

R.T.

Nadruk verboden 57

Natuurkunde. Les 29

29.1. Beeldvorming bij de bolle spiegel

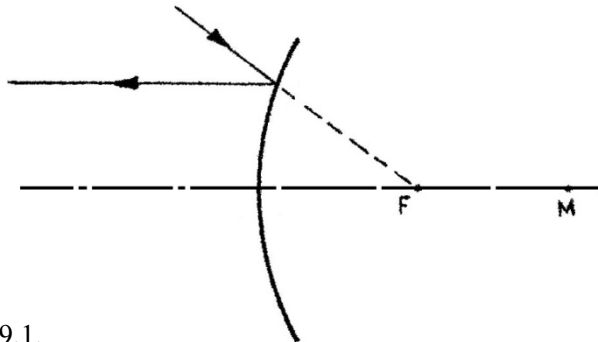


Fig. 29,1.

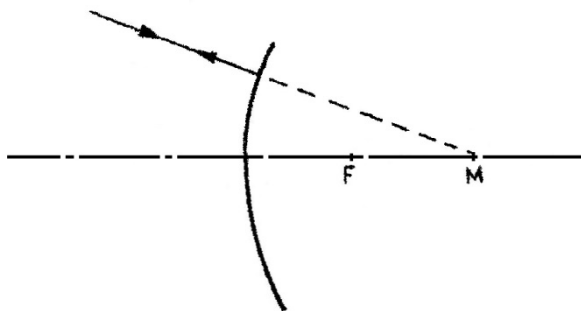


Fig. 29,2.

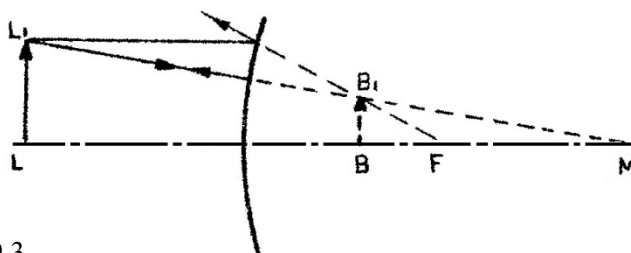


Fig. 29,3.

Bij de bolle spiegel geldt eveneens de formule $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$.

We rekenen hierbij alle afstanden voor de spiegel positief en alle afstanden achter de spiegel negatief.

In les 26, fig. 26,2 hebben we gezien dat lichtstralen, die evenwijdig aan de hoofdas invallen, teruggekaatst worden in één richting alsof zij uit het brandpunt F kwamen. Het verlengde van de teruggekaatste lichtstraal gaat dus door P .

Zo kunnen we omgekeerd zeggen dat een lichtstraal waarvan het verlengde door F gaat, na terugkaatsing evenwijdig aan de hoofdas loopt. (fig. 29,1).

Gaat van een lichtstraal het verlengde door M , dan zal deze lichtstraal langs dezelfde lijn in tegengestelde richting teruggekaatst worden (fig. 29,2).

De beeldvorming gaat analoog aan die bij de holle spiegel.

We gebruiken dus dezelfde stralen om de constructie van het beeld te verkrijgen (fig. 29,3). Het beeld is virtueel verkleind en rechtop. Dat het beeld virtueel is, wil zeggen, dat het niet op een scherm op te vangen is.

We kunnen het beeld wel zien. Als voorbeeld hiervan noemen we de autospiegel. Hierin wordt een verkleind beeld gevormd van een achter ons rijdende auto. Van een reëel voorwerp kan bij een bolle spiegel geen reëel beeld worden gevormd.

De bolle spiegel werkt divergerend (de teruggekaatste stralen lopen steeds verder uit elkaar). De lineaire vergroting is evenals bij de holle spiegel gegeven door $V = \frac{b}{v}$. Voor b en v nemen we de absolute waarde.

Is bij een vraagstuk de vergroting V gegeven, dan zijn er in het algemeen twee oplossingen mogelijk.

Immers: nemen we als vergroting 4 en als brandpuntsafstand 20 cm, dan is het mogelijk, dat:

$\frac{b}{v} = 4$ of $\frac{b}{v} = -4$. We zullen dit voor een holle spiegel laten zien.

We vinden dus:

$$1^{\circ} \quad V = \frac{b}{v} = 4, \text{ zodat } b = 4v. \text{ Nu is dan } \frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}; \frac{1}{4v} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} = \frac{1}{20} \text{ of:}$$

$$\frac{1+4}{4v} = \frac{1}{20}, \text{ dus } \frac{5}{4v} = \frac{1}{20} \text{ of } \frac{4v}{5} = 20 \text{ zodat } v = 25 \text{ cm en } b = 100 \text{ cm.}$$

$$2^{\circ} \quad V = \frac{b}{v} = -4, \text{ zodat } b = -4v. \text{ Nu is } \frac{1}{-4v} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} = \frac{1}{20} \text{ of:}$$

$$\frac{-1+4}{4v} = \frac{1}{20}, \text{ dus } \frac{4v}{3} = 20, \text{ zodat } v = 15 \text{ cm en } b = 60 \text{ cm.}$$

We vinden:

als $\frac{b}{v}$ positief is, dan is het beeld omgekeerd.

als $\frac{b}{v}$ negatief is, dan is het beeld rechtopstaand.

Ook bij de bolle spiegel vinden we twee oplossingen als de vergroting gegeven is. Nemen we hetzelfde getallenvoorbeeld als hierboven, dan geldt:

als $V = +4$; $f = -20 \text{ cm}$ (bij een bolle spiegel f negatief). $V = \frac{b}{v} = 4$ of:

$$b = 4v, \text{ dus } \frac{1}{4v} + \frac{1}{v} = \frac{1}{-20}. \text{ Hieruit volgt } v = -25 \text{ en } b = -100.$$

als $V = -4$ en $f = -20 \text{ cm}$, dan $\frac{b}{v} = -4$, dus $b = -4v$ en $\frac{1}{-4v} + \frac{1}{v} = \frac{1}{-20}$. waaruit volgt:
 $v = -15$ en $b = +60$.

Weer geldt: als $\frac{b}{v}$ positief is, dan is het beeld omgekeerd.

als $\frac{b}{v}$ negatief is, dan is het beeld rechtopstaand.

Zouden we de lichtstralen na terugkaatsing op een holle of bolle spiegel weer op een holle of bolle spiegel opvangen, dan zal het beeld dat door de eerste spiegel gevormd wordt, als voorwerp voor de tweede spiegel fungeren. Er kan dan weer een vergroting optreden. Wordt het voorwerp nu door verschillende spiegels resp. weer opgevangen en teruggekaatst, dan geldt voor de uiteindelijke vergroting de volgende formule:

$$V = V_1 \times V_2 \times V_3 \times \dots$$

Voorbeeld: Stel $V_1 = 4$; $V_2 = 3$; $V_3 = 5$. Dit wil zeggen, dat het eerste beeld $4 \times$ zo groot is als het voorwerp. De tweede spiegel vergroot dit beeld nog eens $3 \times$ en de derde spiegel het tweede beeld nog eens $5 \times$. Dan is de totale vergroting $V = 4 \times 3 \times 5 = 60$.

29.2. Sferische aberratie

De voorwaarde voor de formule $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ geldt alleen als voldaan is aan de voorwaarde, dat de spiegelopening klein is. Is hieraan niet voldaan, dan gaan lichtstralen van een punt uitgaande na de terugkaatsing niet meer door een punt. Deze afwijking heet de sferische aberratie.

Deze afwijking is weg te werken door het invoeren van een diafragma (kleine opening om de stralen door te laten). Dit diafragma houdt de randstralen tegen, waardoor weer praktisch aan de voorwaarde kleine spiegelopening wordt voldaan. Een nadeel hiervan is dat het beeld, dat gevormd wordt veel van zijn lichtsterkte verliest. Een andere methode om de sferische aberratie kwijt te raken is te verkrijgen door de spiegel niet bolvormig te slijpen. Het beeld blijft nu lichtsterk. Het is echter een dure methode.

Ter oefening maken de opgaven 231 t/m 235.

Oplossingen inzenden van de opgaven 236 t/m 240.

30.1. Lichtbreking

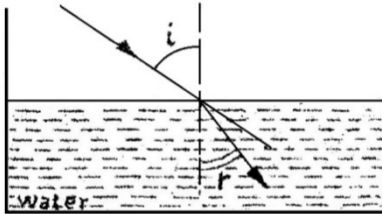


Fig. 30,1.

Een lichtstraal, die door glas of water gaat, ondervindt op het grondvlak breking. In fig. 30,1 is een lichtstraal getekend, die onder een hoek i met de normaal in het wateroppervlak treedt. Op de scheiding tussen lucht en water vertoont de lichtstraal een knik, de lichtstraal wordt hier gebroken.

De hoek i heet de invalshoek. De hoek tussen de lichtstraal in het water en de normaal heet de brekingshoek. Deze hoek stelt men gewoonlijk voor door de letter r van refractie (refractie = breking).

Gaat een lichtstraal van lucht naar water, dan breekt de lichtstraal naar de normaal toe, d.w.z.: $r < i$.

Is de invalshoek gelijk aan nul, dus valt de lichtstraal loodrecht op het wateroppervlak, dan treedt geen breking op, dus:

Bij loodrechte inval gaat een lichtstraal ongebroken door.

Gaat een lichtstraal in omgekeerde zin, dus vanuit het water naar de lucht, dan breekt de lichtstraal van de normaal af, dus $r < i$.

De breking en de terugkaatsing, die aan een grensvlak optreden, veroorzaken beide een verandering in de richting van een lichtstraal. Daardoor krijgt men het voorwerp op een andere plaats te zien dan waar het in werkelijkheid is. Bij een spiegel ziet men het voorwerp achter de spiegel, terwijl het voorwerp zich ervoor bevindt. Onder water ziet men een voorwerp hoger dan het in werkelijkheid is.

Hoeveel dit voorwerp hoger ligt, is afhankelijk van de plaats waar het oog zich bevindt. (fig. 30,2.)

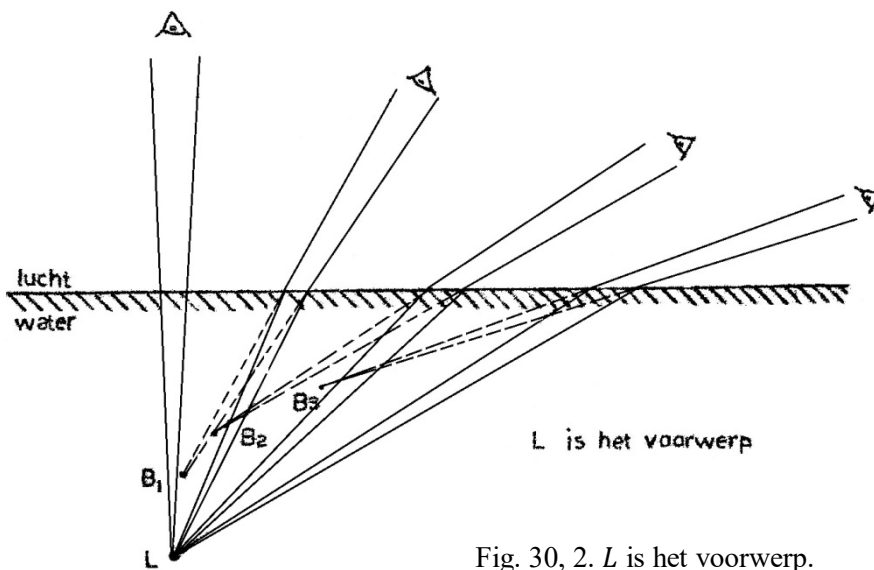


Fig. 30, 2. L is het voorwerp.

Het oog is op drie verschillende plaatsen getekend:

B_1 , B_2 en B_3 zijn de beelden die het oog resp. van het voorwerp L ziet.

Ten gevolge van de lichtbreking lijkt een in het water staande stok gebroken (fig. 30,3). Elk der punten van de stok, dat onder water ligt, lijkt hoger te liggen, waardoor men de stok ziet zoals in fig. 30,3 getekend

is. Ten gevolge van de straalbreking ziet men een ster hoger aan de hemel dan hij in werkelijkheid is. dit komt omdat de dichtheid van de lucht naar de aarde toe geleidelijk toeneemt, waardoor de invallende lichtstralen gebroken worden.

30.2. Wetten van Snellius

De Nederlandse natuurkundige Snellius ontdekte de navolgende wetten, die naar hem de wetten van Snellius zijn genoemd.

- 1^e. De invallende straal; de normaal en de gebroken straal liggen in een plat vlak.
- 2^e. De sinus van de hoek van inval gedeeld door de sinus van de hoek van breking is voor iedere twee tussenstoffen een bepaald getal.

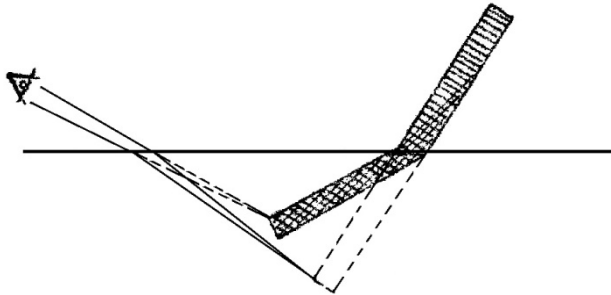


Fig. 30,3.

Dit getal, dat aangegeven wordt door de letter n heet de brekingsindex.

Dus geldt: $\frac{\sin i}{\sin r} = n.$

Bij de overgang van lucht naar glas bv. is de brekingsindex $\frac{3}{2}$, dus:
 $n_{\text{lucht} \rightarrow \text{glas}} = \frac{3}{2}$. Zo is: $n_{\text{lucht} \rightarrow \text{water}} = \frac{4}{3}$ en: $n_{\text{water} \rightarrow \text{glas}} = \frac{9}{8}$.
 Verder is: $n_{\text{glas} \rightarrow \text{lucht}} = \frac{2}{3}$; $n_{\text{water} \rightarrow \text{lucht}} = \frac{3}{4}$.

Algemeen geldt:

De brekingsindex van een stof I naar een stof II is de omgekeerde waarde van de brekingsindex van stof II naar stof I . In formulevorm: $n_{I \rightarrow II} = \frac{1}{n_{II \rightarrow I}}$

Als men spreekt van de brekingsindex van glas bedoelt men daarmee steeds de brekingsindex van lucht naar glas en niet van glas naar lucht. Ook bij andere stoffen heeft de gegeven brekingsindex steeds betrekking op de overgang van lucht naar die stof. In de navolgende tabel zijn de brekingsindices van enkele stoffen gegeven.

| | | | |
|---------|-----|---------|-----|
| ether | 1,4 | kwarts | 1,5 |
| alcohol | 1,4 | ooglens | 1,4 |
| diamant | 2,4 | ijs | 1,3 |
| glas | 1,6 | water | 1,3 |

We komen nu nog tot de volgende belangrijke regels:

Bij een brekingsindex groter dan 1 ontstaat een breking naar de normaal toe; men zegt dan, dat de tweede stof optisch dichter is dan de eerste stof. Is $n < 1$ dan heeft men een breking van de normaal af; men zegt dan, dat de tweede stof optisch minder dicht is dan de eerste.

Ter oefening maken de opgaven 241 t/m 245.
 Oplossingen inzenden van de opgaven 246 t/m 250.

31.1. Breking en terugkaatsing bij een vlakke plaat

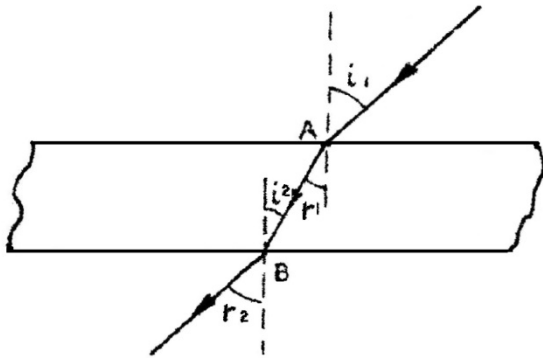


fig. 31,1.

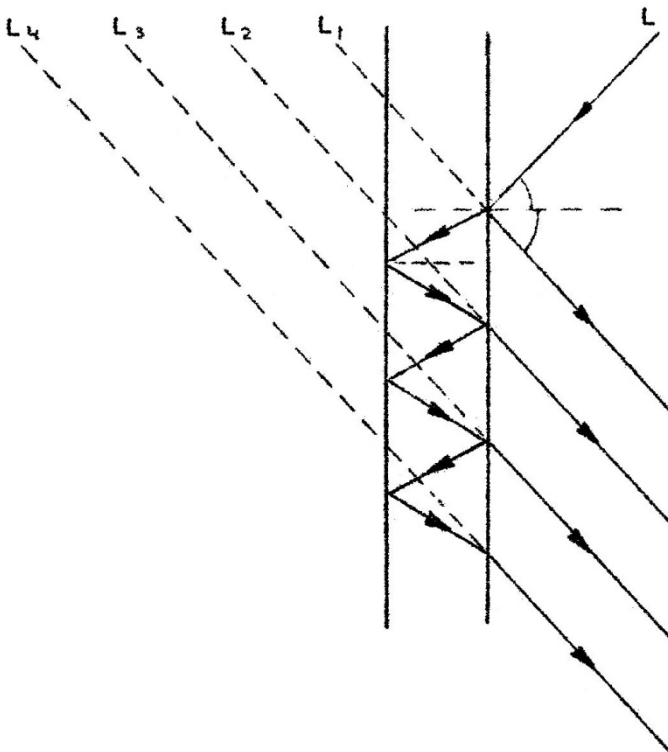


Fig. 31,2. Herhaalde terugkaatsing tegen voor- en achterkant bij een spiegel.

te zien bij een dikke spiegel of glasruit en als men scheef door het glas kijkt.

Verder dient het voorwerp waar we naar kijken dun of klein te zijn of spits toe te lopen, daar anders de verschillende beelden, die gevormd worden, elkaar te veel bedekken.

In fig. 31,1 is de weg getekend van een lichtstraal door een glazen plaat met evenwijdige zijvlakken.

De uit de glasplaat tredende straal ligt niet in het verlengde van de invallende straal, maar is evenwijdig aan zichzelf verschoven.

De grootte van de verschuiving is afhankelijk van de dikte van de glasplaat en van de hoek, waaronder de lichtstraal invalt. Een voorwerp dat men door een glazen ruit bekijkt, ziet men dus op een ietwat andere plaats dan waar het zich in werkelijkheid bevindt. In fig. 31,1 geldt dat:

$$\frac{\sin i_1}{\sin i_2} = n \text{ en } \frac{\sin i_2}{\sin r_2} = \frac{1}{n} . \text{ Hieruit}$$

$$\text{volgt: } \frac{\sin i_1}{\sin r_1} \times \frac{\sin i_2}{\sin r_2} =$$

$$= n \times \frac{1}{n} = 1 . \text{ Nu is: } \angle r_1 = \angle i_2 .$$

(2 // lijnen gesneden door een

derde), zodat: $\frac{\sin i_1}{\sin r_1} \times \frac{\sin i_2}{\sin r_2} = 1$

of: $\frac{\sin i_2}{\sin r_2} = 1$. Hieruit volgt:

$$\sin i_1 = \sin r_2, \text{ dus: } i_1 = r_2 .$$

Hiermee is dus bewezen dat de invallende straal evenwijdig is met de uittrekkende straal.

Een voorwerp, dat men door een glazen ruit bekijkt, ziet men bij nadere beschouwing gewoonlijk meer dan één keer. Ook bij een spiegel is dit het geval. Een van de beelden is veel lichtsterker dan de andere beelden. De andere lichtzwakkere beelden zijn ontstaan door herhaalde terugkaatsing tussen voor- en achterkant van de ruit of de spiegel (fig. 31,2 en fig. 31,3.)

De verschillende beelden die door herhaalde terugkaatsing tussen voor- en achterkant van een spiegel en een ruit ontstaan, krijgt men pas goed

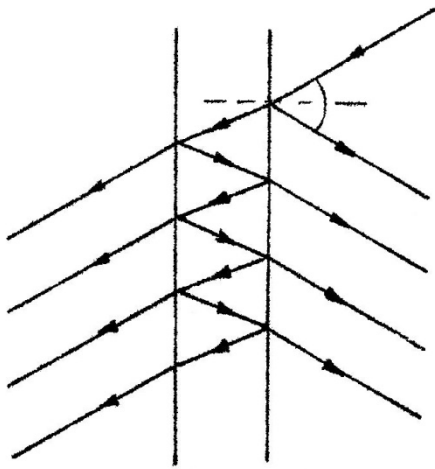


Fig. 31,3. Herhaalde terugkaatsing tegen voor- en achterkant bij een glazen ruit.

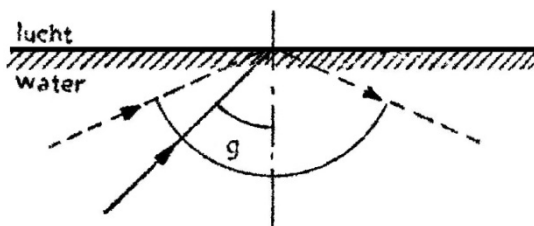


Fig. 31,4.

De brekingsindex voor water naar lucht is $\frac{3}{4}$, zodat voor de grenshoek geldt: $\sin g = \frac{3}{4}$, waaruit volgt: $g = 48^\circ$.

De brekingsindex voor glas naar lucht is $\frac{2}{3}$. Voor de grenshoek geldt dan: $\sin g = \frac{2}{3}$. Hieruit volgt: $g = 42^\circ$.

We komen nu tot de volgende belangrijke conclusie:

Totale terugkaatsing treedt alleen op bij overgang van een optisch dichtere stof naar een optisch minder dichte stof, terwijl bovendien de hoek van inval gelijk is of groter dan de grenshoek.

In de volgende les zullen we enige toepassingen van de totale reflectie behandelen.

Ter oefening maken de opgaven 251 t/m 255.
Oplossingen inzenden van de opgaven 256 t/m 260.

Als een lichtstraal loodrecht op een spiegel of een glazen ruit valt, zal er geen verschuiving optreden.

Kijken we dus naar een voorwerp dat zich loodrecht op de spiegel of de ruit bevindt, dan zullen we dus het optreden van meerdere beelden niet zien.

31. 2. Totale terugkaatsing

Komt een lichtstraal uit een optisch dichtere - aan het grensvlak van een optisch minder dichte stof, dan breekt de lichtstraal van de normaal af. De hoek van breking is dus groter dan de hoek van inval.

De brekingshoek kan op een bepaald moment 90° worden, terwijl de invalshoek dan kleiner dan 90° is.

Er treedt dan geen breking op.

De hoek van inval, die zo groot is, dat de gebroken straal juist langs het grensvlak zou scheren, heet de grenshoek g .

Dan is: $\angle r = 90^\circ$.

De formule $\frac{\sin i}{\sin r} = n$ (waarbij $n < 1$)

gaat dan over in: $\frac{\sin g}{\sin 90^\circ} = n$

of: $\sin g = n$.

Wordt de invalshoek groter dan de grenshoek, dan zullen de lichtstralen aan het grensvlak teruggekaatst worden.

Dit verschijnsel heet totale terugkaatsing of totale reflectie (zie fig. 31,4).

32.1. Toepassingen van de totale terugkaatsing

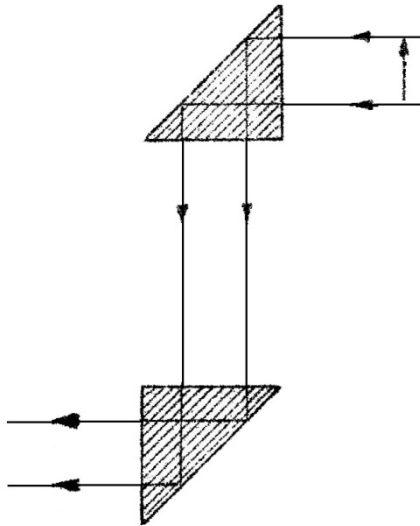


Fig. 32,1.

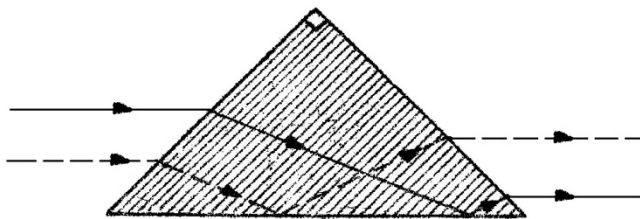


Fig. 32,2.

Een diamant, die in briljantvorm geslepen is, dankt zijn schittering aan herhaalde totale terugkaatsing. Door de grote brekingsindex van diamant is de grenshoek klein. Hierdoor wordt elke lichtstraal aan verscheidene grensvlakken totaal teruggekaatsd. Diamanten worden meestal dusdanig geslepen, dat een aan de bovenkant invallende lichtstraal alleen maar aan de bovenkant kan uittreden.

23.2. Breking door een prisma

In fig. 32,3 is een driezijdig glazen prisma getekend. De hoek, die de zijvlakken PQ en PR met elkaar maken, heet de brekende hoek van het prisma, dit is dus $\angle B$. De ribbe van het prisma, die in P loodrecht op het vlak van tekening staat, heet de brekende ribbe. De lichtstraal LA wordt bij A gebroken naar de normaal EF toe en gaat door het prisma volgens AC . Bij C breekt de lichtstraal van de normaal EG af en vervolgt zijn weg volgens GK . Het oog zal de lichtstraal dus bij K waarnemen alsof het uit M komt.

De hoek, die gevormd wordt door de invallende straal en de uiteindelijk uittredende straal heet de deviatiehoek of kortweg de deviatie. Dit is dus in fig. 32,3 de hoek HSK aangegeven door $\angle D$.

Als $\angle D$ minimaal is, dan spreekt men van minimale deviatie of minimum deviatie.

In een periscoop maakt men gebruik van totaal reflecterende prisma's met doorsneden, die gelijkbenige rechthoekige driehoeken zijn (fig. 32,1).

De lichtstralen die onder een hoek van 45° op de schuine vlakken invallen, worden totaal teruggekaatsd. De grenshoek voor glas immers bedroeg 42° .

Met twee spiegels, die onder een hoek van 45° opgesteld worden, zou men ook een periscoop kunnen maken. De lichtstralen zouden dan dezelfde gang hebben als die bij de prisma's. Door de herhaalde terugkaatsing in de spiegels krijgt men echter een minder scherp beeld dan bij de prisma's.

Een prisma wordt bv. ook gebruikt om in een projectielamp een verticale lichtbundel in een horizontale te doen veranderen. In fig. 32,2 is de stralengang getekend. In deze stand wordt het prisma gebruikt als omkeringsprisma (bv. voor de lens geplaatst van een projectielamp). Het beeld dat anders omgekeerd op het scherm zou komen, wordt nu door het prisma rechtop gezet.

In een waterstraal worden lichtstralen verscheidene malen teruggekaatsd. Dit lichteffect wordt vaak benut bij fontein.

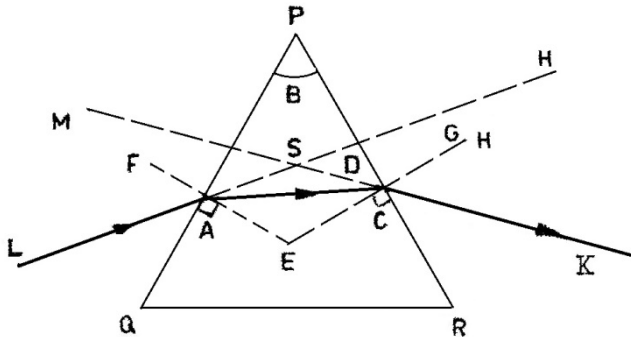


Fig. 32,3.

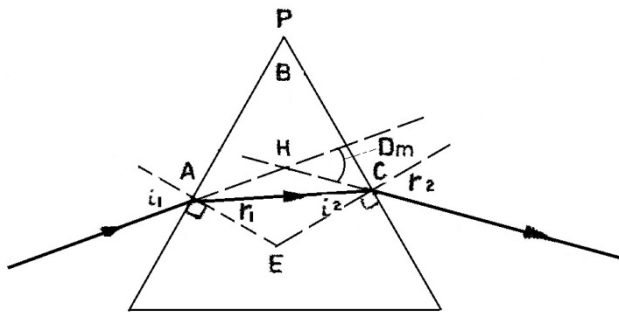


Fig. 32,4.

Verder is $r_1 + i_2 = 180^\circ - \angle E$.

In vierhoek $PAEC$ zijn $\angle PAE$ en $\angle PCE$ ieder 90° , zodat: $\angle E + \angle B = 180^\circ$

of $\angle B = 180^\circ - \angle E$, zodat: $\angle B = r_1 + i_2$ en daar $r_1 = i_2$ is $r_1 = \frac{1}{2} \angle B$.

Voor de hoek Dm vinden we nu: $\angle Dm = (i_1 + r_2) - \angle B$ en daar $i_1 = r_2$ is $\angle Dm = 2i_1 - \angle B$ of: $i_1 = \frac{1}{2} (\angle Dm + \angle B)$.

Vullen we de waarden voor i_1 en r_1 in, in de formule $n = \frac{\sin i_1}{\sin r_1}$, terwijl we de hoektekens weglaten, dan vinden we de volgende betrekking: $\frac{1}{2}$

$$n = \frac{\sin \frac{1}{2}(Dm + B)}{\sin \frac{1}{2}B}.$$

Voor prisma's met zeer kleine brekende hoek B mogen we de sinussen vervangen door de hoeken, mits deze in radialen zijn uitgedrukt. Dit geeft:

$$n = \frac{\frac{1}{2}(Dm + B)}{\frac{1}{2}B} = \frac{Dm + B}{B}$$

of:

$$Dm = (n - 1)B.$$

De waarde $(n - 1)$ heet het brekend vermogen.

Oplossingen inzenden van opgaven 261 t/m 263.

Dit gebeurt als de straal die het prisma doorloopt, evenwijdig met het grondvlak loopt.

Dit is in fig. 32,4 getekend.

De lichtstraal in het prisma snijdt een gelijkbenige driehoek af. De minimum deviatie is aangegeven door de hoek Dm .

Veronderstellen we dat de brekingshoek van het materiaal waaruit het prisma bestaat gelijk is aan n , dan geldt: $n = \frac{\sin i_1}{\sin r_1}$.

Nu is: $\angle PAC = \angle PCA$ en daar:

$\angle PAE = \angle PCA = 90^\circ$, volgt hieruit dat: $\angle CAE = \angle ACE$, dus: $\angle r_1 = \angle i_2$.

Daar $\frac{\sin i_1}{\sin r_1} = n$ en $\frac{\sin i_2}{\sin r_2} = \frac{1}{n}$ volgt hieruit:

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_1} \times \frac{\sin i_2}{\sin r_2} = 1 \text{ en daar } r_1 = i_2,$$

vinden we:

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_2} = 1, \text{ dus: } i_1 = r_2.$$

Daar $\angle Dm$ de buitenhoek is van ΔAHC , is:

$\angle Dm = \angle HAC + \angle HCA$. Maar:

$\angle HAC = i_1 - r_1$ en $\angle HCA =$

$= r_2 - i_2$, zodat: $\angle Dm =$

$= (i_1 - r_1) + (r_2 - i_2) =$

$= (i_1 + r_2) - (r_1 + i_2)$.

33.1. Kleurschifting of dispersie

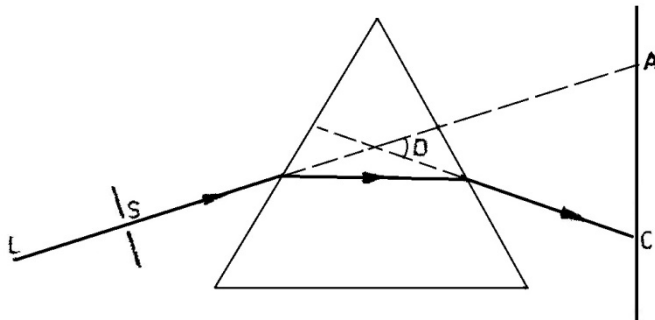


Fig. 33,1.

oranje, geel, groen, blauw en violet onderscheiden. Deze kleuren zijn ontstaan uit het witte licht, dat bij *S* uit de spleet is gekomen.

Wit licht is een verzameling van vele gekleurde lichtstralen.

Werken de kleuren van het spectrum tegelijktijd op het oog in, dan krijgt ons oog de indruk van wit licht.

Bij breking van het licht gaan de verschillende kleuren, die voor de breking dezelfde weg volgen, uit elkaar. Dit komt, omdat de brekingsindex voor de verschillende kleuren verschillend is.

Zo is bv. bij breking van lucht naar glas de brekingsindex voor rood licht 1,526, voor geel licht 1,530, voor groen licht 1,533, voor blauw licht 1,538 en voor violet licht 1,544.

De waarde, die voor de brekingsindex voor glas als 1,5 gegeven wordt, is dus een gemiddelde waarde van deze brekingsindices. Deze waarde is tevens afgerond. Als men een gedeelte van het spectrum d.w.z. een der kleuren van het spectrum, bv. de kleur groen door een spleet van een scherm laat gaan en daarna weer op een prisma laat vallen, treedt er in dit tweede prisma weer deviatie op. Er ontstaat echter geen kleurschifting meer (fig. 33,2). Na eenmaal kleurschifting is het licht niet meer te ontleden. Het licht, dat niet verder kan worden ontleed heet monochromatisch licht. In plaats van over kleurschifting spreekt men ook wel over dispersie.

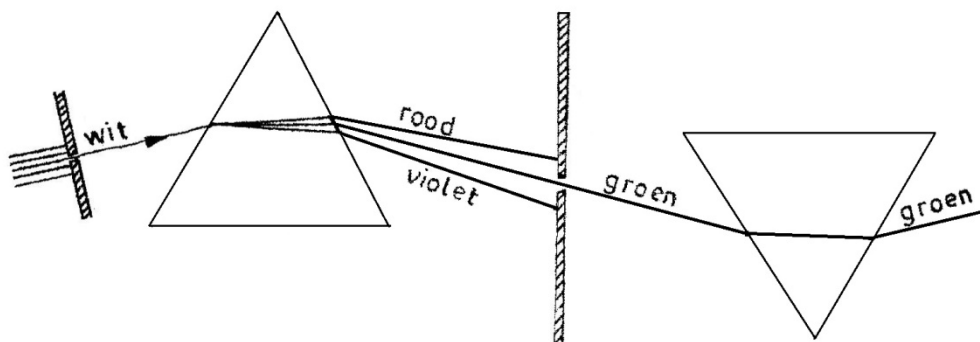


Fig. 33,2.

33.2. Kleuren

Wit licht kan ontstaan bv. door menging van alle spectrale kleuren. Het is echter ook mogelijk wit licht te verkrijgen door twee uitgezochte kleuren met elkaar te vermengen.

Mengt men bv. rood en groen met elkaar, dan verkrijgt men eveneens wit licht. Wit licht ontstaat ook als men bv. geel en blauw licht met elkaar vermengt.

Kleuren, die tezamen de indruk van wit licht teweeg brengen, heten complementaire kleuren.

Zien we een voorwerp bv. als rood, dan komt dit doordat van het op het voorwerp vallende witte licht slechts een gedeelte wordt teruggekaatst; dit teruggekaatste licht maakt op ons oog de indruk van rood licht. Vallen er op dit voorwerp geen rode stralen, dan kan dit voorwerp in het geheel geen stralen terugkaatsen. Het maakt dan op ons oog de indruk alsof het zwart is.

(bij het mengen van verf, bv. gele en blauwe verf, ontstaat een groene kleur. Dit komt, doordat de kleurkorrels het licht niet alleen terugkaatsen, maar ook ten dele doorlaten. Gele kleurkorrels bv. laten behalve geel, ook wat groen licht door.

In het mengsel van de twee soorten kleurkorrels geel en blauw, gaat het gele plus groene licht, dat door een gele kleurkorrel is doorgelaten, daarna door een blauwe kleurkorrel. Hierin wordt het geel geabsorbeerd, doch het groen doorgelaten. Daardoor is het uittredende licht groen van kleur.)

Als men een bundel wit licht eerst door een rood glaasje laat gaan en daarna op een prisma laat vallen, dan neemt men op het scherm achter het prisma niet alleen rood licht waar, maar ook nog wat geel, blauw en violet.

Het licht, dat door het rode glaasje wordt doorgelaten, is dus niet monochromatisch.

Geel licht, dat ontstaat als men wit licht door een geel glaasje laat vallen is evenmin monochromatisch. Bijna het gehele kleurenspectrum is nog aanwezig. Het gele filter heeft uit het witte licht een gedeelte geabsorbeerd, nl. van het blauwe en violette licht vrijwel alles, van de andere kleuren minder en van het geel het minste.

Hierdoor maakt het mengsel van kleuren, dat door het “geelfilter” wordt doorgelaten, op ons oog de indruk van geel.

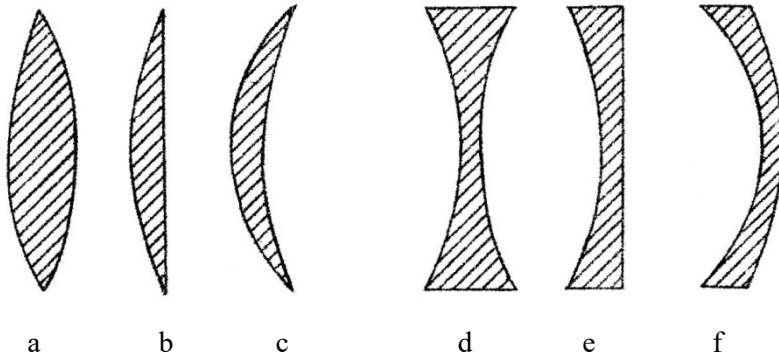
Oplossingen inzenden van de opgaven 264 t/m 265.

34.1. Lenzen

Een lens is een doorzichtig lichaam, meestal van glas dat begrensd wordt door bolvormige, vlakke of holvormige vlakken. Men onderscheidt verschillende soorten lenzen, die in 2 groepen worden onderverdeeld.

1°. De lenzen, die in het midden dikker zijn aan de randen. Dit zijn de bolle of convexe lenzen. Hierin onderscheiden we weer drie soorten, nl:

- a. Zijn de beide grensvlakken bol, dan is de lens dubbelbol of biconvex (fig. 34,1a).
- b. Is een der grensvlakken bol en het andere grensvlak plat, dan is de lens platbol of planoconvex (fig. 34,1b).
- c. Is een der grensvlakken bol en het andere hol, dan is de lens hol-bol of concaaf-convex (fig. 34,1c).



2°. De lenzen, die aan de randen dikker zijn dan in het midden. Dit zijn de holle of concave lenzen. Hierin onderscheiden we weer drie soorten:

- a. Zijn de beide grensvlakken bol, dan is de lens dubbelhol of biconcaaf (fig. 34,1d).
- b. Is een der grensvlakken hol en het andere grensvlak plat, dan is de lens plathol of planoconcaaf (fig. 43,1e).

Fig. 34,1. Zes soorten lenzen. a: dubbelbol; b: platbol; c: holbol
d: dubbelhol; e: plathol; f: bolhol.

c. Is een der grensvlakken hol en het andere bol, dan is de lens bolhol of convex-concaaf (fig. 34,1f).

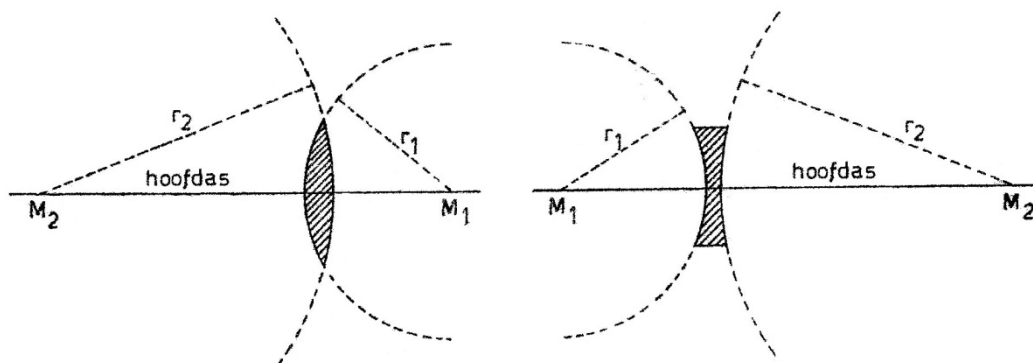


Fig. 34,2. Elke lens heeft een hoofdax, twee krommingsmiddelpunten M_1 en M_2 en twee kromtestralen r_1 en r_2 .

In fig. 34,2 zijn een biconvexe en een biconcave lens getekend. M_1 en M_2 zijn de middelpunten van de bolvormige grensvlakken, r_1 en r_2 de stralen. De verbindingslijn M_1M_2 van de twee middelpunten heet de hoofdas. De bolle en de holle lenzen gedragen zich t.o.v. een opvallende bundel evenwijdige lichtstralen principieel verschillend. Bij de bolle lens gaan de uittreedende lichtstralen naar elkaar toe (fig. 34,3a); bij een holle lens gaan ze steeds verder uit elkaar (fig. 34,3b). Het snijpunt van de uittreedende stralen bij de bolle lens is het punt F . Dit punt heet het brandpunt of focus van de lens.

De bundel stralen, die uit de bolle lens komt, gaat dus naar één punt toe. We noemen zo'n bundel een convergente bundel. De bolle lens convergeert, men zegt ook wel: de bolle lens is een convergente lens.

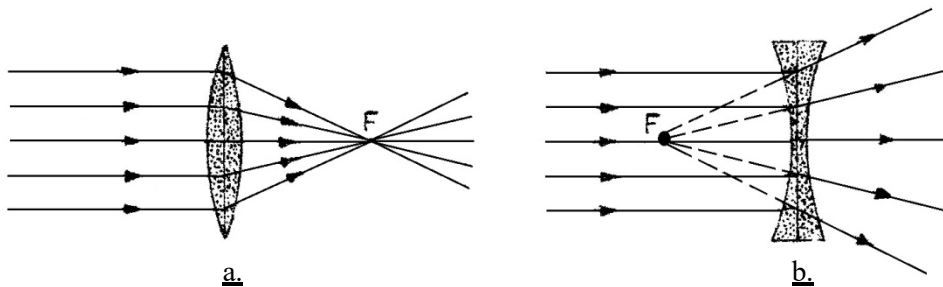


Fig. 34,3. a: Convergerende werking van een bolle lens. b: Divergerende werking van een holle lens.

Bij holle lenzen worden de opvallende evenwijdige stralen zodanig gebroken dat zij na uittreden van de lens uit elkaar gaan (fig. 34,3b). We zeggen dan, dat de uittreedende bundel divergeert. Een holle lens heeft dus een divergerende werking. De holle lens noemen we ook wel een divergente lens. Het snijpunt van de verlengden van de uittreedende stralen bij de divergente lenzen noemt men weer het brandpunt F (zie fig. 34,3b).

Bij de bolle lens gaan dus de gebroken stralen door het brandpunt, terwijl bij de holle lens de stralen als het ware uit het brandpunt komen.

Bij een brandglas, d.i. een bolle lens, concentreren de opvallende evenwijdige zonnestrallen zich na breking door de lens in het brandpunt, waar zij dan een voorwerp kunnen doen ontbranden. Keren we de lens om, zodat het licht nu op dat grensvlak binnentreedt, waar het eerst uittrad, dan convergeert de bundel eveneens. Ook dit snijpunt van stralen heet brandpunt of focus.

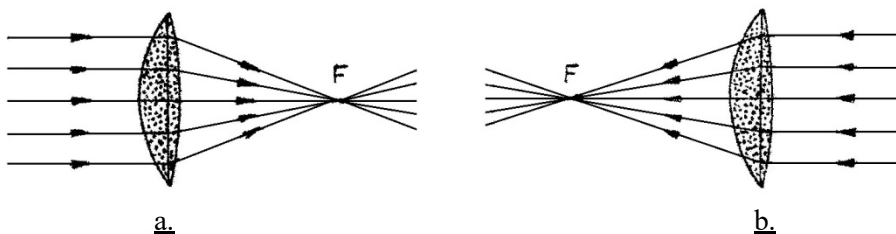


Fig. 34,4.

Een lens heeft dus twee brandpunten.

De afstand van het brandpunt tot de lens heet de brandpuntsafstand.

Deze afstand is voor beide brandpunten even groot (zie fig. 34,4).

35.1. Lenzen (vervolg)

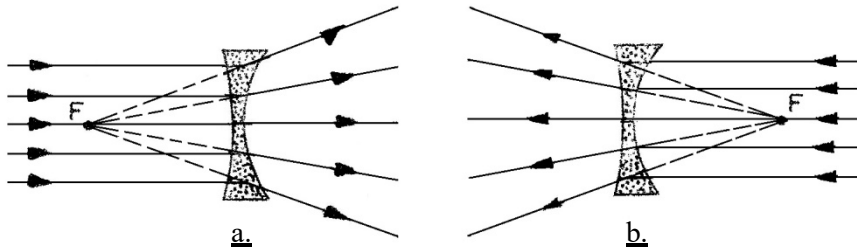


Fig. 35,1.

Zo'n brandpunt noemen we virtueel.

Holle lenzen bezitten evenals de bolle lenzen twee brandpunten. Deze beide brandpunten, die aan weerszijde van de lens liggen, liggen op gelijke afstand van de lens (fig. 35,1).

We kunnen de begrippen reëel en virtueel brandpunt ook anders realiseren. We zeggen dan:

Het reële brandpunt ligt achter de lens, dus aan de kant waar de lichtstralen na de breking naar toe gaan.

Het virtuele brandpunt ligt voor de lens, dus aan de kant waar de lichtstralen vandaan komen.

In het geval van het reële brandpunt noemt men de brandpuntsafstand positief, bij een virtueel brandpunt is de brandpuntsafstand negatief.

De brandpuntsafstand wordt aangegeven met de letter f .

Is bv. gegeven, dat de brandpuntsafstand f van de lens $+6\text{ cm}$ bedraagt, dan is dit een convergerende lens. in het geval van een divergerende lens is bv. $f = -8\text{ cm}$.

De convergerende- of divergerende werking van een lens is sterker naarmate de brandpunten dichter bij de lens liggen, dus naarmate de brandpuntsafstand f kleiner is.

De sterkte van een lens wordt uitgedrukt in dioptrieën.

Daar de sterkte van de lens groter wordt naarmate f kleiner wordt, geldt dus dat bij een brandpuntsafstand van f meter de sterkte van de lens $\frac{1}{f}$ dioptrieën bedraagt.

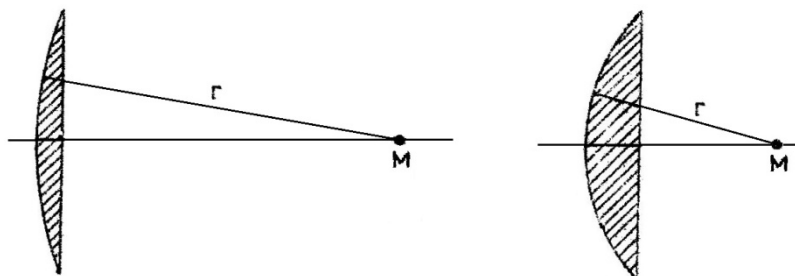


Fig. 35,2.

Bij bolle lenzen is de aanwezigheid van een brandpunt gemakkelijk aan te tonen. We zeggen dan, dat dit brandpunt reëel is.

Bij holle lenzen is het brandpunt niet op een scherm te vangen.

De sterkte van een lens is afhankelijk van de glassoort waarvan de lens gemaakt is en van de kromtestralen van de lens. Dus feitelijk afhankelijk van de bolling van de grensvlakken.

Beschouwen we twee platbolle lenzen van dezelfde glassoort, dan zal de brandpuntsafstand het kleinste zijn bij de lens met de kleinste kromtestraal. De sterkte van deze lens met de kleinste kromtestraal zal dan het grootst zijn (zie fig. 35,2).

35.2. Optisch middelpunt

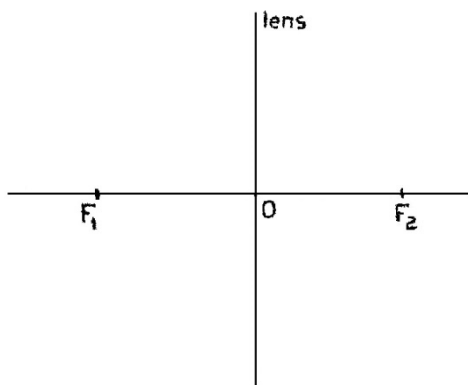


Fig. 35,3.

Het is gebruikelijk de lenzen voor te stellen door een rechte lijn, m.a.w. men verwaarloost de dikte van de lens t.o.v. de afmetingen van de lens. De lijn, waarop de brandpunten zich bevinden, noemen we de hoofdas. De hoofdas staat loodrecht op de lijn, die de lens voorstelt (fig. 35,3).

Het snijpunt van de hoofdas met de lijn, die de lens voorstelt, aangegeven met de letter *O*, heet het optisch middelpunt van de lens.

Nu geldt de volgende regel:

Alle stralen die door het optisch middelpunt van een lens gaan, gaan ongebroken door de lens.

In fig. 35,4 zijn twee lenzen getekend. Het punt *O* is weer het

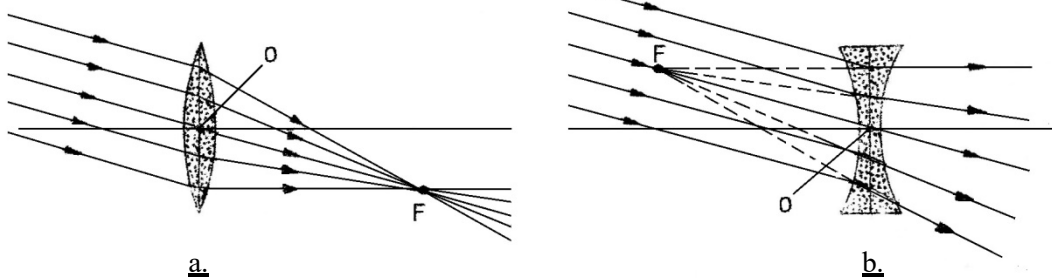


Fig.35,4.

optisch middelpunt. In deze figuur is een bundel scheef op de lens vallende lichtstralen getekend. Ook van deze bundel is er een straal die ongebroken doorgaat. We hebben reeds gezien, dat de lijn, die loodrecht op de beide grensooppervlakken staat, de hoofdas genoemd wordt. Alle andere lijnen, die door het optisch middelpunt gaan, heten bijassen. Het brandpunt dat op de hoofdas ligt, heet hoofdbrandpuntsafstand. Het hoofdbrandpunt wordt zo met deze naam aangegeven ter onderscheiding van de brandpunten op de bijassen.

Stellen we een lens voor door een lijntje, dan geven we met een + -teken boven het lijntje aan, dat men met een bolle lens te doen heeft.

Een - -teken boven de lens geeft aan dat de lens hol is.

36.1. Constructiestralen

Men heeft bij het construeren van een beeld door een lens de beschikking over drie constructiestralen, namelijk:

1. Een lichtstraal door het optisch middelpunt van een lens gaat ongebroken door de lens.
2. Een lichtstraal, die evenwijdig aan de hoofdas invalt, wordt gebroken door het brandpunt.
3. Een lichtstraal, die door het brandpunt van de lens gaat, treedt na breking evenwijdig aan de hoofdas uit.

Van deze constructiestralen behoeven we er slechts twee te gebruiken. Het snijpunt van de uittredende stralen bepaalt de ligging van het beeldpunt. De derde constructiestraal kunnen we eventueel ter controle gebruiken.

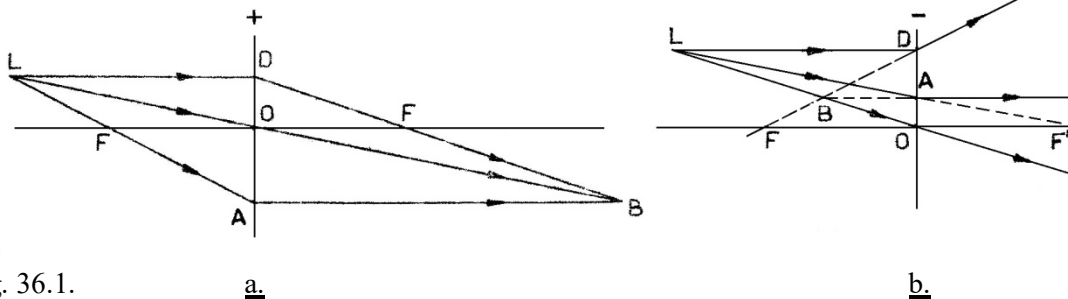


Fig. 36.1.

In 36,1 zijn voor een bolle en een holle lens drie constructiestralen getekend. De lichtstralen komen uit een lichtpunt L en vormen een beeldpunt B .

Meestal gebruikt men als lichtbron niet een enkel lichtend punt, doch een lichtend voorwerp. Men construeert dan van bv. twee punten van het voorwerp het beeldpunt om het beeld te vinden. De verzameling van alle beeldpunten vormt het beeld. Het is meestal voldoende om het beeld te vinden door het hoogste en het laagste punt van het voorwerp te nemen en hiervan de beeldpunten te construeren.

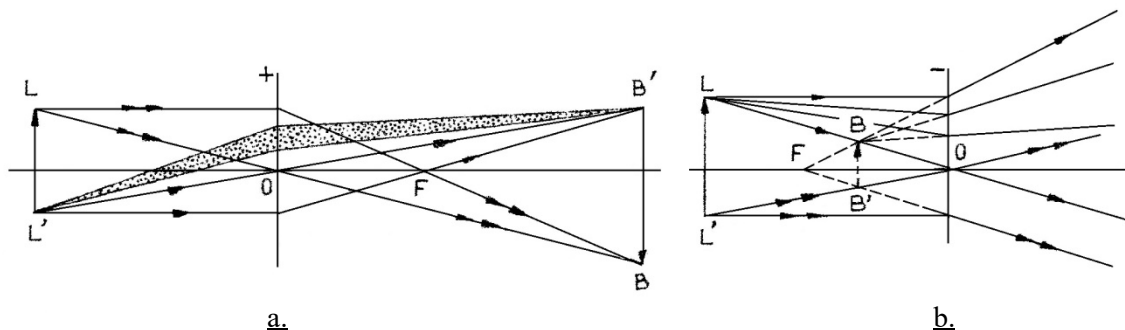


Fig. 36,2

In fig. 36,2 is de stralengang getekend van een voorwerp LL' , bij een positieve en een negatieve lens, voor de constructie van het beeld BB' . In fig. 36,2 is tevens een stralenbundel getekend. Deze bundel gaat uit van het punt L' , wordt door de lens gebroken en vormt daarna het punt B' . Een bolle lens maakt van de divergerende bundel uit L' een convergerende bundel naar B' , een holle lens maakt de divergerende bundel nog sterker divergerend, zodat deze uit het punt B' schijnt te komen.

Staat het voorwerp loodrecht op de hoofdas, dan staat het beeld ook loodrecht op de hoofdas. Van deze eigenschap maken we gebruik als we het beeld moeten construeren van een lichtpunt L dat op de hoofdas ligt (fig. 36,3).

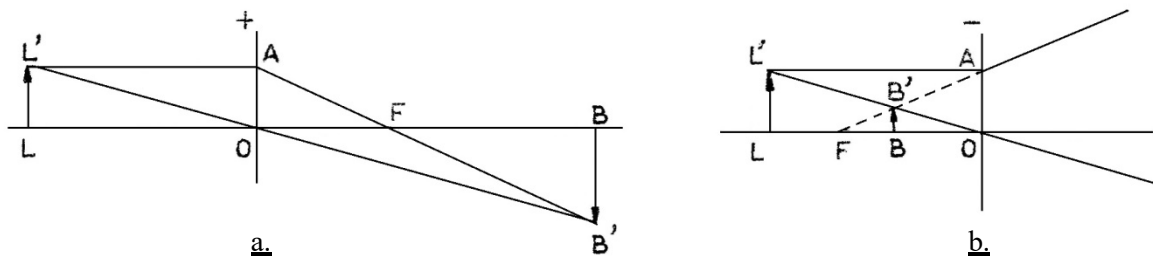


Fig. 36,3.

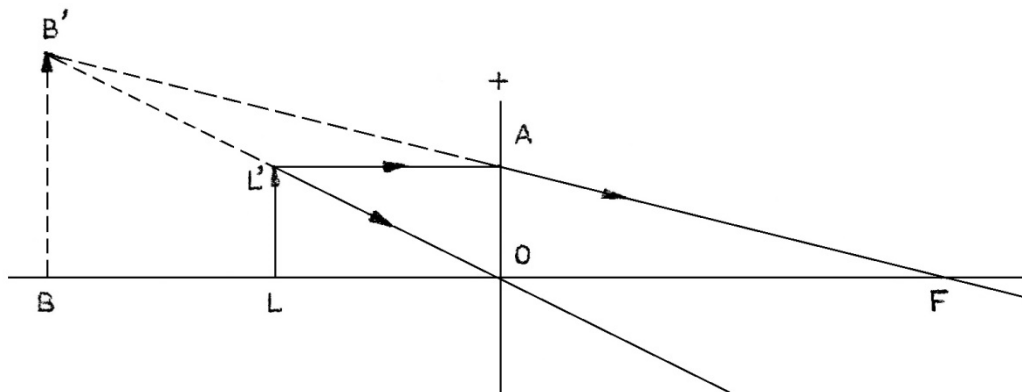


Fig. 36,4.

We kunnen de drie constructiestralen dan niet gebruiken, daar zij alle drie samenvallen en dus geen snijpunt vormen. We nemen dan een voorwerp aan loodrecht op de hoofdas en noemen dit LL' . Van het lichtpunt L' construeren we het beeldpunt B' en laten vanuit dit punt een loodlijn op de hoofdas neer. Het snijpunt van deze loodlijn met de hoofdas geeft het punt B , dat het beeldpunt is van L . In alle voorgaande constructies vormde een negatieve lens altijd een virtueel beeld, terwijl een positieve lens altijd een reëel beeld vormde.

Dit laatste is echter niet altijd het geval. Als we bijvoorbeeld een voorwerp dicht bij een bolle lens plaatsen en wel binnen brandpuntsafstand, dan krijgen we geen reëel beeld, doch een virtueel vergroot rechtopstaand beeld (zie fig. 36,4). De bolle lens gebruiken we in dit geval als loep.



37.1 Afleiding van de lenzenformule

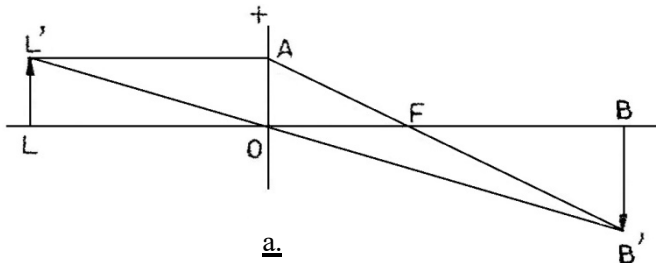


Fig. 37,1.

We beschouwen de stralengang door een bolle lens (fig. 37,1).

Uit deze figuur lezen we af, dat $\Delta LL'O \approx \Delta BB'O$.

Uit de gelijkvormigheid van deze beide driehoeken volgt, dat: $LL' : BB' = LO : BO$. Noemen we LO de voorwerpsafstand v en BO de beeldafstand b , dan is:

$$LL' : BB' = LO : BO = v : b. \quad (1)$$

Verder is $\Delta AOF \approx \Delta BB'F$, zodat daar verder $OA = LL'$, daaruit volgt:

$$LL' : BB' = OF : BF = f : (b - f) \dots\dots\dots (2).$$

Hierin is OF de brandpuntsafstand $= f$.

De linkerleden van de beide evenredigheden (1) en (2) zijn gelijk zodat:

$$v : b = f : (b - f).$$

Voor de evenredigheid geldt: het product der binnenste termen is gelijk aan het product der buitenste, zodat $bf = bv - vf$ of na deling door bvf $\frac{1}{v} = \frac{1}{f} - \frac{1}{b}$, of in andere volgorde geschreven:

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

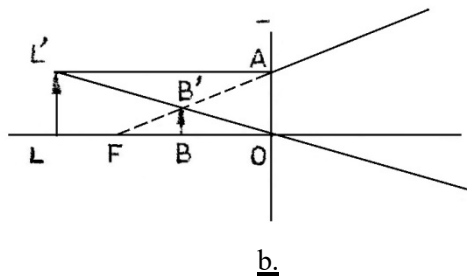


Fig. 37,2.

Voor de holle lens bekijken we fig.37,2. Daarin is:

$\Delta LL'O \approx \Delta BB'O$, dus:

$$LL' : BB' = LO : BO = v : b. \dots\dots\dots (1)$$

en $\Delta AOF \approx \Delta BB'F$ en daar

$AO = LL'$ is:

$$LL' : BB' = OF : BF = f : (f - b). \dots\dots\dots (2)$$

De linkerleden van de evenredigheden (1) en (2) zijn gelijk, dus geldt:

$$v : b = f : (f - b).$$

Hieruit volgt: $bf = v(f - b)$ of na deling door bvf :

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{b} - \frac{1}{f} \text{ of in andere volgorde:}$$

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{b} = -\frac{1}{f}.$$

Zo kunnen we voor ieder verschillend geval een verschillende formule afleiden, afhankelijk van de soort van lens, de plaats van het lichtpunt enz.

We kunnen echter volstaan met een enkele formule, mits we een aantal afspraken maken omtrent het teken van v, b en f .

We onthouden de formule:

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

En maken de volgende afspraken.

1. De voorwerpsafstand v is **positief** als het voorwerp reëel is. dus als het voorwerp zich voor de lens bevindt. Is het voorwerp virtueel, dus bevindt het zich achter de lens, dan is v negatief.

2. De beeldafstand is positief, als het beeld reëel is, dus als het beeld zich achter de lens bevindt, d.w.z. aan de kant waar de lichtstralen na de breking naar toe gaan. De beeldafstand is negatief, als het beeld virtueel is, m.a.w.: het beeld ligt voor de lens.
3. De brandpuntsafstand is positief, als het brandpunt reëel is, dus als het brandpunt zich achter de lens bevindt. De brandpuntsafstand is negatief als het brandpunt voor de lens ligt.

37.2. Vergroting

Onder de vergroting verstaan we de verhouding tussen de lengten van het beeld en van het voorwerp.

Zo is in fig. 37,1 en in fig. 37,2 de vergroting gelijk aan $\frac{BB'}{LL'}$.

Aangezien $\triangle LL'O \approx \triangle BB'$ is $BB' : LL' = b : v$ of:

$$\frac{BB'}{LL'} = \frac{b}{v}.$$

De waarde $\frac{b}{v}$ dient altijd positief te zijn; een negatieve vergroting heeft geen betekenis.

Bij de vergroting rekenen we dus alleen met de grootten van b en v , dus niet met het teken, die deze eventueel bezitten.

We beschouwen dus van de breuk $\frac{b}{v}$ alleen de absolute waarde. Stellen we de vergroting voor met de letter V , dan geldt:

$$V = \left| \frac{b}{v} \right|$$

Indien b kleiner is dan v , dan is de vergroting een getal kleiner dan 1, m.a.w. het beeld is kleiner dan het voorwerp. We dienen dan eigenlijk te spreken over een verkleining.

Voorbeeld: Waar moet men een voorwerp plaatsen om een beeld van dit voorwerp te verkrijgen dat 3 maal zo groot is?

Oplossing: Uit $\left| \frac{b}{v} \right| = 3$ volgt, dat er door de absoluutstrepen twee mogelijkheden zijn, namelijk:

$$b = +3v \text{ en } b = -3v.$$

Uit $b = 3v$ volgt m.b.v. de formule $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, $\frac{1}{v} + \frac{1}{3v} = \frac{1}{f}$ of:

$$3v = 4f \text{ zodat } v = \frac{4}{3} f.$$

Indien we dus het voorwerp op $\frac{4}{3}$ van de brandpuntsafstand van de lens opstellen, vinden we een driemaal vergroot beeld. Aangezien v in dit geval in ieder geval positief is, is f ook positief. Het bovenstaande geldt dus voor een positieve lens.

Uit $b = -3v$ volgt m.b.v. $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, $\frac{1}{v} - \frac{1}{3v} = \frac{1}{f}$ of: $\frac{2}{3v} = \frac{1}{f}$ of: $v = \frac{2}{3} f$.

Daar v wederom een positief getal is, immers we hebben de absolute waarde van de vergroting reeds gesplitst in een positief en een negatief getal, is ook f positief. Deze oplossing geldt dus eveneens voor een positieve lens.

We vinden dus twee oplossingen voor het gestelde probleem. In het eerste geval liggen het voorwerp en het beeld aan verschillende kanten van de lens; in het tweede geval liggen voorwerp en beeld aan dezelfde kant van de lens.

Oplossingen inzenden van de opgaven 275 t/m 276.

38.1. Beeldvorming bij bolle lenzen

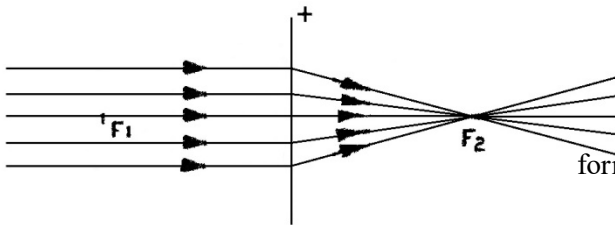


Fig. 38,1.

We hebben reeds geleerd dat een lichtstraal door het optisch middelpunt ongebroken doorgaat.

Een lichtstraal evenwijdig aan de hoofdas gaat na breking door het brandpunt aan de kant van het uittrekkende licht. Dit volgt ook uit de

formule: $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$, immers indien een licht-

straal // aan de hoofdas binnenvalt, kunnen we veronderstellen dat het lichtpunt in het oneindige staat, dus $v = \infty$.

Hieruit volgt $\frac{1}{v} = 0$, zodat we

vinden $\frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ of $b = f$, dus

het beeldpunt komt in F .

Een lichtstraal door het brandpunt wordt gebroken // aan de hoofdas. Nu is $v = f$, dus:

$\frac{1}{b} = \frac{1}{f} + \frac{1}{v}$ of $\frac{1}{b} = 0$, dus

$b = \infty$, dus het beeldpunt in oneindig.

We beschouwen nu enige constructies:

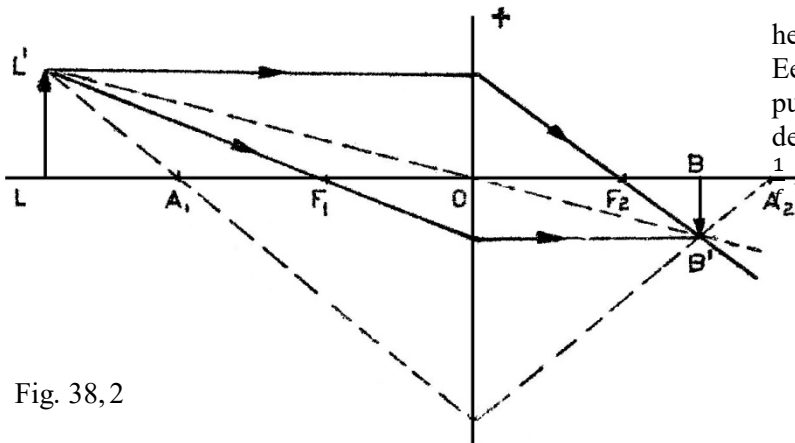


Fig. 38,2

1. Voorwerp in oneindig (zie fig. 38,1).

Het beeld komt in F_2 (zie bovenstaande theorie).

2. Voorwerp LL' tussen oneindig en A .

A is een punt gelegen op de dubbele brandpuntsafstand. Een lichtstraal, die door A_1 gaande op de lens valt, wordt door de lens zodanig gebroken, dat de gebroken straal door A_2 gaat. ($A_1O = OA_2$). In fig. 38,2 zijn verschillende stralen getekend.

Door twee stralen echter is het beeld bepaald. Ligt het voorwerp tussen ∞ en A_1 , dan ligt het beeld tussen F_2 en A_2 , het beeld is omgekeerd, reëel en verkleind. Dit is te bepalen met de formules: $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ en $V = \left| \frac{b}{v} \right|$.

Toepassingen hiervan vindt men bij het oog,

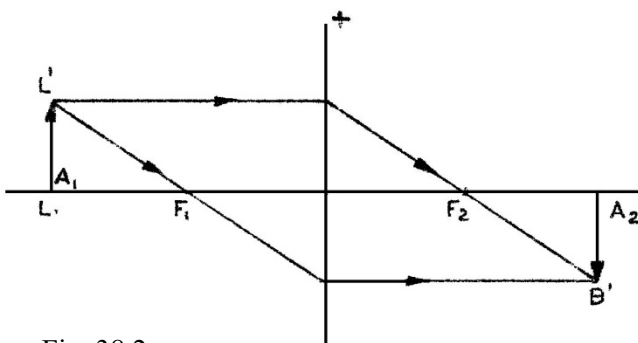


Fig. 38,2.

diverse kijkers, fototoestel enz.

3. Voorwerp LL' in A_1 .

Dan is $v = 2f$. Uit $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ volgt dan: $\frac{1}{2f} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ of $\frac{1}{b} = \frac{1}{f} - \frac{1}{2f} = \frac{1}{2f}$, dus: $b = 2f$.

Indien het voorwerp in A_1 staat, komt het beeld in A_2 . Daar $b = v$ is de vergroting dus $V = \frac{b}{v} = 1$.

We zien dus, dat het beeld reëel, omgekeerd en even groot is als het voorwerp.

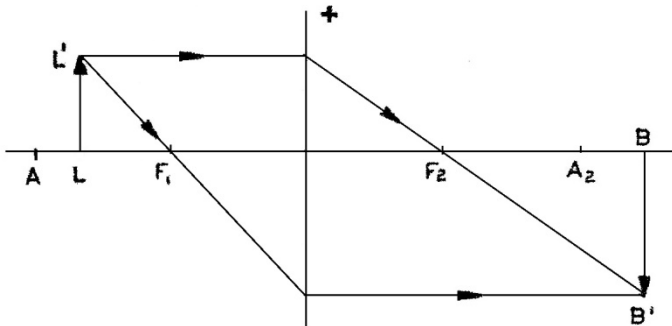


Fig. 38,4.

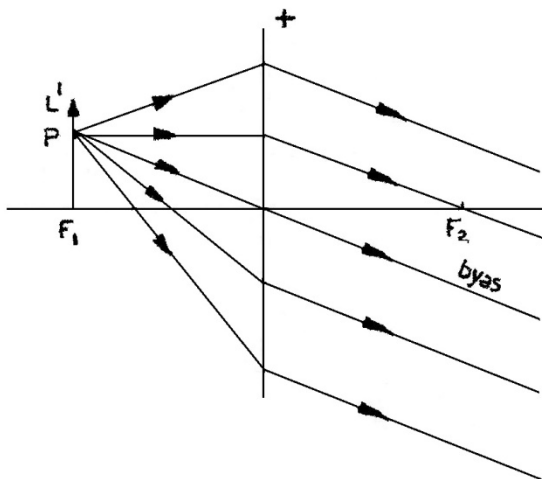


Fig. 38,5.

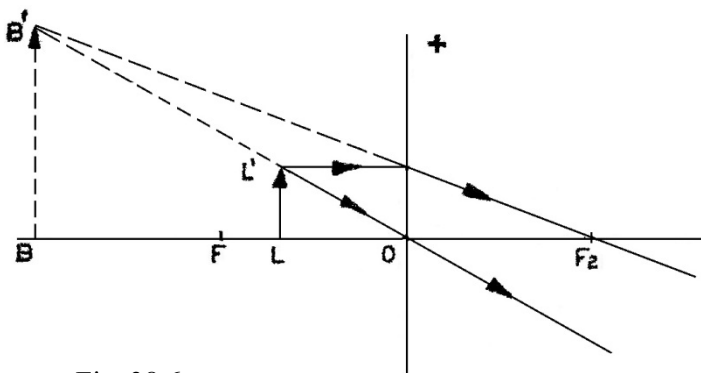


Fig. 38,6

Toepassingen hiervan vindt men in de omkeerlenzen bv. bij verrekijkers.

4. Voorwerp tussen A_1 en F (fig. 38,4).

Het beeld komt tussen A_2 en ∞ , het beeld is omgekeerd en vergroot. Toepassingen hiervan vindt men o.a. bij de microscoop en de projectielantaarn.

5. Voorwerp in F_1 .

Als het voorwerp in F_1 staat, is $v = f$, dus $b = \infty$. Van elk punt dat we op het voorwerp nemen, ontstaat een uittredende bundel // aan de bijas. De bijas is de lijn, die we door een punt van het voorwerp en het optisch middelpunt kunnen trekken.

In fig. 38,5 is uit het punt P de stralenbundel getrokken. Er ontstaat dus a.h.w. een oneindig groot beeld in het oneindige als het voorwerp in het brandpunt staat.

6. Voorwerp tussen F_1 en O (fig. 38,6).

Het beeld is nu virtueel, rechtopstaand en vergroot. Toepassingen hiervan zijn de loep en de optische instrumenten.

7. Virtueel voorwerp, dus achter de lens.

Het beeld BB' is reëel, rechtopstaand en verkleind. Een lichtstraal // aan de hoofdas, die door L' zou gaan wordt gebroken door F_2 .

Een lichtstraal die door het optisch middelpunt en L' zou gaan, gaat ongebroken door. Aldus vinden we het beeld BB' .

Een toepassing hiervan zullen we leren bij lenzenstelsels, waarbij we te maken krijgen met de stralengang door meerdere lenzen.

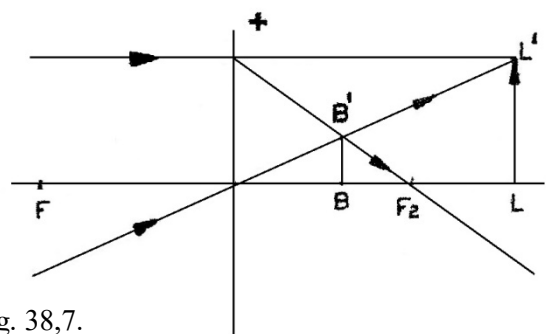


Fig. 38,7.