

§ 6.1 Voortplanting en weerkaatsing van licht

§ 6.2 Spiegel en spiegelbeeld

Lichtbronnen:

- Directe lichtbronnen produceren zelf licht
- Indirecte lichtbronnen reflecteren licht.

Je ziet een voorwerp als er licht afkomstig van dat voorwerp in je oog komt.

Het licht kan zich in doorzichtige (transparante) materialen én in vacuüm voortplanten. In zo'n medium gaat licht met een constante snelheid rechtdoor.

In vacuüm en in gassen is de lichtsnelheid $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}^1$.

In andere doorzichtige stoffen is de lichtsnelheid lager; bijvoorbeeld:

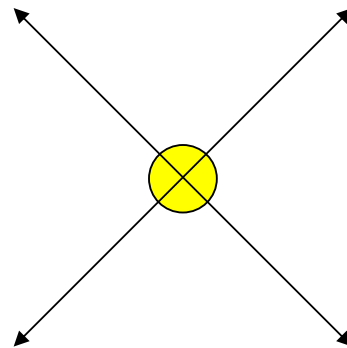
In water: $c_{\text{water}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

In glas: $c_{\text{glas}} = 2,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

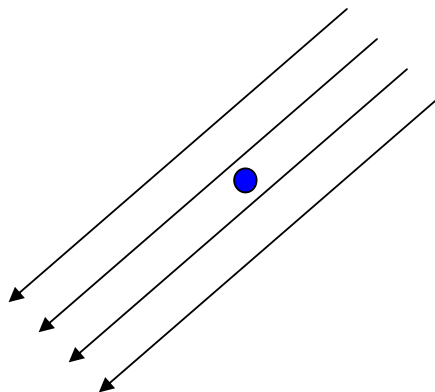
Lichtbundels:

- Evenwijdige lichtbundel
- Divergerende lichtbundel
- Convergerende lichtbundel

Licht afkomstig van een puntvormige lichtbron vormt altijd een divergerende lichtbundel:



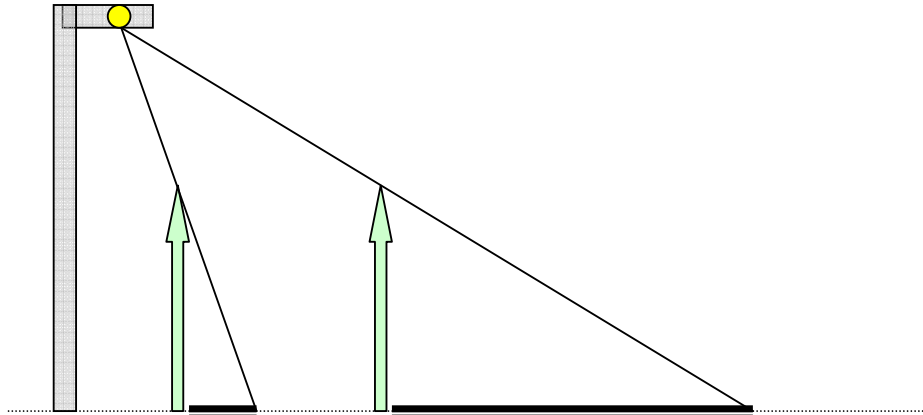
Echter: Als de lichtbron zeer ver weg staat, zijn de lichtstralen (bij benadering) evenwijdig. De lichtstralen van de zon, die de aarde bereiken, vormen een 'perfecte' evenwijdige bundel:



¹ In gassen gaat licht slechts een zeer kleine fractie langzamer dan in vacuüm.

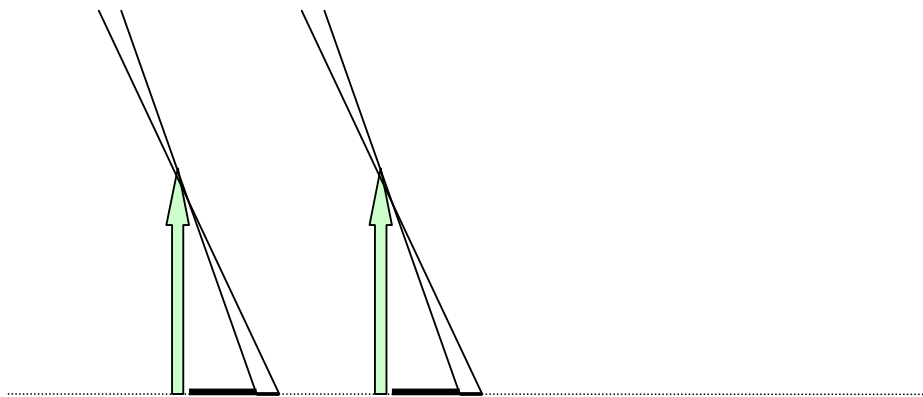
Schaduwvorming:

Een puntvormige lichtbron veroorzaakt een scherpe schaduw.

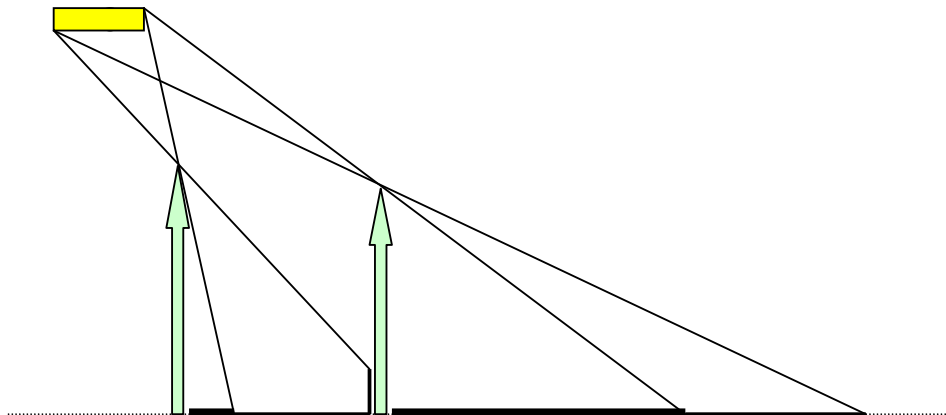


De zon is bij benadering een puntvormige lichtbron². De schaduwrand is daardoor (behoorlijk) scherp.

Ga met BINAS na dat de hoek tussen de uiterste stralen van het zonlicht in onderstaande tekening te groot is.



Een lijnvormige lichtbron (tl-buis) veroorzaakt een kernschaduw en een halfschaduw. In de kernschaduw valt helemaal geen licht; in de halfschaduw valt slechts licht van een deel van de lichtbron.



² Bij een zonsverduistering kun je de zon niet als puntvormige beschouwen; zie figuur 6.2.

Wit licht bestaat uit 'alle kleuren van de regenboog'.

Ondoorzichtige materialen kunnen licht:

- Absorberen
- Terugkaatsen.

Absorptie:

Licht wordt in het materiaal (gedeeltelijk) geabsorbeerd.

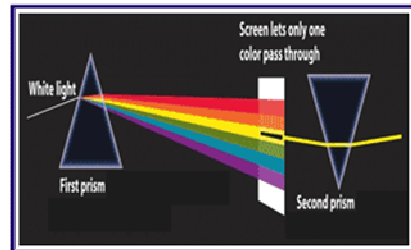
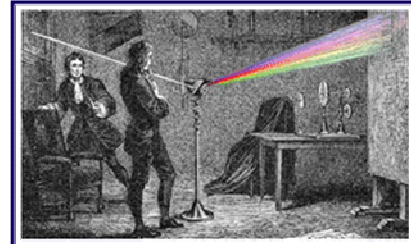
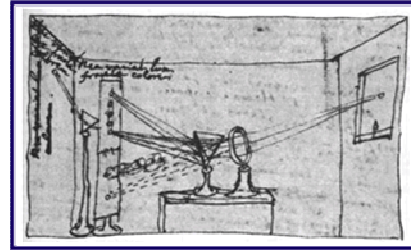
Een rode trui absorbeert alle kleuren behalve rood.

Het rode licht wordt weerkaatst.

Een rode trui, waar (uitsluitend) blauw licht opvalt, kun je niet zien (ziet er zwart uit).

Terugkaatsing:

- Diffuse terugkaatsing vindt plaats op een ruw oppervlak. Het teruggekaatste licht gaat in alle richtingen.
- Spiegelende terugkaatsing vindt plaats op een 'spiegelglad' oppervlak.



Spiegelende terugkaatsing:

Tekenmethode 1

De hoek van inval (i) = De hoek van terugkaatsing (t).

Let op: i en t zijn de hoeken met de 'normaal'; zie figuur 6.10.

Tekenmethode 2

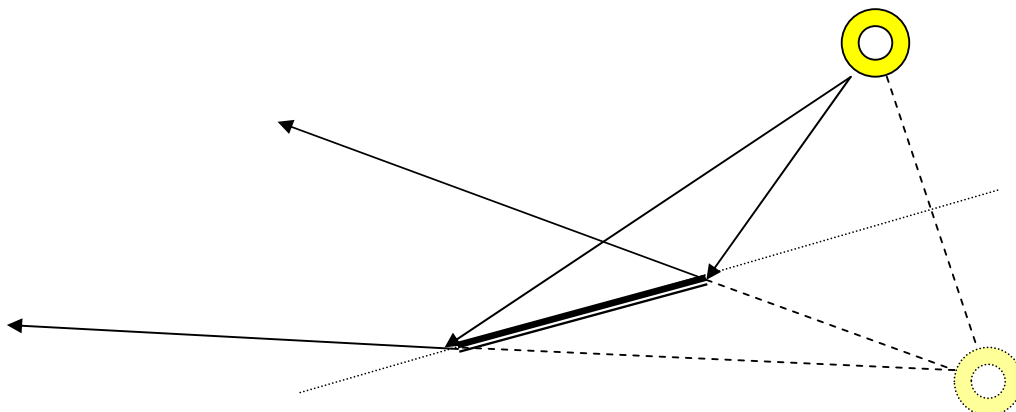
M.b.v het 'spiegelbeeld'.

Lichtstralen afkomstig van een punt, die in de spiegel terugkaatsen, lijken te komen uit het spiegelbeeld.

Dit spiegelbeeld is:

- Even ver
- Loodrecht
- Aan de andere kant van de spiegel.

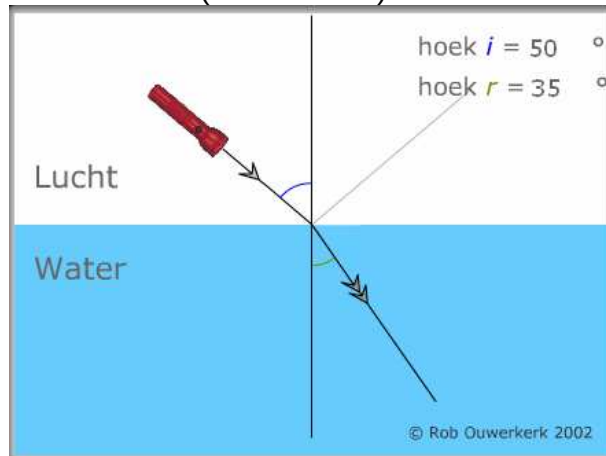
Let op: Ook als de spiegel 'te kort' is, kun je het spiegelbeeld construeren.



§ 6.3 Breking van licht

Bij de overgang van de ene doorzichtige stof naar de andere doorzichtige stof verandert een lichtstraal van richting³. Dit verschijnsel heet: **breking**.

Op: <http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=73> is een simulatie voor de overgang van licht naar water (of andersom).



Een lichtstraal valt op het grensvlak lucht → water.

De hoek van inval $i = 50^\circ$.

De hoek van breking $r = 35^\circ$.

Overigens kaatst een deel van het licht op het grensvlak terug: $t = 50^\circ$.

Licht gaat in lucht sneller dan in water. Hierdoor verandert de richting van het licht 'naar de normaal toe'.

Lichtstralen zijn 'omkeerbaar'. Bij de overgang van water → lucht zal het licht dus 'van de normaal af' breken.

Brekingswet:

$n_{A \rightarrow B}$ is de brekingsindex voor de overgang van stof A naar stof B.

Er geldt:
$$n_{A \rightarrow B} = \frac{\sin i}{\sin r}$$

omdat:
$$n_{A \rightarrow B} = \frac{c_A}{c_B}$$

Als $c_A > c_B$ is de brekingsindex groter dan 1.

Er is dan sprake van 'breking naar de normaal toe': $i > r$.



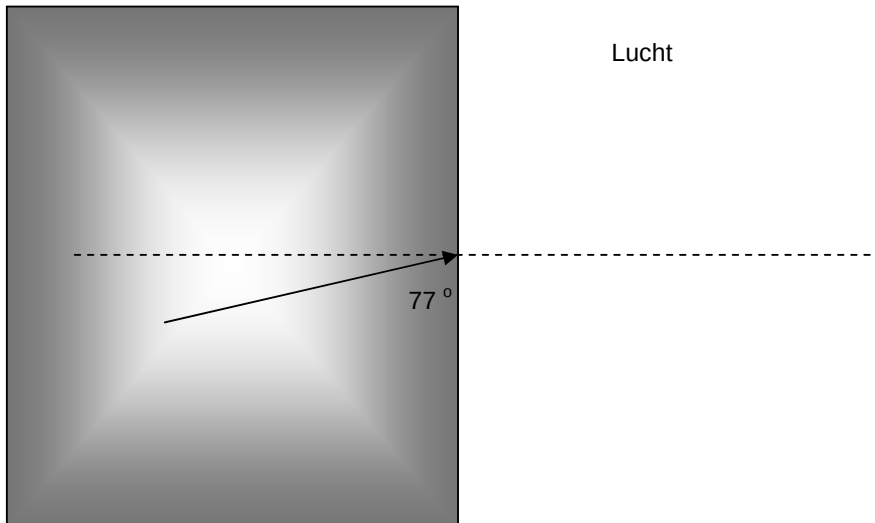
In BINAS staan de brekingsindices van verschillende doorzichtige stoffen.

Afspraak:
$$n_{stofA} = n_{vacuum \rightarrow stofA}$$

³ Er is geen richtingsverandering als de hoek van inval 0° is.

Voorbeeld 1:

Een lichtstraal valt vanuit diamant op het grensvlak met lucht.
De hoek tussen de lichtstraal en het grensvlak is 77° .



De brekingsindex van diamant $n_{\text{diamant}} = 2,4$; dit betekent dus dat de snelheid van

licht in diamant $c_{\text{diamant}} = \frac{c_{\text{vacuum}}}{n_{\text{diamant}}} = \frac{3,00 \cdot 10^8}{2,4} = 1,25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ is.

Er is een handige manier om uit te rekenen hoe de lichtstraal verder gaat.

Methode: 'omkeertruc'⁴

De brekingsindex van diamant is voor de overgang van lucht⁵ naar diamant.

Omdat lichtstralen omkeerbaar zijn, mogen we doen alsof de lichtstraal (met een nog onbekende hoek van inval) vanuit lucht het diamant is ingegaan.

In het diamant is de 'hoek van breking'⁶ $r = 13^\circ$.

De 'hoek van inval' is nu te berekenen:

$$\sin i = n_{\text{diamant}} \cdot \sin r = 2,4 \cdot \sin 13 = 0,54$$

$$\rightarrow i = \sin^{-1} 0,54 = 33^\circ$$

Let er bij het tekenen op dat de hoek 33° met de normaal moet zijn.

Er is breking van de normaal af, omdat licht in lucht sneller gaat dan in diamant.

Opmerking:

Dit probleem kan ook worden opgelost door de brekingsindex voor de overgang van diamant

naar lucht⁷ te berekenen: $n_{\text{diamant} \rightarrow \text{lucht}} = \frac{1}{n_{\text{diamant}}} = \frac{1}{2,4} = 0,42$.

Met deze brekingsindex én $i = 13^\circ$, kan de hoek van breking r worden berekend: $r = 33^\circ$.

⁴ De omkeertruc kan altijd worden gebruikt, als het licht naar vacuüm (lucht) toe gaat.

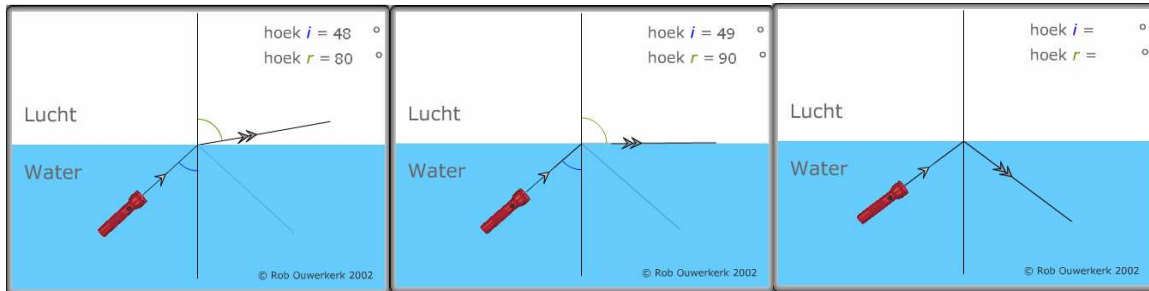
⁵ Eigenlijk voor de overgang van vacuüm naar diamant.

⁶ De hoek van breking is de hoek met de normaal.

⁷ De brekingsindex voor de overgang van een stof naar lucht is altijd kleiner dan 1.

Grenshoek en totale terugkaatsing:

Licht kan niet altijd (vanuit een doorzichtige stof) naar vacuüm (lucht) ontsnappen. Bij breking van de normaal af is er namelijk een grenshoek.



De **grenshoek** is die hoek van inval, waarbij de hoek van breking 90° is.

De grenshoek van water is 49° . Dit kun je zien in de middelste figuur.

Als de hoek van inval groter is dan de grenshoek, kan de lichtstraal niet naar de lucht ontsnappen; al het licht kaatst op het grensvlak terug: **totale terugkaatsing**.

Voorbeeld 2:

De grenshoek van water is 49° (zie de middelste figuur).

Bereken de brekingsindex van water⁸.

Methode: 'omkeertruc'

Omdat lichtstralen omkeerbaar zijn, doen we alsof de lichtstraal vanuit de lucht komt.

De 'hoek van inval' $i = 90^\circ$, maar de lichtstraal breekt nog net het water in.

De 'hoek van breking' is nu de grenshoek van water: $r = 49^\circ$.

$$n_{\text{water}} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin 90}{\sin 49} = 1,3$$

Voorbeeld 3:

De brekingsindex van diamant is 2,4. Bereken de grenshoek van diamant.

Methode: 'omkeertruc':

$$n_{\text{diamant}} = \frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\sin 90}{\sin g} = \frac{1}{\sin g}$$

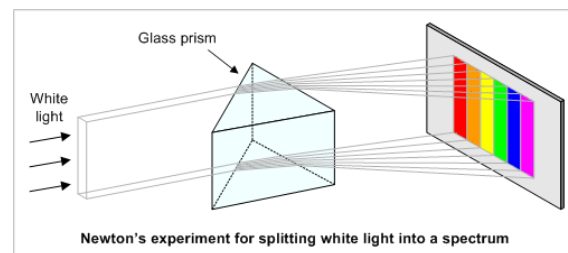
$$\rightarrow \sin g = \frac{1}{n_{\text{diamant}}} = \frac{1}{2,4} = 0,42$$

$$\rightarrow g = \sin^{-1} 0,42 = 25^\circ$$

Dispersie:

Verschillende kleuren breken allemaal iets anders. De brekingsindex verschilt namelijk per kleur (golflengte).

Met een prisma kon Newton de kleuren, waar wit licht uit bestaat, onderscheiden.



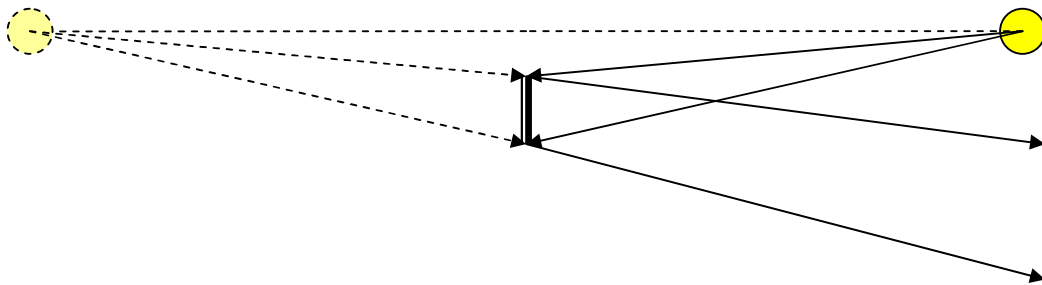
Nuttige sommen: 2, 3, 4, 5, 7, 9, 12, 15, 16c, 17, 18.

⁸ Dit is dus per definitie de brekingsindex voor de overgang van vacuüm (lucht) naar water.

§ 6.4 Toepassingen van breking

Bij een **retroreflector** wordt het invallende licht teruggekaatst precies tegen de richting van het invallende licht in (ook als de hoek van inval anders is dan 0°). Dit is bijvoorbeeld belangrijk in het verkeer. Het licht van de koplampen van een voertuig wordt dan immers teruggekaatst in de richting van de lampen en dus ongeveer in de richting van de bestuurder van het voertuig.

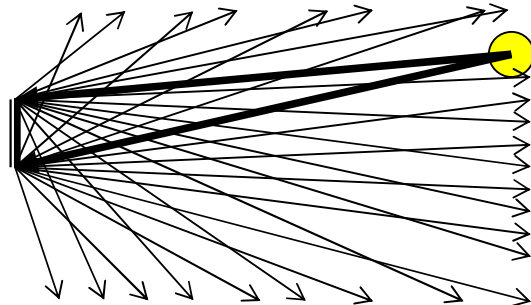
Als i.p.v. een retroreflector een spiegel wordt gebruikt, zal het licht meestal niet in de richting van de bestuurder terugkaatsen.



(En als het licht toevallig wel in de richting van de bestuurder terugkaatst, zal deze kunnen worden verblind.)

Een wit voorwerp (bijvoorbeeld het wit geschilderde deel van een achterspatbord van een fiets) kaatst slechts een klein deel van het licht terug in de richting van de bestuurder.

Er is immers sprake van diffuse terugkaatsing.



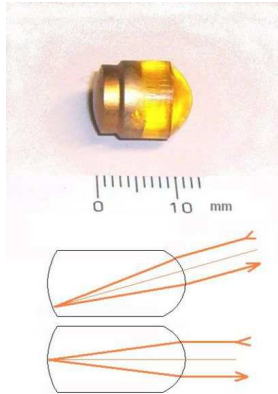
Op <http://nl.wikipedia.org/wiki/Retroreflector> worden retroreflectoren besproken:

1. **Hoekreflector**
Drie spiegels met de spiegelende kanten (onder hoeken van 90°) naar elkaar toe.
Deze hoekreflectoren worden gebruikt voor de reflectie van RADAR, bijvoorbeeld op boeien.
2. **Reflectorplaatje fiets**
Halve kleine plastic kubussen met de punten van de vlakke zijde afgekeerd.
Het licht wordt weerkaatst op de overgang van plastic naar lucht aan de achterzijde van de reflector (totale terugkaatsing).



3. 'Kattenogen'

Transparante bolletjes geplaatst op spiegelen materiaal. Zij worden bijvoorbeeld gebruikt voor rijbaanmarkering, indien goede straatverlichting niet beschikbaar is.



- Het licht wordt zodanig gebroken op het grensvlak lucht → materiaal, dat de lichtstralen samen komen op de achterzijde van het bolletje⁹.
- Daar kaatst het licht terug op het spiegelen materiaal (holle spiegel).
- Door de breking op het grensvlak materiaal → lucht gaat het licht precies terug in de richting waar het vandaan afkomstig was.



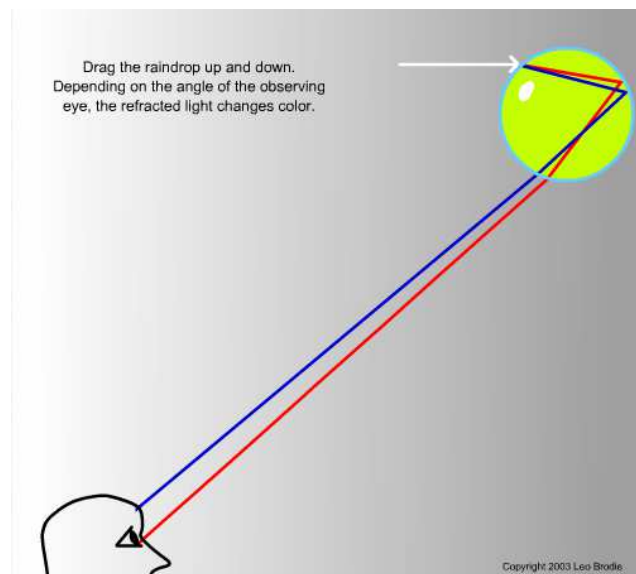
De fietsschoenen reflecteren het licht van de flitser terug naar het fototoestel.
Hier is dus sprake van retroreflectie.



Regenboog

Bij het ontstaan van een regenboog zijn van belang:

1. Breking
2. Terugkaatsing
3. Dispersie.



Zie: <http://www.keesfloor.nl/artikelen/rb.htm>

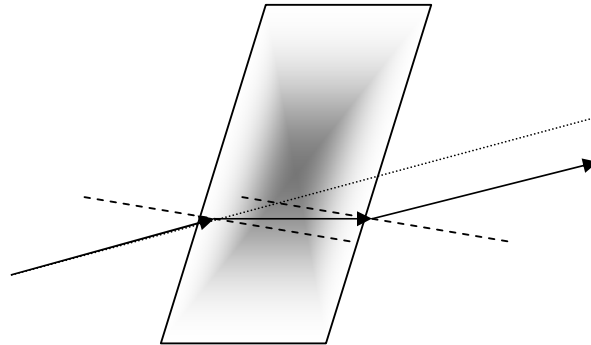
Nuttige sommen: 19, 20, 21.

⁹ Het bolletje is in feite een lens; het spiegelen materiaal is in het brandvlak van deze lens.

§ 6.5 en § 6.6 Constructie van lichtstralen door een lens

Een **planparallelle** glazen **plaat** is een stuk glas, waarvan de zijanten evenwijdig aan elkaar zijn.

Een lichtstraal zal in zo'n stuk glas verschuiven, maar niet van richting veranderen (zie opgave 20)¹⁰.



Indien de zijanten van het stuk glas (of een ander doorzichtig materiaal) niet evenwijdig zijn, verandert een lichtstraal wel van richting. Dit komt, omdat de tweede normaal een andere richting heeft dan de eerste normaal.

Een stuk glas met minstens één gebogen zijkant is een **lens**.

- Bolle (positieve) lenzen zijn in het midden dikker dan aan de rand én hebben een convergerende werking; lichtstralen gaan meer naar elkaar toe lopen.
- Holle (negatieve) lenzen zijn in het midden dunner dan aan de rand én hebben een divergerende werking; lichtstralen gaan meer uit elkaar lopen.

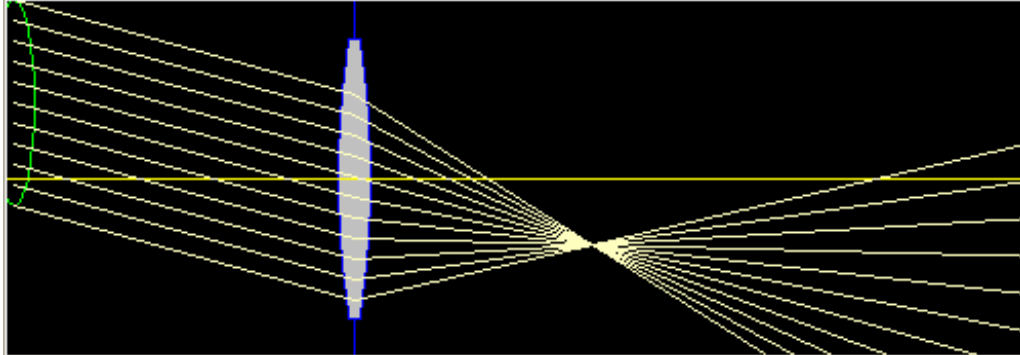
Som 23 Breking en lenzen

Refraction by a Converging Lens Incident rays which travel parallel to the principal axis will refract through the lens and converge to a point.	Refraction by a Diverging Lens Incident rays traveling parallel to the principal axis will refract through the lens and diverge, never intersecting.
Het licht gaat eerst van lucht naar glas. Er treedt dus eerst breking op naar de normaal toe. Daarna gaat het licht van glas naar lucht. Er treedt breking op van normaal af.	
Door de bolle vorm heeft de lens een convergerende werking: de lichtstralen gaan meer naar elkaar toe lopen.	Door de holle vorm heeft de lens een divergerende werking: de lichtstralen gaan meer uit elkaar lopen.

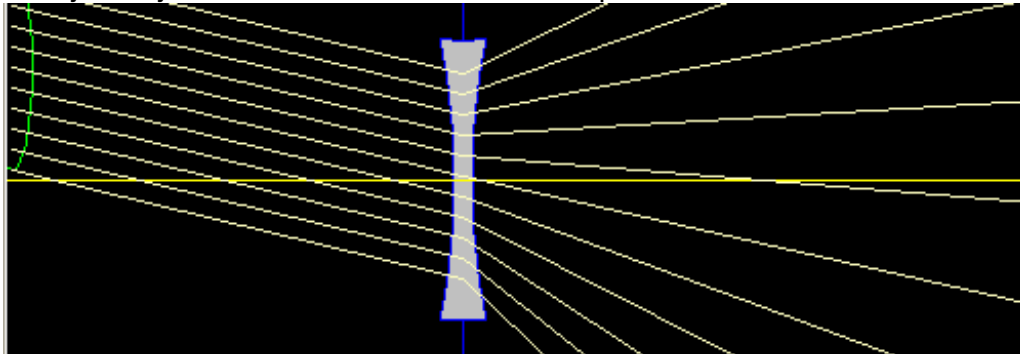
¹⁰ Eigenlijk is dit een mooi voorbeeld van 'lichtstralen zijn omkeerbaar'.

In het vervolg worden uitsluitend dunne lenzen besproken. Er geldt:

1. Lichtstralen door het **optisch middelpunt O** veranderen niet van richting.
2. De **hoofdas** van een lens is een hulplijn door **O** loodrecht op de lens.
3. Lichtstralen evenwijdig aan de hoofdas:
 - Gaan bij een bolle lens naar **brandpunt F**
 - Lijken bij een holle lens uit brandpunt **F** te komen.
4. Het **brandvlak** is het vlak door **F** evenwijdig aan de lens.
5. Evenwijdige lichtstralen:
 - Gaan bij een bolle lens naar één punt in het brandvlak



- Lijken bij een holle lens te komen uit één punt van het brandvlak.



<http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/>

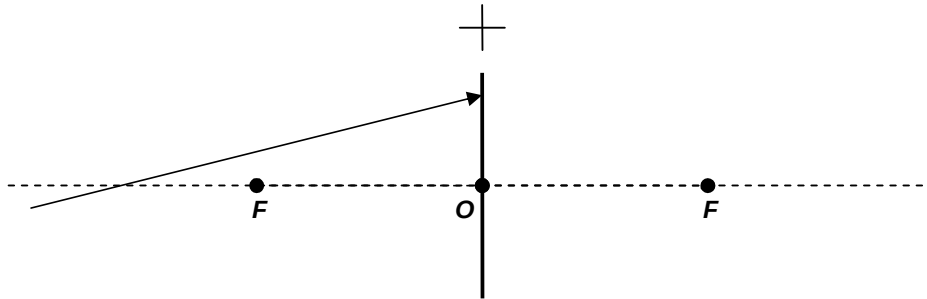
Ga na waar de brandpunten van deze twee lenzen zich bevinden.

6. Lenzen worden schematisch weergegeven:
 - Een verticale lijn met een **+** stelt een bolle lens voor
 - Een verticale lijn met een **-** stelt een holle lens voor.

Met deze regels kunnen lichtstralen door een lens worden getekend.

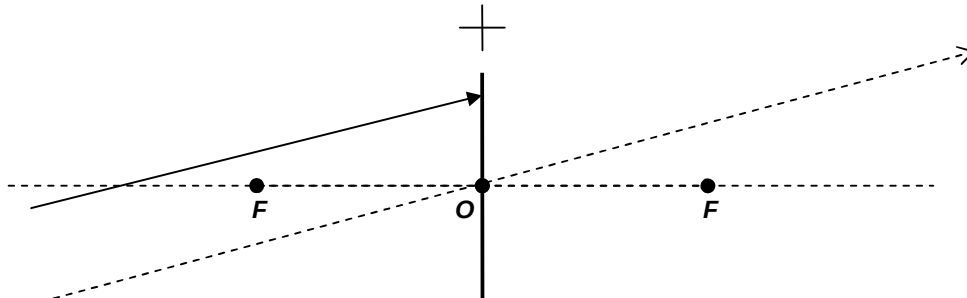
Voorbeeld 1

Een lichtstraal valt op een bolle lens; de brandpunten van de lens zijn bekend.

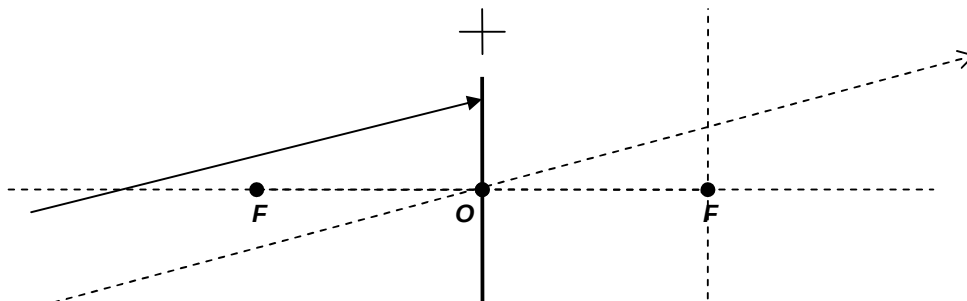


Oplossing:

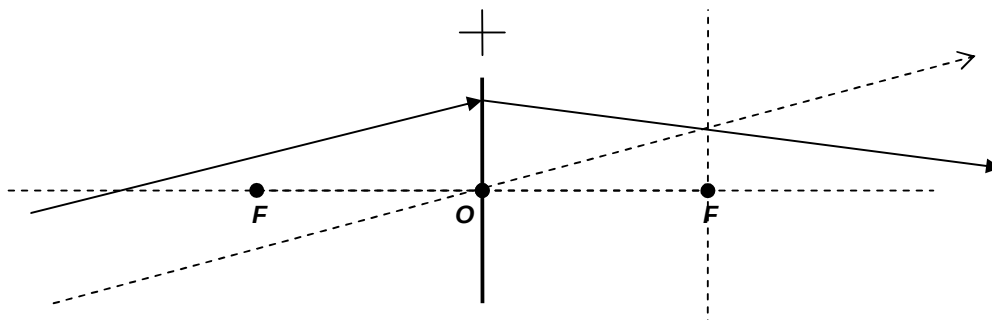
1. Teken een evenwijdige lichtstraal door O ; deze lichtstraal verandert niet van richting in de lens.



2. Teken het brandvlak achter de lens.

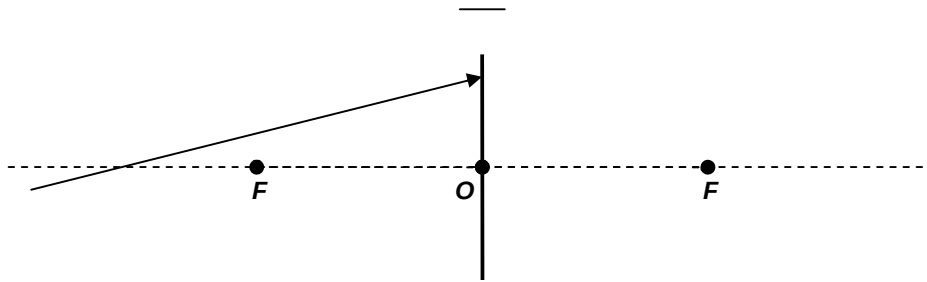


3. Beide (evenwijdige!) lichtstralen snijden elkaar in het brandvlak.



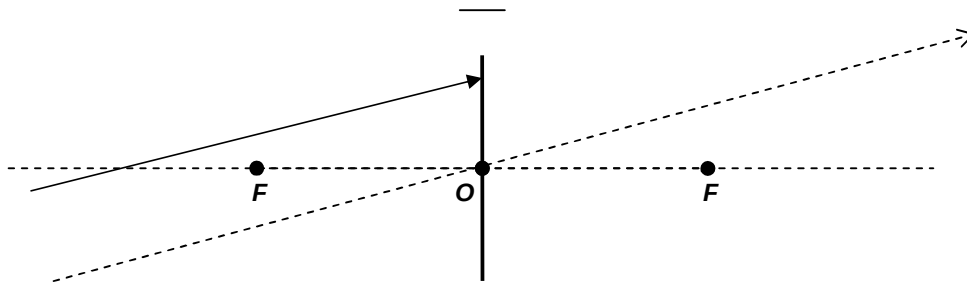
Voorbeeld 2

Een lichtstraal valt op een holle lens; de brandpunten van de lens zijn bekend.

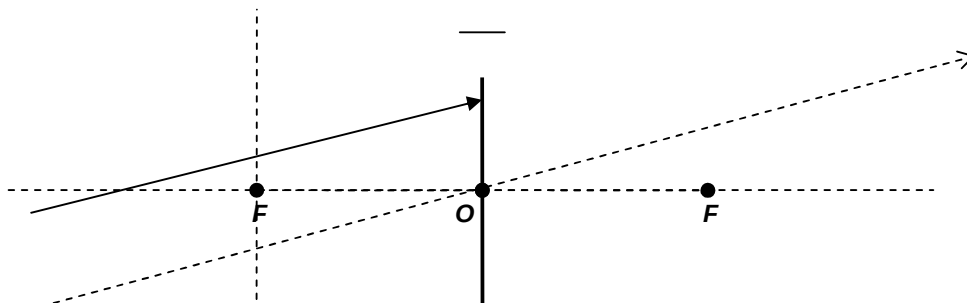


Oplossing:

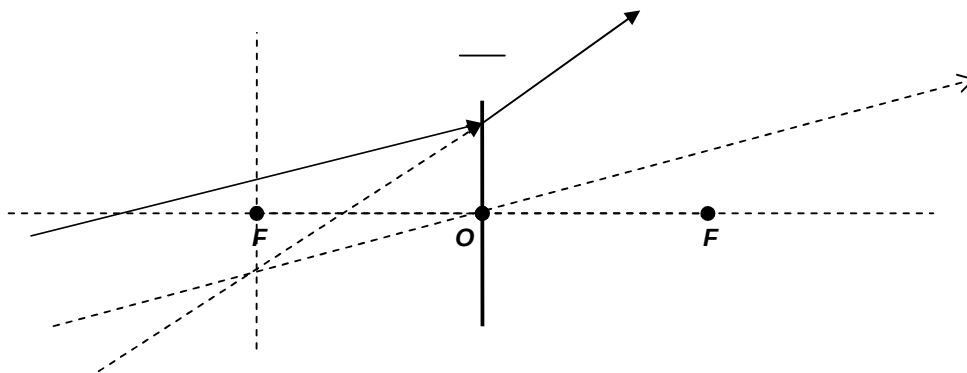
1. Teken een evenwijdige lichtstraal door O ; deze lichtstraal verandert niet van richting in de lens.



2. Teken het brandvlak voor de lens.

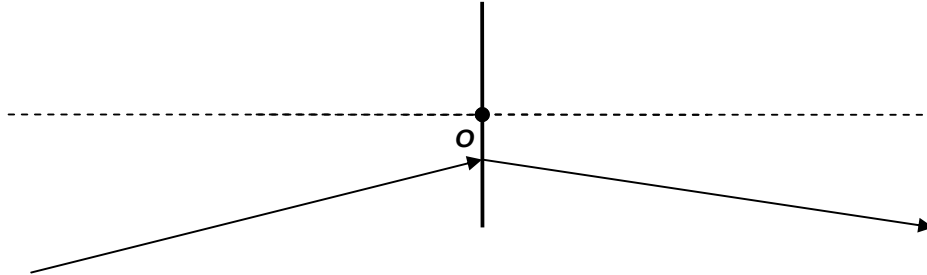


3. Beide (evenwijdige!) lichtstralen lijken uit één punt van het brandvlak te komen.



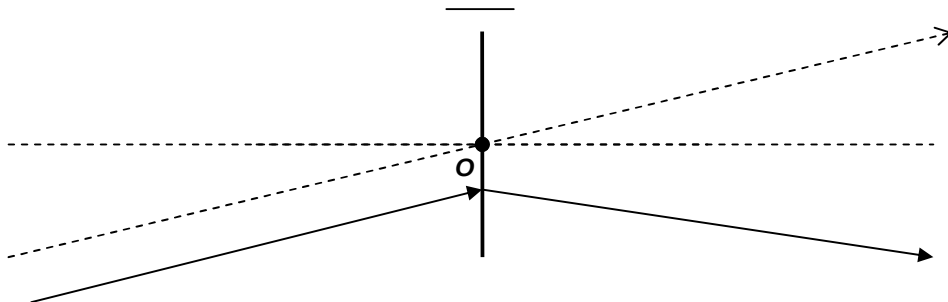
Voorbeeld 3

Een lichtstraal verandert in een lens van richting.
De brandpunten van deze lens zijn nu te tekenen.

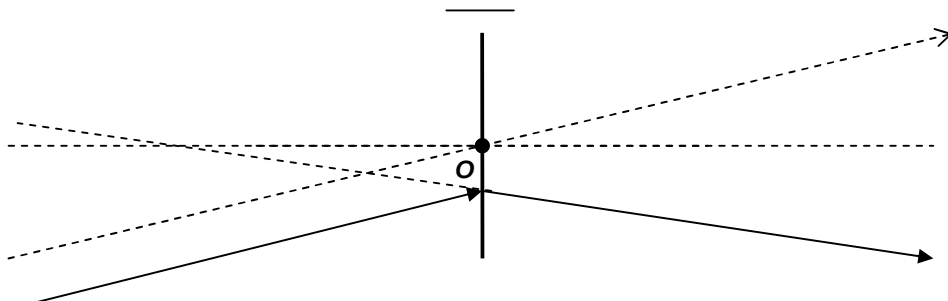


Oplossing:

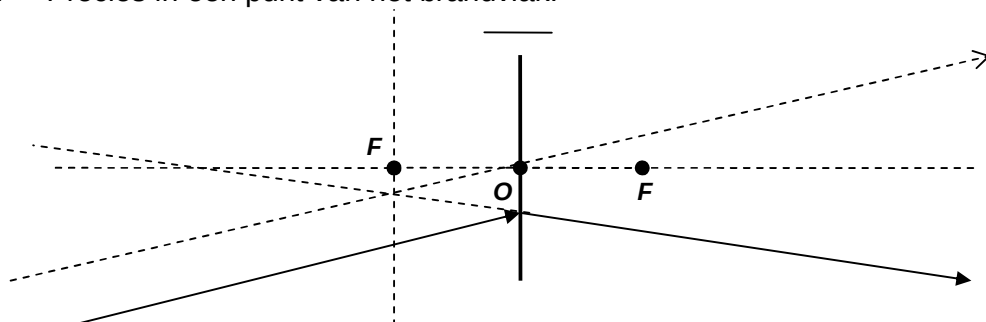
1. Het is een holle lens, want er is een divergerende werking.
Teken een evenwijdige lichtstraal door **O**; deze lichtstraal verandert niet van richting in de lens.



2. Beide lichtstralen lijken elkaar voor de lens te snijden,

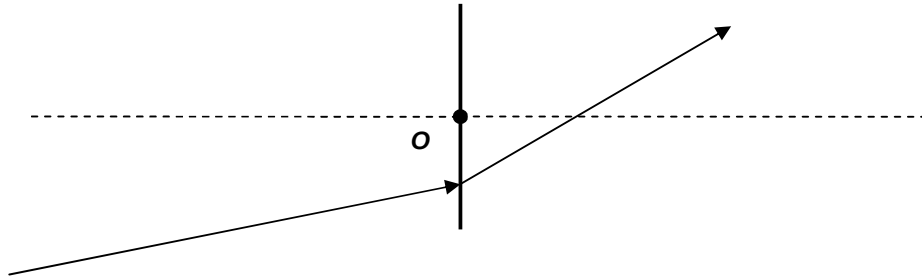


3. Precies in een punt van het brandvlak.



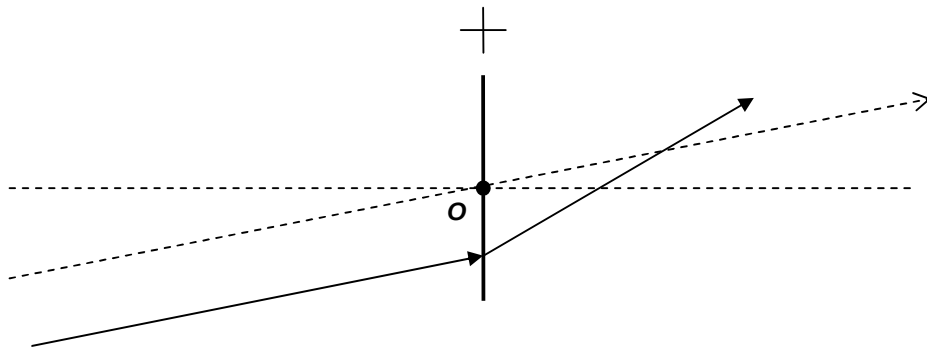
Voorbeeld 4

Een lichtstraal verandert in een lens van richting.
De brandpunten van deze lens zijn nu te tekenen.

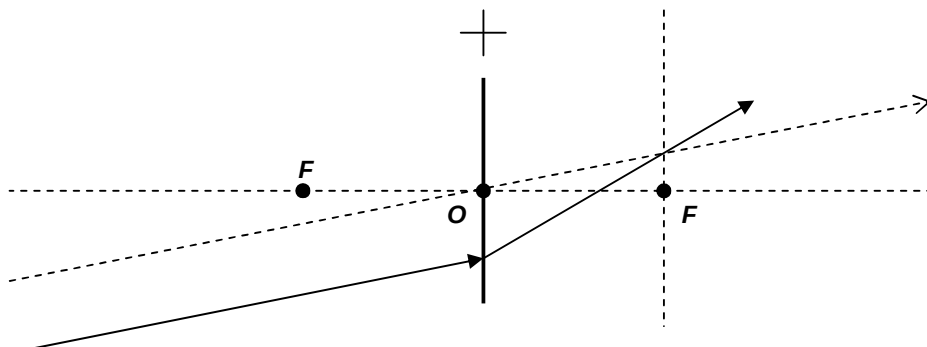


Oplossing:

1. Het is een bolle lens, want er is een convergerende werking.
Teken een evenwijdige lichtstraal door **O**; deze lichtstraal verandert niet van richting in de lens.



2. Beide lichtstralen snijden elkaar achter de lens in het brandvlak.



Nuttige sommen: 26, 30, 31, 32.

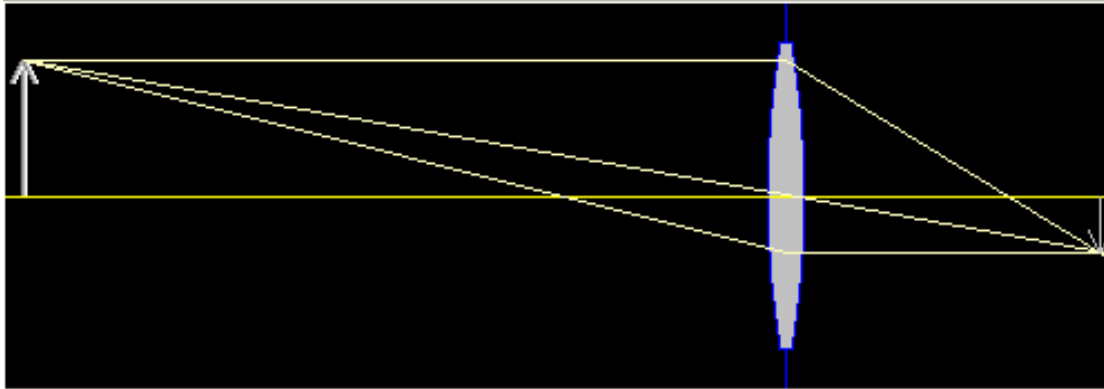
§ 7.1 Beeldvorming en beeldconstructie

Bij een afbeelding met een lens is het punt waar de lichtstralen vandaan komen het **voorwerp** of voorwerpspunt. In de lens veranderen lichtstralen van richting. Hierbij het is **beeld** of beeldpunt belangrijk.

Het beeld is te tekenen door gebruik te maken van **constructiestralen**.

Positieve lens:

A. Het voorwerp bevindt zich buiten de brandpuntsafstand ($v > f$)



Er wordt een **reëel beeld** gevormd; alle lichtstralen afkomstig uit de punt van de pijl gaan achter de lens door het reële beeld van de punt van de pijl.

Een reëel beeld staat 'op zijn kop' en kan op een scherm zichtbaar worden gemaakt.

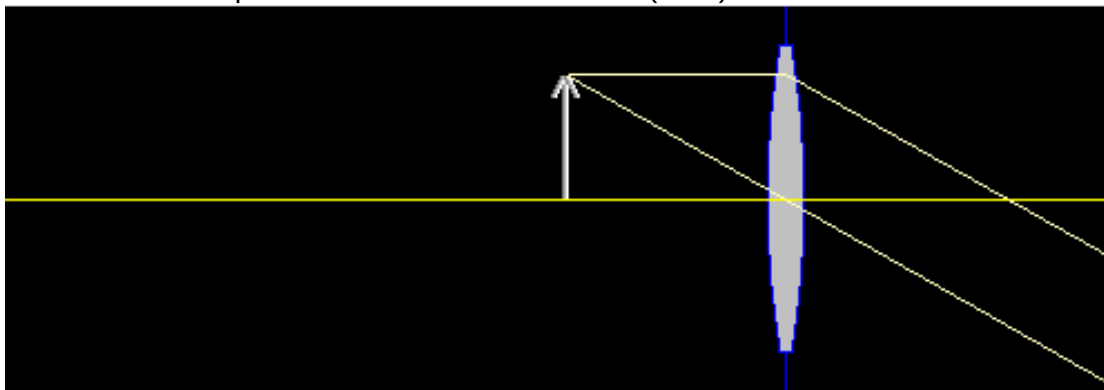
Ga na waar de brandpunten van deze lens zich bevinden.

Vergroting of verkleining?

- ☐ Er is sprake van een vergroting, als $f < v < 2f$
- ☐ Als $v = 2f$ is het beeld precies even groot als het voorwerp
- ☐ Er is sprake van een verkleining, als $v > 2f$.

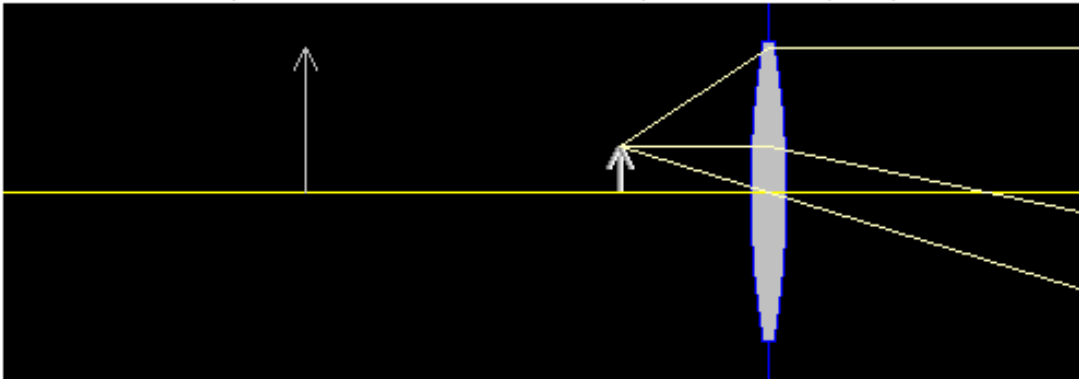
Controleer dit op: <http://webphysics.davidson.edu/Applets/optics4/>

B. Het voorwerp bevindt zich in het brandvlak ($v = f$)



Er wordt geen beeld gevormd; alle lichtstralen afkomstig uit de punt van de pijl vormen achter de lens een evenwijdige bundel.

C. Het voorwerp bevindt zich binnen de brandpuntsafstand ($v < f$)



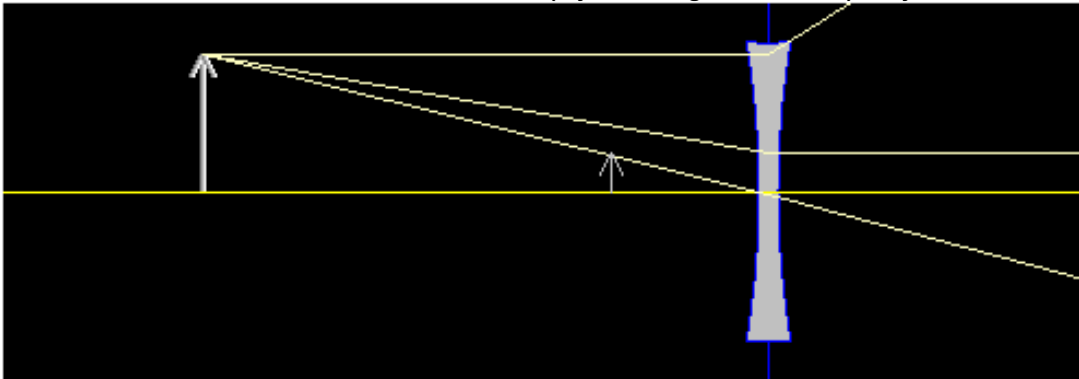
Er wordt een **virtueel beeld** gevormd; alle lichtstralen afkomstig uit de punt van de pijl lijken afkomstig uit het virtuele beeld van de punt van de pijl.

Een virtueel beeld staat 'rechttop' en kan niet op een scherm zichtbaar worden gemaakt. Een virtueel beeld is (bij een positieve lens) altijd vergroot.

Ga na waar de brandpunten van deze lens zich bevinden.

Negatieve lens:

Een negatieve lens vormt altijd een virtueel beeld; dus 'rechttop' en niet op een scherm zichtbaar te maken. Het beeld is (bij een negatieve lens) altijd verkleind.



Ga na waar de brandpunten van deze lens zich bevinden.

Opmerking:

Een wazig of onscherp beeld bestaat niet. Het beeld is per definitie scherp, omdat de lichtstralen daar samen komen.

Als een projectiescherm wazig of onscherp verlicht is, komt dat omdat het beeld niet op het scherm is. Dit betekent dat de lichtstralen (afkomstig uit één punt) niet precies op het scherm samenkomen. Het scherm moet worden verschoven, totdat het beeld wel op het scherm is.

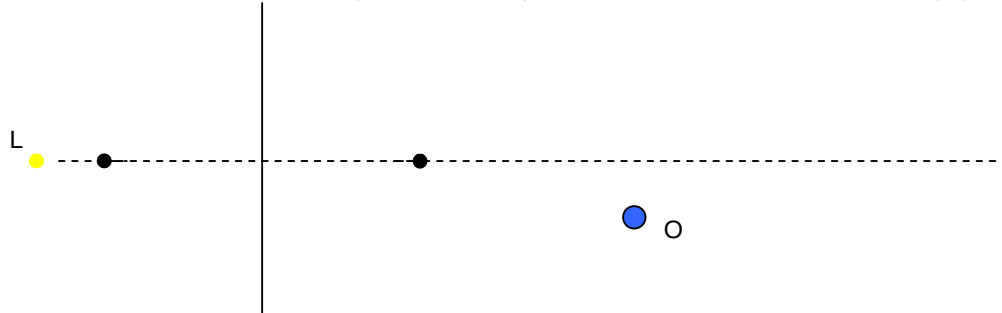
Nuttige sommen: 2, 4, 5, 6, 7.

Oefenopgave

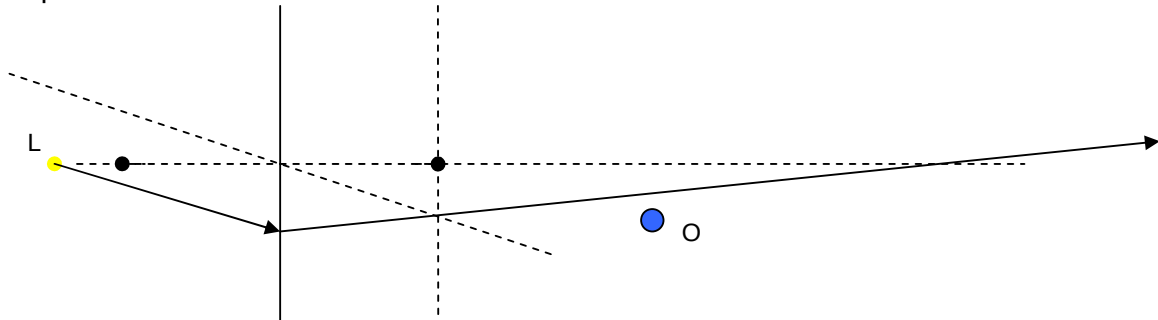
Een lamp L zendt licht uit in alle richtingen.

Een deel van het licht gaat door een positieve lens; de brandpunten van deze lens zijn gegeven. Achter de lens is een oog O.

Teken de lichtstraal afkomstig van de lamp, die door de lens naar het oog gaat.



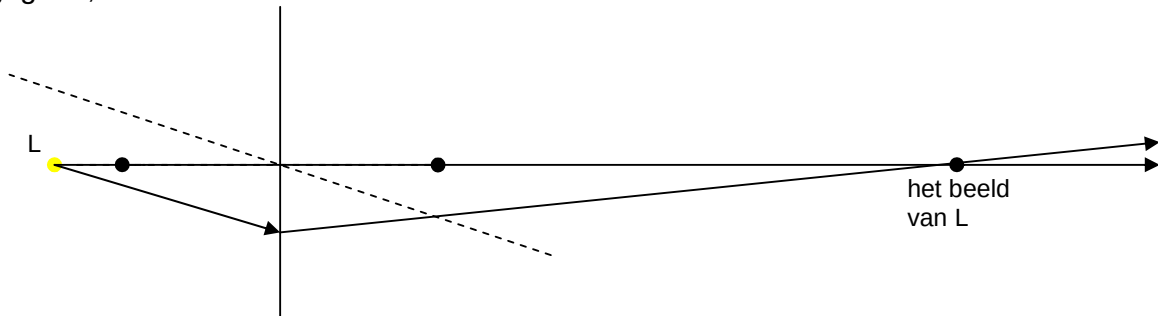
We proberen een lichtstraal.



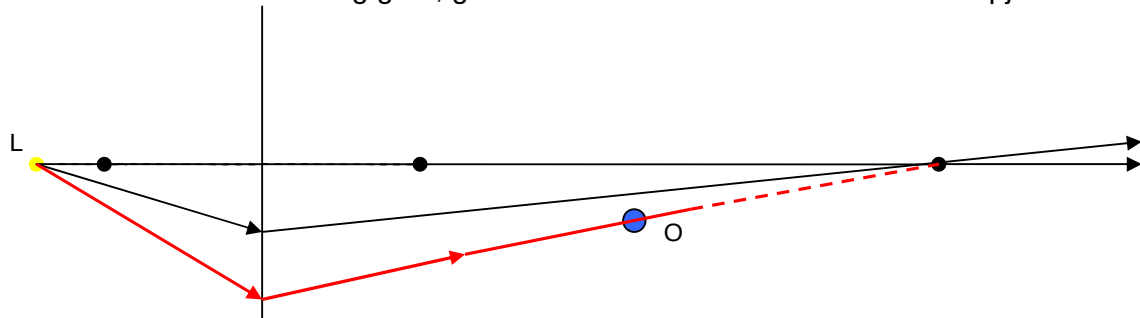
Dit is niet de juiste lichtstraal.

Van het lampje wordt door de lens een reëel beeld gevormd.

Het beeld is het punt waar alle lichtstralen afkomstig van L, die door de lens zijn gegaan, samenkomen.



De lichtstraal die door het oog gaat, gaat dus ook naar het beeld van het lampje.



§ 7.2 Lensformule en lineaire vergroting

□ Lineaire vergroting

De lineaire vergroting is hoeveel keer het beeld groter (langer) is dan het

voorwerp:
$$N = \frac{\text{grootte beeld}}{\text{grootte voorwerp}} = \frac{B}{V}$$

Deze verhouding is precies gelijk aan de verhouding van de beeldafstand b en

de voorwerpsafstand v . Er geldt dus ook¹¹:
$$N = \left| \frac{b}{v} \right|$$

- $0 < N < 1$: verkleining
- $N = 1$: voorwerp en beeld even groot
- $N > 1$: vergroting

Als de lineaire vergroting van een afbeelding bijvoorbeeld 4 x is, is het oppervlak van het beeld $4^2 = 16$ x zo groot als het oppervlak van het voorwerp.

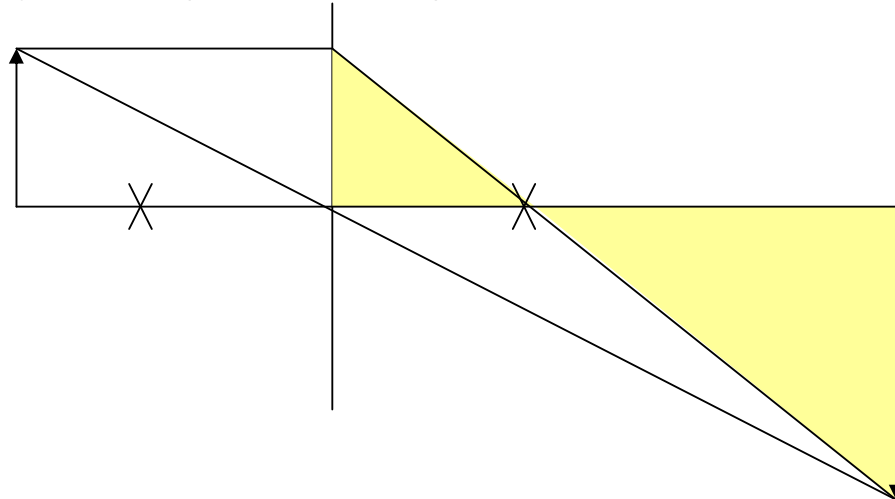
□ Lensformule

Er geldt:
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{b}$$

Afspraak:

- bolle lens: $f > 0$; holle lens: $f < 0$
- reëel beeld: $b > 0$; virtueel beeld: $b < 0$

Extra: Bewijs lensformule (bolle lens, reëel beeld)



De gele driehoeken zijn gelijkvormig, zodat:
$$\frac{V}{f} = \frac{B}{(b-f)}$$

$$\Rightarrow \frac{B}{V} = \frac{b}{v} = \frac{(b-f)}{f} = \frac{b}{f} - 1$$

Nu teller en noemer delen door b geeft de lensformule.

¹¹ De 'absoluutstrepen' zijn nodig, omdat bij virtuele beelden de beeldafstand negatief is.

□ **Sterkte S van een lens**

Er geldt: $S = \frac{1}{f}$

Gevolg: bolle lens: $S > 0$; holle lens: $S < 0$.

Afspraak: $[S] = \text{dpt} = \text{m}^{-1}$; f moet daarom in meter worden ingevuld.

Opmerking: De sterkte van een lens kan ook worden uitgerekend met

$$S = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} \text{ mits } v \text{ en } b \text{ in meter worden ingevuld.}$$

Toepassing (bladzijde 65) reëel beeld¹²

Gegeven: $f = 20 \text{ cm}$

$N = 2,5 \times$

Bereken v en b .

$$N = 2,5 = \frac{b}{v} \Rightarrow b = 2,5 \cdot v$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} \Leftrightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{v} + \frac{1}{2,5 \cdot v} = \frac{2,5}{2,5 \cdot v} + \frac{1}{2,5 \cdot v} = \frac{3,5}{2,5 \cdot v}$$

Kruislings vermenigvuldigen geeft: $2,5 \cdot v = 20 \cdot 3,5 \Rightarrow v = \frac{20 \cdot 3,5}{2,5} = 28 \text{ cm}$

$$\Rightarrow b = 2,5 \cdot v = 2,5 \cdot 28 = 70 \text{ cm}$$

Toepassing (bladzijde 65) virtueel beeld¹³

Gegeven: $f = 20 \text{ cm}$

$N = 2,5 \times$

Bereken v en b .

$$N = 2,5 = \left| \frac{b}{v} \right| \Rightarrow b = -2,5 \cdot v$$

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} \Leftrightarrow \frac{1}{20} = \frac{1}{v} + \frac{1}{-2,5 \cdot v} = \frac{2,5}{2,5 \cdot v} - \frac{1}{2,5 \cdot v} = \frac{1,5}{2,5 \cdot v}$$

Kruislings vermenigvuldigen geeft: $2,5 \cdot v = 20 \cdot 1,5 \Rightarrow v = \frac{20 \cdot 1,5}{2,5} = 12 \text{ cm}$

$$\Rightarrow b = -2,5 \cdot v = -2,5 \cdot 12 = -30 \text{ cm}$$

Nuttige sommen: 10, 11, 12a, 13.

¹² Het is dus niet nodig de formule $b = f(1+N)$ te gebruiken.

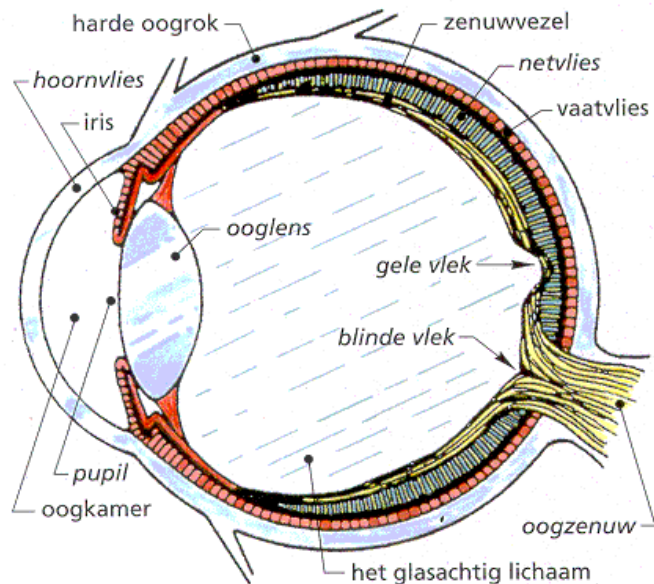
Je mag deze formule uitsluitend gebruiken, als je hem eerst bewijst.

¹³ Het is dus niet nodig de formule $b = f(1-N)$ te gebruiken.

Je mag ook deze formule uitsluitend gebruiken, als je hem eerst bewijst.

Oog

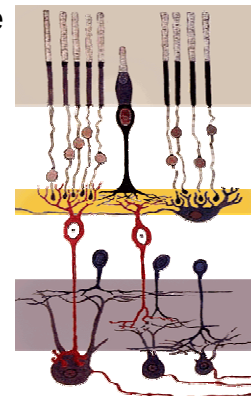
Zie: <http://www.oogartsen.nl/>



Voor de stralengang in het oog van lichtstralen zijn de volgende drie onderdelen belangrijk.

Netvlies: Op het netvlies bevinden zich lichtgevoelige zintuigcellen; staafjes en kegeltjes (voor rood, groen en blauw licht). Het aantal zintuigcellen (per mm^2) is het grootst in de gele vlek. In de blinde vlek zijn geen zintuigcellen.

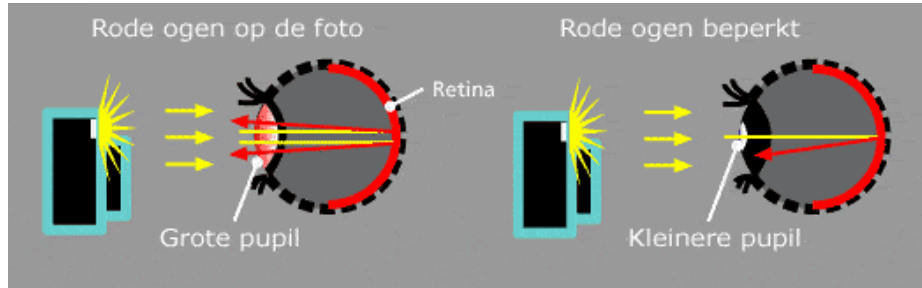
Ooglens: De combinatie¹⁴ van hoornvlies, oogkamer en ooglens zorgt voor een convergerende werking (breking van lichtstralen). De ooglens kan boller worden gemaakt. Dit accommodatievermogen gaat bij mensen tussen 40 en 50 jaar sterk achteruit, doordat de lens minder elastisch wordt. Als de ooglens troebel wordt, is er sprake van 'staar' (cataract).



A cataract is an opacity of the normally clear lens which may develop as a result of aging, metabolic disorders, trauma or heredity

¹⁴ We beschouwen deze combinatie als één geheel en noemen dit dé ooglens.

Pupil: De pupil is de opening in de iris, waardoor het licht het oog binnengaat. De iris zorgt ervoor dat de pupil groter of kleiner wordt afhankelijk van de hoeveelheid licht¹⁵. Als de diameter van de pupil 3 x zo groot wordt, zal er $3^2 = 9$ x zo veel licht in het oog terecht komen. Bij flitsfoto's (zonder voorflits) bestaat de kans op 'rode ogen'.



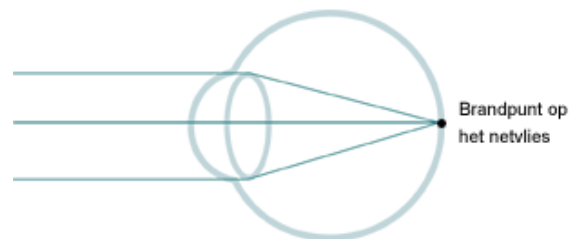
Om voorwerpen goed te kunnen zien is het nodig dat:

1. Het beeld van het voorwerp op het netvlies wordt gevormd. Je ziet het voorwerp dan scherp. Dit wordt in § 7.3 – 7.5 behandeld.
2. Het beeld van het voorwerp moet op voldoende lichtgevoelige zintuigcellen komen en mag dus niet te klein zijn. Je moet immers details kunnen onderscheiden. Dit wordt in § 7.6 behandeld.

Ver weg kijken

Als men kijkt naar een voorwerp dat 'ver weg' is, vallen de lichtstralen van één punt van het voorwerp (bij benadering) evenwijdig op het oog. Bij ver weg kijken is het oog ongeaccommodeerd.

Normaal oog



Het brandpunt van de ongeaccommodeerde ooglens is op het netvlies.

Voorbeeld:

Een normaal oog is 20 mm lang¹⁶.

Bereken de sterkte van het ongeaccommodeerde oog.

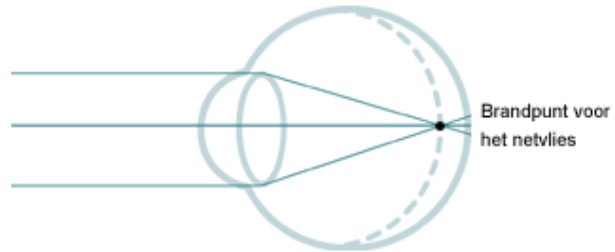
$$S = \frac{1}{f} = \frac{1}{0,020} = 50 \text{ dpt}.$$

Het vertepunt van een normaal oog ligt in 'oneindig'.

¹⁵ De pupil kan ook groter worden onder invloed van geneesmiddelen en verdovende middelen of door emoties.

¹⁶ Afstand knooppunt ooglens – netvlies.
Overigens zal het oog van een baby nog aanzienlijk groeien.

Bijziend oog



Het brandpunt van de ongeaccommodeerde ooglens is voor het netvlies.
Het oog is te lang.

Voorbeeld:

Een bijziend oog is 25 mm lang.

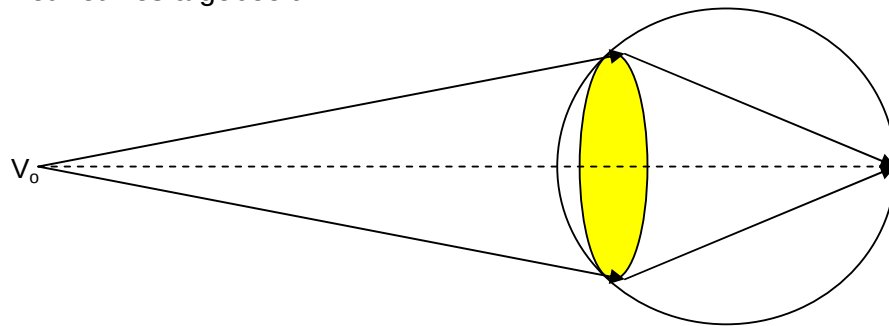
De sterkte van dit ongeaccommodeerde oog is 50 dpt.

Bereken de sterkte van de bril.

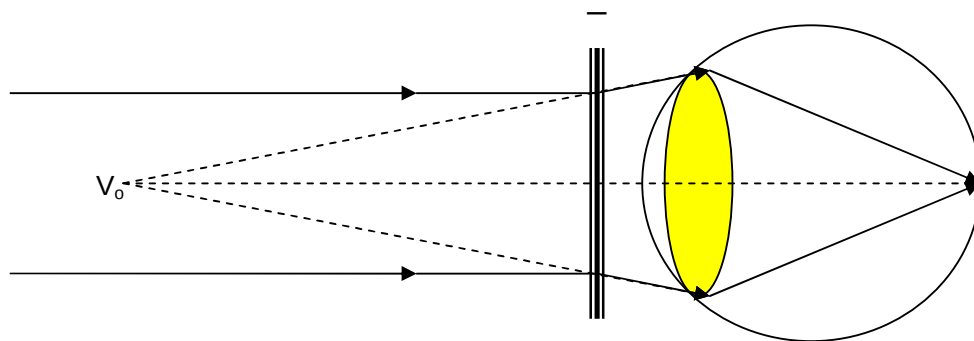
$$S_{\text{totaal}} = \frac{1}{\text{lengte oog}} = \frac{1}{0,025} = 40 \text{ dpt} \rightarrow S_{\text{bril}} = 40 - 50 = -10 \text{ dpt}$$

Bereken¹⁷ het vertepunt van het oog.

Lichtstralen uit het vertepunt van het oog V_o worden door de ongeaccommodeerde ooglens op het netvlies afgebeeld.



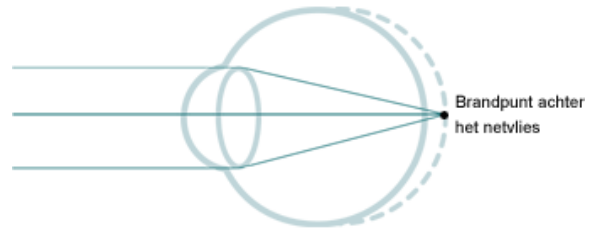
Dit vertepunt moet samenvallen met het brandpunt van de bril,



zodat het vertepunt op 10 cm ligt, immers: $f = \frac{1}{S} = \frac{1}{-10} = -0,10 \text{ m}$.

¹⁷ Tenzij anders vermeld, mag de afstand tussen de bril en de ooglens worden verwaarloosd.

Verziend oog



Het brandpunt van de ongeaccommodeerde ooglens is achter het netvlies.
Het oog is te kort.

Bij voortdurend accommoderen is een bril niet nodig.
Voortdurend accommoderen geeft echter (hoofdpijn)klachten.

Voorbeeld:

Een verziend oog is 17 mm lang.

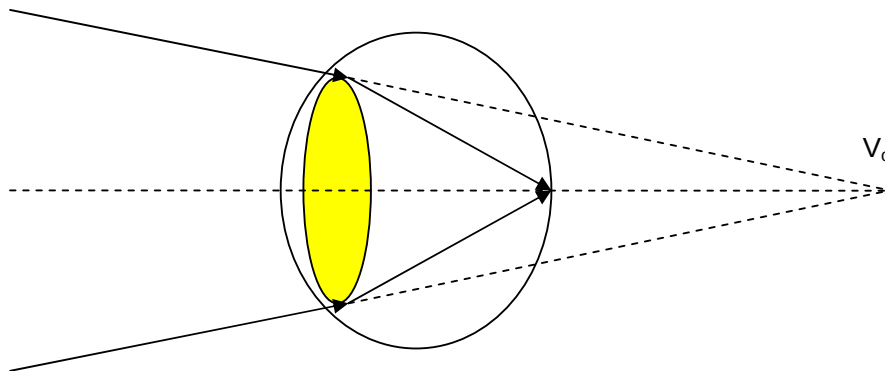
De sterkte van dit ongeaccommodeerde oog is 50 dpt.

Bereken de sterkte van de bril.

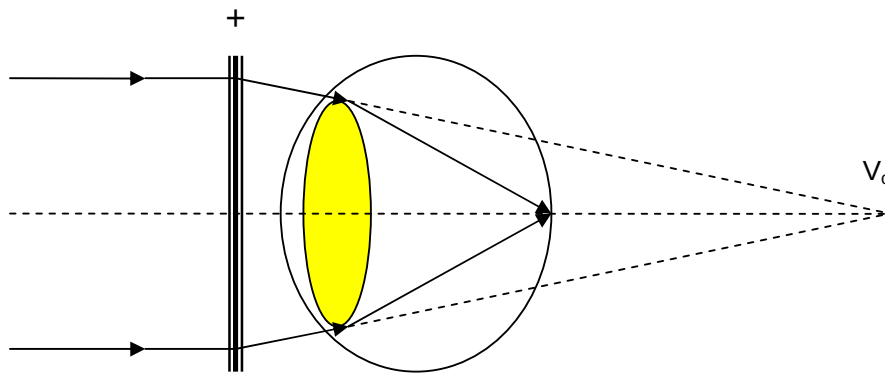
$$S_{\text{totaal}} = \frac{1}{\text{lengte oog}} = \frac{1}{0,017} = 59 \text{ dpt} \rightarrow S_{\text{bril}} = 59 - 50 = +9 \text{ dpt}$$

Bereken het vertepunt van het oog.

Lichtstralen in de richting van het vertepunt van het oog V_o worden door de ongeaccommodeerde ooglens op het netvlies afgebeeld.



Dit vertepunt moet samenvallen met het brandpunt van de bril,



zodat het vertepunt 1 dm 'achter het oog' ligt, immers: $f = \frac{1}{S} = \frac{1}{9} = 0,1 \text{ m}$.

Dichtbij kijken

Bij (zo) dichtbij (mogelijk) kijken is het oog maximaal geaccommodeerd.

Normaal oog

Een normaal oog is goed in staat om te accommoderen.
Scherp zien op relatief kleine afstanden is geen probleem.

Voorbeeld:

Een normaal oog is 20 mm lang.

Het nabijheidspunt van dit oog N_o is op 17 cm.

Bereken de sterkte van het maximaal geaccommodeerde oog.

$$S = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,17} + \frac{1}{0,020} = 5,9 + 50 = 56 \text{ dpt}.$$

Het accommodatievermogen van het oog is 6 dpt; het oog kan 6 dpt sterker worden.

Oudziend oog

Een oudziend oog is een oog dat niet meer in staat is goed te accommoderen.
Scherp zien op relatief kleine afstanden lukt niet meer.

Voorbeeld:

Een oudziend oog is 20 mm lang.

Het nabijheidspunt van dit oog N_o is op 37 cm.

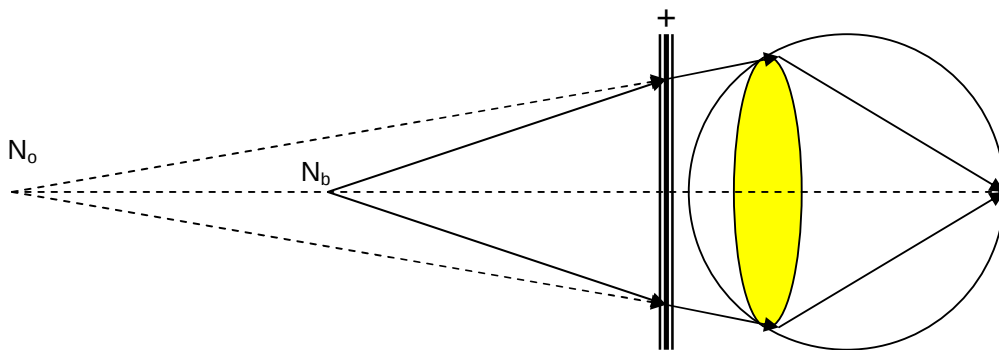
Bereken de sterkte van het maximaal geaccommodeerde oog.

$$S = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,37} + \frac{1}{0,020} = 2,7 + 50 = 53 \text{ dpt}.$$

Het accommodatievermogen is nog slechts 3 dpt.

Een bril moet lezen op 20 cm afstand mogelijk maken.

Bereken de sterkte van deze bril.



$$S = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,20} + \frac{1}{-0,37} = 5,0 - 2,7 = + 2,3 \text{ dpt}$$

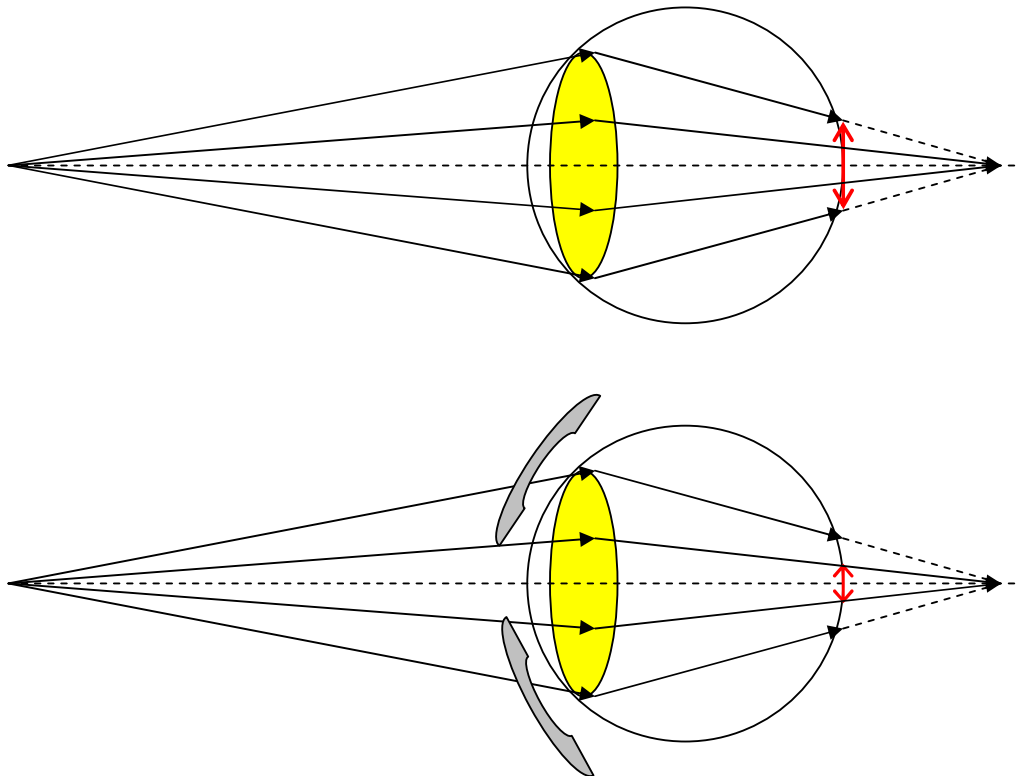
Alternatief:

$$S_{\text{totaal}} = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,20} + \frac{1}{0,020} = 5 + 50 = 55 \text{ dpt} \rightarrow S_{\text{bril}} = 55 - 53 = + 2 \text{ dpt}$$

Intermezzo: Het belang van fel licht bij onscherp zien

Er is sprake van onscherp zien, als het beeld niet op het netvlies wordt gevormd, maar ervoor of erachter.

In deze situatie is het wenselijk dat er fel licht is. Voorwerpen zijn dan soms toch herkenbaar. Bij fel licht is de pupil namelijk klein. Slechts een deel van het licht komt in het oog. Het gevolg is dat de 'onscherpte' (weergegeven door het rode pijltje op het netvlies) minder groot wordt.



Scherptediepte en fotografie

Een fotograaf kan door een klein diafragma te kiezen (eventueel in combinatie met lange belichtstijd) een foto met een groot 'scherptedieptegebied' maken (en omgekeerd).

Voorwerpen op verschillende afstanden lijken scherp op de foto.



grote scherptediepte

kleine scherptediepte

vervolg dichtbij kijken

Bijziend oog

Bij een bijziend oog ligt het nabijheidspunt zonder bril N_o dicht bij.
Omdat een bijziende 'altijd' zijn bril opheeft (of contactlenzen in), komt het nabijheidspunt N_b echter verder weg te liggen.

Voorbeeld:

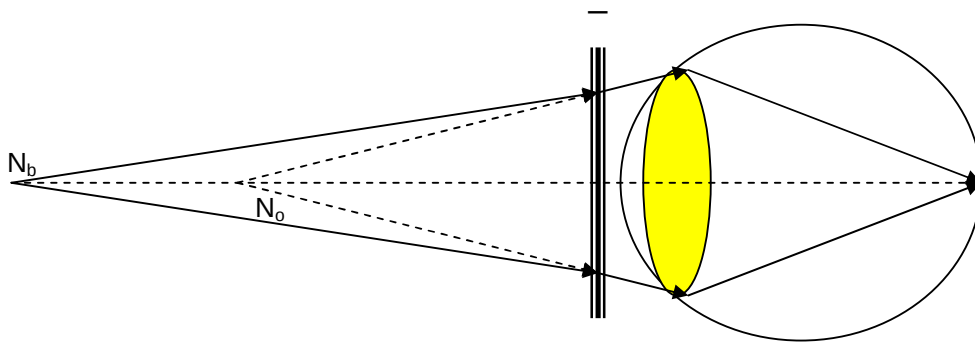
Een bijziend oog is 25 mm lang.

De sterkte van dit ongeaccommodeerde oog is 50 dpt.

Deze persoon heeft een bril van -10 dpt (zie boven).

Met bril op ligt het nabijheidspunt op 12,5 cm.

Bereken het nabijheidspunt zonder bril.



$$\frac{1}{b} = S - \frac{1}{v} = -10 - \frac{1}{0,125} = -10 - 8,00 = -18 \rightarrow b = \frac{1}{-18} = -0,056 \text{ m}$$

Het nabijheidspunt zonder bril ligt dus op 5,6 cm.

Bereken de sterkte van het maximaal geaccommodeerde oog.

$$S = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,056} + \frac{1}{0,025} = 18 + 40 = 58 \text{ dpt}$$

Alternatief:

$$S_{\text{totaal}} = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,125} + \frac{1}{0,025} = 8,00 + 40 = 48 \text{ dpt} \rightarrow S_{\text{oog}} = 48 + 10 = +58 \text{ dpt}$$

Verziend oog

Bij een verziend oog ligt het nabijheidspunt zonder bril N_o (te) ver weg.
Omdat een verziende 'altijd' zijn bril opheeft (of contactlenzen in), komt het nabijheidspunt N_b echter dichterbij te liggen.

Voor wat betreft dichtbij kijken zijn verziendheid en oudziendheid vergelijkbaar.
Een verziende heeft zijn bril echter nodig om ver weg scherp te kunnen kijken (zonder te accommoderen), terwijl een oudziende geen bril nodig heeft om ver weg te kunnen kijken.

Voorbeeld:

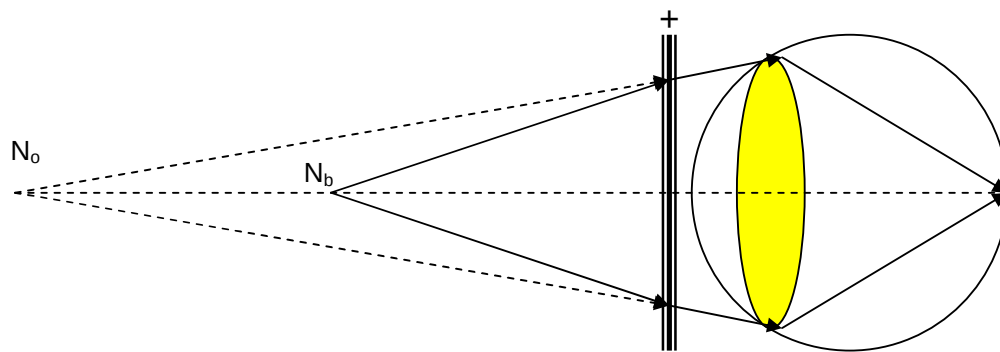
Een bijziend oog is 17 mm lang.

De sterkte van dit ongeaccommodeerde oog is 50 dpt.

Deze persoon heeft een bril van + 9 dpt (zie boven).

Met bril op ligt het nabijheidspunt op 10 cm.

Bereken het nabijheidspunt zonder bril.



$$\frac{1}{b} = S - \frac{1}{v} = 9 - \frac{1}{0,10} = 9 - 10 = -1 \rightarrow b = \frac{1}{-1} = -1 \text{ m}$$

Bereken de sterkte van het maximaal geaccommodeerde oog.

$$S = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{1} + \frac{1}{0,017} = 1 + 59 = 60 \text{ dpt}$$

Alternatief:

$$S_{\text{totaal}} = \frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{0,10} + \frac{1}{0,017} = 10 + 59 = 69 \text{ dpt} \rightarrow S_{\text{oog}} = 69 - 9 = 60 \text{ dpt}$$

Nuttige sommen:

§ 7.3 17, 19

§ 7.4 22, 23

§ 7.5 26, 27, 28, 29

§ 7.6 Duidelijk zien

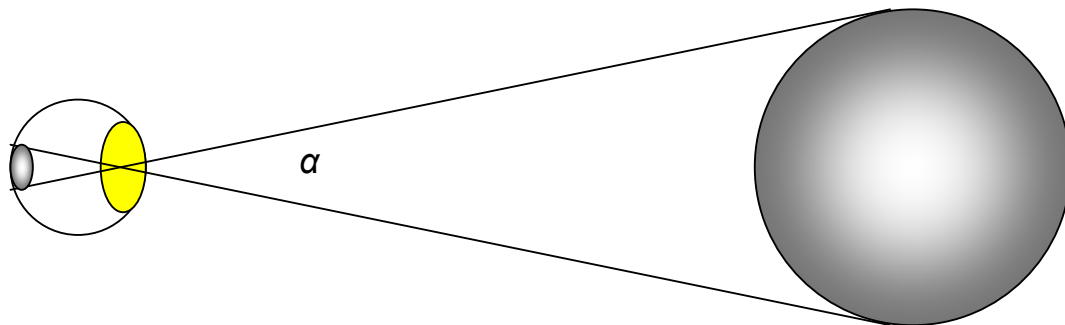
Om details van een voorwerp goed te kunnen zien, is het niet voldoende dat er van dat voorwerp een beeld op het netvlies wordt gevormd.

Het beeld van de maan wordt bij iedereen, eventueel m.b.v. een bril of contactlenzen, op het netvlies afgebeeld.

Toch is het niet mogelijk details op het maanoppervlak te onderscheiden. Het beeld op het netvlies is te klein.



De grootte van het beeld op het netvlies hangt af van de gezichtshoek α .



Kleine (gezichts)hoeken worden uitgedrukt in boogminuten of zelfs boogseconden.

Eén boogminuut (1') is $\frac{1}{60}^\circ$.

Eén boogseconde (1'') is $\frac{1}{60}$ boogminuut.

- Ga na dat de gezichtshoek waaronder de volle maan wordt waargenomen 31' is.
- Ga na dat het oppervlak van het beeld van de volle maan op het netvlies ongeveer $3 \cdot 10^3 \mu\text{m}^2$ is.

Het scheidend (of oplossend) vermogen van het menselijke oog is (ruim) 1'. Als de gezichtshoek kleiner is dan 1', kunnen twee naburige punten niet meer afzonderlijk worden waargenomen.

Soldaten in een Romeins legioen stellen zich naast elkaar op. De onderlinge afstand tussen de schilden is 0,2 m

- Ga na dat op 0,7 km de afzonderlijke soldaten in een Romeins legioen kunnen worden herkend.



Op een verrekijker is de (hoek)vergroting vermeld: 7. Met deze verrekijker wordt de gezichtshoek 7 x vergroot en gekeken naar het Romeinse legioen.

- Ga na dat op 5 km de afzonderlijke soldaten kunnen worden herkend.

(Het objectief van de verrekijker heeft een diameter van 50 mm.)



De details van een voorwerp kunnen het best worden bekeken als het voorwerp in het nabijheidspunt staat, omdat:

- de gezichtshoek dan maximaal is, terwijl
- het beeld nog op het netvlies wordt gevormd.

De spanwijdte van de atalanta is 5,0 cm.
Het nabijheidspunt is op 12 cm van het oog.

- Ga na dat de maximale gezichtshoek waaronder de atalanta kan worden gezien 23° is.



Atalanta

Een loep is een positieve lens met een kleine brandpuntsafstand.

Met een loep kunnen meer details van de vlinder worden waargenomen; de loep vergroot namelijk de gezichtshoek.

Bij het gebruik van een loep wordt het voorwerp in het brandvlak geplaatst; het voorwerp kan dan met ongeaccommodeerd (ontspannen) oog worden bekeken.



De spanwijdte van de atalanta is 5,0 cm.

De sterkte van de loep is 12,5 dpt.

- Ga na dat de gezichtshoek waaronder de atalanta met de loep (met ongeaccommodeerd oog) kan worden gezien 32° is.
- Ga na in dit geval dat de (hoek)vergroting van de loep 1,4 is.

In het boek staat (blz. 90) dat voor de (hoek)vergroting van een loep geldt:
$$N_{ang} = \frac{\text{nabijheids punt} - \text{oog}}{f_{loep}}$$

- Ga na dat deze formule niet (precies) klopt.
- Bewijs m.b.v. figuur 7.41a en 7.41c van het boek dat deze formule bij benadering geldt, indien de (gezichts)hoeken 'klein' zijn.

Nuttige sommen:

§ 7.6 33, 36

§ 7.7 37, 39, 40

Nuttige oefenopgaven:

<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=931379>

<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=791378>

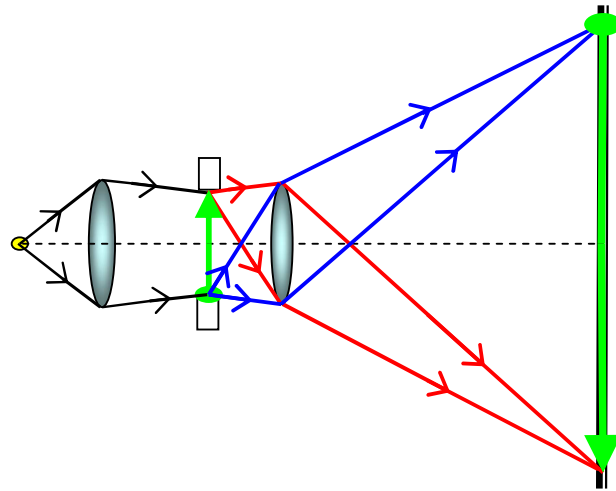
<http://www.natuurkunde.nl/artikelen/view.do?supportId=938560>

§ 7.7 Enkele optische apparaten

De diaprojector

In een diaprojector wordt van een voorwerp (de dia) door een lens een afbeelding op een projectiescherm gemaakt: zie figuur 7.45.

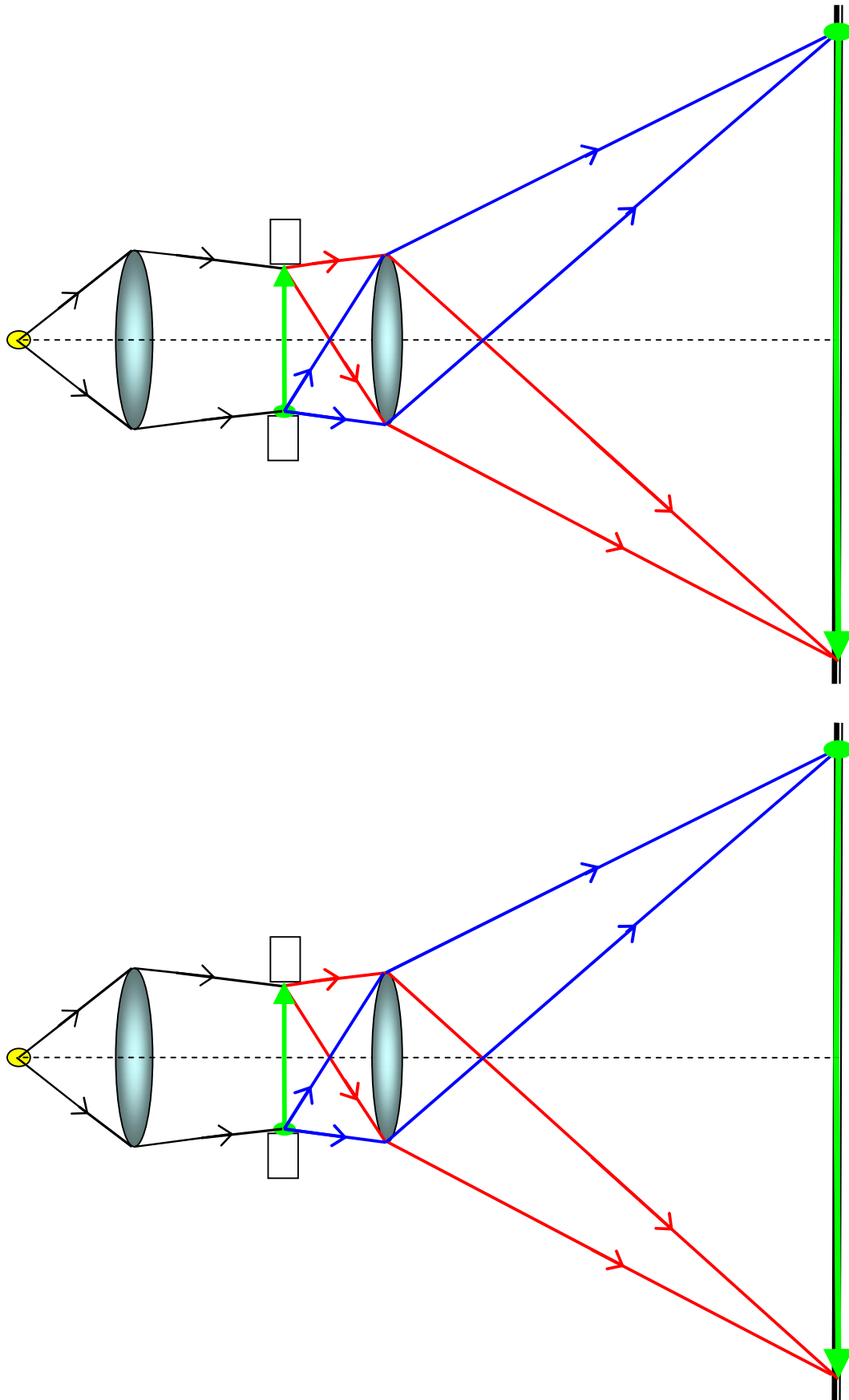
Het licht van een sterke lamp komt via een hulplens op de dia. De holle spiegel zorgt ervoor dat het naar achteren uitgezonden licht ook op de dia komt. Deze spiegel is in onderstaande figuur weggelaten.



Gebruik de figuren op de volgende bladzijde om de volgende opdrachten te maken:

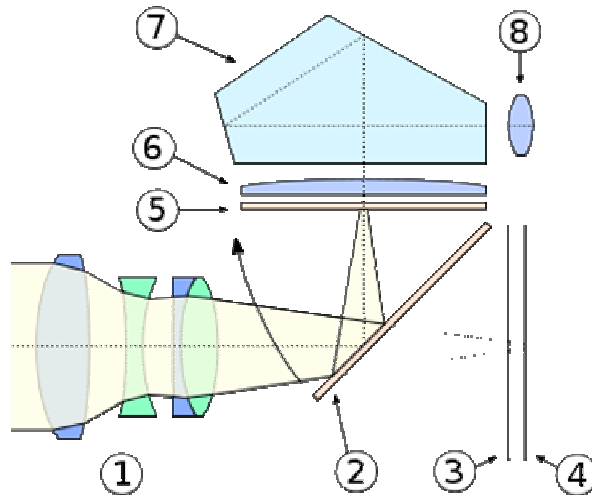
De dia is in werkelijkheid 5,0 cm hoog.

1. Toon aan dat de afstand tussen (het optisch middelpunt van) de projectorlens en het projectiescherm 16 cm is.
2. Bepaal de brandpuntsafstand f van de projectorlens.
3. Bepaal de sterkte S van de hulplens.
4. Leg uit welke lens (de projectorlens of de hulplens) het sterkst is.
5. Bepaal de vergroting N van de afbeelding van de projectorlens.
6. Construeer waar het projectiescherm moet worden geplaatst, opdat het beeld van de lamp op het scherm gevormd wordt.
7. Leg uit wat er op het projectiescherm verandert, als de projectorlens verschoven wordt van de dia naar het projectiescherm.
8. Leg uit wat er op het projectiescherm verandert, als de hulplens verschoven wordt van de lamp naar de dia.



De spiegelreflex camera

De tekening toont de weg van het licht via het objectief (1), de weerkaatsing door de spiegel (2) en de projectie op het matte instelglas (5). Via een lens (6) en het pentaprisma (7) bereikt het beeld de zoeker (8). Tijdens de opname klappt de spiegel omhoog, de sluiters (3) opent, en het beeld wordt geprojecteerd op de film of sensor (4) met precies hetzelfde beeld als zichtbaar in de zoeker.

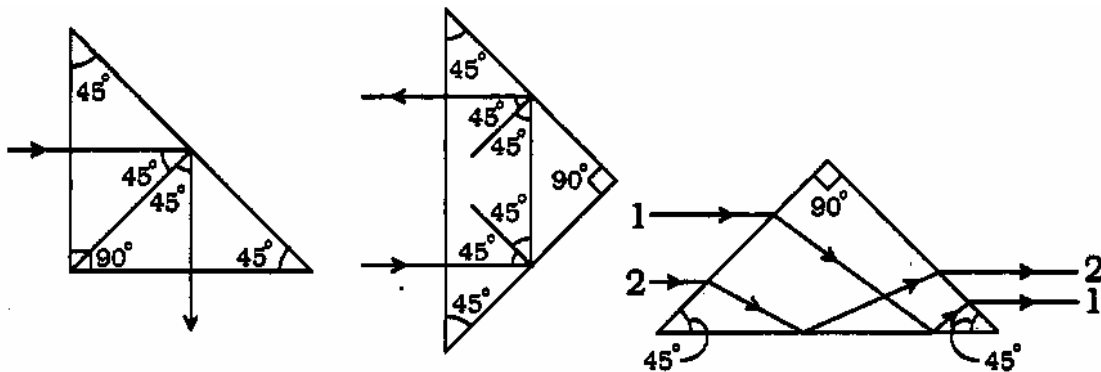


Het objectief is een stelsel van lenzen. Door de onderlinge afstanden van deze lenzen te veranderen, kan de sterkte van het objectief als geheel worden aangepast. Zo wordt scherpgesteld op het te fotograferen voorwerp.

Omdat de afstand van de spiegel tot het instelglas even groot is als de afstand van de spiegel tot de film / sensor, kan in de zoeker precies worden gezien wat op de film / sensor gaat worden afgebeeld.

Om door het objectief te kunnen kijken wordt een pentaprisma gebruikt. Dit prisma is gemaakt van glas. Op de reflecterende zijden zit een spiegelende coating.

1. Worden de voorwerpen in de zoeker 'rechttop' gezien of juist 'op z'n kop'?
2. In een glazen prisma is totale terugkaatsing mogelijk.

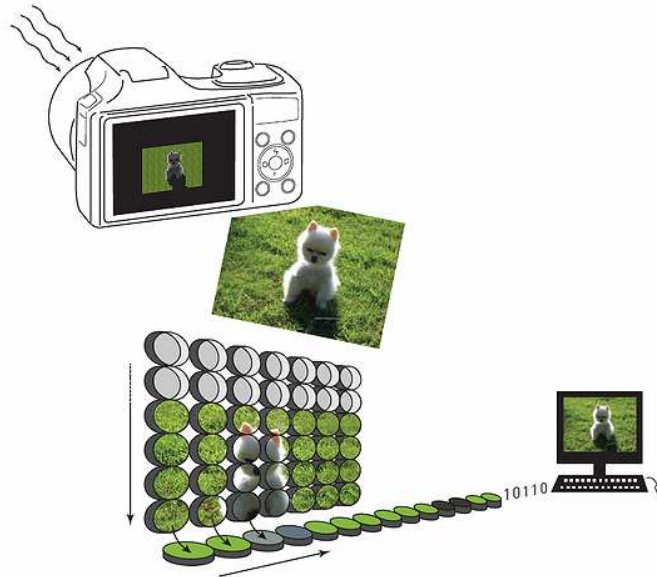


Waarom is de spiegelende coating toch nodig bij het pentaprisma?

Digitale fotografie

Bij een digitale camera wordt het beeld geprojecteerd op een lichtgevoelige sensor: de CCD-chip. De uitvinding hiervan leverde in 2009 de Nobelprijs op.

Zie: <http://www.kennislink.nl/publicaties/nobelprijs-natuurkunde-2009>



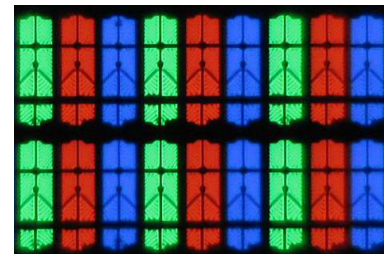
Licht wordt door de lens van de camera afbeeld op één van de vele '*pixels*' op de CCD-chip. Deze pixels vullen zich met meer elektronen naarmate er meer licht op valt. Deze lading wordt, door een AD-omzetter en een computer, omgezet in het beeld.

De kwaliteit van het beeld hangt af van de **resolutie**: het aantal pixels op de chip.

Beamer

In een beamer wordt een LCD door een projectielens op het scherm afgebeeld.

Deze LCD bestaat uit een groot aantal pixels, die zijn opgebouwd uit rode, groene en blauwe subpixels.



Door deze kleuren additief te mengen wordt de afbeelding op het scherm gemanipuleerd.

Er is bijvoorbeeld een **e** zichtbaar in een wit vlak.

