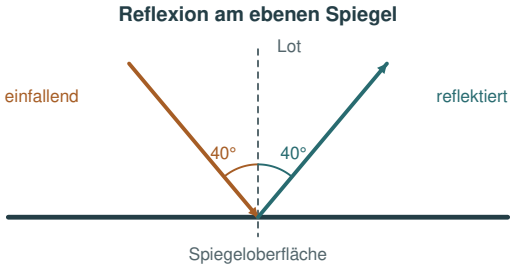
01 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Wie Licht zu unseren Augen gelangt

Ein heller Gegenstand wird sichtbar, wenn Licht von ihm in dein Auge gelangt. Zum Erklären zeichnen wir Lichtwege als Strahlen. Dieses einfache Modell macht viele Vorgänge übersichtlich.



Schematische Lichtwege: Einfall und Reflexion liegen auf derselben Seite des Spiegels. Beide Winkel werden zum gestrichelten Lot gemessen.

1 · Lichtquelle und beleuchteter Körper

Eine **Lichtquelle** sendet eigenes Licht aus, zum Beispiel die Sonne oder eine Lampe. Ein beleuchtetes Buch wirft einen Teil des auftreffenden Lichts zurück. Dieses Licht erreicht dein Auge. Für das Sehen müssen daher Lichtquelle, Gegenstand und Auge miteinander verbunden sein.

Ein **Lichtstrahl** ist eine gedachte Linie mit einem Richtungspfeil. Er zeigt den Weg des Lichts. In einem gleichförmigen durchsichtigen Stoff verläuft dieser Weg gerade. An einer Oberfläche kann Licht zurückgeworfen, durchgelassen oder aufgenommen werden.

2 · Schatten zeigen unterbrochene Lichtwege

Ein undurchsichtiger Gegenstand hält direkte Lichtwege auf. Dahinter entsteht ein **Schattenbereich**. Bei einer kleinen, annähernd punktförmigen Lichtquelle ist seine Grenze scharf. Je näher derselbe Gegenstand zur Lichtquelle rückt, desto größer wird sein Schatten auf einem feststehenden Schirm.

Ausgedehnte Lichtquellen ergeben Übergänge: Im Kernschatten ist die Quelle vollständig verdeckt, im Halbschatten teilweise. Zeichne die äußersten Lichtwege, um die Grenzen zu finden. So lassen sich auch Sonnen- und Mondfinsternisse grundsätzlich erklären.

3 · Spiegelung folgt einer Winkelregel

Bei der **Reflexion** wird Licht zurückgeworfen. Das **Lot** steht am Auftreffpunkt senkrecht auf der Oberfläche. Einfallswinkel und Reflexionswinkel werden zum Lot gemessen. Beide sind gleich groß: Bei 40° Einfallswinkel beträgt der Reflexionswinkel ebenfalls 40°.

Ein glatter Spiegel lenkt parallele Strahlen geordnet zurück. Eine raue Oberfläche besitzt viele unterschiedlich geneigte kleine Flächen. Sie verteilt das Licht in verschiedene Richtungen. Darum kannst du ein Blatt Papier von mehreren Seiten sehen.

Das gehört zusammen: Lichtquelle → Lichtweg → Oberfläche → Auge: Mit dieser Reihenfolge kannst du Sichtbarkeit, Schatten und Spiegelung erklären.

Öffne „Reflexion“. Wähle „40° ansehen“ und verändere anschließend den Einfallswinkel zum Lot. Vergleiche beide Winkel.

01 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Lichtwege mit Randstrahlen und Lot konstruieren

Zwei Konstruktionen mit unterschiedlichen Hilfslinien

Schatten: Randstrahlen
Gerade Wege berühren die Kanten des undurchsichtigen Gegenstands.

Schatten: Grenze
Ihre Fortsetzungen begrenzen den direkt unbeleuchteten Bereich.

Reflexion: Lot
Die Hilfslinie steht senkrecht auf der reflektierenden Fläche.

Reflexion: Winkel
Einfall und Reflexion werden zu demselben Lot gemessen.

Randstrahlen bestimmen Schattenränder; das Lot dient der Winkelmessung. Beide sind gedachte Hilfslinien in einer Zeichnung.

Bei einem Schatten ist wichtig, welche direkten Lichtwege durch einen Gegenstand unterbrochen werden. Zeichne gedanklich zwei **Randstrahlen** von einer kleinen Lichtquelle gerade an den Kanten des Gegenstands vorbei. Zwischen ihren Fortsetzungen liegt auf dem Schirm der Bereich, den das direkte Licht nicht erreicht. Rückt der Gegenstand zur Quelle, gehen diese Randstrahlen stärker auseinander. Auf dem unveränderten Schirm wird der Schatten größer. Rückt er zum Schirm, wird er kleiner. Die Schattenkante ist damit keine eigene Sache, die vom Gegenstand ausgesendet wird. Sie entsteht aus der Grenze zwischen erreichbaren und blockierten Lichtwegen.

Bei einem Spiegel beginnt die Konstruktion anders: Zuerst bestimmst du den Auftreffpunkt und zeichnest dort das **Lot**, eine Senkrechte zur Oberfläche. Einfalls- und Reflexionswinkel werden beide zu diesem Lot gemessen. Würdest du den Winkel zur Spiegelfläche ablesen, erhieltest du eine andere Zahl. Bei 40 Grad zum Lot sind es 50 Grad zur Oberfläche. Diese beiden Winkel ergänzen sich zu einem rechten Winkel. Ein glatter Spiegel ordnet die zurückgeworfenen Strahlen. An vielen kleinen unterschiedlich geneigten Flächen wird das Licht dagegen in verschiedene Richtungen verteilt. Auch dort gilt an jeder kleinen Fläche dieselbe Reflexionsregel; nur die örtlichen Lote zeigen verschieden.

Das **Strahlenmodell** ist eine gezielte Vereinfachung. Es erklärt viele Lichtwege, Spiegelbilder und Schatten gut. Sehr kleine Spalte oder feine Strukturen können jedoch Erscheinungen erzeugen, für die das Wellenmodell nötig ist. Ein Modell wird also danach gewählt, welche Beobachtung erklärt werden soll.

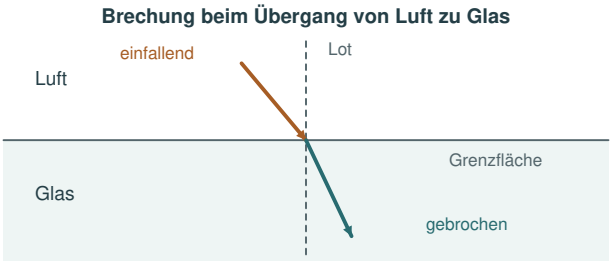
Der Schatten wandert nicht mit derselben Größe
Stellst du einen kleinen Gegenstand näher an eine Lampe, kann sein Schatten auf einer festen Wand stark wachsen. Der Gegenstand selbst wird dabei nicht größer. Die auseinanderlaufenden Randstrahlen erklären die Veränderung. Im Werkstattmodell lässt sich diese Beziehung ohne eine zusätzliche Änderung der Lichtquelle vergleichen.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Der Reflexionswinkel wird zwischen Strahl und Spiegelfläche gemessen.
So stimmt es: In der Reflexionsregel werden beide Winkel zum Lot gemessen. Das Lot steht senkrecht auf dem Spiegel. Winkel zur Oberfläche sind die jeweiligen Ergänzungen auf 90 Grad.

02 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

An Grenzflächen verändert Licht seinen Weg

Ein Löffel wirkt an der Wasseroberfläche geknickt. Das liegt am Weg des Lichts vom Löffel zum Auge. An der Grenze zwischen Wasser und Luft ändert sich seine Ausbreitung.



Luft-Glas: Der gebrochene Strahl liegt näher am Lot. Die Skizze zeigt nur den durchgehenden Lichtweg; der zusätzlich reflektierte Anteil ist weggelassen.

4 · Brechung verbindet Richtung und Material

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht hängt vom Stoff ab. Beim schrägen Übergang zwischen zwei Stoffen ändert sich dadurch meist seine Richtung. Das heißt **Brechung**. Die **Brechzahl** beschreibt, wie stark die Lichtgeschwindigkeit gegenüber dem Vakuum verringert ist.

Beim Übergang von Luft in Wasser oder Glas wird ein schräger Strahl zum Lot hin gebrochen. Beim umgekehrten Übergang wird er vom Lot weg gebrochen. Beim senkrechten Einfall setzt er seinen Weg gerade fort. Material und Einfallswinkel bestimmen gemeinsam den weiteren Weg.

5 · Eine Grenzfläche kann zwei Wege erzeugen

An einer Glasscheibe gelangt meist ein Teil des Lichts hindurch, während ein anderer Teil reflektiert wird. Du kannst deshalb gleichzeitig die Umgebung hinter dem Fenster und eine Spiegelung sehen. Die Anteile hängen unter anderem vom Winkel und den Materialien ab.

Für eine saubere Zeichnung brauchst du zunächst Grenzfläche, Auftreffpunkt und Lot. Erst danach zeichnest du Einfall, Reflexion und Brechung. Die Winkel werden auf beiden Seiten jeweils zwischen Strahl und Lot abgelesen. Diese feste Reihenfolge hilft beim Vergleichen verschiedener Einstellungen.

6 · Totalreflexion hält Licht im Material

Beim Übergang von Glas oder Wasser zu Luft kann der gebrochene Strahl bei großem Einfallswinkel gerade entlang der Grenze laufen. Dieser Winkel heißt **Grenzwinkel**. Oberhalb davon wird das Licht im idealen Modell vollständig zurückgeworfen: Es entsteht **Totalreflexion**.

Dabei muss der Ausgangsstoff die größere Brechzahl haben. Lichtleiter nutzen diesen Zusammenhang: Licht wird an geeigneten Grenzen immer wieder nach innen reflektiert und kann einem gekrümmten Weg folgen. Das Strahlenmodell zeigt die Grundidee; echte Lichtleiter benötigen genauer beschriebene Materialien und Wellenmodelle.

Das gehört zusammen: Material und Einfallswinkel entscheiden zusammen, wie Licht an einer Grenze weiterläuft. Reflexion und Brechung können gleichzeitig auftreten.

Öffne „Brechung“, wähle Luft und Glas und verändere den Winkel. Betätige danach „Medien vertauschen“ und untersuche große Winkel.

02 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Den Übergang umkehren und die Bedingungen prüfen

Totalreflexion in drei Fragen prüfen

1. Ausgangsmedium prüfen
Hat das erste Medium die größere Brechzahl?

→

2. Winkel zum Lot prüfen
Ist der Einfallswinkel größer als der zugehörige Grenzwinkel?

→

3. Strahlweg beurteilen
Wenn beides gilt, bleibt das Licht im idealen Modell im ersten Medium.

Beide Bedingungen sind nötig. Bei Gleichheit mit dem Grenzwinkel verläuft der gebrochene Strahl im Strahlenmodell entlang der Grenze.

Ein Lichtstrahl kann eine Grenzfläche in beide Richtungen durchlaufen. Beim schrägen Übergang von Luft in Glas wird er zum Lot hin gebrochen. Beim umgekehrten Übergang entfernt sich der gebrochene Strahl vom Lot. Die **Brechzahl** verbindet diese Richtungsänderung mit der Lichtgeschwindigkeit im Material. Ein Material mit größerer Brechzahl hat eine kleinere Lichtgeschwindigkeit. Trotzdem knickt der Strahl bei senkrechtem Einfall nicht seitlich ab: Seine Richtung bleibt gleich, obwohl sich seine Geschwindigkeit ändert. Daran erkennst du, dass die Aussagen „Geschwindigkeit verändert sich“ und „Richtung verändert sich“ getrennt geprüft werden müssen. Erst Materialpaar und Einfallsrichtung zusammen bestimmen den Verlauf.

Bei **Totalreflexion** gelten zwei Bedingungen zugleich. Das Licht muss aus dem Material mit größerer Brechzahl kommen, und sein Einfallswinkel muss oberhalb des passenden Grenzwinkels liegen. Ein großer Winkel allein genügt also nicht. Beim Wechsel Luft zu Glas entsteht keine Totalreflexion, auch wenn der Strahl flach auf die Oberfläche trifft. Beim Wechsel Glas zu Luft kann sie dagegen auftreten. Lichtleiter nutzen eine Folge solcher Reflexionen, um Licht in einem geeigneten Kern zu halten. Der Werkstattversuch zeigt eine einzelne Grenzfläche. Aus dieser Beobachtung lässt sich die Grundidee erklären, während die genaue Führung in einem gebogenen Lichtleiter ein weiteres Modell benötigt.

Diese Regeln erklären auch die Wirkung von **Linsen**. Weil ihre Grenzflächen gekrümmt sind, treffen Strahlen an verschiedenen Stellen auf unterschiedlich gerichtete Lote. Eine geeignete Sammellinse lenkt ein paralleles Bündel zusammen. Das verbindet Brechung mit der Bildentstehung im Auge und in einer Kamera.

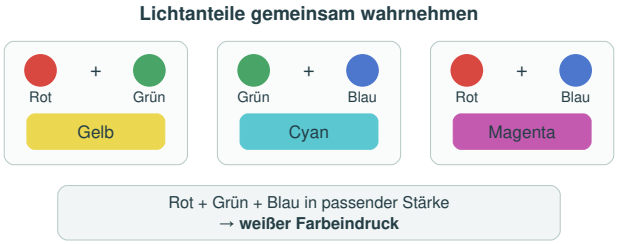
Gleicher Winkel, andere Richtung
Wähle zunächst Luft über Glas und einen Einfallswinkel von 65 Grad. Vertausche dann die Medien, ohne den Winkel zu ändern. Der zweite Versuch kann Totalreflexion zeigen, der erste nicht. Nicht der Winkel allein entscheidet, sondern auch, aus welchem Material das Licht kommt.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Bei einem genügend großen Winkel gibt es an jeder Grenzfläche Totalreflexion.
So stimmt es: Totalreflexion setzt den Übergang vom größeren zum kleineren Brechungsindex voraus. Außerdem muss der Winkel zum Lot oberhalb des Grenzwinkels liegen.

03 | WISSEN IM ZUSAMMENHANG

Farben entstehen aus Licht und Wahrnehmung

Ein Prisma fächert Sonnenlicht in Farben auf. Ein Bildschirm setzt aus roten, grünen und blauen Lichtanteilen viele Farbeindrücke zusammen. Beide Beispiele verbinden physikalische Lichtvorgänge mit unserem Sehen.



Additive Mischung ausgewählter Lichtanteile. Die Farbfelder stellen wahrgenommene Mischfarben vereinfacht dar; ihre Helligkeit und genaue Wirkung hängen von den Lichtquellen ab.

7 · Ein Prisma trennt Lichtanteile

Licht lässt sich auch als elektromagnetische Welle beschreiben. Unterschiedliche sichtbare **Wellenlängen** tragen zu unterschiedlichen Farbeindrücken bei. Weißes Licht kann viele Wellenlängen enthalten. Ein Prisma bricht diese Anteile unterschiedlich stark und fächert sie räumlich auf.

Diese Aufspaltung heißt **Dispersion**. In gewöhnlichem Glas wird violettes Licht stärker abgelenkt als rotes. Die Farben gehen kontinuierlich ineinander über. Das Prisma ordnet die vorhandenen Lichtanteile nach ihrem weiteren Weg. Beim Regenbogen wirken Brechung, innere Reflexion und Dispersion in Wassertropfen zusammen.

8 · Lichtfarben lassen sich addieren

Bei der **additiven Farbmischung** treffen Lichtanteile gemeinsam auf dieselbe Stelle. Geeignetes rotes und grünes Licht erzeugt zusammen einen gelben Eindruck. Grün und Blau ergeben Cyan, Rot und Blau Magenta. Passend dosierte rote, grüne und blaue Anteile können zusammen weiß erscheinen.

Bildschirme nutzen dieses Prinzip. In der Netzhaut reagieren drei Zapfentypen unterschiedlich auf überlappende Wellenlängenbereiche. Das Nervensystem vergleicht ihre Signale. Dadurch können verschiedene Lichtmischungen denselben Farbeindruck auslösen. Die Farben eines Bildschirms verbinden also Lichtquellen, Auge und Gehirn.

9 · Gegenstandsfarben hängen von der Beleuchtung ab

Eine rote Oberfläche reflektiert unter weißem Licht vor allem rote Anteile und nimmt andere stärker auf. **Absorption** bedeutet Aufnahme von Lichtenergie. Verändert sich die Beleuchtung, verändert sich auch das Licht, das die Oberfläche zurückwerfen kann.

Beurteile eine Farbe deshalb immer zusammen mit Lichtquelle, Material und Auge. Beim Mischen von Malfarben werden Lichtanteile unterschiedlich aufgenommen; beim Mischen von Lichtquellen werden Anteile hinzugefügt. Das Strahlenmodell erklärt Wege, während Wellen- und Wahrnehmungsmodelle weitere Eigenschaften ergänzen.

Das gehört zusammen: Lichtweg, Material und Sinneszellen wirken zusammen. Ein vollständiger Farbeindruck entsteht durch physikalische Vorgänge und die Verarbeitung im Nervensystem.

Fachbücher und Quellen stehen auf Seite 7. Die Onlinefassung verlinkt außerdem die passenden Lehrbuchkapitel.

03 | ZUSAMMENHÄNGE VERTIEFEN

Ein Prisma sortiert, Lichtquellen mischen

Aufteilen, addieren oder auswählen?

Prisma
Verschiedene Wellenlängen nehmen unterschiedliche Lichtwege.

Lichtmischung
Mehrere Lichtanteile treffen gemeinsam auf dieselbe Stelle.

Farbige Oberfläche
Bestimmte Anteile werden stärker zurückgeworfen, andere aufgenommen.

Die drei Vorgänge ergänzen sich bei der Erklärung von Farben. Der wahrgenommene Eindruck entsteht jeweils erst zusammen mit Auge und Gehirn.

Ein Prisma und drei farbige Lichtquellen führen zu verschiedenen Beobachtungen. Im Prisma werden vorhandene **Wellenlängen** unterschiedlich stark abgelenkt. Brechung findet an beiden Grenzflächen statt. Bei weißem Licht werden deshalb mehrere Richtungen sichtbar. Wählst du nur einen schmalen Farbanteil, ändert sich seine Richtung ebenfalls, aber es entsteht kein vollständiger Farbfächer. Das Prisma erzeugt die gezeigten Farben nicht aus einer farblosen Substanz. Es verteilt Bestandteile des einfallenden Lichts räumlich. Die einzelnen farbigen Modellstrahlen stehen für ausgewählte Bereiche eines kontinuierlichen Spektrums, nicht für eine Naturgrenze zwischen genau sechs Farben.

Bei der **additiven Mischung** treffen dagegen mehrere Lichtanteile gemeinsam auf dieselbe Stelle. Rot und Grün können zusammen gelb erscheinen. Dieser Eindruck kann dem von Licht eines gelben Wellenlängenbereichs ähneln, obwohl die Zusammensetzung verschieden ist. Der Grund liegt in der Verarbeitung der Antworten der drei Zapfentypen. Für einen Farbeindruck zählt das gemeinsame Antwortmuster, nicht die bloße Anzahl der beteiligten Lichtquellen. Bei Malfarben funktioniert Mischen anders: Pigmente nehmen bestimmte Anteile auf und werfen andere zurück. Deshalb darfst du eine Regel für Bildschirmlicht nicht unverändert auf Wasserfarben übertragen. Frage immer zuerst, ob Lichtanteile hinzugefügt oder durch Material unterschiedlich herausgefiltert werden.

Sichtbares Licht ist nur ein Teil der **elektromagnetischen Strahlung**. An den sichtbaren Bereich schließen sich Infrarot mit längeren und Ultraviolett mit kürzeren Wellenlängen an. Diese Bereiche sieht das menschliche Auge nicht. Ein unsichtbarer Anteil ist deshalb nicht gleichbedeutend mit fehlender Strahlung.

Gelb mit und ohne gelben Lichtanteil
Wähle im Prisma einen einzelnen gelben Farbanteil. Er wird abgelenkt. Stelle anschließend unter „Licht & Farben“ die Mischung „Gelb“ ein: Hier tragen Rot und Grün zum Eindruck bei. Beide Beispiele können ähnlich aussehen, beruhen aber auf einer unterschiedlichen Zusammensetzung des Lichts.

Genau unterscheiden
Häufige Verwechslung: Gelb entsteht immer aus einer einzigen gelben Wellenlänge.
So stimmt es: Gelb kann auch durch eine passende Mischung aus rotem und grünem Licht entstehen. Unterschiedliche Spektren können ähnliche Antworten der Zapfen und damit ähnliche Farbeindrücke auslösen.

Wissen anwenden und weiterdenken

Drei ergänzende Entdeckeraufträge. Erkläre deine Beobachtungen mit den Zusammenhängen aus dem Wissenstext.

1 · Licht & Farben

Ausprobieren: Scrolle innerhalb dieses Bereichs zu „Geradlinige Ausbreitung und Schatten“. Verändere ausschließlich die „Position des Gegenstands“.

Beobachten: Wie verändert sich der Schatten bei gleicher Lichtquelle und gleichem Schirm? Welche beiden Randstrahlen begrenzen ihn?

Erklären: Warum wird der Schatten größer, obwohl sich die Größe des Gegenstands nicht ändert?

Modellgrenze: Das Modell verwendet eine punktförmige Lichtquelle. Halbschatten einer ausgedehnten Quelle werden hier nicht dargestellt.

2 · Brechung

Ausprobieren: Wähle Luft als erstes und Glas als zweites Medium. Klicke „65° ansehen“ und danach „Medien vertauschen“. Vergleiche zusätzlich „Senkrechter Einfall“.

Beobachten: Wann wird der Strahl zum Lot, wann vom Lot weg gebrochen? In welcher Einstellung zeigt die Anzeige Totalreflexion?

Erklären: Welche zwei Bedingungen musst du nennen, um Totalreflexion zu begründen?

Modellgrenze: Brechzahlen sind Näherungen. Die Helligkeiten der Strahlen zeigen keine berechneten Energieanteile; das Modell beschreibt idealisierte Lichtwege.

3 · Prisma & Spektrum

Ausprobieren: Vergleiche „Weißes Licht“ mit einem einzelnen Farbanteil bei gleichem Einfallswinkel. Öffne danach „Licht & Farben“ und wähle „Gelb“.

Beobachten: Wann entsteht ein Farbfächer? Welche zwei Lichtquellen sind bei der gelben Überlappung beteiligt?

Erklären: Wie unterscheiden sich die Aufspaltung im Prisma und die additive Mischung auf dem Bildschirm?

Modellgrenze: Ein Bildschirm stellt Farben mit seinen eigenen Lichtanteilen dar. Die Illustration ersetzt kein reales Spektrum und zeigt nur ausgewählte Wellenlängen im Prisma.

Interaktive Werkstatt öffnen →

Fachliche Quellen und weiterführende Literatur

College Physics 2e