# METROLOGIE

## 1 INLEIDENDE BEGRIPPEN

### 1 Taak en methode

In de natuurkunde worden natuurverschijnselen bestudeerd.
vb. een appel valt, water kookt, een lichtstraal wordt teruggekaatst op een vlakke spiegel...

Om tot een fysische wet te komen moeten we eerst waarnemen, daarna meten en ordenen en dan volgt hieruit de WET, dit is de synthese van een reeks experimenteel gemeten waarnemingen.
We kunnen een wet ook theoretisch invoeren, dit noemt men dan een hypothese (= veronderstelling). Maar in de fysica moet steeds de wet getoetst worden aan het waarnemen. Als het waarnemingsverschijnsel voldoet, dan heeft men een juiste hypothese; als het waarnemingsverschijnsel niet voldoet dan heeft men een slechte hypothese.

Een fysische wet wordt beschreven met de wiskunde, dit is de taal van de fysica.
Merk op dat 5 en 5.0 in de wiskunde dezelfde betekenis heeft, in de fysica echter niet!

### 2 Natuurkunde en andere wetenschappen

In de natuurkunde zal de aard van de stof niet veranderen.
vb. bewegingsverschijnselen, smelten, verdampen...
In de scheikunde zal de aard van de stof wel veranderen.
vb. verbranden, roesten...
In de biologie bestudeert men levende wezens.
vb. planten, dieren...

De natuurkunde of fysica bevat een groot aantal takken die afzonderlijk kunnen bestudeerd worden.
vb. mechanica, warmteleer, elektriciteit, astronomie, elektronica, informatica, geofysica, kernfysica...

### 3 Hoofdeenheden

Om de fysische verschijnselen te kunnen bestuderen moeten we eerst goed kunnen meten, want je begrijpt dat met onnauwkeurige metingen onze wet onmogelijk kan gecontroleerd worden. Het spreekt vanzelf dat we met eenvoudige metingen beginnen.
Door het meten van een lengte, een massa, een tijd en een temperatuur kunnen we voorlopig alle fysische verschijnselen meten.

We moeten deze 4 grootheden dan ook exact definiëren.

De hoofdeenheid van lengte is de standaardmeter, dit is de afstand tussen twee streepjes aangebracht op een platinastaaf die bewaard is in Sèvres. De afgeleide eenheden zijn de km, hm, dam, m, dm, cm, mm.

De hoofdeenheid van tijd is de middelbare zonnedag, dit is het gemiddelde tijdsverloop tussen twee opeenvolgende doorgangen van de zon door de meridiaan. De afgeleide eenheden zijn h, min, s. (Let op schrijfwijze!!)

De hoofdeenheid van de massa is het standaardkilogram, dit is de massa van een platinablok bewaard te Sèvres. De afgeleide eenheden zijn kg, hg, dag, g, dg, cg, en mg.

De hoofdeenheid van temperatuur is de Kelvin, dit is $1/100^{ste}$ van de afstand tussen twee streepjes op een thermometer die men in smeltend ijs en in kokend water gebracht heeft en is gelijk aan de Celsius. De eenheden zijn K en °C.

## 4 Oefeningen

1 Welke zijn de 4 grootheden die toelaten de fysische verschijnselen te definiëren?

2 Zet om:
100 cg =... kg
0.10 dag =... cg
1 h 15 min 38 s =... s
34867 s =... h.. min... s
12 hm =... mm
1500 dm =... hm
38 dam =... cm
0.23 kg =... dg

# 2 MEETINSTRUMENTEN

## 1 Lengtemeting

Uit het dagelijks gebruik kent men de meetlat en de lintmeter. Deze voldoen ruimschoots om metingen tot op 1 mm nauwkeurig uit te voeren. We proberen hier de lengte van een potlood, een agenda of een schrift te meten. Om nauwkeuriger metingen (=nauwkeuriger wetten) te kunnen verrichten hebben we betere toestellen nodig.

Een schuifmaat met nonius is een meettoestel waarmee we metingen tot op 0.1 mm kunnen aflezen. Je begrijpt dat dit toestel dus 10 maal nauwkeuriger meet dan een gewone meetlat. Een nonius bestaat uit een kleine lat die langs de schuifmaat verplaatsbaar is. Op de nonius is een schaalverdeling van 9 mm lengte aangebracht die in 10 gelijke delen verdeeld is. Iedere verdeling op de nonius is dus 0.9 mm, dit betekent 0.1 mm kleiner dan de verdeling op de meetlat. Dit oefenen we in het lab met voorbeelden. De metingen worden nauwkeurig opgetekend. We werken liefst met voorwerpen met regelmatige vorm. (Balken of kubussen)

Een ander toestel waarmee nauwkeurige metingen kunnen verricht worden is de palmer of micrometerschroef. Dit toestel meet nog 10 keer nauwkeuriger dan een schuifpasser en dus 100 keer nauwkeuriger dan een meetlat. Het spreekt vanzelf dat we dit slechts voor kleinere afmetingen zullen gebruiken. Een volledige omwenteling van de schroef is 1 mm. (of 0.5 mm) De omtrek van de schroef is verdeeld in 100 (of 50) gelijke delen. Men kan hier dus aflezen tot op 0.01 mm nauwkeurig. We maken weer gebruik van de lab oefeningen om te meten.

## 2 Tijdmeting

Uurwerken zijn jullie zeker bekend al of niet met een secondewijzer. We kunnen hier dus tot op 1 seconde nauwkeurig aflezen. Wensen we nauwkeuriger te meten dan maken we gebruik van een chronometer die tijden tot op 0,2 s, 0,1 s, of 0,01 s afleest. Dit is zeker nodig, denk maar aan metingen die gebeuren bij atletiek en bij autoraces waar zelfs tot op 0.001 s gemeten wordt om duidelijke verschillen te kunnen waarnemen. In het lab leren we de chronometer goed gebruiken met enkele oefeningen.

## 3 Massameting

Om massa's te bepalen maakt men gebruik van een balans. Merk op dat massa's in kg of g uitgedrukt worden. (Gewicht moet in Newton uitgedrukt worden!). Iedereen kent beslist zijn eigen massa, maar dit is maar tot op 1 kg nauwkeurig.
Wil men nauwkeuriger meten dan moet dit met een nauwkeuriger balans gebeuren. We maken gebruik van de bestaande balansen in het lab om enkele nauwkeurige massametingen uit te voeren en nauwkeurig op te tekenen.

## 4 Temperatuurmeting

Om temperaturen te bepalen maakt men gebruik van een thermometer. Merk op dat de temperatuur in °C gemeten wordt. Wil men nauwkeuriger meten dan maken we gebruik van een thermometer die op 0.1 °C nauwkeurig meet. We meten in het lab de temperatuur van bv. enkele bekers met water op verschillende temperatuur. We vergelijken met twee thermometers met verschillend meetbereik.

# 3 NAUWKEURIGHEID VAN METINGEN

## 1 Oorzaken van foutieve metingen

In het voorgaande hoofdstuk hebben we vastgesteld dat de nauwkeurigheid waarmee we meten in de eerste plaats afhangt van het meettoestel zelf. Hoe nauwkeuriger dit is hoe beter onze meting zal zijn. Maar we kunnen nu ook fouten maken bij het aflezen van deze meettoestellen. De voornaamste oorzaken waardoor men een fout maakt zijn de systematische fouten.
bv. een slecht geijkt instrument, in verkeerde omstandigheden het instrument gebruiken of zelfs niet te meten invloeden.

Er bestaan ook toevallige fouten zoals verkeerd aflezen of onoplettend zijn. Deze fouten zijn echter te vermijden. Het meten van een willekeurige grootheid geeft echter al een fout, want men kan niet nauwkeuriger meten dan de kleinste aanduiding op het meettoestel (de rest is schatten). Dit laatste is op te lossen door bij elke meting de fout te vermelden.

## 2 Benaderingsregels voor fouten

Om de moeilijke foutentheorie te vermijden kan men best gebruik maken van een aantal eenvoudige benaderingsregels. Vooreerst moeten we weten dat elk toestel waarmee we meten een kleinst mogelijke verdeling heeft. Deze kleinste verdeling noemen we de absolute fout. Je kan ze dus gemakkelijk op het meettoestel zelf aflezen.
Bv. een meetlat heeft een fout van 1 mm, een maatcilinder heeft een fout van 5 ml, een chronometer heeft een fout van 0.1 s. Dit betekent dat als je een meting uitvoert je altijd met die fout rekening moet houden.

Bv. als l = 23,4 cm gemeten met een meetlat met absolute fout van 1 mm dan schrijven we:

l = ( 23,4 +/- 0,1) cm

Dit betekent dat de lengte van de meetlat begrepen is tussen 23,3 cm en 23,5 cm.

Bv. als m = 5,6 g gemeten met een balans met absolute fout van 0.1 g dan schrijven we:

m = (5,6 +/- 0,1) g

Dit betekent dat de massa van het voorwerp begrepen is tussen 5,5 g en 5,7 g.

## 3 Beduidende cijfers en bewerkingen

Veronderstel dat we de massadichtheid $\rho$ = m/V van een lichaam bepalen door het meten van de massa m = 25,5 g, dit is een nauwkeurigheid van 0,1 g. Het volume is V = 34 ml = 34 $cm^3$ met een fout van 1 ml.

Er is hier tweemaal gemeten met twee verschillende fouten. Hoe moet je nu de fout van zo'n onrechtstreekse meting bepalen?
We passen de theorie van de beduidende cijfers toe. In de massa staan 3 beduidende cijfers, in het volume 2 beduidende cijfers, dit betekent dat het resultaat van de deling maximaal 2 beduidende cijfers mag hebben.
Dus $\rho = 25.2/34 = 0.74117\ g/cm^3$
We ronden dit echter af tot op 2 beduidende cijfers
nl. $\rho = 0.74\ g/cm^3$

We onthouden:

De minst nauwkeurige meting bepaalt de nauwkeurigheid van het eindresultaat.
Bij een onrechtstreekse meting mag het berekend resultaat slechts evenveel beduidende cijfers tellen als het meetresultaat met het kleinste aantal beduidende cijfers.

Bijkomend kunnen we vaststellen dat bovenstaande meting niet erg nauwkeurig uitgevoerd is. Met deze rekenregels kun je nu de fout berekenen op alle metingen die we zullen uitvoeren. We gaan dat in het lab telkens hernemen zodat je bewust wordt van het feit dat we bij het meten altijd een fout maken, maar dat de meting toch juist is van zodra we een idee hebben van de fout.

## 4 Grafieken

Bij het meten van de dichtheid van een vloeistof kunnen we het volgende experiment uitvoeren. We bepalen achtereenvolgens de massa van 10 g, 20 g, 30 g, 40 g en 50 g van de vloeistof (propaantriol) en bepalen het volume ervan. (In maatcilinder)
We bekomen respectievelijk 12.5 ml, 25.0 ml, 37.5 ml, 50.0 ml en 62.5 ml.
We zetten deze gegevens uit in een V(m)-diagram. De onafhankelijk veranderlijke is hier de massa en de afhankelijk veranderlijke het volume. We plaatsen de massa op de horizontale as en het volume op de verticale as. We vergeten niet de eenheden er tussen haakjes bij te voegen. We verbinden de meetpunten en krijgen dus een rechte door de oorsprong. Uit de vorm van de grafiek, nl. een rechte kun je besluiten dat er een recht evenredig verband bestaat tussen V en m. Hieruit leiden we af dat V/m constant is en die constante verhouding wordt het volume per massa genoemd.

Gaan we nu omgekeerd te werk. We meten van een vloeistof achtereenvolgens 10, 20, 30, 40 en 50 ml af. We bepalen nu telkens de massa. Dit levert de volgende resultaten nl. 8, 16, 24, 32 en 40 g.

We zetten deze gegevens uit in een m(V)-diagram. De onafhankelijk veranderlijke is hier het volume en plaatsen we op de horizontale as. De afhankelijk veranderlijke is de massa en plaatsen we op de verticale as. We verbinden opnieuw de uitgezette punten en krijgen weer een rechte.

Nu is m/V weer een constante, we noemen die constante de massa per volume en als symbool noemen we ze $\rho$ (uitgesproken rho) of kort de (massa)dichtheid. De eenheid van $\rho$ is $kg/m^3$, maar kan beter in $g/cm^3$ worden uitgedrukt.

We kunnen nu ook gemakkelijk aantonen dat de dichtheid een zeer specifieke eigenschap van de stof is door bv. van 100 ml poedersuiker, 100 ml keukenzout, 100 ml zand, 100 ml ijzervijlsel en 100 ml bloem de massa te bepalen en daaruit de dichtheid te bepalen. Zie tabel met dichtheden bij de labo oefeningen.

## 5 Oefeningen

1 Wat is het nauwkeurigst: 5,8 m of 5,80 m. Verklaar.

2 Hoeveel beduidende cijfers?
m = 15.27 g
t = 234 s
h = 234.56 m
l = 0.18 m
b = 0.050 mm

3 Bij een meting vinden we m = 12.8 g en V = 45 $cm^3$. Bereken $\rho$ en de meetnauwkeurigheid. Heb je een idee van de absolute fout van beide metingen?

4 Zet om: $\rho$ = 7800 $kg/m^3$ in $g/cm^3$.

5 Uit een meting vinden we $\rho$ = 0.85 $g/cm^3$. Het volume was V = 56.8 $cm^3$. Bereken hieruit de massa en geef ook de meetnauwkeurigheid.

# HET MATERIEMODEL

## 1 MASSA VOLUME DICHTHEID

### 1 Massa en gewicht

In het voorgaande deel hebben we de massa van een voorwerp leren bepalen met een balans. We hebben vastgesteld dat de massa van een voorwerp gemeten wordt in kg of in g. In de omgangstaal zal men echter altijd spreken over gewicht. Wat is dan eigenlijk het verschil? Je zult wel al gehoord hebben over de maanwandelingen van de astronauten en van de ruimtewandelingen om bv. een defecte satelliet te herstellen. De astronauten zijn dan in een toestand van gewichtloosheid. Dit betekent dan natuurlijk niet dat ze geen massa meer zouden hebben, want dan zouden ze in het niets oplossen. Het gewicht van een voorwerp heeft dus duidelijk te maken met het aanwezig zijn in de nabijheid van de aarde. Veronderstel dat we een voorwerp met zelfde massa op de maan wegen, dan zullen we minder gewicht hebben. (denk aan het stripalbum van Kuifje: mannen op de maan) De reden waarom de voorwerpen op de maan minder wegen is omdat de maan een kleinere massa heeft dan de aarde. Gewicht heeft dus te maken met de grootte van de planeet waar men de massa bepaalt. Voor ons is het niet zo moeilijk, want wij bepalen de massa altijd op aarde. We zullen het gewicht uitdrukken in Newton (N). De verhouding van het gewicht tot de massa zal op aarde dan ook altijd hetzelfde zijn. We zullen dit getal g (zie later) noemen en het is gelijk aan 9.8 N/kg. (op aarde natuurlijk)

$G = m.g$

bv. $m = 50$ kg dan is $G = 50 * 9.8 = 490$ N

### 2 Massa en volume

Verwarmen we een koperen bol met een welbepaalde massa en controleren we dat die bol bij lage temperatuur wel door een ring gaat en bij hoge temperatuur niet meer dan stellen we vast dat het volume van een lichaam temperatuur afhankelijk is. De massa van een lichaam is dat echter niet. We controleren dit met de balans. De verhouding van de massa op het volume noemen we de (massa)dichtheid van het lichaam. Dit is een heel fundamentele grootheid in de fysica. We zullen er dan ook uitgebreid op ingaan.

$$\rho = m/V$$

Eenheden van $\rho$ $kg/m^3$ of $g/cm^3$

We moeten die eenheden goed kunnen omzetten.

Merk op dat $1000\ kg/m^3 = 1\ g/cm^3$.

## 3 Meten van de dichtheid

Uit de bovenstaande formule $\rho = m/V$ is het duidelijk dat we om de dichtheid te meten, de massa m en het volume V moeten meten. De massa van het voorwerp kan op de balans bepaald worden. We meten de massa in g of in kg. Om het volume van een voorwerp te bepalen is het noodzakelijk de formules voor het volume uit de wiskunde te kennen.
We onthouden hierbij het volume van
- een kubus $V = z^3$ met z de zijde van de kubus
- een balk $V = l.b.h$ met l, b en h lengte, breedte en hoogte
- een cilinder $V = A.h$ met $A = \pi d^2/4$ en d de diameter en h de hoogte
- een bol $V = \pi d^3/6$ met d de diameter

We kunnen al deze grootheden meten met een meetlat, of nauwkeuriger met de schuifmaat. Het zijn immers allemaal lengtes.

Merk op dat we in de fysica liever gebruik maken van de diameter i.p.v. de straal omdat we steeds de diameter meten en nooit de straal. In de praktijk meten we afstanden in cm en massa's in g, zodat we de massadichtheid in $g/cm^3$ bekomen. Het is nu echter een koud kunstje dit in $kg/m^3$ om te zetten. In het lab (zie labo proef) kunnen we dergelijke metingen uitvoeren. We nemen een aantal houten blokjes (neem dezelfde houtsoort - waarom?) met regelmatige vorm. We bepalen telkens de massa op de balans met meetnauwkeurigheid 0.1 g. We bepalen de afmetingen van het blokje met de schuifpasser op 0.01 cm en berekenen het volume. We berekenen tenslotte voor elk blokje de massadichtheid - en plaatsen onze metingen in een m(V)-grafiek.

## 4 Dichtheid van vaste lichamen met onregelmatige vorm

Men vraagt je bv. de dichtheid van een ijzeren sleutel te bepalen. Geen probleem zeg je. We passen de voorgaande methode toe, bepalen de massa, bepalen de afmetingen.... Neen, dat gaat niet.

Hoe bepalen we nu het volume van een lichaam met onregelmatige vorm?
De oplossing is de volgende. Vermits de materie in de ruimte een bepaald volume inneemt zullen we onze blok materie in water onderdompelen. Het is duidelijk dat daardoor het volume in de maatcilinder stijgt. Het volumeverschil komt overeen met het volume van het lichaam. We kunnen dus weer $\rho$ berekenen.

Maken we gebruik van een vijftal verschillende ijzeren voorwerpen dan kunnen we weer telkens $\rho$ berekenen en een m(V)-grafiek maken. In het lab (zie proef) kan dit experimenteel geverifieerd worden. Gebaseerd op hetzelfde principe kunnen we de massadichtheid van het menselijk lichaam bepalen. Je bepaalt de massa van de proefpersoon. In een ton met overloop breng je de proefpersoon (best in badpak) en laat hem zichzelf volledig onderdompelen. Het overtollig water wordt opgevangen en het volume ervan bepaald. Zo zie je maar dat fysicaproeven toch spectaculair kunnen zijn.

## 5 Dichtheid van vloeistoffen

Hier treedt weer een probleem op, want we kunnen een vloeistof toch niet rechtstreeks op de balans zetten of toch? We maken gebruik van een maatbeker. We brengen een bepaald volume vloeistof in de beker, bepalen de gezamenlijke massa en trekken dan de massa van de beker eraf om de massa van de vloeistof te kennen.
We vinden $\rho$ door de massa van de vloeistof te delen door het volume. We werken met een vijftal verschillende volumes.
Met water zal m(water) = V(water) omdat $\rho$(water) = 1 g/cm$^3$.
Je wist al dat voor water 1 dm$^3$ = 1 l, dit wordt nu met deze proef experimenteel bevestigd. Bovenstaande proef voeren we uit met methanol of met glycerine. We kunnen natuurlijk ook olie nemen, maar dat is wat vettiger!!

## 6 Dichtheid van gassen

Wat zeg je nu? Kunnen we ook de dichtheid van gassen bepalen? Hoe moet dat nu in hemelsnaam?
Hoe bepaal je de massa van een gas op de balans, en hoe bepaal je het volume? We nemen een glazen kolf met volume van bv. 1 l. Dat kun je nameten door de kolf te vullen met water. We bepalen de massa van de kolf gevuld met lucht ( die hier het gas is) op de balans. Met een vacuümpomp of waterstraalpomp (uit les chemie) maken we de kolf luchtledig en bepalen opnieuw de massa. Het verschil geeft de massa van de lucht en het volume kenden we reeds zodat we weer de massadichtheid kunnen bepalen. Zie ook proef lab.

## 7 Tabellen

We vergelijken onze metingen met de tabellen die bestaan voor dichtheden van vaste stoffen, vloeistoffen en gassen. Zie tabellen. We kunnen nu ook de procentuele afwijking van de theoretische waarde berekenen. Veronderstel dat we in onze proef voor ijzer als gemiddelde waarde vonden dat $\rho$ = 8.1 g/cm$^3$.
Kijken we naar de massadichtheid van ijzer in de tabel dan zien we dat $\rho$ = 7.85 g/cm$^3$. Hoeveel is dan de procentuele afwijking?

$$\left( \frac{8.1}{7.85} * 100 \right) - 100 = 3\ \%$$

## 8 Toepassingen

Het zal je niet ontgaan zijn dat bv. olie bovendrijft op water, een metalen voorwerp zinkt, een blik cola light bovendrijft en een blik gewone cola zinkt. Dit betekent dat we weten dat de massadichtheid van olie kleiner is dan die van water. Verifieer in de tabel. Uit de tabel zien we dat bv. lood zal zinken in water, maar bovendrijven in kwik. De verklaring van de krachten die hierbij werkzaam zijn volgt later, maar het is duidelijk dat je uit de tabellen al heel wat praktische ervaring kunt halen.

## 9 Oefeningen

1 Waarom drijft olie op water?

2 De straal van een bol is 2.3 cm. Als de massadichtheid 7.8 $g/cm^3$ is, hoeveel is dan de massa van deze bol? (Hou rekening met de meetnauwkeurigheid)

3 De afmetingen van een balk zijn 12.4 cm, 13.6 cm en 2.40 cm. Bereken het volume en de dichtheid als je weet dat zijn massa 2678 g is. (Hou rekening met de meetnauwkeurigheid)

# 2 AGGREGATIETOESTANDEN EN KENMERKEN

## 1 Temperatuur en warmtehoeveelheid

In het eerste deel hebben we gezien dat temperatuur een fundamentele grootheid is en gemeten wordt met een thermometer in °C. Waarom moeten we de temperatuur van een lichaam kunnen bepalen? Om exacte wetten op te stellen moeten we nauwkeurig meten. Uit de omgangstaal kennen we de begrippen heet, warm, lauw, koud, vrieskou...
Dit zijn echter relatieve en subjectieve begrippen. Met een eenvoudige proef kunnen we dit vaststellen. We nemen een beker met warm water en voelen met de hand in het water: het is warm. Steken we echter eerst de hand in koud water en voelen we dan opnieuw, dan voelt het nu bijna heet. Vandaar de noodzaak om temperaturen van lichamen te meten en objectieve waarnemingen te verrichten. Het toestel dat we daarvoor gebruiken is de thermometer, het is gebaseerd op een lengtemeting.
Plaatsen we een beker water op een drievoet en verwarmen we met de bunsenbrander dan zien we dat als we bv. om de twee minuten de temperatuur aflezen, na roeren, dat de temperatuur stijgt. Met de bunsenbrander (of elektrische dompelaar) voeren we warmte toe. De hoeveelheid warmte die we toevoeren noemen we warmtehoeveelheid met symbool Q en als eenheid de Joule (J). Het is echter ook mogelijk warmte toe te voegen. We blijven dan verwarmen zonder dat de temperatuur stijgt, dit gebeurt als het water kookt. De temperatuur blijft 100 °C. Het water verdampt, het is dus verandert van aggregatietoestand. Vertrekkende van een proef waarin we 2 bekers met verschillende hoeveelheden water brengen die we t.z.t. verwarmen (we voeren dezelfde warmtehoeveelheid toe) kunnen we duidelijk aantonen dat de beker met de kleinste hoeveelheid water eerst zal koken. Het is ook duidelijk dat de bekers, als ze beide dezelfde warmtehoeveelheid hebben opgenomen ze niet noodzakelijk dezelfde temperatuur hebben.

## 2 Aggregatietoestanden

De materie die we kennen kunnen we in drie verschillende aggregatietoestanden verdelen. We kennen nl. de vaste toestand, de vloeibare toestand en de gasvormige toestand.
De materie in de vaste toestand heeft een vaste vorm, neemt een bepaald volume in en is weinig of niet samendrukbaar.
bv. bij een auto die samengedrukt wordt is het in feite de binnenruimte die samengedrukt wordt, bij het samendrukken van een spons drukt men de lucht en het water weg.
De materie in de vloeibare toestand heeft geen vaste vorm, ze neemt de vorm aan van het vat waarin ze gegoten wordt. Ze neemt wel een bepaald volume in, want 1 l blijft 1 l in een vat van 1 l of in een vat van 5 l. Vloeistoffen zijn niet samendrukbaar, met een injectiespuit zie je de vloeistof eruit spuiten.
De materie in de gasvormige toestand heeft geen vaste vorm maar neemt een zo groot mogelijk volume in en heeft dus ook geen bepaald volume. Gassen zijn echter wel sterk samendrukbaar. Denk aan de vele toepassingen met spuitbussen waarin gas onder druk staat.

## 3 Faseovergangen

In een schema worden de faseovergangen als volgt samengevat:

```
                    Sublimeren
--------------------------------------------→

           Smelten            verdampen
           ------->          -------->
VAST              VLOEISTOF           GAS
          <-------          <--------
           Stollen            condenseren
<----------------------------------------------
                    Sublimeren
```

De overgangen die van links naar rechts gaan zijn warmte opname, de overgangen van rechts naar links zijn warmteafgifte. We zullen deze overgangen nu systematisch bekijken.

## 4 Smelten en stollen

Proef
We nemen een beker met smeltend ijs en bepalen de begintemperatuur. We verwarmen nu met de bunsenbrander en nemen om de twee minuten de temperatuur op (roeren). We verwarmen tot de temperatuur +/- 15 °C is. We maken een temp(tijd)-grafiek.

Merk op dat we ook het stollen van paraffine kunnen bepalen. We merken hierbij op dat het volume van paraffine in vaste toestand kleiner is dan het volume van de paraffine in vloeibare toestand.  Bij water is het volume in de vaste toestand (ijs) groter dan het volume in de vloeibare toestand. Denk maar aan gesprongen waterleidingen of erosietoestanden uit de les aardrijkskunde.

## 5 Verdampen en condenseren

Proef
We nemen een beker met water, we verwarmen en noteren de temperatuur. We meten een vijftal minuten nadat het water kookt. We maken weer een temp(tijd)-grafiek
Merk op dat we bij het verdampen van ether (bv. op de hand) een temperatuurdaling krijgen.

## 6 Sublimeren

Proef
Met jodium zien we dat de vaste stof rechtstreeks overgaat in de gasfase.
Voorbeelden in de praktijk vinden we bij ijskristallen en hagel.

# 3 EIGENSCHAPPEN VAN DE MATERIE

## 1 Materie heeft massa en volume

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat materie een bepaalde massa heeft. Materie heeft ook een bepaald volume. De massadichtheid $\rho$ was de verhouding van massa op volume en is stof specifiek. De aggregatietoestand speelt een rol bij bepaalde eigenschappen van de materie bv. wel of geen samendrukbaarheid.

## 2 Materie is deelbaar

Een klontje suiker kan geplet worden tot kristalsuiker. We kunnen de verdeling nog opdrijven door te pletten tot bloemsuiker. De materie is deelbaar.

Proef
We beginnen met het oplossen van suiker in water. De stof die men oplost noemt men de opgeloste stof en het middel waarin men oplost noemt men het oplosmiddel. De oplossing kan terug gefiltreerd worden. We kunnen hier ook het begrip dichtheid bij betrekken bij verschillende oplossingen. Hoe groter de massa suiker, hoe groter de dichtheid als het volume gelijk blijft. We kunnen aan een oplossing suiker toevoegen en deze oplossing verwarmen. We stellen vast dat hoe hoger de temperatuur, hoe hoger de oplosbaarheid. We kunnen nu ook het begrip verzadigde oplossing en onverzadigde oplossing en het begrip concentratie invoeren. Het is mogelijk van een oplosbaarheidskromme te construeren en oefeningen te maken in verband met de veranderingen in de toestand van een oplossing. We kunnen ook een oplossing kristalliseren, deze oplossing uitdampen of draden in een geconcentreerde oplossing hangen. Dit is echter meer voor in de les chemie.

## 3 Diffusie van materie

Diffusie is het verschijnsel waarbij twee stoffen zich spontaan mengen. Dit kan bij vloeistoffen, maar ook bij gassen.

Proef
Leg een korrel kaliumpermanganaat in een schaaltje met water. De vlek wordt met de tijd groter.

## 4 Cohesie en adhesie bij materie

Proeven
- twee vlakke plaatjes uit glas op elkaar leggen
- twee kwikdruppels in elkaars onmiddellijke buurt duwen
- twee waterdruppels op oliepapier in elkaars onmiddellijke buurt duwen
- vinger in water steken
- vinger in kwik steken (opletten met goud)
- vloeistofranden controleren bij water en bij kwik

Uit de proeven stellen we vast dat er twee soorten krachten (zie later) werkzaam zijn tussen de moleculen.

Cohesie is de aantrekkingskracht tussen moleculen van eenzelfde soort. Adhesie is de aantrekkingskracht tussen moleculen van een verschillende soort.

### 5 Poreusheid en vervormbaarheid van materie

Proef
Een filtreerpapiertje zuigt water op. Door het feit dat er lege ruimte is tussen de moleculen, is de materie poreus.
Proef
We drukken een spons samen. Door het feit dat er lege ruimte is tussen de moleculen is de materie vervormbaar.

### 6 Elasticiteit van materie

Een stalen staaf kan geplooid worden, een veer rekt uit, een boekenplank buigt door. Dit zijn voorbeelden van de elasticiteit van de vaste stof. Dit betekent dat de materie rekbaarheid vertoont. Deze rekbaarheid is al of niet blijvend. Indien de stof in zijn oorspronkelijke toestand terugkeert spreekt men over een elastische stof.

### 7 Beweging van materie

De materie is voortdurend in beweging. Bij een vaste stof is dat niet zo gemakkelijk vast te stellen. Bij een vloeistof daarentegen kan men gemakkelijk de beweging van de materiedeeltjes waarnemen. Men noemt deze beweging ook wel de Brownbeweging.
Proef
De Brownbeweging uitvoeren met een reuterlamp en krijtdeeltjes of verwijzen naar de lab proef waar we een druppel verdunde melk of Oost-Indische inkt op een dekglaasje leggen en met de microscoop (400 tot 600 x) bekijken.

# 4 HET MATERIEMODEL

## 1 Structuurmodel van de materie

Om al de eigenschappen van de materie goed te kunnen begrijpen is het noodzakelijk dat we een materiemodel of structuurmodel invoeren. Hoe ziet dit model eruit?

De vaste stof wordt voorgesteld door het volgende model:
De vaste stof is opgebouwd uit kleine massadeeltjes (moleculen) die we voorstellen door punten. Deze punten trillen ten opzichte van elkaar Tussen de punten is er een onderlinge aantrekkingskracht (cohesiekracht) De openingen tussen de punten zorgen voor poreusheid en ook elasticiteit van de vaste stof.

De vloeistof wordt voorgesteld door het volgende model:
Het vloeistofmodel bestaat eveneens uit massapunten, maar nu zijn de kenmerken veranderd. De punten glijden langs elkaar en er zijn weinig of geen openingen zodat een vloeistof niet samendrukbaar is en een constant volume heeft. Er zijn cohesiekrachten werkzaam tussen de massapunten, maar ze zijn relatief klein. Bovendien zijn de vloeistofdeeltjes voortdurend in beweging, zowel binnen als aan de oppervlakte.

Het gas wordt voorgesteld door het volgende model:
Het gasmodel bestaat eveneens uit massapunten, maar de gasdeeltjes zijn voortdurend in beweging. Ze bewegen rechtdoor tot ze met andere deeltjes of met de wand botsen. Ze zijn niet aan elkaar gebonden, er is dus praktisch geen krachtwerking tussen de deeltjes.

## 2 Samenvatting

Groeperen van al deze eigenschappen gezien vanuit het materiemodel, geeft aanleiding tot volgend overzicht:

| | Vaste stof | Vloeistof | Gas |
|---|---|---|---|
| vorm | vast | veranderlijk | veranderlijk |
| volume | vast | vast, vorm vat | veranderlijk |
| samendrukbaarheid | klein | klein | groot |
| cohesie | groot | groot | te verwaarlozen |
| poreus | klein | klein | groot |
| beweging | trillen op plaats | kleine Verplaatsing | grote verplaatsing |

## 3 Smelten en stollen verklaren vanuit het materiemodel

Smelten is uiteraard de overgang van vaste stof naar vloeistof. Wat gebeurt er met de materie punten?
Schematisch geeft dat volgend overzicht:

| | vaste stof | vloeistof |
|---|---|---|
| cohesie | grote aantrekkingskracht | vermindert |
| energie | minder energie | groter en nog groter bij buurdeeltjes |
| | vaste buren | altijd andere buren |
| | bewegen niet | bewegen |

Dit materiemodel volstaat om al onze experimenten te verklaren. We nemen dan ook aan dat het juist is.

# GEOMETRISCHE OPTICA

## 1 LICHT - EIGENSCHAPPEN

### 1 Definities

Uit het materiemodel kunnen we afleiden dat licht in feite bestaat uit een opeenvolging van kleine materiedeeltjes. Bij het zichtbaar maken van lichtstralen door het uitkloppen van een bordveger zien we dat licht bestaat uit een bundel stralen. Een enkele lichtstraal is in feite niet realiseerbaar. We hebben in het geval van een lichtstraal te maken met geometrische optica. We stellen vast dat een lichtstraal zich rechtlijnig voortbeweegt in een homogeen midden. Uit de praktijk steel we vast dat er bij de geometrische optica 3 soorten bundels bestaan nl. convergerende, divergerende en evenwijdige bundels. Licht kan op voorwerpen invallen. Deze voorwerpen kunnen

- ondoorschijnend vb. metaalplaat,
- doorschijnend vb. blad papier
- doorzichtig zijn vb. glas

Licht kan door voorwerpen geabsorbeerd, teruggekaatst of gebroken worden. We zullen deze gevallen nader bekijken. In werkelijkheid is licht een vorm van energie. Licht is afkomstig van een energiebron of lichtbron. In een lichtbron zal dus een energie-omzetting plaatsgrijpen.

Warmte kan in licht worden omgezet.
vb. stuk Fe eerst rood, dan geel en dan wit: thermoluminescentie

Chemische energie kan in licht worden omgezet.
vb. een stuk gele fosfor zal oxideren en langzaam blauw licht opwekken: chemiluminescentie

Elektrische energie kan in licht worden omgezet.
vb. Na-lamp (geel); Ne-lamp (rood): elektroluminescentie

Speciale stoffen zijn de fluorescerende en fosforescerende stoffen.
Fluorescerende stoffen zijn stoffen die lichtgevend worden na bestraling (reflectoren)
Fosforescerende stoffen zijn stoffen die blijven stralen na lichtinval (wijzers van een uurwerk)

### 2 Schaduwvorming

Schaduw is de plaats van een niet belichte zone. Er bestaan 2 soorten schaduw nl. kernschaduw en bijschaduw. Bij een ideale puntbron is er alleen kernschaduw, bij een uitgestrekte bron zijn de twee soorten steeds aanwezig.

Gekende toepassingen hiervan zijn de zon en maansverduisteringen. (maak zelf figuren)

## 3 Donkere kamer

Licht afkomstig van een uitgestrekte lichtbron (rechtopstaande pijl) wordt in een donkere kamer bekeken.

Besluiten:
1) de pijl wordt omgekeerd afgebeeld
2) de pijl wordt scherper afgebeeld als het gaatje kleiner is
3) de pijl wordt helderder afgebeeld als het gaatje groter is, maar is dan minder scherp

# 2 TERUGKAATSING VAN LICHT

## 1 Wetten van de terugkaatsing

Om de wetten van de terugkaatsing af te leiden gebruiken we een spiegel, dit is een ondoorschijnend voorwerp dat de lichtstralen terugkaatst.

1$^{ste}$ wet: het vlak gevormd door de invallende en de teruggekaatste straal staat loodrecht op het raakvlak aan de spiegel in het punt waar de straal de spiegel treft.

2$^{de}$ wet: de invalshoek i is de hoek tussen de normaal n en de invallende lichtstraal, de terugkaatsinghoek t is de hoek tussen de normaal n en de teruggekaatste straal met $i = t$

3$^{de}$ wet: bij terugkaatsing is de stralengang omkeerbaar d.w.z. de teruggekaatste lichtstraal mag door de invallende vervangen worden.

## 2 Proef met de draaiende spiegel

Draaien we een spiegel over een hoek $\alpha$ terwijl we de invallende straal onveranderd laten dan wordt de teruggekaatste straal over een hoek $2\alpha$ gedraaid.

## 3 Beeldvorming bij vlakke spiegels

Voor we de beeldvorming bespreken geven we eerst enkele definities. Een voorwerpspunt is elk punt waar de stralen samenkomen voor ze teruggekaatst of gebroken worden. Een reëel beeldpunt is elk punt waar stralen samenkomen nadat ze teruggekaatst of gebroken worden. Een virtueel beeldpunt is elk punt waar de verlengden van de stralen samenkomen (al of niet teruggekaatst of gebroken) Men kan een virtueel beeld krijgen van een reëel voorwerp of een reëel beeld van een virtueel voorwerp (zie figuur)

Bij een vlakke spiegel is het beeld virtueel, even groot als het voorwerp, rechtopstaand en het ligt symmetrisch met het voorwerp t.o.v. de spiegel. Beeld en voorwerp staan tot elkaar zoals linker en rechterhand.

## 4 Beeldvorming bij sferische spiegels

Er bestaan twee soorten sferische spiegels nl. holle en bolle. We moeten vooraf nog enkele definities invoeren.
R : kromtestraal
M : krommingsmiddelpunt
MO : hoofdas of optische as
O : spiegelmiddelpunt
PM : bijas
$\alpha$ : openingshoek ( < 20° )
F : brandpunt

We kunnen zeer gemakkelijk aantonen dat f = R/2 (als $\alpha < 20°$) en f is de brandpuntsafstand. Om de 8 gevallen van beeldvorming bij spiegels te kunnen construeren maken we de volgende afspraken:
1)een straal evenwijdig met de hoofdas wordt teruggekaatst door het brandpunt F (rood)
2)een straal door het spiegelmiddelpunt wordt symmetrisch teruggekaatst (zwart)
3)een straal door het brandpunt F wordt evenwijdig met de hoofdas teruggekaatst (blauw)
4)een straal door het kromtemiddelpunt keert niet terug tenzij volgens haar eigen baan (groen)

We noemen;
v voorwerpsafstand = de afstand van het voorwerp tot het spiegelmiddelpunt
b beeldafstand = de afstand van het beeld tot het spiegelmiddelpunt
f brandpuntsafstand = de afstand van het brandpunt tot het spiegelmiddelpunt

De acht gevallen (zie figuur 1 tot 8)

1) 2f < v < oneindig: HOL reëel omgekeerd verkleind

2) v = oneindig: HOL reëel omgekeerd verkleind in F

3) v = R = 2f: HOL reëel omgekeerd even groot in R

4) f < v < R: HOL reëel omgekeerd vergroot achter V

5) v = f: HOL geen beeld

6) 0 < v < f: HOL virtueel rechtopstaand

7) v = oneindig: BOL virtueel rechtopstaand verkleind in R

8) 0 < v < oneindig: BOL virtueel rechtopstaand voor F

## 5 Spiegelformule voor de plaats van het beeld

We kunnen bewijzen dat 1/f = 1/v + 1/b als we de volgende afspraken in acht nemen:
f, v, b zijn positief als ze voor de spiegel gelegen zijn
f, v, b zijn negatief als ze achter de spiegel gelegen zijn

We bewijzen dit voor een holle spiegel met 2f < v < oneindig

VV'O ~ BB'O

of $$\frac{VV'}{BB'} = \frac{V'O}{B'O} = \frac{v}{b} \qquad (1)$$

IOF ~ FBB'

$$\text{of}\quad \frac{IO}{BB'} = \frac{VV'}{BB'} = \frac{FO}{B'F} = \frac{f}{B'O-FO} = \frac{f}{b-f} \qquad (2)$$

of v/b = f/b-f

hieruit v(b - f) = bf
vb = bf + vf

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

Voorbeeld
Waar bevindt zich het beeld van een voorwerp op 80 cm van een holle spiegel met f = 20 cm?
1/b = 1/f - 1/v = 1/20 - 1/80 = 4-1/80 = 3/80
of b = 80/3 = 26.7 cm

## 6 Formule voor de lineaire vergroting

Naast de spiegelformule moeten we eveneens de vergrotingsformule kennen

$$\boxed{G = \frac{b}{v}}$$

waarbij de volgende afspraken gemaakt worden:

G positief dan rechtopstaand en virtueel
G negatief dan omgekeerd en reëel
|G| > 1 vergroot beeld
|G| < 1 verkleind beeld

bv. f = 20 cm v = 80 cm b = 27 cm
dus G = -27/80 = - 0.3 dus een omgekeerd verkleind reëel beeld

## 7 Oefeningen

1 Zoek de plaats van het beeld van een voorwerp dat 4 cm hoog is bij een holle spiegel met f = 20 cm en v = 30 cm. Zoek de aard van het beeld en de lineaire vergroting.

2 Men wil een 5 maal vergroot virtueel beeld bekomen bij een holle spiegel met brandpuntsafstand f = 30 cm. Zoek v en b!

3 Een bolle spiegel met brandpuntsafstand f = 24 cm geeft van een voorwerp 10 cm hoog en dat op 16 cm van de spiegel staat een virtueel beeld. Bereken de plaats en de grootte van dit beeld.

# 3 BREKING VAN LICHT

## 1 Brekingswetten

Wanneer een lichtstraal verandert van medium volgt ze niet langer een rechte lijn maar wordt gebroken (vergelijk met een stok in water)

1ste wet: het vlak gevormd door de invallende straal en de gebroken straal staat loodrecht op het scheidingsvlak

2de wet: de verhouding van de sinus van de invalshoek i tot de sinus van de brekingshoek r is constant
$i_0$ : is de hoek in het luchtledige (of in lucht!)
met $i_0 > r$

$$\frac{\sin i_0}{\sin r} = c^{te} = n = \text{brekingsindex}$$

3de wet: de brekingsindex is afhankelijk van de middenstof, men kan de glasplaat door een pvc-plaat vervangen
bv. glas: n = 1.50
water: n = 1.33

4de wet: de brekingsindex is afhankelijk van de kleur (en dus eigenlijk van de golflengte) van het licht. Men neemt de kleur van geel Na-licht

5de wet: de stralengang is eveneens omkeerbaar, maar dan hebben we de overgang van glas naar lucht zodat:

$$\frac{\sin i}{\sin r_0} = c^{te} = n'$$

waarbij we opmerken dat $\sin i = \sin r$
en $\sin r_0 = \sin i_0$
zodat $n'=1/n$!!

## 2 Grenshoek

De maximale invalshoek $i_0$ bij overgang van lucht naar een medium is $i_0 = 90^o$ en dan is r = g de maximale brekingshoek of grenshoek.

vb. voor glas is n=1.50 zodat $\sin i_0 / \sin r = n$ of
$\sin 90^o / \sin g = 1.50$ waaruit $\sin g = 1/1.5 = 0.66666$
of $g = 41^o\ 48'\ 37''$

## 3 Totale terugkaatsing

Nemen we bij de overgang van medium naar lucht de invalshoek groter dan de grenshoek dan is er geen breking meer, maar totale terugkaatsing. (zie labo)

## 4 Benaderingsformule van Kepler

Bij kleine hoeken mag ook de volgende formule gebruikt worden nl.

$$\frac{\sin i_0}{\sin r} = \frac{i_0}{r}$$

vb. $i_0 = 18°$ en $r = 12°$

$$n = \frac{\sin i_0}{\sin r} = \frac{\sin 18°}{\sin 12°} = \frac{0.30902}{0.20791} = 1.486$$

$$\frac{18}{12} = 1.5$$ of verschil van 0.014 is fout van 1%

## 5 Algemene brekingsformule

Beschouwen we twee verschillende middenstoffen met respectievelijke brekingsindex n1 en n2 met 2 evenwijdige grensvlakken gescheiden door een luchtlaag.

Gaan we van de eerste middenstof naar lucht dan is

$\sin i_1 / \sin r_0 = 1/n1$

Gaan we van lucht naar de tweede middenstof dan is

$\sin i_0 / \sin r_2 = n2$

Daar de twee grensvlakken evenwijdig zijn is $i_0 = r_0$ en $\sin r_0 = \sin i_0$ of :

$$\frac{\sin i_1}{\sin r_2} = \frac{n2}{n1}$$

n1->2 = n2/n1

n2->1 = n1/n2

Is de eerste middenstof het luchtledige dan spreekt men van de absolute brekingsindex. Deze komt nagenoeg overeen met de brekingsindex van lucht overeen want $n_{lucht} = 1.0003$

vb. water glas n1->2 = $n_{glas} / n_{water}$ = 1.50/1.33 = 1.13

glas water n1->2 = $n_{water}/n_{glas}$ = 1.33/1.50 = 0.88 (=1/1.13!!)

## 6 Overzicht van de breking

a) Is n 1 ->2 > 1 dus n2 > n1 dan gaat het licht van een optisch ijle naar een optisch dichter midden en de breking gebeurt naar de normaal toe : $i_1 > r_2$

b) Is n 1 ->2 < 1 dus n2 < n1 dan gaat het licht van een optisch dicht naar een optisch ijler midden.
1) voor $i_1 < g$ is er breking van de normaal weg: $i_1 < r_2$
2) voor $i_1 > g$ is er geen breking maar totale terugkaatsing

## 7 Meetkundige constructie van de gebroken straal

Kent men de brekingsindex n1 en n2 van de twee stoffen dan tekent men 2 cirkels met respectievelijk n1 en n2 als straal en men past onderstaande constructie toe. Men kan hieruit grafisch de brekingshoek bepalen als men de invalshoek kent.

vb. overgang water naar glas n1 = 1,33 x 3 = 4 cm
n2 = 1,50 x 3 = 4,5 cm
$i_1 = 45^o$
( $r_2 = 40^o$ )

## 8 Toepassingen

De schijnbare verheffing van een ster en ook van de zon zijn een gevolg van het feit dat de optische dichtheid van de luchtlagen verminderen als we stijgen in de atmosfeer. Het verschijnsel van de fata morgana is niets anders dan totale terugkaatsing. Door de grote hitte zijn de luchtlagen juist boven het aardoppervlak ijler. Merk op dat we het verschijnsel ook hier waarnemen, nl. een betonbaan schijnt vochtig op grote afstand bij warm weer.

## 9 Oefeningen

1 Construeer de gebroken straal voor de overgang van glas naar water bij een invalshoek van 35° . Bepaal grafisch de waarde van de brekingshoek en bereken hem.

2 Bereken de grenshoek voor diamant met n = 2,42

3 Construeer de brekingshoek voor de overgang van lucht naar diamant voor een invalshoek van 25°. Kan je daarop eveneens de grenshoek aanduiden?

## 10 Breking door een planparallelle plaat

Als een lichtstraal invalt op een glazen plaat met evenwijdige grensvlakken dan is de gebroken straal evenwijdig met de invallende straal, maar over een bepaalde afstand verschoven.
Noemen we d = IP de dikte van de plaat en a = IQ de evenwijdige verschuiving van de lichtstraal
dan is

IPU $\cos r = \frac{PI}{IU} = \frac{d}{IU}$

IQU $\sin (r_0 - i) = \sin (i_0 - r) = \frac{QI}{IU} = \frac{a}{IU}$

of $a/d = \sin (i_0 - r) / \cos r$

of

$$\boxed{a = d \cdot \frac{\sin(i_0 - r)}{\cos r}}$$

Hieruit: de evenwijdige verschuiving is
1) evenredig met de plaatdikte
2) afhankelijk van de brekingsindex
3) groter als de lichtstraal schuiner invalt

Opm. is $i_0 = 90°$ dan is $\sin (i_0-r) = \cos r$ en $a = d$

## 11 Deviatie bij een prisma

Zijn de twee grensvlakken niet evenwijdig dan heeft men te maken met een prisma
In het punt I is $\sin i_0/\sin r = n$
U is $\sin i/\sin r_0 = 1/n$ met n de brekingsindex prisma
Bij de eerste lichtstraal is de deviatie $i_0 - r$
Bij de tweede lichtstraal is de deviatie $r_0 - i$ zodat de totale deviatie D

$$D = (i_0 - r) + (r_0 - i)$$
$$= i_0 + r_0 - (i + r)$$

met A de brekende hoek die in de driehoek AIU

$$A+(90°-r)+(90°-i)=180°$$

of $A = i + r$

$$\boxed{D = i_0 + r_0 - A}$$

Als $i_0 = r_0$ dan gaat de deviatie door een minimumwaarde, dan is eveneens $i = r$ zodat $D_{min} = 2i_0 - A$ met $A = 2r$ of $r = A/2$

en $i_0 = ( D_{min} + A) / 2$

$$n = \frac{\sin [(A+D_{min})/2]}{\sin(A/2)}$$

Besluit
De deviatie bij een prisma hangt af van
1) de kleur
2) de brekingshoek
3) de brekingsindex
4) de invalshoek

**12 Totale terugkaatsing bij prisma**

Een prisma met een rechte hoek geeft van een recht beeld een omgekeerd beeld. Gebruikt men twee prisma's dan bekomt men weer een recht beeld. Dit laatste is van toepassing bij periscopen (onderzeeërs - loopgraven)

**13 Oefeningen**

1 De brekende hoek van een prisma is 60º. De minimumdeviatie vindt men bij $i_0$ = 35º. Bereken de brekingsindex.

2. Een prisma heeft een brekingsindex van 1.60 met een brekende hoek van 60º. Bepaal de minimumdeviatiehoek en de invalshoek $i_0$.

3. Bereken de verschillende hoeken die bij doorgang van een lichtstraal door een prisma optreden wetende dat A = 53º 14', $i_0$ = 29º 08' en n = 1.53.

4. $CS_2$ ,water en benzine boven elkaar. Een lichtstraal valt onder een hoek van 5º vanuit lucht in op dit systeem. Onder welke hoek treedt de straal uit benzine?
$n_{CS2} = 1.63$  $n_{water} = 1.33$  $n_{benzine} = 1.05$

# 4 LENZEN

## 1 Definities

Een lens is een doorzichtig lichaam, begrensd door ten minste 1 gebogen oppervlak. Er bestaan twee soorten lenzen nl. BOLLE en HOLLE lenzen.
De bolle lenzen kan men verdelen in biconvexe, planconvexe en concaaf convexe.
De holle lenzen kan men verdelen in biconcave, planconcave en convexconcave. We zullen meestal over biconvexe en biconcave lenzen spreken.
Voorstelling: bolle lens holle lens

Vermits er hier 2 gebogen oppervlakken zijn, hebben we dan ook twee kromtestralen nl. R1 en R2. Lenzen hebben ook twee brandpunten nl. F1 en F2. Men noemt F1 het eerste hoofdbrandpunt, dit is het brandpunt waar de stralen eerst door gebroken worden.

De brandpuntsafstand wordt hier gevonden door:

$$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2}\right)$$

met n de brekingsindex en R1 en R2 de twee kromtestralen

Merk op dat R en f positief zijn bij biconvexe lenzen: reëel brandpunt en dat R en f negatief zijn bij biconcave lenzen: virtueel brandpunt
Een reëel brandpunt: het brandpunt van de linkerzijde ligt rechts
Een virtueel brandpunt: het brandpunt van een zijde ligt langs dezelfde kant

vb. Hoeveel is f als R1 = R2 =20 cm en n=1.60
1/f=(1.60-1)(1/20 +1/20)=0.06 cm-1 of f=16.7 cm
Bij biconcave lenzen is er altijd een virtueel beeld (of op oneindig) en bij biconvexe lenzen kan het beeld virtueel of reëel zijn (of op oneindig). We zullen dit onderzoeken in volgend punt.

## 2 Constructie van het beeld

We beschouwen hier 3 constructiestralen (i.p.v. 4 bij spiegels)

1) Een straal evenwijdig met de hoofdas gaat door het eerste brandpunt (rood)

2) Een straal door het optisch middelpunt gaat ongebroken door (zwart)

3) Een straal door het tweede brandpunt F2 wordt gebroken evenwijdig met de hoofdas (blauw)

Men kan nu 6 gevallen onderscheiden ( zie figuur 1 tot 6)

1) $v = 2f$: BICONVEX even groot reëel omgekeerd beeld

2) $f < v < 2f$: BICONVEX vergroot reëel omgekeerd beeld

3) $v = f$: BICONVEX reëel beeld op oneindig

4) $0<v<f$: BICONVEX vergroot rechtopstaand virtueel beeld

5) $f<v<2f$: BICONVEX virtueel voorwerp geeft reëel verkleind rechtopstaand beeld

6) $f<v<2f$: BICONCAAF virtueel verkleind rechtopstaand beeld

Opm.
Een bolle lens is analoog als holle spiegel!
een holle lens is analoog als bolle spiegel!

## 3 Lenzenformule en lineaire vergroting

Evenals voor spiegels is de lenzenformule

$$\boxed{1/f = 1/v + 1/b}$$

met v positief bij reëel voorwerp (zelfde kant lens) en v negatief bij virtueel voorwerp (gebroken stralen)
met b en f positief bij reëel beeld (gebroken straal) en negatief bij virtueel beeld (zelfde kant lens)
Analoog :

$$\boxed{G = - b/v}$$

met G positief voor rechtopstaand beeld (reëel of virtueel)
G negatief voor omgekeerd beeld (reëel)

en $|G|>1$: vergroot beeld  $|G|<1$: verkleind beeld

## 4 Oefeningen

1. Een voorwerp bevindt zich op 13 cm van een lens met brandpuntsafstand 12 cm. Bepaal ligging en aard van het beeld voor divergerende en convergerende lens.

2. Een lens met f = 8 cm moet een vijfvoudige vergroting geven. Bepaal voorwerp en beeldafstand bij convergerende lens.

3. Een divergerende lens vormt van een voorwerp dat zich op 6 cm van de lens bevindt een rechtopstaand driemaal vergroot beeld. Is het voorwerp reëel of virtueel? Zoek de brandpuntsafstand.

4. Men moet van een convergerende lens met brandpuntsafstand 20 cm een 10-voudige vergroting bekomen, waar moet het voorwerp zich bevinden t.o.v. het brandpunt?

**5 Samengestelde lenzen**

Bij plaatsen van verschillende lenzen na mekaar, kan men de volgende formule toepassen
$1/f = 1/f' + 1/f''$ met f' en f'' de brandpuntsafstanden voor de eerste en de tweede lens
Vb. een convergerende en een divergerende lens met f=20 cm en f= - 12 cm worden na mekaar geplaatst.
De nieuwe f wordt dan $1/f=1/20 + 1/-12 = - 0.03$ of $f = -30$ cm.

Drukken we f in meter uit dan stellen we $P=1/f$ de sterkte van de lens of de dioptrie dan wordt

$$\boxed{P = P' + P''}$$

vb. $f' = 0.20$ m dus $P' = 5\ m^{-1}$
$f'' = -0.12$ m dus $P''=-8.3\ m^{-1}$
$P = 5 - 8.3= -3.3\ m^{-1}$

**6 Lenzenfouten**

De stralen die van een voorwerp vertrekken werden verondersteld in 1 beeldpunt samen te komen. Dit is slechts waar als:
1)de lens oneindig dun is
2)de diameter van de lens klein is t.o.v. de brandpuntsafstand
3)de lichtstralen mogen niet te schuin t.o.v. de hoofdas verlopen
4)men moet licht van 1 kleur gebruiken

De afwijkingen kunnen 2 verschillende oorzaken hebben:
1) meetkundige afwijkingen: de meetkundige structuur o.a. de dikte, het optisch middelpunt
2) fysische afwijkingen: te wijten aan het fysisch karakter van wit licht dat een mengsel is van verschillende lichtsoorten

Bij de meetkundige afwijkingen zijn de voornaamste:

a) *sferische aberratie*: de lens gedraagt zich alsof ze verschillende brandpunten heeft. Deze afwijkingen zijn te wijten aan het dikteverschil tussen het centrum en de rand van de lens

b) *astigmatisme*: als de lichtstralen schuin invallen op een lens gedraagt deze zich alsof ze een verschillende brandpuntsafstand heeft voor de horizontale en de verticale lijnen.

c) *distorsie*: de lineaire vergroting is afhankelijk van de beschouwde richting in het voorwerp (zie afbeelding vierkant)

Bij de fysische afwijkingen zijn de voornaamste:

a) *chromatische aberratie*: treedt op als men wit licht gebruikt, dan liggen de brandpunten niet samen , rood verst en violet dichtst.

b) *onderscheidingsvermogen*: het beeld van een voorwerpspunt is nooit een punt, maar steeds een cirkeltje. Men noemt onderscheidingsvermogen van een lens de kleinste hoek $\alpha$ waaronder het licht van 2 voorwerpspunten mag invallen. Voor de ooglens is dat 1' (1 boogminuut) Met optische toestellen wensen we dat te vergroten.

# 5 OPTISCHE INSTRUMENTEN - HET OOG

## 1 Anatomische bouw van het oog

Het oog is een optisch instrument dat levende wezens in staat stelt indrukken van beelden uit hun omgeving waar te nemen. De informatieverwerking gebeurt door de hersenen. Het oog bestaat uit een bolvormig lichaam door het harde oogvlies omgeven, dit beschermt het oog. Binnen is er een vaatvlies voorzien van een zwart pigment om hinderlijke terugkaatsing te voorkomen. Hieronder bevindt zich het netvlies dat de zenuwen bevat, allen met de oogzenuw verbonden die met de hersenen verbonden is. Vooraan het harde oogvlies is er een doorzichtig deel, het hoornvlies langs waar het licht de oogbol binnendringt. Vooraan het netvlies zit een cirkelvormig gekleurd gedeelte, het regenboogvlies genoemd. Dit vlies houdt de kristallens vast. Deze lens, biconvex, geeft een scherp, verkleind beeld op het netvlies. De brandpuntsafstand is veranderlijk. In het regenboogvlies is een opening met veranderlijke diameter, de pupil genoemd dat als diafragma dienst doet. De gevoelige zone recht tegenover de kristallens noemt men de gele vlek. De plaats waar de oogzenuwen samenkomen en dus geen beeldindrukken gevormd worden noemt men de blinde vlek. Tussen de lens en het regenboogvlies is een kleine ruimte die we de achterste oogkamer noemen, tussen hoornvlies en regenboogvlies is de ruimte de voorste oogkamer. Het volume van de oogbol is gevuld met glasachtig lichaam.

## 2 Beeldvorming en accommodatievermogen

Het oog werkt als volgt:

1)de kristallens, het waterachtig vocht en het glasachtig lichaam vormen een doorzichtige middenstof die zich als een convergerende lens gedraagt.

2)op het netvlies vormt zich een reëel omgekeerd verkleind beeld De brandpuntsafstand van het oog moet zich aanpassen om verre en dichtbij staande voorwerpen scherp te kunnen zien. Dit aanpassen noemt men het “accommodatievermogen van het oog”. In rusttoestand is een normaal oog ingesteld op oneindig en het beeld valt op het netvlies. Voorwerpen die dichter staan worden eveneens scherp gezien doordat de ooglens zich kromt. De afstand tussen het optisch middelpunt van de lens en het netvlies d.w.z. de beeldafstand is onveranderlijk en constant nl. 1.5 cm. Het dichtst bijgelegen punt dat kan waargenomen worden, het nabijheidspunt ligt op 15 cm van het oog. ( Bereken hieruit f!)

Bij een bijziend oog ligt het brandpunt voor het netvlies en om dit te verbeteren moet men een bril met holle lenzen dragen.
Bij een verziend oog ligt het brandpunt achter het netvlies en om dit te verbeteren moet men een bril met bolle lenzen dragen.

## 3 Onderscheidingsvermogen van het oog

De kleinste hoek waaronder men twee voorwerpspunten nog afzonderlijk kan waarnemen noemt men het onderscheidingsvermogen. Voor een normaal oog bedraagt het 1 minuut.
$\text{tg}\ \alpha = VV'/d$ of $VV' = d \cdot \text{tg}\ \alpha$ $\quad$ $\text{tg}\ 1' = 0{,}00029$

Twee punten op 1 m afstand van het oog zullen afzonderlijk waargenomen worden, als zij minstens 0.29 mm van elkaar verwijderd zijn. Ons oog kan echter niet onbeperkt accommoderen zodat we de te onderscheiden punten niet dichter mogen brengen dan het nabijheidspunt of:

$$0{,}15 \text{ m} \times 0{,}00029 = 0{,}04 \text{ mm}$$

Een normaal oog zal dus geen details meer onderscheiden die dichter dan 0.04 mm bij elkaar liggen.

## 4 Nawerking van de beelden

De beelden op het netvlies blijven nog enige tijd nawerken. Een cirkelsector vlug draaien geeft de indruk van een volledige cirkel. De nawerking duurt 0.1 s. Dit toont aan dat 10 beelden per seconde continu in elkaar overvloeien. Bij een film is dat 16 tot 24 bld/s en bij TV 25 bld/s.

## 5 Schatten van afstanden - waarnemen van reliëf

Door het gebruik van beide ogen leren we afstanden schatten. Hoe dichter het voorwerp, hoe groter de hoek waarover beide ogen zullen draaien. Uit de werking van de oogspieren (via de hersenen) leren we afstand schatten. Voorwerpen vertonen ook een zeker reliëf of diepte daar waar we het voorwerp met 2 ogen waarnemen. Deze ongelijke beelden worden tot 1 beeld verenigd waardoor we reliëf waarnemen.
Toepassing: de stereoscoop
Holografie

## 6 De lichtsterkte

Het oog kan slechts een bepaalde lichtintensiteit verdragen en anderzijds is er ook een bepaalde lichtsterkte nodig om de voorwerpen te kunnen waarnemen. Om de lichtsterkte binnen het oog te regelen zal de pupil bij grote lichtsterkte verkleinen en bij kleine lichtsterkte vergroten. Daar de scherptediepte toeneemt bij een klein diafragma zal men bij heldere verlichting de beelden scherper kunnen waarnemen.

# 6 OPTISCHE INSTRUMENTEN - OBSERVATIEINSTRUMENTEN

## 1 Doel van een observatie-instrument

Noemen we $\alpha$ de gezichtshoek waaronder we een voorwerp kunnen waarnemen in het geval van kleine hoeken (in radialen)

$$\boxed{\alpha = V/d}$$

met V: grootte van het voorwerp
d: afstand van het voorwerp

Is de hoek $\alpha$ kleiner dan 1' dan kunnen we het beschouwde voorwerp niet van zijn omgeving onderscheiden. Het doel van een observatie-instrument is de richting van de invallende stralen zo te wijzigen dat zij onder een grotere hoek in het oog binnendringen. De hoekvergroting $\gamma$ van een optisch instrument is de verhouding van de hoek $\beta$ waaronder men twee punten ziet met behulp van een optisch instrument tot de hoek $\alpha$ waaronder die twee punten gezien worden zonder instrument.

$$\boxed{\gamma = \beta/\alpha}$$

## 2 De loep

De loep is een bolle lens die van het voorwerp VV' een virtueel vergroot rechtopstaand beeld BB' vormt. Plaatsen we het voorwerp in het brandvlak van de lens, dan wordt het beeld op oneindig gevormd, voor een normaal oog ligt het vertepunt toch op oneindig. De hoek $\beta$ = VV'/f en de hoek $\alpha$ = VV'/d
dan is

$$| \alpha = d/f \quad |$$

met d = werkafstand ( 25 cm !!)

## 3 De microscoop

Bij een microscoop maakt men gebruik van twee lenzen nl. het objectief en het oculair. Het objectief is een bolle lens, die van een zeer klein voorwerp VV' een vergroot reëel beeld B1B1' vormt. Het voorwerp staat iets verder dan Fobj. Om zoveel mogelijk licht van het voorwerp in het objectief op te vangen moet de afstand tussen voorwerp en objectief zo klein mogelijk zijn, d.w.z. een sterk bolle lens (zeer kleine lenzen!)
Het oculair is eveneens een bolle lens dat van het reeds gevormde reële beeld B1B1' een nieuw beeld B2B2' geeft, virtueel vergroot en nog steeds omgekeerd is t.o.v. het oorspronkelijke voorwerp.(Het is dus een loep!)
Het beeld B1B1' moet dus tussen Foculair en oculair gevormd worden (of in Foculair bij niet accommoderen).

Bij de microscoop is

$\beta = B1B1'/f_{oc}$

$\alpha = VV'/d$ met d = werkafstand = 25 cm!

of $\gamma = \beta/\alpha = B_1B_{1'} / f_{oc} \times d/VV'$

met $B_1B_{1'} / VV' = a / f_{obj}$

of

$$\boxed{\gamma = \frac{d}{f_{oc}} * \frac{a}{f_{obj}}}$$

Bij een microscoop die n keren vergroot bij het objectief en m keren bij het oculair is de totale vergroting dus n.m

Voorbeeld 2 objectieven x 50 x80

2 oculairs x 5 x10

Dan zijn er vier mogelijke vergrotingen

1) 5 x 50 =250

2) 5 x 80 =400

3) 10 x 50 =500

4) 10 x 80 =800

# 7 OPTISCHE INSTRUMENTEN - PROJECTIEINSTRUMENTEN

## 1 Doel van projectie-instrumenten

Terwijl we bij observatie-instrumenten het onderscheidingsvermogen moeten opdrijven door een vergroot virtueel beeld vast te leggen moeten we bij projectie-instrumenten reële beelden vastleggen om ze te bewaren.

## 2 Fototoestel

Een fototoestel bestaat uit 3 delen nl. een donkere kamer, een lenzenstelsel en een filmtransport inrichting. Bij het lenzenstelsel hebben we bovendien nog de sluiter, het regelbaar diafragma en de scherpstelling. Om de afstand, de scherptediepte en de belichting juist in te stellen kunnen we gebruik maken van telemeters. In veel moderne toestellen zijn die ingebouwd zodat fotograferen zeer eenvoudig wordt. Bij een filmcamera worden een aantal beelden (vb. 8 of 16) per seconde opgenomen. Het Maltezer kruis zorgt voor de lichtonderbreking om de verschuiving van de film mogelijk te maken.

## 3 Episcoop

Dit projectietoestel wordt gebruikt voor het projecteren van ondoorschijnende platen en teksten. Het voorwerp wordt horizontaal geplaatst en op een verticaal scherm geprojecteerd. De lichtbron moet van hoge intensiteit zijn want het belichte oppervlak wordt vele malen groter, daarom is er ook een koelinrichting voor de lamp. We merken op dat het beeld omgekeerd verschijnt, daarom moeten we het voorwerp omgekeerd plaatsen.

# 8 KLEUREN EN EIGENSCHAPPEN

## 1 Kleurschifting

Met een prisma zien we duidelijk dat wit licht uit 7 kleuren bestaat nl. rood, oranje, geel, groen, blauw, indigo en violet. (roggbiv). Deze kleuren noemt men de spectrale kleuren: het spectrum. Merk op dat de deviatiehoek het grootst is voor violet en het kleinst voor rood. De brekingsindex is dus ook afhankelijk van de kleur van het gebruikte licht. Indien de kleur niet gekend is neemt men aan dat de brekingsindex die opgegeven is deze voor de gele natriumlijn is. Met de schijf van Newton kunnen we diverse kleuren opnieuw wit licht krijgen door het draaien van de schijf.

## 2 Eigenschappen

De kleur van een doorschijnend lichaam wordt bepaald door de lichtstralen die er doorheen gaan, dus door de stralen die niet geabsorbeerd worden. vb. rood plaatje voor lamp
De kleur van een ondoorschijnend lichaam wordt bepaald door de lichtstralen die het lichaam terugkaatst, dus ook door de stralen die niet worden geabsorbeerd. vb. rode boekentas Lichamen die alle stralen terugkaatsen zijn wit, lichamen die alle stralen absorberen zijn zwart. De drie kleuren waarvoor het oog meest gevoelig is noemt men de primaire of hoofdkleuren nl. rood, groen en blauw

Menging van deze 3 kleuren geeft 3 binaire of bijkleuren nl. geel, cyaan en magenta
rood + groen ---> geel
groen + blauw ---> cyaan
blauw + rood ---> magenta
De 3 hoofdkleuren samen geven wit licht.
Dit noemt men additieve kleurenmenging.

Plaatsen we nu bv. een gele filter voor een bundel wit licht, dan zal deze rood en groen doorlaten. Plaatsen we nu een gele en een cyaanfilter na mekaar, dan komt alleen groen door. De 3 bijkleuren na mekaar geven zwart.
Dit noemt men substractieve kleurenmenging.

## 3 De spectroscoop

Dit toestel dient om het spectrum met het oog te onderzoeken. Legt men het spectrum ook vast op fotografische plaat, dan noemt dit ook de spectrograaf.