

8 Licht

8.0 Overzicht

8.1 Voortplanting en weerkaatsing van licht

- Wat zijn lichtbronnen?
- Waarom kun je met een laser geen kamer verlichten?
- Hoe kan licht in je oog komen?
- Wat is het symbool voor de lichtsnelheid?
- Hoe ontstaat schaduw?
- Wat is het verschil tussen de kernschaduw en de halfschaduw?
- Wat zijn evenwijdige, divergerende en convergerende lichtbundels?
- Wat is reflectie, absorptie en transmissie?
- Wat is het verschil tussen spiegelende en diffuse weerkaatsing?
- Hoe luidt de terugkaatsingswet?
- Hoe moet je de normaal tekenen?
- Hoe teken je lichtstralen die door een vlakke spiegel worden weerkaatst?
- Waarom is het beeld dat je in de spiegel ziet virtueel?
- Hoe worden lichtstralen door een holle of bolle spiegel weerkaatst?

8.2 Breking van licht

- Wat is breking van licht?
- Wat zijn de hoek van inval en de hoek van breking en hoe meet je die?
- Hoe moet je de normaal tekenen?
- Hoe breekt het licht als het van lucht naar stof gaat?
- Hoe breekt het licht als het van stof naar lucht gaat?
- Wat is de brekingsindex?
- Waarom is de brekingsindex van gassen ongeveer gelijk aan 1?
- Hoe luidt de wet van Snellius?
- Hoe vereenvoudigt de wet van Snellius als licht van lucht naar stof of van stof naar lucht gaat?
- Wat is de grenshoek en wat is het symbool van de grenshoek?
- Wanneer treedt er totale terugkaatsing op?
- Hoe bereken je de grenshoek uit de brekingsindex?
- Waarom splitst een prisma wit licht in kleuren?
- Hoe ontstaat de regenboog?

8.3 Lenzen

- Wat is de hoofdas van een lens en wat zijn bijassen?
- Waaraan zie je of een lens positief of negatief is?
- Wat is het brandpunt van een lens en met welke letter geef je dit punt aan?
- Wat is de brandpuntsafstand en welk symbool gebruik je hiervoor?
- Wat zegt de brandpuntsafstand over de sterkte van een lens?

- Wat is het brandvlak van een lens en hoe bepaal je waar dit vlak ligt?
- Hoe kun je bij een positieve lens het pad van een willekeurige lichtstraal bepalen als je de ligging van de brandpunten weet?
- Hoe gaat dit bij een negatieve lens?

8.4 De plaats van het beeld construeren

- Wat is een voorwerpspunt en wat is een beeldpunt en hoe geef je deze punten aan?
- Wat is de voorwerpsafstand en wat is de beeldafstand en welke symbolen hebben ze?
- Wanneer ontstaat er bij een positieve lens een reëel beeld en wanneer een virtueel beeld?
- Hoe teken je de constructiestralen bij een positieve lens?
- Hoe teken je de constructiestralen bij een negatieve lens?

8.5 De plaats van het beeld berekenen

- Wat is de lineaire vergroting en wat is het symbool hiervan?
- Hoe bereken je de lineaire vergroting?
- Hoe bereken je de lineaire vergroting uit de beeld- en de voorwerpsafstand?
- Hoe luidt de lensformule?
- Hoe moet je de lensformule invullen bij een positieve lens?
- Hoe moet je de lensformule invullen bij een negatieve lens?
- Wanneer gebruik je een negatief getal voor b in de lensformule?
- Wat is de sterkte van een lens en wat is de eenheid van de lenssterkte?
- Hoe bereken je de lenssterkte uit de brandpuntsafstand?
- Hoe bereken je v en b als je alleen f en N weet?
- Wat is een loep?

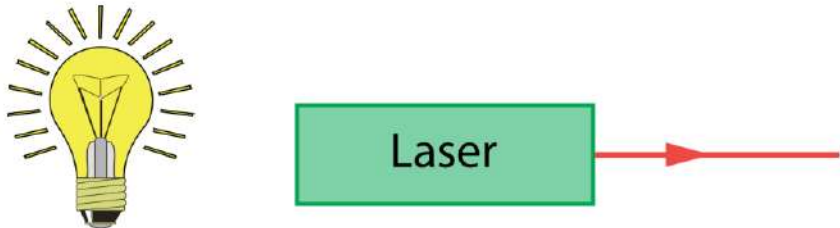
8.1 Voortplanting en weerkaatsing van licht

Lichtbronnen

Licht ontstaat in een lichtbron. De zon, vuur en lampen zijn lichtbronnen. Het licht dat door deze bronnen wordt uitgezonden kan met het oog worden waargenomen. Zendt een lichtbron het licht in alle richtingen uit, dan kun je hem gebruiken om bijvoorbeeld een kamer te verlichten. Het uitgestraalde licht bestaat altijd uit één of meerdere kleuren. Zonlicht is wit, vuur is meestal geel. Met neonlampen en LED-lampen kan iedere kleur van de regenboog worden gemaakt.

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 maximumsnelheid 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.

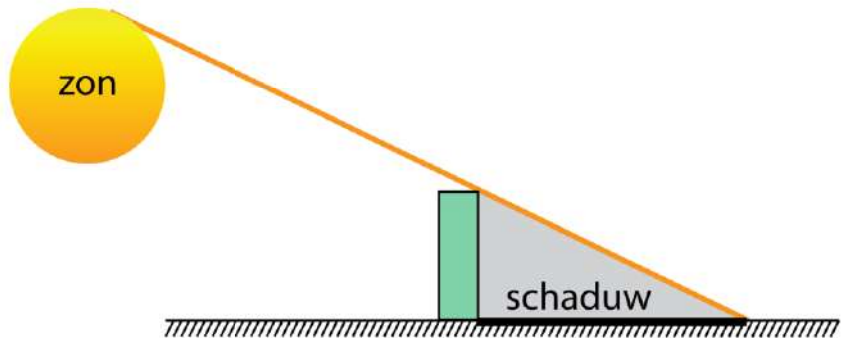
In vacuüm verplaatst licht zich in een rechte lijn met snelheid c .

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

Schaduwvorming

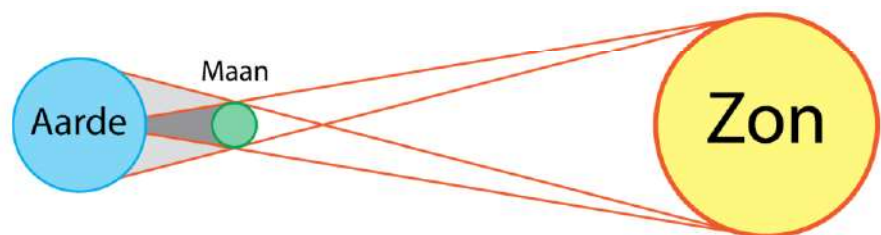
Als er tussen de zon en de straat een ondoorzichtig voorwerp, zoals een muur of jijzelf, staat kan het zonlicht niet meer rechtstreeks op de straat vallen, waardoor er een donkere plek ontstaat, de schaduw. De schaduw is meestal niet helemaal donker, omdat andere voorwerpen in de buurt een beetje licht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

Figuur 2
Achter een ondoorzichtig voorwerp ontstaat een schaduw.



Een **zonsverduistering** of **eclips** ontstaat als de maan zich tussen de zon en de aarde bevindt. 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.



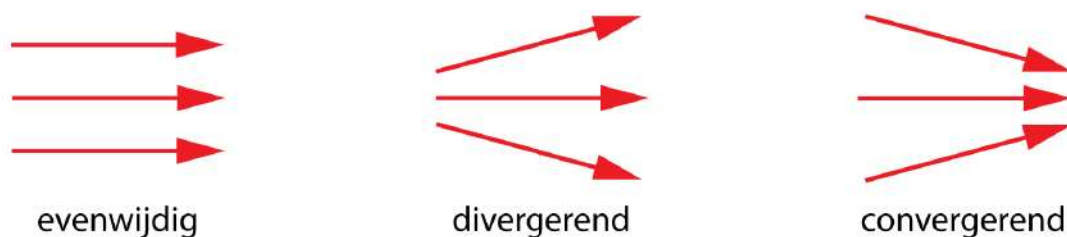
Lichtstralen en lichtbundels

Een **lichtstraal** is een smalle gerichte straal licht, zoals door een laser wordt uitgezonden. Een **lichtbundel** is een verzameling van 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 wordt verkregen door een lens voor een lichtbron te plaatsen.



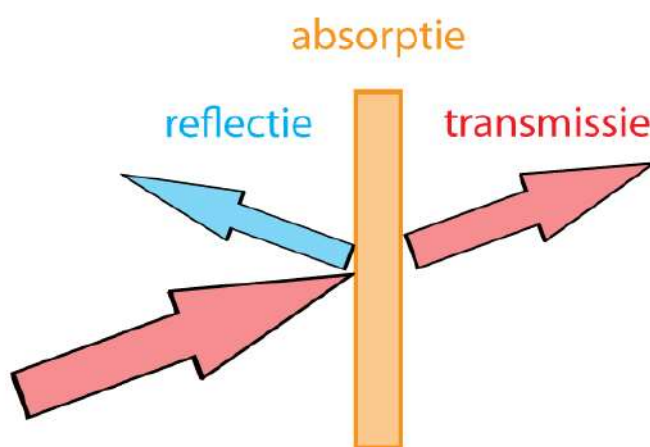
Figuur 4 Lichtbundels kunnen evenwijdig zijn, divergerend (van elkaar af) of convergerend (naar elkaar toe).

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 vindt een combinatie van reflectie, absorptie en transmissie plaats.



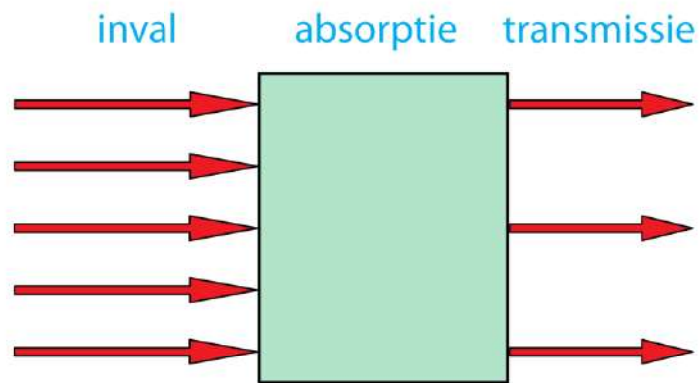
Figuur 5
 Licht dat op een doorzichtig voorwerp valt wordt in drie delen gesplitst. Een deel wordt weerkaatst (reflectie), een deel wordt opgenomen (absorptie) en een deel wordt doorgelaten (transmissie).

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. Deze stoffen laten geen licht door. Voorbeelden zijn 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. Als het licht door een hele dikke laag moet blijft er aan de achterkant vrijwel niets over.

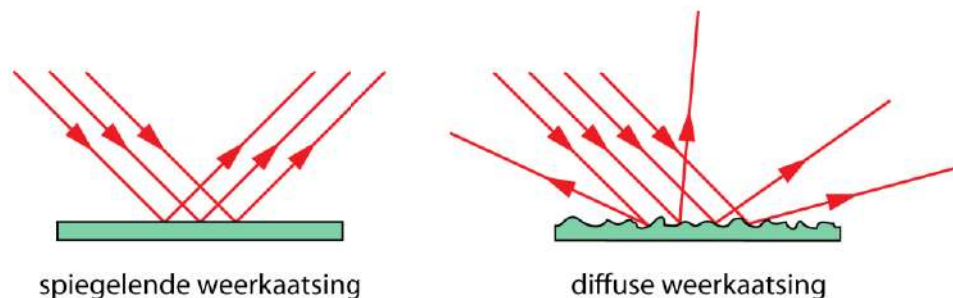
Figuur 6
Licht dat wordt geabsorbeerd
wordt binnen in de stof steeds
zwakker.



Weerkaatsing van licht

Wordt een voorwerp met een glad oppervlak door een evenwijdige lichtbundel beschenen, dan weerkaatst een deel van de opvallende lichtstralen onder dezelfde hoek. Dit noemen we **spiegelende weerkaatsing**. Wordt een voorwerp met een ruw oppervlak beschenen, dan worden lichtstralen onder verschillende hoeken weerkaatst. Dit noemen we **diffuse weerkaatsing**. Hoeveel licht wordt gereflecteerd kan sterk variëren. Metalen weerkaatsen veel van het opvallende licht, donker gekleurde voorwerpen weerkaatsen weinig licht.

Figuur 7
Een evenwijdige
lichtbundel wordt
weerkaatst door
een voorwerp.



De terugkaatsingswet

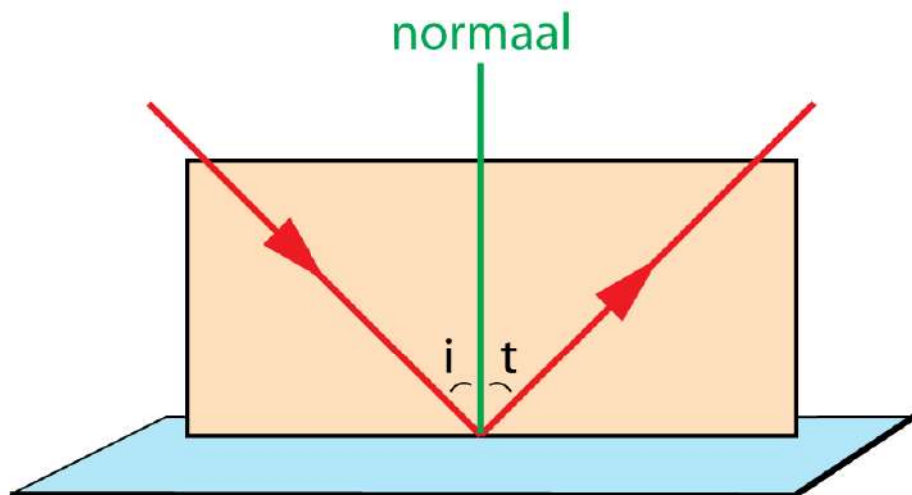
Voor een lichtstraal die wordt weerkaats geldt de **terugkaatsingswet**. In figuur 8 zie je hoe een lichtstraal wordt weerkaatst.

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.

Figuur 8
Terugkaatsing.
hoek i = hoek t



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.

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 invallende lichtstraal en de normaal.

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

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 altijd met een pijltje de bewegingsrichting van het licht moet aangeven.

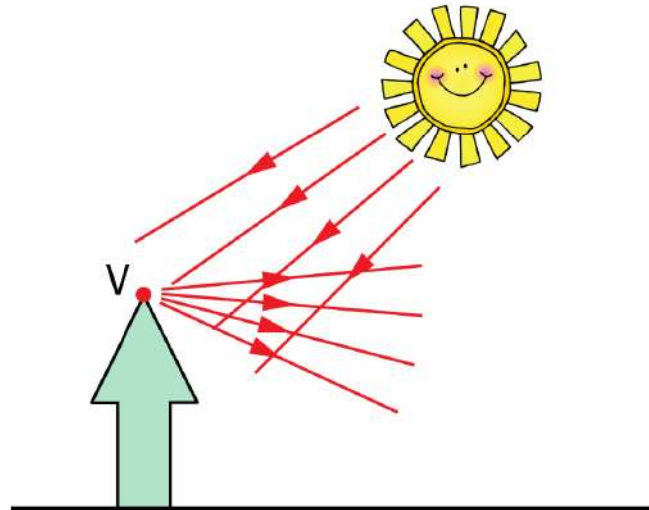
De richting waarin het licht beweegt moet je aangeven met een pijltje in de lichtstraal.

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 hij heeft genomen.

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.

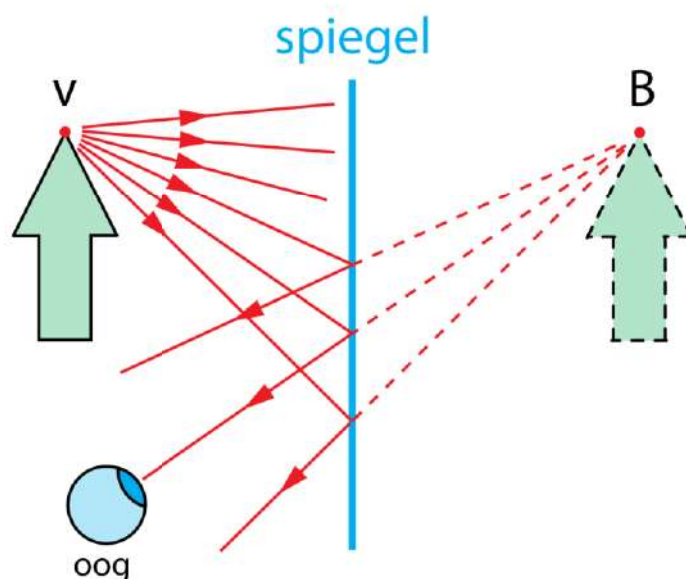


Figuur 9

Een voorwerpspunt V is een punt op het voorwerp. Het voorwerpspunt 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.

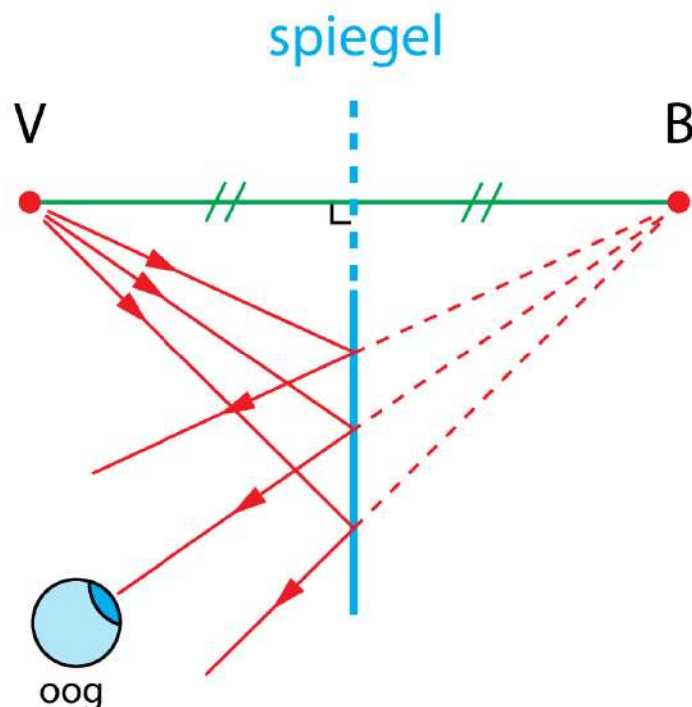
De plaats van het beeldpunt wordt verkregen door de teruggekaatste lichtstralen te verlengen tot achter de spiegel. Als lichtstralen worden verlengd geven we dat aan met een **gestreepte lijn**, zodat duidelijk is dat het geen echte lichtstralen zijn. Het punt waar de verlengde lichtstralen achter de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



Figuur 10

Een divergerende lichtbundel vertrekt uit een voorwerpspunt. De bundel wordt door een spiegel weerkaatst en komt in het oog van een waarnemer. De waarnemer ziet het voorwerp achter de spiegel.

Figuur 11
Het construeren van
teruggekaatste lichtstralen
bij een vlakke 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. Zie figuur 11.

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.

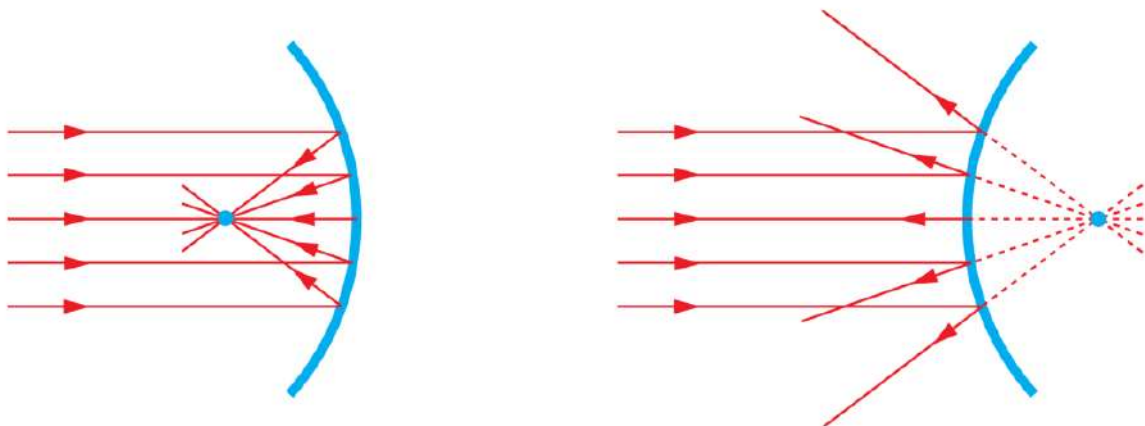
Bij een reëel beeld komen lichtstralen afkomstig uit één punt weer samen.

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

VOORBEELD vlakke spiegel

Met een vlakke spiegel wordt een virtueel beeld gevormd. In figuur 10 bereikt de divergerende lichtbundel het oog. De hersenen van de waarnemer krijgen dezelfde informatie als wanneer de lichtstralen zonder weerkaatsing het oog bereiken. Vandaar dat de hersenen concluderen dat het voorwerp zich achter de spiegel in punt B bevindt. Wel is het virtuele beeld een spiegelbeeld van het voorwerp en als dat herkenbaar is (bijvoorbeeld omdat er letters op staan) wordt dit door de hersenen opgemerkt.

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.



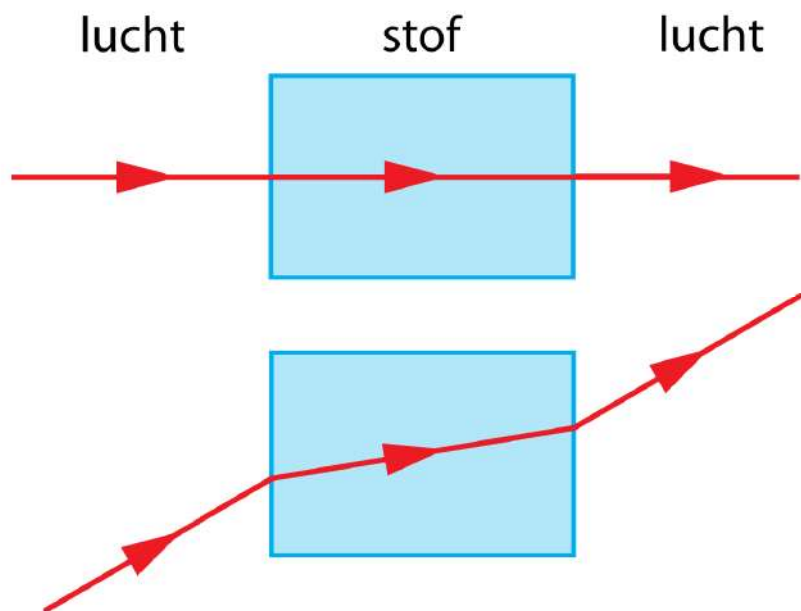
Figuur 12 Links: een evenwijdige lichtbundel op een holle spiegel wordt convergent weerkaatst. Rechts: een evenwijdige lichtbundel op een bolle spiegel wordt bij divergent weerkaatst.

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.

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



Figuur 13

Licht passeert het grensvlak tussen lucht en een doorzichtige stof. Licht dat loodrecht op het grensvlak invalt verandert niet van richting (boven). Licht dat onder een hoek invalt wordt gebroken en verandert van richting (onder).

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.

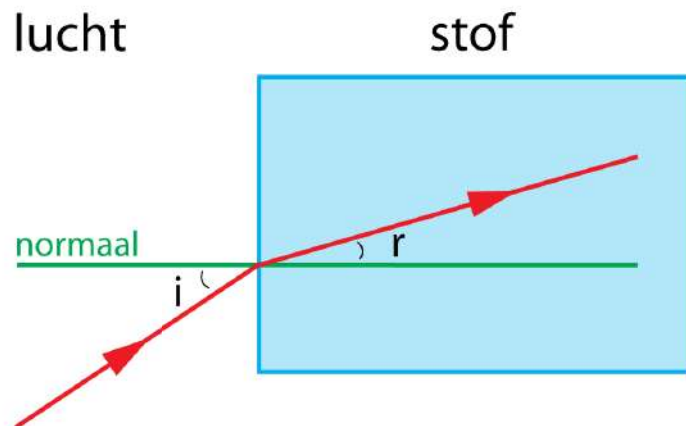
De hoek van inval i is de hoek tussen de invallende lichtstraal en de normaal.

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

Breking van lucht naar stof

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

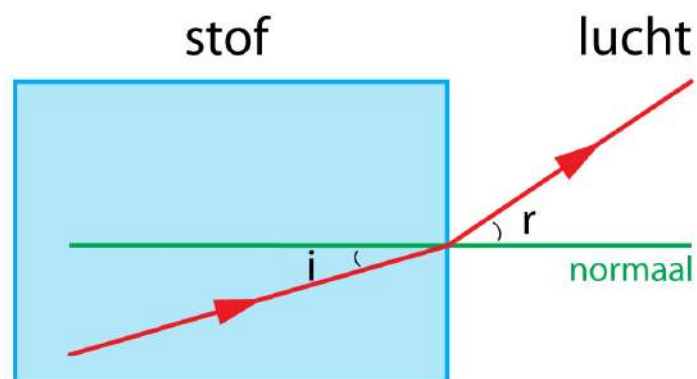
Figuur 14
Licht gaat van lucht
naar stof →
hoek $r <$ hoek i



Breking van stof naar lucht

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

Figuur 15
Licht gaat van stof
naar lucht →
hoek $r >$ hoek i



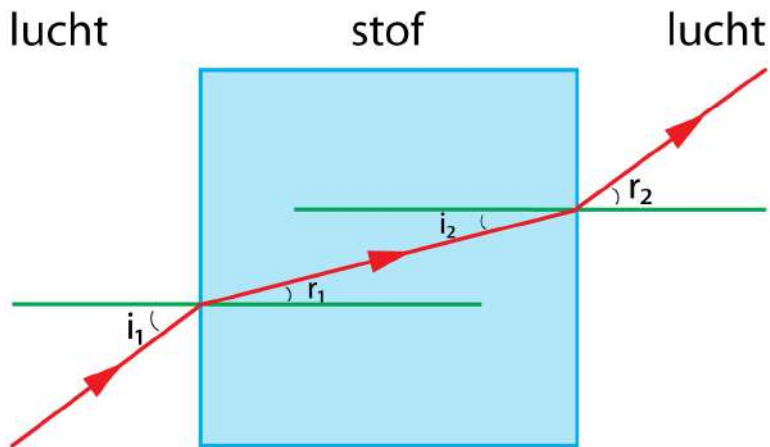
Breking van lucht naar stof naar lucht

Een lichtstraal van lucht naar stof naar lucht wordt eerst gebroken bij het grensvlak lucht–stof en daarna opnieuw bij het grensvlak stof–lucht. Als de twee grensvlakken evenwijdig zijn is de lichtstraal die de stof verlaat evenwijdig aan de lichtstraal die de stof ingaat. Hieruit concluderen we dat de breking van stof naar lucht precies tegengesteld is aan de breking van lucht naar stof.

lucht $\rightarrow$ stof
 stof $\rightarrow$ lucht
 r_1 en i_2 zijn Z-hoeken

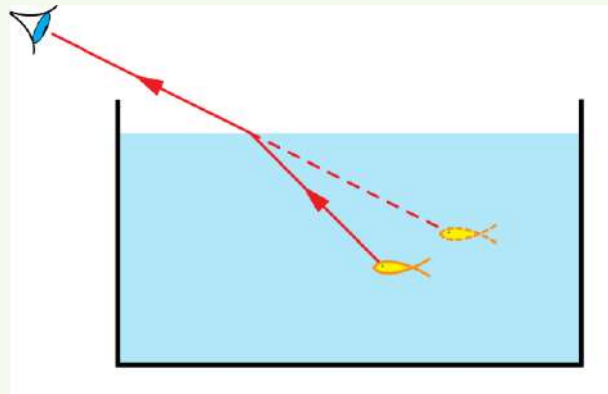
$r_1 < i_1$
 $r_2 > i_2$
 $r_1 = i_2$

Figuur 16
 Licht passeert eerst het grensvlak tussen lucht en stof (breking 1) en daarna het grensvlak tussen stof en lucht (breking 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 hij in werkelijkheid is. Je ziet de gestreepte vis, want daar lijkt het licht vandaan te komen. Maar de echte vis bevindt dieper onder water en is dichterbij.



Figuur 17
 Als je naar een vis onder water kijkt zie je de vis op een andere plaats dan waar de echte vis zich bevindt.

Brekingindex

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} .
 n_{stof} is de brekingsindex van de stof en heeft geen eenheid.

Als licht door stof A gaat krijgt het een snelheid gegeven door:

$$v_{\text{licht, A}} = \frac{c}{n_A}$$

- $v_{\text{licht, A}}$ is de snelheid van het licht in stof A
- c is de lichtsnelheid in vacuüm
- n_A is de brekingsindex van stof A (geen eenheid)

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 maar weinig 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.

Bereken de voortplantingssnelheid van rood licht in water.

• $v_{\text{licht}} = \frac{c}{n} \rightarrow \text{rood licht: } v_{\text{licht}} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{1,330} = 2,26 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

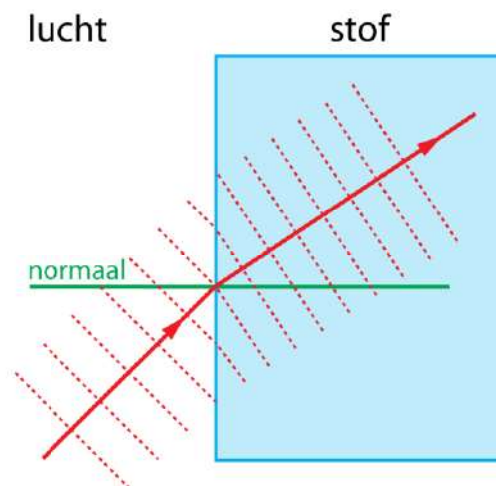
Beredeneer of blauw licht sneller of langzamer gaat dan rood licht.

- de brekingsindex voor blauw licht is groter dan voor rood licht
- voor blauw licht is de vertragingsfactor 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 reist. 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.

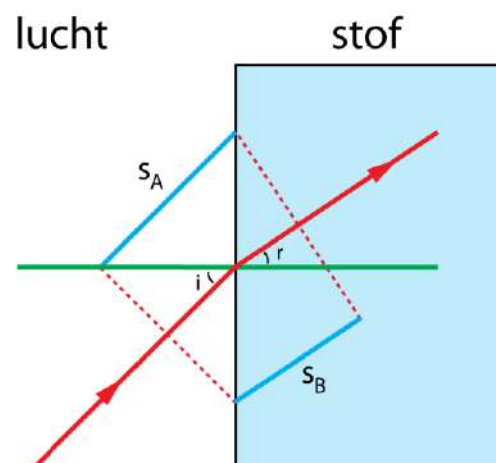
Om te begrijpen waarom dit zo is moet je licht opvatten als een golf. Bij watergolven zien we toppen en dalen die zich over het wateroppervlak verplaatsen. Lichtgolven gedragen zich net als watergolven. In figuur 18 zie je een lichtstraal die aankomt door lucht en schuin op een stof valt. Loodrecht op 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 te zien in figuur 18, is de richting van de lichtstraal bij het passeren van het grensvlak veranderd.



Figuur 18

Een lichtstraal verandert van richting bij het passeren van het grensvlak tussen lucht en stof. De gestreepte lijnen zijn de toppen van de lichtgolf. Omdat eerst de rechterkant van de golf het grensvlak passeert en even later pas de linkerkant verandert de richting van de lichtstraal.

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.

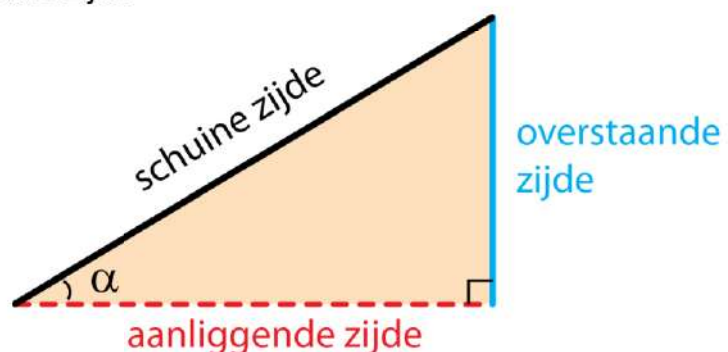
$$n_i \cdot \sin i = n_r \cdot \sin r$$

- 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.

Wat met de sinus van een hoek wordt bedoeld zie je in figuur 20. Neem een driehoek waarvan één van de hoeken 90° is (een rechthoekige driehoek). De hoek aan de linkerkant is hoek α (alpha).

Dan geldt: $\sin \alpha = \frac{\text{lengte overstaande zijde}}{\text{lengte schuine zijde}}$

Figuur 20
De sinus van hoek α is de lengte van de overstaande zijde (blauw) gedeeld door de lengte van de schuine zijde (zwart).



Breking van lucht naar stof en van stof naar lucht

Lucht heeft een brekingsindex van $n_{\text{lucht}} = 1,00029$ en dit stellen we op 1, omdat de fout die we daarmee maken onmeetbaar klein is. Voor licht dat van lucht naar stof of van stof naar lucht gaat vinden we nu de onderstaande formules.

Licht gaat van lucht naar stof

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{\text{stof}}$$

Licht gaat van stof naar lucht

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n_{\text{stof}}}$$

BEWIJS

Als licht **van lucht naar stof** gaat vullen we voor n_i het getal 1 in en vinden we:

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_r \quad \text{waarbij } n_r \text{ de brekingsindex van stof B is.}$$

Als licht **van stof naar lucht** gaat vullen we voor n_r het getal 1 in en vinden we:

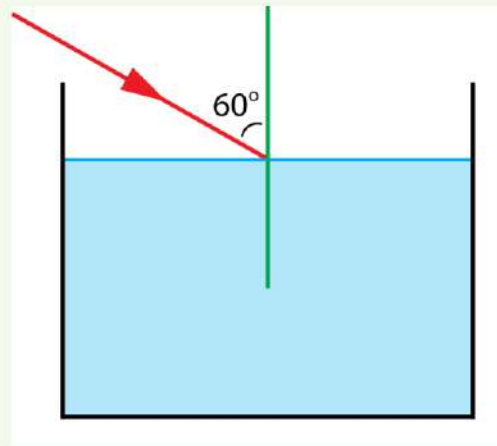
$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n_i} \quad \text{waarbij } n_i \text{ de brekingsindex van stof A is.}$$

VOORBEELD breking van lucht naar water

Een rode lichtstraal komt onder een hoek van 60° in een aquarium. Zie figuur 21.

Bereken de hoek van breking.

- $\angle i = 60^\circ$
- rood licht: $n_{\text{water}} = 1,330$
- $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_{\text{water}}}{1}$
- $\frac{\sin 60}{\sin r} = 1,330 \rightarrow \sin r = \frac{\sin 60}{1,330} \rightarrow$
- $\sin r = \frac{0,8660}{1,330} = 0,65115 \rightarrow$
- $r = \sin^{-1}(0,65115) = 40,63 = 40,6^\circ$



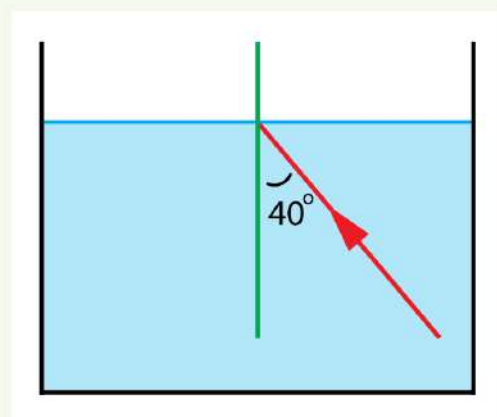
Figuur 21 lucht → water

VOORBEELD breking van water naar lucht

Een rode lichtstraal valt onder een hoek van 40° op het grensvlak van water naar lucht. Zie figuur 22.

Bereken de hoek van breking.

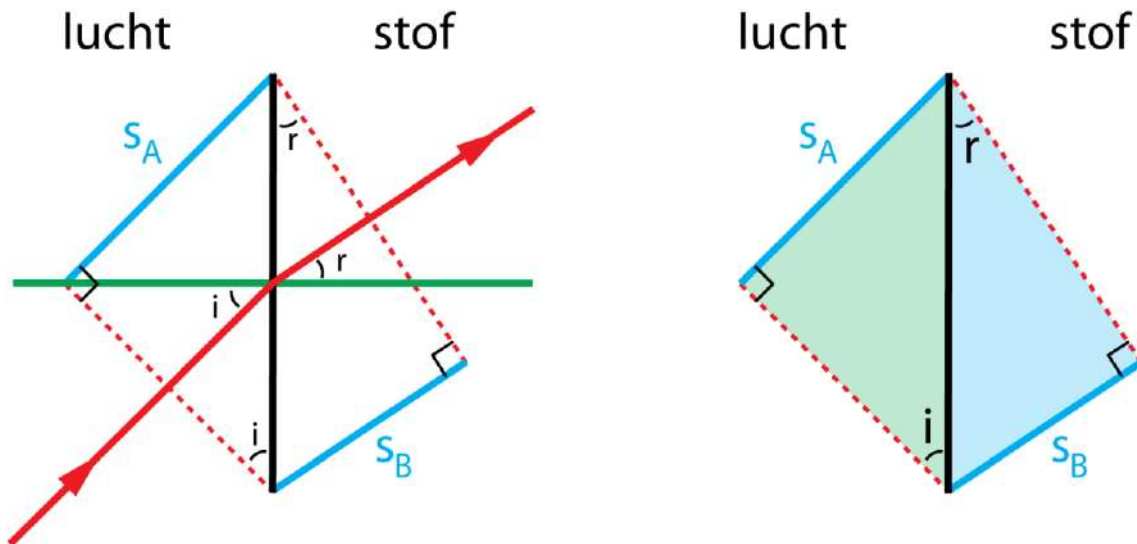
- $\angle i = 40^\circ$
- rood licht: $n_{\text{water}} = 1,330$
- $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n_{\text{water}}}$
- $\frac{\sin 40}{\sin r} = \frac{1}{1,330} = 0,75188 \rightarrow$
- $\sin r = \frac{\sin 40}{0,75188} = 0,8549 \rightarrow$
- $r = 58,75 = 59^\circ$



Figuur 22 water → lucht

Bewijs van de brekingswet van Snellius (voor de liefhebber)

Om de wet van Snellius te bewijzen kijken we naar figuur 23. Hierin herkennen we twee rechthoekige driehoeken die met hun schuine zijden tegen elkaar zitten.



Figuur 23 Twee rechthoekige driehoeken zitten met hun schuine zijden aan elkaar vast.

- $\sin i = S_A$ gedeeld door de lengte van de zwarte lijn
 $\sin r = S_B$ gedeeld door de lengte van de zwarte lijn
- $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{S_A}{S_B}$
- $S_A = v_A \cdot \Delta t$ en $S_B = v_B \cdot \Delta t \rightarrow \frac{S_A}{S_B} = \frac{v_A}{v_B}$
- $v_A = \frac{c}{n_A}$ en $v_B = \frac{c}{n_B}$
- $\frac{S_A}{S_B} = \frac{c/n_A}{c/n_B}$
- delen door een breuk is vermenigvuldigen met het omgekeerde
- $\frac{S_A}{S_B} = \frac{n_B}{n_A}$
- $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_B}{n_A} \rightarrow n_A \cdot \sin i = n_B \cdot \sin r$

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 met $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{1}{n}$

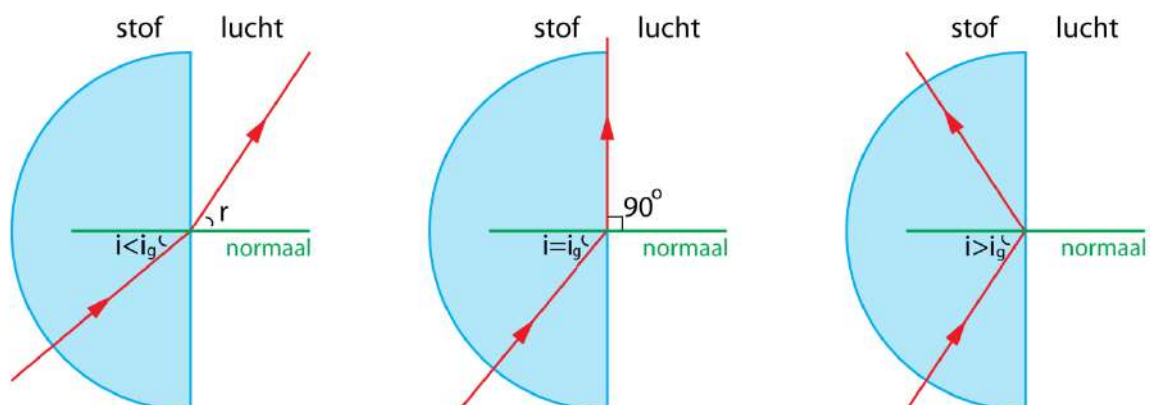
het volgende resultaat:

hoek i (graden)	hoek r (graden)
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

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 omdat er geen wiskundige oplossing is.

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

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 24 zie je wat er gebeurt.



Figuur 24 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 al 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 exact gelijk aan de grenshoek is de hoek van breking 90 graden.

Omdat de grenshoek de hoek van inval is waarbij de hoek van breking 90 graden is, kunnen we de grenshoek berekenen. Er geldt:

Licht gaat van stof A naar stof B. Als $n_A > n_B$ geldt voor de grenshoek i_g

$$\sin i_g = \frac{n_B}{n_A}$$

BEWIJS

- $n_i \cdot \sin i = n_r \cdot \sin r$
- $n_i = n_A$ en $n_r = n_B$
- voor $i = i_g$: $r = 90^\circ \rightarrow \sin r = 1$
- $n_A \cdot \sin i_g = n_B \cdot 1 \rightarrow \sin i_g = \frac{n_B}{n_A}$

Als licht van stof A naar lucht gaat geldt $n_B = 1$ en vinden we: $\sin i_g = \frac{1}{n}$

VOORBEELD breking van water naar lucht

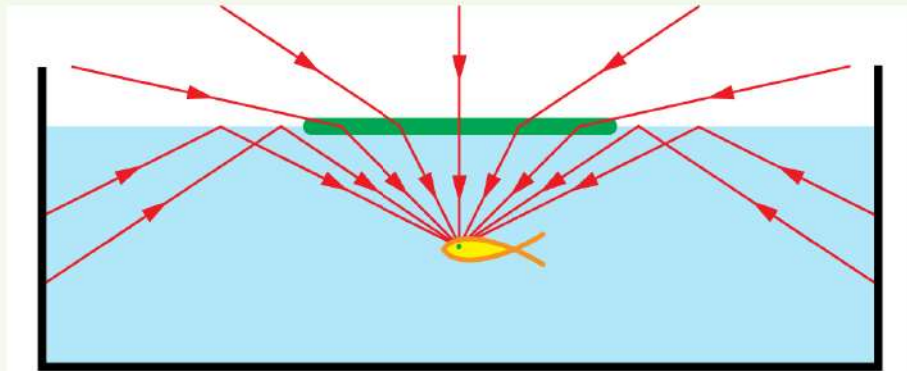
Een rode lichtstraal valt onder een hoek op het grensvlak van water naar lucht.

Bereken de grenshoek.

- $\sin i_g = \frac{1}{n_{\text{stof}}}$
- $\sin i_g = \frac{1}{1,33} \rightarrow i_g = \sin^{-1}(0,7519) = 48,7^\circ$

VOORBEELD vis onder water

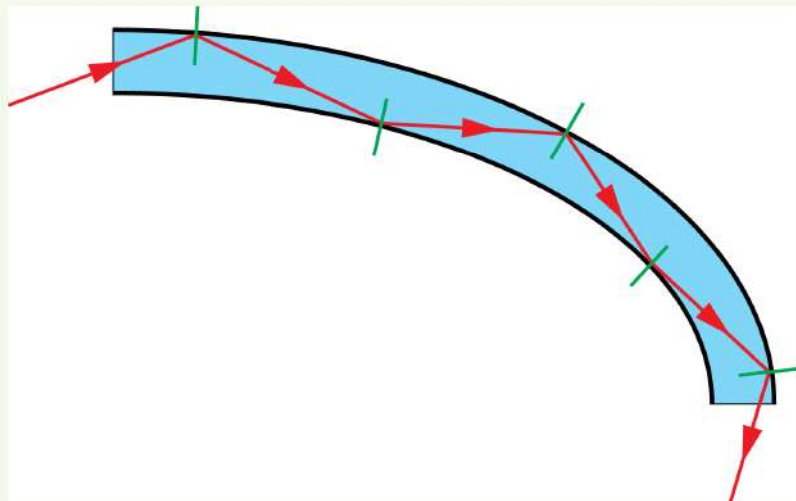
Een vis zwemt onder water en kijkt naar boven. Als de hoek waarmee hij tegen het wateroppervlak kijkt groter is dan de grenshoek ziet hij de bodem. Is de hoek kleiner dan de grenshoek dan ziet hij wat zich boven het water bevindt. De groene streep geeft het gebied aan waarbij de kijkhoek kleiner is dan de grenshoek. Zie figuur 25.



Figuur 25

VOORBEELD glasvezelkabel

Glasvezelkabels (glasfibers) worden gebruikt om met hoge snelheid informatie 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.



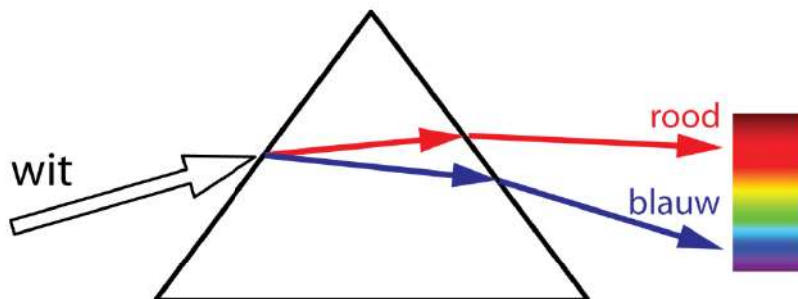
Figuur 26
In een glasvezelkabel wordt licht voortdurend weerkaatst omdat de invalshoek steeds groter is dan de grenshoek.

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 27.

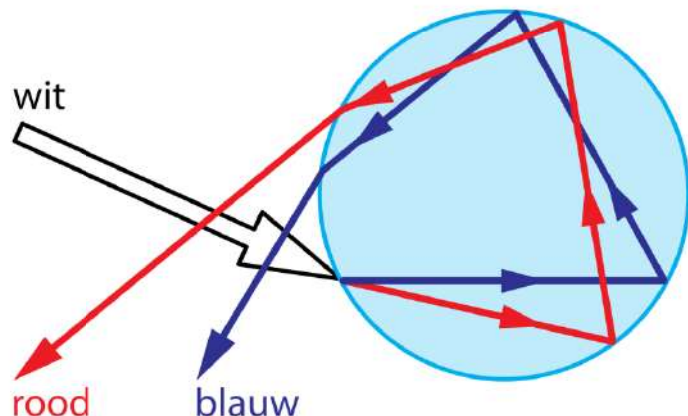
Als er een bundel wit licht op een prisma valt zie je achter het prisma een band van kleuren, het **kleurenspectrum**. Dit komt omdat wit licht uit meerdere kleuren bestaat én omdat voor iedere kleur de brekingsindex een beetje anders is. De brekingsindex voor blauw licht is groter dan die voor rood licht, waardoor het blauwe licht meer wordt gebroken. Het splitsen van wit licht in het kleurenspectrum heet **kleurschifting** of **dispersie**.

Figuur 27
Omdat de brekingsindex voor iedere kleur een beetje anders is wordt in een prisma wit licht gesplitst in kleuren.



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 er kleurschifting op. 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.



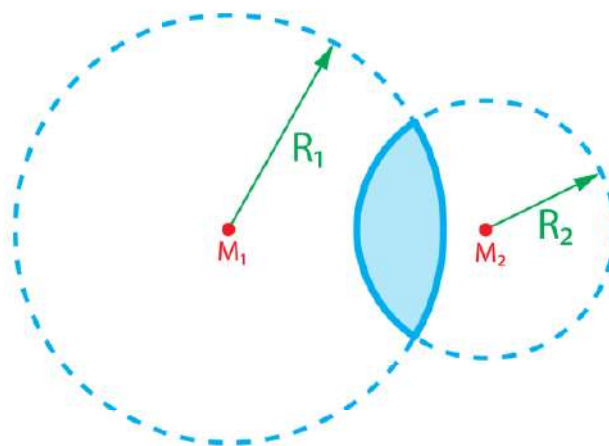
Figuur 28
In een regendruppel wordt het zonlicht gebroken, twee keer weerkaatst en daarna opnieuw gebroken. Omdat de brekingsindex van water kleurafhankelijk is wordt het witte licht gesplitst in de kleuren van de regenboog.

8.3 Lenzen

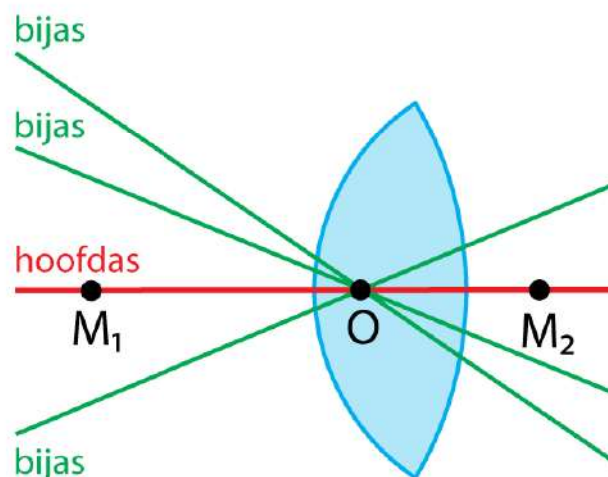
Sferische lenzen

Lenzen worden gemaakt van doorzichtig materiaal, zoals glas, kwarts of plastic. Een lens heeft op zijn minst één gekromd oppervlak. Als dit gekromde oppervlak deel is van een bol spreken we van een **sferische** lens. Voor sterke lenzen zijn twee gekromde oppervlakken nodig. De kromtestralen r_1 en r_2 van beide oppervlakken hoeven niet gelijk aan elkaar te zijn. Vaak is dat wel het geval. Er bestaan ook niet-sferische (**asferische**) lenzen. Deze zijn moeilijker te maken en zijn daarom duurder, maar hebben betere eigenschappen dan sferische lenzen. Dure fotocamera's hebben tegenwoordig een asferische lens.

Figuur 29
Sferische lenzen. De oppervlakte van de lens is een deel van een bol met straal R en middelpunt M .



Alleen de lijn die door de middelpunten M_1 en M_2 gaat snijdt beide lensoppervlakken loodrecht. Deze lijn is de **hoofdas** van de lens. Het **optisch middelpunt** O ligt bij een symmetrische lens ($R_1 = R_2$) precies in het midden van de lens. Bij een niet-symmetrische lens ($R_1 \neq R_2$) ligt punt O niet in het midden maar dichterbij het sterkst gekromde lensoppervlak. Een rechte lijn door O die niet samenvalt met de hoofdas is een **bijas** van de lens.



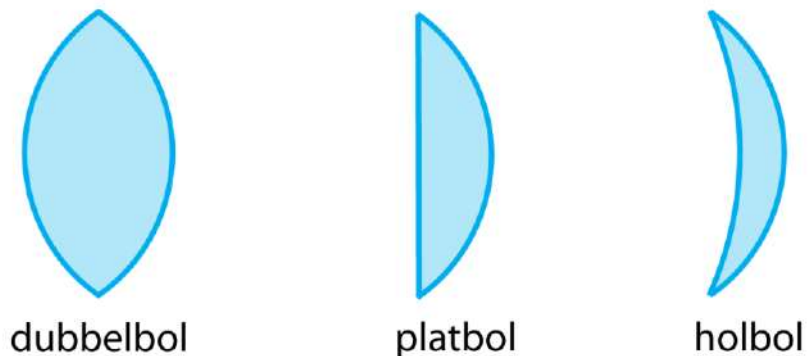
Figuur 30
Hoofdas en bijassen van een lens.

Positieve en negatieve lenzen

Een **positieve** lens wordt een **bolle** lens genoemd. Als evenwijdige lichtstralen op een bolle lens komen worden ze naar elkaar toe gebroken; ze richten zich naar één punt. Dit heet **convergeren**. In figuur 31 zie je drie typen bolle (positieve) lenzen:

- **dubbelbolle** lens (twee gekromde oppervlakken naar buiten)
- **platbolle** lens (één naar buiten gekromd en één plat oppervlak)
- **holbolle** lens (één gekromd oppervlak naar buiten en één naar binnen)

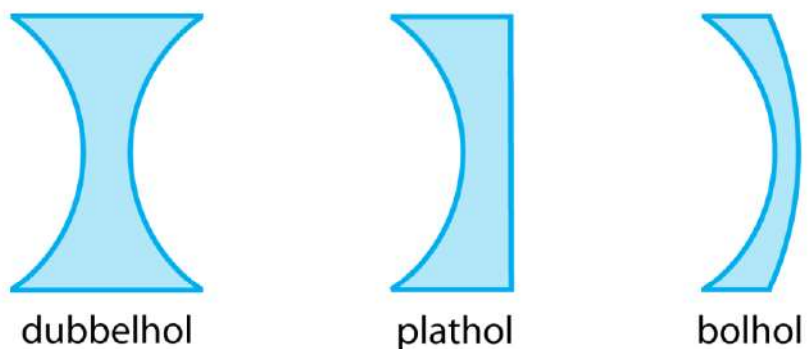
Figuur 31
Positieve lenzen zijn in het midden dikker dan aan de rand. In een positieve lens worden lichtstralen naar elkaar toe gebroken.



Een **negatieve** lens wordt een **holle** lens genoemd. Als evenwijdige lichtstralen op een holle lens komen worden ze van elkaar af gebroken; ze gaan steeds verder uit elkaar. Dit heet **divergeren**. In figuur 32 zie je drie typen holle (negatieve) lenzen:

- **dubbelholle** lens (twee gekromde oppervlakken naar binnen)
- **platholle** lens (één naar binnen gekromd en één plat oppervlak)
- **bolholle** lens (één gekromd oppervlak naar buiten en één naar binnen)

Figuur 32
Negatieve lenzen zijn in het midden dunner dan aan de rand. In een negatieve lens worden lichtstralen van elkaar af gebroken.



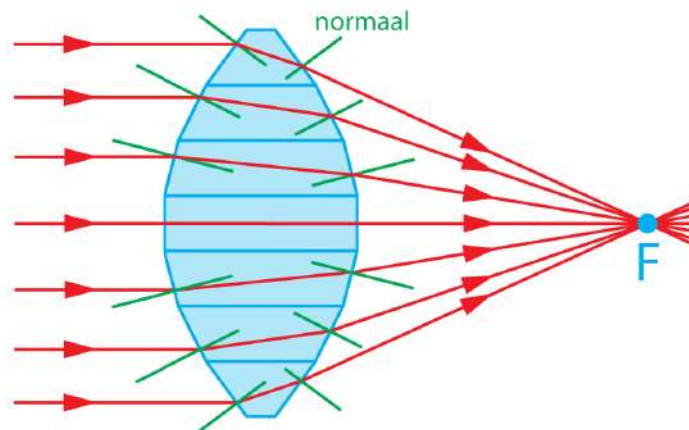
Een positieve lens is in het midden dikker dan aan de rand.

Een negatieve lens is in het midden dunner dan aan de rand.

Breking in een positieve lens

In figuur 33 zie je schematisch een positieve lens. Om de eigenschappen van deze lens te begrijpen kun je de lens opvatten als een verzameling gestapelde segmenten in de vorm van een trapezium. In het midden van de lens zijn de zijvlakken evenwijdig. Hoe meer je naar de rand gaat hoe schuiner de zijkanten van de trapeziums worden. De wet van Snellius geldt ook voor een lens. Bij het passeren van het lucht-glas grensvlak worden de lichtstralen naar de normaal toe gebroken. Bij het glas-lucht grensvlak breken de lichtstralen van de normaal af. Vanwege de bolvorm worden evenwijdige lichtstralen zodanig gebroken dat ze na de lens samenkomen in één punt. Dit punt is het brandpunt wat wordt aangegeven met hoofdletter F.

Figuur 33
Een positieve lens kan worden opgevat als gestapelde trapeziums. Evenwijdige lichtstralen komen na breking samen in het brandpunt F.



Het brandpunt

In een positieve lens worden lichtstralen evenwijdig aan de hoofdas naar elkaar toe gebroken en komen samen in één punt, het **brandpunt**, aangegeven door de letter F van "focus". Een lens heeft twee brandpunten, aan elke zijde één. Deze brandpunten liggen op gelijke afstand van het optisch midden. De naam "brandpunt" is ontstaan uit het gebruik om vuur te maken met behulp van een positieve lens. Richt je de lens op de zon, dan komen de zonnestralen samen in één punt. De gebundelde lichtstralen laten de temperatuur stijgen, waardoor er brand kan ontstaan. Vandaar "brandpunt".

Als het lensoppervlak sterker is gekromd worden de lichtstralen meer gebroken, waardoor het brandpunt dichterbij de lens komt. Behalve door de bolling van de lens wordt de ligging van het brandpunt ook bepaald door de brekingsindex van het materiaal waaruit de lens is gemaakt.

De **brandpuntsafstand** f is de afstand tussen het brandpunt F en het optische middelpunt O van de lens. Door een lens met een kleine brandpuntsafstand wordt het licht sterker gebroken dan door een lens met een grote brandpuntsafstand. Een sterke lens heeft een kleine brandpuntsafstand en een zwakke lens heeft een grote brandpuntsafstand.

brandpuntsafstand groot	→	zwakke lens
brandpuntsafstand klein	→	sterke lens

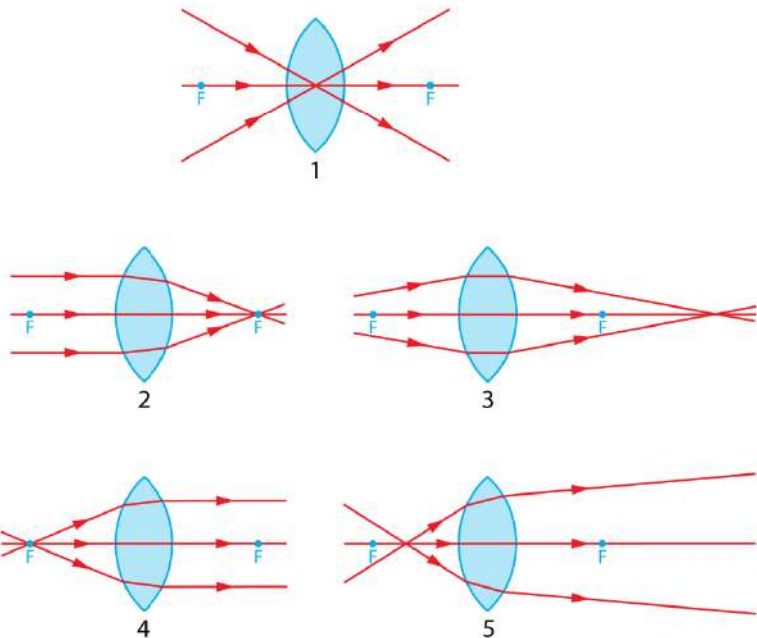
Breking van licht door een positieve lens

In figuur 34 zie je hoe lichtstralen in een positieve lens worden gebroken. In de volgende paragraaf gaan we deze eigenschappen toepassen bij het maken van een afbeelding.

Figuur 34

Positieve lenzen.

- 1 Lichtstralen door het optisch midden gaan na de lens ongebroken verder.
- 2 Lichtstralen evenwijdig aan de hoofdas gaan na de lens door F.
- 3 Lichtstralen komend uit een punt verder dan F gaan na de lens door een punt verder dan F.
- 4 Lichtstralen komend uit F gaan na de lens evenwijdig aan de hoofdas verder.
- 5 Lichtstralen komend uit een punt dichterbij dan F zijn na de lens divergent.



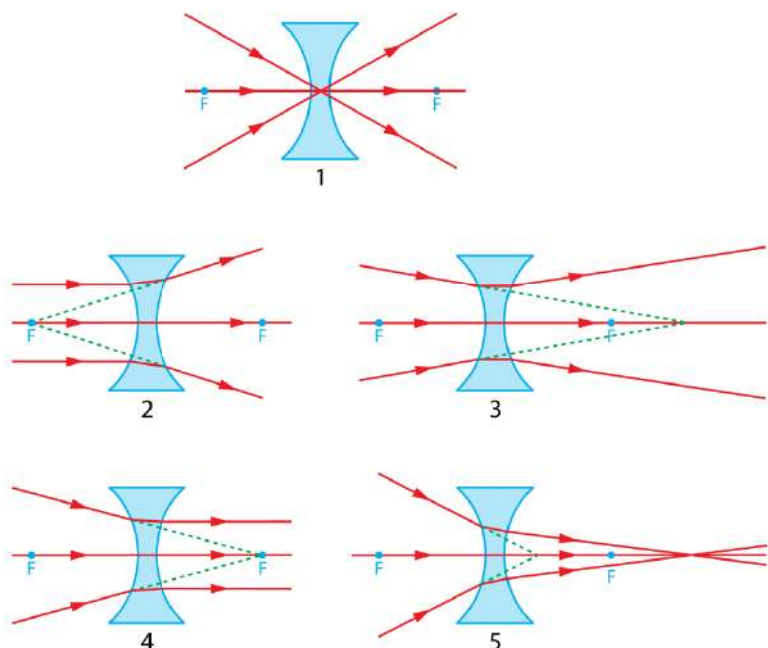
Breking van licht door een negatieve lens

In figuur 35 zie je hoe lichtstralen in een negatieve lens worden gebroken.

Figuur 35

Negatieve lenzen.

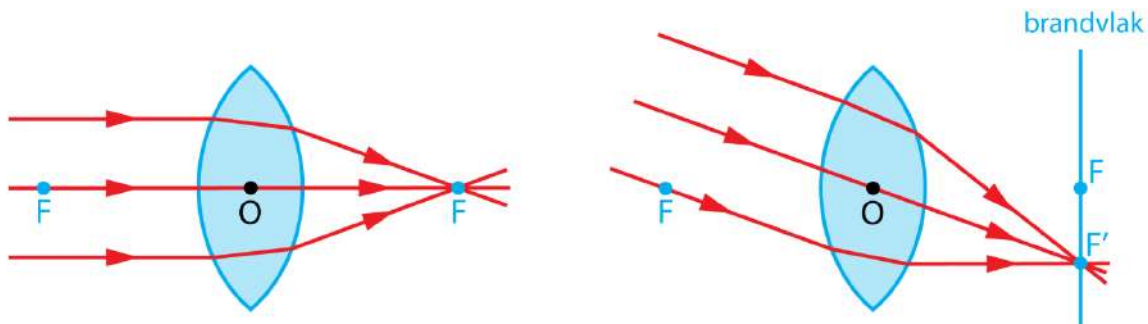
- 1 Lichtstralen door het optisch midden gaan na de lens ongebroken verder.
- 2 Lichtstralen evenwijdig aan de hoofdas gaan na de lens verder alsof ze uit F vóór de lens komen.
- 3 Lichtstralen gericht op een punt achter de lens voorbij F gaan verder alsof ze uit een punt vóór F komen.
- 4 Lichtstralen gericht op F achter de lens gaan evenwijdig aan de hoofdas verder.
- 5 Lichtstralen gericht op een punt achter de lens vóór F snijden elkaar in een punt achter F.



Bijassen, bijbrandpunten en brandvlak

In figuur 30 zie je een positieve lens met de hoofdas en een aantal bijassen. De twee brandpunten F die op de hoofdas liggen zijn de **hoofdbrandpunten**. Ook op de bijassen liggen brandpunten. Een brandpunt F' die op een bijas ligt heet een **bijbrandpunt**. Omdat een lens oneindig veel bijassen heeft zijn er ook oneindig veel bijbrandpunten.

Bijbrandpunten op bijassen die een niet al te grote hoek met de hoofdas maken liggen in een plat vlak loodrecht op de hoofdas. Dit vlak heet het **brandvlak**. In het brandvlak ligt ook het hoofdbrandpunt. Zie figuur 36.



Figuur 36 Hoofdbrandpunten F liggen op de hoofdas. Bijbrandpunten F' liggen op een bijas. Als de hoek tussen de hoofdas en een bijas klein is ligt het bijbrandpunt van deze bijas in het brandvlak.

Voor een positieve lens geldt:

Evenwijdige lichtstralen gaan na de lens door één punt in het brandvlak.

Lichtstralen die door één punt in het brandvlak aankomen zijn na de lens evenwijdig.

Het pad van een willekeurige lichtstraal bepalen

Weet je van een lens waar het brandpunt ligt, dan kun je voor iedere willekeurige lichtstraal het pad bepalen. Het brandpunt geeft aan hoe sterk de lens is, en dat is voldoende om te weten hoe het licht door de lens wordt gebroken.

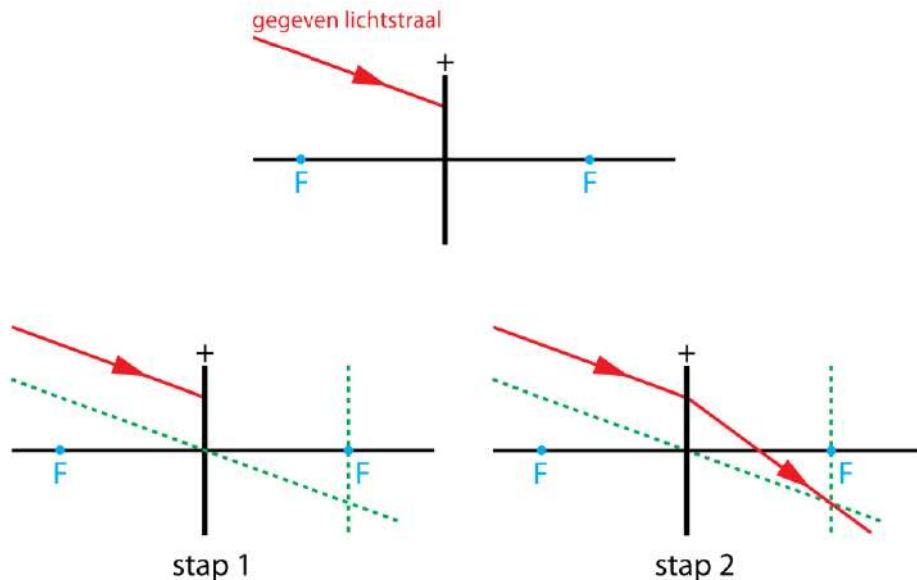
Als het brandpunt bekend is kan het pad van iedere lichtstraal worden bepaald.

Met het onderstaande stappenplan kan het pad van een lichtstraal worden bepaald. Om het tekenen te vereenvoudigen geven we een lens aan met een dikke streep loodrecht op de hoofdas. Een positieve lens krijgt een $+$ en een negatieve lens een $-$ boven de streep. Zie de figuren 37 en 38.

Stappenplan positieve lens (zie figuur 37)

- teken het brandvlak achter de lens (stap 1)
- teken de lijn evenwijdig met de gegeven lichtstraal door het optisch midden van de lens (stap 1)
- bepaal het snijpunt van deze lijn met het brandvlak (stap 2)
- dit snijpunt is het bijbrandpunt achter de lens
- de lichtstraal gaat verder door het bijbrandpunt achter de lens (stap 2)

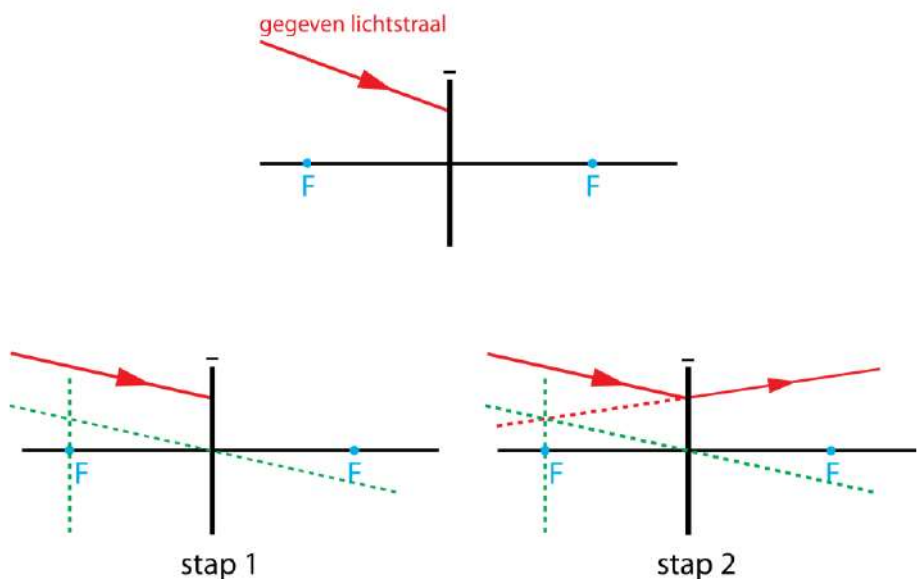
Figuur 37
Bepaling van het pad van een lichtstraal bij een positieve lens.



Stappenplan negatieve lens (zie figuur 38)

- teken het brandvlak aan de voorzijde van de lens (stap 1)
- teken de lijn evenwijdig met de gegeven lichtstraal door het optisch midden van de lens (stap 1)
- bepaal het snijpunt van deze lijn met het brandvlak vóór de lens (stap 2)
- dit snijpunt is het bijbrandpunt vóór de lens
- de lichtstraal gaat verder alsof hij afkomstig is uit het bijbrandpunt vóór de lens (stap 2)

Figuur 38
Bepaling van het pad van een lichtstraal bij een negatieve lens.



VOORBEELD

bepaling van brandvlak en hoofdbrandpunt

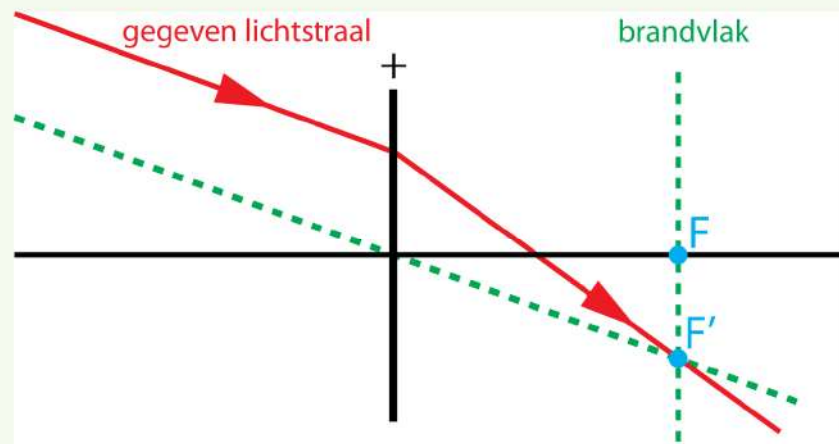
Van een positieve lens is het pad van één lichtstraal gegeven.

Bepaal de ligging van het brandvlak.

- teken de lijn evenwijdig met de opvallende lichtstraal die door het optisch middelpunt van de lens gaat
- bepaal het snijpunt van deze lijn met de lichtstraal
- dit snijpunt is het bijbrandpunt
- teken de lijn loodrecht op de hoofdas die door het bijbrandpunt gaat
- dit is het brandvlak

Bepaal de ligging van het hoofdbrandpunt.

- bepaal het snijpunt van het brandvlak met de hoofdas
- dit snijpunt is het hoofdbrandpunt



Figuur 39
Bepaling van
brandvlak en F
als het pad van
één lichtstraal
is gegeven.

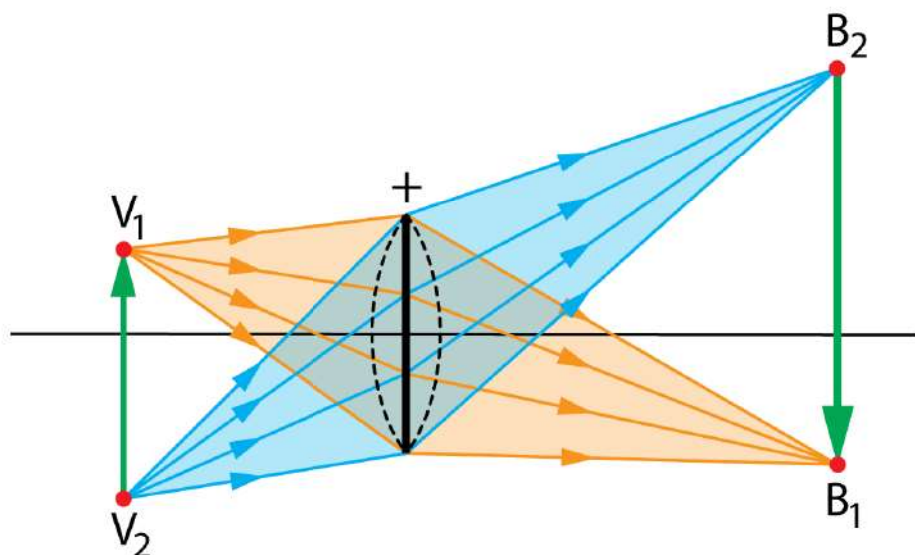
8.4 De plaats van het beeld construeren

Beeldvorming door een positieve lens

Met een positieve lens kan een afbeelding worden gemaakt van een voorwerp op een scherm. We gaan ons nu bezighouden met de vraag hoe dit in zijn werk gaat. Je gaat leren hoe je door te tekenen kunt bepalen waar je het scherm moet zetten om een scherpe afbeelding te krijgen. Om het tekenen te vereenvoudigen geven we opnieuw een lens aan met een dikke streep loodrecht op de hoofdas. Bij een positieve lens zetten we een $+$ boven de streep en bij een negatieve lens een $-$.

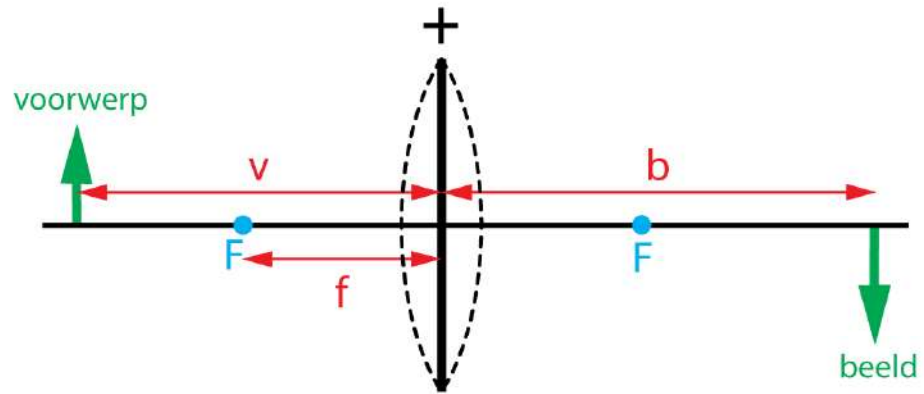
In figuur 40 nemen we een pijl als voorwerp. Opvallende lichtstralen worden door de pijl diffuus weerkaatst. Neem een willekeurig punt op het oppervlak van het voorwerp. Dit punt is een **voorwerpspunt V**. Door een positieve lens worden de divergerende lichtstralen uit V naar elkaar toe gebroken, zodat ze weer samenkomen in één punt. Dit punt is het **beeldpunt B**. Het beeldpunt B is de **afbeelding** van het voorwerpspunt V. Ieder deel van de pijl wordt op deze manier afgebeeld, zodat een afbeelding van de hele pijl ontstaat. Zie figuur 40.

Figuur 40
Afbeelding van een pijl. De divergerende lichtstralen uit de voorwerpspunten V_1 en V_2 worden door een positieve lens samengebracht in de beeldpunten B_1 en B_2 . Omdat dit voor ieder deel van de pijl gebeurt ontstaat er een scherp beeld van de pijl. Zoals je ziet is het beeld omgekeerd.



Bij de vorming van een afbeelding zijn drie afstanden van belang: de voorwerpsafstand v , de beeldafstand b en de brandpuntsafstand f .

v is de voorwerpsafstand	de afstand van het voorwerpspunt V tot het midden van de lens.
b is de beeldafstand	de afstand van het beeldpunt B tot het midden van de lens.
f is de brandpuntsafstand	de afstand van het brandpunt F tot het midden van de lens.

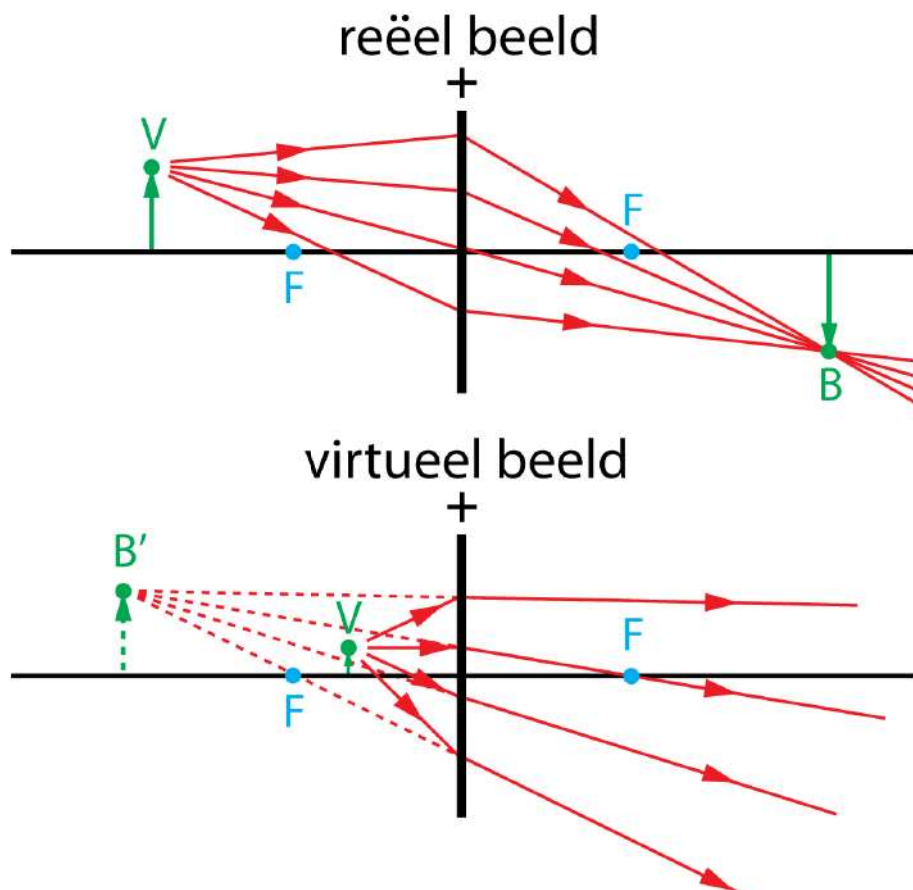


Figuur 41
Voorwerpsafstand v ,
beeldafstand b en
brandpuntsafstand f .

De voorwerpsafstand v speelt een belangrijke rol bij het maken van een afbeelding. Als bij een positieve lens v groter is dan f komen de lichtstralen achter de lens weer samen en ontstaat er een **reëel beeld**. Als v kleiner of gelijk is aan f gebeurt dit niet. In dat geval ontstaat er een **virtueel beeld**. Bij een negatieve lens ontstaat er altijd een virtueel beeld.

Lichtstralen kunnen op drie manieren uit een positieve lens komen:

$v > f$	→	lichtstralen convergeren	→	reëel beeld
$v < f$	→	lichtstralen divergeren	→	virtueel beeld
$v = f$	→	lichtstralen evenwijdig	→	geen beeld



Figuur 42
Reëel en virtueel
beeld bij een
positieve lens.

Een reëel beeld kan worden afgebeeld op een scherm. Een virtueel beeld kan niet worden afgebeeld maar kun je wel zien. Je hersenen gaan er van uit dat lichtstralen in een rechte lijn gaan. Je verlengt de lichtstralen die door de lens zijn gebroken naar achteren en waar de verlengde lichtstralen elkaar snijden zie je de afbeelding. Maar in werkelijkheid bevindt het voorwerp zich niet op deze plaats.

Reëel beeld

Lichtstralen uit voorwerpspunt V worden door een positieve lens samen-gebracht in beeldpunt B → punt B is het reële beeld van punt V.

Virtueel beeld

Lichtstralen uit voorwerpspunt V komen na de lens NIET meer samen. De naar achteren verlengde lichtstralen snijden elkaar in virtueel beeldpunt B' → punt B' is het virtuele beeld van punt V.

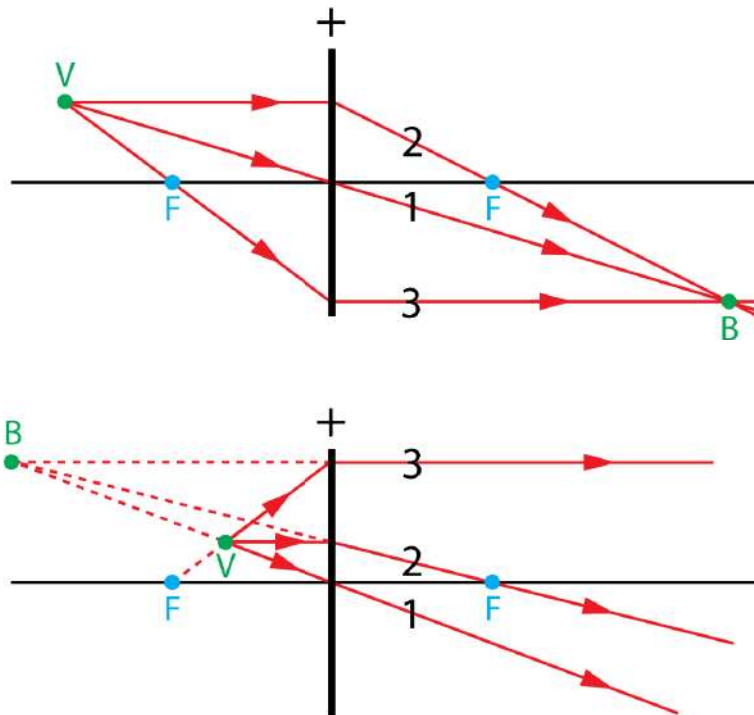
Constructiestralen voor positieve lenzen

Weet je V en moet je B bepalen of omgekeerd dan kan dat alleen als je de ligging van het brandpunt F weet. Je kunt dan gebruik maken van **constructiestralen**. Dat zijn speciale lichtstralen waarvan je weet hoe ze door de lens gaan.

Constructiestralen voor positieve lenzen

- 1 Lichtstralen door het optisch midden van de lens worden niet gebroken.
- 2 Lichtstralen komend evenwijdig aan de hoofdas gaan na de lens door F.
- 3 Lichtstralen komend door F zijn na de lens evenwijdig aan de hoofdas.
- 4 Evenwijdige stralen gaan na de lens door een bijbrandpunt.

	Lichtstraal in	Lichtstraal uit
1	door het optisch middelpunt	wordt niet gebroken
2	evenwijdig aan de hoofdas	door het brandpunt
3	door het brandpunt	evenwijdig aan de hoofdas
4	evenwijdig aan een bijas	door het bijbrandpunt



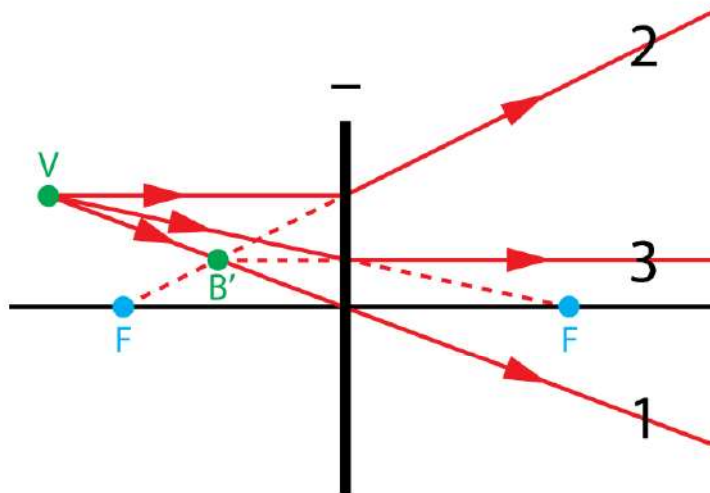
Figuur 43
Constructiestralen
voor een positieve
lens.

Beeldvorming bij een negatieve lens

Constructiestralen voor negatieve lenzen

- 1 Lichtstralen door het optisch midden van de lens worden niet gebroken.
- 2 Lichtstralen komend evenwijdig aan de hoofdas gaan na de lens alsof ze uit F vóór de lens komen.
- 3 Lichtstralen gericht op F achter de lens zijn na de lens evenwijdig aan de hoofdas.
- 4 Evenwijdige stralen gaan na de lens alsof ze uit een bijbrandpunt vóór de lens komen.

	Lichtstraal in	Lichtstraal uit
1	door het optisch middelpunt	wordt niet gebroken
2	evenwijdig aan de hoofdas	weg van het brandpunt vóór de lens
3	gericht op het brandpunt achter de lens	evenwijdig aan de hoofdas
4	evenwijdig aan een bijas	weg van het bijbrandpunt vóór de lens



Figuur 44
Constructiestralen
voor een negatieve
lens.

Beelden gemaakt met negatieve lenzen hebben de volgende eigenschappen:

- het beeld is altijd virtueel
- het beeld staat altijd rechtop
- het beeld is altijd verkleind
- hoe kleiner v hoe groter het virtuele beeld
- ook als $v = f$ wordt er een verkleind virtueel beeld gevormd

OPMERKINGEN

- De regels voor lichtbreking in positieve en negatieve lenzen gelden alleen voor dunne lenzen. Bij dikke lenzen klopt het niet precies. De afwijking heet **sferische aberratie**.
- Omdat de brekingsindex afhankelijk is van de kleur heeft iedere kleur een iets andere brandpuntsafstand. Dit heet **chromatische aberratie**.

8.5 De plaats van het beeld berekenen

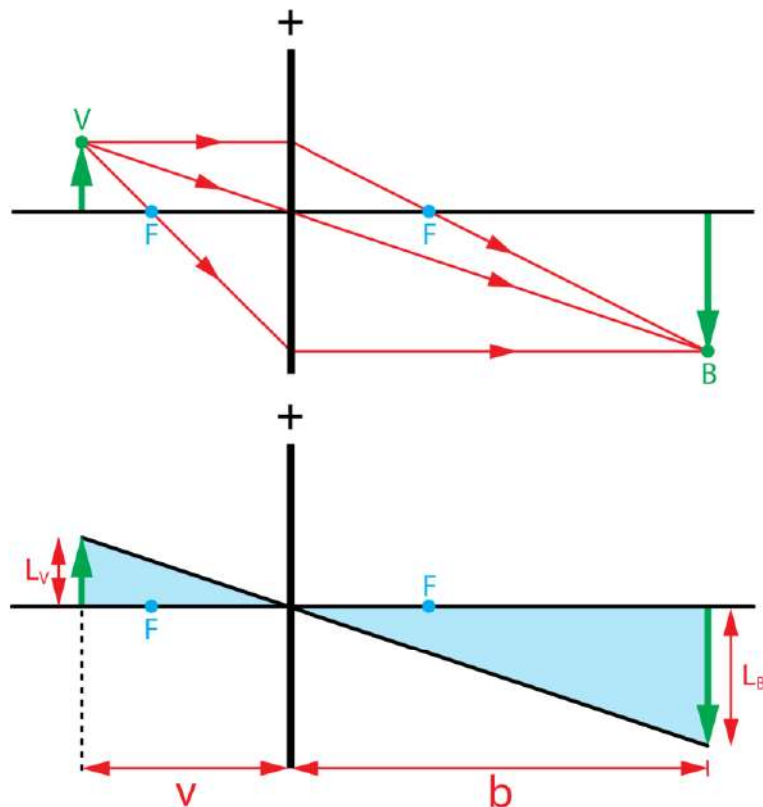
Lineaire vergroting

De lineaire vergroting N geeft aan hoeveel keer het beeld groter (of kleiner) is dan het voorwerp. Het woord lineair zegt dat het om de vergroting van de lengte of de breedte gaat en niet de vergroting van de oppervlakte of het volume.

De lineaire vergroting wordt bepaald door de voorwerpsafstand v en de beeldafstand b . Zoals in figuur 45 is te zien zijn de blauwe driehoeken gelijkvormig. De verhouding L_V / v is daarom gelijk aan de verhouding L_B / b .

Er geldt: $\frac{L_V}{v} = \frac{L_B}{b} \rightarrow \frac{L_B}{L_V} = \frac{b}{v}$

$$N = \frac{\text{lengte beeld}}{\text{lengte voorwerp}} = \frac{L_B}{L_V} = \frac{b}{v}$$



Figuur 45
Vergroting $\rightarrow$
 $N = L_B / L_V = b / v$

De formule voor de vergroting geldt voor reële en voor virtuele beelden.

$N > 1 \rightarrow$ beeld is groter dan het voorwerp

$N < 1 \rightarrow$ beeld is kleiner dan het voorwerp

$N = 1 \rightarrow$ beeld is even groot als het voorwerp

Voor v en b moeten altijd positieve getallen worden ingevuld.

N is altijd een positief getal zonder eenheid.

De lensformule

Met constructiestralen kan de plaats van het beeld worden bepaald. Het is ook mogelijk om de plaats van het beeld te berekenen. De formule die je hiervoor nodig hebt is de **lensformule**. Deze formule kunnen we niet bewijzen, omdat dat te ingewikkeld is. Bij het bewijs moet je de wet van Snellius toepassen op een bolvormig oppervlak. Verder moet je de dikte van de lens verwaarlozen.

De lensformule:

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

- v is de voorwerpsafstand in centimeter (cm) of meter (m)
- b is de beeldafstand in centimeter (cm) of meter (m)
- f is de brandpuntsafstand in centimeter (cm) of meter (m)

OPMERKING

Je moet bij v, b en f altijd dezelfde eenheid invullen (alles in cm of in m).

De lensformule geldt voor zowel positieve als negatieve lenzen. Voor v vul je altijd een positief getal in. Als het beeld reëel is heeft b een positieve waarde en als het beeld virtueel is heeft b een negatieve waarde. Gebruik je de lensformule voor een negatieve lens, dan moet je voor f een negatief getal invullen. Omdat bij een negatieve lens altijd een virtueel beeld ontstaat, krijgt b nu altijd een negatieve waarde.

Positieve lens

f is positief en v is positief

- reëel beeld → b is positief
- virtueel beeld → b is negatief

Negatieve lens

f is negatief en v is positief

- reëel beeld → onmogelijk
- virtueel beeld → b is negatief

De sterkte van een lens

De sterkte van de lens wordt aangegeven met hoofdletter S en heeft als eenheid de dioptrie (dpt). De lenssterkte bereken je door 1 te delen door de brandpuntsafstand. De brandpuntsafstand moet in dit geval altijd in meter worden ingevuld.

$$S = \frac{1}{f}$$

- S is de lenssterkte in dioptrie (dpt)
- f is de brandpuntsafstand in meters (m)

De lensformule kan ook worden opgeschreven als $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = S$

Omdat bij de formule met S de meter is gebruikt moet je ook de afstanden v en b in meters invullen.

VOORBEELD een vergroting maken

Met een positieve lens wil je een voorwerp dat op 20 cm afstand van de lens staat 4 keer vergroot op een scherm afbeelden.

Bereken de beeldafstand.

- $v = 20 \text{ cm}$ | $N = 4$ | $f = \dots \text{ cm}$
- $N = \frac{b}{v} \rightarrow 4 = \frac{b}{20} \rightarrow b = 80 \text{ cm}$

Bereken de brandpuntsafstand van de lens.

- $v = 20 \text{ cm}$ | $b = 80$ | $f = \dots \text{ cm}$
- $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{20} + \frac{1}{80} = \frac{1}{f}$
- noemers gelijk maken $\rightarrow$
- $\frac{4}{80} + \frac{1}{80} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{5}{80} = \frac{1}{f}$
- $f = \frac{80}{5} = 16 \text{ cm}$

Bereken de lenssterkte.

- $f = 16 \text{ cm}$ | $S = \dots \text{ dpt}$
- $S = \frac{1}{f}$ (*f moet in meter*)
- $S = \frac{1}{0,16} = 6,25 \text{ dpt}$

Combinatie van de vergrotingsformule en de lensformule

Soms komt het voor dat je informatie hebt over de vergroting van de afbeelding en de sterkte van de lens maar niet over de afstanden v of b . In dat geval moet je de vergrotingsformule combineren met de lensformule. Je vindt dan twee nieuwe formules. Deze formules gelden zowel voor positieve als voor negatieve lenzen. Waar je goed op moet letten is om bij een negatieve lens een negatief getal voor f in te vullen en bij een virtueel beeld een negatief getal voor b .

$$\text{Reëel beeld} \quad b = f \cdot (1 + N) \quad \text{en} \quad v = \frac{f \cdot (1 + N)}{N}$$

$$\text{Virtueel beeld} \quad b = f \cdot (1 - N) \quad \text{en} \quad v = \frac{-f \cdot (1 - N)}{N}$$

BEWIJS reëel beeld

- $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$
- $\frac{b}{v} = N \rightarrow \frac{1}{v} = \frac{N}{b}$
- $\frac{N}{b} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1+N}{b} = \frac{1}{f} \rightarrow b = f \cdot (1+N)$
- $v = \frac{b}{N} \rightarrow v = \frac{f \cdot (1+N)}{N}$

BEWIJS virtueel beeld

- $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$
- virtueel beeld $\rightarrow b$ is een negatief getal
- alleen positieve getallen in de formule voor N invullen
- $\frac{-b}{v} = N \rightarrow \frac{1}{v} = \frac{N}{-b} = \frac{-N}{b}$
- $\frac{-N}{b} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1-N}{b} = \frac{1}{f} \rightarrow b = f \cdot (1-N)$
- $v = \frac{-b}{N} \rightarrow v = \frac{-f \cdot (1-N)}{N}$

VOORBEELD bereken b en v bij een reëel beeld

Met een positieve lens met $f = 20$ cm wordt een reëel beeld gevormd met een vergroting van $N = 2,5$.

Bereken de beeldafstand.

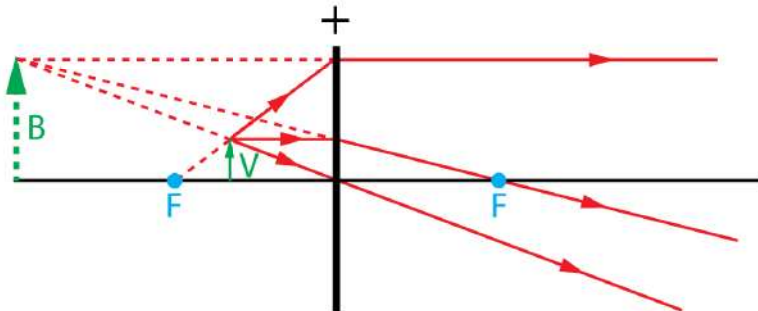
- $f = 20$ cm | $N = 2,5$ | $b = \dots$ cm
- $b = f \cdot (1 + N)$
- $b = 20 \cdot (1 + 2,5) = 70$ cm ($b > 0$, klopt want het beeld is reëel)

Bereken de voorwerpsafstand.

- $v = \frac{b}{N} \rightarrow v = \frac{70}{2,5} = 28$ cm ($v > f$, klopt want het beeld is reëel)

Een loep

Een loep is een sterke positieve lens. Kijk je door de loep naar een voorwerp dan zie je een vergroot virtueel beeld. Dit virtuele beeld staat altijd rechtop. Zie figuur 46.



Figuur 46
Lichtstralen door een loep.

VOORBEELD een loep: bereken b en v bij een virtueel beeld

Met een positieve lens met $f = 20$ cm wordt een virtueel beeld gevormd met een vergroting $N = 2,5$.

Bereken de beeldafstand.

- $f = 20$ cm | $N = 2,5$ | $b = \dots$ cm
- $b = f \cdot (1 - N)$
- $b = 20 \cdot (1 - 2,5) = -30$ cm ($b < 0$, klopt want het beeld is virtueel)

Bereken de voorwerpsafstand.

- $v = \frac{-b}{N} \rightarrow v = \frac{30}{2,5} = 12$ cm ($v < f$, klopt want het beeld is virtueel)

VOORBEELD virtueel beeld met een negatieve lens

Met een negatieve lens met $f = 20 \text{ cm}$ wordt een beeld gevormd met $N = 0,8$.

Bereken de beeldafstand.

- $f = 20 \text{ cm}$ | $N = 0,8$ | $b = \dots \text{ cm}$
- $b = f \cdot (1 - N)$
- negatieve lens $\rightarrow$ negatief getal voor f invullen
- $b = -20 \cdot (1 - 0,8) = -4 \text{ cm}$ ($b < 0$, klopt want het beeld is virtueel)

Bereken de voorwerpsafstand.

- in de vergrotingsformule alleen positieve getallen invullen
- $v = \frac{-b}{N} \rightarrow v = \frac{4}{0,8} = 5 \text{ cm}$