R.T.

Inhoud Natuurkunde. Nadruk verboden

HILVERSUM

R.T. Nadruk verboden 1

Nk

Natuurkunde. Les 1

1,1. De materie

In de natuurkunde noemt men alles wat ruimte inneemt een lichaam.
Een lichaam bestaat uit stof of materie. De ruimte, die door een lichaam wordt ingenomen, heet het volume van het lichaam.

Verder heeft een lichaam nog een bepaalde vorm. De lichamen kunnen in drie toestanden voorkomen.

1e. Vaste lichamen. Deze kenmerken zich door een eigen volume en een eigen vorm, bv. een blok hout, een staaf ijzer enz.

2e. Vloeibare lichamen of vloeistoffen. Dit zijn lichamen, die wel een eigen volume bezitten, doch geen eigen vorm. Een vloeistof neemt de vorm aan van het voorwerp waarin het zich bevindt. Water bijvoorbeeld neemt de vorm aan van het vat waarin het zich bevindt, het behoeft echter niet het gehele vat te vullen.

3e. Gasvormige lichamen of gassen. Deze lichamen hebben geen eigen volume en geen eigen vorm. Een gas in een gesloten ruimte gebracht, neemt de vorm aan van deze ruimte en vult deze geheel. Maakt men de ruimte kleiner, dan wordt het volume van het gas eveneens kleiner, de vorm verandert eveneens, terwijl de hoeveelheid gas hetzelfde blijft. De drie mogelijkheden waarin een lichaam kan voorkomen, heten de aggregatietoestanden.

Eenzelfde stof kan in alle aggregatietoestanden voorkomen, echter niet alle stoffen bezitten deze hoedanigheid.

De vloeistof water kan in vaste vorm voorkomen (ijs) en ook in gasvormige toestand (waterdamp). Hout echter komt uitsluitend in de vaste vorm voor; lucht is gewoonlijk gasvormig. Door samenpersen en afkoelen is het mogelijk lucht vloeibaar te maken. Een vaste vorm van lucht komt niet voor,

1,2. Massa

Als een stilliggend lichaam in beweging moet worden gebracht, moet er een oorzaak zijn om het in beweging te brengen. Deze oorzaak heet kracht.

Een kracht kan meer of minder hard zijn en kan in verschillende richtingen werken, waaruit volgt, dat de grootte en de richting van de kracht bepalen hoe het lichaam zich uiteindelijk zal bewegen.

Werken op twee lichamen, die hetzelfde volume en dezelfde vorm bezitten, doch uit verschillende materie bestaan, dezelfde krachten, dan zullen deze lichamen zich op een verschillende manier gaan bewegen.

Dit verschil in beweging kan niet ontstaan zijn door een verschil in volume of kracht, daar die hetzelfde zijn gesteld. De oorzaak moet dus in de aard van de stof worden gezocht.

Om dit aan te geven, zegt men, dat de beide stoffen een verschillende massa hebben.
De massa van een lichaam geeft het verband tussen de beweging, die een lichaam krijgt en de kracht die deze beweging veroorzaakt. Een kracht behoeft niet noodzakelijkerwijs door de mens voortgebracht te worden.
Houdt men een lichaam, bv. een steen op een bepaalde hoogte vast en laat men het dan los, dan blijkt dat het lichaam zich zal gaan bewegen, het “valt”.

Op het lichaam moet dus volgens het voorgaande een kracht werken, daar er anders geen beweging zou ontstaan. Deze kracht blijkt overal op de aarde aanwezig te zijn, het is alsof de Aarde het lichaam naar zich toe trekt.

De kracht, die op een lichaam werkt, heet de aantrekkingskracht van de Aarde of ook wel de zwaartekracht of gravitatiekracht.

Deze kracht zal ook op het lichaam werken als het bijvoorbeeld op een tafel ligt. Haalt men de tafel weg, dan zal het lichaam zich gaan bewegen.

Zolang het gewicht op de tafel ligt, zal het dus een druk op de tafel uitoefenen, men zegt dat het lichaam zwaarte of gewicht bezit.

De kracht, die een lichaam, waarop de aantrekkingskracht van de Aarde werkt, uitoefent, heet het gewicht van het lichaam.

De kracht waarmee de Aarde een lichaam aantrekt, is niet overal even groot. Het blijkt dat de afstand van het middelpunt der Aarde tot het lichaam hierin een rol speelt.
Daar de Aarde geen zuivere bol is, doch aan de polen is afgeplat, zal de afstand tot het middelpunt der Aarde niet overal hetzelfde zijn.

Net als bij de wet van Coulomb voor de aantrekkingskracht tussen twee ladingen, is ook hier de aantrekkingskracht der Aarde omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand.

Dit betekent dus, dat van eenzelfde lichaam het gewicht aan de polen groter is dan aan de evenaar, het gewicht van een lichaam is dus plaatsafhankelijk.

Omdat het gewicht geen constante grootheid is op Aarde, werkt men liever met de massa, die wel op iedere plaats van de Aarde even groot is
De massa van een lichaam wordt vergeleken met een massa, waarvan men de waarde kent, de standaardmassa genaamd. Voorlopig wordt er op het begrip massa niet verder ingegaan; in de mechanica zal dit verder behandeld worden.

Als eenheid van gewicht is de kilogram (kg) gekozen. Deze is gedefinieerd als volgt:

$1dm^3$ zuiver water van 4°C heeft een gewicht van 1 kg.

1,3. Soortelijk gewicht*[1]

Als men van twee stoffen wil weten welke stof het zwaarst is, neemt men van beide stoffen een even groot volume en weegt deze hoeveelheden.
Neemt men bijvoorbeeld $1dm^3$ lood en $1dm^3$ marmer, dan vindt men, dat $1dm^3$ lood 11,3 kg weegt en $1dm^3$ marmer 2,7 kg. Eenzelfde volume lood heeft dus een groter gewicht dan eenzelfde volume marmer. Omdat de soort stof hierbij bepalend is voor het gewicht, heeft men het gewicht bepaald van $1dm^3$ van iedere stof. Het getal dat men vond, noemde met het soortelijk gewicht (s.g.) van de stof.

Dus het soortelijk gewicht van een stof is het gewicht van $1dm^3$ van die stof.

Omdat het gewicht van $1dm^3$ zuiver water van 4°C even groot is als het gewicht van het platina standaard kilogram is het soortelijk gewicht van water bij 4°C gelijk aan 1. (Op de toevoeging bij 4°C wordt later nader ingegaan.)

Oplossingen inzenden van de opgaven 1 t/m 7.

*[1] De **dichtheid** of **soortelijke massa** van een homogeen materiaal is in de natuur- en scheikunde een intensieve grootheid die uitdrukt hoeveel massa van dat materiaal aanwezig is in een bepaald volume. Men drukt dit wel uit als de 'massa per volume-eenheid'. Vaak wordt nog de verouderde en foutieve term **soortelijk gewicht** gebruikt.
In het SI-stelsel wordt dichtheid uitgedrukt in kilogram per kubieke meter (kg/m^3), maar de oudere eenheid (uit het cgs-systeem) gram per kubieke centimeter (g/cm^3) of kilogram per kubieke decimeter wordt ook nog gebruikt. De omzetting is: 1000 kg/m^3 = 1 g/cm^3 = 1 kg/dm^3. Getalsmatig zijn de twee oudere eenheden dus aan elkaar gelijk, de SI-eenheid is een factor 10^3 groter. (bron: Wikipedia) FV

2,1. Soortelijk gewicht

Voor het bepalen van het soortelijk gewicht van een stof moet men twee grootheden kennen, nl. het gewicht en het volume van de stof. Weegt een lichaam G kg en heeft het lichaam een volume van $V\ cm^3$ dan: weegt 1 dm^3 van die stof $\frac{G}{V}$ kilogram.
De verhouding $\frac{G}{V}$ is het soortelijk gewicht van de stof. Algemeen geldt:

Gewicht= Volume × Soortelijk Gewicht.

Daar het gewicht is uitgedrukt in kg en het volume in dm^3, volgt uit bovenstaande formule, dat het soortelijk gewicht is uitgedrukt in kg/dm^3.

In onderstaande tabel zijn enige stoffen vermeld met hun soortelijk gewicht.

alcohol	0,7	lucht	0,0013
aluminium	2,7	lood	11,3
beton	2,4	marmer	2,7
brons	8,7	messing	8,7
diamant	3,5	nikkel	8,8
goud	19,3	platina	21,4
koper	8,9	tin	7,3
kurk	0,24	water (bij 4°C)	1,000
kwik	13,6	ijs	0,9
lichtgas	0,0005	zilver	10,5
lithium	0,53	zink	7,1

2,2. Kracht

Om een stil liggend voorwerp in beweging te brengen, een bewegend voorwerp stil te houden of van richting te veranderen, moet men een kracht uitoefenen. Een kracht veroorzaakt een verandering van de bewegingstoestand. Laat men een tennisbal op de grond vallen, dan kaatst de bal weer omhoog, dus een verandering van beweging. De lucht in de bal wordt bij de botsing samengeperst, daar de tennisbal ingedrukt wordt. De samengeperste lucht oefent de kracht uit nodig voor het veranderen van de beweging. Gassen en ook vloeistoffen zijn volkomen veerkrachtig, dat wil zeggen, als de kracht die de vormverandering teweeg brengt, ophoudt te bestaan, herneemt het gas of de vloeistof zijn oorspronkelijke vorm. Vrijwel alle lichamen zijn meer of minder veerkrachtig, doch er zijn weinig lichamen die volkomen of nagenoeg veerkrachtig zijn. De meeste vaste stoffen zullen na een ondergane verandering hun oorspronkelijke vorm niet weer innemen.
Deze stoffen zijn niet volkomen veerkrachtig.

2,3. Opwaartse kracht

Wanneer men een lichaam, dat zich in een vloeistof bevindt, omhoog wil trekken, bemerkt men, dat de hiervoor uit te oefenen kracht kleiner is dan wanneer het voorwerp zich in lucht bevindt. Een lichaam, dat in een vloeistof ondergedompeld wordt, weegt schijnbaar minder dan wanneer het zich buiten de vloeistof bevindt. Het voorwerp ondervindt in de vloeistof een opwaartse kracht. Proeven tonen aan dat de opwaartse kracht even groot is als het gewicht van de door het voorwerp verplaatste hoeveelheid vloeistof. Dit verschijnsel wordt gedefinieerd in de wet van Archimedes:

Een voorwerp geheel of gedeeltelijk in een vloeistof gedompeld, ondervindt een opwaartse kracht, die even groot is als het gewicht van de verplaatste vloeistof.

De wet van Archimedes wordt ook wel aldus gegeven:
Een voorwerp geheel of gedeeltelijk in een vloeistof gedompeld, verliest schijnbaar zoveel aan gewicht, als het gewicht van de verplaatste hoeveelheid vloeistof.

Van deze zeer belangrijke wet volgen hier enige toepassingen.

Opgave: Een blok lood met een volume van 2 dm^3 wordt aan een arm van een weegschaal gehangen. Men maakt evenwicht. Welk gewicht moet men aan de andere kant hangen? Als nu het loden voorwerp in water wordt gehangen, blijkt men minder gewicht nodig te hebben. Hoeveel is nu het schijnbare gewicht?
Oplossing: Uit de tabel blijkt, dat het s.g. van lood 11,3 bedraagt. Het gewicht van het lood is dus: $2 \times 11{,}3 = 22{,}6$ kg. Als het in water hangt, is de verplaatste hoeveelheid water 2 dm^3.
Het gewicht van deze verplaatste hoeveelheid water is $2 \times 1 = 2$ kg.
Het schijnbare gewicht van het blok lood is:
$$(22{,}6 - 2)kg = 20{,}6\ kg.$$

Opgave: Een koperen bol, waarin een holte aanwezig is, weegt in de lucht 3 kg. Als de bol in water hangt, weegt de bol 2 kg. Bereken hieruit de grootte van de bol.
Oplossing: Het s.g. van koper is 8,9. Het massieve deel van de bol is $\frac{3}{8{,}9} = 0{,}337\ dm^3$. De opwaartse kracht in water is $(3 - 2)kg = 1\ kg$. Dit is het gewicht van de verplaatste hoeveelheid water. Omdat het s.g. van water 1 is. is het volume van het water $1dm^3$. Dit is ook het volume van de bol met de holte.
De holte is dan $1 - 0{,}337 = 0{,}663\ dm^3$.

2.4. Opwaartse kracht in lucht

Een lichaam ondervindt niet alleen een opwaartse druk in een vloeistof, maar ook in de lucht. Een ballon, die gevuld is met helium, waterstof of lichtgas, zal opstijgen. De genoemde gassen hebben alle een s.g. dat kleiner is dan dat van lucht. Een ballon, die met lucht is gevuld, zal langzaam dalen. Als het gewicht van het omhulsel te verwaarlozen is, zou de met lucht gevulde ballon op z'n plaats blijven hangen.

Ook in lucht geldt de wet van Archimedes.

De opwaartse kracht in gassen toont men aan met een baroscoop. Dit is een weegschaaltje met aan de ene arm van de balans een grote glazen bol en aan de andere kant een kleine loden bol.
De beide bollen zijn in de lucht even zwaar, zodat zij elkaar in de lucht in evenwicht houden.

Men plaatst nu de baroscoop onder de klok van een z.g. luchtpomp (dat is een pomp waarmee men lucht weg kan pompen) en pompt de lucht uit de klok weg. Het evenwicht blijkt nu verbroken te zijn; de weegschaal slaat door naar de kant van de grote bol. In het luchtledige weegt de grote bol dus meer dan de kleine. Dit is als volgt te verklaren. In de lucht verplaatst de groet bol meer dan de kleine, dus de opwaartse kracht is voor de grote bol groter dan de kleine. Het werkelijke gewicht heeft iedere bol in het luchtledige. Dan komt er voor de kleine bol meer bij dan voor de grote, d.w.z. de kleine bol is in het luchtledige lichter dan de grote, dus de balans slaat door naar de kant van de grote bol.

Ter oefening maken de opgaven 8 t/m 13.
Oplossingen inzenden van de opgaven 14 t/m 20

3.1. Zinken, drijven en zweven

Zoals in de vorige les is uiteengezet, ondervindt ieder lichaam in een vloeistof gedompeld een opwaartse kracht, die het lichaam omhoog tracht te duwen.

Door de zwaartekracht wordt het lichaam naar beneden getrokken. Er zijn nu drie mogelijkheden:

1e. De zwaartekracht is groter dan de opwaartse kracht. Het lichaam zal dan zinken tot op de bodem.

2e. De opwaartse kracht is groter dan de zwaartekracht. Het lichaam stijgt dan naar boven, totdat een deel van het lichaam boven de vloeistof uitkomt. Indien het lichaam gedeeltelijk boven de vloeistof uitsteekt, is de verplaatste hoeveelheid vloeistof kleiner, dus de opwaartse kracht eveneens. Op een gegeven moment zal er een evenwichtstoestand optreden; het lichaam drijft dan op de vloeistof. De opwaartse kracht is nu even groot als het gewicht van het lichaam geworden. Tijdens het drijven is de opwaartse kracht (dus het gewicht van de verplaatste hoeveelheid vloeistof) gelijk aan het gewicht van het lichaam.

3e. De opwaartse kracht van het geheel ondergedompeld lichaam en het gewicht van het lichaam zijn even groot. Het lichaam beweegt zich dan niet naar beneden of boven, het zweeft.

Bovenstaande kan men samengevat aldus formuleren:

Een lichaam zinkt in een vloeistof, als het s.g. van het lichaam groter is dan het s.g. van de vloeistof; het drijft op de vloeistof als zijn s.g. kleiner is dan het s.g. van de vloeistof en het lichaam zweeft in de vloeistof als zijn s.g. gelijk is aan het s.g. van de vloeistof.

Voorbeeld: Een koperen bol met een straal van 3 dm wordt in een bak met vloeistof gedaan. De bol zweeft in de vloeistof. Wat is het s.g. van de vloeistof?

Oplossing: Als een lichaam in een vloeistof zweeft, is de opwaartse kracht even groot als het gewicht van het voorwerp.

Het gewicht van de bol is te vinden uit het product van het s.g. van het materiaal van de bol en het volume van de bol. Het s.g. van koper is 8,9 (zie tabel les 2). Het volume van de bol is $\frac{4}{3}\pi R^3$. Het gewicht is $\frac{4}{3}\pi R^3 \times 8{,}9\ kg$.

Het gewicht van de verplaatste hoeveelheid vloeistof bedraagt $\frac{4}{3}\pi R^3 . x$ als het s.g. van de vloeistof op x gesteld wordt.

De voorwaarde voor zweven is: $\frac{4}{3}\pi . 3^3 \times 8{,}9 = \frac{4}{3}\pi 3^3 . x$

Hieruit volgt $x = 8{,}9$. Uit dit voorbeeld blijkt dat het s.g. van de vloeistof gelijk moet zijn aan het s.g. van het materiaal waaruit de bol gemaakt is.

3.2. Druk

De ervaring leert dat het mogelijk is, dat een houten vloer een gewicht van 10.000 kg kan dragen, mits dit gewicht over de gehele oppervlakte van de vloer verdeeld is, terwijl de vloer in zal zakken als het gehele gewicht van 10.000 kg op één plaats geconcentreerd wordt.

Het is dus van veel belang op welke oppervlakte de totale kracht werkt.

Om een vergelijking te kunnen maken, moet de oppervlakte waarop de kracht werkt, bekend zijn. Het is nu het eenvoudigste om de kracht per oppervlakte-eenheid te bekijken. De kracht op één vierkante centimeter uitgeoefend, noemt men de druk.

Definitie: Onder de druk verstaat men de kracht, die op 1 cm^2 van een vlak wordt uitgeoefend.

Of een wand al of niet bestand is tegen de werking die er op wordt uitgeoefend, hangt dus af van de druk en niet van de totale kracht.

Als bv. de wanden van een duikboot onder water een totale kracht van een miljoen kg ondervinden, terwijl het oppervlak van de duikboot 20,000 cm^2 bedraagt, dan is de druk: $\frac{1\ 000\ 000}{20\ 000} = 50\ kg/cm^2$. Dit getal zegt ons iets als we weten, dat een duikboot normaal een druk kan verdragen van ongeveer $60 kg/cm^2$.

Ieder voorwerp oefent ten gevolge van de kracht, waarmee het door de Aarde wordt aangetrokken, een kracht uit op het vlak waarop het rust.
Dit geldt ook voor de lucht; op iedere cm^2 van de Aarde drukt het gewicht van een luchtkolom, die kilometers hoog is.

3.3. Proef van Torricelli

Een aan een zijde gesloten buis van ongeveer 1 meter lengte wordt geheel gevuld met kwik. Men sluit nu de opening met de vinger af en zet de buis omgekeerd in een bak die gevuld is met kwik. Neemt men nu de vinger weg, dan zakt het kwik in de buis, tot het op een bepaalde hoogte blijft staan. Boven het kwik in de buis kan zich niets bevinden, deze zg. ruimte van Torricelli is luchtledig.
Deze hoogte bedraagt ongeveer 76 cm. Of deze proef gedaan wordt met een nauwe of met een wijde buis, steeds blijkt de kwikhoogte 76 cm te bedragen. De buitenlucht die op het kwik in de bak drukt, verhindert het weglopen van het kwik uit de buis.

De druk van de buitenlucht is even hoog als de druk van een kwikkolom die een loodrechte hoogte heeft van 76 cm.

Uit de definitie volgt, dat op iedere vierkante centimeter de luchtdruk even groot is als het gewicht van een kolom kwik van 76 cm hoogte. Het s.g. van kwik is 13,6, waaruit volgt, dat het gewicht van de kwikkolom gelijk is aan $76 \times 1 \times 13{,}6 = 1033{,}6$ gram.
(de hoogte van de kwikkolom × het oppervlak, waarop de kwikkolom drukt, is dus het volume van de kwikkolom. Het volume × het soortelijk gewicht is het gewicht,)
De grootte van de luchtdruk is dus 1033,6 $gram/cm^2$ of 1.0336 kg/cm^2.

Een televisie-weergeefbuis is vrijwel geheel luchtledig, waardoor de kracht die de buitenlucht op de wanden van de buis uitoefent, niet door een tegenkracht wordt opgeheven.
De buiswand moet dus zeer stevig geconstrueerd zijn om niet stuk te gaan.

Ter oefening maken de opgaven 21 t/m 24.
Oplossingen inzenden van de opgaven 25 t/m 31.

4,1. De grootte van de luchtdruk

De proef van Torricelli kan men ook met een andere vloeistof doen, bv. water.
Het gewicht wan de waterkolom moet op 1 cm^2 1033,6 gram zijn (zie vorige les). Daar het s.g. van water gelijk aan 1 is, zou de waterkolom 1033,6 cm moeten worden, waaruit volgt, dat de buis ca. 11 meter lang moet zijn om de luchtledige ruimte of het vacuüm van Torricelli waar te nemen.

De grootte van de luchtdruk, die overeenkomt met 76 cm kwikdruk noemt men 1 atmosfeer. (afgekort atm.)*[2]

In de techniek is deze eenheid niet erg praktisch. Daar gebruikt men liever een eenheid at (ook uitgesproken als 'atmosfeer'), waarvoor geldt $1\ at = 1\ kg/cm^2$.

Een voorstelling over de grootte van de buitenlucht krijgt men uit de proef, die de burgemeester van Maagdenburg deed. Hij liet de ruimte tussen twee halve bollen, die luchtdicht op elkaar pasten, zo goed mogelijk luchtledig pompen.
Zestien paarden waren niet in staat de bollen van elkaar te trekken. Deze proef staat in de natuurkunde bekend als de proef met de Maagdenburger halve bollen.

4,2. Barometer

Een barometer is een toestel dat gebruikt wordt om de grootte van de luchtdruk te meten.
De buis van Torricelli is een kwikbarometer. De barometer bedraagt niet altijd 76 cm, doch schommelt deze waarde, afhankelijk van de weersgesteldheid.

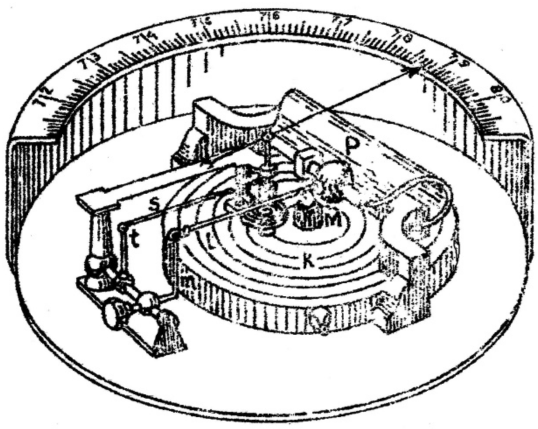


Fig. 4,1. Metaalbarometer.

De meest gebruikte barometer is de metaalbarometer (zie fig. 4,1). Deze bestaat uit een luchtledig gepompt doosje met een bovenvlak van gegolfd blik (k). Als de luchtdruk toeneemt, buigt het gegolfde blik iets door. Deze beweging wordt door middel van de hefbomen l, m en t vergroot op de wijzer overgebracht. Wordt de luchtdruk lager, dan trekt de stalen veer p het deksel van de doos omhoog, waardoor de wijzer terug draait.
De schaalverdeling, waarlangs de wijzer beweegt, is proefondervindelijk (empirisch) aangebracht.

Veronderstel eens, dat men in het noorden van Nederland een hoge barometerstand en in het zuiden een lage barometerstand meet, m.a.w. de luchtdruk is in het noorden hoger dan in het zuiden.

Er zal nu een verplaatsing van lucht (wind) optreden van het gebied met de hoge barometerstand naar het gebied met de lage barometerstand.

Kent men in meerdere plaatsen tegelijk de barometerstand, dan is het hieruit mogelijk ongeveer de windrichting te voorspellen. Bij deze voorspelling moet men echter wel rekening houden met de draaiing van de Aarde. De Nederlander Buys Ballot stelde hiervoor de naar hem genoemde wet op:

*[2] De atmosfeer is een wat verouderde eenheid van druk, overeenkomend met de gemiddelde luchtdruk op zeeniveau, ofwel 101,325 kPa. 1 atmosfeer is ongeveer gelijk aan 1 bar. Het eenheidssymbool is atm.
1 atm. = 760 mm Hg. Vroeger werd ook het begrip technische atmosfeer gebruikt (at): 1 at = 1 kgf/cm2 = 0,9678 atm. De ato was het symbool voor (technische) atmosfeer overdruk. In de luchtvaart en meteorologie sprak men voorheen van 1013,25 millibar en thans van 1013,25 hectopascal (hPa) als men het over een standaardluchtdruk heeft.
In water neemt de druk toe met ongeveer 1 atmosfeer voor elke 10 meter diepte. (bron: Wikipedia) FV

Op het noordelijk halfrond heeft de wind een afwijking naar rechts, op het zuidelijk halfrond een afwijking naar links.

Is het verschil in luchtdruk groot, dan zal er een harde wind waaien. Het is dus mogelijk uit de barometerstanden, op verschillende plaatsen gemeten, een eventuele storm te voorspellen.

De luchtdruk neemt met de hoogte geleidelijk af. Ook de temperatuur verandert met de hoogte. Het gedeelte van de atmosfeer, waarin de temperatuur met toenemende hoogte afneemt, heet troposfeer. Boven de troposfeer ligt de stratosfeer. In de stratosfeer neemt de temperatuur weer toe met de hoogte.

Komt men boven de stratosfeer, dan bevindt men zich in de ionosfeer.
In de ionosfeer komen enkele lagen voor, die rijk zijn aan elektrisch geladen deeltjes (ionen).
Deze lagen heten de D, E, F en F_2 lagen. in de D en E-lagen worden de radiogolven naar de Aarde teruggebogen. De D-laag is alleen overdag aanwezig.

4,3. De wet van Pascal

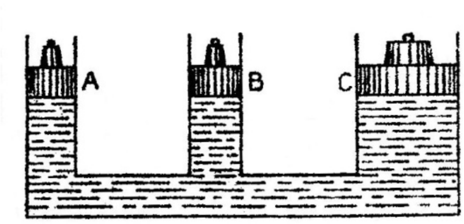


fig. 4,2.

Het toestel van fig. 4,2 bestaat uit drie onderling met elkaar verbonden vaten A, B en C, die met water gevuld zijn en afgesloten door een zuiger. De doorsneden van zuiger A en zuiger B zijn ieder $2\ cm^2$ van zuiger C $10\ cm^2$.

Als op zuiger A een gewicht van 10 kg wordt gezet, zal deze zuiger naar beneden bewegen, terwijl de zuigers B en C omhoog gaan. Onderzoekt men door proberen hoe groot de gewichten moeten zijn die op de zuigers B en C moeten worden gzet om alle drie de zuigers op dezelfde hoogte te houden, dan blijkt dit op zuiger B ook 10 kg te zijn en op zuiger C 50 kg.

De gevolgtrekking die hieruit getrokken wordt, is: zijn beide zuigers even groot, dan moet hetzelfde gewicht er op geplaatst worden, terwijl voor een 5 × zo grote zuiger het gewicht ook 5 × zo groot moet zijn. Voor de druk op iedere zuiger betekent dit: op zuiger A $\frac{10}{2} = 5\ kg/cm^2$ op:
B $\frac{10}{2} = 5 \frac{kg}{cm^2}$, en op C $\frac{50}{10} = 5\ kg/cm^2$.
De conclusie is: de druk blijft steeds gelijk. Dit wordt geformuleerd in de wet van Pascal.

Een op een vloeistof uitgeoefende druk plant zich in alle richtingen gelijkmatig (d.w.z. met dezelfde grootte) voort.

Oplossingen inzenden van de opgaven 32 t/m 38.

5,1. Communicerende vaten

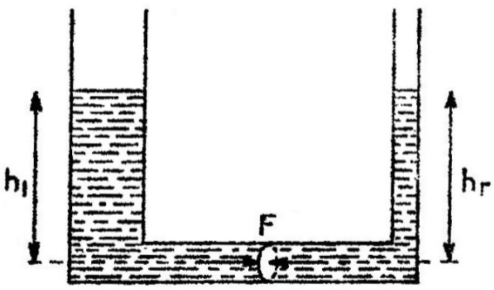


Fig. 5,1. Communicerende vaten

Als twee of meer vaten met elkaar in verbinding staan, spreekt men van communicerende vaten. Giet men in de vaten water, dan blijkt dat in alle vaten het water even hoog komt te staan. Doet men dit met andere vloeistoffen, dan blijkt dat eenzelfde vloeistof in communicerende vaten even hoog komt te staan.

Giet men in een der vaten vloeistof, dan ontstaat er in de verbindingsbuis een stroming, die ophoudt als de vloeistof in de verschillende vaten even hoog staat. De vloeistof is dan in evenwicht.

Op een doorsnede F in de verbindingsbuis (zie fig. 5,1) werkt van links een druk van: $h_1 \times s\ gram/cm^2$. (h_1 is de verticale afstand van het midden van F tot het vloeistofoppervlak in het linker been; s is de s.m. van de vloeistof.) Van rechts werkt een druk $h_r \times s\ g/cm^2$. Indien de vloeistof in evenwicht is, dan geldt dat: $h_1 \times s = h_r \times s$. Hieruit volgt dat $h_1 = h_r$.

5,2. Hevel

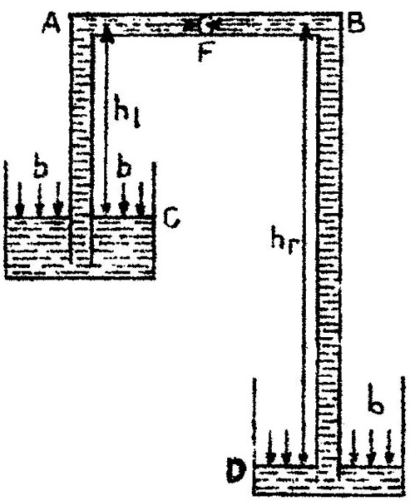


Fig. 5,2. Hevel.

Een hevel is een omgebogen buis, waardoor een vloeistof van een hoger naar een lager vat stroomt (zie fig. 5,2). De werking begint nadat de hevel vol vloeistof is gezogen en wordt veroorzaakt door de druk van de buitenlucht. Deze werkt zowel op het vloeistofoppervlak in het vat C als in het vat D. Een doorsnede bij F ondervindt van links een druk van $(b - h_1)\ cm$ vloeistof.

(h_1 is de hoogte van de vloeistofkolom tussen C en A, b is de barometerstand.) Van rechts ondervindt F een druk $(b - h_r)\ cm$. Daar h_r groter is dan h_1, is de druk links groter dan rechts. Dit drukverschil veroorzaakt een stroming van links naar rechts.

5,3. Gassen

Een gas gedraagt zich anders dan een vaste stof of een vloeistof. Een gas zal zich nl. verspreiden over de gehele ruimte, die het ter beschikking heeft en Dit is niet het geval met vaste stoffen en vloeistoffen.

Daar een opgesloten gas een zo groot mogelijk volume wil nemen, zal dit gas op de wanden van de ruimte, waarin het opgesloten zit, een druk uitoefenen. Deze eigenschap noemt men de spanning van het gas. De grootte van de spanning van een gas wordt aangegeven door de druk die het gas op de wanden uitoefent. In fig. 5,3 houdt de spanning van het gas in de cilinder de zuiger met het daarop staande gewicht omhoog. Als de zuiger in rust is, is er evenwicht tussen de druk, die het gas binnen de cilinder op de zuiger uitoefent en de druk, die het gewicht van de zuiger met het daarop

staande gewicht plus de druk van de buitenlucht daarop uitoefenen. Stel dat het gewicht van de zuiger, plus wat er op staat 25 kg is en het oppervlak van de zuiger is $5cm^2$.
De druk bedraagt dan $\frac{25}{5} kg/cm^2 = 5kg/cm^2$.
De druk van de buitenlucht is ca. 1 kg/cm^2. De spanning van het gas in de cilinder bedraagt dan $5 + 1 = 6\ kg/cm^2$.

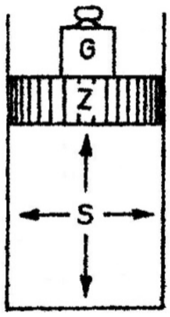


Fig. 5,3.

De grootte van de spanning van een gas wordt gemeten met een manometer. Men onderscheidt de open en gesloten vloeistofmanometers. Een open manometer bestaat uit een aan beide zijden open U-buis, bij een gesloten manometer is een der benen dicht.

In de buis bevindt zich kwik (voor hoge spanningen) of water (voor lage spanningen). De buis wordt op de ruimte waarin het gas zich bevindt aangesloten. Uit het hoogteverschil van de vloeistof en de beide benen wordt de spanning van het gas bepaald. Bij een gesloten manometer is de ruimte boven het kwik in het gesloten been luchtledig. Voor dagelijks gebruik is een kwikmanometer niet geschikt, vooral niet bij het meten van grote spanningen. Men gebruikt hiervoor de metaalmanometer, (zie fig. 5,4) bv. voor het meten van de spanning van een autoband, in een stoomketel etc.

De werking van de metaalmanometer is als volgt:
het afgesloten gas drukt onder tegen een gegolfde plaat b. De beweging van deze plaat wordt door een stang c op een wijzer e overgebracht door middel van een tandwieltje d.

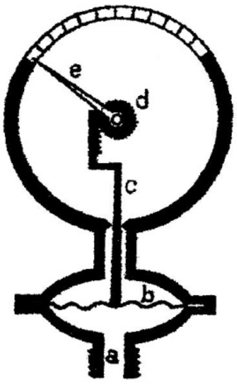


Fig. 5,4. Metaalmanometer.

5.5. Wet van Boyle

Indien een gas in een cilinder wordt samengeperst door een zuiger, neemt de spanning toe. Boyle ontdekte bij proefnemingen dat bij het samenpersen van gassen het product van spanning en volume voor eenzelfde gas steeds constant was. Ook als het volume van het gas toeneemt, blijkt dit het geval te zijn. Is het volume van de afgesloten hoeveelheid gas $V\ cm^3$ en de druk $p\ cm$ kwikdruk, dan is:

$$p \times V = constant$$

Dit geldt alleen als de gewichtshoeveelheid en de temperatuur van het gas dezelfde blijven.
Dit is de wet van Boyle. De wet geldt dus niet, als er tijdens de proef gas verdwijnt of bijkomt, of als de temperatuur verandert.

Heeft een zekere gewichtshoeveelheid eerst een volume V_1 en een druk p_1; en heeft het daarna bij dezelfde temperatuur een volume V_2 en een druk p_2, dan is:

$$V_1 \times p_1 = V_2 \times p_2.$$

Het is gebleken dat voor grote drukken de wet van Boyle slechts bij benadering geldt.

Ter oefening maken de opgaven 39 t/m 45.
Oplossingen inzenden van de opgaven 46 t/m 51.

6,1. Wet van Gay Lussac

Behalve door verandering van het volume, verandert de spanning van een afgesloten hoeveelheid gas ook als de temperatuur verandert. Uit proefnemingen is gebleken, dat bij alle gassen de vermeerdering van de spanning voor elke graad temperatuurverhoging even groot is.

Gay Lussac ontdekte nu de volgende naar hem genoemde wet:

Bij alle gassen neemt bij gelijkblijvend volume de spanning per graad temperatuurstijging toe met $\frac{1}{273}$ deel van de spanning die de beschouwde hoeveelheid gas bij 0° had.

Het getal $\frac{1}{273}$ wordt de spanningscoëfficiënt van het gas genoemd.

6,2. Uitzetting door verwarming

Als een spoorstaaf door de zon wordt verwarmd, wordt hij langer. Daarom legt men de spoorrails niet strak tegen elkaar, maar zorgt men voor enige ruimte; de rails kunnen dan bij verwarming vrij uitzetten. Bij de bouw van bruggen en wegen etc. wordt hiermee ook rekening gehouden.

In verband met de uitzetting is het nuttig de proef van 's Gravesande eens te bekijken.

Een koperen bol past precies binnen een koperen ring en kan er doorheen als de temperatuur van de bol en de ring gelijk is. wordt de bol verwarmd, dan kan hij niet meer door de ring en blijft er bovenop liggen.
Hieruit blijkt dus, dat bij verwarming het volume van een lichaam groter wordt. Verwarmt men de bol en de ring tegelijk, dan kan de bol steeds door de ring heen.
De ringopening wordt dus evenveel groter dan de bol, waaruit men leert, dat een hol lichaam bij verwarming evenveel uitzet alsof het massief was geweest.

Uitzetting ten gevolge van verwarming komt ook voor bij vloeistoffen en gassen.

Indien bij verwarming van lichamen het volume zich niet kan vergroten, treden er spanningen op die zo groot kunnen zijn, dat zij een breuk in het lichaam veroorzaken.

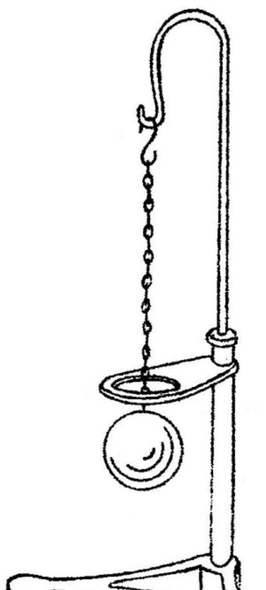


Fig. 6,1. Bol en ring van 's Gravensande.

Bij een proef van Tyndall (fig. 6,2.) wordt een smeed-ijzeren staaf verhit. Met een gietijzeren pen S en een schroef M wordt de staaf vastgeklemd. Met de schroef M wordt de staaf stevig vastgedraaid. Nu laat men de staaf afkoelen. De staaf krimpt is en op een gegeven moment knapt de gietijzeren pen S.

Opmerking: Tramrails kunnen in tegenstelling tot de treinrails wel tegen elkaar geplaatst worden. Dit komt omdat de tramrails contact met het wegdek maken, waardoor de warmte van de rails snel naar de Aarde wordt afgevoerd. De tramrails kunnen dus nooit zo warm worden als de treinrails.

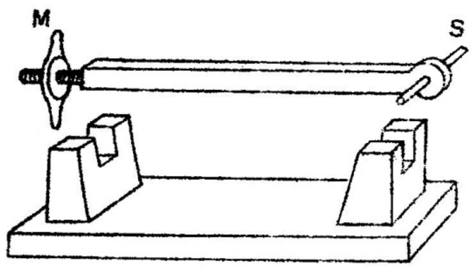


fig. 6,2. Proef van Tyndall

6,3. Thermometer

Kwikthermometer

Deze bestaat uit een glazen reservoir met nauwe buis. Het kwik, waarmee het reservoir is gevuld zet bij verwarming uit. De kwikkolom in het buisje wordt dan langer. Op een schaalverdeling langs het buisje is de temperatuur af te lezen. Kwik wordt in thermometers gebruikt omdat het een hoog kookpunt heeft, nl. 357°C en dus geschikt is voor het meten van hoge temperaturen.

In plaats van kwik wordt ook alcohol in thermometers gebruikt. Om de kleurloze alcohol te kunnen zien, wordt er een kleurstof bijgevoegd. Alcohol heeft een zeer laag vriespunt (-114°C), waardoor alcoholthermometers geschikt worden voor het meten van zeer lage temperaturen.

Om een schaalverdeling op de thermometer te maken, bepaalt men twee vaste punten en verdeelt de afstand daartussen in gelijke delen. Eerst plaatst men het bolletje van de thermometer in smeltend ijs. Het kwik staat dan op een bepaalde hoogte, waarbij een streep wordt gezet.
De aldus aangegeven temperatuur heet het vriespunt van water.

Het tweede vaste punt is het kookpunt van water. Het kwikreservoir wordt daarvoor in de damp van kokend water gehangen.

Celsius plaatste bij het vriespunt het getal 0 en bij het kookpunt 100.
De afstand tussen deze twee waarden verdeelde hij in honderd gelijke delen, deze delen heten graden.

Réaumur ontwierp een schaalverdeling waarbij het vriespunt door 0 en het kookpunt door het getal 80 werd aangegeven.

Fahrenheit plaatste 0 bij de stand die het kwik in de thermometer bereikte toen deze in een mengsel werd geplaatst, bestaande uit zout, water en ijs. Bij de stand, die het kwik bereikt als de thermometer in de oksel van de arm geplaatst wordt, schreef Fahrenheit 100. Het vriespunt van water ligt bij deze schaalverdeling bij 32, het kookpunt bij 212.

In wetenschap en techniek drukt men de temperatuur meestal uit in graden Celsius, in enkele landen, o.a. Engeland gebruikt men graden Fahrenheit.

Om een temperatuur, die in graden Celsius is gegeven, om te rekenen in graden Fahrenheit, vergelijkt men deze schalen met elkaar. Een temperatuurverschil van 100 graden Celsius komt overeen met een temperatuurverschil van 180 graden Fahrenheit (van 32°F tot 212°F).

Hieruit volgt, dat een temperatuurverschil van 1 graad Celsius overeen komt met een temperatuurverschil van 1,8 graad Fahrenheit.

Uit het voorgaande volgt, dat 100°C, 80°R en 180°F eenzelfde temperatuurverschil aangeven
Men vindt dus dat:

$$\boxed{5°\mathrm{C} = 4°R = 9°\mathrm{F}}$$

De algemene formule luidt:

$$\boxed{t\,°R = \frac{5}{4} \times t°\mathrm{C} = \left(\frac{9}{4} \times t + 32\right)°\mathrm{F}}$$

Ter oefening maken de opgaven 52 t/m 55.
Oplossingen inzenden van de opgaven 56 t/m 62.

7.1. Lineaire uitzettingscoëfficiënt

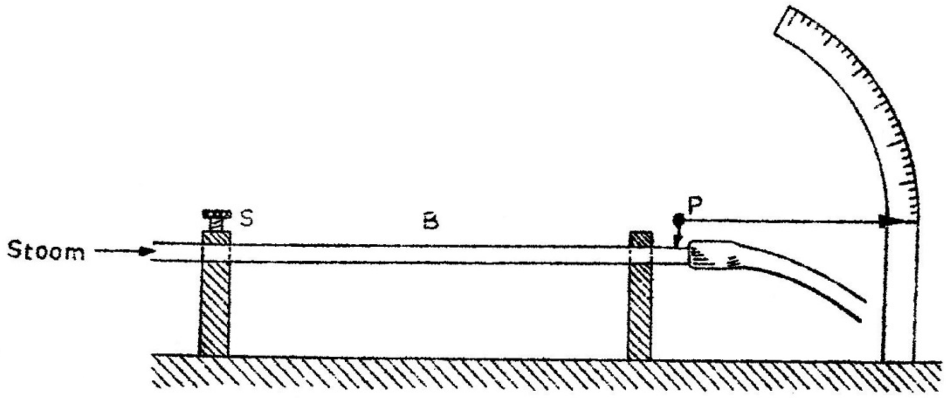


Fig. 7,1. Bepaling van de lineaire uitzettingscoëfficiënt van een holle buis.

Een staaf zet bij verwarming uit: de uitzetting kan gemeten worden met het toestel volgens fig. 7,1.

Men brengt een holle buis B op een temperatuur van 0°C en voert daarna stoom door de buis, waardoor de temperatuur van de buis 100°C wordt.

De buis is bij S vastgeklemd en tot P precies 50 cm lang. Nadat de buis tot 100 °C verwarmd is, leest men op de schaalverdeling de lengtetoename van de buis af. Deze lengtetoename bedraagt 0,06 cm; dus per centimeter is de buis $\frac{0{,}06}{50} = 0{,}0012$ cm langer geworden. Dit was bij een temperatuurstijging van 100 °C. Bij een stijging van 1°C zal de lengtevermeerdering per centimeter dus $\frac{0{,}0012}{100} = 0{,}000\ 012$ cm zijn. Deze lengtevermeerdering van 0,000 012 cm per cm en per graad temperatuurstijging is karakteristiek voor het ijzer waarvan de buis gemaakt is.

Deze grootheid heet de Lineaire uitzettingscoëfficiënt van ijzer.
(lineair omdat zij betrekking heeft op een uitzetting in de lengterichting.)

Onder de Lineaire uitzettingscoëfficiënt van een stof verstaat men de lengterichting in cm, die één cm van die stof ondergaat bij verwarming van één graad.

Nu volgt de afleiding voor een algemene formule voor de uitzetting.
Veronderstel dat de lengte van de stof bij 0°C l_0 is en bij t°C is de lengte l_t.

De Lineaire uitzettingscoëfficiënt van een stof stelt men voor door de Griekse letter λ (labda). 1 cm neemt voor iedere graad temperatuurstijging toe met λ, dus de lengte wordt $1 + \lambda$ cm; bij een temperatuurstijging van t° wordt de lengte $1 + \lambda$ cm. Een lengte l_0 zal dan bij t° temperatuurstijging $l_0(1 + \lambda t)$ cm lang zijn.

De formule voor de lengte van de stof bij t°C is dus:

$$\boxed{l_t = l_0(1 + \lambda t).}$$

Bij deze formule is uitgegaan van een begintemperatuur van 0°C van de staaf.

Als de staaf reeds een bepaalde temperatuur t_1 heeft, wordt de lengtevermeerdering bij een stijging tot een temperatuur t_2 berekend. Bereken eerst de lengte van de staaf bij $t_1{}^{0c}$ uit die bij 0°C, daarna bij $t_2{}^{0c}$ ook uit die bij 0°C. Het verschil in lengte is nu de lengtevermeerdering:

$l_1 = l_0(1+\lambda t_1)$; $l_2 = l_0(1+\lambda t_2)$; Deling van deze vergelijkingen geeft:

$\frac{l_2}{l_1} = \frac{1+\lambda t_2}{1+\lambda t_1}$ dus: $l_2 = l_1 \frac{1+\lambda t_2}{1+\lambda t_1}$. Vermenigvuldig teller en noemer met $1-\lambda t_1$.

$l_2 = l_1 \frac{1+\lambda t_2}{1+\lambda t_1} \times \frac{1-\lambda t_1}{1-\lambda t_1} = l_1 \frac{1+\lambda t_2 - \lambda t_1 - \lambda^2 t_2 t_1}{1-\lambda^2 t_1{}^2}$. Daar λ een zeer klein getal is, is λ^2 te verwaarlozen, dus met een kleine benadering geldt:

$$l_2 = l_1\{1+\lambda\,(t_2-t_1)\}.$$

Voorbeeld: Bereken de lengte van een koperen staaf van 40 cm, als de staaf verwarmd wordt van 30°C tot 80°C als λ-koper $= 17.10^{-6}$.

Oplossing: $l_2 = 40\{1+17.10^{-6}(80-30)\} = 40(1+850.10^{-6}) =$

$= 40(1+85.10^{-5}) = 40 + 340.10^{-5} = 20 + 34.10^{-4} = 20{,}0034\ cm.$

Wordt de staaf afgekoeld, dan geldt bovenstaande formule ook, mits men λ negatief neemt.
De lineaire uitzettingscoëfficiënt van enige stoffen is in onderstaande tabel gegeven.

aluminium	24.10^{-6}	lood	29.10^{-6}
beton	10.10^{-6}	messing	19.10^{-6}
brons	18.10^{-6}	nikkel	13.10^{-6}
eboniet	80.10^{-6}	ijs	51.10^{-6}
glas	8.10^{-6}	ijzer	12.10^{-6}
koper	17.10^{-6}	zink	30.10^{-6}

7.2. Kubieke uitzettingscoëfficiënt

Bij verhoging van de temperatuur wordt niet alleen de lengte van een lichaam groter, doch ook de breedte en de hoogte. Bij verwarming van 1° wordt de lengte van een blokje materiaal met lengte 1 cm en hoogte 1 cm, dus $(1+\lambda)$ cm lang. Ook de breedte en de hoogte worden $(1+\lambda)$ cm.
Het volume van het blokje wordt dan $(1+\lambda)^3\ cm^3 = (1+3\lambda+3\lambda^2+\lambda^3)\ cm^3$. λ^2 *en* λ^3 worden weer zo klein, dat ze t.o.v. λ verwaarloosd kunnen worden. Het volume wordt dan $(1+3\lambda)\ cm^3$.
De volumevermeerdering bedraagt dus bij 1° temperatuurstijging $3\lambda\ cm^3$. Deze grootheid heet de kubieke uitzettingscoëfficiënt en wordt aangegeven met de letter α (alpha).

Onder de kubieke uitzettingscoëfficiënt van een stof verstaat men de volumevermeerdering in cm^3, die één cm^3 van die stof ondergaat bij een temperatuurstijging van één graad.
De kubieke uitzettingscoëfficiënt is driemaal zo groot als de lineaire uitzettingscoëfficiënt ($\alpha = 3\lambda$).
Geeft men het volume van een stof bij 0°C aan door V_0, het volume bij t°C door V_t en de kubieke uitzettingscoëfficiënt door α, dan geldt op dezelfde manier als bij de lineaire uitzettingscoëfficiënt:

$$\boxed{V_t = V_0(1+\alpha t).}$$

Gaat men uit van een volume V_1 bij een temperatuur t_1 en vergelijkt men die met het volume V_2 die een stof bij een temperatuur t_2 inneemt, dan geldt:

$$\boxed{V_2 = V_1\{1+\alpha(t_2-t_1)\}.}$$

Opmerking: Deze formule geldt voor alle vaste stoffen en vloeistoffen, maar niet voor gassen, daar mag nl. de waarde α^2 niet verwaarloosd worden, zodat geldt: $V_2 = V_1 \frac{1+\alpha t_2}{1+\alpha t_1}$.

Ter oefening maken de opgaven 63 t/m 66.
Oplossingen inzenden van de opgaven 67 t/m 73.

8,1. Anomalie van water

Anomalie wil zeggen: afwijking van de algemene regel. Een voorbeeld hiervan is de volumeverandering van water bij temperatuurverandering. Bij afkoeling krimpt water tot het een bepaalde temperatuur (4°C) heeft bereikt, benden die temperatuur zet het weer uit.

Om de temperatuur te leren kennen, waarbij water zijn kleinste volume heeft, bekijken we de proef van Hope (zie fig. 8,1).

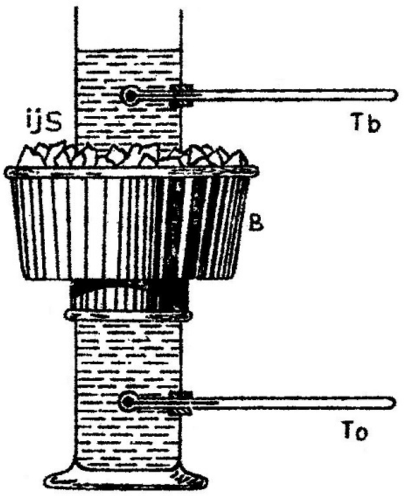


Fig. 8,1. Toestel van Hope.

Een cilinder is gedeeltelijk met water gevuld. In de cilinder steken twee thermometers, nl. T_b en T_o. Om de cilinder is een bak B met smeltend ijs en zout gevuld. De temperatuur in beide thermometers daalt totdat na verloop van tijd de thermometer T_o een temperatuur van 4°C aangeeft en daarop blijft staan. De thermometer T_b echter blijft dalen totdat de temperatuur daar 0°C is geworden.

Bij het begin van de proef is het onderste water kouder dan het bovenste. Als het onderste water 4°C is geworden wordt het niet kouder meer, het bovenste echter wel.

Hieruit blijkt, dat water van 4° zich verzamelt en het onderste deel van de cilinder. Water van 4° is dus zwaarder dan water van een andere temperatuur, of anders gezegd: het soortelijk gewicht van water van 4 ° is het grootste. Daar het gewicht echter hetzelfde blijft, volgt uit de formule gewicht = volume × soortelijk gewicht, dat het volume bij water het kleinste is bij een tyemperatuur van 4°C. Dus:

Water heeft bij 4° zijn grootste soortelijk gewicht of zijn kleinste volume.

Het soortelijk gewicht van water is 1, als de temperatuur van het water 4° is. Beneden en boven 4° is het soortelijk gewicht kleiner.

In opgaven wordt echter altijd met een soortelijk gewicht 1 gerekend voor water, onverschillig bij welke temperatuur men werkt.

Indien het water in een sloot bv. ’s-winters afkoelt, zal dit eerst inkrimpen; het s.g. wordt groter en het water zinkt naar de bodem totdat al het water 4°is geworden.

Bij verdere afkoeling kan het water niet naar de bodem zakken en zal dus aan het oppervlak gaan bevriezen. Het bevriezen zet zich daarna naar beneden toe voort.

8,2. Bimetaal

Twee dunne repen van verschillend metaal zijn tegen elkaar geklonken of gelast.
De twee metalen bezitten een sterk verschillende uitzettingscoëfficiënt, waardoor bij verwarming de metalen niet evenveel uitzetten. De gevormde staaf wordt dan krom gebogen. Het metaal met de grootste uitzettingscoëfficiënt zit aan de bolle kant.
De buiging van het bimetaal is een maat voor de temperatuur; deze buiging is echter gering, zodat men

de aanwijzing kunstmatig moet vergroten, bv. door het bimetaal in spiraalvorm te wikkelen.
Voordelen van een bimetaalthermometer zijn:

1e geringe breekbaarheid
2e te gebruiken bij temperaturen, waarbij vloeistofthermometers onbruikbaar zijn wegens bevriezen of verdampen van de vloeistof.

Bimetaal wordt zeer vaak gebruikt om de temperatuur te regelen. Het bimetaal wordt in dit geval als contactveer gebruikt, die een elektrische stroom verbreekt of sluit.
In strijkijzers, in warmwaterketeltjes, in olietoevoer van een verwarmingsinrichting enz. enz. wordt bimetaal gebruikt om de temperatuur automatisch te regelen.

<u>8,3. Uitzettingscoëfficiënt van een gas</u>

Fig. 8,2.

Gassen zetten bij verwarming vrij veel uit. Om de grootte van de uitzetting te meten, gebruikt men een glazen bol met een buisje, waarin zich een kwikdruppel bevindt, zie fig. 8,2. Door de druppel is de lucht in de bol afgesloten.

Men zet de bol in smeltend ijs, zodat de temperatuur precies 0°C is. De kwikdruppel neemt een bepaalde stand in. Het volume onder de druppel wordt nu gemeten.
Daarna plaatst men de bol in de stoom van kokend water, zodat de temperatuur in de bol 100° is.
De kwikdruppel stijgt nu.
Hierna wordt weer het volume gemeten. Stel het eerste volume was V_0 en het tweede V_{100}, dan is per graad temperatuurstijging de volumetoename: $\frac{V_{100} - V_0}{100}$.
Deze volumetoename blijkt nu precies het $\frac{1}{273}$ deel van het oorspronkelijke volume te zijn. Doet men deze proef met andere gassen, dan vindt men precies hetzelfde resultaat.
Hieruit volgt de wet van Gay-Lussac:

<u>Bij alle gassen neemt het volume voor elke graad temperatuurstijging met het $\frac{1}{273}$ deel van het volume bij 0° toe, mits de spanning constant blijft.</u>

Het getal $\frac{1}{273}$ wordt de <u>uitzettingscoëfficiënt</u> van gassen genoemd en wordt als volgt gedefinieerd:

<u>Onder de uitzettingscoefficient van een gas verstaat men de volumevermeerdering in cm^3, die 1 cm^3 gas van 0° ondergaat bij verwarming van één graad, mits de spanning constant blijft.</u>

Ter oefening maken de opgaven 74 t/m 79.
Oplossingen inzenden van de opgaven 90 t/m 84.

9.1. Warmte en temperatuur

Het is op verschillende manieren mogelijk een metaal in temperatuur te doen stijgen, bv. door het in een vlam te houden, in heet water te leggen, in de zon te houden enz. In al deze gevallen zegt men dat het metaal warmte opneemt. Om de temperatuur van het metaal te doen dalen moet het metaal warmte afstaan.

Indien twee materialen, die een verschillende temperatuur hebben, met elkaar in contact worden gebracht, staat het materiaal met de hoogste temperatuur zolang warmte af aan het andere, totdat beide materialen dezelfde temperatuur hebben verkregen.

In de natuurkunde bedoelt men met verwarmen het opnemen van warmte en niet het stijgen van temperatuur. Het is nl. niet altijd noodzakelijk dat bij warmtetoevoer de temperatuur stijgt, zoals we later zullen leren.

Het is op verschillende manieren mogelijk om warmte te ontwikkelen, bv. elektrisch, scheikundig, mechanisch, enz.

Elektrische warmte-ontwikkeling treffen we bv. aan bij een elektrisch kacheltje, een strijkijzer, een kookplaat, enz.

Scheikundige warmte-ontwikkeling bij verbranding (steenkool, petroleum), inwerking van water op carbid, enz.

Mechanische warmte-ontwikkeling door bv. de wrijving, hameren, enz.

9.2. Voortplanting van warmte door geleiding

Als men een pook in de kachel steekt, dan voelt men dat de gehele pook warm wordt.
De warmte plant zich in het materiaal voort, het materiaal geleidt de warmte. Niet alle lichamen geleiden de warmte even goed. Slechte warmtegeleiders zijn bv. water, glas, porselein en steen.

Sommige materialen geleiden de warmte praktisch geheel niet, deze stoffen noemt men warmte-isolatoren, bv. asbest, katoen, papier en hout.

Bijna alle vloeistoffen, behalve kwik en gesmolten metalen zijn slechte warmtegeleiders, ook gassen en dampen geleiden de warmte slecht.

Lucht wordt vaak als isolator gebruikt tussen dubbele ramen of muren.

9.3. Voortplanting van warmte door stroming

Als men een reageerbuisje met water bovenaan, waar het water zich nog bevindt, verwarmt, gaat het water daar koken, terwijl het water onder in de reageerbuis koud blijft. Water is een zeer slechte warmtegeleider.
Verwarmt men het reageerbuisje echter onderaan, dan voelt men al spoedig dat het water bovenin ook heet wordt. De oorzaak van deze warmtevoortplanting is niet de geleiding, maar de stroming van het hete water van onder naar boven. Het koude water zakt naar beneden, wordt daar verwarmd en stijgt dan weer op enz. Het transport van warmte door middel van stroming van een vloeistof vindt o.a. toepassing bij de centrale verwarming.

Ook in gassen ontstaat door verwarming stroming. De warme lucht in een kachel veroorzaakt in de schoorsteen de “trek”, waardoor de kachel blijft branden.

9.4. Voortplanting van warmte door straling

De warmte van de zon bereikt de aarde zonder dat geleiding of stroming hiervan de oorzaak zijn.

De tussengelegen lucht wordt nl. niet verwarmd door de zonnestralen, doch door contact met de aarde, die door de zonnestralen verwarmd is.
Het transport van zonnewarmte geschiedt door straling.

R.T.

18 Nk Nadruk verboden

Bij voortplanting van warmte door geleiding geeft het ene deeltje van de stof de warmte over aan een volgend deeltje, dit weer aan een volgend deeltje enz. De geleidende stof beweegt zelf niet (soldeerbout).

Bij stroming beweegt de stof wel, hij draagt de warmte met zich mee (centrale verwarming). Bij straling wordt de warmte overgebracht zonder dat een tussenstof daaraan meewerkt (straalkachel).

De hoeveelheid warmte, die door een lichaam wordt uitgestraald hangt, behalve van de temperatuur, ook af van de aard van het oppervlak. Zwarte oppervlakken stralen meer warmte uit dan witte oppervlakken van dezelfde temperatuur. Ruwe oppervlakken stralen meer warmte uit dan gepolijste oppervlakken van dezelfde temperatuur. Een lichaam, dat door straling wordt verwarmd, absorbeert de warmte (absorberen is opnemen). De hoeveelheid warmte, die geabsorbeerd wordt, hangt af van de aard en de stand van het oppervlak.

Donkere en ruwe oppervlakken nemen meer warmte op bij bestraling dan lichte en gladde oppervlakken.

De oppervlakken, die in verhitte toestand de grootste uitstraling hebben, absorberen eveneens het meeste. Verder neemt een vlak meer warmte op naarmate de hoek, die de stralen met het vlak maken, groter is. M.a.w. de grootste warmte-absorptie wordt verkregen als het vlak loodrecht op de stralen staat.
(Vergelijk de warmte aan de evenaar en aan de polen in verband met de stand van de zon.)

De hoeveelheid warmte, die wordt overgebracht van een lichaam met een hoge temperatuur naar een lichaam met lage temperatuur, is bij stroming en geleiding recht evenredig met het temperatuurverschil; de hoeveelheid, die overgebracht wordt door straling is evenredig met het verschil van de vierde machten van de temperaturen in $°K.$ $(t°\mathrm{C} = t + 273°K = t + 273°\ Kelvin.)$

Hieruit volgt, dat bij grote temperatuurverschillen de overdracht hoofdzakelijk plaatsvindt door straling, terwijl bij kleine temperatuurverschillen de overbrenging door stroming en geleiding gaat overheersen.

De bij deze wetten noodzakelijke evenredigheidsfactoren hangen af van het materiaal en de oppervlakken van de lichamen.

De grootste afstraling van warmte krijgt men bv. van een dof zwart lichaam, terwijl een glimmend gepoetst koperen lichaam een zeer geringe afstraling heeft. Dit is dan ook de reden waarom men bij een verwarmingsketel of stoommachine de koperen leidingen en afsluiters steeds poetst, er gaat dan nl. de minste warmte verloren door afstraling.

Oplossingen inzenden van de opgaven 85 t/m 95.

10.1. Calorie

Om een hoeveelheid warmte te kunnen meten, is een eenheid ingevoerd die de calorie is genoemd.

Een calorie*[3] is de hoeveelheid warmte die nodig is om een gram water een graad in temperatuur te doen stijgen.

Echter wordt de eenheid van warmtehoeveelheid vaak gedefinieerd als kilogramcalorie (kcal). Een kilogramcalorie is de hoeveelheid warmte die nodig is om een kg water een graad in temperatuur te doen stijgen.

Wanneer men water enige graden verwarmt, neemt het dus een aantal calorieën op van de verwarmingsbron. Koelt dit verwarmde water weer af tot de oorspronkelijke temperatuur, dan staat het de opgenomen calorieën weer af, zodat geldt:

Opgenomen warmte = afgestane warmte.

Men kan de calorie dus ook als volgt definiëren:

Een calorie is de hoeveelheid warmte, die vrijkomt als een gram water een graad in temperatuur daalt.

Hout, papier, kolen enz. leveren bij verbranding warmte. Deze warmte kan gebruikt worden om water te verwarmen, waardoor het mogelijk is de hoeveelheid warmte, die bij het verbranden ontstaat, in calorieën te meten.

Onder de verbrandingswarmte van een stof verstaat men de hoeveelheid warmte, die bij het verbranden van een eenheid van die stof vrijkomt.

Als eenheid voor de hoeveelheid stof, die men gebruikt, wordt meestal de kg genomen, of ook wel de m^3, de eenheid voor de hoeveelheid warmte is dan de kilocalorie (kcal).

In onderstaande tabel kan men zien, hoe groot de verbrandingswarmte van enige stoffen is, de verbrandingswarmte is uitgedrukt in kilocalorieën per kg.

acetyleengas	12000	houtskool	7000
antraciet	8000	lichtgas	7000
benzine	11000	mijngas	13300
buskruit	750	petroleum	10000
cokes	7000	spiritus	6000
dieselolie	11000	turf	4000
hout	4500	waterstofgas	34000

10.2. Warmtecapaciteit

Vier even zware bollen van verschillende materialen gemaakt, nl: van ijzer, koper, tin en lood, worden verhit tot eenzelfde temperatuur en daarna tegelijk op een wasplaat gelegd.

Na enige tijd zakt eerst de ijzeren bol door de wasplaat en daarna de koperen bol. De tinnen en de loden bol zinken veel langzamer door de waslaag en het is zelfs mogelijk dat zij daarin blijven steken. Hieruit blijkt dat niet iedere bol dezelfde hoeveelheid warmte bezit. De bol, die het eerste door de waslaag is gedrongen heeft de grootste warmtecapaciteit.

Onder de warmtecapaciteit verstaat men het aantal calorieën dat vrijkomt als het lichaam een graag in temperatuur daalt. De hoeveelheid warmte, die vrijkomt als een lichaam een graad in temperatuur daalt, is even groot als de hoeveelheid warmte, die nodig is om dat lichaam een graad in temperatuur te doen stijgen. Men kan dus ook zeggen:

*[3] De **calorie** (van Lat. *calor*, warmte) is een verouderde eenheid voor energie of warmte. Tegenwoordig wordt energie in het SI-stelsel in joule uitgedrukt. 1 calorie = 4,1868 joule. (bron: Wikipedia) FV

De warmtecapaciteit van een lichaam is het aantal calorieën dat toegevoerd moet worden om dat lichaam een graad in temperatuur te doen stijgen.

De ijzeren bol heeft dus bij het verwarmen per graad temperatuurstijging meer calorieën opgenomen dan de koperen en deze weer meer dan de tinnen bol enz.

Bij het afkoelen staat de ijzeren bol dus ook meer calorieën af dan de anderen, zodat de was sneller zal smelten dan bij de andere bollen.

10,3. Soortelijke warmte

Uit 10,2 volgt dat de warmtehoeveelheid afhankelijk van de soort stof is, men spreekt daarom van de soortelijke warmte van een stof.

Onder de soortelijke warmte van een stof verstaat men het aantal calorieen dat vrijkomt als een gram van die stof een graad in temperatuur daalt, of ook het aantal calorieen dat nodig is om een gram van die stof een graad in temperatuur te doen stijgen.

In onderstaande tabel zijn van enige stoffen de soortelijk warmten gegeven in calorieën per graad.

aluminium	0,21 cal/graad	petroleum	0,51 cal/graad
glas	0.19 ,,	platina	0,032 ,,
goud	0,031 ,,	steen	0,2 ,,
koper	0,091 ,,	water	1,000 ,,
kwik	0,033 ,,	ijs	0,5 ,,
lood	0,03 ,,	ijzer	0,111 ,,
messing	0,093 ,,	zink	0,092 ,,

Voorbeeld:

Een voorwerp van 800 gram en een temperatuur van 100° wordt in 2000 gram water van 10° gebracht. De eindtemperatuur wordt 15°. Wat is de soortelijke warmte van die stof?

Oplossing:

Steeds geldt, dat de opgenomen warmte gelijk is aan de afgestane warmte.
Het water neemt een hoeveelheid warmte op, die gelijk is aan:
$(15-10)\times 2000 \times 1 = 10\,000\ cal$. Stelt men de soortelijke warmte van het voorwerp op X, dan is de hoeveelheid warmte, die het voorwerp afstaat:
$(100-15)\times 800 \times X = 68\,000\ X\ cal$. Deze hoeveelheid is gelijk aan:
$10\,000\ cal$, zodat:

$68\,000\ X = 1000$, dus: $X = \frac{1}{68} = 0{,}015$.

De soortelijke warmte van de stof is dus 0,015 cal/graad.

Ter oefening maken de opgaven 91 t/m 95.
Oplossingen inzenden van de opgaven 96 t/m 103.

11,1. Calorimeter

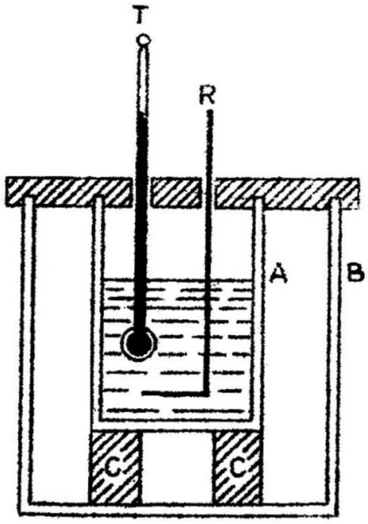


Fig. 11,1. Calorimeter.

Een toestel dat dient om een hoeveelheid warmte (calorieën) te meten, noemt men een calorimeter.

Met de calorimeter bereikt men dat de warmte-uitwisseling met de omgeving tot een minimum beperkt blijft, zodat een zo nauwkeurig mogelijke meting verricht kan worden.

de calorimeter van fig. 11,1 bestaat uit een koperen bak A, van boven afgesloten door een houten deksel D. In het deksel zijn openingen voor de thermometer T en de roerder R aangebracht.

De bak A is omgeven door een tweede bak B, waardoor bak A geïsoleerd is van de omgeving. Bak A staat op kurken voetjes C, die de warmte slecht geleiden.

Om de straling zo gering mogelijk te maken, zijn beide bakken gemaakt van glad en glimmend materiaal.

Om de hoeveelheid warmte te leren kennen, die gebruikt wordt om het vat A, de roerder en de thermometer, gelijk met het water in temperatuur te doen stijgen, moet men weten hoe groot de warmtecapaciteit van de calorimeter met toebehoren is.

In een calorimeter, die 500 gram water bevat van 10°C, giet men 100 gram water van 80°C. Na een tijdje roeren, is de eindtemperatuur 20°. Het oorspronkelijke water in de calorimeter heeft $500(20-10)=5000\ cal.$ Opgenomen.

Noemt men de warmtecapaciteit van de calorimeter x, dan heeft de calorimeter $(20-10)x=10x\ cal$ opgenomen. Totaal is dus opgenomen: $(5000+10x)$ calorieen.

Het bijgevoegde warme water heeft afgestaan:

$100(80-20)=6000$ calorieën

Daar de opgenomen warmte gelijk is aan de afgestane warmte, geldt:

$$5000+10x=6000$$
$$10x=1000$$
$$x=100.$$

De warmtecapaciteit van de calorimeter met toebehoren is dus 100 cal per graad. Dat wil zeggen, dat de calorimeter 100 cal opneemt om een graad in temperatuur te stijgen. Men zegt ook wel, dat de calorimeter een waterwaarde heeft van 100. In plaats van waterwaarde wordt het woord warmtecapaciteit veel gebruikt.

11,2. Smeltpunt en stolpunt

Als men in een glas met water een stukje ijs doet, dan daalt de temperatuur van het water. Als het stuk ijs voldoende groot is, daalt de temperatuur van het water tot 0°C.

Verwarmt men een glas met water van 0°, waarin een flink stuk ijs drijft, dan stijgt de temperatuur van het water niet. Het ijs smelt tijdens de verwarming. Pas nadat al het ijs gesmolten is, zal de temperatuur gaan stijgen boven 0°.

Bijna alle vaste stoffen hebben een bepaalde temperatuur waarbij zij van de vaste in de vloeibare toestand overgaan. Deze temperatuur heet het smeltpunt van de stof.

Voor een bepaalde stof heeft het smeltpunt altijd dezelfde waarde, zodat het smeltpunt kenmerkend is voor die stof.

Het stolpunt van een stof is de temperatuur, waarbij de vloeibare toestand van de stof in de vaste toestand overgaat. Een stof stolt bij dezelfde temperatuur als waarbij hij smelt, dus:

stolpunt = smeltpunt.

11,3. Smeltingswarmte

De smeltingswarmte van een stof is het aantal calorieën, dat nodig is om een gram van die stof uit de vaste in de vloeibare toestand te doen overgaan.

De stollingswarmte van een stof is het aantal calorieën, dat vrijkomt als een gram van die stof uit de vloeibare in de vaste toestand overgaat. De hoeveelheid warmte, die bij het stollen vrijkomt, is even groot als de hoeveelheid, die nodig was om de stof te doen smelten.
Dus is:

smeltingswarmte = stollingswarmte.

De smeltingswarmte van ijs bedraagt ongeveer 80, d.w.z. om 1 gram ijs om te zetten in 1 gram water, moeten 80 calorieën toegevoerd worden.

Dit getal komt zo dikwijls in opgaven voor, dat het raadzaam is dit getal te onthouden.

11.4. Verdampingswarmte

Voor het verdampen van water is warmte nodig.

De verdampingswarmte van een stof is het aantal calorieen, dat nodig is om een gram van die stof van de vloeibare in de gasvormige toestand van dezelfde temperatuur te doen overgaan.

De warmte, die voor het verdampen nodig is geweest komt weer vrij als de damp gaat condenseren, zodat:

verdampingswarmte = condensatiewarmte

De condensatiewarmte van een stof is het aantal calorieën, dat vrijkomt als een gram van die stof uit de gasvormige toestand in de vloeibare toestand van dezelfde temperatuur overgaat.

De verdampingswarmte van water is 540 cal/g.

De meeste stoffen krimpen bij het stollen in, dus het volume wordt kleiner; bij het smelten gebeurt het omgekeerde: het volume wordt groter.

Daar bij het groter worden van het volume de soortelijke massa van een stof groter wordt, zinkt de vaste stof in de gesmolten stof.

Water, ijzer en bismuth vormen op deze regel echter een uitzondering.
Water zet juist uit als het bevriest. Daardoor springen waterleidingbuizen bij vorst. Bij het verdampen nemen alle stoffen zonder uitzondering een groter volume in; bij condenseren een kleiner.

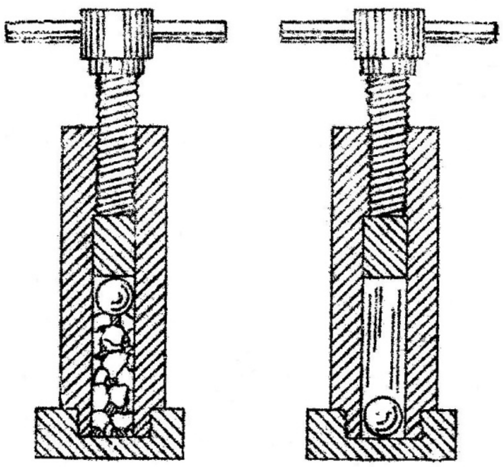
Ter oefening maken de opgaven 104 t/m 110.
Oplossingen inzenden van de opgaven 111 t/m 115.

12,1. Wet van Thomson

Als ijs onder druk wordt gebracht verandert het smeltpunt van het ijs.

Dit werd bewezen door Mousson door in een cilinder ijs te doen en daarop een metalen bolletje te leggen (fig.12,1).

Daarna werd de schroef zeer sterk aange- draaid en na enige tijd weer losgedraaid.
Het bleek dan dat het metalen bolletje onder het ijs lag.



a b

Fig. 12,1. Proef van Mousson.
a: voor de drukvergroting;
b: na opheffing van de druk.

Tijdens de proef wordt de cilinder voortdurend op een temperatuur beneden 0° gehouden.
Dit komt, doordat onder invloed van de druk het ijs gesmolten is. Het bolletje is in het smeltwater gezonken. Nadat de druk op het water weer was opgeheven, is het water weer ijs geworden.

Bij een druk van een atmosfeer smelt het ijs bij 0°C, doch onder hoge druk smelt ijs bij een lagere temperatuur. Het vriespunt wordt met ongeveer 0,0075°C per atmosfeer verlaagd.

Bovenstaand verschijnsel kunnen we ook in het dagelijkse leven waarnemen.

Als een zware wagen over de sneeuw rijdt, smelt de sneeuw onder de wielen.
Als de wagen gepasseerd is, is de druk opgeheven, de gesmolten sneeuw bevriest en zo ontstaan de gladde sporen, die een wagen in de sneeuw achterlaat.
Hetzelfde zien we bij kinderen die een glijbaan maken, door de druk van het lichaam smelt de sneeuw enz.

Dit opnieuw bevriezen na het opheffen van de druk heet <u>regelatie</u>. Men kan dit ook zien bij de volgende proef.
(zie fig. 12,2).

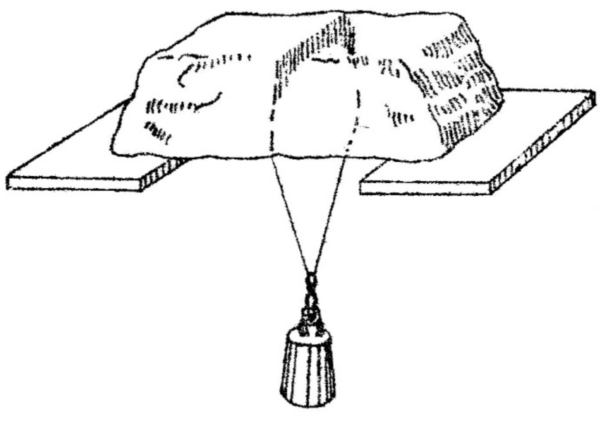


Fig. 12,2. Regelatieproef

Over een blok ijs legt men een ijzerdraad en hangt daaraan een zwaar gewicht. Onder invloed van de druk smelt het ijs en de draad zakt door het ijs heen.
Boven de draad bevriest het smeltwater direct weer, zodat het blok heel blijft.

Bij de proef van Mousson werd het ijs gedwongen een kleiner volume in te nemen, waardoor het ijs overging in water.

Thomson formuleert nu de volgende wet"

<u>Verhoging van de druk bevordert het ontstaan van die toestand, waarbij de stof het kleinste volume inneemt.</u>

Deze wet geldt ook, als men in een cilinder met zuiger, waarin zich bij 100° water en stoom bevindt, de zuiger indrukt.

Een deel van de stoom gaat dan over in vloeistof, omdat deze in vloeistoftoestand een kleiner volume inneemt, dan in damptoestand.

Drukverhoging doet bij de meeste stoffen het smeltpunt stijgen, bij water (ijs) echter daalt het smeltpunt als men de druk op het ijs verhoogt.

Dit gedeelte van de natuurkunde wordt afgesloten door een herhaling van de belangrijkste wetten en formules, die de cursist uit het hoofd dient te leren.

I. Soortelijk gewicht $= \frac{\text{gewicht in kg of g}}{\text{volume in dm}^3 \text{ of cm}^3}$; s.g. $= \frac{G}{V}$.

II. Archimedes: Een lichaam geheel of gedeeltelijk ondergedompeld in een vloeistof ondervindt een opwaartse kracht, gelijk aan het gewicht van de verplaatste vloeistof.

III. Drijven: $G < O.K;$ Zweven: $G = O.K$: Zinken: $G > O.K.$ (G = gewicht lichaam, $O.K.$ = opwaartse kracht van een geheel ondergedompeld lichaam).

IV. Pascal: Een op een vloeistof uitgeoefende druk plant zich in alle richtingen gelijkmatig voort.

V. Boyle: $p \times V =$ constant; $p =$ druk, $V =$ volume van een gas. (Temperatuur en hoeveelheid mogen niet veranderen).

VI. Gay Lussac: Bij alle gassen neemt bij gelijkblijvend volume de spanning per graad temperatuurstijging toe met $1/273$ van de oorspronkelijke spanning.

VII. 5°C = 9°F = 4°R.

VIII. Lengte van een staaf bij t°C: $l_t = l_0(1 + \lambda t)$.
Volume van een lichaam bij t°C: $V_t = V_0(1 + \alpha t)$.

IX. Water heeft bij 4°C zijn grootste s.g. of zijn kleinste volume.

X. De warmte, nodig om 1 g water 1°C in temperatuur te doen stijgen, is een calorie.

XI. Onder de verbrandingswarmte van een stof verstaat men de hoeveelheid warmte, die bij verbranding van een eenheid van die stof vrijkomt.

XII. Onder de soortelijke warmte van een stof verstaat men het aantal calorieën, nodig om 1 gram van die stof 1° in temperatuur te doen stijgen.

XIII. De smeltingswarmte van een stof is het aantal calorieën, nodig om 1 gram van die stof uit de vaste in de vloeibare toestand te doen overgaan.

XIV. De verdampingswarmte van een stof is het aantal calorieën, dat nodig is om een gram van die stof van de vloeibare in de gasvormige toestand (van dezelfde temperatuur) te doen overgaan.

Oplossingen inzenden van de opgaven 116 t/m 120.

13.1. Moleculen

Elk lichaam kan men in kleinere delen splitsen. Hierbij doet zich de vraag voor of dit maar steeds door kan gaan, of dat men een op een bepaald ogenblik op zodanig kleine deeltjes komt, dat die niet meer deelbaar zijn.

Het blijkt, dat men een bepaalde stof kan verdelen in zeer kleine stukjes, waarbij ieder stukje nog dezelfde eigenschappen heeft als de oorspronkelijk stof. De kleinste deeltjes, die nog dezelfde eigenschappen hebben, heten moleculen.

Uit proefnemingen blijkt, dat de moleculen in een stof niet onmiddellijk tegen elkaar aan liggen, doch dat er tussen de moleculen intermoleculaire ruimten zijn. Deze ruimten zijn er onder andere de oorzaak van dat alle stoffen min of meer samendrukbaar zijn.

Gassen zijn meer samendrukbaar dan vloeistoffen en vaste stoffen; de moleculen zullen bij gassen verder uiteen liggen dan bij vloeistoffen en vaste stoffen.

Als men een gaskraan openzet. Ruikt men het gas al spoedig in alle hoeken van de kamer. Het gas verspreidt zich en vermengt zich met de lucht, anders gezegd, het gas diffundeert in de lucht.

Vindt diffusie plaats door een poreuze wand, dan spreekt men van osmose.

Oplossen, diffusie en osmose wijzen erop, dat de moleculen voortdurend in beweging zijn. Hieruit kan men verklaren, dat een gas in een afgesloten ruimte spanning uitoefent. Omdat de gas-moleculen bewegen, botsen zij voortdurend tegen de wanden van het vat, die daardoor als het ware worden weggeduwd.

Hoe groter het aantal moleculen is, hoe groter het aantal botsingen en dus hoe groter de druk, des te sneller te sneller de beweging van de moleculen is, des te heftiger zal elke botsing met de wand zijn.

De diffusie- en osmoseproeven verlopen bij hoge temperatuur sneller dan bij lage, waaruit blijkt, dat de moleculen bij hoge temperatuur sneller bewegen dan bij lage temperatuur.

De moleculen botsen echter niet alleen tegen de wanden, doch ook tegen elkaar. Door het zeer grote aantal botsingen, dat elk molecuul per seconde ondergaat, wordt zijn snelheid telkens anders.

Het is daarom niet mogelijk om te spreken van de snelheid van de moleculen, wel is het mogelijk om te spreken over een gemiddelde snelheid van de moleculen.

Uit diffusieproeven blijkt: bij lage temperatuur is de gemiddelde snelheid der moleculen kleiner dan bij hoge temperatuur.

De kleinst mogelijke snelheid der moleculen is die, waarbij de moleculen stilstaan. Daar de snelheid der moleculen afhankelijk is van de temperatuur geldt:

De laagste temperatuur, die een lichaam kan aannemen is die temperatuur, waarbij de snelheid der moleculen gelijk aan nul is geworden.

Deze temperatuur noemt men het absolute nulpunt. Er zijn diverse redenen om aan te nemen dat het absolute nulpunt voor alle stoffen gelijk is en wel: = 273°C.

De natuurkundige Kelvin stelde voor dit absolute nulpunt als het begin van de temperatuur-schaal aan te nemen. De afstand tussen de deelstrepen van zijn schaalverdeling nam hij even groot aan, als die bij Celsius. Hierdoor verkreeg hij een temperatuurschaal, waarbij 0°C overeenkomt met 273° Kelvin (273°K).

De temperatuur in graden Celsius kan men tot de schaal van Kelvin herleiden door er 273° bij op te tellen.

13,2. Cohesie en adhesie

Het kost moeite een stuk hout te breken, een papier te scheuren enz., met andere woorden, men moet een kracht uitoefenen om de samenhang der moleculen te verbreken.

Men neemt aan, dat de moleculen een aantrekkende kracht op elkaar uitoefenen.
De aantrekkende kracht, die moleculen van eenzelfde stof op elkaar uitoefenen, noemt men cohesie.
De aantrekkende kracht tussen de moleculen van verschillende stoffen heet adhesie.

Dat een waterdruppel aan de kraan blijft hangen is een gevolg van de cohesie tussen de watermoleculen. Het gewicht van de druppel is dan nog niet zo groot dat de druppel er af valt.

Een niet te wijd glas giet men gedeeltelijk vol met kwik. Het kwikoppervlak staat bol.
Het oppervlak van een vloeistof in een buis noemt men de meniscus. Kwik heeft dus een bolle meniscus.

Giet men echter water in het glas, dan staat het wateroppervlak hol, water heeft dus een holle meniscus.

De vorm van de meniscus is een gevolg adhesie en cohesie. Bij water wordt door het overheersen van de adhesiekrachten het water langs de wanden van het glas omhoog getrokken, waardoor een holle meniscus ontstaat. Bij kwik echter is de cohesie tussen de kwikmoleculen groter dan de adhesie tussen glas en kwik. (Hierdoor blijven de kwikmoleculen zo mooi als een druppel bij elkaar.) Het kwik trekt zich van de glaswand terug en er ontstaat een bolle meniscus.

In communicerende vaten van verschillende wijdte staat het water in de nauwste buis het hoogst. Zijn de vaten met kwik gevuld, dan staat het kwik in de nauwste buis het laagst.

In zeer nauwe buizen, zogenaamde capillaire buizen kan het water zelfs enige centimeters hoger staan dan is een vrije buis, als gevolg van de grote adhesie tussen glas en water.

De poriën in krijt, vloeipapier etc. zijn capillaire buisjes, waardoor water, inkt enz. sterk wordt opgezogen (kwik echter niet).

Een molecuul is in het algemeen de kleinste hoeveelheid, die van een bepaalde stof bestaat.
Het kleinste waterdruppeltje bestaat uit meer dan een triljoen moleculen. Vullen we een glas voor de helft met water en gieten we hier voorzichtig alcohol op, die rood gekleurd is, dan blijft de alcohol boven het water staan en zien we duidelijk een scheidingsvlak tussen beide vloeistoffen.

Laten we het glas echter enige dagen staan, dan neemt de scherpte van het scheidingsvlak voortdurend af. Het water diffundeert in de alcohol en omgekeerd de alcohol in het water.
Moleculen van de ene stof komen dan op de plaats van de moleculen van de andere stof. Ook uit deze proef blijkt dus, dat de moleculen steeds in beweging zijn.

Samenvatting: Capillaire opstijging, holle meniscus en bevochtiging van de wand gaan altijd samen.
Zij zijn alle drie het gevolg van de wisselwerking tussen grote adhesie en kleine cohesie.
Capillaire neerdrukking bolle meniscus en het niet bevochtigen van de wand gaan eveneens altijd samen. Zij zijn het gevolg van de wisselwerking tussen kleine adhesie en grote cohesie.

Oplossingen inzenden van de opgaven 121 t/m 127.

R.T.

Natuurkunde. Les 14 Nadruk verboden 27

14,1. Oppervlaktespanning

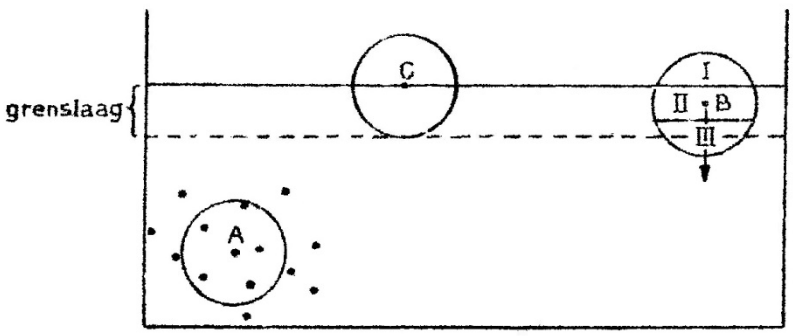


Fig. 14,1.

De aantrekkende kracht van een molecuul is slechts over een zeer kleine afstand werkzaam. Men kan zich om het molecuul een bol denken, waarbuiten de krachten van het molecuul niet meer merkbaar zijn. Binnen deze bol, de zogenaamde attractiesfeer van het molecuul, ondervindt een ander molecuul een aantrekkende kracht; er buiten niet.

Het molecuul A (zie fig. 14,1) zal alleen aantrekking ondervinden van die moleculen, die zich binnen de attractiesfeer van A bevinden. Deze moleculen zijn gelijkelijk over de ruimte rondom A verdeeld. Het molecuul A ondervindt daardoor van alle kanten een even grote aantrekkende kracht, zodat deze krachten elkaars werking opheffen, waardoor de resulterende kracht op A werkend, gelijk aan nul is.

Een molecuul C, dat zich precies aan de oppervlakte van de vloeistof bevindt, ondervindt alleen aantrekkende krachten van moleculen, die er beneden liggen. Het resultaat hiervan is, dat het molecuul C naar het binnenste van de vloeistof wordt getrokken.

Een molecuul B, gelegen in de grenslaag, dit is een laag aan de oppervlakte van de vloeistof met een dikte die gelijk is aan de straal van de attractiesfeer, heeft een attractiesfeer, die uit 3 delen bestaat.

In deel I bevinden zich geen moleculen van de vloeistof, zodat alleen de moleculen in de delen II en III een aantrekkende werking op B uitoefenen.

De moleculen in het deel II liggen symmetrisch te opzichte van B, zodat de krachten van deze moleculen elkaars werking opheffen.

De moleculen in deel III liggen niet symmetrisch om B verdeeld, zij oefenen een kracht uit, die hoofdzakelijk naar beneden is gericht.

Het resultaat hiervan is, dat het molecuul B een kracht ondervindt, die naar het binnenste van de vloeistof is gericht.

Op alle moleculen in de grenslaag werkt dus een kracht, die naar het binnenste van de vloeistof is gericht. het gevolg hiervan is, dat zo weinig mogelijk moleculen in de grenslaag blijven, m.a.w. het volume van de grenslaag wordt zo klein mogelijk.
De spanning in de grenslaag heet de oppervlaktespanning.

Ten gevolge van de oppervlaktespanning heeft een vloeistof in een vat een eigen volume.
Een molecuul, dat in de grenslaag komt en uit de vloeistof zou willen treden, wordt door de cohesiekrachten naar het binnenste van de vloeistof teruggetrokken en kan dus niet uittreden.
Hierdoor zorgt de oppervlaktespanning ervoor dat de vloeistof bijeen blijft en een eigen volume heeft.
Bij een gas is de gemiddelde afstand tussen de moleculen veel groter dan bij een vloeistof .
Daarom is er bij een gas van de cohesie tussen de moleculen vrijwel niets merkbaar.
Door het gemis aan voldoende cohesie komt er bij gassen geen grenslaag voor, vandaar dat een gas geen eigen volume heeft.

R.T.

14,2. Vloeistof en damp

In 14,1 hebben we gezien dat een molecuul niet uit een vloeistof treedt. Alleen als een molecuul een zeer groet snelheid heeft, is het wel eens mogelijk dat zo'n molecuul de oppervlaktespanning doorbreekt en uittreedt. Een molecuul kan zo de benodigde snelheid toevallig krijgen door een serie botsingen, die in dezelfde richting werken. Het molecuul komt dan in de ruimte boven de vloeistof. De ruimte is echter gevuld met dampmoleculen, waarmee eveneens botsingen plaatsvinden.

Door deze botsingen is het mogelijk dat de moleculen weer naar de vloeistof worden gestoten. In het begin vliegen er meer moleculen uit de vloeistof dan er in terug keren.

Naarmate er meer moleculen in de ruimte boven de vloeistof komen, wordt echter het terugkerende aantal groter, totdat er een toestand ontstaat, waarbij per seconde evenveel moleculen van de vloeistof naar de dampruimte gaan als omgekeerd van de dampruimte naar de vloeistof.

De dampruimte is dan met damp verzadigd. De druk, die de moleculen in de dampruimte uitoefenen, heeft dan zijn maximum bereikt. Deze druk noemt men de verzadigingsdruk.

Als de vloeistof zich in een open vat bevindt, zal er nooit een evenwichtstoestand optreden. De uit de vloeistof tredende moleculen verspreiden zich gedeeltelijk in de gehele atmosfeer, hierdoor neemt het aantal moleculen in de vloeistof voortdurend af, tenslotte is de vloeistof geheel verdampt.

Aan de hand van het behandelde, komt men nu tot de volgende conclusies:

1. Verdamping wordt bevorderd door de damp boven de vloeistof weg te nemen (wasgoed droogt dus snel, als het in de wind hangt).
2, Verdamping wordt bevorderd door een groot vloeistofoppervlak (bij een groter oppervlak krijgt een groter aantal moleculen de kans om uit de grenslaag te treden).
3. De verdamping wordt bevorderd door verhoging van de temperatuur. Immers bij hoge temperatuur is de gemiddelde snelheid van de moleculen groter, waardoor een groter aantal moleculen voldoende snelheid krijgt om uit te treden.

14,3. Experimentele en theoretische natuurkunde

De experimentele natuurkunde is er op gericht om de kennis van feiten en verschijnselen te vergroten.

De theoretische natuurkunde houdt zich bezig met het "waarom".

De theoretische natuurkunde begint meestal met het opstellen van enkele hypothesen, dit zijn veronderstellingen, die op grond van de kennis die de experimentele natuurkunde ons heeft verschaft, waarschijnlijk lijken.

Uit deze grondstellingen of hypothesen leidt de theoretische natuurkunde door redenering en berekening gevolgtrekkingen af ten aanzien van de verschijnselen en de eigenschappen, die zich kunnen voordoen.

Indien de gevolgtrekkingen in overeenstemming zijn met de waargenomen verschijnselen en eigenschappen, zeggen we dat de theorie juist is. Indien de uit de hypothesen getrokken conclusies en redeneringen niet in overeenstemming zijn met de waargenomen feiten, is de theoretische natuurkunde genoodzaakt haar hypothesen te herzien. Zij moet dan andere hypothesen opbouwen, die een betere overeenstemming met de waargenomen feiten weergeven.

Uit een en ander volgt, dat de experimentele natuurkunde en de theoretische natuurkunde nauw met elkaar verbonden zijn en ten zeerste samenwerken.

Oplossingen inzenden van de opgaven 128 t/m 130.

15,1. Atomen

Het is mogelijk moleculen te splitsen; er ontstaan dan echter deeltjes die niet meer dezelfde eigenschappen hebben als de oorspronkelijke stof. Deze deeltjes heten atomen.

Indien men een watermolecuul splitst, valt dit uiteen waterstof- en zuurstofatomen. Water is dus samengesteld uit waterstof en zuurstof, ook wel de elementen genaamd, waaruit water is opgebouwd.

Er zijn een kleine honderd elementen bekend, uit deze elementen zijn alle stoffen opgebouwd.

Tabel van de belangrijkste elementen

Aluminium	Jodium	Fosfor
Argon	Kalium	Platina
Barium	Kiezel*[4]	Radium
Bismuth	Koolstof	Stikstof
Broom	Koper	Tin
Calcium	kwik	Uranium
Chloor	Lood	Waterstof
Chroom	Magnesium	Wolfraam
Kobalt	Natrium	IJzer
Goud	Neon	Zilver
Helium	Nikkel	Zuurstof

Elk watermolecuul bestaat uit drie atomen, nl. twee waterstofatomen en een zuurstofatoom; zwavelzuur is opgebouwd uit twee waterstofatomen, een zwavelatoom en vier zuurstofatomen; keukenzout uit 1 atoom natrium en 1 atoom chloor.

Door het grote aantal mogelijkheden, waarop de atomen van verschillende elementen zich tot moleculen kunnen verenigen, is er een enorme verscheidenheid van stoffen.

Het groeperen van de atomen tot verschillende soorten stof behoort tot de scheikunde.

Proeven hebben aangetoond dat een atoom ook weer uit verschillende deeltjes is samengesteld. Ieder atoom bestaat namelijk uit een kern en een aantal deeltjes, dat men elektronen noemt. Alle elektronen zijn aan elkaar gelijk, het is een gemeenschappelijk bouwsteen van alle atomen.

De elektronen hebben een negatieve elektrische lading, zij zijn de dragers van de elektriciteit. Een elektrische stroom is een verplaatsing van elektronen. De lading van een elektron is de kleinste hoeveelheid elektriciteit die men kent. Zij is $1{,}60.\,10^{-19}$ Coulomb. De massa van een elektron is eveneens zeer klein en wel ongeveer 9.10^{-31} kg.

De massa van een waterstofatoom is 1837 maal zo groot. Bij een elektron, een atoom en een molecuul spreekt men altijd over de massa en nooit over het gewicht. (Zulke kleine deeltjes kunnen niet gewogen worden.)

15,2. Structuur van het atoom

Ieder atoom bestaat uit een kern en een of meer elektronen. De elektronen bewegen zich om de kern heen, het atoom is voor het grootste deel een “lege ruimte”. Het waterstofatoom is het eenvoudigste atoom, het bestaat uit een kern en een elektron.

Daar de totale lading van een atoom neutraal is en daar de elektronen negatief geladen zijn, moet de atoomkern een positieve lading bezitten. Door de tegengestelde lading van de kern en het elektron trekken deze elkaar aan, waardoor het elektron zijn baan om de kern niet makkelijk kan verlaten.

*[4] Silicium of kiezel is een scheikundig element met symbool Si en atoomnummer 14. Het is een donkergrijs metalloïde. (bron Wikipedia)FV

De elektronen van een atoom beschrijven verschillende banen, sommige cirkelvormig, andere elliptisch. Het ene elektron loopt in een baan dichter om de kern dan een ander. Speciaal bij metalen komt het voor dat een of twee elektronen een veel grotere baan doorlopen dan de overige.

Daar een atoom elektrisch neutraal is, zal de positieve lading van de kern even groot zijn als de som der ladingen van de elektronen, die bij het atoom behoren.

De kern van een atoom is samengesteld uit protonen en neutronen. Beide deeltjes hebben ongeveer even grote massa, de protonen zijn positief geladen, de neutronen zijn ongeladen zoals uit de naam reeds blijkt.

Bij metalen beschrijven enkele elektronen een veel grotere baan om de kern dan de overige. Zo'n elektron komt dan wel eens dicht bij de kern van een ander atoom, waardoor dit atoom het elektron sterker aantrekt dan het atoom waartoe het oorspronkelijk behoorde. Het elektron gaat dan een baan om het tweede atoom beschrijven. Doch ook hier blijft het niet, want als het te dicht in de buurt van een volgend atoom komt, gaat het hier naar over enz.

Een dergelijk elektron behoort dan niet meer tot een bepaald atoom; zo'n elektron wordt dan een vrij elektron genoemd.

Deze vrije elektronen bewegen zich in alle richtingen.

Indien er tussen de uiteinden van een stuk metaal een spanningsverschil bestaat, worden de vrije elektronen in een bepaalde richting gedwongen. Niet alle vrije elektronen zullen zich in dezelfde richting gaan bewegen door botsingen met andere elektronen en atoomkernen. Er gaat dus nu een elektronenstroom lopen, dus een verplaatsing van negatieve elektriciteit.

15,1. Geleiders en isolatoren

Stoffen, waarin vrije elektronen voorkomen, heten geleiders. Bij isolatoren zijn alle elektronen zo sterk aan de atoomkernen gebonden, dat er zich geen elektronen kunnen gaan bewegen, waardoor geen elektrische stroom mogelijk is.

Voor het bewegen van een elektron in een geleider zijn de atoomresten een belemmering, waardoor de atoomresten een zekere weerstand vormen. In de ene stof is deze weerstand groter dan in de andere, vandaar dat men spreekt over de weerstand van een stof of wel over de soortelijke weerstand.

Plaatsen we in een bakje met gedestilleerd water twee koolstaafjes en verbinden we de koolstaafjes met de polen van een accu, dan blijkt er geen stroom door de keten te lopen, we kunnen dit constateren als we bv. een lampje in de leiding opnemen. Het lampje geeft dan geen licht. Hieruit blijkt dus dat gedestilleerd water een isolator is. Doen we echter een beetje keukenzout of wat zwavelzuur in het water, dan geeft het lampje wel licht, m.a.w. er loopt nu wel een elektrische stroom. Een paar druppels zuur of een beetje keukenzout maken het water dus geleidend. Een keukenzoutkristal is opgebouwd uit regelmatig gerangschikte natriumatomen (die positief geladen zijn) en chlooratomen (die negatief geladen zijn). Positief en negatief geladen atomen noemen we ionen.

Een positief ion is een atoom die een of meerdere elektronen mist en een negatief ion is een atoom dat een of meerdere elektronen teveel heeft.

Deze ionen van het keukenzout gaan zich nu naar de koolstaafjes bewegen die aan de polen van de accu verbonden zijn. In de vloeistof ontstaat een ionenstroom, in de verbindingsdraden een elektronenstroom. De negatieve ionen geven hun teveel aan elektronen af aan de koolstaaf die met de positieve pool van de accu verbonden is, de positieve ionen nemen elektronen op van de koolstaaf die met de negatieve pool van de accu is verbonden.

Oplossingen inzenden van de opgaven 131 t/m 135.

16,1. Contactelektriciteit

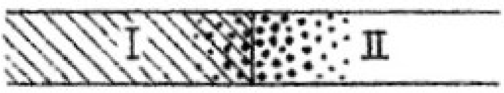


Fig. 16,1. Contactelektriciteit

Fig. 16,1 stelt een contactplaats tussen twee verschillende metalen voor. Beide metalen bevatten vrije elektronen.
De elektronen ondervinden bij het bewegen door de stof steeds invloed van de atoomresten.

De grootte van de beïnvloeding van de atoomresten is in beide metalen verschillend, in het ene metaal ondervinden zij minder weerstand dan in het andere.

Aan de grens van de twee metalen geschiedt het volgende: Indien de elektronen in metaal I meer bewegingsvrijheid hebben dan in metaal II, dan gaan er meer elektronen van I naar II, dan in omgekeerde richting. Er ontstaat dan een teveel aan elektronen aan de kant van staaf II en een tekort aan de kant van staaf I. Dat wil zeggen dat staaf II negatief is ten opzichte van staaf I, zodat er een spanningsverschil tussen de staven ontstaat.

Door dit spanningsverschil worden echter weer elektronen vanuit II naar I getrokken, met als resultaat een evenwichtstoestand, waarbij er per seconde evenveel elektronen van staaf I naar II gaan als in omgekeerde richting.

Aan het grensvlak van twee verschillende stoffen treedt een dergelijk spanningsverschil altijd op ook al zijn die stoffen geen metalen.

Als men twee metalen zo tegen elkaar plaatst, dat zij een gesloten keten vormen, ontstaat er op de contactplaatsen tussen de metalen we Contactelektriciteit, doch dit heeft niet tot gevolg dat er een elektrische stroom door de keten gaat (zie fig. 16,2).

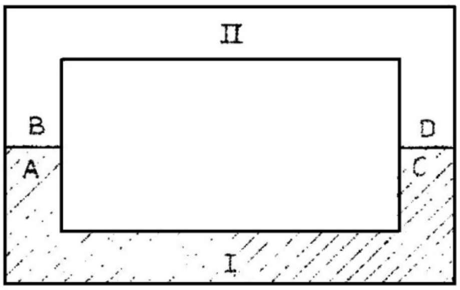


Fig. 16,2. Twee metalen die een gesloten keten vormen.

Op de twee contactplaatsen zijn de spanningsverschillen even groot, dus:
$U_A - U_B = U_C - U_D$, dus:
$U_A = U_C$ en $U_B = U_D$.

Ook in een keten, die uit meer metalen bestaat, ontstaat er uit de spanningsverschillen op de contactplaatsen geen elektrische stroom.

16,2. Thermostroom

Indien in een gesloten keten bestaande uit twee verschillende metalen een contactplaats wordt verwarmd, gaat er een stroom door de keten lopen. In welke richting de stroom loopt, hangt af van het metaal dat gebruikt wordt en welke contactplaats verwarmd wordt.

De elektrische stroom, die door het verschil in temperatuur op de contactplaatsen wordt opgewekt, heet <u>thermostroom</u>.

Een keten van twee verschillende metalen geleiders werkt bij een verschil in temperatuur op de contactplaatsen als <u>thermo-element</u>. het opgewekte spanningsverschil is slechts klein, zodat de thermo-elementen dan ook niet gebruikt worden voor het opwekken van elektrische stroom, doch wel bv. voor het meten van temperatuurverschillen.

Een groot aantal thermo-elementen in serie geplaatst heet een <u>thermozuil</u>.

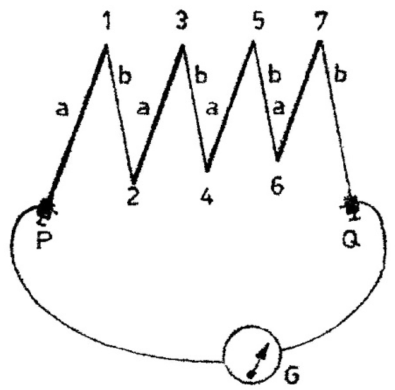


Fig. 16,3. Thermozuil.

In fig. 16,3 zijn vier thermo-elementen, bestaande uit de twee verschillende metalen a en b achter elkaar geschakeld. G is een galvanometer, een zeer gevoelige stroommeter. De oneven contactplaatsen van de thermozuil worden verwarmd, de even contactplaatsen niet. Er ontstaat op die manier een spanningsverschil, dat vier maal zo groot is als van een enkel thermo-element.

Contactelektriciteit kan men zelf heel eenvoudig aantonen als volgt:
Wanneer men een vulpen langs de kleren wrijft en men houdt de vulpen daarna boven enige papiersnippers, dan ziet men, dat de papiersnippers naar de pen toespringen. Hetzelfde kan men met een kam verkrijgen nadat men deze een paar maal door het haar heeft gehaald.

Indien men een dun straaltje water uit de kraan laat lopen en men houdt daar een gewreven kam bij, dan ziet men dat het water naar de kam toe getrokken wordt.

16,3. Ionen

Indien van een atoom een of meer elektronen worden verwijderd, dan krijgt de atoomrest een positieve lading. Worden er aan een atoom enige elektronen toegevoegd, dan wordt de lading negatief.
Een atoom, dat één of meerdere elektronen te veel of te weinig heeft, heet een ion.
Is de lading van een ion negatief, dus heeft het atoom een teveel aan elektronen, dan noemt men het een negatief ion. Is de lading positief, dus ontbreken er een of meer elektronen, dan noemt men het een positief ion.

Elektriciteitsgeleiding vindt ook in gassen plaats door middel van ionen evenals in vloeistoffen, zoals we reeds gezien hebben. Het vormen van ionen in een gas heet het ioniseren van gassen.
Voor het ioniseren is een oorzaak nodig. Röntgenstralen bv. kunnen de lucht ioniseren, dus geleidend maken. Voor de elektriciteitsgeleiding in gassen geldt echter de wet van Ohm niet meer. Uit metingen blijkt, dat bij groter wordende spanning de stroomsterkte eerst toeneemt, doch daarna constant blijft, ondanks het groter worden van de spanning. Dit komt doordat van de gevormde ionen bij een klein spanningsverschil tussen twee platen bv. slechts een klein deel der ionen de plaat met tegengestelde lading bereikt.
Indien de spanning groter wordt, wordt het aantal ionen dat aan het transport deelneemt groter, totdat alle gevormde ionen meedoen. Een vergroten van de spanning tussen de platen heeft geen verdere toename van de ionen ten gevolge, daar er geen ionen meer zijn, die aan het transport kunnen deelnemen. De ionenstroom heeft zijn verzadiging bereikt. Willen we dat de ionenstroom toch groter wordt, dan zullen we meer ionen moeten vormen, m.a.w. de ionisatie moet groter zijn.

Oplossingen inzenden van de opgaven 136 t/m 142.

Geluid

17.1. Ontstaan en voortplanting van het geluid

Het ontstaan van het geluid kan verschillende oorzaken hebben. Zo'n oorzaak, die het geluid opwekt, noemen we een geluidsbron. Voorbeelden van geluidsbronnen zijn: een geweer dat wordt afgeschoten; een snaar die in trilling wordt gebracht enz. Om nu het geluid dat door een geluidsbron wordt voortgebracht te kunnen horen, is het noodzakelijk dat er zich tussen het oor en de geluidsbron een tussenstof bevindt. Deze tussenstof wordt medium of middenstof genoemd.

Indien een geluid in het luchtledige wordt opgewekt, zullen wij dit niet horen, daar er geen medium aanwezig is tussen ons oor en de geluidsbron.

Het geluid kan worden voortgeplant door vaste lichamen, vloeistoffen en gassen. Het ene lichaam geleidt het geluid echter beter dan het andere. Vaste lichamen en vloeistoffen geleiden het geluid beter dan gassen. Onveerkrachtige stoffen, zoals lood en zand geleiden het geluid slecht.
De voortplanting van het geluid in lucht vindt als volgt plaats:

Bij het ontstaan van geluid wordt de lucht op de plaats van de geluidsbron samengedrukt.
Deze samengedrukte luchtlagen drukken de aangrenzende luchtlagen samen enz. totdat ook de luchtlagen, die zich bij het oor bevinden, samengedrukt worden.
Deze grotere luchtdruk bij het oor wordt op het trommelvlies overgebracht. Is een geluidsbron in voortdurende trilling, dan zullen er afwisselend luchtverdichtingen en verdunningen optreden.
Bij de verdunning van de lucht, gaan de luchtlagen als het ware verder uit elkaar.
Deze luchtverdunningen delen zich eveneens aan aangrenzende luchtlagen mede, totdat zij uiteindelijk weer het trommelvlies bereiken. Zo ontvangt het oor dus de geluidstrillingen.

Uit het voorgaande betoog mogen we de conclusie trekken, dat het geluid enige tijd nodig heeft om de afstand tussen geluidsbron en het oor af te leggen. Dit blijkt nog duidelijker uit het volgende:

Bij een explosie zien we de rookkolom of lichtflits, terwijl we eerst na enige tijd de knal horen.
De afstand, die het geluid per seconde aflegt, heet de snelheid van het geluid.

Door proefnemingen is bepaald, dat de snelheid van het geluid in lucht van 0°C, 332 meter/per seconde bedraagt (332 meter per seconde schrijven we als $332 m/sec$). Bij hogere temperaturen is de geluidssnelheid groter: bij 15°C bedraagt de geluidssnelheid 340 m/sec.

Daar alle tonen zich met dezelfde snelheid voortplanten, kunnen we spreken over de voortplantingssnelheid van het geluid. Zoals we reeds gezien hebben, geleiden de vaste lichamen en vloeistoffen het geluid beter dan gassen. De voortplantingssnelheid in vaste stoffen en vloeistoffen is dan ook groter dan in gassen. Verder blijkt, dat de snelheid van het geluid in een gas onafhankelijk is van de druk van het gas, m.a.w. drukverhoging of drukverlaging van het gas heeft geen invloed op de voortplantingssnelheid.

Als geluidstrillingen, die door een geluidsbron worden uitgezonden, teruggekaatst worden, bv. door een wand, is het mogelijk dat de zogenaamde echo ontstaat. Het geluid wordt dus door een bepaald voorwerp teruggekaatst en keert weer terug naar de plaats van de geluidsbron.

Bevinden we ons in een kleine ruimte, bv. in de kamer of in een leslokaal, dan is er praktisch geen tijdsverschil tussen het oorspronkelijk opgewekte geluid en het teruggekaatste geluid.
Het teruggekaatste geluid zal het oorspronkelijke geluid als het ware versterken.

In grote zalen en in kerken zal er echter een merkbaar tijdsverschil optreden tussen de heengaande geluidsgolf en de teruggekaatste geluidsgolf.
Hierdoor ontstaat dus het verschijnsel dat wij echo noemen,

Indien iemand staat te praten, zullen de teruggekaatste geluidsgolven van de eerst gesproken woorden zich gaan vermengen met de geluidsgolven van de daarna gesproken woorden.
Dit is het zogenaamde nagalmen. Om dit zeer hinderlijke verschijnsel of in ieder geval te verminderen, worden de wanden en het plafond van de zaal met geluiddempende materialen bekleed en de vloeren van dikke tapijten voorzien.

Deze bekledingen absorberen (opnemen) een groot deel van het geluid, zodat het nagalmen sterk vermindert. In studiozalen mag het nagalmen natuurlijk nooit optreden, daar dan geluidsgolven van eerder uitgesproken woorden of van muziek teruggekaatst worden naar de microfoon en zich mengen met andere geluidsgolven van later uitgesproken woorden.
Deze gemengde geluidsgolven, die dan ontstaan, worden dan uiteraard versterkt uitgezonden.
Bij studiozalen voor omroepdoeleinden worden dan ook hoge eisen gesteld aan het geluid of zoals men liever zegt, aan de akoestiek.

De terugkaatsing van geluidsgolven is vastgelegd in twee wetten:
de zogenaamde wetten van terugkaatsing van Christiaan Huygens. Deze luiden (uit het hoofdleren):

1e De aankomende geluidstrilling en de teruggekaatste geluidstrilling liggen met de normaal in het punt, waar de trilling teruggekaatst wordt in een plat vlak. (onder de normaal in een punt van een vlak verstaan we de denkbeeldige lijn, die we in dit punt loodrecht op het vlak kunnen tekenen.)

2e De hoek van inval (dit is de hoek, gevormd door de normaal en de invallende trilling) is gelijk aan de hoek van terugkaatsing (dit is de hoek, gevormd door de normaal en de teruggekaatste trilling).

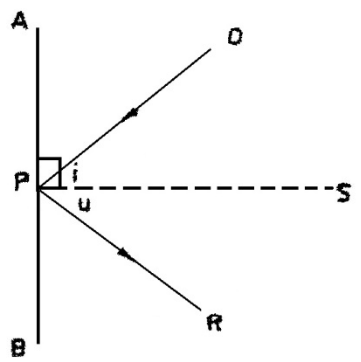


Fig. 7,1.

In fig. 17,1 is AB de wand waardoor de geluidstrilling wordt teruggekaatst en P het punt, waar de opvallende trilling OP (hier voorgesteld als een rechte lijn, zoals we bv. met een lichtstraal doen) de wand treft.
PR is de teruggekaatste trilling en PS is de normaal, die dus loodrecht in P op de wand AB staat.

De hoek i is de hoek van inval en de hoek u is de hoek van terugkaatsing.

De wetten van terugkaatsing zijn precies hetzelfde als die voor licht, zoals we later zullen zien.

Oplossingen inzenden van de opgaven 143 t-m 147.

18,1. Wetten van terugkaatsing (vervolg)

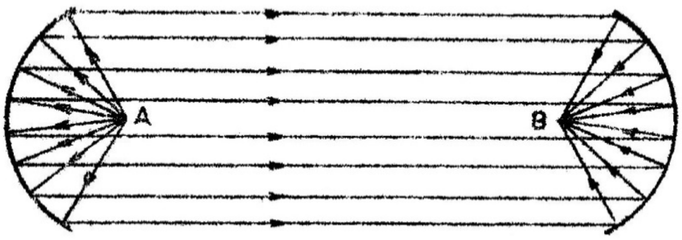


Fig. 18,1.

We kunnen de wetten van terugkaatsing van Huygens met het volgende proefje eenvoudig aantonen.

We plaatsen voor een hol oppervlak een klokje in het punt A (zie fig. 18,1). In het punt B horen we nu het klokje tikken. Halen we nu het rechter holle oppervlak weg, dan horen we in B niets meer.

De in A uitgezonden geluidsgolven worden door het linker oppervlak teruggekaatst in de richting van het rechter gebogen oppervlak. Deze geluidsgolven, die daar aankomen, worden door dit rechter oppervlak weer teruggekaatst, zodanig dat deze teruggekaatste geluidsgolven in B samenkomen. In B krijgen we dus weer een samenkomen van een groot deel der uitgezonden geluidstrillingen. Is het rechter oppervlak echter niet aanwezig, dan zullen alleen de rechtstreeks uitgezonden geluidstrillingen in B komen en zullen we niets horen. Van dit principe wordt o.a. gebruik gemaakt bij vliegvelden voor het binnenloodsen van vliegtuigen ’s-nachts of bij zware mist.

Een hol oppervlak wordt draaibaar opgesteld, terwijl in het brandpunt van dit oppervlak een microfoon wordt geplaatst (het brandpunt is het punt waar de door een gebogen oppervlak teruggekaatste trillingen samenkomen). Het gebogen oppervlak wordt nu gedraaid totdat we een maximum aan geluid ontvangen van het binnenkomende vliegtuig. Hierdoor is de richting van het vliegtuig te bepalen. (Uiteraard is deze methode voor het grootste deel vervangen in de tegenwoordige tijd door radar.)

Bij het bouwen van grote gehoorzalen begint men tegenwoordig eveneens meer en meer rekening te houden met de wetten van de terugkaatsing. De terugkaatsing van het geluid wordt dan echter ten nutte gemaakt. Door bv. het podium niet te groot te maken en de achterwand van dit podium gebogen te maken, zal het geluid dat op het toneel wordt opgewekt door de achterwand als het ware gericht naar de zaal worden gekaatst.

Door het podium klein te houden, zullen de teruggekaatste trillingen de oorspronkelijke trillingen versterken, zodat men minder geluid behoeft te produceren om de gehele zaal te bereiken.

Om te voorkomen dat de zijwanden nagalmen zullen veroorzaken, wordt de zaal trechtervormig gebouwd en wel van achter breder dan van voren.

Daar de achterwand van de zaal geen geluid mag terugkaatsen (door de grote afstand van het podium zal dan immers nagalm optreden) wordt deze gebogen en van geluiddempend materiaal voorzien. Het is nu voldoende om op het podium te spreken, alsof men in een normaal leslokaal staat in plaats van voor een zaal met enige honderden toehoorders. Een dergelijke zaal is o.a. gebouwd aan de Technische Universiteit te Delft.

Een ander bekend voorbeeld van de wetten van terugkaatsing is ook nog de St. Paulskerk te Londen, het zogenaamde fluistergewelf. In dit gewelf kan men op een grote afstand een gefluisterd gesprek duidelijk volgen.

18,2. Trillingen

Indien de snaar van een muziekinstrument wordt aangeslagen, dan zullen we een geluid horen als de snaar strak genoeg gespannen is. is de snaar niet strak gespannen, dan zullen we niets horen.

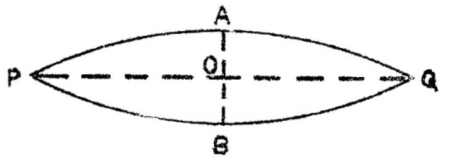


Fig. 18,2.

Hoe strakker de snaar gespannen is, des te hoger zal het geluid zijn. Een toon wordt dus voortgebracht door een trilling.

In fig. 18,2 hebben we een deel van een trillende snaar getekend in twee standen. Laten we aannemen dat dit de uiterste standen zijn die de aangeslagen snaar bereikt, dan trilt het punt van de snaar, aangegeven met A tussen de punten A en B heen en weer. We nemen even aan, dat de trilling onderhouden wordt, zodat de uitwijking niet afneemt, wat normaal natuurlijk wel het geval is. De tijd, die het punt A nodig heet om van A naar B en weer terug naar A te komen, noemen we de <u>periode</u> of <u>trillingstijd</u>.
Dit is dus de tijd, nodig om één trilling te volbrengen. De gestippelde lijn stelt de rusttoestand of evenwichtstoestand van de snaar voor. Alle deeltjes van de snaar gaan nu tegelijkertijd door de evenwichtstoestand heen. <u>Een lichaam heet in staande trilling, indien alle delen van dit lichaam gelijktijdig door de evenwichtstoestand gaan</u>.
Het aantal malen per seconde dat de snaar de weg van $A\ naar\ B$ en weer terug naar A aflegt, noemen we het aantal trillingen per seconde. Hoe groter nu het aantal trillingen per seconde zal zijn, des te hoger is de toon die wordt voortgebracht.

Het blijkt nu, dat een toon wordt voortgebracht, indien minstens 20 trillingen per seconde en hoogstens 20 000 trillingen per seconden worden volbracht. Een toon, die zeer kort duurt, horen we als een knal. De trillingstijd, dit is dus de tijd die nodig is om 1 trilling te volbrengen, wordt aangegeven door de hoofdletter T. T is uitgedrukt in seconden.

Het <u>aantal trillingen per seconde</u> of de <u>frequentie</u> wordt aangegeven met de letter f. Zoals we reeds geleerd hebben, geld dat $f = \frac{1}{T}$. Deze f, de frequentie, wordt uitgedrukt in hertz (Hz).

Trillingen, die een zo hoge frequentie bezitten, dat wij ze niet meer kunnen horen, heten <u>ultrasone</u> trillingen, toegepast in diverse takken van de techniek.

Worden twee verschillende snaren tegelijkertijd in trilling gebracht, zodanig dat beide snaren steeds tegelijkertijd door hun evenwichtstoestand gaan, dan zeggen we, dat de snaren <u>dezelfde fase</u> hebben of korter, de snaren zijn <u>in fase</u>. De maximale uitwijking, die de snaar krijgt, dus de lengten OA en OB in fig. 18,2 heet de <u>amplitude</u> van de trilling. Twee snaren die in fase zijn, behoeven niet dezelfde amplitude te hebben. Gaan twee snaren niet tegelijkertijd door hun evenwichtsstand, dan zeggen wij, dat ze uit fase zijn. Is de uitwijking van een der snaren juist aan de andere kant van de evenwichtsstand dan de andere snaar, doch zij gaan weer tegelijkertijd door de evenwichtsstand, dan zeggen we dat de trillingen in <u>tegenfase</u> zijn.

<u>Samenvatting:</u>

<u>Naarmate de toon hoger is, is zijn frequentie groter ofwel zijn trillingstijd kleiner</u>

<u>Bij een sterkere toon (dus harder geluid) is de amplitude van de trillende beweging groter</u>.

Het verschil in klank tussen twee tonen wordt dus bepaald door een verschil in trillingstijd.

Oplossingen inzenden van de opgaven 148 t/m 152.

Voortplanting van trillingen

19,1. De transversale golfbeweging

Wordt het ene einde van een koord in harmonische trilling gebracht, dan zien we, dat er in het koord golven ontstaan (zie fig. 19,1).

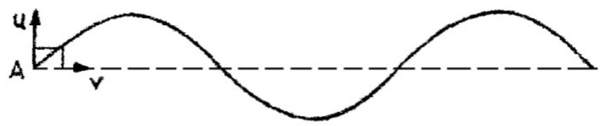


Fig. 19,1.

Onder een harmonische trilling verstaan we een trilling, die voortdurend en regelmatig onderhouden wordt, dus steeds met dezelfde amplitude en dezelfde snelheid. Elk deeltje van het koord krijgt een heen- en weergaande beweging. De beweging, die aan het begin van het koord wordt opgewekt, wordt overgereikt op ieder deeltje van het koord. Dit heet een voortgaande of lopende golfbeweging. Daar elk deeltje van het koord zich heen en weer beweegt in een richting die loodrecht staat op de voortplantingsrichting van de golf, spreken we van een transversaal lopende golfbeweging.

Definitie: Een transversaal lopende golfbeweging is een golfbeweging, waarbij de trillingen volvoerd worden in een richting die loodrecht staat op de voortpantingsrichting van de golf.

In fig. 19,1 hebben we de uitwijkrichting aangegeven met de letter u en de voortplantingsrichting van de golf met de letter v, dus geld $u \perp v$. Daar voor het overreiken van de trillingen de deeltjes met elkaar verbonden moeten zijn, volgt hieruit de volgende zeer belangrijke regel.

Transversaal lopende golfbewegingen kunnen alleen optreden in vaste lichamen.

De afstand, waarover de trilling in een trillingstijd wordt overgereikt, heet de golflengte aangegeven met de letter λ (spreek uit: labda), terwijl de voortplantingssnelheid v de afstand is, waarover de trilling overgereikt wordt in 1 seconde. Daar de trillende beweging in 1 seconde over een weg van $v\ cm$ overgereikt wordt, is de afgelegde weg in T seconden. Dus in 1 trillingstijd $v.T$, zodat:

$$\boxed{\lambda = v\ .\ T.}$$

(Wij maken er nogmaals op attent, dat de trillingstijd T het aantal seconden is, nodig om één volledige trilling uit te voeren.)

19,2. Terugkaatsing van transversaal lopende golven tegen een vast uiteinde

Een einde van het koord wordt vastgemaakt aan een wand. Met het andere einde voeren we weer een harmonische trilling uit, loodrecht op de richting van het koord. Langs het koord plant zich een transversaal lopende golfbeweging voort. Stel, dat we het koord slechts een halve trilling hebben gegeven. Dus vanuit de evenwichtsstand naar boven en weer naar beneden tot de evenwichtsstand. Deze beweging wordt nu aan ieder deeltje van het koord overgebracht, zodat er als het ware een golfberg langs het koord gaat en in het vaste uiteinde B aankomt. Dit vaste uiteinde wil zich ook naar boven bewegen doch wordt vastgehouden door de bevestiging aan de wand. Deze wand oefent nu op het koord een tegengestelde kracht (reactiekracht) uit, dus naar beneden.

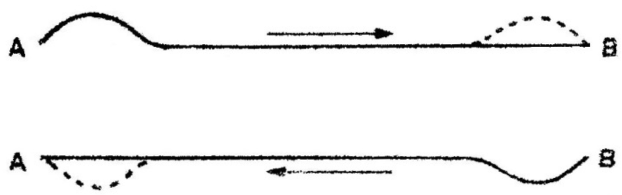


Fig. 19,2.

De stoot, die het koord in B van de wand naar beneden krijgt, doet langs het koord een transversaal lopende golfbeweging ontstaan van B naar A (zie fig. 19,2). Uit een en ander volgt, dat indien bij het overreiken van trillingen een transversaal lopende golfbeweging tegen een vast uiteinde komt, een transversaal lopende golfbeweging wordt teruggekaatst. De heen-

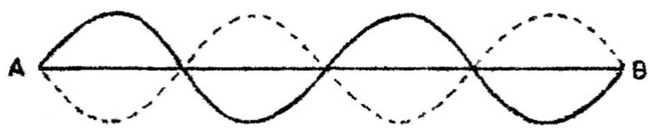


Fig. 19,3.

lopende golfbeweging en de teruggekaatste golfbeweging zullen op het einde B een tegengestelde werking doen gevoelen, er komt dus een golf aan, die het punt B naar boven wil en er gaat een golf terug, die het punt B naar beneden wil bewegen. De beide golfbewegingen verschillen ½ in fase. Conclusie:

Beschouwen we de teruggekaatste golfbeweging als een vervolg op de heengaande, dan is door de terugkaatsing tegen het vaste uiteinde de fase ½ versprongen. Indien we nu het punt A in harmonische trilling houden, dan zal van B ook steeds een golfbeweging teruggekaatst worden, die tegen de heengaande golfbeweging in zal lopen. Verschillende punten van het koord blijven dan op hun plaats, terwijl de andere een op- en neergaande beweging zullen krijgen (fig. 19,3).
De beweging, die nu ontstaat door gelijktijdig de heengaande en teruggaande lopende golfbeweging te beschouwen, heet de transversaal staande golfbeweging. Fig. 19,3 stelt dus een transversaal staande golfbeweging voor. Het verschijnsel, dat het samenstellen van meer golfbewegingen oplevert, heet interferentie. De deeltjes die in rust blijven, heten de knopen, de punten precies midden tussen twee knopen heten de buiken. Bij een buik heeft het koord dus de grootste uitwijking.

De afstand tussen twee opeenvolgende knopen is de halve golflengte, zodat we kunnen zeggen, dat de golflengte bij een transversaal staande golfbeweging de afstand is, gemeten vanaf een knoop tot de tweede daarop volgende.
De knopen bevinden zich op het vaste uiteinde en op $\frac{1}{2}, \frac{2}{2}, \frac{3}{2}, \frac{4}{2}, \frac{5}{2}$ enz. golflengten van het vaste uiteinde. De buiken op $\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{5}{4}, \frac{7}{4}$ enz. golflengten van het vaste uiteinde (zie fig. 19,3).

19.3. Terugkaatsing van transversaal lopende golven tegen een vrij uiteinde

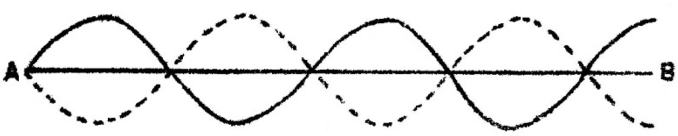


Fig. 19,4.

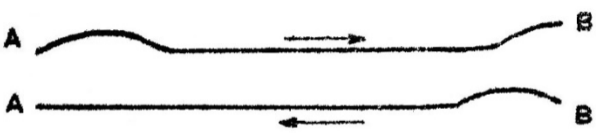


Fig. 19,5.

Het uiteinde van een koord AB laten we vrij bewegen, terwijl het punt A in harmonische trilling wordt gebracht (fig. 19,4). Wordt A naar boven bewogen, daarna naar beneden, dan plant zich een golfberg voort, die ook B naar boven zal bewegen. Rechts van B werken geen krachten meer op het koord, zodat B zo hoog mogelijk wordt opgeslingerd. Hierdoor zal het uiteinde op de links van B gelegen deeltjes een kracht uitoefenen, die eveneens naar boven is gericht. Het uiteinde wil als het ware het voorgaande deeltje optillen, waardoor de links van B gelegen deeltjes wederom een omhooggaande beweging krijgen. (zie fig. 19,5). Door interferentie van de heengaande en teruggaande transversaal lopende golfbeweging ontstaat de transversaal staande golfbeweging. Ten gevolge van de terugkaatsing tegen het vrije uiteinde is de fase niet versprongen. De knopen bevinden zich op een oneven aantal kwartgolflengten en de buiken op een even aantal kwartgolflengten van het vrije uiteinden.
Dus knopen op $\frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \frac{5}{4}\lambda$ enz. en buiken op $\frac{2}{4}\lambda, \frac{4}{4}\lambda, \frac{6}{4}\lambda$ enz.

Oplossingen inzenden van de opgaven 153 t/m 157.

20,1. De longitudinale golfbeweging

Bij de transversale trilling hebben we gezien dat de uitwijkingsrichting loodrecht staat op de voortplantingsrichting. Bij een longitudinale trilling vallen uitwijkingsrichting en de voortplantingsrichting in dezelfde richting.
Beschouwen we bv. een spiraalveer, die in de lengterichting uitgerekt wordt en daarna wordt losgelaten, dan zal er dus een longitudinale trilling ontstaan (zie fig. 20,1). Een transversale golfbeweging kan door de cohesiekrachten alleen voorkomen in vaste stoffen.

Longitudinale trillingen komen voor zowel in vaste stoffen als in vloeibare en gassen. We zien dus: een golfbeweging in vloeistoffen en gassen is altijd longitudinaal.

Een longitudinale golf in een vast lichaam zal dus ontstaan als het lichaam een volumeverandering ondergaat en hieraan weerstand zal bieden. Bij gassen zullen dus opeenvolgend verdichtingen en verdunningen ontstaan. Ook bij de longitudinale golfbeweging geldt weer:

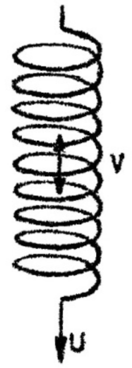


Fig. 20,1.

$$\boxed{\lambda = v\,.\,T.}$$

20,2. Terugkaatsing van longitudinaal lopende golven tegen een vast uiteinde

Wanneer bij het overreiken van de trillingen een longitudinaal lopende golfbeweging tegen een vaste wand komt, wordt een longitudinaal lopende golfbeweging teruggekaatst. Evenals bij de transversaal staande golfbeweging verspringt de fase met ½ . door interferentie van de heengaande en de teruggekaatste longitudinale golfbeweging ontstaat de longitudinaal staande golfbeweging.
De knopen bevinden zich op een even aantal kwart golflengten van het vaste uiteinde, de buiken op een oneven aantal kwart golflengten. Indien we in de kolom lucht in een glazen buis, die aan het ene einde afgesloten is, in trilling brengen, dan zullen de luchtdeeltjes bij het vaste uiteinde in rust verkeren, evenals de luchtdeeltjes gelegen op $\frac{2}{4}\lambda$, $\frac{4}{4}\lambda$, $\frac{6}{4}\lambda$ enz. van het vaste uiteinde. Dit zijn dus de knopen. De andere luchtdeeltjes in de buis zijn in heen- en weergaande beweging in de lengterichting van de buis. De deeltjes, die zich midden tussen twee knopen bevinden, verkeren het sterkst in trilling, zij krijgen dus de grootste uitwijking. Een en ander kunnen we aantonen met de buis van Kundt (zie fig. 20,2). In de buis is enig poeder gestrooid. Door nu met de zuiger de heen- en weergaande beweging uit te voeren, wordt de lucht in de buis in trilling gebracht. Door nu de zuiger regelmatig over een kleine afstand heen en weer te bewegen, ontstaat een longitudinaal staande golfbeweging door interferentie van de heengaande en de teruggekaatste longitudinaal lopende golfbeweging.

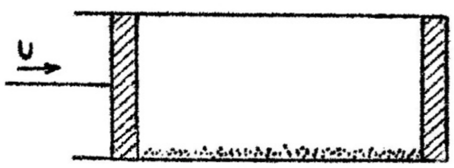


Fig. 20,2.

We zien, dat het poeder, dat regelmatig in de buis gestrooid was, zich in de buis gaat verplaatsen, totdat er op sommige plaatsen hoopjes van dit poeder zijn gevormd, waar dus blijkbaar de lucht niet in trilling verkeert, dit zijn dus de knopen.

De afstand tussen een knoop en de tweede daarop volgende, is weer de golflengte λ, terwijl de trillende deeltjes, die op een golflengte liggen, samen een staande golf vormen.

20,3. Terugkaatsing van longitudinaal lopende golven tegen een vrij uiteinde

Wanneer bij het overreiken van trillingen een longitudinaal lopende golfbeweging tegen een vrij uiteinde komt, wordt een longitudinaal lopende golfbeweging teruggekaatst. We kunnen ons dit het beste voorstellen met behulp van de spiraalveer van fig. 20,1. De spiraalveer zal nl. aan het einde van de trilling niet aan verdere materiaaldeeltjes over kunnen dragen, het gevolg hiervan is, dat de uitwijking van het laatste deeltje groter zal zijn dan die van de voorgaande deeltjes. De krachten die in het materiaal opgewekt worden door deze grotere uitwijking, veroorzaken dat de trilling weer teruggekaatst wordt.

Door interferentie van de heengaande en de teruggekaatste lopende longitudinale golfbeweging ontstaat de longitudinaal staande golfbeweging. Tussen de heengaande en de teruggekaatste golfbeweging ontstaat geen faseverschil. Het vrije uiteinde wordt een buik. Dus de knopen worden gevormd op een $\frac{1}{4}\lambda$, $\frac{3}{4}\lambda$, $\frac{5}{4}\lambda$ enz. van het vaste uiteinde. De buiken op $\frac{2}{4}\lambda$, $\frac{4}{4}\lambda$, $\frac{6}{4}\lambda$ enz. van het vaste uiteinde.

Indien een snaar van een muziekinstrument wordt aangeslagen, dan wordt de snaar in transversale staande trilling gebracht. De uiteinden waar de snaar is ingespannen, worden knopen.
De snaar brengt echter de lucht niet in trilling, dus er wordt geen toon waargenomen.

Daarvoor is er onder de snaar een klankkast, waarop de snaar over houten kammen is bevestigd. Deze kammen brengen de trillingen van de snaar op de klankkast over, die dan in trilling komt en in de lucht verdichtingen en verdunningen veroorzaakt, dus de lucht in longitudinale trilling brengt.

Indien de snaar zodanig trilt, dat er tussen de twee knopen bij de inspanpunten slechts één buik voorkomt, dan geeft de snaar zijn grondtoon. Wordt de snaar in het midden ingedrukt, op een kam, dan wordt de snaar in twee halve golven verdeeld. Op de plaats van indrukking ontstaat weer een knoop. Beide helften verkeren in trilling. Drukken we de snaar neer op $\frac{1}{3}$ van de lengte, dan ontstaat daar een knoop, doch eveneens op de afstand $\frac{1}{3}$ verder. Wordt de snaar op $\frac{1}{4}$ van de lengte ingedrukt, dan ontstaan knopen op $\frac{1}{4}$, $\frac{2}{4}$ en $\frac{3}{4}$ van de lengte. De tonen, die hierdoor ontstaan, heten de boventonen.

Een stemvork is een omgebogen stalen staaf. De beide uiteinden van de tanden worden in trilling gebracht (naar elkaar toe), waar dus buiken worden gevormd. Bij de gebogen stukken aan de onderkant ontstaan knopen, waardoor er op de plaats waar zich de steel bevindt, een buik gevormd wordt. Hoe dikker nu het deel tussen de twee knopen is, des te minder boventonen zich kunnen vormen. Door nu de steel op een voorwerp te drukken, zal dit voorwerp door de buik, die zich ter plaatse van de steel bevindt, in trilling worden gebracht en daardoor de lucht in trilling brengen.

Bij een trommel gebruiken we een vlies over een klankkast gespannen.
Door het slaan op het vlies wordt dit in trilling gebracht, waarna deze trilling van het vlies de luchttrilling veroorzaakt.

Oplossingen inzenden van de opgaven 158 t/m 262.

21,1. Orgelpijpen

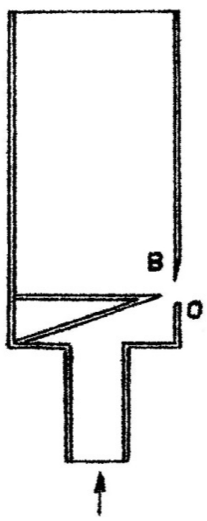


Fig. 21,1.

Een orgelpijp bestaat uit een metalen of houten buis die van boven open of gesloten is. Een orgelpijp die van boven gesloten is, heet een gesloten orgelpijp, is de orgelpijp van boven open, dan een open orgelpijp.

De lucht wordt onderaan naar binnen geblazen, passeert dan een nauwe spleet en komt tegen de bovenlip B. O is de onderlip, terwijl de opening tussen B en O de mond wordt genoemd.

De bovenlip komt nu in trilling. Door deze trillende beweging worden longitudinaal lopende golven in de orgelpijp uitgezonden, die tegen het gesloten of open uiteinde worden teruggekaatst, waardoor in de lucht van de pijp een longitudinaal staande golfbeweging ontstaat.
De lucht bij de bovenlip ondervindt de meeste trilling van de bovenlip, zodat daar dus een buik ontstaat. Bij een open orgelpijp wordt aan het boveneinde eveneens een buik gevormd, daar we dit moeten zien als de terugkaatsing tegen een los uiteinde. Indien zich nu in het midden van de orgelpijp dus juist tussen de twee buiken een knoop bevindt, dan geeft de orgelpijp zijn grondtoon. Het is dan ook mogelijk dat er meer knopen worden gevormd.
Tussen 2 van deze knopen bevindt zich steeds een buik, waarbij we er op moeten letten, dat er zich aan de uiteinden van de pijp steeds buiken bevinden.

Stellen we de lengte van de pijp, gerekend vanaf B, voor door de letter l en is de golflengte van de toon λ, dan geldt voor de grondtoon dat:
$l = \frac{1}{2}\lambda$ of $\lambda = 2.l.$ Nu was: $\lambda = v.T$ en $T = \frac{1}{f}$, zodat: $f = \frac{v}{\lambda} . = \frac{v}{2l}$
Hieruit volgt, dat het trillingsgetal of de frequentie van de grondtoon van een open orgelpijp gelijk is aan:

$$\boxed{f = \frac{v}{2l}.}$$

Bij een gesloten orgelpijp ontstaat bij het vaste uiteinde een knoop.
Bij B blijft natuurlijk een buik bestaan. Bij de grondtoon is er alleen bij het vaste uiteinde een knoop en bij B een buik, zie fig. 21,2.

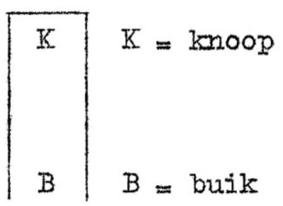


Fig. 21,2.

Stellen we weer de lengte van de pijp voor door l, dan is in dit geval $l = \frac{1}{4}\lambda$, dus daar $f = \frac{v}{\lambda}$ is $f = \frac{v}{4l}$.
De frequentie van de grondtoon van een gesloten orgelpijp is:

$$\boxed{f = \frac{v}{4l}.}$$

Uit de formules van de frequentie van een open en een gesloten orgelpijp, nl. resp:
$f = \frac{v}{2l}$ en $f = \frac{v}{4l}$ zien we, dat de grondtoon hoger is naarmate de lengte van de pijp kleiner is.

Wordt de lucht hard in de orgelpijp geblazen, dan zullen meer knopen ontstaan, hierdoor ontstaan dus de boventoon.

Open orgelpijp

In fig. 21,3a ontstaat de grondtoon, waarvoor $f = \frac{v}{2l}$.
In fig. 21,3b ontstaat de eerste boventoon. Uit de figuur zien we dat: $l = \lambda$, zodat: $f = \frac{v}{l}$.

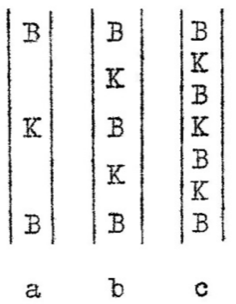


Fig. 21,3. Verdeling van knopen en buiken in een open orgelpijp.

In fig. 21,3c ontstaat de tweede boventoon. Uit de figuur lezen we af dat: $l = \frac{3}{2}\lambda$ zodat: $f = \frac{v}{\frac{2}{3}l} = \frac{3}{2}\frac{v}{l}$ enz. Beschouwen we de 3 gevonden frequenties, dan was de frequentie achtereenvolgens: $\frac{1}{2}\frac{v}{l}$; $\frac{2}{2}\frac{v}{l}$ en $\frac{3}{2}\frac{v}{l}$. De derde boventoon zal dus een frequentie hebben van $\frac{4}{2}\frac{v}{l}$, de vierde boventoon van: $\frac{5}{2}\frac{v}{l}$ enz.

De tonen, die dus door een open orgelpijp worden voortgebracht, hebben frequenties die zich verhouden als de rij der natuurlijke getallen, dus: als 1 : 2 : 3 : 4 enz.

Gesloten orgelpijp

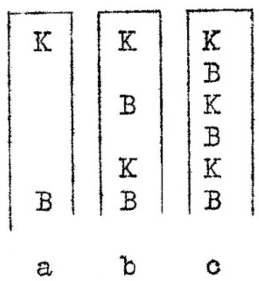


Fig. 21,4. Verdeling van knopen en buiken in een gesloten orgelpijp.

In fig. 21,4a ontstaat de grondtoon waarvoor geldt: $f = \frac{v}{4l}$.

In fig. 21,4b ontstaat de eerste boventoon, waarvoor geldt: $l = \frac{3}{4}\lambda$ zodat: $f = \frac{3}{4}\frac{v}{l}$.

In fig. 21,4c ontstaat de tweede boventoon, waarvoor geldt: $l = \frac{5}{4}\lambda$ zodat: $f = \frac{5}{4}\frac{v}{l}$.

beschouwen we weer de 3 gevonden frequenties dan zien we dat deze achtereenvolgens waren: $\frac{1}{4}\frac{v}{l}$; $\frac{3}{4}\frac{v}{l}$; $\frac{5}{4}\frac{v}{l}$ enz. De derde boventoon zal dus een frequentie hebben gelijk aan $\frac{7}{4}\frac{v}{l}$ enz.

De tonen, die door een gesloten orgelpijp worden voortgebracht hebben dus frequenties, die zich verhouden als 1 : 3 : 5 : 7 enz.

Opmerking: Het is niet alleen de lengte van de orgelpijp, die de toonhoogte bepaalt, doch ook de doorsnede van de pijp. Het blijkt echter uit onderzoekingen, dat de toonhoogte voornamelijk afhankelijk is van de lengte en in veel geringere mate van de doorsnede van de pijp.

Opmerking: Daar de voortplantingssnelheid van de longitudinale golven in warme lucht groter is dan in koude, zal dus, indien men met een blaasinstrument in een warme zaal komt de voortplantingssnelheid bij het blazen in het instrument groter zijn, daar nu $f = \frac{v}{\lambda}$ zal dus ook de frequentie f veranderen. Het blaasinstrument zal dan ontstemd zijn.

Oplossingen inzenden van de opgaven 163 t/m 166.

22,1. Resonantie

Twee stemvorken worden naast elkaar opgesteld, de stemvorken geven dezelfde toon. Een van de stemvorken wordt aangeslagen en na enkele ogenblikken stil gehouden. Het blijkt dan dat de andere stemvork de toon weergeeft. De stemvork, die aangeslagen is, heeft de lucht in trilling gebracht, de luchttrillingen hebben weer de tweede stemvork in trilling gebracht. Deze overdracht vindt alleen plaats als de beide stemvorken dezelfde toon voortbrengen, m.a.w. dezelfde frequentie hebben. De tweede stemvork trilt dus met de eerste mee, hij resoneert.

Ditzelfde gebeurt met twee gelijkgestemde snaren van een muziekinstrument. Verschillende voorwerpen in de huiskamer kunnen in resonantie komen, indien de radio aan staat.

Om de toon van een stemvork te versterken, plaatst men de stemvork op een resonantiekast, dit is een doos die aan het ene einde open is. De lengte van de luchtkolom in de doos is ongeveer $\frac{1}{4}\lambda$ van de grondtoon die de vork voortbrengt.

22,2. Interferentie van geluidsgolven

We gaan een van de twee gelijkgestemde stemvorken een weinig verstemmen en brengen de beide stemvorken tegelijk in trilling. We horen dan de toon afwisselend toe- en afnemen. Een versterking en een volgende verzwakking vormen samen een zweving.

De afwisselende versterkingen en verzwakkingen van de toon, die het gevolg zijn van interferentie bij een klein verschil der frequenties heten zwevingen.

Stel de ene stemvork 280 en de andere 284 trillingen per seconde. Op een gegeven moment wordt de lucht bij ons trommelvlies ten gevolge van de beide uitgezonden golven verdicht. Na $\frac{1}{8}$ seconde heeft de ene stemvork $\frac{280}{8} = 35$ trillingen en de andere $\frac{284}{8} = 35\frac{1}{2}$ trillingen bij ons oor gebracht. Het faseverschil is dus $\frac{1}{2}$. Hierdoor brengt de ene trilling een luchtverdichting en de andere trilling een luchtverdunning bij ons trommelvlies tot stand, waardoor beide trillingen elkaars werking op zullen heffen en wij niets zullen horen.

Na $\frac{1}{4}$ seconde hebben de stemvorken resp. 70 en 71 trillingen bij ons trommelvlies gebracht, die in fase zijn, hierdoor versterken zij dus elkaar enz. Nu geldt:

Het aantal zwevingen van twee geluidsbronnen per seconde is gelijk aan het verschil der frequenties der beide tonen.

22,3. Proef van Quincke

Met behulp van de proef van Quincke is aan te tonen dat een deeltje onder invloed van twee golven in rust kan zijn.

Het toestel bestaat uit een vaste holle buis en een buis, die in- en uitgeschoven kan worden. Over de onderste uitmonding spannen we een doorzichtig vlies, waarop we wat zand strooien.

Boven de bovenste opening wordt een geluidsbron gehouden. We zien nu dat het zand in beweging is, dus dat het vlies in trilling wordt gebracht.

We schuiven nu de rechte buis uit, totdat de weg door de buis een halve golflengte van de toon langer is dan de weg door de linker vaste buis. Het zand blijft nu in rust, dus het vlies wordt niet in trilling gebracht.

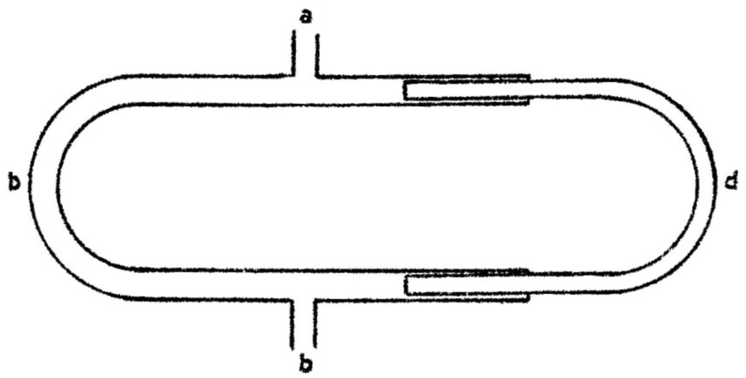


Fig. 22,1

Komt dus door de rechter buis een luchtverdichting bij het vlies, dan komt tegelijkertijd door de linker buis een luchtverdunning bij het vlies (of omgekeerd). De beide trillingen verkeren dus, indien ze bij het vlies komen, in tegenfase en zullen elkaar opheffen.

Een punt, waarin twee trillingen samenwerken (interfereren) is in rust, wanneer de beide trillingen gelijke amplitude hebben en is tegenfase zijn, dus $\frac{1}{2}\lambda$ verschillen. Verkeren de trillingen in dezelfde fase, dan wordt de trilling in een bepaald punt versterkt.

22,4. Beginsel van Doppler (het Dopplereffect)

Een geluidsbron geeft een aantal trillingen per seconde. Een waarnemer, die zich op een bepaalde afstand bevindt, zal ditzelfde aantal trillingen per seconde opvangen, indien zowel de geluidsbron als de waarnemer zich niet bewegen. Als de geluidsbron of de waarnemer zich echter snel verplaatsen, wordt dit anders. Indien de geluidsbron de waarnemer snel nadert, dan zal een iedere toon, die gegeven wordt, een kleinere weg te doorlopen hebben dan de vorige uitgebrachte tonen.
Het trommelvlies van de waarnemer zal dus per seconde meer trillingen ontvangen dan wanneer de geluidsbron niet naderbij kwam. De waarnemer zal dus een hogere toon horen.

Verwijdert de geluidsbron zich snel van de waarnemer, dan gebeurt juist het omgekeerde, de waarnemer zal dan een lagere toon horen.

Dit verschijnsel is duidelijk waar te nemen bij een trein, die nadert, terwijl de machinist de fluit laat gaan. De toon klinkt bij het naderen van de trein hoger en daalt plotseling als de trein ons passeert. Dit is het beginsel van Doppler.

Oplossingen inzenden van de opgaven 167 t/m 170.

R.T.

HILVERSUM

Licht

23,1. Lichtbronnen

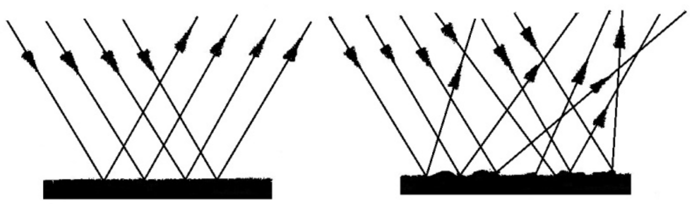
Een voorwerp zien we als het licht uitstraalt en dit licht ons oog bereikt. Zendt het voorwerp zelf licht uit, dan noemt men het een lichtbron. Voorbeelden van lichtbronnen zijn: de zon, een kaars, een lamp enz.

Andere voorwerpen stralen licht uit dat zij eerst van de een of andere lichtbron hebben ontvangen, dit zijn dus geen lichtbronnen. De maan bv. is geen lichtbron, zij straalt licht uit dat zij eerst van de zon heeft ontvangen.

Evenals de zon straalt elk voorwerp, dat op hoge temperatuur wordt gebracht, licht uit. Naarmate de temperatuur stijgt, wordt het uitgestraalde licht intenser, zodat de kleur geleidelijk overgaat van donkerrood naar lichtrood om daarna geel en tenslotte fel wit te worden. Naarmate men de temperatuur der lichtbronnen wist op te voeren, kreeg men betere lichtbronnen.

De lichtbundels, die ontstaan door de warmte die zij bezitten, heten temperatuurstralers. Behalve deze temperatuurstralers kent men nog de zg. gasontladingslampen, waartoe o.a. behoren natriumlampen, kwiklampen, T.L.-buislampen.

Glas, water en lucht laten het licht, dat er op valt, door; zij zijn doorschijnend. Het licht dat door glas, water of lucht gaat, wordt voor een deel in deze stoffen opgeslorpt, dit heet absorberen.
Het licht kan ook aan het grensvlak van twee stoffen worden teruggekaatst. Als het lichaam een volmaakt glad oppervlak heeft , ontstaat spiegeling. Het licht dat op een blad papier of iets dergelijks valt, wordt verstrooid, daar dit oppervlak niet als een volmaakt glad oppervlak kan worden opgevat. Het bestaat a.h.w. uit diverse gladde oppervlakjes, die in verschillende standen en richtingen staan. Ieder vlakje kaatst nu het licht dat er op valt terug, waardoor verstrooiing van het licht ontstaat.



spiegeling verstrooiing

Fig. 23,1.

Een lichtbundel in een stofvrije ruimte is onzichtbaar. Bevinden zich stofdeeltjes in de ruimte, die de lichtbundel doorloopt, dan verstrooien deze stofdeeltjes het licht, waardoor de lichtbundel wel zichtbaar wordt.

Ondoorzichtbare lichamen die zich in de lichtweg bevinden veroorzaken schaduwen.

In fig. 23,2 is een puntvormige lichtbron L getekend. B is een bol van een ondoorzichtige stof. S is een scherm. Op het scherm S zien we de schaduw van bol B. Deze schaduw noemen we de slagschaduw van bol B.
De kant van de bol, die niet door het licht van de puntvormige lichtbron bereikt kan worden, heet de eigen schaduw van het lichaam.

De schaduwvorming is een bewijs dat het licht zich rechtlijnig voortplant. Ten gevolge van de rechtlijnige voortplanting van het licht is het niet mogelijk om een hoekje te kijken. Het oog achter een opening geplaatst, ontvangt slechts licht uit een beperkt deel van de ruimte. Het deel van de ruimte, dat door het oog wordt waargenomen, heet het gezichtsveld.

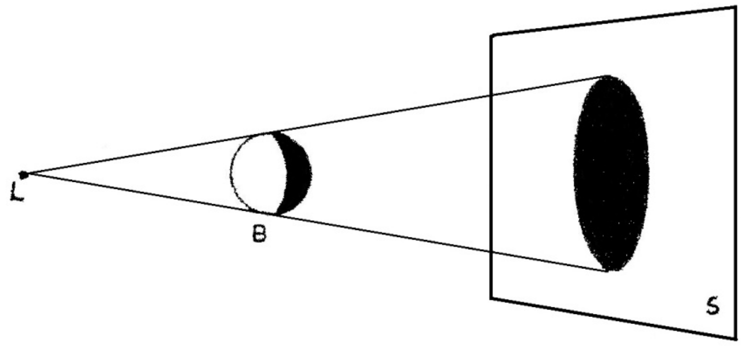


Fig. 23,2.

Is de lichtbron niet puntvormig, doch heeft de lichtbron afmetingen, dan zal op bepaalde plaatsen op het scherm en op het lichaam slechts een gedeelte van het licht komen (zie fig. 23,3). Op de plaatsen waar slechts een gedeelte van het licht komt, ontstaat een schaduw, die half- of bijschaduw wordt genoemd.

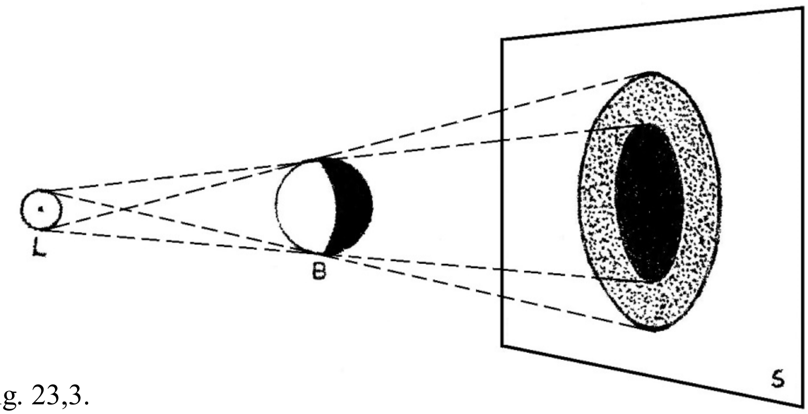


Fig. 23,3.

In fig. 23,3 is L de lichtbron. Door de stralen vanuit het hoogste en laagste punt van de lichtbron te tekenen, raken de aan het lichaam B ontstaan het hoogste en laagste punt van de slagschaduw.

Door alle stralen vanuit het buitenoppervlak van de lichtbron te trekken rakende aan lichaam B ontstaat de grens der slagschaduw.

De lichtstralen vanuit het centrum der lichtstralen getekend rakende aan lichaam B, geven de grens der bijschaduw aan.

Een en ander is duidelijk te zien in fig. 23,3 (De bijschaduw is gestippeld getekend.)

In fig. 23,4 is het gezichtsveld getekend dat bepaald wordt door een koker AB.

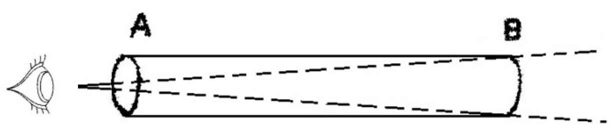


Fig. 23,4.

Oplossingen inzenden van de opgaven 171 t/m 178.

24,1. Donkere kamer

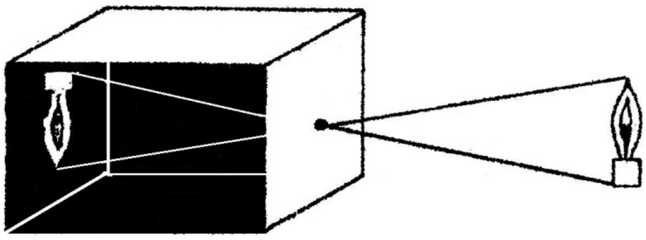


Fig. 24,1.

Voor een lichtdichte kast met matglazen achterwand en een nauwe opening in de voorwand plaatsen we een lichtgevend voorwerp, bv. een brandende kaars. De kaars plaatsen we voor de nauwe opening. (Deze donkere kamer wordt ook wel camera obscura genoemd.)
Op het matglas ontstaat een omgekeerd beeld van het voorwerp dat zich voor de opening bevindt (zie fig. 24,1).
Het ontstaan van dit beeld kunnen we nagaan aan de hand van fig. 24,1.
Vanuit ieder punt van het lichtende voorwerp gaat licht uit. Een klein deel daarvan gaat door de nauwe opening O. Een straal vanuit het punt A van de kaars komt bij A_1 op het scherm. Een straal vanuit B in B_1 enz. tezamen vormen de lichtstralen die door de opening gaan op de matglazen achterwand van de donkere kamer een omgekeerd beeld van het voorwerp.

Hoe kleiner de opening wordt, des te scherper wordt het beeld, immers indien de opening groot is, zijn de lichtvlekjes, die op het scherm komen, ook groot. Deze lichtvlekjes vallen gedeeltelijk over elkaar heen; zij overlappen elkaar. We krijgen dan een onscherp beeld.

Daar ieder punt, dat licht uitstraalt, als een vlekje op het matglas wordt geprojecteerd, kan het beeld nooit volmaakt scherp worden, hoe nauw men de opening ook maakt.

Samenvattend kunnen we de volgende conclusie trekken.

1. Het beeld is scherper, naarmate:
   a. de opening nauwer wordt.
   b. het voorwerp verder weg staat.
   c. het matglas dichter achter de opening staat.
2. Het beeld is lichtsterker naarmate er van elk punt van het voorwerp meer licht door de opening kan, dus naarmate:
   a. de opening wijder is.
   b. het voorwerp dichterbij staat.
   c. het matglas dichter achter de opening staat.

24,2. Terugkaatsing

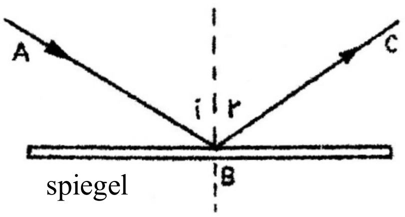


Fig. 24,2.

Laat men een lichtbundel op een vlakke spiegel vallen, dan noemen we de hoek, die gevormd wordt door de loodlijn op de spiegel in het punt waar de straal de spiegel treft en de invallende straal, de hoek van inval i.
(Zie fig. 24,2). De loodlijn in een punt op een oppervlak noemt men de normaal. In het vervolg zullen we dan ook steeds over de normaal spreken.
Wordt de lichtstraal nu teruggekaatst, dan heet de hoek , gevormd door de normaal en de teruggekaatste straal, de hoek van terugkaatsing r.

Uit onderzoekingen is gebleken dat geldt:

$$\boxed{\text{hoek van inval} = \text{hoek van terugkaatsing.}}$$

Opmerking: We wijzen er nadrukkelijk op, dat de hoek van inval en de hoek van terugkaatsing zich altijd bevindt tussen de normaal en de straal en dus niet tussen het terugkaatsende oppervlak en de straal.

Dat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing geldt voor alle oppervlakken, dus ook bij gebogen oppervlakken, zoals we in latere lessen zullen zien.

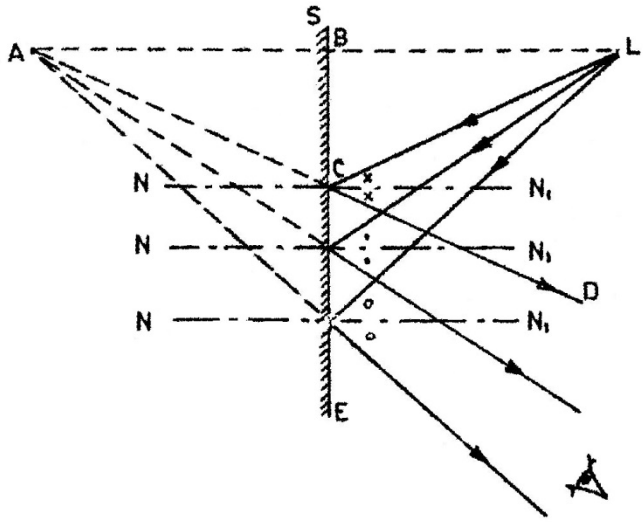


Fig. 24,3. $AB = BL$

In fig. 24,3 is een puntvormige lichtbron L getekend, die lichtstralen uitzendt.
De lichtstralen vallen op het spiegelende oppervlak van de spiegel S en worden dan teruggekaatst.
NN_1 zijn de normalen, getekend in verschillende punten waar de stralen de spiegel treffen.
De teruggekaatste stralen treffen het oog.

Deze stralen maken op de waarnemer de indruk alsof zij uit een punt, het punt A komen. Dit punt heet het beeldpunt van L. Het beeldpunt is het spiegelbeeld van het eigenlijke lichtpunt L.

Het beeldpunt ligt bij een vlakke spiegel even ver achter de spiegel als het lichtput er voor.

In fig. 24,3 is dus $LB = BA$. Dit bewijzen we als volgt:
$\angle LCN_1 = \angle N_1CD$ (hoek van inval = hoek van terugkaatsing). Hieruit volgt:
$\angle LCB = \angle DCE$ (de complementaire hoeken van $\angle LCN_1$ en $\angle N_1CD$). Daar verder:
$\angle DCE = \angle ACB$ (overstaande hoeken) is $\angle LCB = \angle ACB$.

Vanuit L is een loodlijn op de spiegel getrokken, die AC in A snijdt, zodat $\Delta\, LBC \cong \Delta\, BAC$. Hieruit volgt, dat $LB = BA$. Dus A ligt op de loodlijn uit L op de spiegel getekend even ver achter de spiegel als L er voor.
Dit geldt voor alle stralen, die vanuit L gaan. Na terugkaatsing op de spiegel schijnen zij alle uit het punt A te komen.

Het punt A heet het spiegelbeeld van het punt L of korter het beeld van A.
Daar de stralen in werkelijkheid niet van A uitgaan, heet het een schijnbeeld of virtueel beeld.

Een vlakke spiegel vormt van een voorwerp een virtueel beeld, dat symmetrisch t.o.v. het spiegelend oppervlak is gelegen.

Ter oefening maken de opgaven 179 t/m 181.
Oplossingen inzenden van de opgaven 182 t/m 186.

25,1. Beeldvorming

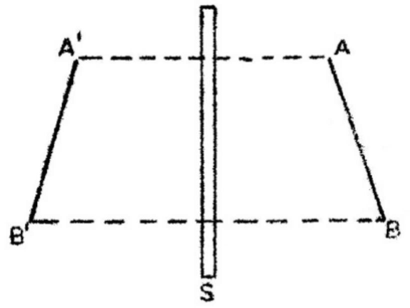


Fig. 25,1.

Een vlakke spiegel vorm van ieder lichtpunt een beeldpunt. Alle beeldpunten samen vormen het beeld van het voorwerp. Zo is in fig. 25,1 $A'B'$ het beeld van het voorwerp AB. Beeld en voorwerp zijn even groot. Het beeld, dat door een vlakke spiegel wordt gevormd, is volkomen scherp daar ieder punt als een punt wordt afgebeeld.

Beeld en voorwerp zijn echter niet precies aan elkaar gelijk, zij zijn elkaars spiegelbeeld.

Plaatsen we tussentwee vlakke spiegels een lichtbron L, dan worden door de herhaalde terugkaatsing vele beelden gevormd (fig. 25,2).

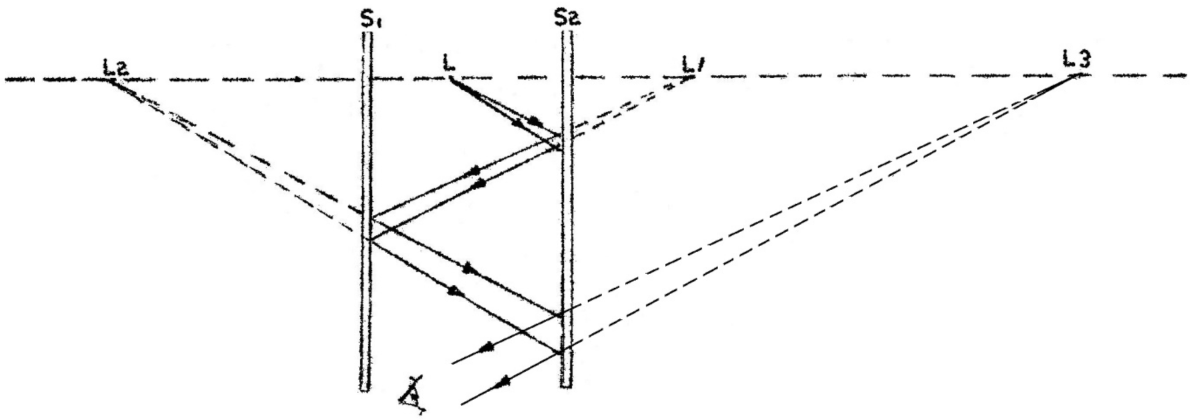


Fig. 25,2.

S_1 en S_2 zijn 2 spiegels met de spiegelende oppervlakken naar elkaar toe gekeerd. L_1, L_2 en L_3 zijn de verschillende virtuele beelden, die gevormd worden. (hiervan wordt in winkeletalages wel eens gebruik gemaakt om de indruk te wekken van een grote etalage met vele voorwerpen.)

Dikwijls zien we in een spiegel van éénzelfde voorwerp verscheidene beelden. Dit komt doordat niet alleen het verzilverde achtervlak een beeld geeft, maar ook het voorvlak. Het beeld, veroorzaakt door het voorvlak, is zwakker dan het andere beeld, daar het grootste deel van het invallende licht door glas tot aan de achterwand valt. Beide oppervlakken vormen dus een beeld. Deze verschillende beelden komen vooral duidelijk uit, als men ze van terzijde in de spiegel beziet.

25,2. Verstrooide terugkaatsing

Een zorgvuldig gepolijst spiegeloppervlak kan men niet zien, daar alle stralen die vanuit een punt op de spiegel vallen, na terugkaatsing van één punt achter de spiegel schijnen te komen.
Bij een ruw oppervlak (een dof oppervlak) liggen de deeltjes, die dit oppervlak vormen, in allerlei richtingen en gedragen zich als een heleboel spiegeltjes. Doordat de normalen op al deze vlakjes dus zeer verschillende richtingen hebben, werken de teruggekaatste stralen dus niet samen tot het vormen van een beeld. Deze terugkaatsing heet verstrooide of diffuse terugkaatsing.

R.T.

50 Nk

25.3. Bolvormige spiegels

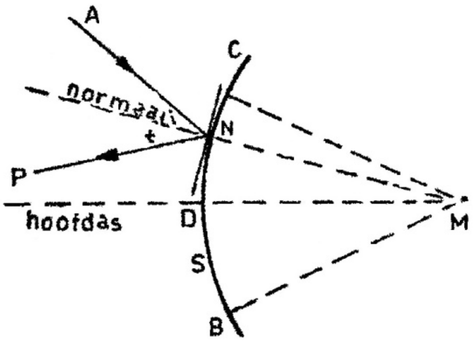


Fig. 25,3. Bolle spiegel.

Dit zijn spiegelende oppervlakken die een deel van een boloppervlak zijn. De mate van hun bolvormigheid wordt bepaald door hun kromtestraal r.

(Dit is de straal van de bol, waar het oppervlak a.h.w. een deel van is.)

de doorsnede van een bolvormige spiegel met een vlak door zijn middelpunt is een cirkelboog. Deze cirkelboog zullen we altijd tekenen als we die spiegel in tekening brengen.

Zit het spiegelende oppervlak aan de buitenkant van de bolvormige spiegel, dan noemen we dit een bolle spiegel (zie fig. 25,3); zit het spiegelende oppervlak aan de binnenkant, dan spreken we van een holle spiegel (zie fig. 25,4).

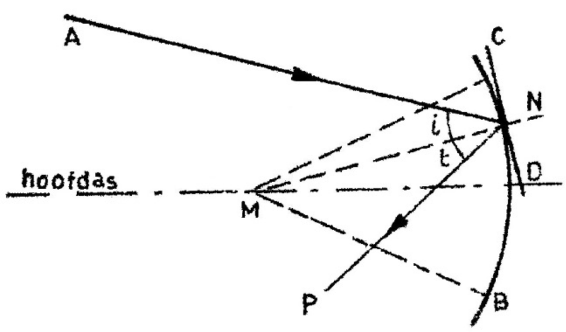


Fig. 25,4. Holle spiegel

Bij bolle spiegels ligt het middelpunt in de ruimte, waar de lichtstralen niet doordringen; bij holle spiegels ligt het middelpunt in de ruimte waar de lichtstralen lopen.

De normaal op deze oppervlakken is de loodlijn op de raaklijn in het punt waar de straal invalt aan de spiegel.
Uit de vlakke meetkunde weten we , dat de normaal dus moet gaan door het middelpunt van het bolvormige oppervlak, dus in fig. 25,3 en 25,4 bv. de lijnen MN.

De lichtstralen, die volgens AN op de spiegels vallen, worden volgens NP teruggekaatst. Meting aan de hoek van inval i en de hoek van terugkaatsing t leert weer, dat ook hier geldt:

De hoek van inval = de hoek van terugkaatsing.

De hoek CMB, dus de hoek gevormd door de buitenste uiterste stralen heet de openingshoek van de spiegel. De bissectrice van $\angle CMB$, dus de lijn MD in fig. 25,3 en 25,4 heet de hoofdas van de spiegel.

Laten we een bundel evenwijdige stralen evenwijdig aan de hoofdas op de spiegel vallen, dan blijkt, dat de teruggekaatste stralen bij een bolle spiegel zich steeds verder van elkaar verwijderen. We zeggen dan dat de teruggekaatste stralen divergeren.
Bij een holle spiegel echter zullen de teruggekaatste stralen steeds meer naar elkaar toe komen. We zeggen dan dat de teruggekaatste stralen convergeren.

Ter oefening maken de opgaven 187 t/m 191.
Oplossingen inzenden van de opgaven 192 t/m 198.

26,1. Brandpunt

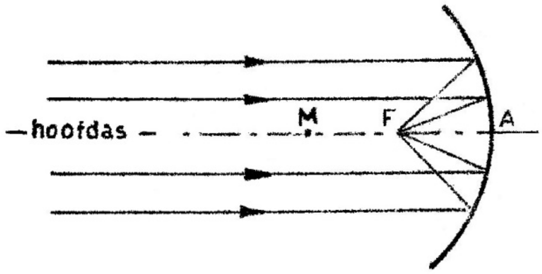


Fig. 26,1.

Valt een bundel evenwijdige stralen evenwijdig aan de hoofdas op een holle spiegel, dan worden deze stralen teruggekaatst naar een punt, het brandpunt of focus genoemd (zie fig. 26,1).

Dit punt wordt aangegeven met de letter F, terwijl de afstand van F tot de spiegel gemeten langs de hoofdas, dus de afstand FA, de brandpuntsafstand genaamd, wordt aangegeven met de letter f.

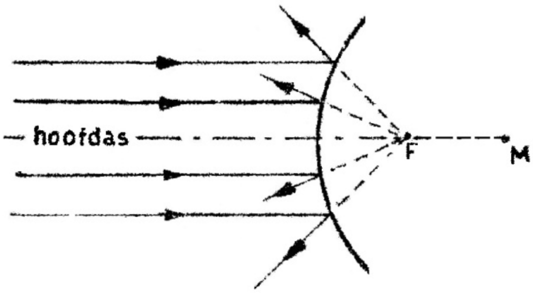


Fig. 26,2.

Bij de bolle spiegel schijnen de teruggekaatste stralen uit een punt F te komen dat achter de spiegel ligt. Ook dit punt F heet het brandpunt.
De afstand van F tot de spiegel gemeten langs de hoofdas, heet weer de hoofdbrandpuntsafstand f (zie fig. 26,2).

Bij holle spiegels is het brandpunt reëel, het wordt gevormd door het samenkomen van werkelijk bestaande lichtstralen. Bij de bolle spiegel is het brandpunt virtueel, het ligt in de ruimte waar de lichtstralen niet kunnen komen, het is het punt, vanwaar de lichtstralen na de terugkaatsing schijnen te komen.

Als men een bundel evenwijdige zonnestralen op een holle spiegel laat vallen, kan men in zijn brandpunt een voorwerp bv. een stukje papier tot ontbranding brengen, bij een bolle spiegel is dit niet mogelijk.

Uit proeven is nu gebleken dat:

Bij een holle en een bolle spiegel ligt het brandpunt midden tussen de spiegel en het middelpunt van de spiegel.

Is de straal van de spiegel gelijk aan R, dan geldt:

$$\boxed{f = \frac{1}{2}R.}$$

In fig. 26,1 en 26,2 is dus $AF = FM$.

Indien de stralen niet evenwijdig aan de hoofdas op de spiegel vallen, gaan zij eveneens na terugkaatsing door één punt (fig. 26,3). Dit punt F_1 genaamd in fig. 26,3 heet eveneens brandpunt. Dit punt ligt echter niet op de hoofdas, doch op een zg. bij-as.

Een bijas is een as, die wel door M gaat, maar niet door het midden van de spiegel (het punt A). Het brandpunt op de hoofdas noemt men, ter onderscheiding van de andere brandpunten die kunnen ontstaan, indien een evenwijdige bundel stralen op de spiegel valt, het hoofdbrandpunt en de afstand FA de hoofdbrandpuntsafstand.

Ditzelfde geldt weer bij de bolle spiegel.

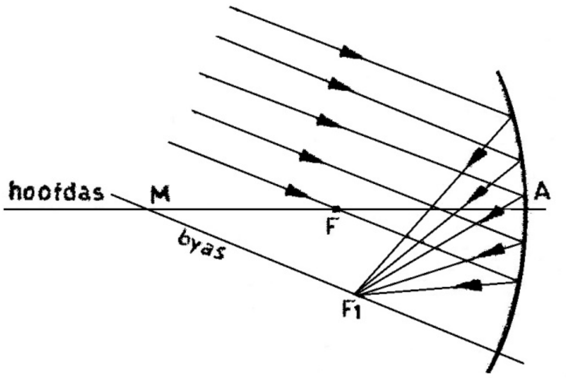


Fig. 26,3.

We bewijzen nu nog dat:
$f = \frac{1}{2}R$ is (zie fig. 26,4).
LN is een lichtstraal die $//MA$ invalt.
Aangezien $\angle i = \angle t$ en $\angle i = \angle NMA$ (verwisselende binnenhoeken) volgt hieruit, dat $\Delta\ MFN$ gelijkbenig is, dus $MF = FN$.

Veronderstellen we nu dat de openingshoek van de spiegel klein is. (deze openingshoek is $2 \times \angle NMA$), dan is ook $\angle NFA$ klein. Met goede benadering kunnen we dan zeggen, dat $NF = FA$.
Hieruit volgt dan, dat $MA = 2AF$ of :
$FA = \frac{1}{2}\ MA$, dus $f = \frac{1}{2}\ R$.

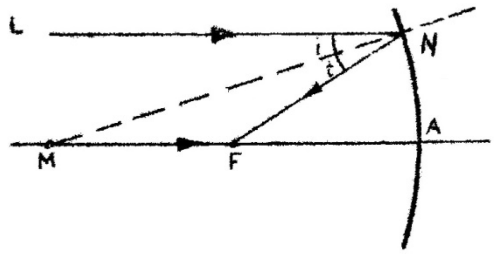


Fig. 26,4.

Dit bewijs geldt voor alle stralen die $//$ aan de hoofdas invallen.
Dus alle evenwijdige aan de hoofdas invallende stralen snijden elkaar na terugkaatsing in punt F zodanig, dat $f = \frac{1}{2}\ R$.

Zuiver wiskundig kan NF nooit even groot zijn dan FA, daar F dan het middelpunt van de spiegel zou moeten zijn. Het bovenstaande bewijs geldt dus alleen onder voorwaarde dat de spiegelopening klein moet zijn.

Als de openingshoek te groot is, is er wel verschil in lengte te constateren. Hierdoor gaan alle teruggekaatste stralen niet meer door één punt, doch zij snijden elkaar in verschillende punten. Zij vormen daardoor niet meer een brandpunt, doch een verzameling van punten, een brandvlak genaamd.

Het bewijs voor $f = \frac{1}{2}\ R$ gaat op precies dezelfde wijze bij de bolle spiegel.
Wat de beeldvorming betreft, gedragen de holle en de bolle spiegel zich totaal verschillend. Een holle spiegel vormt van een voorwerp een verkleind beeld, terwijl een bolle spiegel een vergroot beeld vormt.

Het beeld, dat gevormd wordt, kan rechtstaand of omgekeerd zijn.
Indien het mogelijk is het beeld dat door een holle of bolle spiegel gevormd wordt op een scherm op te vangen, dan noemen we het beeld reëel, is dit niet mogelijk dan heet het beeld virtueel.

Het beeldpunt, dat bij een bepaald lichtpunt behoort, kunnen we construeren als we de gang van twee teruggekaatste stralen kennen. Het snijpunt van die twee lichtstralen geeft het beeldpunt.
In de volgende les zullen we hier verder op wijzen.

Oplossingen inzenden van de opgaven 199 t/m 207.

27,1 Beeldvorming bij de holle spiegel

Als constructiestralen gebruiken we twee der volgende stralen (zie fig. 27,1):

1e. De lichtstraal, die vanuit het lichtpunt L door M gaat. Deze lichtstraal valt loodrecht op de spiegel en wordt dus langs dezelfde lijn teruggekaatst.

2e De lichtstraal, die evenwijdig aan de hoofdas op de spiegel valt, wordt teruggekaatst door het brandpunt F.

3e. De lichtstraal, die door het brandpunt gaat, wordt teruggekaatst evenwijdig aan de hoofdas.

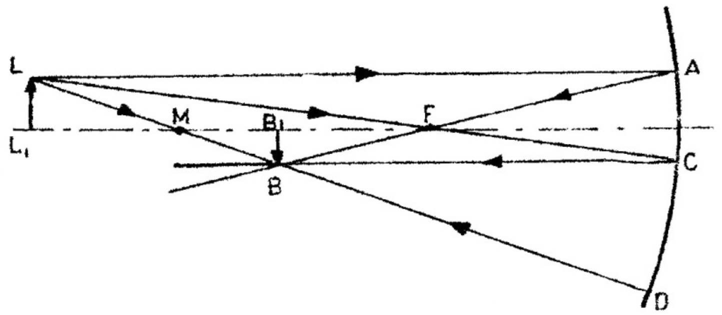


Fig. 27,1.

In fig. 27,1 zijn de drie stralen getekend resp:

1e. De straal LM treft de spiegel bij D en wordt volgens DM teruggekaatst.

2. De straal LA wordt teruggekaatst volgens AF.

3. De straal LF treft de spiegel bij C en wordt // aan de hoofdas teruggekaatst als CB. Het snijpunt van de teruggekaatste stralen is het punt B.

Is LL_1 een voorwerp, dan wordt het beeld BB_1.

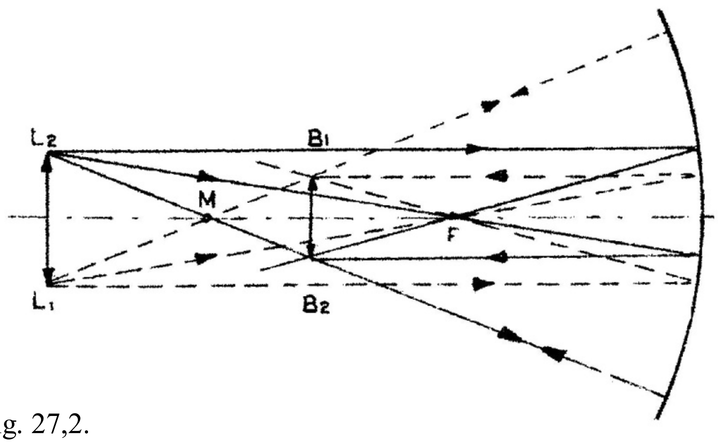


Fig. 27,2.

Voor de constructie hebben we dus aan 2 van de 3 genoemde stralen voldoende; de derde straal kan dan altijd als controle dienen.

Bij de constructies maken we er gebruik van dat, indien een voorwerp loodrecht op de hoofdas staat, het beeld ook loodrecht op de hoofdas staat.

Strikt genomen, geldt dit alleen als de openingshoek van de spiegel klein is en het voorwerp niet te groot. We behoeven dus slechts het hoogste punt van het voorwerp te beschouwen en vinden dan het hoogste punt van het beeld.

Ligt het voorwerp niet met zijn voetpunt op de hoofdas, dan nemen we voor de constructie van het beeld het hoogste en het laagste punt van het voorwerp (zie fig.27,2). De stralen van L_1 zijn vol getekend, die van L_2 gestippeld om de constructie duidelijke te laten uitkomen.

27,2 Spiegelformule

In fig. 27,3 is het lichtpunt L op de hoofdas genomen. Een lichtstraal LN wordt teruggekaatst volgens NB, waarbij gebruik is gemaakt van de regel, dat de hoek van inval gelijk is aan de hoek van terugkaatsing, dus: $\angle i = \angle t$. Het punt B op de hoofdas is het beeldpunt van L.

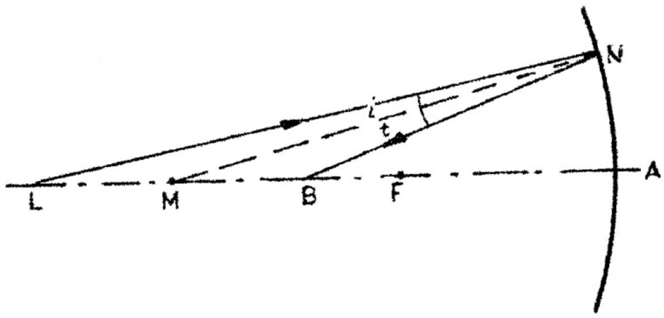


Fig. 27,3.

Nu is MN de bissectrice van hoek LNB. Uit de vlakke meetkunde kennen we de stelling, dat een bissectrice de overstaande zijde verdeelt in 2 stukken, die zich verhouden als de aangrenzende zijden, dus:
$LM : MB = LN : NB$.

Noemen we de straal $MN = MA$ van de spiegel R, LA de voorwerpsafstand v en BA de beeldafstand b, dan kunnen we schrijven:
$LM = LA - MA = v - R$ en:
$MB = MA - BA = R - b$.
Is de spiegelopening klein, dan geldt verder bij benadering dat:
$LN = LA = v$ en $NB = BA = b$.

Vullen we dit alles in, in $LM : MB = LN : NB$, dan vinden we:
$(v - R) : (R - b) = v : b$ of $v(R - b) : b(v - R)$ of:
$vR - bv = bv - bR$, dus: $vR + bR = 2bv$.

Hieruit volgt, na deling door bvR:

$\frac{vR}{bvR} + \frac{bR}{bvR} = \frac{2bv}{bvR}$, dus $\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{2}{R}$. De spiegelformule luidt dus:

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{2}{R}.$$

Veronderstellen we, dat het voorwerp in het oneindige ligt, dus $v = \infty$, dan weten we, dat het beeld in F komt, dus $b = f$. Vullen we dit in , dan vinden we $\frac{1}{\infty} + \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$; omdat $\frac{1}{\infty} = 0$, is $\frac{1}{f} = \frac{2}{R}$ of $f = \frac{1}{2} R$, zoals we reeds eerder gezien hebben. Samengevat komen we dus tot de volgende belangrijke formules:

$$\boxed{\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.} \qquad \boxed{f = \frac{R}{2}.}$$

<u>27,3. Vergroting</u>

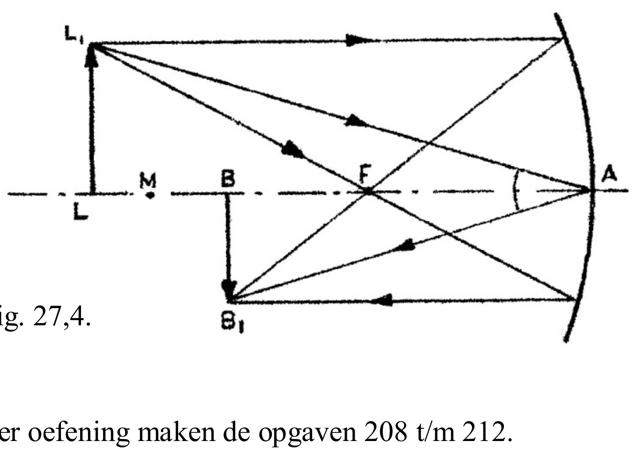


Fig. 27,4.

BB_1 is het beeld van het voorwerp LL_1. De verhouding $\frac{BB_1}{LL_1}$ noemen we de vergroting. Deze vergroting kan ook kleiner dan 1 zijn en is dan dus een verkleining (zie fig. 27,4).

Uit de tekening zien we, dat:
$\Delta\, LL_1A \approx BB_1A$ immers: $\angle i = \angle t$ en:
$\angle LL_1A = \angle BB_1A = 90°$. Hieruit volgt:
$BB_1 : LL_1 = AB : AL = b : v$ of:

$$\boxed{\text{Vergroting } V = \frac{BB_1}{LL_1} = \frac{b}{v}.}$$

Ter oefening maken de opgaven 208 t/m 212.
Oplossingen inzenden van de opgaven 213 t/m 220.

HILVERSUM

28,1. Afspraken omtrent het teken van v, b, f en R

1. De voorwerpsafstand v is positief als het voorwerp reëel is, dus als het voorwerp zich voor de spiegel bevindt. Bevindt het voorwerp zich achter de spiegel, (dus een virtueel voorwerp), dan is v negatief.

2. De beeldafstand b is positief als het beeld reëel is, dus als het beeld zich voor de spiegel bevindt. Is het beeld virtueel, dus als het zich achter de spiegel bevindt, dan is b negatief.

3. De brandpuntsafstand is positief als het brandpunt reëel is, dus als het brandpunt zich voor de spiegel bevindt (bv. bij de holle spiegel). Bevindt het brandpunt zich achter de spiegel (bv. bij de bolle spiegel), dan is f negatief. Het brandpunt is nu virtueel.

4. De straal R is positief als het middelpunt M zich voor de spiegel bevindt (holle spiegel). Bevindt het middelpunt zich achter de spiegel (bolle spiegel), dan is R negatief.

De spiegelformule is niet exact; hij geldt alleen als:
1. de openingshoek van de spiegel klein is.
2. het voorwerp niet te dicht bij de spiegel staat.

Ook de vlakke spiegel kunnen we als een bolvormige spiegel beschouwen.
De straal is in dat geval oneindig groot, zodat de formule $\frac{1}{-b} + \frac{1}{v} = \frac{2}{R}$ overgaat in $\frac{1}{-b} + \frac{1}{v} = 0$, dus: $\frac{1}{v} = \frac{1}{b}$ of $b = v$ (b is negatief, aangezien het beeld achter de spiegel ligt). Het beeld bevindt zich dus even ver achter de spiegel als het voorwerp er voor.

Daar in dit geval de vergroting $V = \frac{b}{v} = 1$ is het beeld even groot als het voorwerp.

Bij de formule voor de vergroting $V = \frac{b}{v}$ heeft alleen de absolute waarde van $\frac{b}{v}$ betekenis.
Een vergroting van -5 heeft geen betekenis.

Een vergroting $\frac{1}{5}$ betekent, dat de grootte van het beeld $\frac{1}{5}$ is van de grootte van het voorwerp.
Het beeld is dus $5 \times$ zo klein als het voorwerp.

28,2. Enige constructies bij de holle spiegel

In fig. 28,1a staat het voorwerp in het oneindige, beeld in F.

In fig. 28,1b staat het voorwerp LL_1 tussen oneindig en M. Beeld BB_1 reëel, verkleind en omgekeerd tussen M en F.

In fig. 28,1c staat het voorwerp ML in M. Beeld BM, reëel, even groot, omgekeerd in M.

In fig. 28,1d staat het voorwerp LL_1 tussen M en F. Beeld BB_1 reëel, vergroot, omgekeerd tussen M en oneindig.

In fig. 28,1e staat het voorwerp FL_1 in F. Een lichtstraal, die in de richting ML_1 op de spiegel valt, wordt langs dezelfde lijn teruggekaatst.

De lichtstralen, die vanuit L_1 op de spiegel vallen, worden evenwijdig aan deze bijas terugge-kaatst. Een ander punt van het voorwerp FL_1 zal weer een andere evenwijdige bundel stralen terug-kaatsen evenwijdig aan die bijas. Er ontstaat dus geen beeld.

R.T.

56 Nk

Nadruk verboden

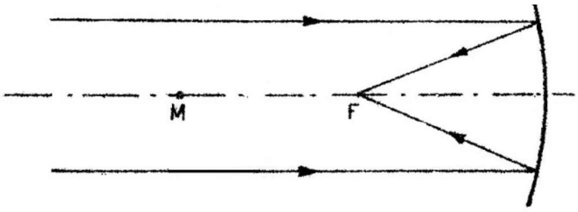
In fig. 28,1f staat het voorwerp LL_1 tussen F en de spiegel. Het beeld BB_1 achter de spiegel, dus virtueel rechtopstaand en vergroot.
Als voorbeeld noemen we hiervan de scheerspiegel.

In fig. 28,1g staat het virtueel voorwerp, dus LL_1 achter de spiegel.
We kunnen ons dit als volgt realiseren. Een lichtstraal, die evenwijdig aan de hoofdas invalt, zou door L_1 gaan als de spiegel er niet was.
Deze straal wordt nu teruggekaatst door F. Een lichtstraal door M, die door L_1 zou gaan, wordt langs dezelfde weg teruggekaatst. Het beeld BB_1 is reëel, rechtopstaand, verkleind en bevindt zich tussen F en de spiegel.

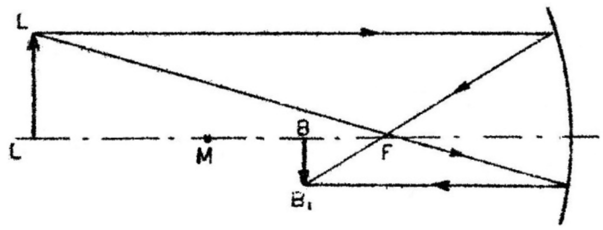
Een dergelijk geval kan zich voordoen als we het voorwerp m.b.v. een vlakke spiegel opgesteld opvangen.

Ter oefening maken de opgaven 221 t/m 226.
Oplossingen inleveren van de opgaven 227 t/m 230.

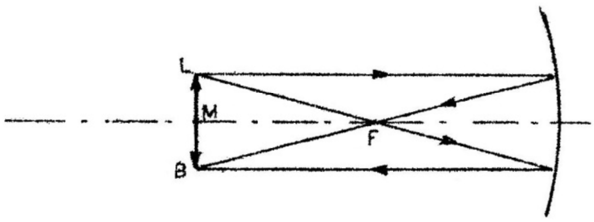
1a.



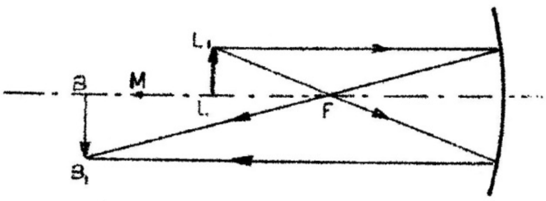
b.1.



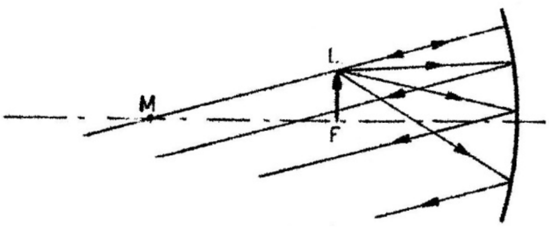
1c.



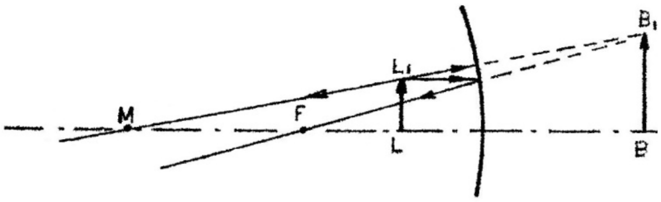
1d.



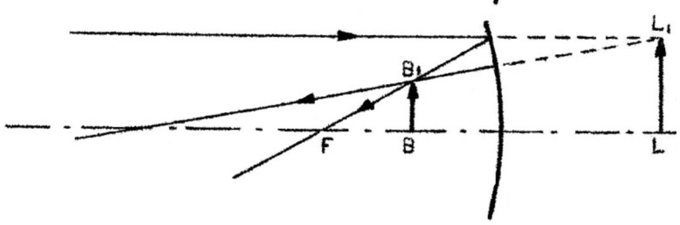
1e.



1f.



1g.



←

Fig. 28,1. Van boven naar beneden:
a: voorwerp in ∞.
b: voorwerp tussen ∞ en M.
c: voorwerp in M.
d: voorwerp tussen M en F.
e: voorwerp in F.
f: voorwerp tussen F en spiegel.
g: virtueel voorwerp.

Zie voor vervolg les 29 t/m 58.