

8 Licht

havo

8.0 Inhoud

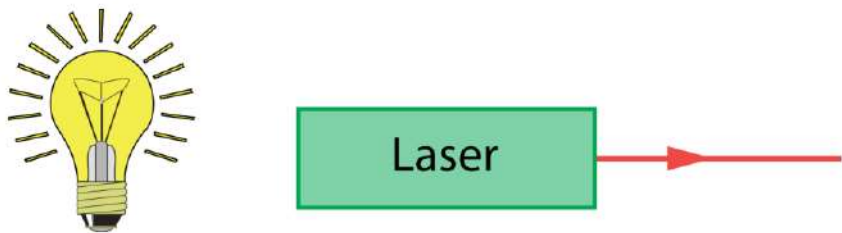
8.1	Voortplanting en weerkaatsing van licht	2
–	Lichtbronnen	2
–	Voortplanting van licht	2
–	Schaduw	2
–	Lichtstralen en lichtbundels	3
–	Reflectie, absorptie en transmissie	4
–	Absorptie van licht	4
–	Weerkaatsing van licht	4
–	De terugkaatsingswet	5
–	Beeldvorming bij een vlakke spiegel	6
–	Reëel en virtueel beeld	7
8.2	Breking van licht	8
–	Breking	8
–	Breking van lucht naar stof en van stof naar lucht	8
–	Breking van lucht naar stof naar lucht	9
–	Brekingsindex	10
–	Brekingsindex voor gassen	10
–	De brekingswet van Snellius	10
–	De grenshoek	12
–	Het prisma	14
–	De regenboog	15

8.1 Voortplanting en weerkaatsing van licht

Lichtbronnen

Licht ontstaat in een lichtbron, zoals de zon, vuur en lampen. Licht dat door deze bronnen wordt uitgezonden kun je met je ogen waarnemen. Als een lichtbron het licht in alle richtingen uitzendt, kun je die gebruiken om bijvoorbeeld een kamer te verlichten. Het uitgestraalde licht bestaat altijd uit één of meerdere kleuren. Een speciaal type lichtbron is een laser. Het licht uit een laser is gebundeld in één smalle gerichte lichtstraal. Omdat het laserlicht zich niet verspreidt kun je er geen kamer mee verlichten.

Figuur 1 Licht uit een gloeilamp verspreidt zich over de ruimte. Een laser geeft een smalle gerichte straal licht.



Voortplanting van licht

Alleen licht dat in je oog komt kun je zien. In een bioscoop zie je de lichtbundel die van de projector naar het scherm gaat nauwelijks. Wat je wel ziet is het licht dat op het scherm terugkaatst en in je oog komt. Als je goed kijkt zie je ook de lichtbundel uit de projector, omdat er stofdeeltjes zijn die ervoor zorgen dat een beetje licht in je oog wordt gekaatst. Hoe het weerkaatsen van licht in zijn werk gaat leer je verderop in deze paragraaf.

Er zijn twee mogelijkheden waardoor licht in je oog kan komen

- door rechtstreeks in een lichtbron te kijken
- doordat een voorwerp het licht in je oog kaatst

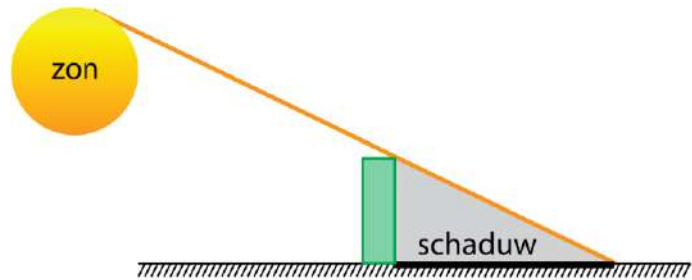
Licht verplaatst zich met een grote snelheid. Deze snelheid speelt in belangrijke rol in de natuurkunde, omdat het de grootste snelheid is die een voorwerp kan krijgen. De lichtsnelheid in vacuüm is een natuurconstante en heeft als symbool de letter c . In vacuüm is de lichtsnelheid $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. Licht verplaatst zich altijd in een rechte lijn, behalve als het bij het grensvlak van twee stoffen wordt gebroken. In de volgende paragraaf leer je hier meer over.

In vacuüm verplaatst licht zich in een rechte lijn met snelheid c .

$$c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m / s}$$

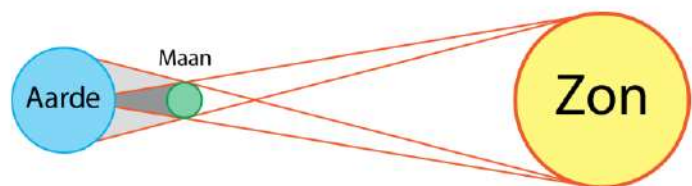
Schaduw

Als er tussen de zon en de straat een ondoorzichtig voorwerp, zoals een muur of jijzelf, staat kan het zonlicht niet meer rechtstreeks op de straat vallen, waardoor er een donkere plek ontstaat, de schaduw. De schaduw is meestal niet helemaal donker, omdat andere voorwerpen in de buurt een beetje licht op de donkere plek weerkaatsen.



Figuur 2 Achter een ondoorzichtig voorwerp ontstaat een schaduw.

Een **zonsverduistering** of **eclips** ontstaat als de maan tussen de zon en de aarde staat. Op plaatsen waar de hele zon achter de maan staat is er sprake van een totale zonsverduistering. Daar bevindt zich de **kernschaduw** van de zon. Op plaatsen waar slechts een gedeelte van de zon achter de maan staat is nog een deel van de zon zichtbaar. De schaduw is daar minder diep en wordt de **halfschaduw** genoemd.



Figuur 3 Bij een zonsverduistering staat de maan tussen de aarde en de zon in.

Lichtstralen en lichtbundels

Een **lichtstraal** is een smalle gerichte straal licht, zoals door een laser wordt uitgezonden. Een **lichtbundel** is een verzameling lichtstralen die ongeveer dezelfde richting hebben.

Een **evenwijdige** lichtbundel is een lichtbundel die gedurende zijn weg precies even breed blijft. De lichtstralen waaruit een evenwijdige lichtbundel is samengesteld lopen parallel aan elkaar. Het licht uit een laser is altijd evenwijdig.

Een **divergerende** lichtbundel is een lichtbundel die gedurende zijn weg steeds breder wordt. De lichtstralen gaan van elkaar af. Alle lichtbronnen, behalve lasers, zenden een divergerende lichtbundel uit.

Een **convergerende** lichtbundel is een lichtbundel die gedurende zijn weg steeds smaller wordt, door een punt gaat, en daarna weer breder wordt. De lichtstralen gaan naar elkaar toe. Een convergerende lichtbundel kun je maken door een lens voor een lichtbron te plaatsen.



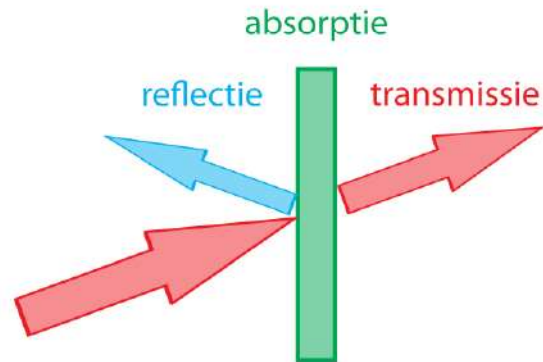
Figuur 4 Lichtbundels kunnen evenwijdig zijn, divergerend (van elkaar af) of convergerend (naar elkaar toe).

Reflectie, absorptie en transmissie

Licht dat op een stof valt wordt in drie delen gesplitst.

een deel wordt weerkaatst (reflectie)
een deel wordt opgenomen (absorptie)
een deel wordt doorgelaten (transmissie)

Spiegels en sneeuw weerkaatsen vrijwel al het opvallende licht. Zwarte voorwerpen absorberen al het opvallende licht. Glas laat het meeste licht door. Bij doorzichtige voorwerpen is er een combinatie van reflectie, absorptie en transmissie.

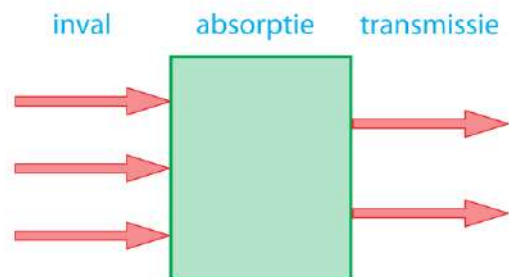


Figuur 5 Reflectie, absorptie en transmissie.

Absorptie van licht

Een lichtbundel die door een stof gaat wordt steeds zwakker. Dat komt omdat het licht door de stof wordt opgenomen, het licht wordt **geabsorbeerd** en verdwijnt. Bij absorptie wordt lichtenergie omgezet in warmte.

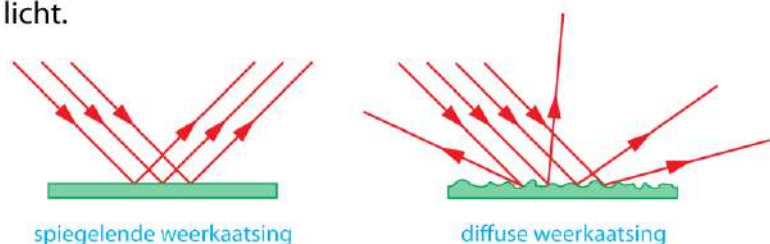
De meeste stoffen zijn niet transparant en laten geen licht door, zoals metalen, kunststoffen en hout. Andere stoffen, zoals glas en speciale plasticsoorten, zijn juist erg doorzichtig en laten vrijwel al het licht door. Er zijn ook stoffen die gedeeltelijk transparant zijn. Van het opvallende licht wordt een gedeelte geabsorbeerd en wordt de rest doorgelaten. Binnen in de stof wordt het licht steeds zwakker.



Figuur 6 Licht dat wordt geabsorbeerd wordt binnen in de stof steeds zwakker.

Weerkaatsing van licht

Schijn je met een evenwijdige lichtbundel op een voorwerp met een glad oppervlak, dan weerkaatst een deel van de opvallende lichtstralen onder dezelfde hoek. Dit heet **spiegelende weerkaatsing**. Heeft het voorwerp een ruw oppervlak, dan worden de lichtstralen onder verschillende hoeken weerkaatst. Dit heet **diffuse weerkaatsing**. Hoeveel licht wordt gereflecteerd kan sterk variëren. Metalen weerkaatsen veel licht, donkergekleurde voorwerpen weerkaatsen weinig licht.



Figuur 7 Een evenwijdige lichtbundel wordt weerkaatst door een voorwerp.

De terugkaatsingswet

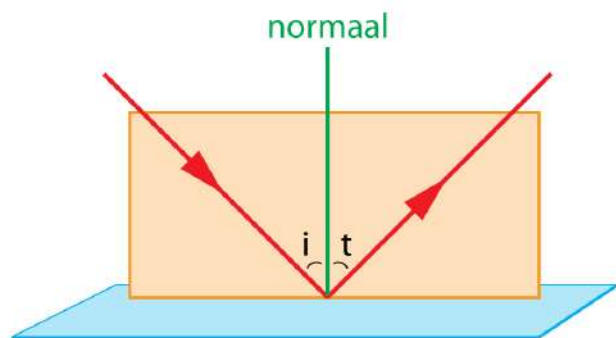
Voor een lichtstraal die wordt weerkaats geldt de **terugkaatsingswet**. In figuur 8 zie je hoe een lichtstraal wordt weerkaatst.

De hoek van inval is gelijk aan de hoek van terugkaatsing.

$$\angle i = \angle t$$

- Hoeken i en t worden gemeten ten opzichte van de normaal.
- De invallende en weerkaatste lichtstralen liggen in één vlak.
- Dit vlak staat loodrecht op het spiegelende oppervlak.

Om de hoek van inval en terugkaatsing te bepalen moet je eerst de **normaal** tekenen. In figuur 8 is de normaal getekend met een groene lijn.



Figuur 8 Terugkaatsing. hoek i = hoek t

De normaal is een denkbeeldige lijn door het punt waar de lichtstraal op het oppervlak valt en heeft een hoek van 90° met het oppervlak.

De hoek van inval (hoek i) is de hoek tussen de normaal en de invallende lichtstraal.

De hoek van terugkaatsing (hoek t) is de hoek tussen de normaal en de weerkaatste lichtstraal.

Omdat de beweging van het licht niet eenvoudig kan worden bepaald weet je alleen van welke kant het licht komt als je weet waar de lichtbron staat. Vandaar dat je met een pijltje de bewegingsrichting van het licht moet aangeven. Het is altijd zo dat licht ook de andere kant op zou kunnen gaan. Dus als je weet waar een lichtstraal aankomt, kun je door de lichtstraal terug te sturen bepalen welk pad het licht heeft genomen.

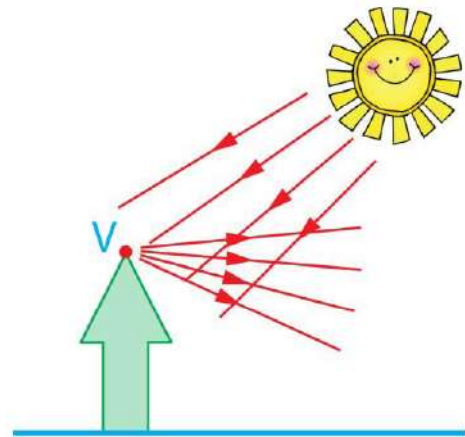
De richting waarin het licht beweegt moet je aangeven met een pijltje in de lichtstraal.

De bewegingsrichting van een lichtstraal mag worden omgekeerd.

Beeldvorming bij een vlakke spiegel

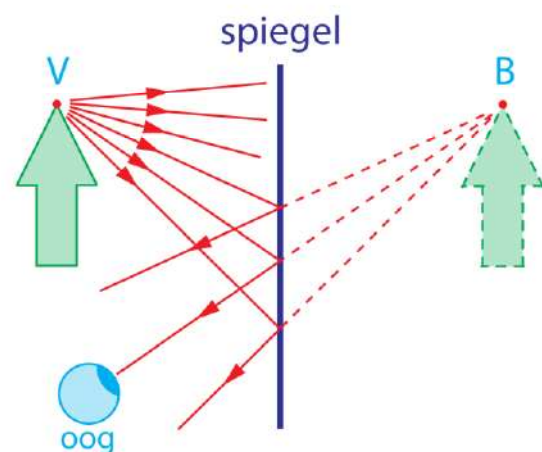
Een voorwerp kan alleen in een spiegel worden waargenomen als het weerkaatste licht in het oog komt. Een **voorwerpspunt** is een punt op het voorwerp. Dit punt wordt bestraald door een lichtbron en weerkaatst het licht in alle richtingen. Het voorwerpspunt gedraagt zich daarom als een divergerende lichtbron.

Figuur 9 Een voorwerpspunt V is een punt op het voorwerp en fungeert als divergente lichtbron.



Als licht, afkomstig van een voorwerpspunt, op een spiegel valt geldt voor iedere lichtstraal de terugkaatsingwet. Na terugkaatsing zijn de lichtstralen net zo divergent als ervoor, maar nu komen ze uit een andere richting. Voor een waarnemer die de weerkaatste lichtbundel ziet lijkt het alsof het voorwerp zich achter de spiegel bevindt. Het waargenomen beeld is een **virtueel beeld**, want in werkelijkheid bevindt het voorwerp zich niet achter maar vóór de spiegel. Zie figuur 10.

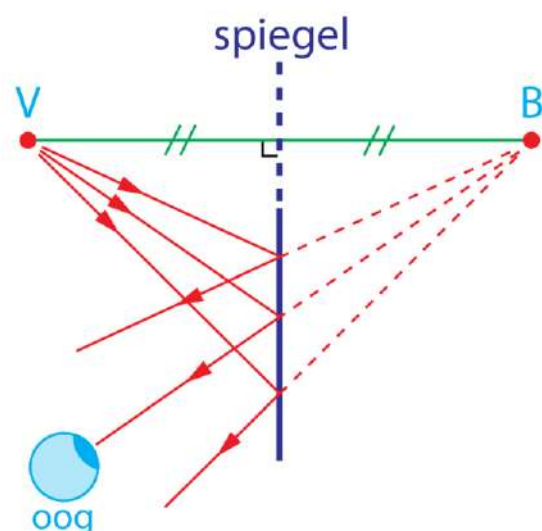
De plaats van het beeldpunt kun je vinden door de teruggekaatste lichtstralen te verlengen tot achter de spiegel. Als lichtstralen worden verlengd geven we dat aan met een **gestreepte lijn**, zodat duidelijk is dat het geen echte lichtstralen zijn. Het punt waar de verlengde lichtstralen achter de spiegel samenkomen is het **beeldpunt B**. Het spiegelbeeld kun je vinden door van minimaal twee voorwerpspunten het beeldpunt te bepalen.



Figuur 10 Een virtueel beeld achter een spiegel.

Zoals je in figuur 11 ziet kun je bij een vlakke spiegel het beeldpunt ook vinden door eerst de spiegel te verlengen en daarna een lijn te tekenen door het voorwerpspunt, loodrecht op de spiegel. De afstand van het beeldpunt tot de spiegel is even groot als de afstand van het voorwerpspunt tot de spiegel.

Figuur 11 Het construeren van teruggekaatste lichtstralen bij een vlakke spiegel.



Het virtuele beeld ligt even ver achter de spiegel als het voorwerp vóór de spiegel.

Om de loop van de lichtstralen uit voorwerpspunt V te bepalen moet je eerst het beeldpunt B achter de spiegel bepalen. Als je B gevonden hebt teken je rechte lijnen tussen B en het oog. Achter de spiegel zijn de lijnen gestreept, want het zijn geen lichtstralen. Daarna teken je lichtstralen tussen V en de spiegel. Om het spiegelbeeld te construeren volg je deze procedure voor ten minste twee punten die gekozen zijn op de rand van het voorwerp.

Construeer het spiegelbeeld:

- verleng zo nodig de spiegel met een hulplijn
- teken de lijn door V loodrecht op de spiegel
- B ligt op deze lijn even ver achter de spiegel als V vóór de spiegel ligt
- teken uit B: lijnen door de spiegel, achter gestreept, vóór met pijltje
- teken uit V: lichtstralen naar het snijpunt van de lijnen uit B met de spiegel
- kies van het voorwerp tenminste twee punten op de rand

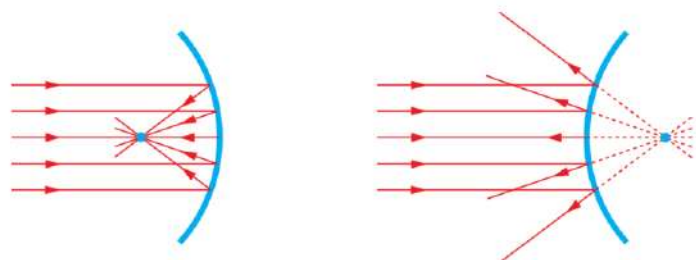
Reëel en virtueel beeld

Bij een vlakke spiegel verandert de divergentie van de lichtbundel niet. Er ontstaat een **virtueel beeld** achter de spiegel, dat even groot is als het reële voorwerp vóór de spiegel. Er bestaan ook bolle spiegels en holle spiegels. Deze spiegels veranderen wél de divergentie van een lichtbundel. De divergentie wordt vergroot door een bolle spiegel en verkleind door een holle spiegel. Als de kromming van een holle spiegel groot genoeg is wordt een divergerende lichtbundel convergent. Op de plaats waar de lichtstralen samenkomen ontstaat nu een **reëel beeld**. Als je op deze plaats een scherm zet zie je op het scherm een afbeelding van het voorwerp.

**Bij een reëel beeld komen lichtstralen afkomstig uit één punt weer samen.
Bij een virtueel beeld komen lichtstralen afkomstig uit één punt niet meer samen.**

In figuur 12 zie je bolvormige spiegels waar een evenwijdige lichtbundel op valt. Bij een holle spiegel is de weerkaatste lichtbundel convergent en gaan de lichtstralen door één punt. Bij een bolle spiegel is de weerkaatste lichtbundel divergent. Verleng je de lichtstralen achter de spiegel dan gaan de lijnen door één punt.

Figuur 12 Links: een evenwijdige lichtbundel op een holle spiegel. Rechts: een evenwijdige lichtbundel op een bolle spiegel.

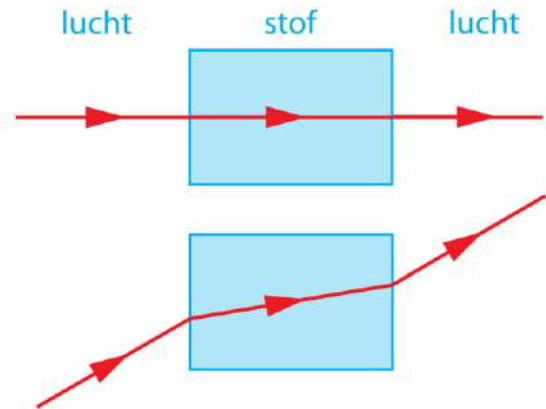


8.2 Breking van licht

Breking

Op het grensvlak van twee doorzichtige stoffen verandert een schuin invallende lichtstraal van richting. Dit heet het **breken** van licht. Alleen licht dat schuin invalt wordt gebroken, loodrecht invallend licht breekt niet. Zie figuur 13.

Figuur 13 Licht dat onder een hoek invalt wordt gebroken en verandert van richting.



Breking is het veranderen van de richting van licht op het grensvlak van twee doorzichtige stoffen.

Als je breking van licht nader wilt onderzoeken moet je een afspraak maken over het meten van de hoek tussen een lichtstraal en een oppervlak. Net als bij spiegels is de afspraak dat de hoeken worden gemeten ten opzichte van de normaal.

De normaal is de denkbeeldige lijn, loodrecht op het grensvlak, door het punt waar de lichtstraal het grensvlak passeert.

De hoek van inval i is de hoek tussen normaal en de invallende lichtstraal.

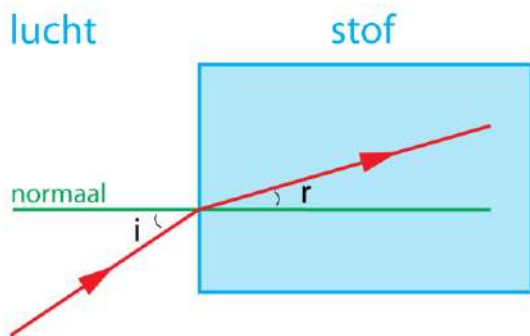
De hoek van breking r is de hoek tussen normaal en de gebroken lichtstraal. (r komt van "refractie" wat een ander woord is voor breking)

Breking van lucht naar stof en van stof naar lucht

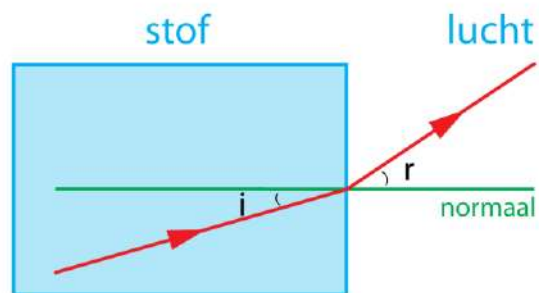
Als een lichtstraal vanuit de lucht invalt op een stof, dan wordt de straal gebroken waarbij de hoek van breking kleiner is dan de hoek van inval. Zie figuur 14. Als een lichtstraal uit een stof invalt op lucht, dan wordt de straal gebroken waarbij de hoek van breking groter is dan de hoek van inval. Zie figuur 15.

Breking van lucht naar stof → **hoek r is kleiner dan hoek i**
Licht breekt naar de normaal toe.

Breking van stof naar lucht → **hoek r is groter dan hoek i**
Licht breekt van de normaal af.



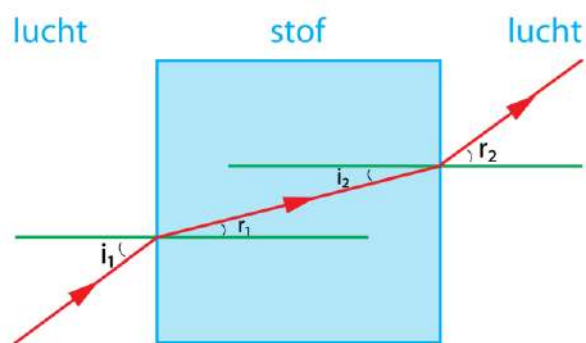
Figuur 14 Licht gaat van lucht naar stof. Hoek $r < \text{hoek } i$.



Figuur 15 Licht gaat van stof naar lucht. Hoek $r > \text{hoek } i$.

Breking van lucht naar stof naar lucht

Een lichtstraal van lucht naar stof naar lucht wordt eerst gebroken bij het grensvlak lucht–stof (grensvlak 1) en daarna opnieuw bij het grensvlak stof–lucht (grensvlak 2). Als de twee grensvlakken evenwijdig zijn is de lichtstraal die de stof verlaat evenwijdig aan de lichtstraal die de stof ingaat. Hieruit kun je concluderen dat de breking van stof naar lucht exact tegengesteld is aan de breking van lucht naar stof.



Figuur 16 Licht passeert eerst het grensvlak tussen lucht en stof (breking 1) en daarna het grensvlak tussen stof en lucht (breking 2).

lucht – stof $r_1 < i_1$

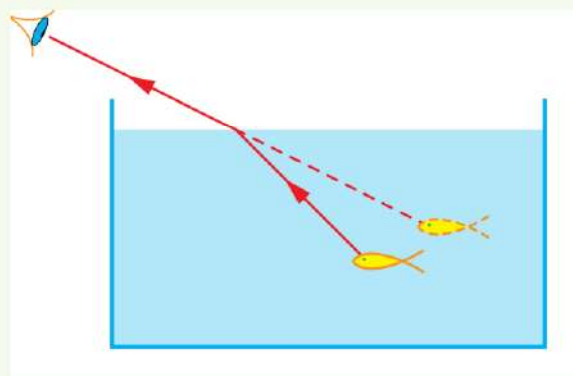
stof – lucht $r_2 > i_2$

r_1 en i_2 zijn Z-hoeken $r_1 = i_2$

VOORBEELD

kijken naar voorwerpen onder water

Je ziet een vis die onder water zwemt, zie figuur 17. Omdat het licht bij het grensvlak van lucht en water wordt gebroken zie je de vis op een andere plaats dan waar hij is. Je ziet de gestreepte vis, want daar lijkt het licht vandaan te komen. Maar de vis zit in werkelijkheid dieper onder water en is dichterbij.



Figuur 17

Brekingsindex

Het breken van licht kun je begrijpen door aan te nemen dat licht een golf is waarvan de snelheid binnen in een doorzichtige stof kleiner is dan de lichtsnelheid in vacuüm. Als licht door een stof beweegt heeft het altijd een lagere snelheid dan $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. Dit komt omdat het licht onderweg atomen tegenkomt, waardoor de lichtgolven worden afgeremd. In vacuüm zijn er geen atomen en bereikt het licht zijn maximum snelheid. Zo verplaatst licht zich door glas met een snelheid van $c/1,5 = 2,0 \cdot 10^8$ m/s. In water is de lichtsnelheid $c/1,3 = 2,3 \cdot 10^8$ m/s. Het getal waarmee je c moet delen (1,5 voor glas, 1,3 voor water, etc.) om de snelheid van licht in een stof te berekenen is de brekingsindex n_{stof} van de stof. Iedere stof heeft zijn eigen brekingsindex.

De lichtsnelheid in vacuüm is $c = 3,0 \cdot 10^8$ m/s. De snelheid van licht in een stof is c / n_{stof} . Het getal n_{stof} is de brekingsindex van de stof en heeft geen eenheid. De brekingsindex is afhankelijk van de kleur van het licht.

Brekingsindex voor gassen

In een gas zijn er per kubieke meter maar weinig atomen. Licht dat door gas beweegt wordt daarom nauwelijks vertraagd. De brekingsindex voor gassen is daarom niet veel groter dan 1. In de meeste gevallen mogen we de brekingsindex voor een gas op 1 stellen.

- $n_{\text{helium}} = 1,000035$
- $n_{\text{lucht}} = 1,000292$

VOORBEELD de snelheid van licht in water

De brekingsindex van water is 1,330 voor rood licht en 1,337 voor blauw licht.

Beredeneer of blauw licht sneller of langzamer gaat dan rood licht.

- de brekingsindex voor blauw licht is groter dan voor rood licht
- voor blauw licht is de vertragsingsfactor groter
- blauw licht gaat in water langzamer dan rood licht

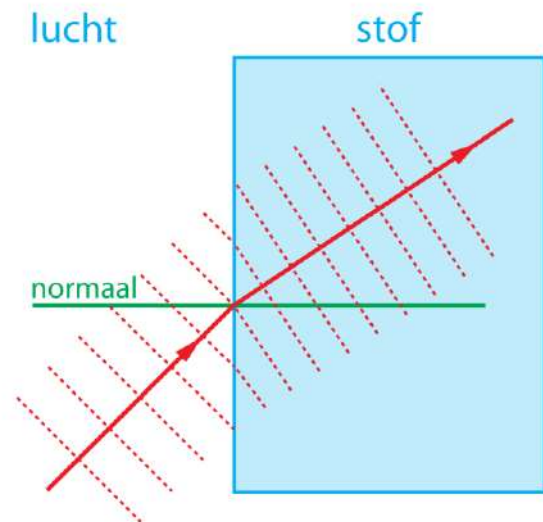
De brekingswet van Snellius

Het breken van licht aan het grensvlak van stof A en stof B wordt veroorzaakt door de verschillende snelheden waarmee het licht door A en B gaat. Als de lichtsnelheid in A groter is dan in B is hoek i groter dan hoek r en breekt het licht naar de normaal toe. In het omgekeerde geval is hoek i kleiner dan hoek r breekt het licht van de normaal af.

Om te begrijpen waarom dit zo is moet je licht opvatten als een golf. Bij watergolven zien we toppen en dalen die zich over het wateroppervlak verplaatsen. Lichtgolven gedragen zich net als watergolven. In figuur 18 zie je een lichtstraal die aankomt door lucht en schuin op een stof valt. Loodrecht op de lichtstraal zijn gestreepte lijnen getekend. Deze lijnen

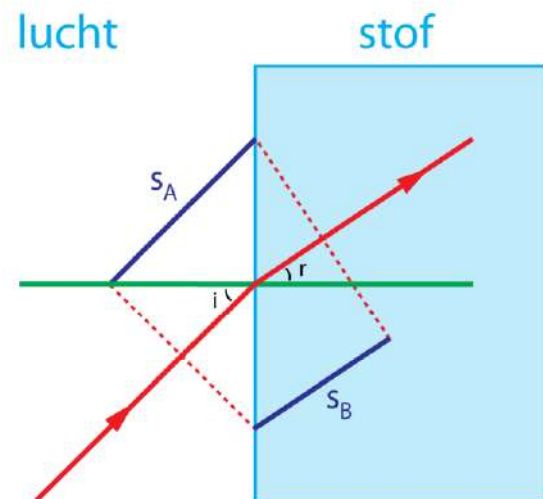
stellen de toppen van de lichtgolven voor. De rechterkant van de lichtgolf passeert als eerste het grensvlak tussen lucht en stof. Achter het grensvlak wordt de rechterkant van de golf vertraagd, terwijl de linkerkant van de golf zonder vertraging verdergaat. Nadat ook de linkerkant van de lichtgolf het grensvlak is gepasseerd gaat het licht verder in de stof. Zoals je ziet in figuur 18, is de richting van de lichtstraal bij het passeren van het grensvlak veranderd.

Figuur 18 Een lichtstraal verandert van richting door het verschil in snelheid.



Om dit verder te onderzoeken zie je in figuur 19 dezelfde lichtstraal. Op $t=0$ passeert de rechterkant van de lichtgolf het grensvlak. Na Δt seconde passeert de linkerkant van de golf het grensvlak. In het tijdsinterval Δt heeft de linkerkant van de golf afstand S_A afgelegd en de rechterkant afstand S_B .

Figuur 19 Een lichtstraal verandert van richting omdat de rechterkant van de golf in tijdsinterval Δt een kleinere afstand aflegt dan de linkerkant van de golf.



In 1621 ontdekt Willibrord Snel van Royen (Leiden, 1580 – 1626) de wet voor de breking van licht. Deze wet staat nu bekend als de brekingswet van Snellius. Zeshonderd jaar eerder werd deze wet ook al ontdekt in de Arabische wereld door Ibn Sahl (Bagdad, 940 – 1000) en Hasan Ibn al-Haytham (Cairo, 965 – 1040), maar hun werk was in de westerse wereld niet bekend.

Licht gaat van stof A naar stof B.

$$n_i \cdot \sin i = n_r \cdot \sin r$$

- n_i is de brekingsindex van stof A van de invallende lichtstraal
- n_r is de brekingsindex van stof B van de gebroken lichtstraal
- $\sin i$ is de sinus van de hoek van inval
- $\sin r$ is de sinus van de hoek van breking.

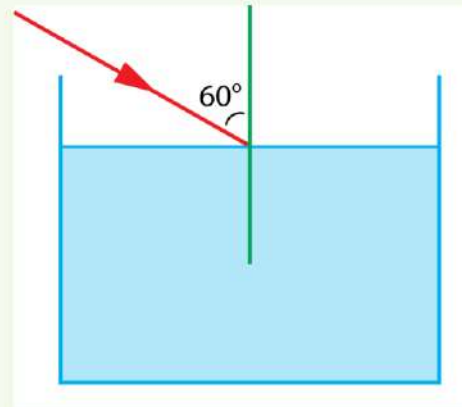
Deze wet geldt altijd. Als één van de stoffen een gas is vul je voor de brekingsindex 1 in.

VOORBEELD breking van lucht naar water

Een rode lichtstraal komt onder een hoek van 60° in een aquarium. Zie figuur 20.

Bereken de hoek van breking.

- $\angle i = 60^\circ$
- lucht $n_{\text{lucht}} = 1$ | rood licht $n_{\text{water}} = 1,330$
- $n_i \cdot \sin i = n_r \cdot \sin r$
- $1 \cdot \sin 60 = 1,330 \cdot \sin r$
- $\sin r = \frac{1 \cdot \sin 60}{1,330} = 0,65115$
- $r = \sin^{-1}(0,65115) = 40,628 = 41^\circ$



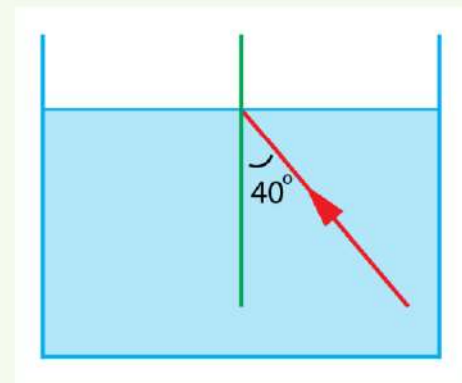
Figuur 20 lucht → water

VOORBEELD breking van water naar lucht

Een rode lichtstraal valt onder een hoek van 40° op het grensvlak van water naar lucht. Zie figuur 21.

Bereken de hoek van breking.

- $\angle i = 40^\circ$
- lucht $n_{\text{lucht}} = 1$ | rood licht $n_{\text{water}} = 1,330$
- $n_i \cdot \sin i = n_r \cdot \sin r$
- $1,330 \cdot \sin 40 = 1 \cdot \sin r$
- $\sin r = \frac{1,330 \cdot \sin 40}{1} = 0,85491$
- $r = \sin^{-1}(0,85491) = 58,7495 = 59^\circ$



Figuur 21 water → lucht

De grenshoek

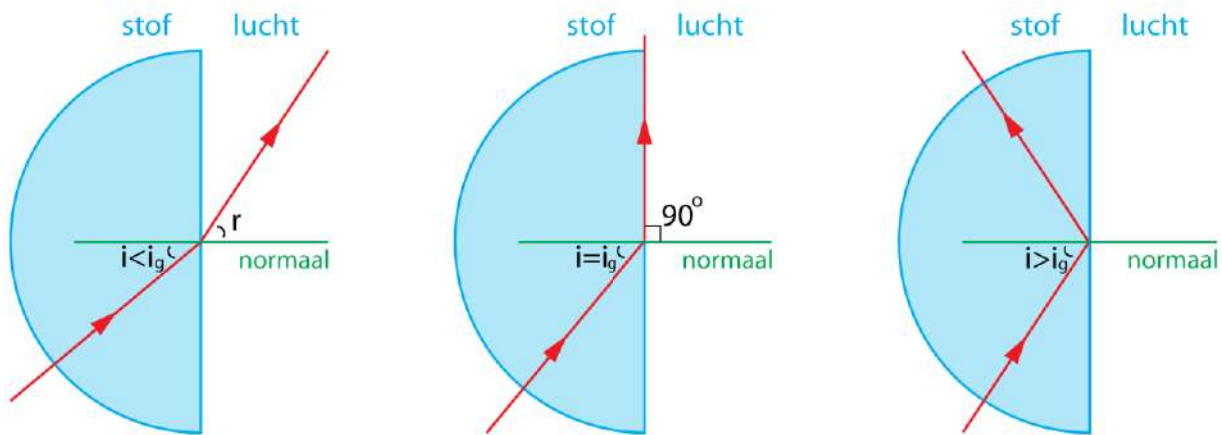
Als licht van een stof met een grote brekingsindex naar een stof met een kleinere brekingsindex (zoals lucht) gaat is de hoek van breking altijd groter dan de hoek van inval. Het licht breekt van de normaal af. Stel we hebben een stof met een brekingsindex van 1,5 en het licht gaat van deze stof naar lucht. Dan vinden we het resultaat in de tabel hiernaast.

Bij een hoek van inval net boven de $41,8$ graden wordt de hoek van breking 90 graden. Maak je de hoek nog groter, bijvoorbeeld $41,9$ graden, dan kan de hoek van breking niet meer worden berekend en krijg je een foutmelding ERROR.

hoek i ($^\circ$)	hoek r ($^\circ$)
40,0	74,6
40,5	76,9
41,0	79,8
41,5	83,7
41,8	88,9
41,9	error
42,0	error

De grenshoek i_g is hoek van inval waarbij de hoek van breking 90 graden is.

Bij een hoek i groter dan de grenshoek is er geen wiskundige oplossing voor de wet van Snellius. Het licht kan niet breken en kan dus het grensvlak tussen de stof A en stof B niet passeren. Het licht wordt daarom teruggekaatst. Dit heet **totale terugkaatsing**. In figuur 22 zie je wat er gebeurt.



Figuur 22 Bij het grensvlak wordt de lichtstraal gebroken of weerkaatst.

- de lichtstraal wordt gebroken als $i < i_g$
- de lichtstraal wordt weerkaatst als $i > i_g$
- voor $i = i_g$ is de brekingshoek 90°

Bij een invalshoek groter dan de grenshoek wordt het licht teruggekaatst en geldt de terugkaatsingswet.

Als de hoek van inval kleiner is dan de grenshoek wordt de lichtstraal gebroken. Is de hoek van inval groter dan de grenshoek, dan wordt de lichtstraal niet gebroken maar teruggekaatst. Voor een hoek van inval gelijk aan de grenshoek is de hoek van breking 90° .

Met de wet van Snellius $n_i \cdot \sin i = n_r \cdot \sin r$ kun je de grenshoek berekenen. n_i is de brekingsindex van de stof waar de lichtstraal uitkomt en n_r is de brekingsindex van de stof waar de lichtstraal naartoe gaat. Als de lichtstraal naar lucht gaat is n_r gelijk aan 1. Verder vul je voor hoek r 90° in omdat bij de grenshoek i_g de hoek van breking exact 90° is.

VOORBEELD breking van water naar lucht

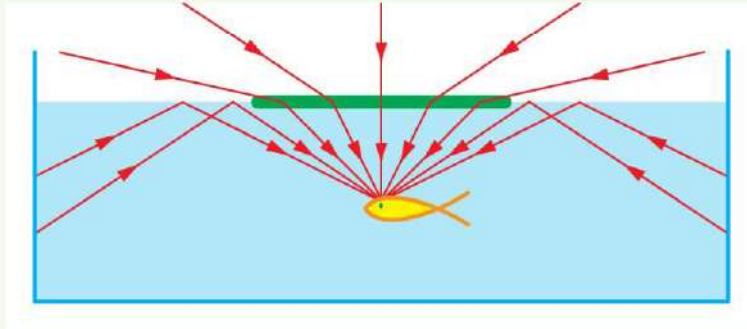
Een rode lichtstraal valt op het grensvlak van water naar lucht.

Bereken de grenshoek.

- rood licht $n_{\text{water}} = 1,330$ | lucht $n_{\text{lucht}} = 1$
- $n_i \cdot \sin i = n_r \cdot \sin r$
- $1,330 \cdot \sin i_g = 1 \cdot \sin 90^\circ \rightarrow \sin i_g = \frac{1 \cdot \sin 90^\circ}{1,330} = 0,75188$
- $i_g = \sin^{-1} 0,75188 = 48,753 = 49^\circ$

VOORBEELD vis onder water

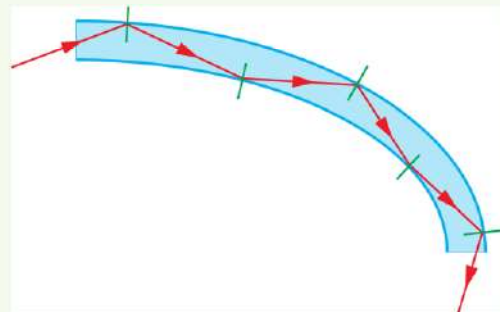
Een vis zwemt onder water en kijkt naar boven. Als de hoek waarmee hij tegen het wateroppervlak kijkt groter is dan de grenshoek ziet hij de bodem. Is de hoek kleiner dan de grenshoek dan ziet hij wat zich boven het water bevindt. De groene streep geeft het gebied aan waarbij de kijkhoek kleiner is dan de grenshoek. Zie figuur 23.



Figuur 23

VOORBEELD glasvezelkabel

Glasvezelkabels (glasfibers) worden gebruikt om informatie met hoge snelheid te versturen, bijvoorbeeld voor internet. In een glasvezelkabel zit een lichtstraal opgesloten, omdat de hoek van inval steeds groter is dan de grenshoek. De lichtstraal wordt daarom steeds weerkaatst. Pas aan het einde van de kabel is de invalshoek kleiner dan de grenshoek en kan het licht de glasfiber verlaten.



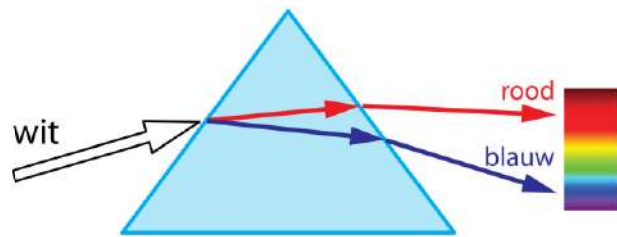
Figuur 24

Het prisma

Een prisma is een driehoek gemaakt uit transparant materiaal. Licht dat onder een hoek op de zijkant op een prisma valt, wordt naar de normaal toe gebroken. Bij het prisma–lucht grensvlak wordt het licht opnieuw gebroken, dit keer van de normaal af. In tegenstelling tot een rechthoek heeft een prisma geen evenwijdige vlakken. De uittrekkende lichtstraal is daarom niet evenwijdig aan de invallende lichtstraal. De richtingsverandering bij het eerste grensvlak wordt versterkt door de richtingsverandering bij het tweede grensvlak van het prisma. Licht wordt hierdoor twee keer in dezelfde richting gebroken. Zie figuur 25.

Als er een bundel wit licht op een prisma valt zie je achter het prisma een band van kleuren, het **kleurenspectrum**. Dit komt omdat wit licht uit meerdere kleuren bestaat én omdat voor iedere kleur de brekingsindex een beetje anders is. De brekingsindex voor

blauw licht is groter dan die voor rood licht, waardoor het blauwe licht meer wordt gebroken. Het splitsen van wit licht in het kleurenspectrum heet **kleurschifting** of **dispersie**.

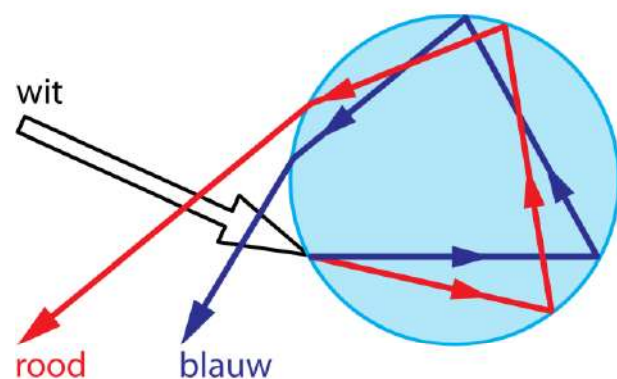


Figuur 25

De regenboog

Als regen en zonlicht tegelijkertijd aanwezig zijn kan er een regenboog ontstaan. De waterdruppels breken het witte zonlicht. In een regendruppel wordt het licht eerst gebroken, dan twee keer weerkaatst en vervolgens opnieuw gebroken. Hierdoor treedt kleurschifting op. Zie figuur 26.

Net als bij een prisma wordt het blauwe licht meer gebroken dan het rode licht. Het rode licht dat ons oog bereikt is afkomstig van regendruppels die hoog in de lucht zijn. Het blauwe licht is afkomstig van regendruppels die lager zijn. Vandaar dat de rode band bovenaan de regenboog te zien is en de blauwe band onderaan. Omdat bij de vorming van de regenboog het zonlicht door regendruppels wordt weerkaatst is een regenboog alleen met de zon in de rug te zien.



Figuur 26