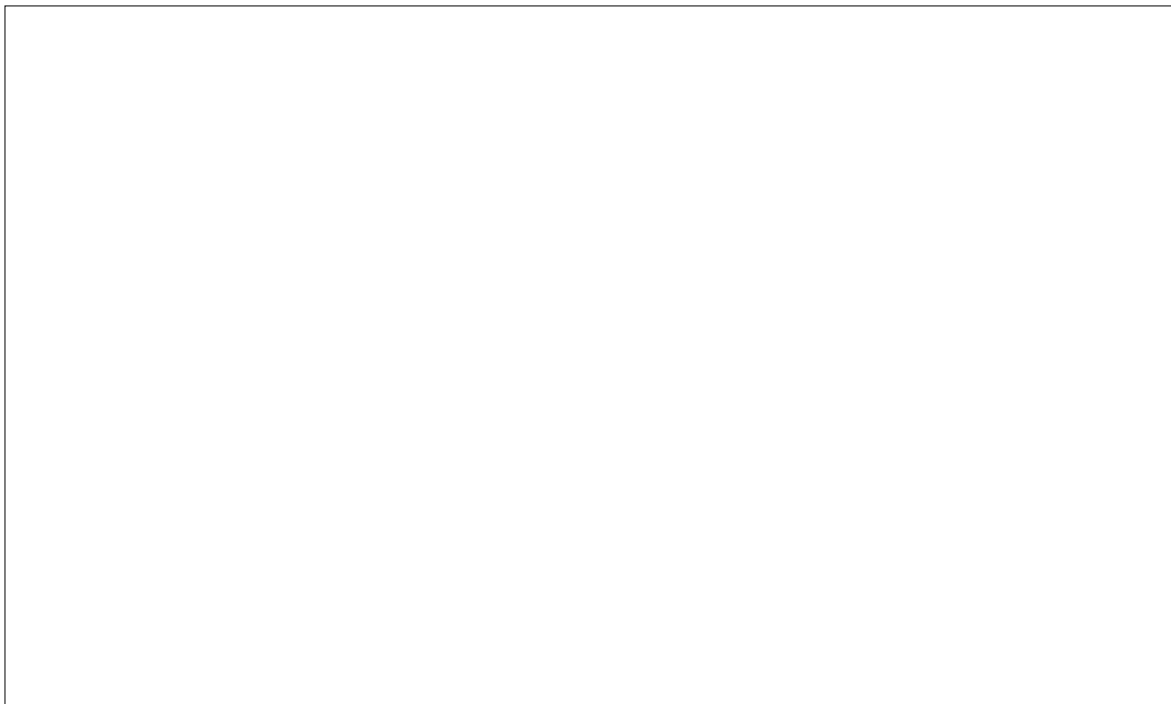
2.2 Der Einfluss der Geschwindigkeit ( an Land, im Wasser) für den optimalen Weg (mit der kürzesten Zeit) wird untersucht. Dazu betrachten wir verschiedene Fälle:

- Der Rettungsschwimmer ist an Land und im Wasser gleich schnell,  $v_2 = v_1$ ,
- Der Rettungsschwimmer ist an Land doppelt so schnell wie im Wasser,  $v_2 = \frac{v_1}{2}$ ,
- Der Rettungsschwimmer ist an Land dreimal so schnell wie im Wasser,  $v_2 = \frac{v_1}{3}$ .

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

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

b) Überlegt in Partnerarbeit, wie die unterschiedlichen Geschwindigkeiten in eurem Experiment erreicht werden können. Haltet eure Gedanken dazu im Leerfeld fest.



2.3 Im Plenum werden Vermutungen und Lösungsvorschläge vorgestellt und besprochen.

## 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 wird durch den sogenannten Brechungsindex  $n$  bestimmt, wobei für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v = \frac{c}{n}$  gilt. Mit  $c$  wird die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum bezeichnet.

Fermat, ein französischer Physiker, hat das sogenannte Fermatsche Prinzip aufgestellt. Dies besagt, dass ein Lichtstrahl immer jenen Weg nimmt, für den er die kürzeste Zeit benötigt. Überlege dir nun, welchen Weg ein Lichtstrahl dann nehmen wird, wenn er von Luft (Brechungsindex  $n_1 = 1$ ) in ein anderes Material – z.B. Glas oder Wasser mit dem Brechungsindex  $n_2 > 1$  – wechselt.

Wir betrachten dazu wieder zwei Punkte A und B:

- Zeichne ein, in welche Richtung der Lichtstrahl abgelenkt wird. Fertige dazu eine Skizze an. Gehe im Acrobat Reader auf Werkzeuge – Kommentieren - Zeichenwerkzeuge – (verbundene) Linie oder verwende ein Blatt Papier.
- Schreibe deine Überlegungen auf! Beachte das durchgeführte Experiment und die Formel für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v = \frac{c}{n}$ .

a)

**A** •

**Luft,  $n_1$**

**Wasser,  $n_2$**

• **B**

b)

### 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 Einfallswinkel 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  $v=c/n$ .

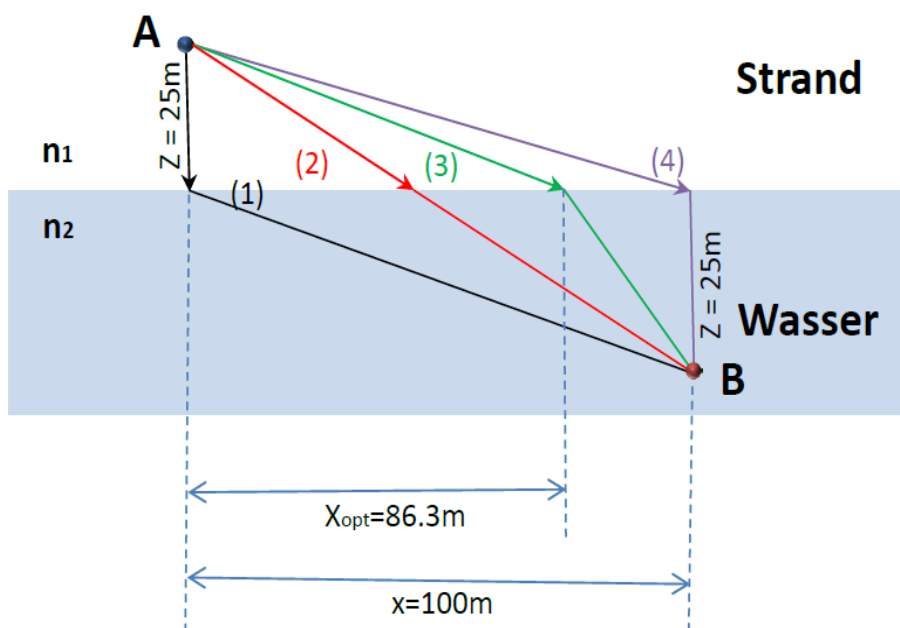
Bei dem Fermatschen Prinzip handelt es sich um ein Extremalprinzip. Das bedeutet, dass die Ausbreitung von Licht so vonstattengeht, dass sie „optimal“ ist – in diesem Fall heißt das, dass der Lichtstrahl jenen Weg wählt, für den er die kürzeste Zeit benötigt. Das bedeutet jetzt aber nicht, dass der Lichtstrahl 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 Grenzzebene ist, desto weiter verschiebt sich der optimale Weg nach rechts. Dadurch ist insbesondere die Zeit für den direkten Weg (2) und für den optimalen Weg (3) 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 (3) und jener für den direkten Weg (2) ca. 12.5%. Die Abweichung zum Weg (4) 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 (3) und (4) 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	<p>Ich kann einzeln oder im Team zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen und Vermutungen aufstellen</p> <p>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</p>
2.1	E3  E 4	<p>Ich kann einzeln oder im Team zu Fragestellungen eine passende Untersuchung oder ein Experiment planen, durchführen und protokollieren</p> <p>Ich kann einzeln oder im Team Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren (ordnen, vergleichen, Abhängigkeiten feststellen) und interpretieren</p>
2.2 2.3	E2	<p>Ich kann einzeln oder im Team zu Vorgängen und Phänomenen in Natur, Umwelt und Technik Fragen stellen und Vermutungen aufstellen</p>
3	W3  E4	<p>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</p> <p>Ich kann einzeln oder im Team Daten und Ergebnisse von Untersuchungen analysieren (ordnen, vergleichen, Abhängigkeiten feststellen) und interpretieren</p>