

H E T L I C H T.

HOOFDSTUK I.

Inleiding. De ervaring leert dat een lichtstraal zich rechtlijnig voortplant zolang deze in dezelfde stof blijft.
Dit weten we uit de volgende waarnemingen:

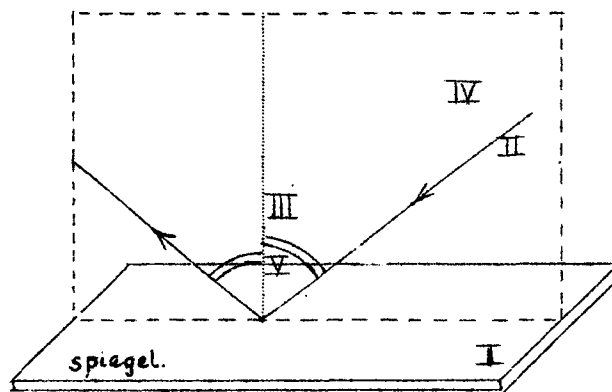
- 1^o) een zonnestraal gaat recht door, en is een rechte lijn.
- 2^o) Men kan niet om een hoek kijken.
- 3^o) Het vormen van de schaduw; de schaduw-vorming geschiedt op dezelfde manier als het vermenigvuldigen van figuren in de meetkunde.

CONCLUSIE: Een lichtstraal gaat, zolang deze in dezelfde stof blijft, altijd recht door.

Hoofdstuk II. De terugkaatsing van het licht.

Deel I. De vlakke spiegel.

§ 1. De terugkaatsing van een lichtstraal tegen een vlakke spiegel.



I is een vlakke spiegel.

II is een willekeurige lichtstraal die de spiegel treft.

In de lichtstraal is een pijl getekend die de richting van de lichtstraal aangeeft.

PIJL VERGETEN = PUNT VERLOREN.

III is de NORMAAL (loodlijn) van het trefpunt.

IV is een denkbeeldig vlak door de invallende straal en de normaal.

V is de hoek tussen de invallende straal en de normaal.

Deze hoek heet; "DE HOEK VAN INVAL".

De vraag is nu: Hoe wordt deze lichtstraal teruggekaatst?

Deze kwestie is het eerst onderzocht door de natuurkun. ge Huygens (1629 - 1695)

Het resultaat van dit onderzoek is bekend als de WET VAN HUYGENS.

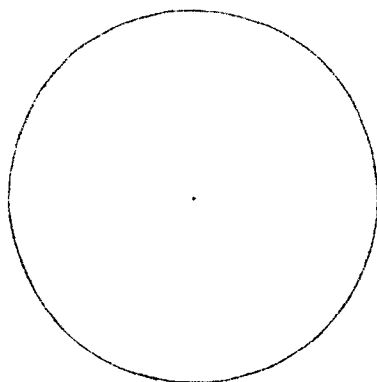
Deze wet luidt:

- 1°) DE INVALLLENDE STRAAL, DE NORMAAL EN DE TERUGGEKAATSTE STRAAL LIGGEN IN EEN PLAT VLAK.
- 2°) DE HOEK VAN INVAL IS GELIJK AAN DE HOEK VAN TERUGKAATSING.

Opmerkingen: 1°) Een lichtstraal volgt deze wet van Huygens bij IEDERE terugkaatsing.

2°) Ook als de spiegel niet vlak is.

Als de spiegel niet vlak is kan men rond het trefpunt altijd een klein plat vlakje tekenen, dat dan dienst doet als vlakke spiegel.



- 3°) Bestaat het oppervlak uit ontelbare kleine spiegeltjes - b.v. ruw glas oppervlak - dan kaatst ieder spiegeltje het licht terug volgens de wet van Huygens. Men krijgt dan een z.g. verwarde of diffuse terugkaatsing.

Vraag: a) Hoe komt het dat men in een stoffige kamer een lichtstraal kan zien, zonder dat men in het licht staat.

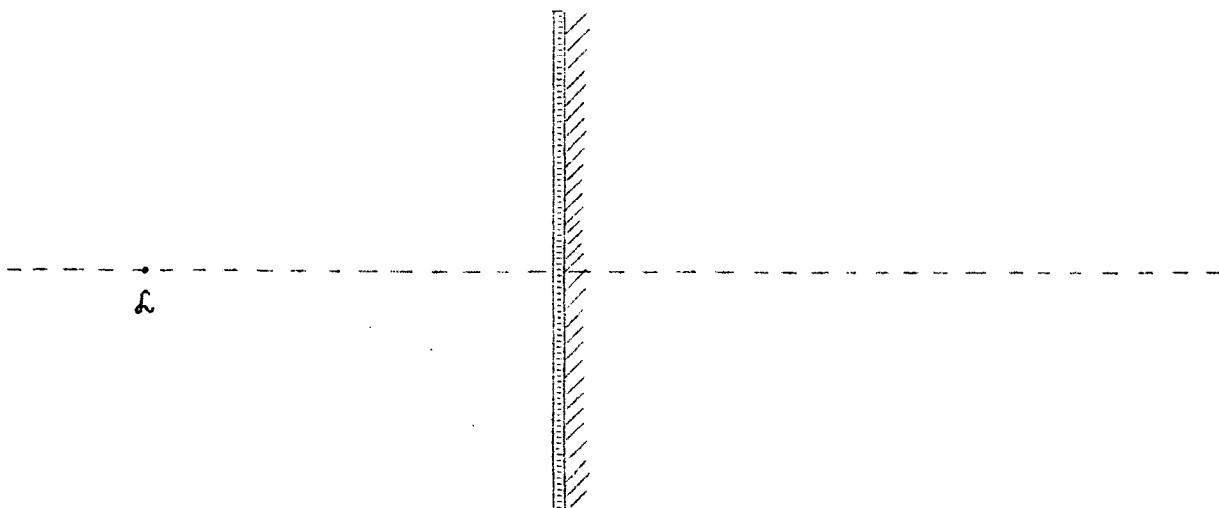
Antw.: De stofdeeltjes kaatsen het licht terug.

Vraag: b) Hoe komt het dat men een niet lichtgevend voorwerp kan zien?

Antw.: De stof kaatst het licht terug. Het rood van een potlood wordt b.v. teruggekaatst.

- 4°) De gang van een lichtstraal is bij terugkaatsing omkeerbaar.

§ 2. De beeldvorming bij een vlakke spiegel.



LA is een willekeurige lichtstraal die in het vlak van tekening op de spiegel valt. We construeren de teruggekaatste straal volgens de wet van Huygens. AC is de teruggekaatste straal.

We vragen naar de meetkundige bijzonderheden van de teruggekaatste straal.

We vullen de fig. meetkundig aan. (zie gestippelde lijnen)

Dan zien we, dat; $\triangle LPA \cong \triangle L'PA$ (Z.H.H.)

Dus: $LP = L'P$.

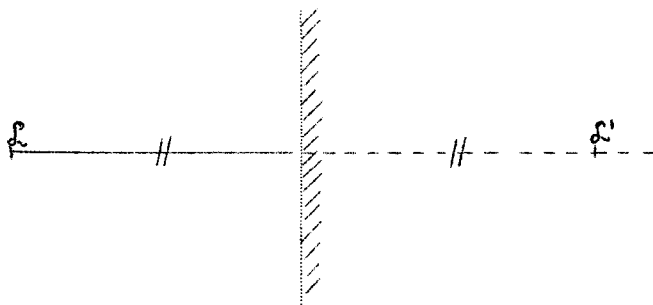
CONCLUSIE: De punten L en L' liggen symmetrisch t.o.v. de spiegel, d.w.z. ze liggen op dezelfde loodlijn en hebben dezelfde afstand tot de spiegel.

De natuurkundige bijzonderheid is nu dat de teruggekaatste straal (AC) SCHIJNT te komen uit het punt L' .

Nu was de lichtstraal LA geheel willekeurig.

Wat voor deze lichtstraal geldt, geldt dus voor iedere lichtstraal die vanuit L op de spiegel valt.

Conclusie:



Alle lichtstralen die uit L vertrekken
SCHIJNEN

na terugkaatsing te komen uit het punt
 L' , dat met L symmetrisch ligt t.o.v.
de spiegel.

Vraag: Wat is de natuurkundige betekenis van het punt L' .

Antw.: Voor het oog SCHIJNT het alsof zich in L' een lichtpunt bevindt. Dit lichtpunt is echter alleen meetkundig aanwezig. Hier heeft men in de natuurkunde een uitdrukking voor:

"alleen meetkundig aanwezig" = VIRTUEEL

Daarom noemt men L' het VIRTUELE BEELD van L .

Vraag: Wat verstaat men in de natuurkunde onder een lichtpunt?

Antw.: Onder een lichtpunt verstaat men het meetkundige snijpunt van de op de spiegel vallende lichtstralen.

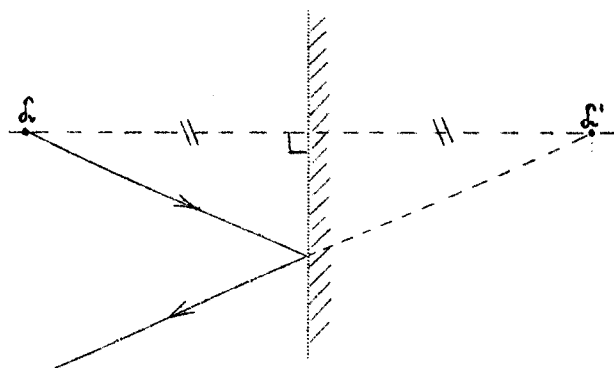
Vraag: Wat verstaat men in de natuurkunde onder een beeldpunt?

Antw.: Onder een beeldpunt verstaat men het meetkundige snijpunt van de door de spiegel teruggekaatste stralen.

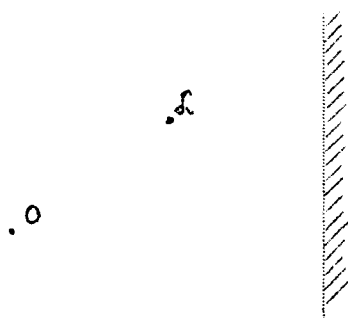
Conclusie:

Bij een vlakke spiegel liggen lichtpunt en beeldpunt symmetrisch t.o.v. de spiegel.

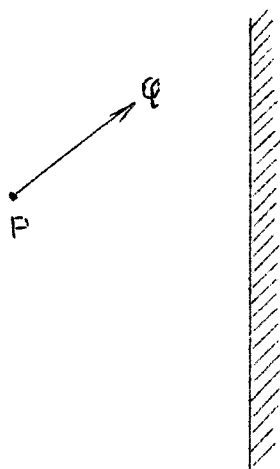
Opgave 1. Gevraagd: Construeer in de gegeven figuur de teruggekaatste straal zonder toepassing van de constr. van Huygens.



2. Gevraagd: Construeer de lichtstraal die uit S vertrekt en na terugkaatsing door O gaat.



3. Gevraagd: Construeer het beeld van PQ.

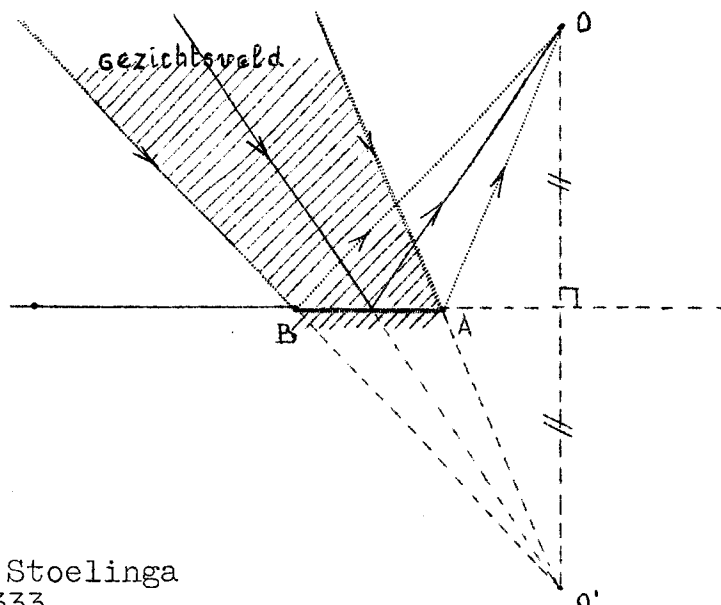


§ 3. Het gezichtsveld.

Ieder voorwerp dat zich in de gearceerde ruimte bevindt kan via de spiegel door het oog gezien worden.

Deze ruimte noemt men het GEZICHTSVELD.

Het woord "veld" is een verbastering van het Engelse woord "field" = ruimte.



Sommen:

Uit Bogers & Stoelinga
no. 330 t/m 333.

Deel II. De holle spiegel.

§ 1. Benamingen.

Een holle spiegel is een deel van een bol-oppervlak dat aan de binnenkant spiegelen is.

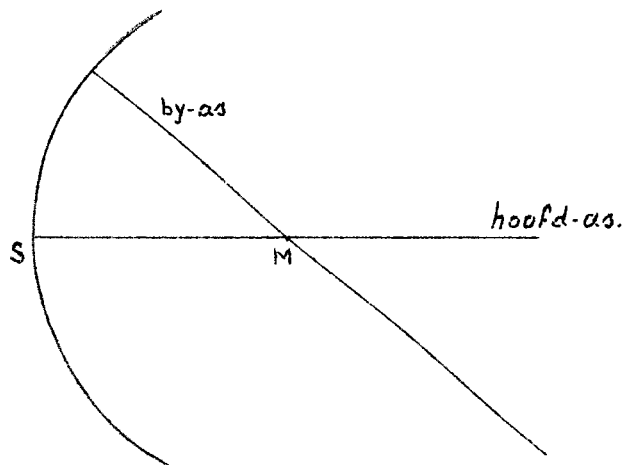
Het middelpunt M (zie fig.) noemt men het KROMTEMIDDELPUNT (passerpunt) van de spiegel.

S is het midden van het spiegelen oppervlak. Dit wordt kortweg het midden van de spiegel genoemd.

De meetkundige lijn door S en M noemt men de hoofdas van de spiegel.

Iedere andere lijn door M heet een bij-as.

Een holle spiegel heeft dus EÉN hoofd-as en oneindig veel bij-assen.



§ 2. Het HOOFDBRANDPUNT van een holle spiegel.

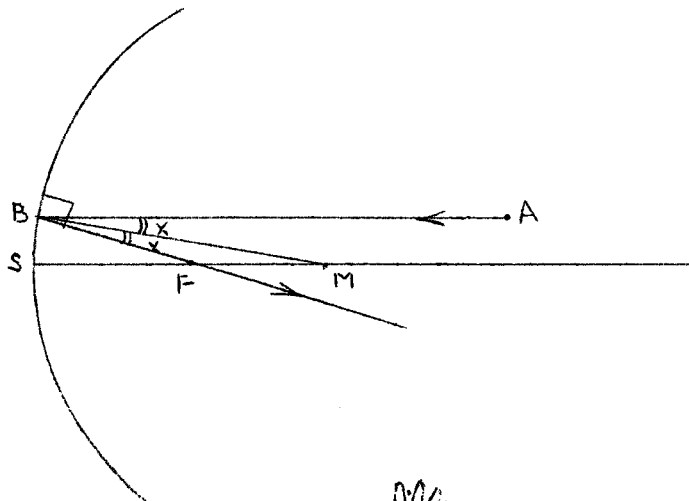
Punt 1) Lichtstralen evenwijdig aan de hoofdas.

AB is een lichtstraal // hoofdas.

We construeren de teruggekaatste straal volgens Huygens.

Deze teruggekaatste straal snijdt de hoofdas in F.

We vragen naar de meetkundige bijzonderheden van F.



Stelling: F is het midden van MS.

Bewijs:

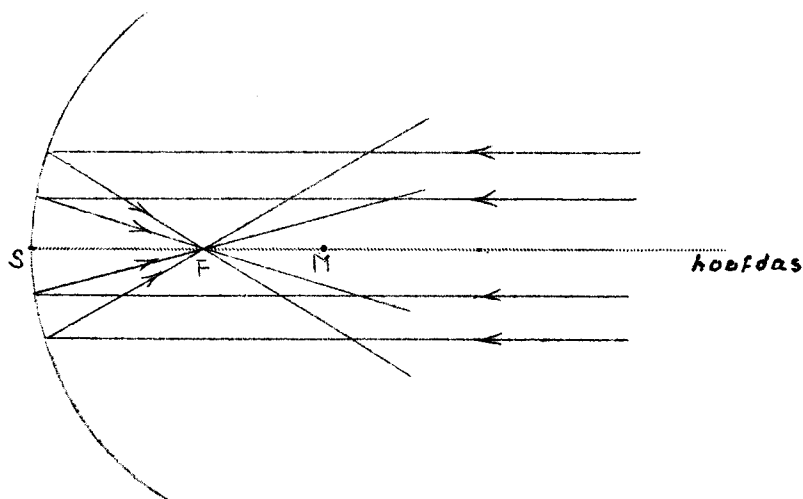
$$\left. \begin{array}{l} MF = FB \\ FB = FS \end{array} \right\} \text{ dus } MF = FS$$



Dus F is het midden van de hoofdkromtestraal.
AB was een willekeurige straal // hoofdas.

Conclusie:

Alle lichtstralen // hoofd-as gaan na terugkaatsing door het midden F van de hoofd-kromtestraal.



Vraag: Hoe heet dit punt F.

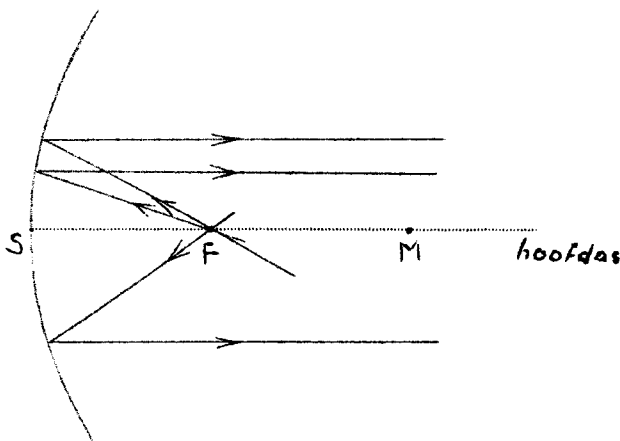
Antw.: Stel dat we de spiegel naar de zon richten, dan komen alle zonne-stralen in F samen. Houdt men dan een stuk papier in F, dan begint dit te branden. Daarom heet F het brandpunt van de spiegel. En omdat F op de hoofd-as ligt, noemt men dit het HOOFD-BRANDPUNT van de spiegel.

Dus:

Alle lichtstralen // hoofd-as gaan na terugkaatsing door het hoofd-brandpunt van de spiegel.

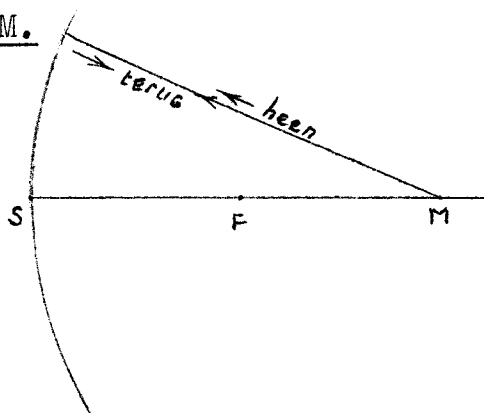
De letter F is de eerste letter van het lat. woord FOCUS = brandpunt.

Punt 2) Lichtstralen door het hoofd-brandpunt.



De gang van een lichtstraal is bij terugkaatsing omkeerbaar; dus zullen alle lichtstralen die door F gaan na terugkaatsing evenwijdig lopen aan de hoofd-as.

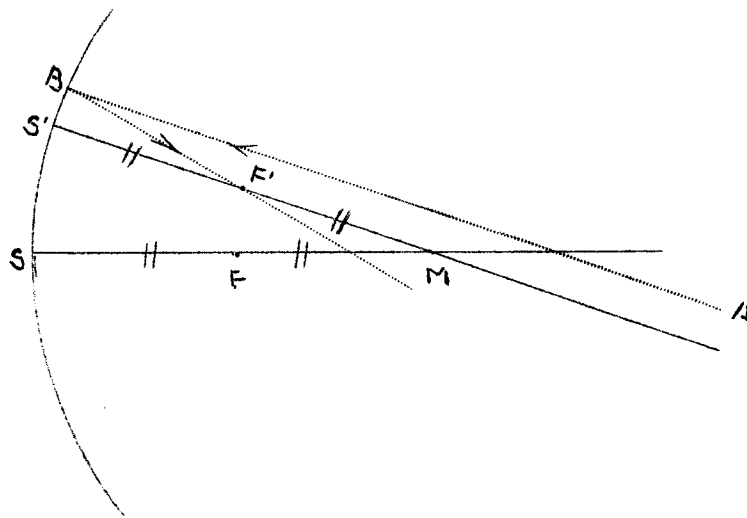
§3. Een lichtstraal door M.



Conclusie:

Lichtstralen door M gaan na terugkaatsing weer door het punt M. M is dus het verzamelpunt v.d. teruggek. stralen = beeldpunt.

§ 4. De BIJ-brandpunten van een holle spiegel.



Gegeven: AB is een lichtstraal // een bij-as.

Gevr.: Construeer de teruggekaatste straal.

Oplossing: AB loopt dus // de bij-as MS'

Voor de lichtstraal AB is het alsof MS' de hoofdas is. De teruggekaatste straal gaat dus door het midden F' van MS'

Welnu; iedere lichtstraal // aan deze bij-as gaat na terugkaatsing door F'

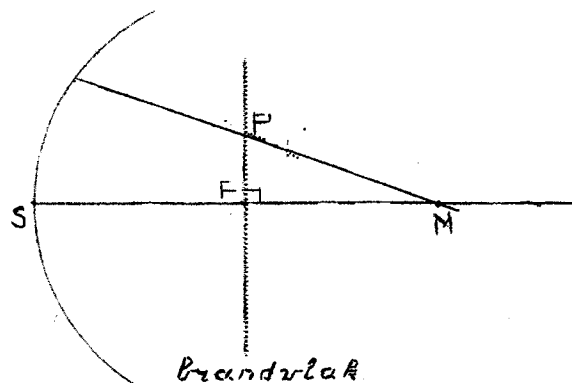
N.B. F' noemt men het brandpunt van deze bij-as, ook wel een bij-brandpunt van de spiegel.

Een holle spiegel heeft EEN hoofd-brandpunt, maar oneindig veel bij-brandpunten.

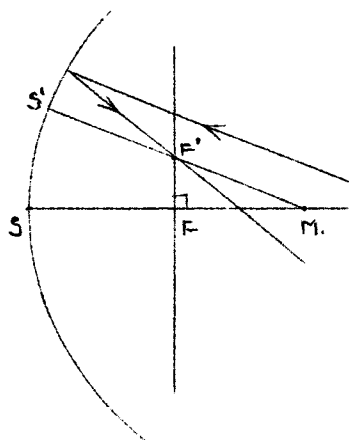
Gevr.: De verzameling van deze bij-brandpunten.

Antw.: De verzameling van deze bij-brandpunten is een bol-oppervlak met M als kromte-middelpunt en MF als straal.

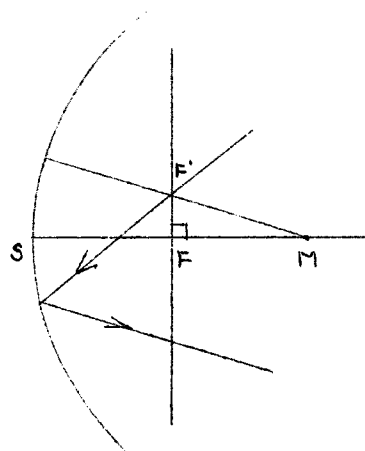
We maken weer een benadering. We nemen aan dat dit laatste boloppervlak een plat vlak is.



Definitie: De meetkundige verzameling van de brandpunten van een holle spiegel is een plat vlak, dat in het hoofd-brandpunt \perp op de hoofdas. F' is dus het brandpunt van de getekende bij-as; genoemd plat vlak, t.w. de meetk. plaats van de brandpunten heet het brandvlak van de spiegel.

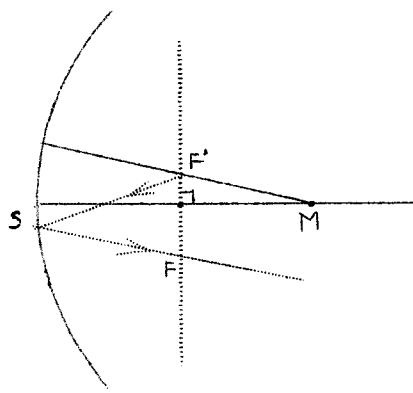
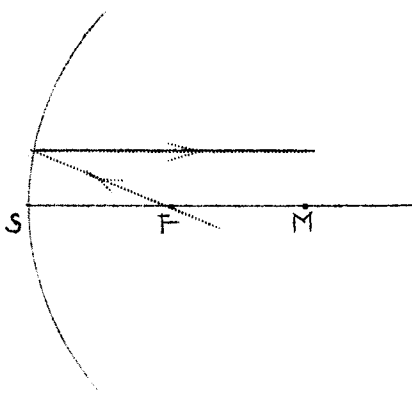
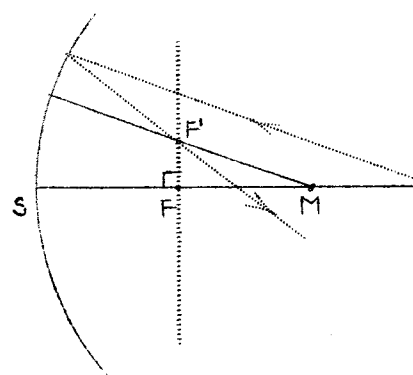
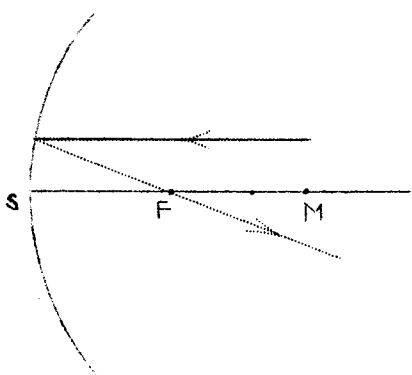
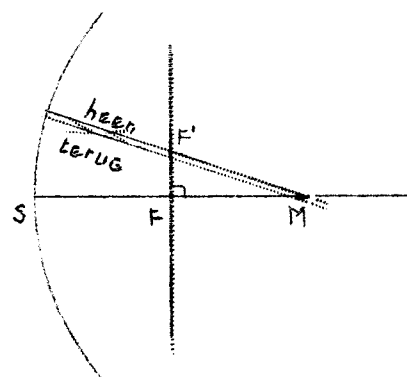
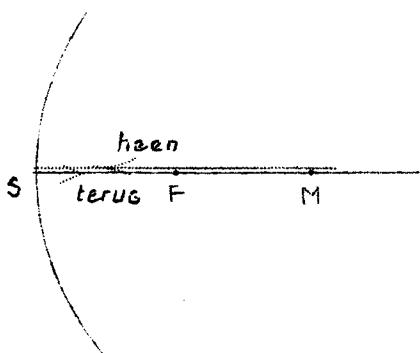
Conclusies:

Lichtstralen // bij-as gaan na terugkaatsing door het brandpunt van die bij-as.

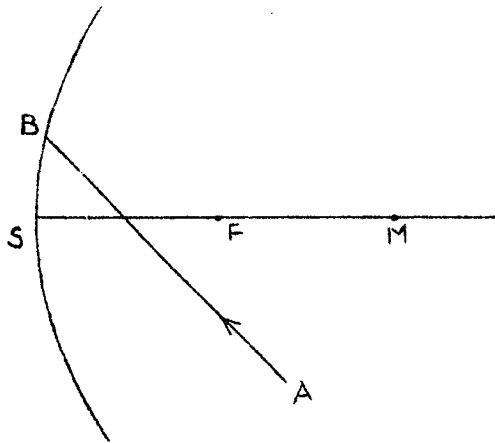


Lichtstralen die door een bij-brandpunt gaan, lopen na terugkaatsing // aan de as van dat bij-brandpunt.

§ 5. Overzicht van de bijzondere stralen.



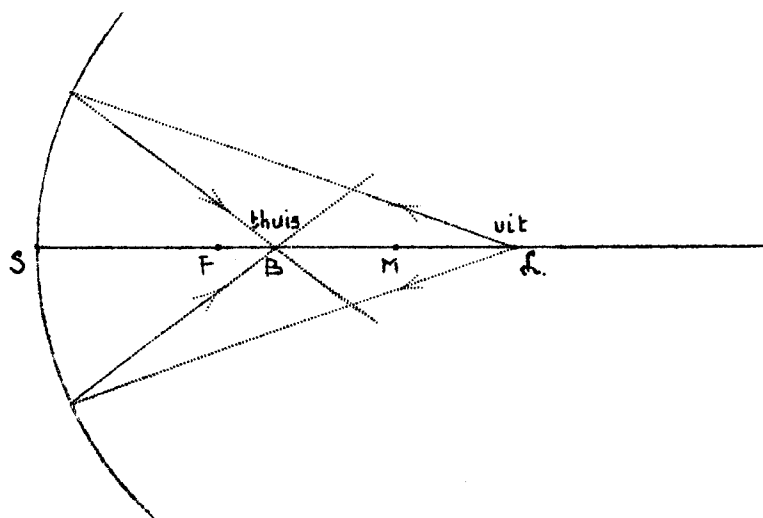
Opgave: Gegeven: AB is een willekeurige lichtstraal. (zie fig.)
Gevr.: Construeer de teruggekaatste straal zonder toepassing van de wet van Huygens.



Oplossing: De straal is de gevraagde straal.

|| Bovenstaande constructies (zie ook blz. 8) vormen de spelregels voor het construeren van lichtstralen.

§ 6. Een lichtpunt op de hoofd-as.

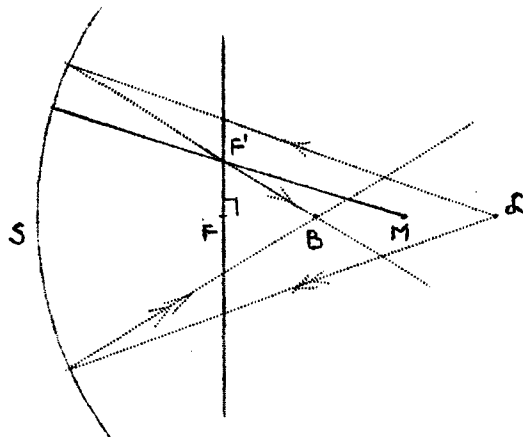


Van L gaat een kegel van lichtstralen naar de spiegel toe. De ervaring leert dat deze lichtstralen na terugkaatsing door eenzelfde punt van de hoofd-as gaan.

Dus:

"SAMEN UIT, SAMEN THUIS, OP DEZELFDE AS".

Gevraagd: Dit thuispunt te construeren.



B is het gevraagde thuispunt.

Vraag: Wat is de natuurkundige betekenis van het punt B?

Antw.: B is het meetkundige snijpunt van de door de spiegel teruggekaatste stralen. Dus B is het beeld van punt L.
Houden we in B een stuk papier, dan zien we op het papier werkelijk een lichtpunt.

Het beeld is nu iets werkelijks, iets reëls.

Men noemt daarom B het reële beeld van het lichtpunt L.

L heeft in dit geval alleen maar een reël beeld.

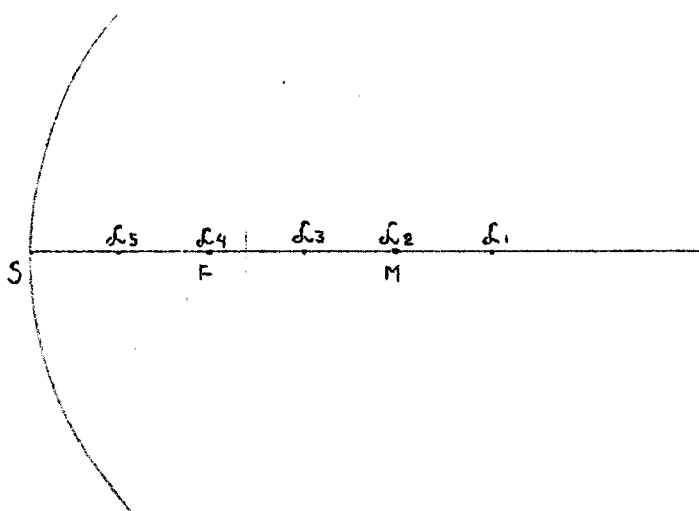
Opmerking: Vraag: Wanneer heet een beeld REËEL?

Antw.: Een beeld heet REËEL, als het meetkundige snijpunt van de teruggekaatste stralen VOOR de spiegel ligt.

Vraag: Wanneer heet een beeld VIRTUEEL?

Antw.: Een beeld heet VIRTUEEL, als het meetkundige snijpunt van de teruggekaatste stralen ACHTER de spiegel ligt.

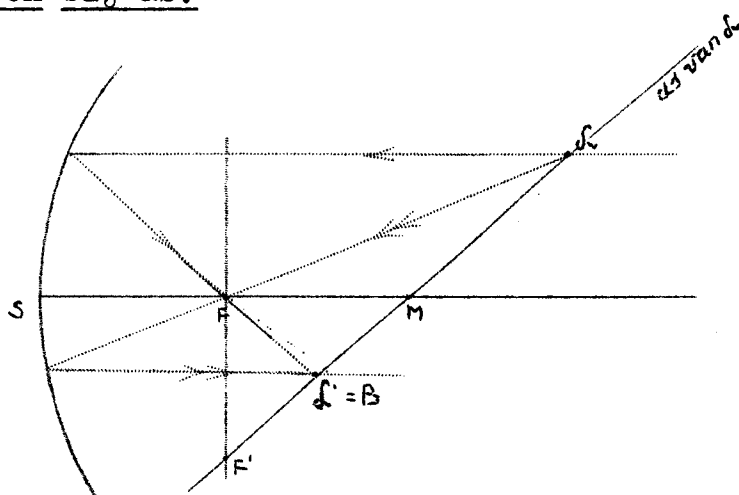
Opgave:



Schuif het lichtpunt L van veraf tot dicht bij de spiegel.

Construeer in elk van deze gevallen het beeldpunt, en vermeld of dit reël of virtueel is.

§ 7. Het lichtpunt op een bij-as.



L. is een lichtpunt op een bij-as.

Van L gaat weer een stralenkegel van lichtstralen naar de spiegel; na terugkaatsing gaan deze stralen door eenzelfde punt van de bij-as door L.

Construeer dit beeldpunt.

Vanuit L gaan echter 2 bijzondere stralen.

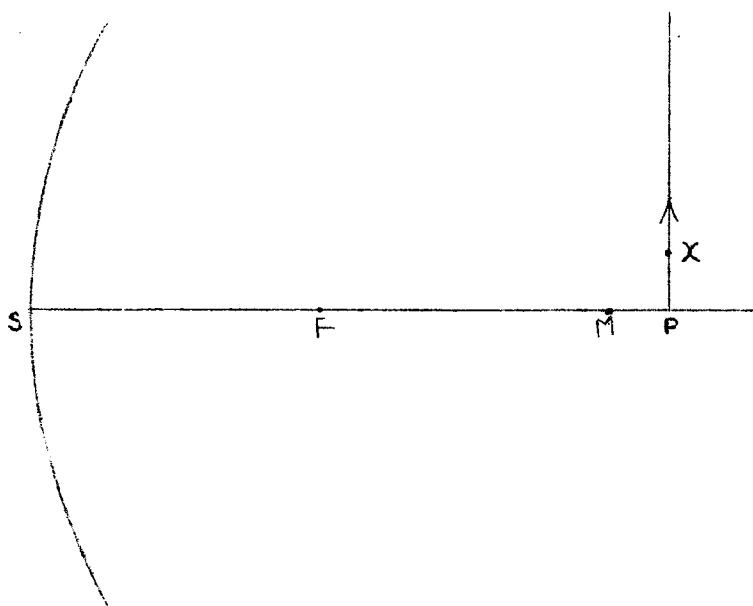
1^o) De lichtstraal // hoofd-as.

Deze gaat na terugkaatsing door het hoofd-brandpunt en we vinden het punt B.

2^o) De lichtstraal die uit L vertrekt en door het hoofd-brandpunt gaat; deze loopt na terugkaatsing // hoofd-as en we vinden weer het punt B.

NB. Constructie 1', 2', 3 is de belangrijkste. (zie later)

§ 8. Het beeld van een voorwerp loodrecht op de hoofdas.



PQ is een reeks van lichtpunten. Ieder lichtpunt heeft een beeldpunt. We krijgen dus een reeks van beeldpunten. Deze reeks van beeldpunten vormen het beeld van PQ .

Gevraagd: Construeer dit beeld.

Discussie bij constructie 5.

Eigenlijk moeten we nu voor meerdere punten van PQ het beeld bepalen. Zouden we dit doen, dan zou blijken, dat deze punten niet op een rechte lijn lagen, maar op een krom gebogen lijn die de hoofdas loodrecht snijdt.

We maken weer een benadering en zegen dat het beeld een rechte lijn is, die vanuit Q' loodrecht staat op de hoofdas. P' is dan het beeld van P .

$P'Q'$ is het beeld van PQ . We merken op, dat $P'Q' < PQ$ en omgekeerd.

Opgave a) Als X een willekeurig punt op PQ is, construeer dan het beeld van X (X')

Het beeldpunt X' moet liggen op 2 meetkundige plaatsen:

1^o) op de bij-as door het punt X , en

2^o) op $P'Q'$

Dus X' is het snijpunt van de bij-as met $P'Q'$

b) Construeer de gang van een willekeurige lichtstraal die vanuit Q vertrekt.

(Na terugkaatsing door Q')

c) Construeer de gang van een willekeurige lichtstraal die vanuit P vertrekt.

(Na terugkaatsing door P')

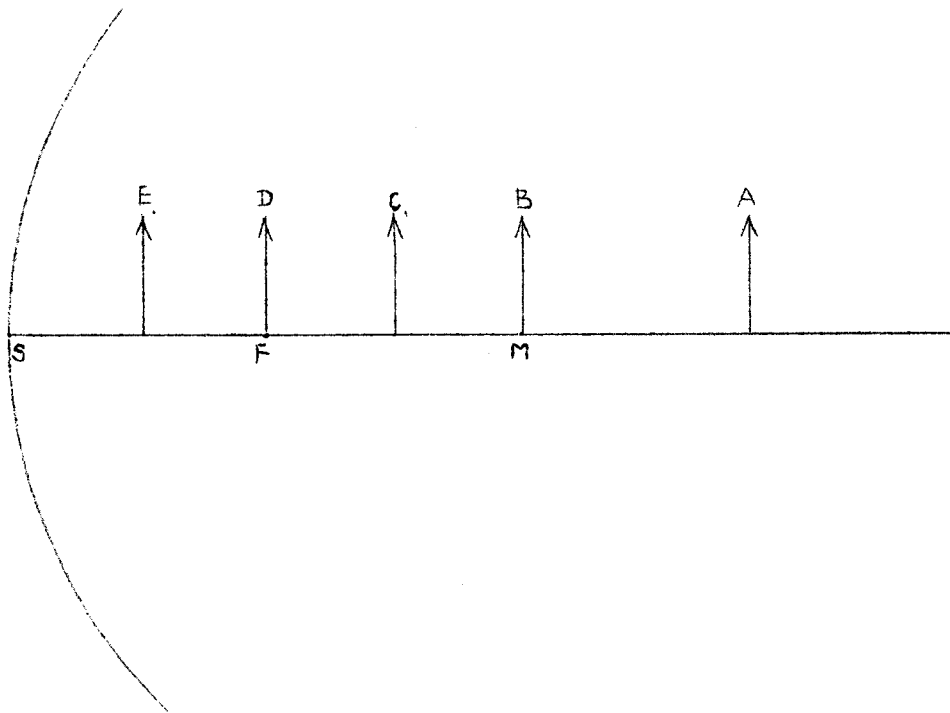
d) Construeer de gang van een willekeurige lichtstraal die vanuit X vertrekt.

(Na terugkaatsing door X')

e) O is een willekeurig punt.

Construeer de lichtstraal die uit X vertrekt en na terugkaatsing door O gaat.

§ 9. Verschillende gevallen.



Conclusie: 1^o) Voorwerp en beeld bewegen in tegengestelde richting.

2^o) Als de voorwerpsafstand $v > SM$, dan ligt het beeld tussen F en M.

Is de voorwerpsafstand $v = SM$, dan ligt het beeld ook in M.

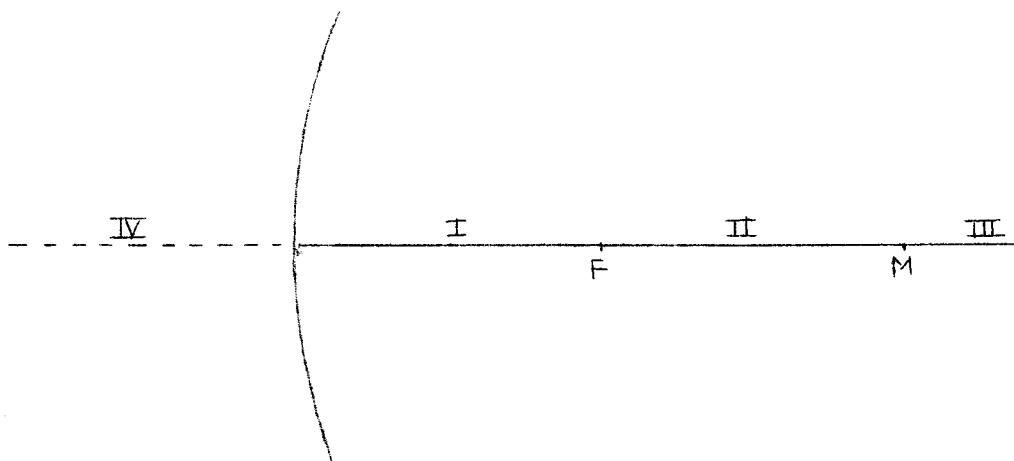
Is de voorwerpsafstand $v < SM$ maar $> SF$, dan ligt het beeld verder dan M van de spiegel af.

Ligt het voorwerp in F, dan ligt het beeld in het oneindige.

Is het voorwerp $< SF$, dan is het beeld virtueel.

Om een en ander te onthouden, hebben we regels; n.l.

DE REGELS VAN ESBACH.

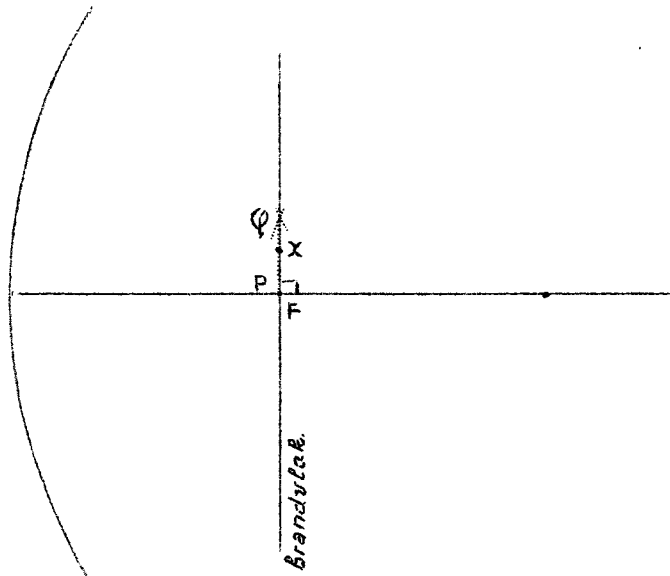


- De som van de nummers van voorwerpgebied en beeldgebied is altijd vijf.
- Het beeld is omgekeerd als voorwerp- en beeldgebied aan weerskanten van M liggen.
- Een beeld is rechtopstaand als het voorwerp- en beeldgebied aan dezelfde kant van M liggen.
- Een beeld is vergroot als het nummer van het beeldgebied hoger is dan het nummer van het voorwerpgebied.

- e) Het beeld is verkleind als het nummer van het beeldgebied lager is dan het nummer van het voorwerpgebied.

De belangrijkste gevallen afzonderlijk geconstrueerd.

- 1^e Geval: Gevraagd, de gang van een stralenbundel te construeren die uit P, Q en X vertrekt.



Het merkwaardige is nu, dat ieder punt van het voorwerp, een brandpunt is van de spiegel.

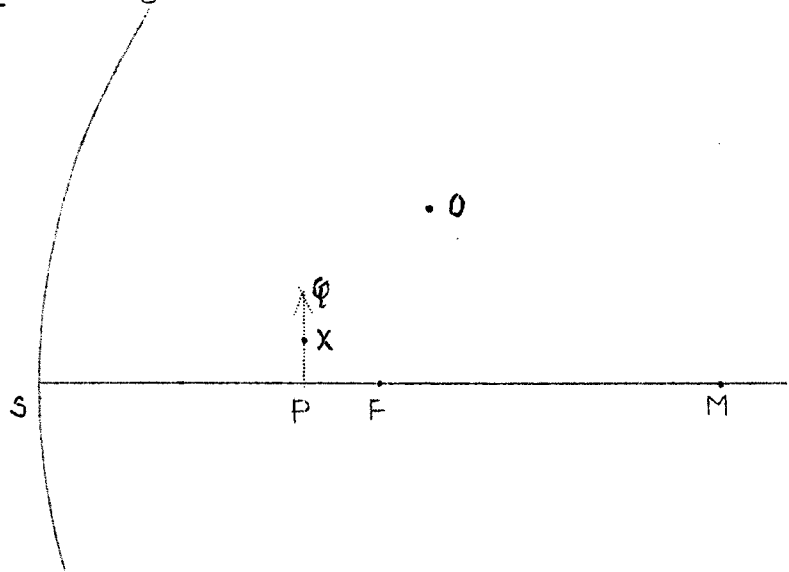
Q is dus een bij-brandpunt v.d. spiegel, eveneens P en X.

- Conclusie:
- Alle lichtstralen die uit Q vertrekken, vormen na terugkaatsing een bundel, // aan de bij-as door Q.
 - Alle lichtstralen die uit P vertrekken, vormen na terugkaatsing een stralenbundel // de hoofd-as.
 - Alle lichtstralen die uit X vertrekken, vormen na terugkaatsing een stralenbundel // de bij-as door X.

- 2^o Geval: Het voorwerp binnen de eerste brandpuntsafstand.

Gevraagd, construeer de lichtstraal die uit P, Q en X vertrekken en na terugkaatsing door O gaan.

Constructie: zie figuur.

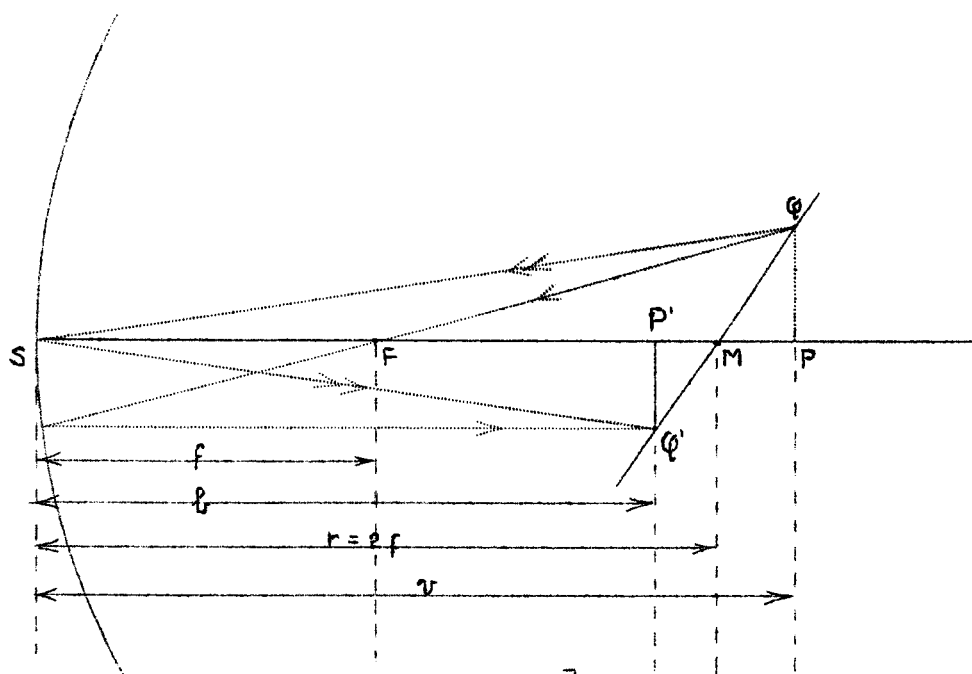


- Conclusie: Het oog meent dat P'Q' een voorwerp is dat achter de spiegel staat; m.a.w. het virtuele beeld door de spiegel ontworpen is reëel voorwerp voor het oog!!

§ 10. HET VERBAND TUSSEN DE VOORWERPSAFSTAND, DE BEELDSAFSTAND EN DE BRANDPUNTSAFSTAND.

NB.

Benaming: f = brandpuntsafstand
 b = beelds- afstand
 r = kromtestraal.



$$\left. \begin{array}{l} \triangle SPQ \sim \triangle SP'Q' \rightarrow PQ : P'Q' = SP : SP' \\ \triangle MPQ \sim \triangle MP'Q' \rightarrow PQ : P'Q' = MP : MP' \end{array} \right\} SP : SP' = MP : MP'$$

$$v : b = (v - 2f) : (2f - b)$$

$$b(v - 2f) = v(2f - b)$$

$$bv - 2bf = 2vf - bv$$

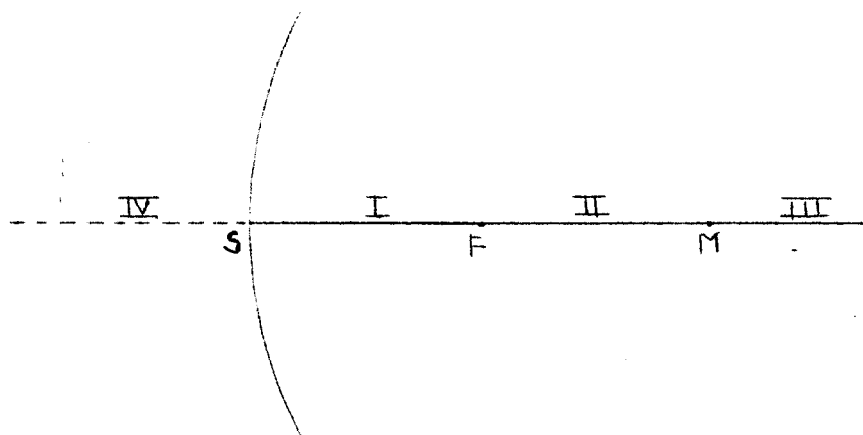
$$\frac{2bv - 2bf - 2vf}{2bvf} = 0$$

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{v} - \frac{1}{b} = 0$$

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

In woorden: Het omgekeerde van de voorwerpsafstand +
het omgekeerde van de beelds- afstand =
het omgekeerde van de brandpuntsafstand

Getallenvoorbeeld. $f = 10$ cm.



v	$\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f} \rightarrow b$	Esbach.
30 cm.		Voorw. in III; beeld in II
20 cm.		Voorw. in M; beeld in M
15 cm.		Voorw. in II; beeld in III
10 cm.		Voorw. in F; beeld oneindig
5 cm.		Voorw. in I; beeld in IV
		Het min teken geeft aan, dat het beeld virtueel is.

Conclusie: Altijd geldt de formule:

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

maar, als het beeld virtueel is, krijgen we automatisch uit, dat b negatief is.

Opmerking: Uit het 1^o en 3^o voorbeeld volgt, dat de plaats van het voorwerp en beeld verwisseld kan worden.

§ 11. De VERGROTING.

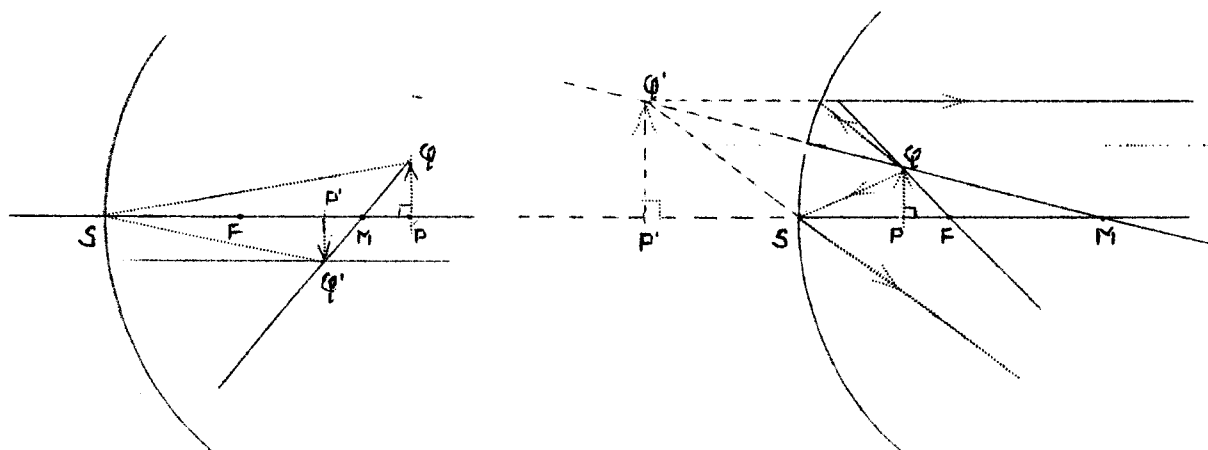
Definitie: Onder de vergroting verstaat men de lengte van het beeld gedeeld door de lengte van het voorwerp.

De vergroting wordt altijd aangegeven door de hoofdletter N.

$$\text{Dus: } N = \frac{\text{lengte van } P'Q'}{\text{lengte van } PQ}.$$

Stelling: $N = \frac{\text{lengte van de beeldsafstand}}{\text{lengte van de voorwerpsafst.}} = \frac{|b|}{|v|}$

Bewijs:



$$\triangle SPQ \sim \triangle SP'Q'$$

$$P'Q' : PQ = SP' : SP$$

$$\frac{P'Q'}{PQ} = \frac{SP'}{SP} \rightarrow \frac{P'Q'}{PQ} = N$$

$$\frac{SP'}{SP} = \frac{|b|}{|v|} \quad \text{dus}$$

$$N = \frac{|b|}{|v|}$$

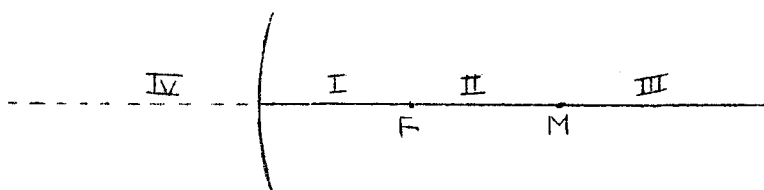
Vraag: 1) Waarom deze absoluut-strepen.

Antw.: Bij de vergroting gaat het alleen om een meetkundige verhouding en niet om een algebraïsche verhouding.
 Welnu: een meetkundige verhouding heeft geen teken.
 De vergroting heeft nooit een teken.

Vraag: 2) Wat wil zeggen: de vergroting is 2 x.

Antw.:

- I. dat het beeld 2 x zo groot is als het voorwerp.
- II. voor de sommen: dat het aantal cm. van de beeldsafstand 2 x zo groot is als het aantal cm. van de voorwerpsafstand.
- III. Als nu b.v. gegeven is $N = 2$, welke mogelijkheden zijn er dan voor de voorwerpsafstand.



Het beeld moet dus groter zijn dan het voorwerp, dus het nummer van het beeldgebied moet hoger zijn dan het nummer van het voorwerpgebied.

Er zijn nu 2 mogelijkheden:

1^o mogelijkheid.

Het voorwerp ligt in I.
 Het beeld ligt dan in IV.

2^o mogelijkheid.

Het voorwerp ligt in II.
 Het beeld ligt dan in III.

- a) Welk verband bestaat er nu tussen de voorwerpsafstand en de beeldsafstand.

Antwoord:

$$\left. \begin{array}{l} v + \\ b - \\ \text{Stel } v = +a \\ b = -2a \end{array} \right\} \text{ dus } b = -2v$$

$$\left. \begin{array}{l} v + \\ b + \\ \text{Stel } v = +a \\ b = +2a \end{array} \right\} \text{ dus } b = +2v$$

- b) Hoe moet nu de formule ingevuld worden?

Antwoord:

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

$$\frac{1}{v} + \frac{1}{-2v} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{1}{v} - \frac{1}{2v} = \frac{1}{f}$$

Conclusie: Als bij een som alleen maar de vergroting gegeven is, dan zijn dit altijd 2 sommen in een som.

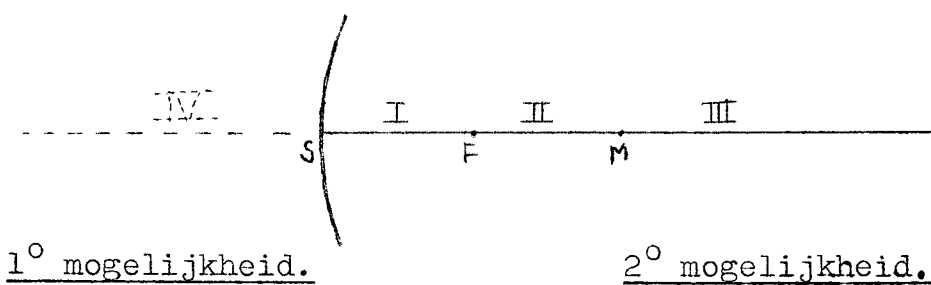
12. Voorbeeld.

Bogers en Stoelinga; som 350.

Gegeven: Een holle spiegel heeft een brandpuntsafstand van 24 cm; loodrecht op de hoofdas is een lichtgevend voorwerp geplaatst, waarvan door de spiegel een 3 x zo groot beeld gevormd wordt.

Gevraagd: De voorwerps-afstanden.

Oplossing:



1° mogelijkheid.

2° mogelijkheid.

Voorwerp in I, beeld in IV.

$$\left. \begin{array}{l} v = + \\ b = - \end{array} \right\} b = -3v.$$

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

$$-\frac{1}{3v} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{2}{3v} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{2}{3v} = \frac{1}{24}$$

$$\underline{v = 16 \text{ cm.}}$$

Voorwerp in II, beeld in III.

$$\left. \begin{array}{l} v = + \\ b = + \end{array} \right\} b = 3v.$$

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

$$\frac{1}{3v} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$$

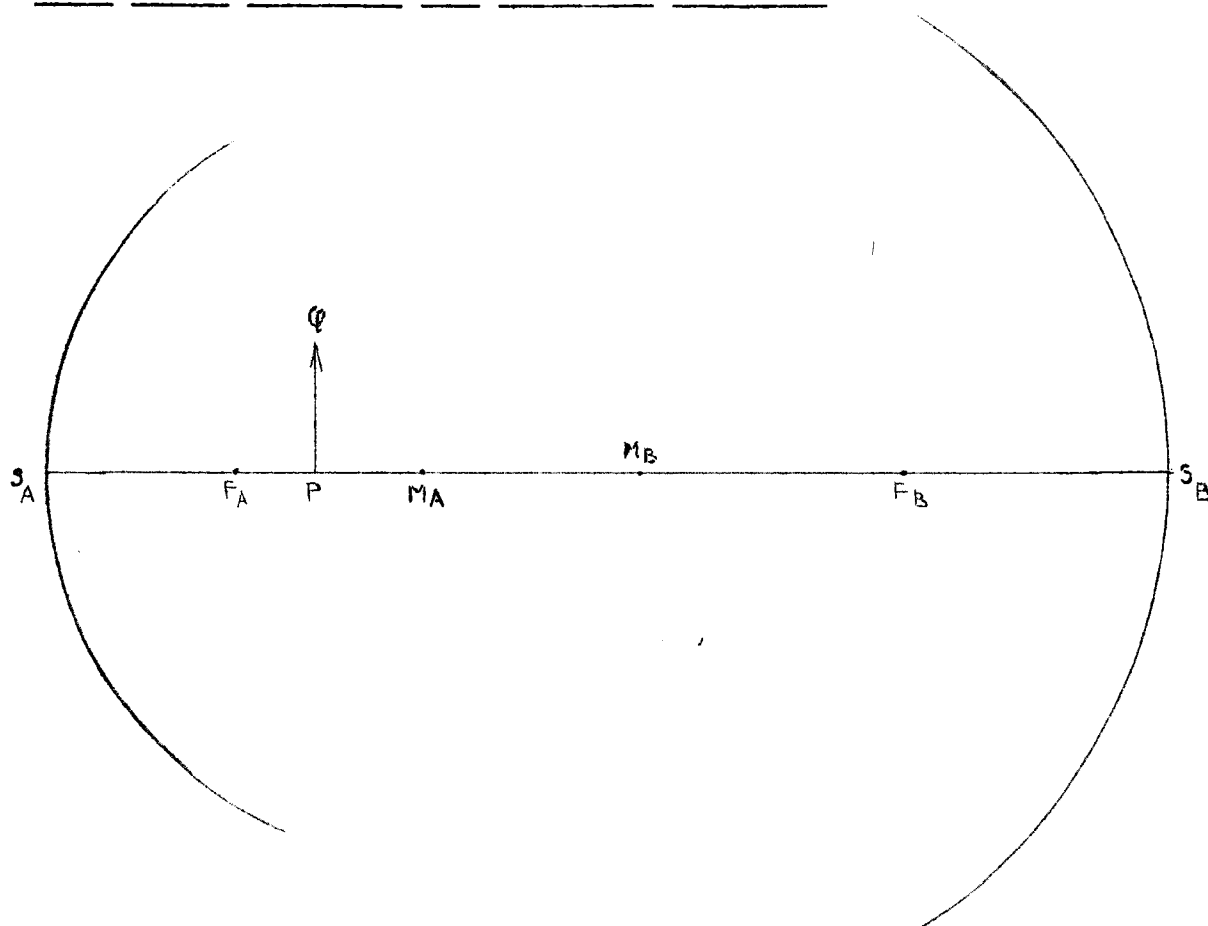
$$\frac{4}{3v} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{4}{3} = \frac{1}{24}$$

$$\underline{v = 32 \text{ cm.}}$$

§ 13. TWEE HOLLE SPIEGELS MET DEZEELFDE HOOFDAS.

NB.



Gevraagd: Wijs in de figuur de afstand tussen de middens van de spiegels aan.

Antwoord: $S_a - S_b$

Gegeven: PQ is een voorwerp dat loodrecht staat op de hoofdas, en alleen stralen stuurt in de richting van spiegel A.

Gevraagd: Construeer het beeld door spiegel A ontworpen.

Vraag: $P'Q'$ is het beeld door spiegel A ontworpen.
Welke betekenis heeft dit beeld voor spiegel B?

Antw.: Het beeld door spiegel A ontworpen is reëel voorwerp voor spiegel B.

Vraag: Hoe beginnen we nu met de constructie van het beeld $P''Q''$.

Antw.: Met de bij-as $Q' - MB$.

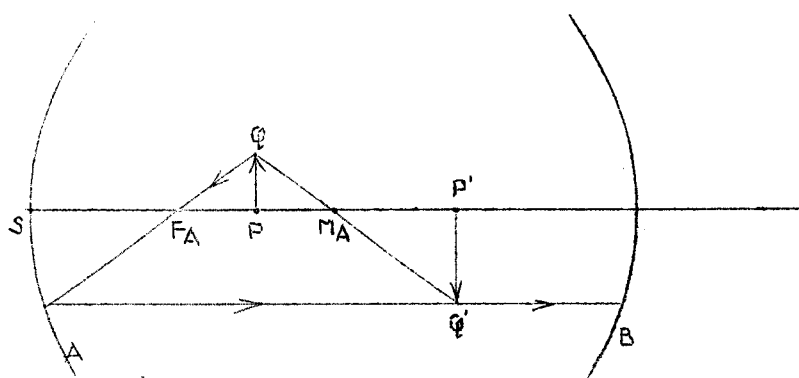
Vraag: Hoe vinden we nu Q'' ?

Antw.: De lichtstraal // de hoofdas gaat na terugkaatsing door F_B .
We vinden dan Q'' .

Vraag: We hebben bij de constructie de lichtstraal QF_A getrokken.
Welk voordeel had dit?

Antw.: QF_A loopt na terugkaatsing // aan de hoofdas.
Dit is EEN BIJZONDERE STRAAL voor spiegel B.

NB. CONSTRUCTIE:



Gegeven: A en B zijn twee holle spiegels met dezelfde hoofdas.
 PQ is een lichtgevend voorwerp.
We veronderstellen, dat PQ alleen lichtstralen in de richting van spiegel A uitzendt.

Gevraagd: Construeer het eindbeeld.

- Constr.:
- I. Construeer het beeld door spiegel A ontworpen.
Neem als bijzondere straal de straal door F_A !
 - II. Het beeld door spiegel A ontworpen is voorwerp voor spiegel B.
Behandel $P'Q'$ als gewone voorwerp voor spiegel B!
 - III. Eindbeeld.

Voorbeeld op schaal.

Gegeven: A en B zijn twee holle spiegels met dezelfde hoofd-as.
Zij keren hun spiegelend oppervlak naar elkaar toe.

$$f_A = 12 \text{ cm.}; v_A = 20 \text{ cm.}$$

$$S_A S_B = 40 \text{ cm.}; f_B = 15 \text{ cm.}$$

- Gevraagd:
- a) Bereken de plaats van het beeld door spiegel B ontworpen.
 - b) Construeer het eindbeeld.
 - c) Construeer de gang van een willekeurige lichtstraal die uit een willekeurig punt X van het voorwerp vertrekt.

Oplossing:

Oplossing:I
Spiegel A.

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

$$\frac{1}{20} + \frac{1}{b} = \frac{1}{12}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{12} - \frac{1}{20}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{5}{60} - \frac{3}{60}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{2}{60} = \frac{1}{30}$$

$$b = 30 \text{ cm.}$$

$$N = \frac{|b|}{|v|} = \frac{30}{20} = 1\frac{1}{2}$$

$$N_A = 1\frac{1}{2} \times$$

II
Spiegel B.

$$b_A = 30 \text{ cm.}$$

$$S_A S_B = 40 \text{ cm.} \quad v_B = + 10 \text{ cm.}$$

$$f_B = 15 \text{ cm.}$$

Het beeld door spiegel A
ontworpen is dus
REEL VOORWERP
voor spiegel B.

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

$$\frac{1}{10} + \frac{1}{b} = \frac{1}{15}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{15} - \frac{1}{10}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{2}{30} - \frac{3}{30}$$

$$\frac{1}{b} = -\frac{1}{30}$$

$$b = -30$$

Het eindbeeld is virtueel.

$$N = \frac{|b|}{|v|} = \frac{30}{10} = 3$$

$$N_B = 3 \times$$

Vraag: Hoe groot is de totale vergroting?

Antw.: $N_{\text{totaal}} = \frac{P'Q''}{PQ} = \frac{P'Q'}{PQ} \times \frac{P'Q''}{P'Q'} = N_A \times N_B$

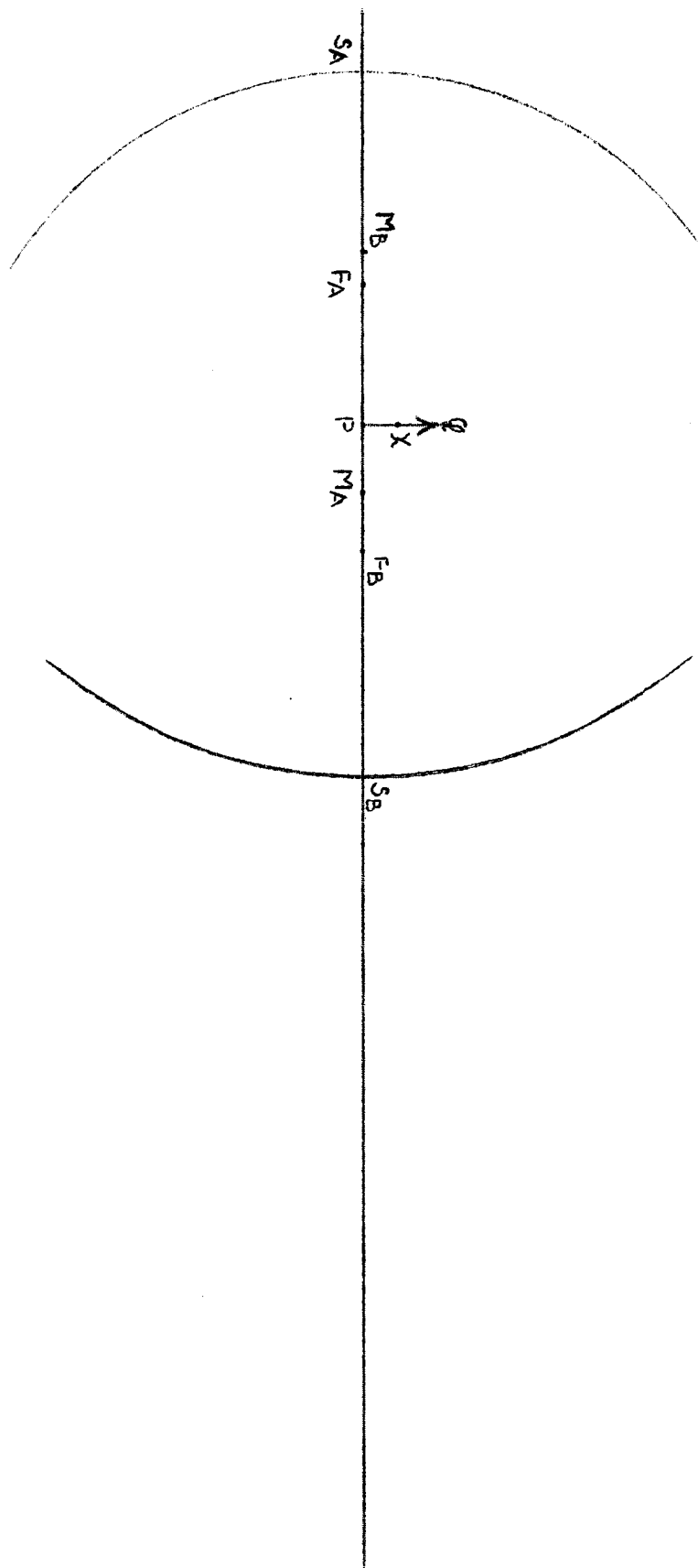
Dus:

$$N_{\text{tot.}} = N_A \times N_B$$

$$= 3 \times \frac{3}{2} = \frac{9}{2} = 4\frac{1}{2} \times$$

Constructie:

zie blz. 19a.



Gevraagd: (Zie de constr. op voorgaande blz.)

Construeer de gang van een lichtstraal die uit X vertrekt, en na terugkaatsing gaat door O.

§ 14. HET VIRTUELE VOORWERP.

Som 353a uit Bogers en Stoelinga.

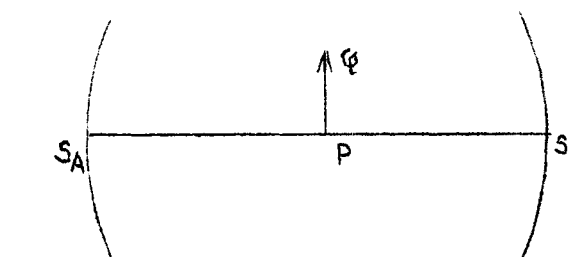
Gegeven: $S_A S_B = 40$ cm.

$f_A = 15$ cm.; $f_B = 30$ cm. 20 cm. voor A.

$v_A = 20$ cm.; $PQ = 3$ cm.

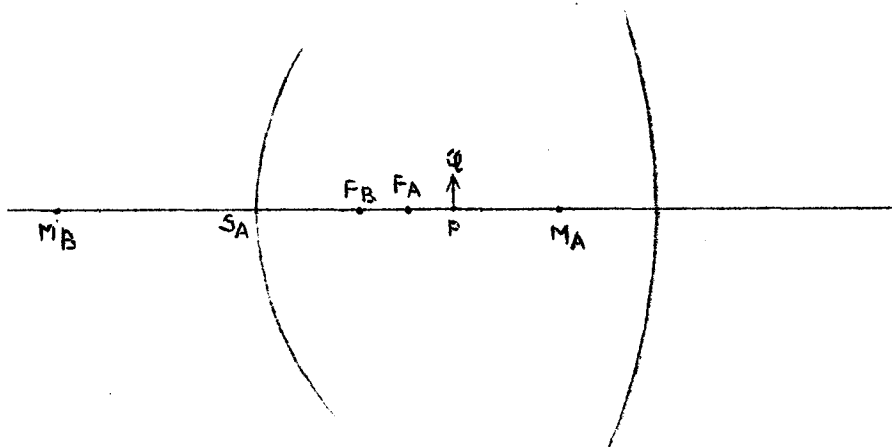
Gevraagd: a) Bereken de plaats van het eindbeeld en de grootte van P'Q'

b) De constructie.



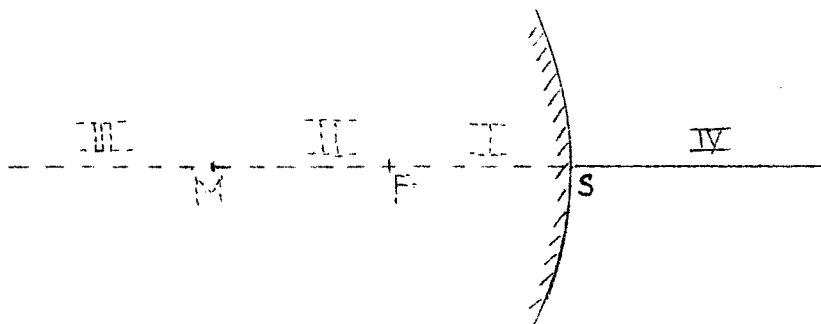
<u>Spiegel A</u>	<u>Spiegel B.</u>
$\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$	$\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$
$\frac{1}{20} + \frac{1}{b} = \frac{1}{15}$	$S_A S_B = 40$ cm. } $v_B = -20$ cm.
$\frac{1}{b} = \frac{1}{15} - \frac{1}{20}$	$b_A = 60$ cm. }
$\frac{1}{b} = \frac{4}{60} - \frac{3}{60} = \frac{1}{60}$	$-\frac{1}{20} + \frac{1}{b} = \frac{1}{30}$
$b = +60$ cm.	$\frac{1}{b} = \frac{2}{60} + \frac{3}{60} = \frac{5}{60}$
$N_A = \frac{ b }{ v } = \frac{60}{20} = 3 \times$	$b = 12$ cm.
$N_{\text{totaal}} = 3 \times \frac{3}{5} = \frac{9}{5} \times$	$N_B = \frac{b}{v} = \frac{12}{20} = \frac{3}{5} \times$
$P'Q' = \frac{9}{5} \times 3 = 5,4$ cm.	

Constructie:



15. Huiswerk sommen:

Bogers en Stoelinga; 333, 334, 336, 339, 342, 350, 351,
352, 353, 354.

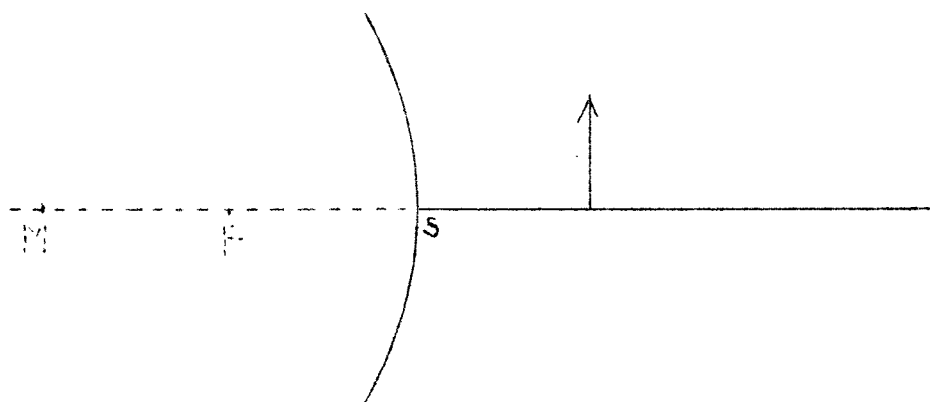
Deel III.DE BOLLE SPIEGEL.

Gebied IV is nu reëel.

Wat betreft de constructie, dus meetkundig, is er geen verschil tussen de holle en de bolle spiegel.

Natuurkundig is er dit verschil, dat alles wat bij de holle spiegel reëel, bij de bolle spiegel virtueel is.

We zullen èèn geval construeren



Vraag: Hoe moeten we nu de brandpuntsafstand in de formule invullen?

Antw.: Het brandpunt is nu negatief.

De brandpunts-afstand is dus ook negatief.

We vinden dus; (gelijkv. van $\Delta \Delta$)

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

NB. Hieruit blijkt, dat we bij een bolle spiegel (virtueel brandpunt!) het aantal cm. van de brandpuntsafstand negatief moeten rekenen.

Gegeven: $v = + 10$ cm. $f = - 8$ cm.

Gevr.: b en N .

Opl.: $\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ $\frac{1}{10} + \frac{1}{b} = - \frac{1}{8}$

$$\frac{1}{b} = - \frac{1}{8} - \frac{1}{10}; \frac{1}{b} = - \frac{10}{80} - \frac{8}{80}; \frac{1}{b} = - \frac{9}{40};$$

$$b = - \frac{40}{9}; b = - 4\frac{4}{9} \text{ cm.}$$

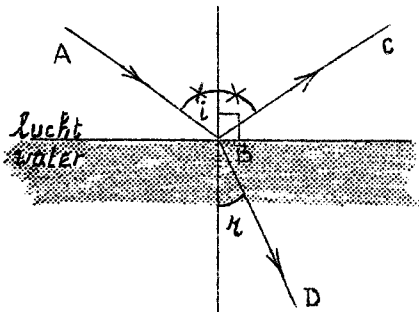
$$N = \frac{b}{v}; N = \frac{4\frac{4}{9}}{10}; N = \frac{4}{9} \text{ x.}$$

Sommen: Bogers en Stoelinga, 348, 354.

Hoofdstuk III.

DE BREKING VAN HET LICHT.

1. Het verschijnsel.



We beschouwen een lichtstraal, die het grensvlak van twee middenstoffen treft, b.v. het grensvlak tussen lucht en water.

AB is de invallende straal.

De ervaring leert, dat deze lichtstraal;

1°) gedeeltelijk wordt teruggekaatst volgens Huygens,

2°) gedeeltelijk wordt gebroken.

M.a.w. de rest van de lichtstraal

gaat het water in, MAAR MAAKT DAN EEN KLEINERE HOEK MET DE NORMAAL.

Het is dus alsof de lichtstraal aan het grensvlak een knak krijgt.

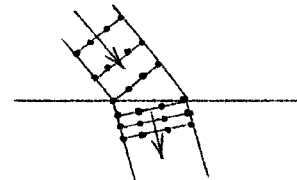
Men zegt daarom, de lichtstraal wordt aan het grensvlak gebroken.

BD is de gebroken straal.

$\angle i$ heet de hoek van inval.

$\angle r$ heet de hoek van breking.

Populaire verklaring van de breking:



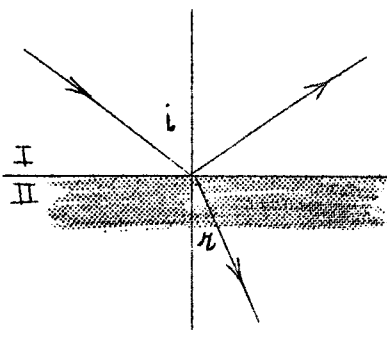
colonne soldaten.

2. De wet van Snellius.

We vragen naar het verband tussen $\angle i$ en $\angle r$.

Dit verband is het eerst ontdekt door SNELLIUS. (Willibrord Snel; ± 1600 ; Prof. in Leiden.)

Proef met de optische schijf.

	i	r	sin i	sin r	$\frac{\sin i}{\sin r}$
	10°				
	20°				
	30°				
	40°				
	50°				
	60°				

De proef leert: 1) De invallende straal, de normaal en de gebroken straal liggen in een plat vlak.

2) $\frac{\sin i}{\sin r} =$ een constant getal.

3) De gang van een lichtstraal is bij breking omkeerbaar.

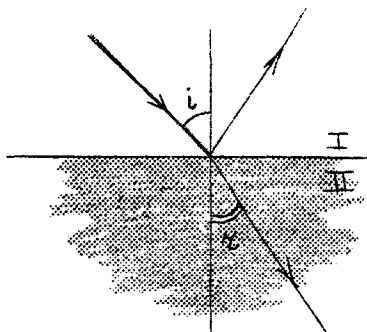
Dit resultaat staat bekend als de Wet van Snellius.

Vraag: Hoe luidt de Wet van Snellius?

Antw.: 1)

2)

3)

3. De BREKINGSINDEX.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \underline{\underline{\text{constant getal.}}}$$

Dit constante getal is een natuurconstante; het wordt door de natuur zelf bepaald. Het hangt alleen af van de aard van de stoffen I en II.

5 Gym.

Op de IV^e HBS zullen we bewijzen dat dit constante getal gelijk is aan de verhouding van de snelheden die het licht in de stoffen I en II heeft.

Dit constante getal noemt men de brekings-index voor het geval dat de lichtstraal gaat van I naar II.

Het wordt aangegeven door $n_{I \rightarrow II}$.

dus:

$$\frac{\sin i_I}{\sin r_{II}} = n_{I \rightarrow II}$$

Vraag: Wat wil zeggen, de brekingsindex van lucht \rightarrow glas is $\frac{3}{2}$

Antw.: Gaat de lichtstraal van lucht \rightarrow glas, dan is

$$\frac{\sin i_{\text{lucht}}}{\sin r_{\text{glas}}} = \frac{3}{2}$$

Vraag: Hoe groot is nu de brekingsindex van glas \rightarrow lucht?

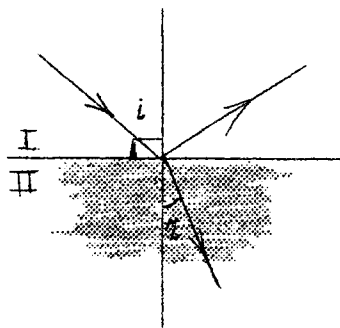
Antw.: $n_{\text{glas} \rightarrow \text{lucht}} = \frac{2}{3}$, want de gang van een lichtstraal is bij breking omkeerbaar.

NB. Vraag: Welke mogelijkheden kunnen zich bij deze breking voordoen; m.a.w. welke waarden kan de brekingsindex hebben?

Antw.: Er zijn drie mogelijkheden.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n_{I \rightarrow II}$$

$$\angle i > \angle r$$



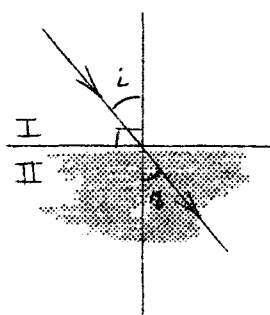
De lichtstraal gaat dus van grote hoek \rightarrow kleine hoek.

Stof II noemt men optisch dichter dan I.

Dus $i_I > r_{II} \rightarrow$

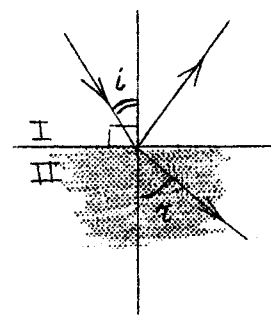
$$\frac{\sin i_I}{\sin r_{II}} > 1, \text{ want:}$$

$$i_I = r_{II}$$



$$n_{I \rightarrow II} = 1$$

$$i_I < r_{II}$$



De lichtstraal gaat nu van kleine naar grote hoek.

Stof I is nu optische dichter

$i_I < r_{II} \rightarrow$

$$\sin i_I < \sin r_{II}$$

$$\sin i_I > \sin r_{II}$$

dus.

$$n_{I \rightarrow II} > 1.$$

Conclusie:

Als $n > 1$, dan gaat de lichtstraal van grote hoek \rightarrow kleine hoek:
Stof II is optisch dichter dan I.

$$\frac{\sin i_I}{\sin r_{II}} < 1.$$

dus:

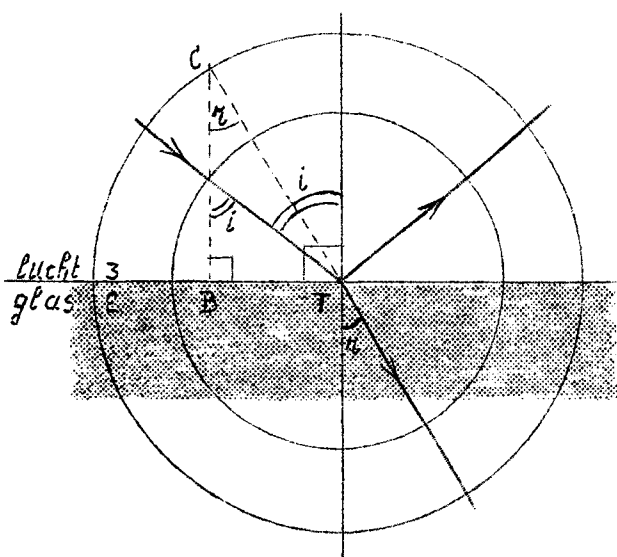
$$n_{I \rightarrow II} < 1.$$

Conclusie:

Als $n < 1$, dan gaat de lichtstraal van kleine hoek \rightarrow grote hoek:
Stof I is optisch dichter dan II.

§ 4. De constructie van Snellius.

a)



Gegeven: De lichtstraal AT treft het grensvlak tussen lucht en glas:
lucht \rightarrow glas.

Gevraagd: Construeer de gebroken straal.

Constr.: Zie nevenstaande fig.

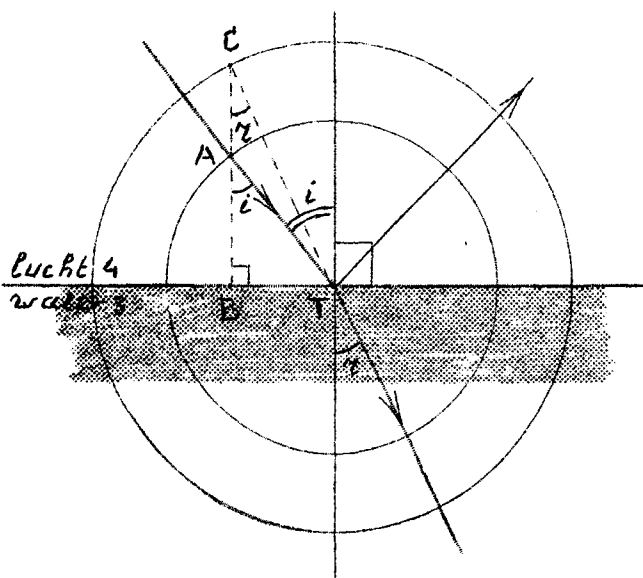
Bewijs:

$$\left. \begin{aligned} \sin i &= \frac{BT}{AT} \\ \sin r &= \frac{BT}{CT} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{\frac{BT}{AT}}{\frac{BT}{CT}} = \frac{BT}{AT} \times \frac{CT}{BT}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{CT}{AT} = \frac{3}{2}$$

b)



Gegeven: De lichtstraal AT treft het grensvlak tussen lucht en water:
lucht \rightarrow water.

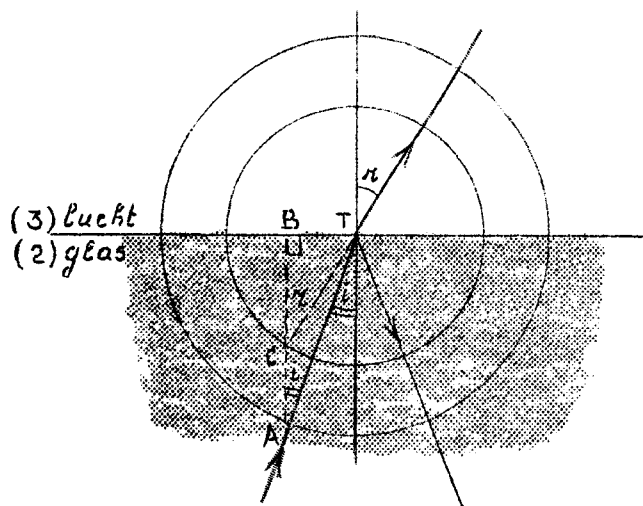
Gevraagd: Construeer de gebroken straal.

Constr.: Zie nevenstaande fig.

Bewijs:

$$\left. \begin{aligned} \sin i &= \frac{BT}{AT} \\ \sin r &= \frac{BT}{CT} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{CT}{AT} = \frac{4}{3}$$



Gegeven: De lichtstraal AT treft het grensvlak tussen glas en lucht:
glas \rightarrow lucht.

Gevraagd: Construeer de gebroken straal.

Constr.: Zie nevenstaande fig.

Bewijs:

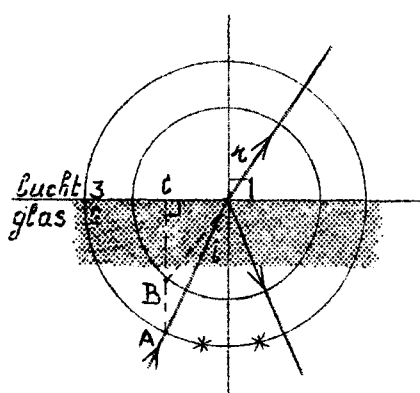
$$\left. \begin{aligned} \sin i &= \frac{BT}{AT} \\ \sin r &= \frac{BT}{CT} \end{aligned} \right\}$$

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{CT}{AT} = \frac{2}{3}$$

NB. 5. De totale terugkaatsing.

We beschouwen het geval, dat de lichtstraal gaat van glas \rightarrow lucht.

De vraag is nu of we de invalshoek zo groot kunnen maken als we willen.

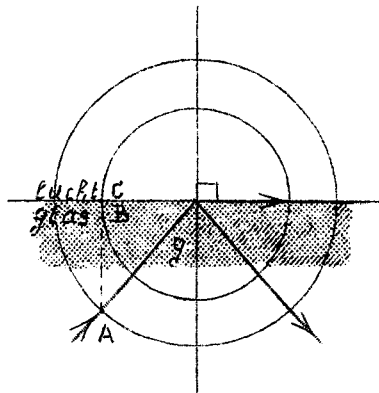


We hebben de gebroken straal geconstr. volgens Snellius.

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{2}{3}$$

Wordt $\angle i$ groter, dan komen de punten B en C dichter bij elkaar, dus $\angle r$ wordt groter.

De vraag is nu, kunnen we $\angle i$ zo groot maken als we willen?



We maken $\angle i$ zo groot dat B en C samenvallen.

De hoek van breking is nu 90° .

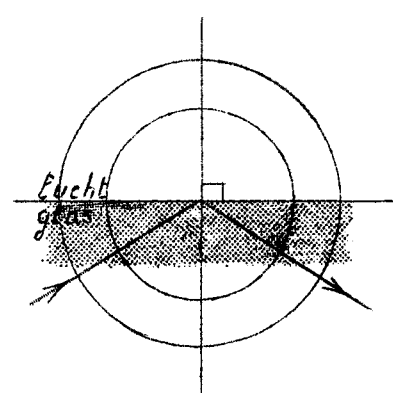
Uit de constr. en de proef blijkt, dat de gebroken straal scheert langs het oppervlak, maar zeer lichtzwak is; de teruggekaatste straal heeft nu bijna alle energie gekregen. Deze invalshoek heet de grenshoek.

$$\frac{\sin g}{\sin 90^\circ} = \frac{2}{3}$$

dus:

$$\sin g = \frac{2}{3}$$

In woorden: de sinus van de grenshoek is gelijk aan de brekingsindex voor het geval de lichtstr. gaat van opt. dichter \rightarrow opt. minder dichte stof.



Als de invalshoek gelijk is aan de grenshoek, treedt voor de eerste keer precies totale terugkaatsing op.

Wordt de invalshoek groter dan de grenshoek, dan wordt de lichtstraal alleen maar totaal teruggekaatst.

Dus: het oppervlak van het glas werkt als een gewone spiegel.

Conclusie: Gaat een lichtstraal van glas \rightarrow lucht, dan gaat de lichtstraal van kleine hoek \rightarrow grote hoek. Maar de invalshoek mag niet groter worden dan de grenshoek.

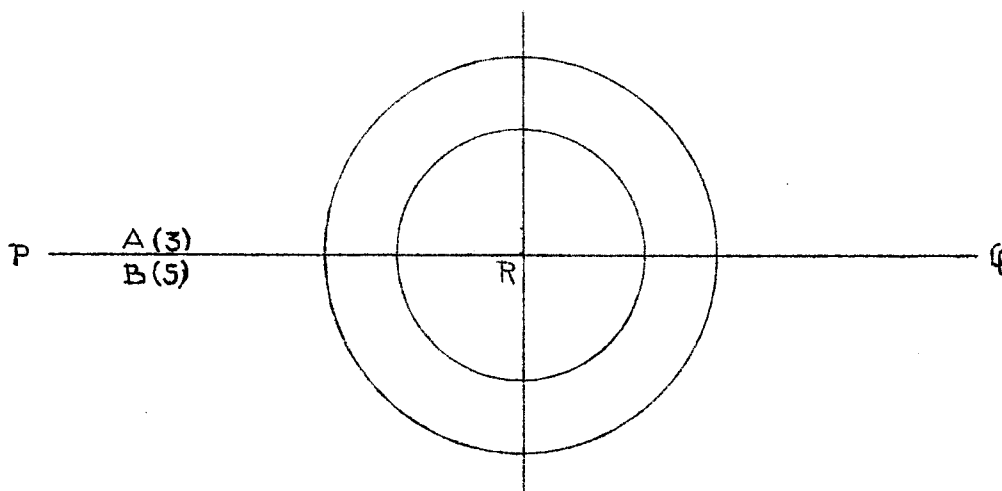
Is de invalshoek gelijk of groter dan de grenshoek, dan wordt de lichtstraal totaal teruggekaatst.

De sinus van de grenshoek is gelijk aan de brekingsindex voor het geval de lichtstraal gaat van de optisch dichtere \rightarrow de optisch minder dichte stof;

$n_{\text{opt.dichter}} \rightarrow$ optisch minder dichte stof.

Bij de totale terugkaatsing blijft de lichtstraal geheel in de optisch dichtere stof.

Opgave: Gegeven: Zie fig.



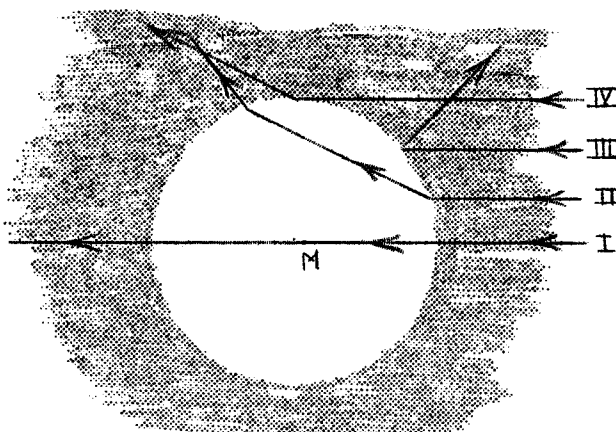
- a) Gevraagd: Uit welke richting moet de lichtstraal komen, als deze in R totaal wordt teruggekaatst?

Antwoord: De lichtstraal moet geheel verlopen in de optisch dichtere stof. In dit geval in stof A.

- b) Gevraagd: Construeer de lichtstraal die in R totaal wordt teruggekaatst.

Constr.: Zie fig. boven.

Vraag: Waarom blinken dampbellen die in een kokende vloeistof opstijgen alsof ze verzilverd zijn.



Antw.: Water is optisch dichtere dan waterdamp.

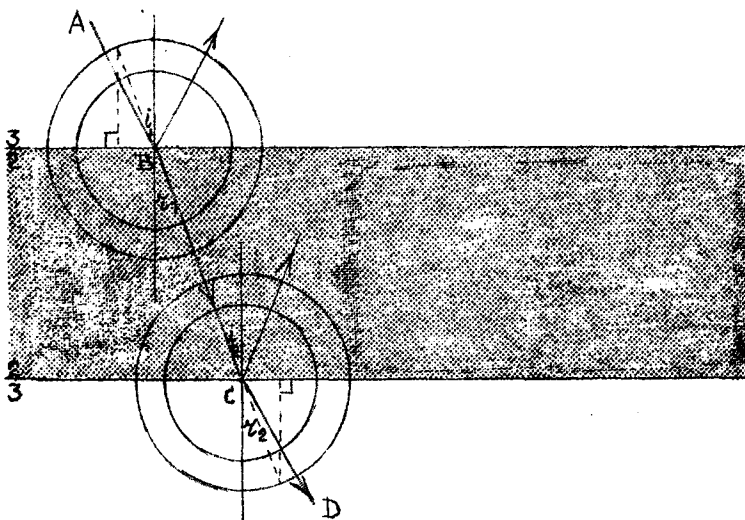
Er heeft totale terugkaatsing plaats aan het grensvlak, (oppervl. dampbel) water \rightarrow damp.

Het oppervlak werkt dus als een spiegel, en geeft dus de indruk dat de dampbel verzilverd is.

Vraag: Noem technische toepassingen van van de totale terugkaatsing.

Antw.: 1^o) Periscoop. 2^o) Verrekijker. 3^o) Omkeer-prisma.

§ 6. De breking door een plan-parallelele plaat.



Bewering: $CD \parallel AB$

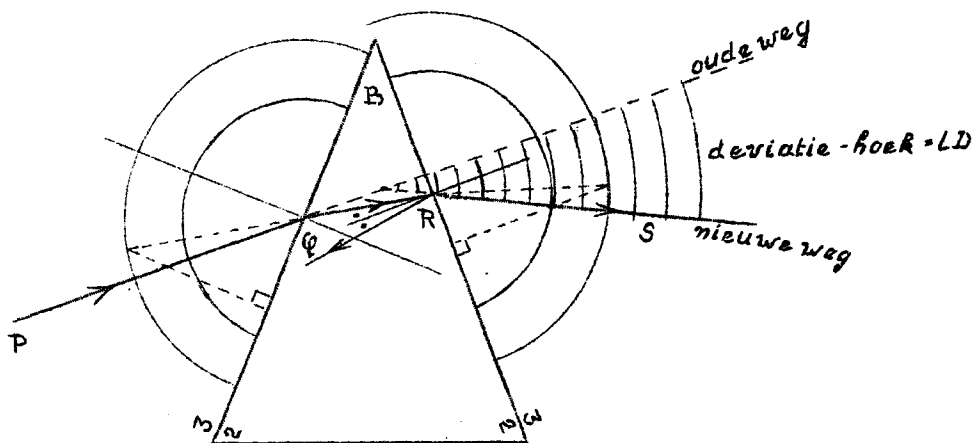
Bewijs:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\sin i_1}{\sin r_1} &= \frac{3}{2} \longrightarrow \sin i_1 = \frac{3}{2} \sin r_1 \\ \frac{\sin i_2}{\sin r_2} &= \frac{2}{3} \longrightarrow \sin i_2 = \frac{2}{3} \sin r_2 \end{aligned} \right\} \sin i_1 = \frac{3}{2} \sin i_2$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{2}{3} \sin i_1 &= \sin i_2 \\ \frac{2}{3} \sin r_2 &= \sin i_2 \end{aligned} \right\} \angle i_1 = \angle r_2 \longrightarrow AB \parallel CD$$

Conclusie: Gaat een lichtstraal door een plan-paralleleleplaat, dan loopt de uittredende straal \parallel invallende straal; de lichtstraal wordt dus alleen maar \parallel aan zichzelf verschoven.

§ 7. De breking door een prisma.



De figuur stelt een prisma voor, waarvan de ribben loodrecht staan op het vlak van tekening; $\angle B$ heet de brekende hoek.

Gevraagd: Construeer de gang van de lichtstraal PQ bij breking door het prisma.

Constr.: Zie fig. op de vorige blz.

We moeten hier 2 x de constructie van Snellius toepassen.

Opmerking: De lichtstraal wordt dus 2 x gebroken, en wel van de brekende ribbe af.

$\angle D$ heet de deviatie.

We zullen proef-ondervindelijk bewijzen dat de deviatie altijd groter is dan een bepaalde waarde.

De deviatie is minimaal als QR een gelijkbenige driehoek afsnijdt.

Opgaven:

1) Gegeven: Een glazen prisma met brekende hoek = 60° .

Gevr.: a) Construeer een straal die in het prisma een gelijkbenige driehoek afsnijdt.
Bepaal de deviatie.

b) Teken in dezelfde figuur een andere lichtstraal met andere invalshoek. $i = 30^\circ$ of $i = 60^\circ$.
Bepaal de deviatie.

c) Bepaal met een gradenboog de deviatie-hoeken in beide gevallen.

Er moet uitkomen:

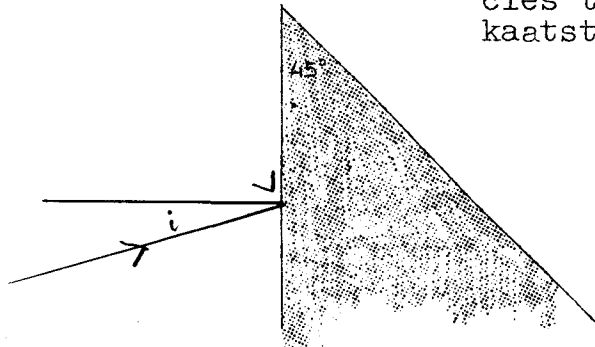
deviatie in a) is $<$ dan de deviatie in b).

2) Gegeven: Een glazen prisma met een brekende hoek van 60° .

Gevr.: Construeer een lichtstraal die aan het tweede grensvlak precies totaal wordt teruggekaatst.

3) Gegeven: Een prisma met een brekende hoek van 45° .

Gevr.: Hoe groot moet n zijn opdat deze lichtstraal aan het tweede grensvlak precies totaal wordt teruggekaatst.



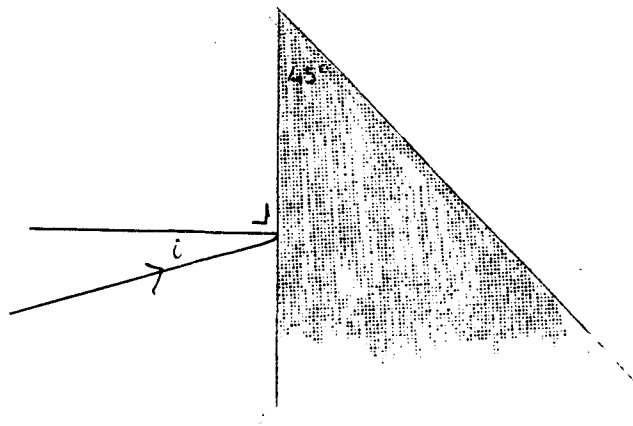
$$i = 10^\circ$$

Bereken de deviatie.

4) Gegeven: Een glazen prisma in zwavelkoolstof heeft een brekende hoek van 45° .

$$n_{\text{CS}_2} \rightarrow \text{glas} = \frac{3}{5}$$

Gevr.: Construeer de gang van deze lichtstraal.



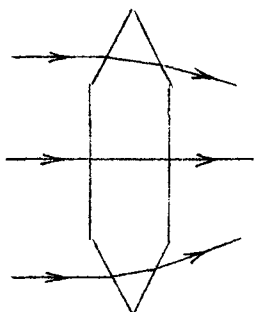
$$i = 10^\circ$$

Bereken de deviatie.

L E N Z E N.Inleiding: De soorten.

De lenzen worden ingedeeld in twee families.

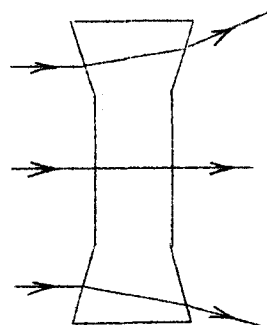
BCL (convex)



De convexe lenzen worden naar het uiterlijk gekenmerkt door het feit dat ze in het midden dikker zijn dan aan de rand.

Convexe lenzen hebben een convergerend vermogen.

HOL (concaaf)



De concave lenzen zijn in het midden dunner dan aan de rand.

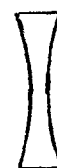
Concave lenzen hebben een divergerend vermogen.

Afstammelingen.

1) bi-convex.



1) bi-concaaf.



2) plan-convex.



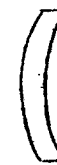
2) plan-concaaf.



3) concaaf-convex.



3) convex-concaaf.

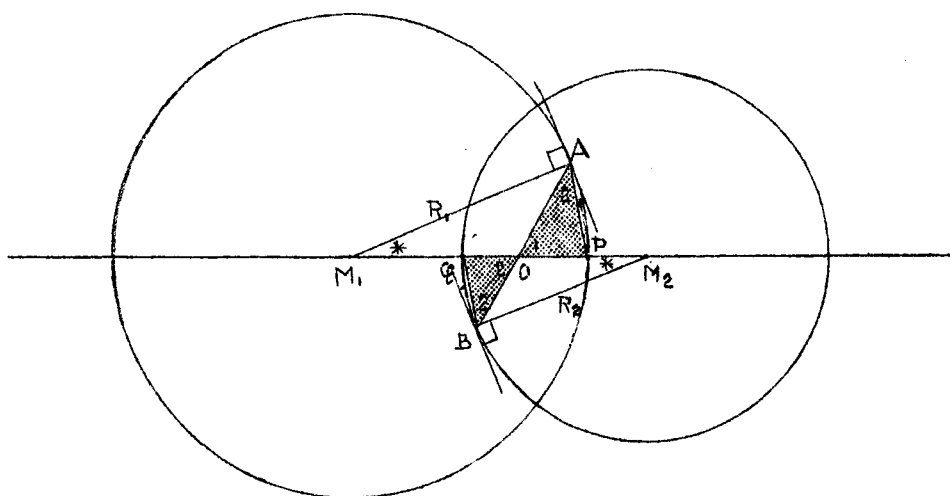


Deel A. DE CONVEXE LENZEN.

1. Het optisch middelpunt.

Punt 1) Meetkunde som.

zie vlg. blz.

Punt 1) Meetkunde som.

Gegeven: A en B zijn zo'n punten, dat de raaklijn in A // loopt aan raaklijn in B.
Dus: $M_1A \parallel M_2B$.

Te Bew.: $OP : OQ = R_1 : R_2$

Bewijs : $\triangle OPA \sim \triangle OQB$ want raakl. in A // raakl. in B.

$$\left. \begin{array}{l} \text{dus } \angle A_{1+2} = \angle B_{1+2} \\ \text{maar } \angle A_1 = \angle B_1 = \frac{1}{2}\angle* \end{array} \right\} \begin{array}{l} \angle A_2 = \angle B_2 \\ \text{verder } \angle O_1 = \angle O_2 \end{array} \Bigg\} \text{HH}$$

$$\text{dus: } OP : OQ = OA : OB \quad (I)$$

$$\triangle OAM_1 \sim \triangle OBM_2 \text{ (HH)} \rightarrow OA : OB = R_1 : R_2 \quad (II)$$

Uit (I) en (II) volgt:

$$\underline{OP : OQ = R_1 : R_2}$$

q.e.d.

Nu was $\angle*$ willekeurig. Dit geldt dus voor iedere $\angle*$.

We kunnen ook zo zeggen:

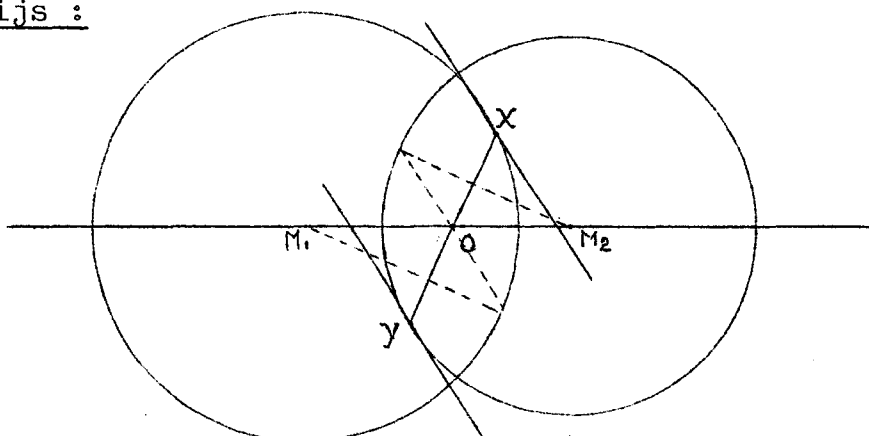
Als A en B twee punten zijn zo dat de raaklijn in A // de raaklijn in B, dan verdeelt de lijn AB het lijnstuk FQ in twee delen, zo dat $OP : OQ = R_1 : R_2$.

Het omgekeerde is ook waar. Trekt men door O een willekeurige lijn, die de cirkels snijdt in de punten X en Y, dan lopen de raaklijnen in X en Y //.

Dus: Gegeven: $OP : OQ = R_1 : R_2$

Te bew.: Raaklijn in A // raaklijn in B.

Bewijs :

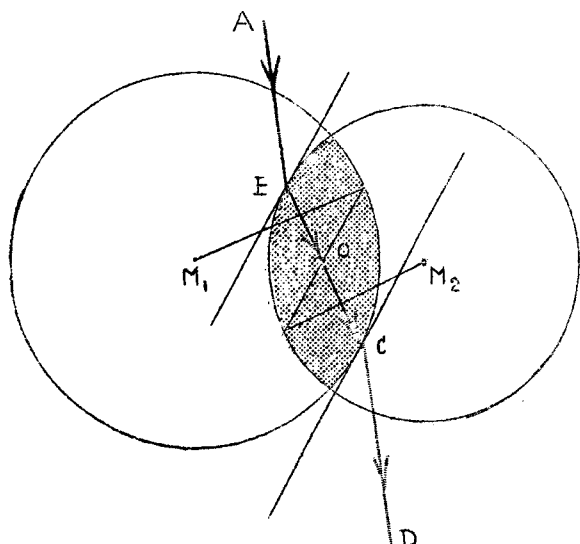


We hebben het punt O eerst geconstrueerd.

XY is een willekeurige lijn door O.

Bewijs nu zelf ($\sim \triangle \triangle$) dat de raaklijn in X // raaklijn in Y.

Punt 2) Natuurkundige toepassing van deze meetkundige eigenschap.



Het gearceerde oppervlak stelt een biconvexe lens voor. We beschouwen een lichtstraal die zò op de lens valt, dat de gebroken straal IN HET GLAS door het punt O gaat. Daar de raakvlakken in B en C evenwijdig lopen, telt de lens voor deze lichtstraal voor een planparallele plaat. Dus: De uittrede straal $CD // AB$.

Dit geldt voor iedere lichtstraal, die in het glas door O gaat.

Dit punt O noemt men het optisch middelpunt van de lens.

Conclusie: Gaat een lichtstraal in het glas door het optisch middelpunt van de lens, dan loopt de uittrede straal // invallende straal.

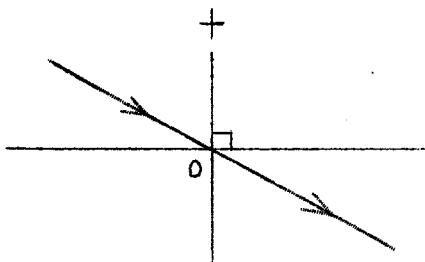
Opmerking: We hebben deze stelling alleen bewezen voor een biconvexe lens; zij geldt echter voor iedere lens.

Opgave.

Construeer het optisch middelpunt voor:



Punt 3) Bij het maken van de sommen stellen we de lens voor door een enkele lijn, die in het optisch middelpunt staan op de verbindingslijn der kromte middelpunten (M_1 en M_2)



Het plus-teken boven de lens geeft aan, dat we te doen hebben met een convexe lens.

O is dus het optisch middelpunt van de lens.

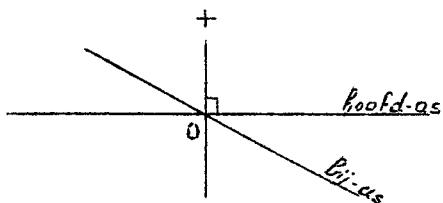
Iedere lichtstraal door het optisch middelpunt (O) gaat ongebroken door de lens.

Opmerking: Een lichtstraal gaat door de lens heen. Het gedeelte van de invallende straal, dat wordt teruggekaatst laten we geheel buiten beschouwing.

Let wel!

ER DOOR HEEN!

Punt 4) Benaming:

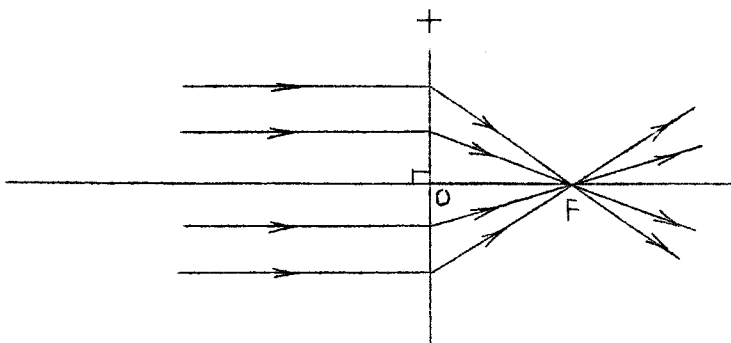


Iedere lijn door O heet een as van de lens.

De as \perp op de lens heet hoofd-as. Iedere andere as heet bij-as.

Een lens heeft dus EEN hoofd-as en veel bij-assen.

§ 2. De hoofd-brandpunten van een convexe lens.



We beschouwen een // bundel waarvan de stralen // hoofd-as op de lens vallen.

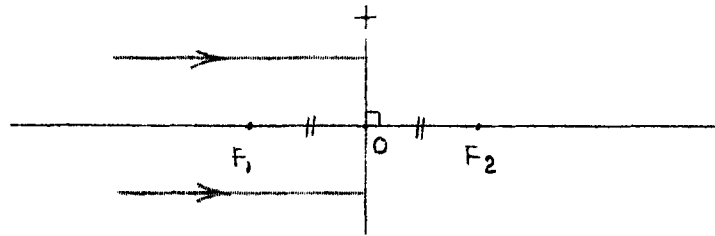
DE ERVARING leert, dat deze stralen na breking allen door eenzelfde punt van de hoofd-as gaan. F.

Dit punt wordt bepaald door de brekingsindex van het glas en door de kromming van de lensoppervlakken.

Dit punt heet hoofd-brandpunt van de lens.

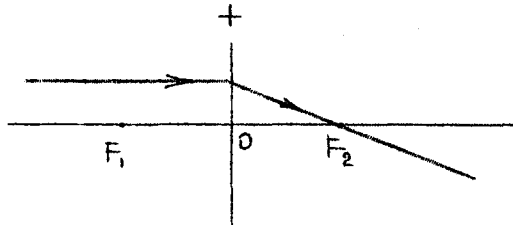
Draaien we de lens om, zo dat nu de andere kant belicht wordt, dan blijken de stralen na breking door hetzelfde punt F te gaan.

Conclusie I: Een lens heeft dus twee hoofd-brandpunten. Deze hoofd-brandpunten liggen symmetrisch t.o.v. het optisch middelpunt van de lens.

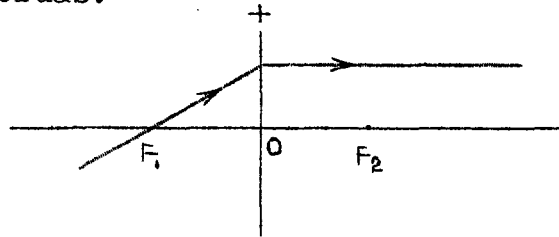


Deze brandpunten worden genummerd: Het brandpunt aan de lichtzijde van de lens heet het 1^o brandpunt, het brandpunt aan de schaduwzijde van de lens heet het 2^o brandpunt.

Conclusie II: Een lichtstraal // hoofdas gaat na breking door het tweede hoofd-brandpunt.

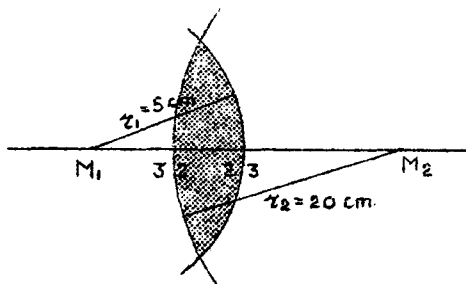


Conclusie III: Een lichtstraal door F₁ loopt na breking // aan de hoofdas.



§ 3. De grootte van de brandpuntsafstand van een lens.

De brandpunts-afstand van een lens is niet zo eenvoudig te berekenen als bij een spiegel. Het is niet de helft van de kromte-straal! Op 5 gymn. en IV HBS zullen we de volgende formule bewijzen:

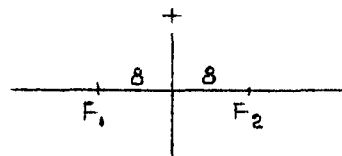


$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

In het voorbeeld:

$$\begin{aligned} \frac{1}{f} &= \left(\frac{3}{2} - 1 \right) \left(\frac{1}{5} + \frac{1}{20} \right) \\ &= \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4} = \frac{1}{8} \quad \text{dus } f = 8 \text{ cm.} \end{aligned}$$

dus



Opmerking: Bij deze formule hoort nog een afpraak:

- 1^o) bij een bol (convex) lensopp. behoort een + R.
- 2^o) bij een plat lensopp. behoort een $R = \infty$.
- 3^o) bij een hol (concaaf) lensopp. behoort een - R.

§ 4. De sterkte van een lens.

Definitie: De sterkte van een lens. = $\frac{1}{f}$ mits f is uitgedrukt in meters.

Is $f = 1$ m. \rightarrow Sterkte = $\frac{1}{1} = 1$ dioptrie.

$f = 2$ m. \rightarrow Sterkte = $\frac{1}{2}$ dioptrie.

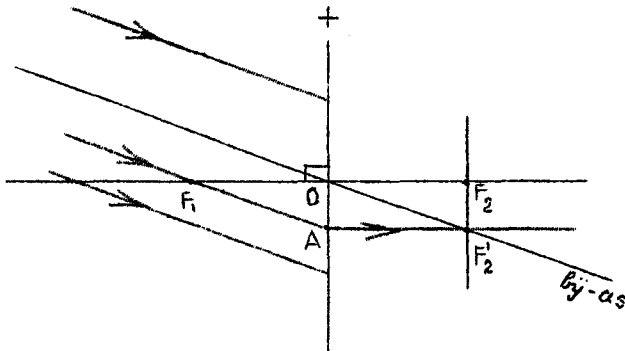
$f = 20$ cm. \rightarrow Sterkte = 5 dioptrie.

Gegeven: Sterkte = 4 dioptrie.

Gevr.: f .

Antw.: $f = \frac{1}{4}$ $f = \frac{1}{4}$ m. $f = 25$ cm.

§ 5. De bij-brandpunten.



We beschouwen een // stralenbundel waarvan de lichtstralen // bij-as op de lens vallen.

DE ERVARING leert, dat deze lichtstralen na breking door eenzelfde punt van deze bij-as gaan.

Gevraagd: Construeer dit punt.

Constructie: In deze // bundel zit ook een lichtstraal die door F_1 gaat. Deze

loopt na breking // hoofdas. We vinden dus het punt F_2^1 .

Stelling: Het punt F_2^1 ligt op de lijn door $F_2 \perp$ hoofdas.

Bewijs: Vierhoek $OF_1AF_2^1$ is een par. #

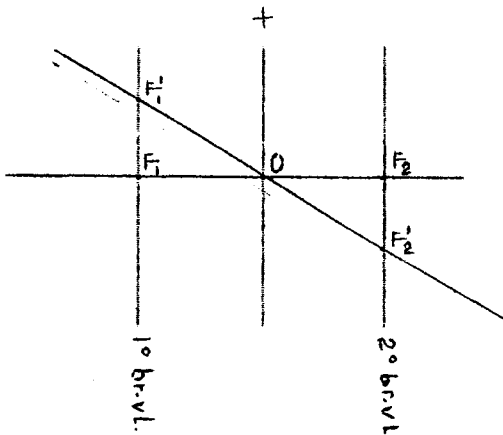
dus: $AF_2^1 = OF_1 = OF_2 \rightarrow AF_2^1 = OF_2$ } dus vierh. $OAF_2^1F_2$ is
 en $AF_2^1 \parallel OF_2$ } een par.
 maar $\angle O = 90^\circ$
 dus: rechthoek.
 dus: $\angle F_2 = 90^\circ$.

Benaming: F_2^1 heet een tweede bij-brandpunt van de lens.

Conclusie: De meetkundige plaats van de tweede bij-brandpunten van een lens is het plat vlak dat in het tweede hoofd-brandpunt \perp hoofdas.

Gevraagd: Wat is de meetkundige plaats van de eerste bij-brandpunten van de lens?

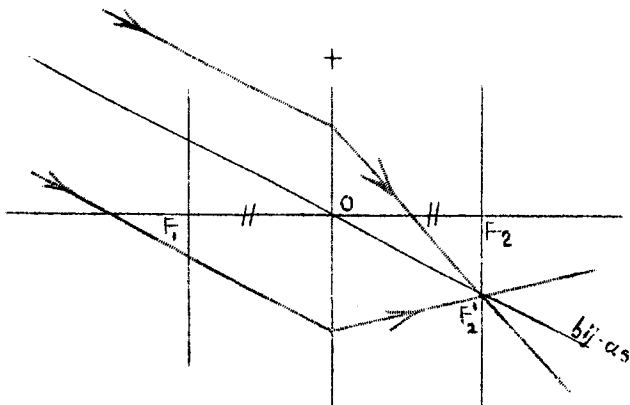
Antwoord: De meetkundige plaats van de eerste bij-brandpunten van de lens is een plat vlak, dat in het eerste hoofd-brandpunt \perp hoofdas.



Een lens heeft dus twee brandvlakken, die in de hoofdbrandpunten \perp staan op de hoofdas.

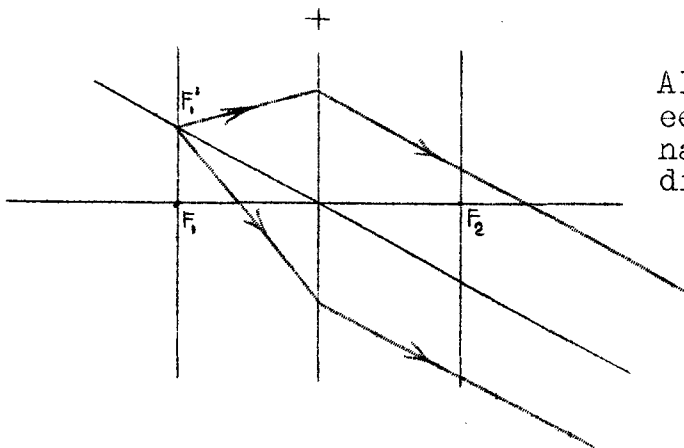
Conclusies:

I



Alle lichtstralen // bij-as,
gaan na breking door het 2^o
brandpunt van deze bij-as.

II



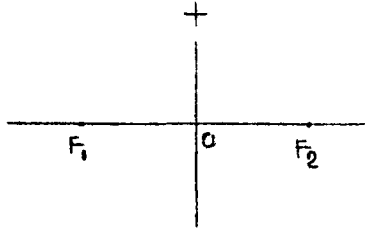
Alle lichtstralen door een
eerste bij-brandpunt, lopen
na breking // aan de as van
dit bij-brandpunt.

§ 6. Overzicht van de bijzondere stralen bij een positieve lens.

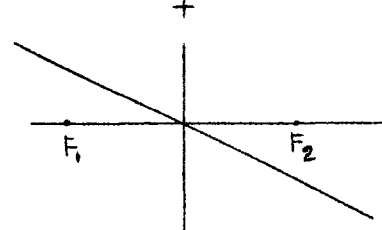
Hoofd-as.

Bij-as.

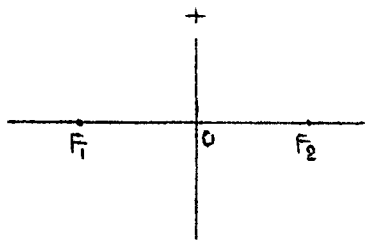
1)



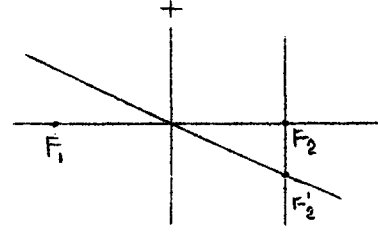
1)



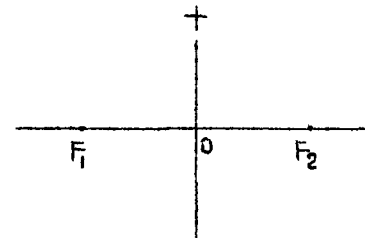
2)



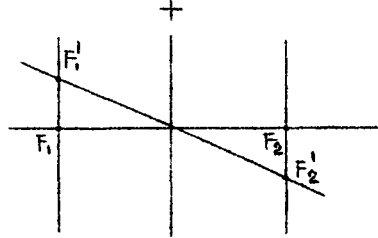
2)



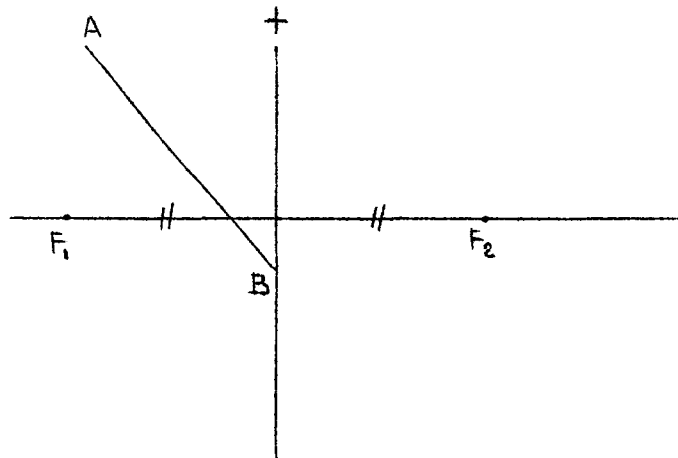
3)



3)



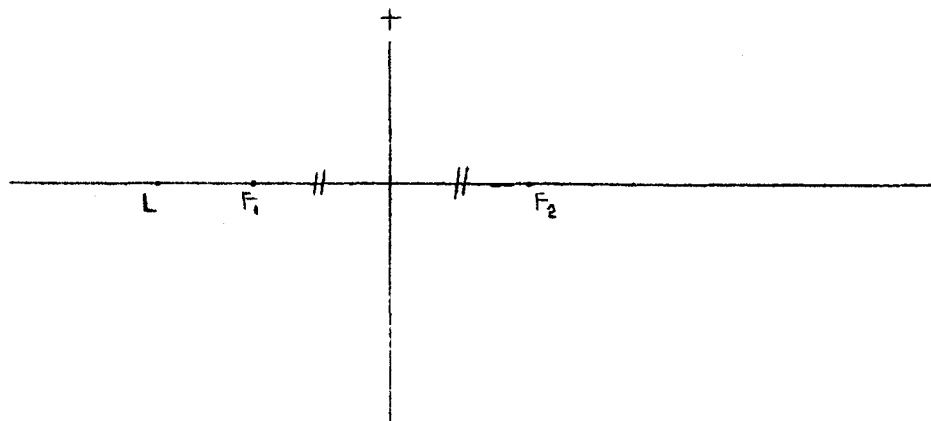
4) Willekeurige straal.



Deze constructies vormen de "spelregels".

§ 7. De BEELDVORMING bij een positieve lens.

Deel I. Lichtpunt op de hoofd-as.



Gegeven: L is een willekeurig lichtpunt ergens op de hoofd-as van de lens.

De ervaring leert, dat alle lichtstralen, die uit L vertrekken, na breking door de lens door eenzelfde punt van de hoofdas gaan.

Dus: SAMEN UIT, SAMEN THUIS op dezelfde as.

Gevr.:a) Construeer dit thuispunt.

Constr.: Zie figuur op blz. 35.

Gevr.:b) Construeer de lichtstraal die uit L vertrekt en na breking door A gaat.

Benaming: B noemt men het beeldpunt van L.

Vraag: Wat verstaat men in de natuurkunde onder een lichtpunt?

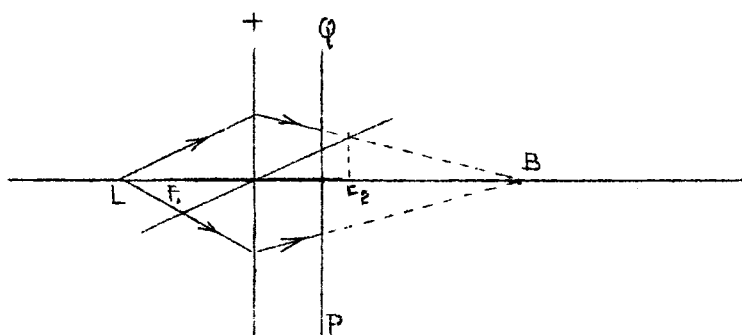
Antw.: Onder een lichtpunt verstaat men, het meetkundige snijpunt van de op de lens vallende lichtstralen.

Vraag: Wanneer noemt men een lichtpunt reëel en wanneer virtueel?

Antw.: Een lichtpunt is reëel, als het meetkundige snijpunt vòòr de lens ligt, en virtueel, als het meetkundige snijpunt van de op de lens vallende lichtstralen achter de lens ligt.

Dit is te verwezenlijken door in de voorgaande figuur, in PQ een tweede lens te plaatsen.

Construeer hiervan het beeld.



Het beeld door de eerste lens ontworpen is nu virtueel voorwerp voor de tweede lens.

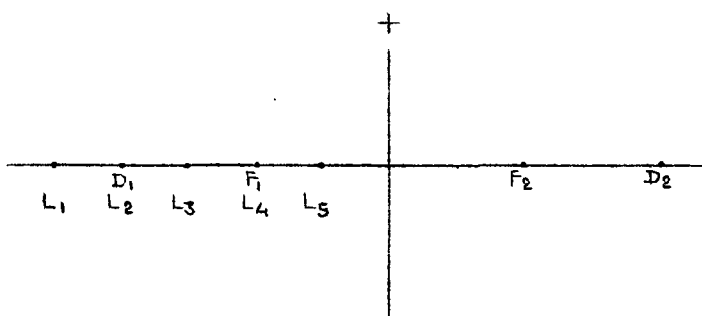
Vraag: Wat verstaat men onder een beeldpunt?

Antw.: Onder een beeldpunt verstaat men het meetkundige snijpunt van de door de lens gebroken stralen.

Vraag: Wanneer is het beeldpunt reëel en wanneer virtueel?

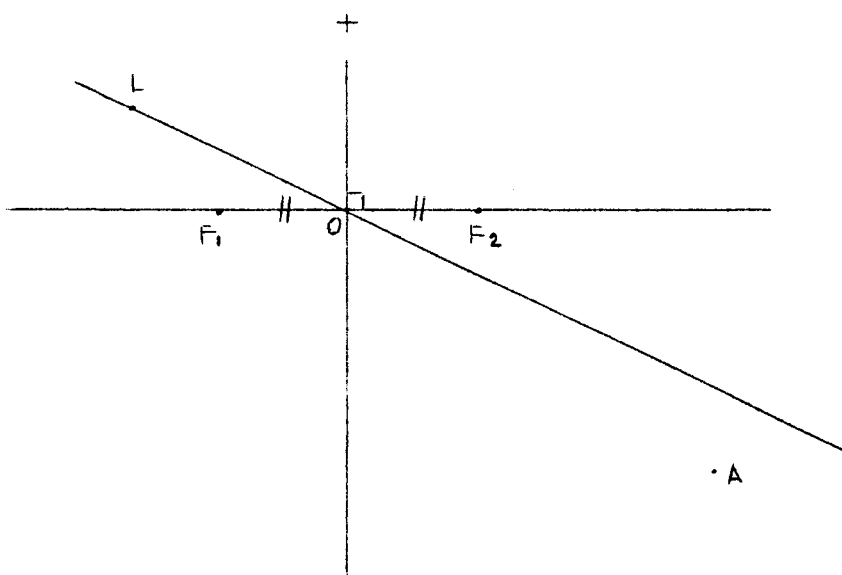
Antw.: Het beeldpunt is reëel, als het achter de lens ligt; virtueel, wanneer het meetkundige snijpunt van de gebroken stralen vòòr de lens ligt.

Opgave:



a) Construeer de beeldpunten van L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 .

b) Construeer de lichtstraal uit L, die na breking door A gaat.

Deel II. Lichtpunt op een bij-as.

Gegeven: L is een willekeurig punt van een bij-as.

De ervaring leert, dat de lichtstralen die uit L vertrekken na breking door eenzelfde punt van de as gaan.

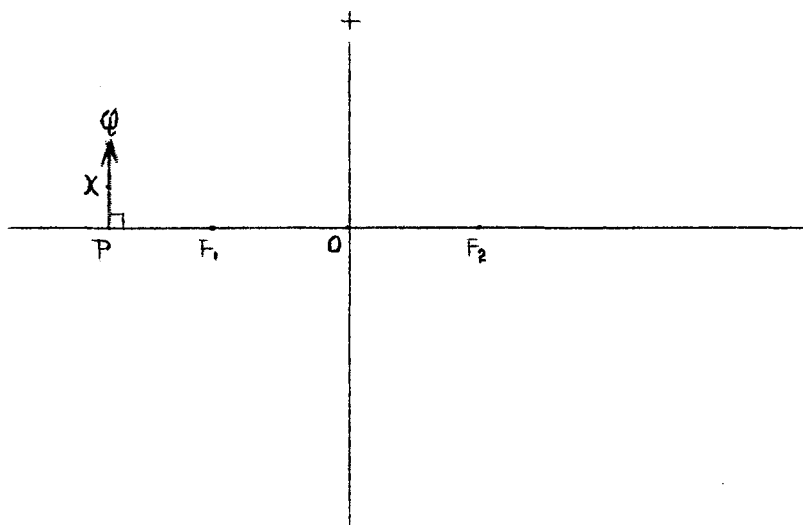
Gevr. a) Construeer dit punt.

b) Construeer een willekeurige straal welke uit L vertrekt.

c) Construeer een straal uit L, welke na breking door punt A gaat.

Deel III. Het beeld van een voorwerp.

1)



Gegeven: PQ is een lichtgevend voorwerp \perp hoofd-as.

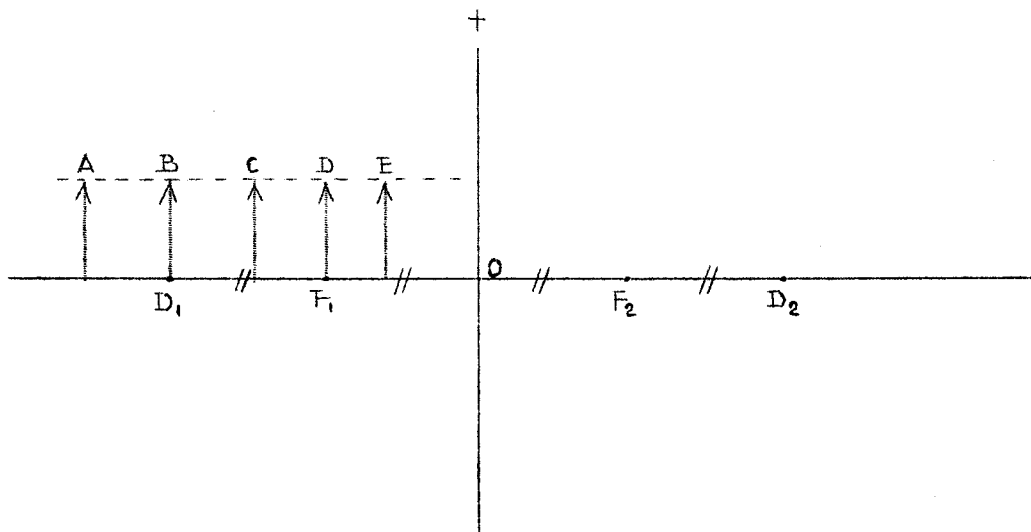
Gevr.: Construeer het beeld (P'Q')

Constr.: Zie figuur.

Concl.: P'Q' is het beeld van PQ.

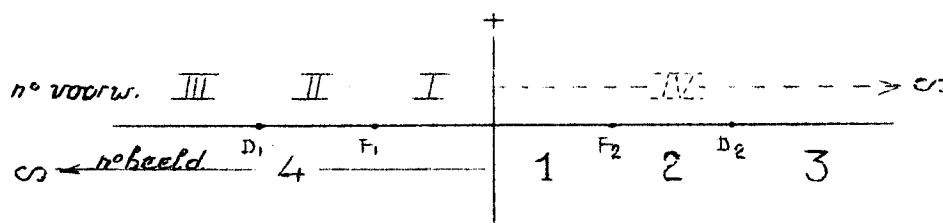
- 2) Opgave.
- Construeer de gang van een willekeurige lichtstraal uit Q.
 - Construeer de gang van een willekeurige lichtstraal uit P.
 - Construeer de gang van een willekeurige lichtstraal uit X.
 - Construeer de lichtstraal die uit X vertrekt, en na breking door punt A gaat.

Deel IV. Verschillende gevallen.



- Conclusies:
- 1) Voorwerp en beeld bewegen in dezelfde richting.
 - 2) Is $v > 2f$, dan ligt het beeld tussen F_2 en D_2 en is reëel, omgekeerd en verkleind.
 - 3) Is $v = 2f$, dan ligt het beeld in D_2 , en is reëel, omgekeerd en gelijk aan het voorwerp.
 - 4) Ligt het voorwerp tussen D_1 en F_1 , ($D_1 > v > F_1$) dan ligt het beeld tussen D_2 en oneindig, is reëel, omgekeerd en vergroot.
 - 5) Ligt het voorwerp in F_2 , dan ligt het beeld in het oneindige.
 - 6) Ligt het voorwerp binnen de eerste brandpuntsafstand ($v < F_1$), dan is het beeld virtueel, recht-opstaand, en vergroot.

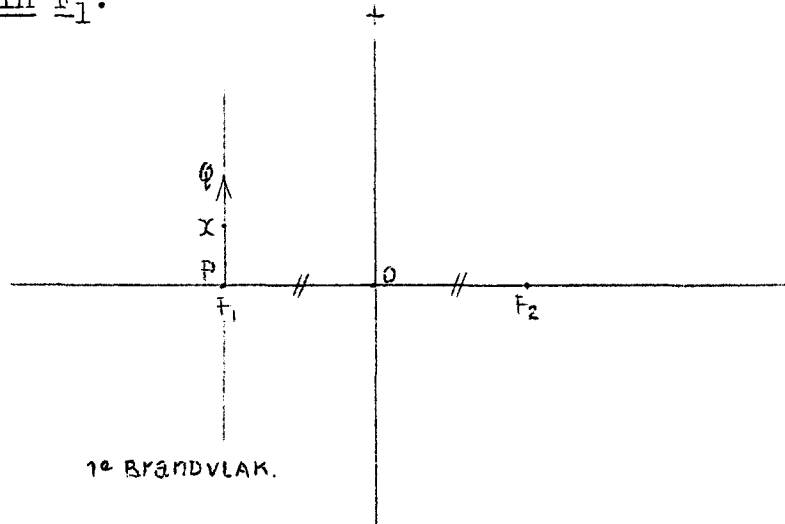
Regels van ESBACH.



- Conclusies:
- 1) De som van de nummers van voorwerpgebied en beeldgebied = 5.
 - 2) Een beeld is dan en slechts dan VIRTUEEL als het voorwerp ligt in I.
 - 3) Een beeld is vergroot als het nummer van het beeldgebied hoger is dan het nummer van het voorwerpgebied.
 - 4) Een beeld is omgekeerd, als voorwerp en beeld aan weerskanten van de lens liggen.
 - 5) Een beeld is recht-opstaand, als voorwerp en beeld aan dezelfde kant van de lens liggen.

Belangrijke gevallen afzonderlijk geconstrueerd.

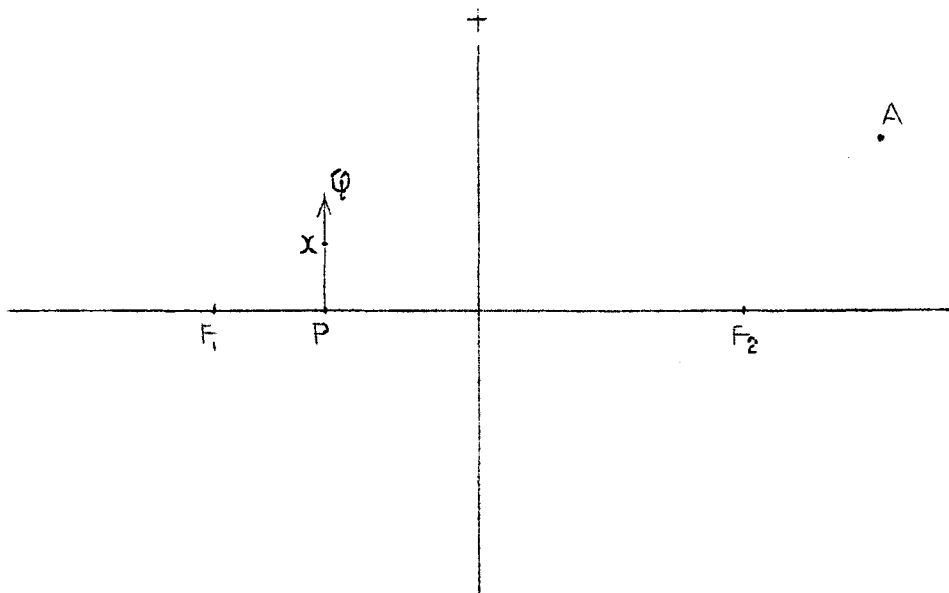
Punt 1) Voorwerp in F_1 .



Het voorwerp ligt nu geheel in het brandvlak F_1 ; ieder punt van het voorwerp is dus een brandpunt van de lens.

- Gevraagd:
- Construeer de gang van een stralenbundel die uit P vertrekt.
 - Construeer de gang van een stralenbundel die uit Q vertrekt.
 - Construeer de lichtstraal die uit X vertrekt en na breking door A gaat.

Punt 2) Het voorwerp binnen de eerste brandpunts-afstand.



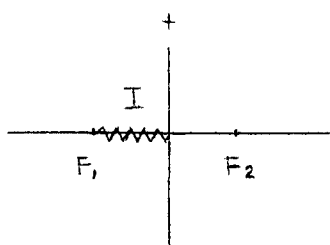
Vraag: Wat neemt het oog waar, dat zich in A bevindt?

Antw.: A meent, dat $P'Q'$ het voorwerp is dat het waarneemt. Het virtuele beeld door de lens ontworpen is dus reëel voorwerp voor het oog in A . (loep)

Vraag: Wanneer ontwerpt een positieve lens een virtueel beeld?

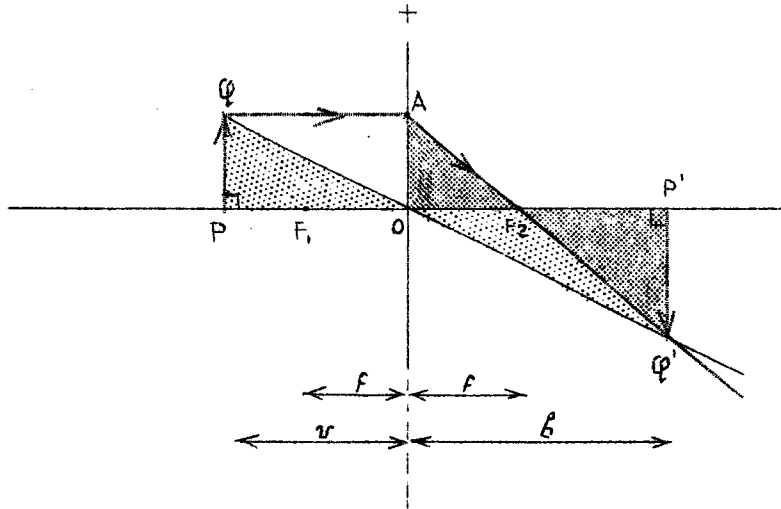
Antw.:

Een positieve lens ontwerpt DAN en SLECHTS DAN een virtueel beeld, als het voorwerp in I ligt, dus binnen de eerste brandpuntsafstand van de lens staat.



Deel V. Het verband tussen v, b en f.

1)



$$\left. \begin{array}{l} \triangle OPQ \sim \triangle OP'Q' \longrightarrow PQ : P'Q' = OP : OP' \\ \triangle PQF_1 \sim \triangle OAF_1 \longrightarrow PQ : P'Q' = PF_1 : OF_1 \end{array} \right\} \longrightarrow$$

Dus:

$$OP : OP' = PF_1 : OF_1$$

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

$$b(v-f) = v \cdot f$$

$$bv - bf - vf = 0$$

$$bf + vf - bv = 0$$

Alle termen delen door $b \times v \times f$, dan volgt:

$$\frac{bv - bf - vf = 0}{bvf}$$

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{v} - \frac{1}{b} = 0$$

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

$$\frac{1}{b} + \frac{1}{v} - \frac{1}{f} = 0$$

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

We krijgen dus bij de lenzen dezelfde formule als bij de spiegels. Deze formule is algemeen geldig.

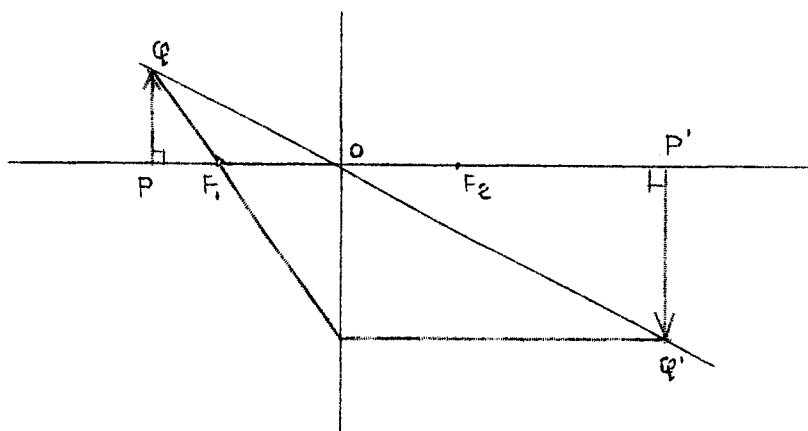
Als het beeld virtueel is, dan is b negatief.

Is het voorwerp negatief, dan is v negatief.

Is de lens divergerend dan is f negatief.

2) De vergroting.

Onder de vergroting bij een lens verstaat men hetzelfde als bij een spiegel; er gelden ook dezelfde formules.

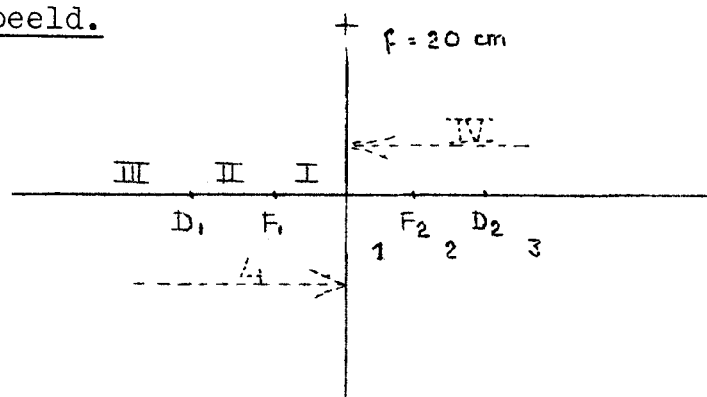


$$N = \frac{P'Q'}{PQ}, \text{ maar } \frac{P'Q'}{PQ} = \frac{|b|}{|v|}$$

Dus:

$$N = \frac{|b|}{|v|}$$

Getallenvoorbeeld.



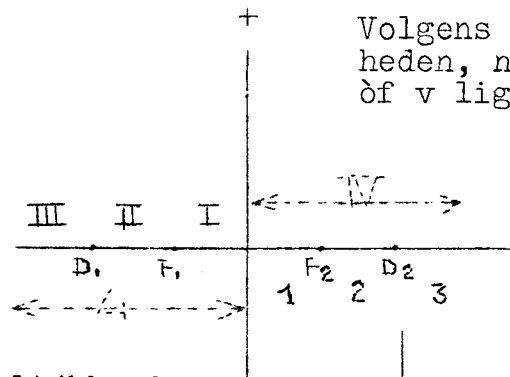
v	b	N	Esbach.
50 cm.		$N = \frac{ b }{ v } = \frac{2}{3} \times$	Voorwerp in III. beeld in 2, is reëel, omgekeerd en verkl.
40 cm.		$N = \frac{ b }{ v } = 1 \times$	Voorwerp in D ₁ Beeld in D ₂ , is reëel, omgekeerd en congr.
30 cm.		$N = \frac{ b }{ v } = 2 \times$	Voorwerp in II, beeld in 3, is reëel, omgekeerd en vergr.
20 cm.		$N = \frac{ b }{ v } = 0$	Voorwerp in F ₁ , beeld in oneindige.
15 cm.		$N = \frac{ b }{ v } = 4 \times$	Voorwerp in I, beeld in 4, is virt. recht-op-stand en vergroot.

Gegeven: $N = 2 \times$.

Het aantal cm. van de beeldsafstand is 8 cm.

Gevr.: De brandpuntsafstand en de sterkte van de lens.

Oplossing:



Volgens Esbach zijn er twee mogelijk heden, n.l.;
òf v ligt in II, of in I.

1^o mogelijkheid.

2^o mogelijkheid.

Voorw. in II \rightarrow beeld in 3.

$$\left. \begin{array}{l} v = \text{pos.} \\ b = \text{pos.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} b = +2v, \text{ want } N=2x \\ b = 8 \text{ cm} \rightarrow v = 4 \text{ cm} \end{array}$$

$$\frac{1}{4} + \frac{1}{8} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{f} = \frac{3}{8} \quad \underline{f = 2\frac{2}{3} \text{ cm.}}$$

De sterkte van de lens is hier:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{8/300\text{m}} = \frac{300}{8} = 37,5 \text{ diopt.}$$

Voorw. in I \rightarrow beeld in III

$$\left. \begin{array}{l} v = \text{pos.} \\ b = \text{neg.} \end{array} \right\} \begin{array}{l} b = -2v, \text{ want } N = 2x \\ b = -8 \text{ cm} \rightarrow v = 4 \text{ cm.} \end{array}$$

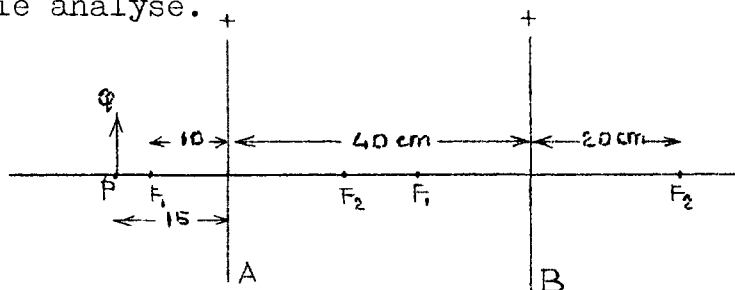
$$\frac{1}{4} - \frac{1}{8} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{8} \quad \underline{f = 8 \text{ cm.}}$$

De sterkte van de lens is hier:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{8/100\text{m}} = \frac{100}{8} = 12,5 \text{ dioptrie.}$$

Deel VI. Twee positieve lenzen met dezelfde hoofd-as.

Gegeven: Zie analyse.



Gevraagd: Bereken de plaats van het eindbeeld.

Oplossing: $\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ $\frac{1}{b} + \frac{1}{15} = \frac{1}{10}$ $\frac{1}{b} = \frac{1}{30}$ $\underline{b = 30 \text{ cm.}}$

$$N_A = \frac{|30|}{|15|} = \underline{2 \times}.$$

Gevraagd: Hoe groot is de voorwerpsafstand voor lens B.

Oplossing: $40 - 30 = 10 \text{ cm. } \underline{v_B = 10 \text{ cm.}}$

Gevraagd: Is het beeld door lens A ontworpen reëel of virtueel voorwerp voor lens B.

Antwoord: Het beeld door lens A ontworpen is reëel voorwerp voor lens B.

Gevraagd: Hoe groot is de beeldsafstand van het door lens B ontworpen beeld?

Oplossing: $\frac{1}{v} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$ $\frac{1}{10} + \frac{1}{b} = \frac{1}{20}$ $\frac{1}{b} = -\frac{1}{20}$ $\underline{b = -20 \text{ cm.}}$

Gevraagd: Wat betekent deze negatieve uitkomst?

Antwoord: Het beeld is virtueel.

Vraag: Hoe groot is N_B ?

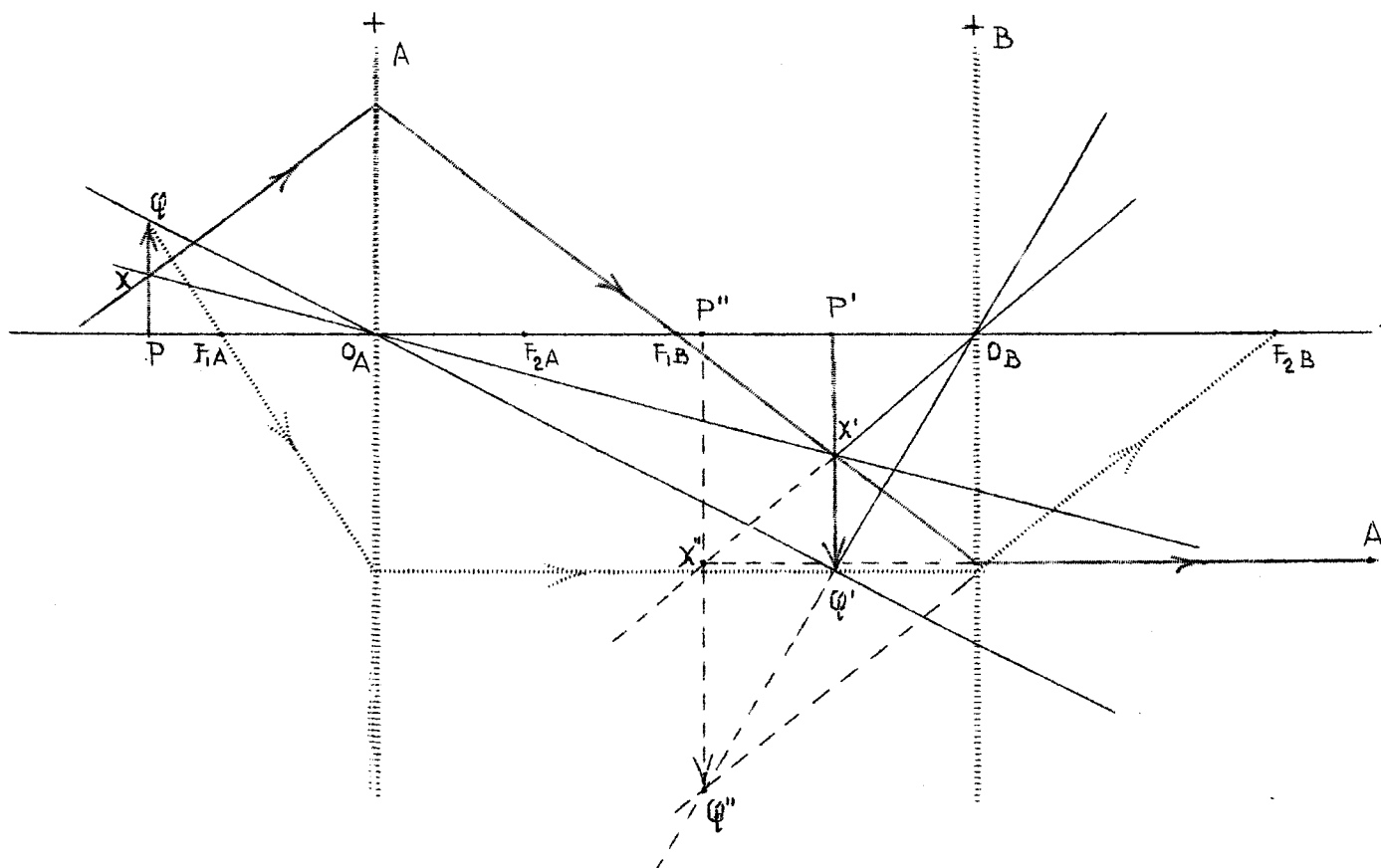
Antw.: $N_B = \frac{20}{10} = 2 \times$.

Vraag: Hoe groot is N_{tot} .

Antw.: $N_{\text{tot}} = N_A \times N_B \quad N_{\text{tot}} = 2 \times 2 = 4 \times$.

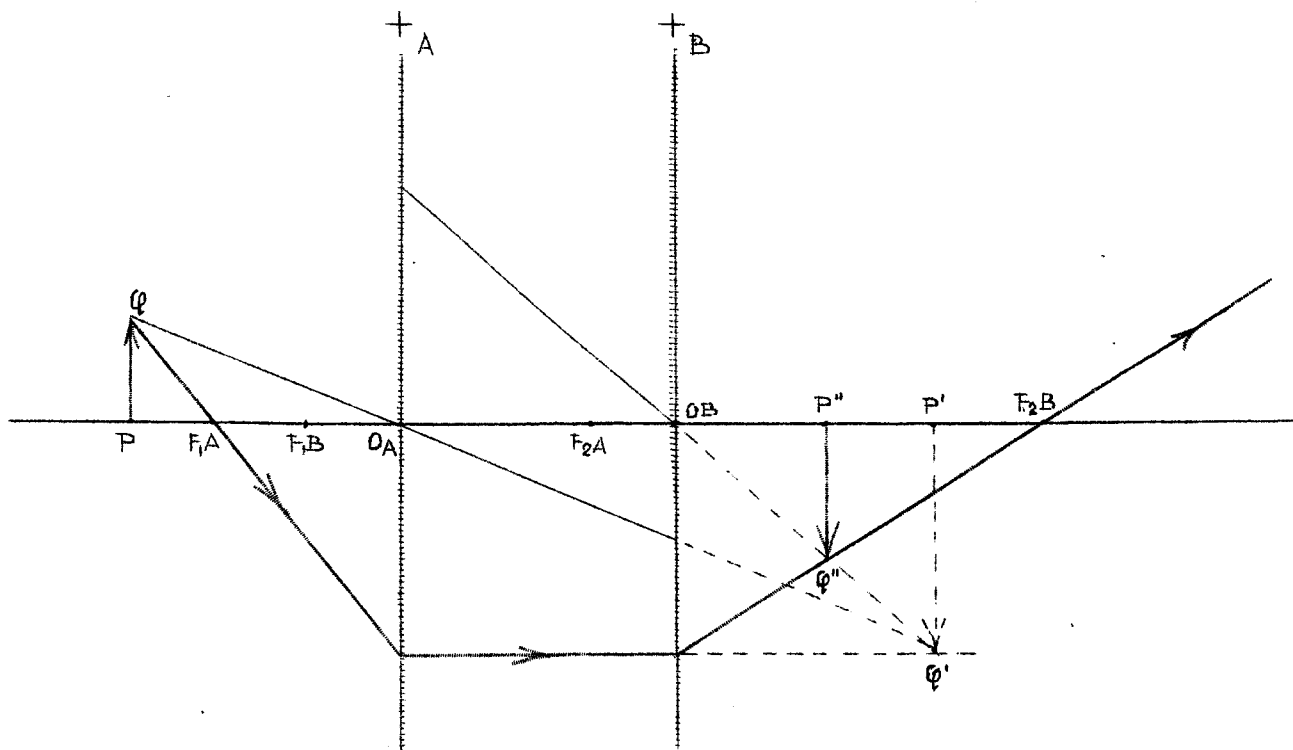
Gevr.: Construeer het eindbeeld.

Constructie.



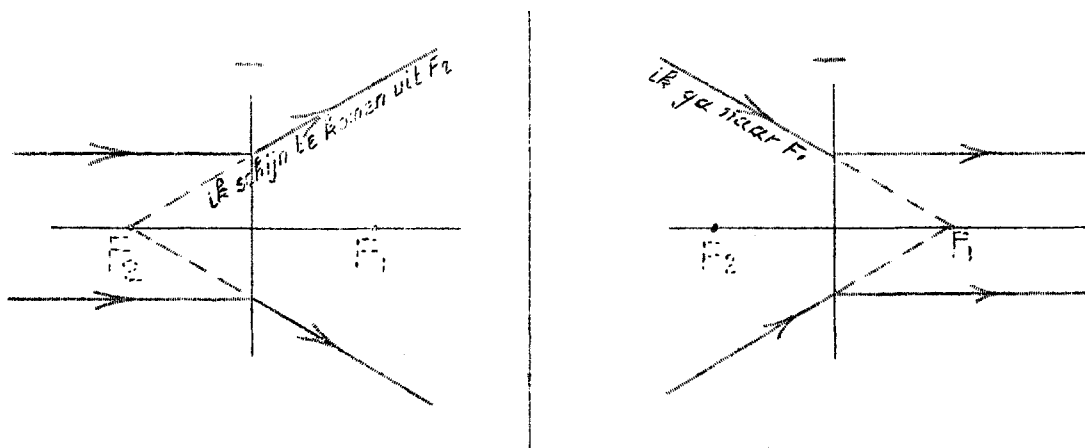
In het bovenstaande voorbeeld is het beeld door lens A ontworpen reëel voorwerp voor lens B.

In onderstaand geval is het beeld door lens A ontworpen virtueel voorwerp voor lens B.



Deel B. De concave lenzen.

- 1) Concave lenzen zijn in het midden dunner dan aan de rand; zij hebben allen een divergerend vermogen.
- 2) Een concave lens heeft ook een optisch middelpunt; de constructie is dezelfde als bij de convexe lens.
- 3) Bij de sommen wordt een concave lens voorgesteld door èèn enkele lijn, die in het optisch middelpunt loodrecht staat op de verbindingslijn der kromte-middelpunten.
- 4) Het min-teken boven de lens geeft aan, dat we te doen hebben met een divergerende of concave lens.
- 5) De hoofdbrandpunten van een divergerende of concave lens.

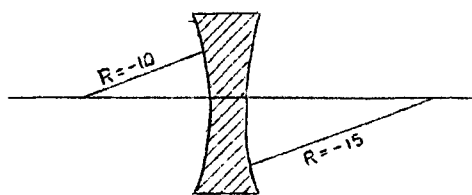


Conclusie: Een divergerende lens heeft twee VIRTUELE brandpunten, die symmetrisch liggen t.o.v. het optisch middelpunt van de lens.

Omdat deze brandpunten virtueel zijn, moeten we de brandpuntsafstand (f) in de formule negatief rekenen.

Men noemt daarom de divergerende lenzen ook wel negatieve lenzen. Vandaar het - teken boven de lens.

- 6) De berekening van de brandpunts-afstand bij een divergerende lens.



Geg.: $R_1 = -10$ cm.

$R_2 = -15$ cm.

$n_{1 \rightarrow gl.} = \frac{3}{2}$

Gevr: f .

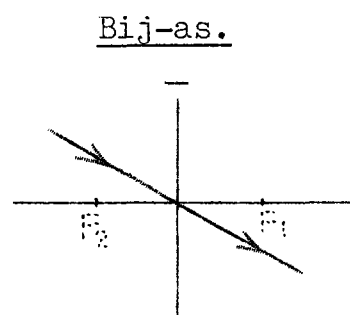
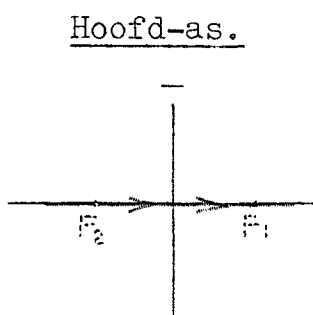
Opl.: $\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) =$

$$= \left(\frac{3}{2} - 1 \right) \left(-\frac{1}{10} - \frac{1}{15} \right) = \frac{1}{2} \left(-\frac{1}{6} \right) = -\frac{1}{12}$$

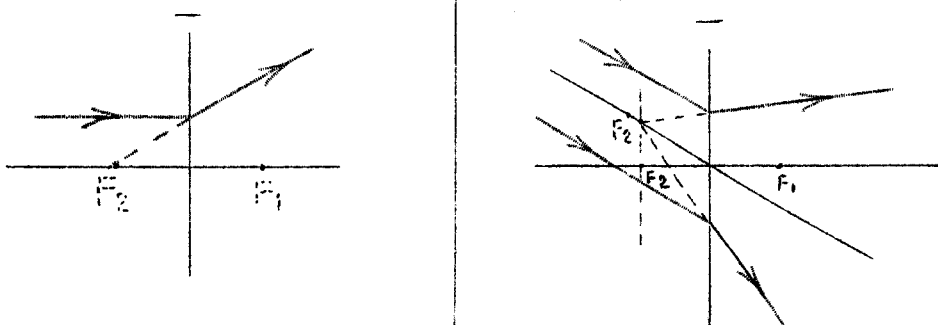
$\therefore f = -12$ cm.

- N.B. 7) Bijzondere stralen voor een divergerende lens.

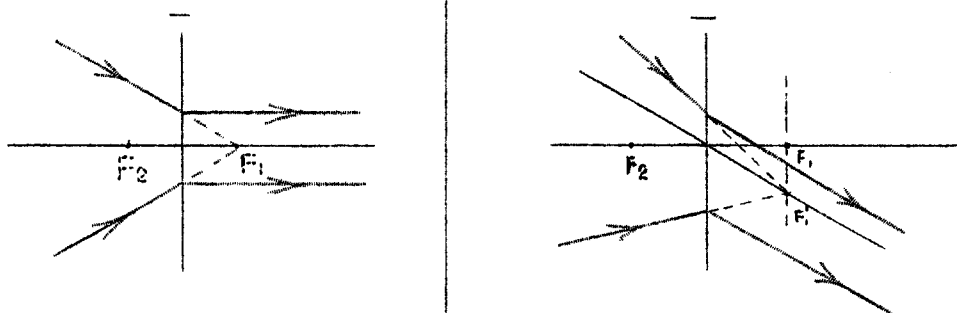
a)



b)



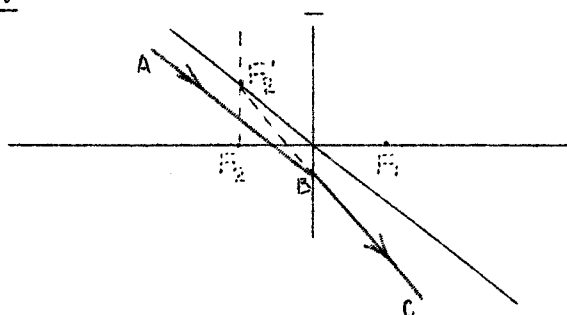
c)



d) Geg.: Een willekeurige straal AB.

Gevr: De gebroken straal te construeren.

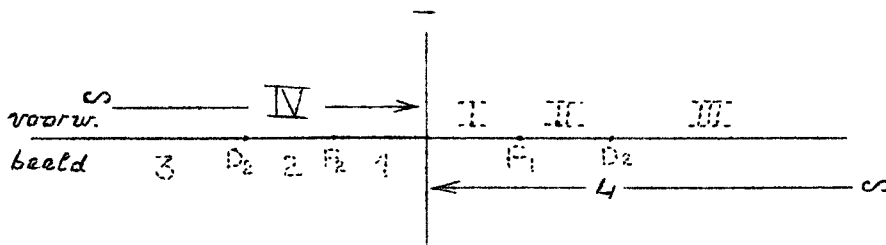
Constructie:



8) De regels van Esbach voor de divergerende lenzen.

Meetkundig is er geen verschil tussen de divergerende en de convergerende lenzen.

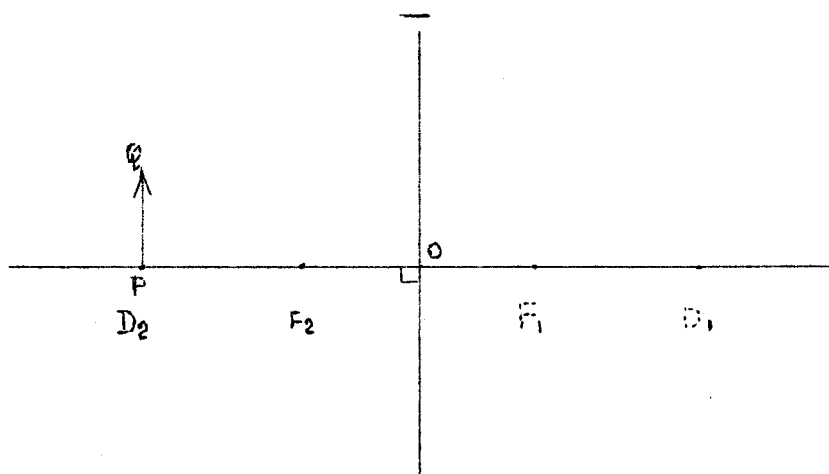
Natuurkundig is er wel verschil: Alles wat bij de convergerende lenzen reëel is wordt bij de divergerende lenzen virtueel en omgekeerd.



Vraag: Wanneer ontwerpt een divergerende lens een reëel beeld?

Antw.: Een divergerende lens ontwerpt dan en slechts dan een reëel beeld als het voorwerp in gebied I staat; dus virtueel is en binnen de eerste brandpuntsafstand van de divergerende lens staat.

9) De constructie van het beeld van een reëel voorwerp.



Gegeven: Voorwerp = 60 cm. $f = -20$ cm.

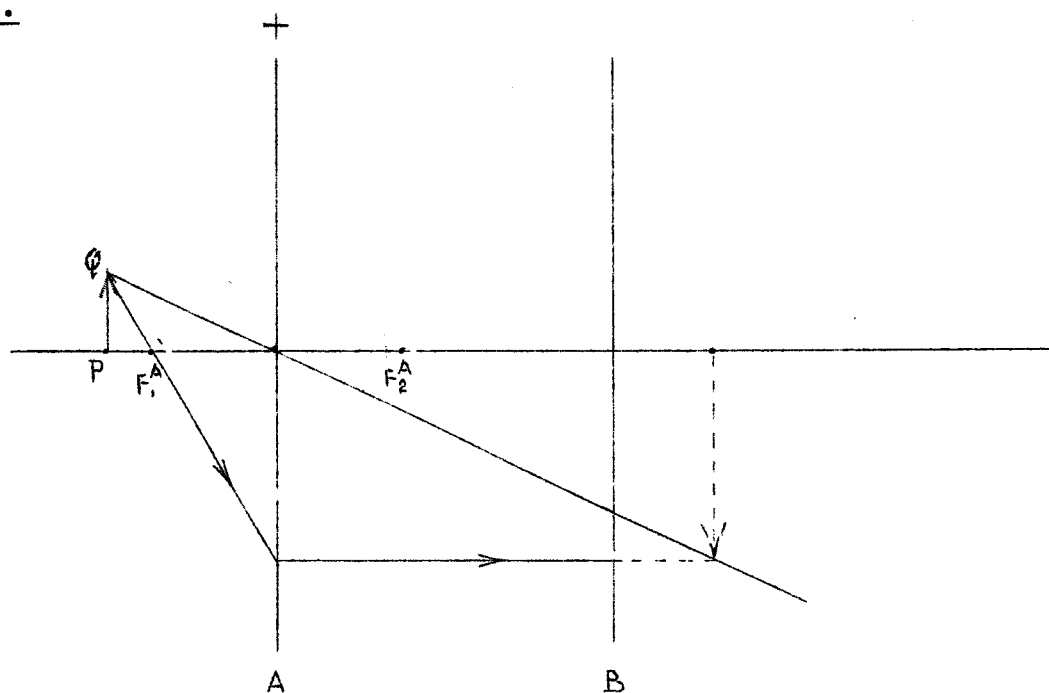
Gevraagd: b.

Oplossing: $\frac{1}{60} + \frac{1}{b} = -\frac{1}{20}$ $\frac{1}{b} = -\frac{4}{60} \longrightarrow b = -15$ cm.

$$N = \frac{|b|}{|v|} = \frac{15}{60} = \frac{1}{4} \times$$

Verder is alles hetzelfde als bij de convergerende lens.

Opgave.

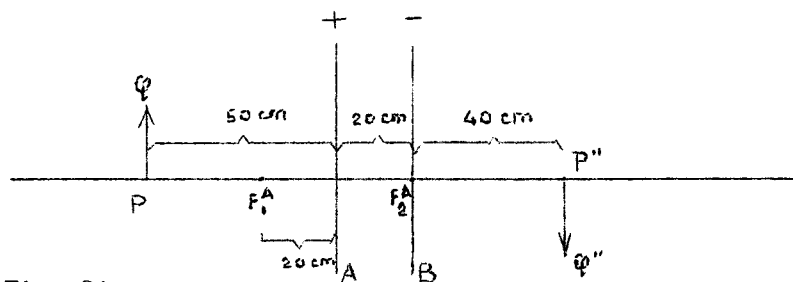


Gegeven: Zie de situatie van bovenstaande figuur.
Het beeld door lens B ontworpen ligt in het oneindige.

Gevraagd: Construeer f_B

Oplossing: Het beeld door lens A ontworpen is virtueel voorwerp voor lens B.
Het eindbeeld moet in het oneindige liggen, $P'Q'$ ligt dus in F_1 . Lens B is dus nu

Opgave.



Gegeven: Zie figuur.
Het eindbeeld $P''Q''$ is REEL en ligt 40 cm. achter lens B.

Gevraagd: I. Het beeld van lens A.

Oplossing:

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

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{20} - \frac{1}{50} \quad \frac{1}{b} = \frac{3}{100} \quad b = 33\frac{1}{3} \text{ cm.}$$

$$N_A = \frac{100}{3} = \frac{100}{3} \times \frac{1}{50} \quad \underline{\underline{N_A = \frac{2}{3} \times}}$$

Gevraagd: II. f_B

Oplossing: Het beeld door lens A ontworpen ligt $33\frac{1}{3}$ cm. achter lens B. Het is dus virtueel voorwerp voor lens B.

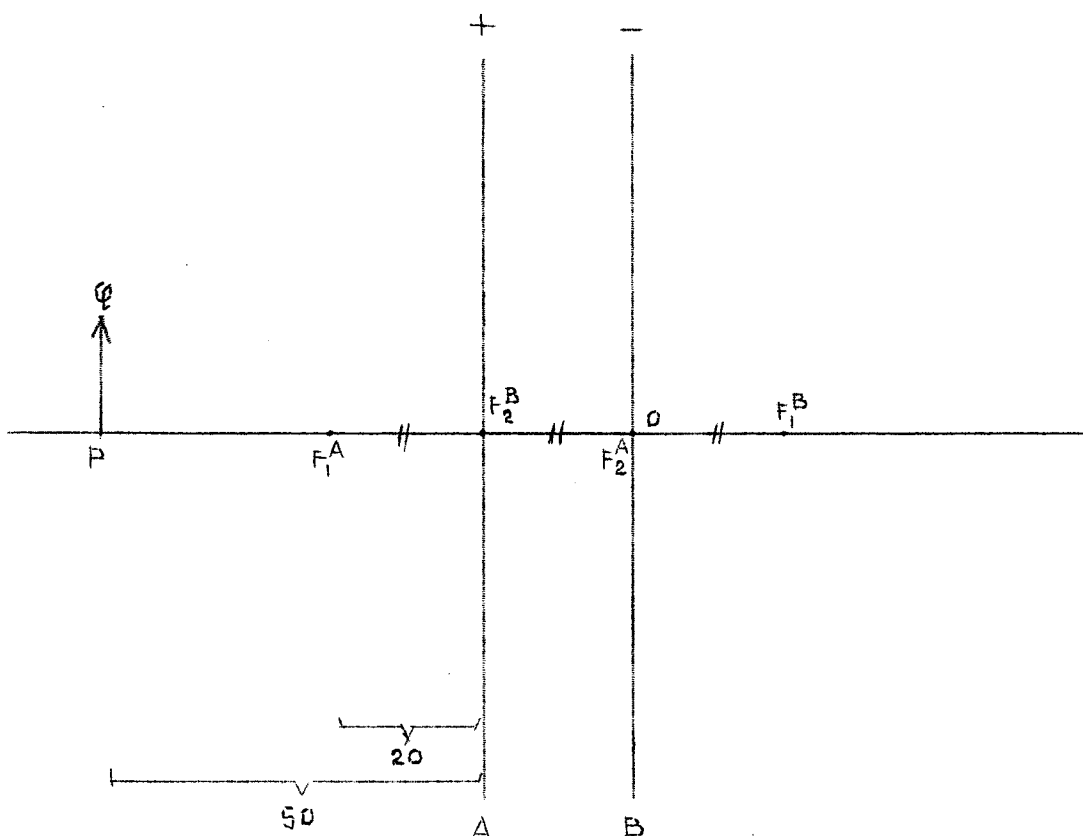
dus:

$$-\frac{1}{33\frac{1}{3}} + \frac{1}{40} = \frac{1}{f} \quad -\frac{6}{200} + \frac{5}{200} = \frac{1}{f}$$

$$-\frac{1}{200} = \frac{1}{f} \quad \underline{\underline{\frac{f}{B} = -20 \text{ cm.}}} \quad \text{sterkte is } \underline{\underline{-5 \text{ diopt.}}}$$

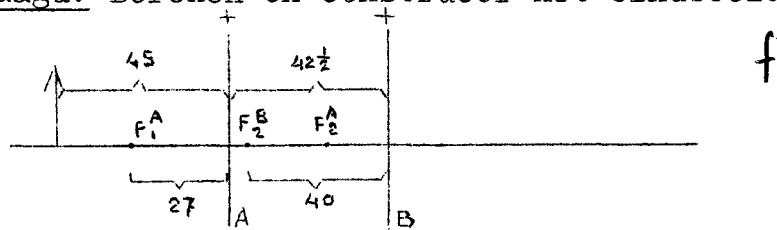
$$N_B = \frac{40}{\frac{40}{3}} = 40 \times \frac{3}{40} \quad \underline{\underline{N_B = 3 \times}}$$

$$N_{\text{tot.}} =$$



Opgave. Gegeven: Zie figuur.

Gevraagd: Bereken en construeer het eindbeeld.



Oplossing: $\frac{1}{b} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f} \quad \frac{1}{b} = \frac{1}{27} - \frac{1}{45}$

$$\frac{1}{b} = \frac{5}{135} - \frac{3}{135} \quad b = \frac{135}{2} = 67\frac{1}{2} \text{ cm.}$$

$$N_A = \frac{135}{2} \times \frac{1}{45} = \frac{3}{2} \times$$

Uit $b = 67\frac{1}{2}$ cm. volgt, het beeld door lens A ontworpen ligt 25 cm. achter lens B en is dus VIRTUEEL voorwerp voor lens B.

Dus: $-\frac{1}{25} + \frac{1}{b} = \frac{1}{40}$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{40} + \frac{1}{25} \quad \frac{1}{b} = \frac{5}{200} + \frac{8}{200} \quad b = 15,38 \text{ cm.}$$

$$N_B = \frac{200}{13} \times \frac{1}{25} \quad N_B = \frac{8}{13} \times$$

Constructie:

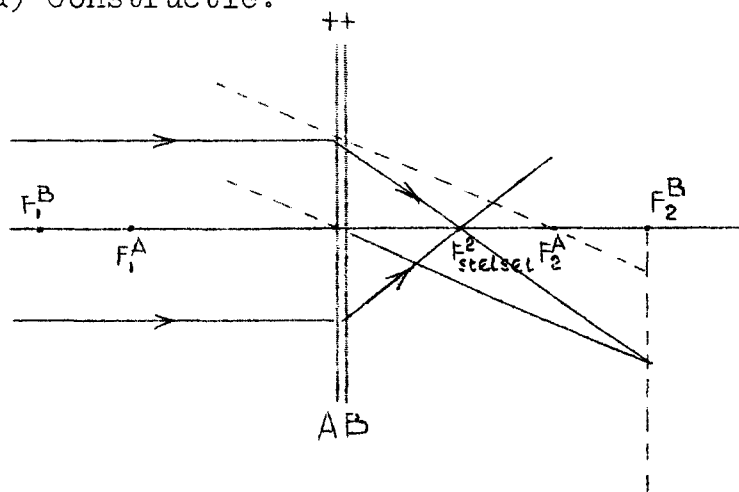
LENZENSTELSELS.

Gegeven: A en B zijn twee vlak tegen elkaar geplaatste lenzen.
 O_A en O_B vallen samen.

Gevraagd: a) Construeer f_{stelsel} .

b) Bereken de sterkte van het stelsel.

Oplossing: a) Constructie:



b) Berekening voor A:

$$\frac{1}{\infty} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_A} \rightarrow b_A = f_A$$

Berekening voor B:

$$v_B = -f_A$$

$$-\frac{1}{f_A} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f_B}$$

$$\frac{1}{b} = \frac{1}{f_A} + \frac{1}{f_B}$$

$$\text{Maar } \frac{1}{b} = \frac{1}{f_{\text{stelsel}}}$$

$$\boxed{\frac{1}{f_{\text{stelsel}}} = \frac{1}{f_A} + \frac{1}{f_B}}$$

In woorden: Het omgekeerde van de brandpuntsafstand van het stelsel is gelijk aan de som van de omgekeerde waarde van de brandpuntsafstand van de samenstellende lenzen.

Par. 5) De astronomische kijker.1) Inleiding.

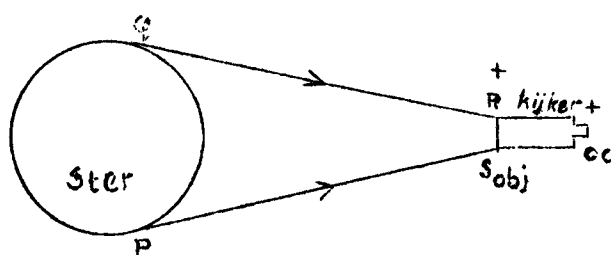
- a) De astronomische kijker is een optisch instrument dat tot doel heeft om het waarnemende oog een groot netvliesbeeld te verschaffen van een klein gedeelte van de sterrenhemel.
De grond-gedachte van de astronomische kijker is dezelfde als die van de microscoop:

Een positieve objectieflens ontwerpt van een gedeelte van de sterrenhemel een REEEL BEELD. Dit reële beeld is reël voorwerp voor een ALS LOUPE FUNGERENDE OCULAIR LENS.

- b) De microscoop was geconstrueerd voor de waarneming van een klein voorwerp dat zich ZEER DICHT (maar steeds in gebied II) vóór de objectieflens bevond.
Bij de astronomische kijker is het object (de sterrenhemel) ZEER VER van de objectieflens verwijderd.
De IMMENS GROTE AFSTAND tussen een ster en het objectief van de kijker heeft een belangrijk gevolg voor de van een ster afkomstige lichtstralen die de objectieflens treffen en voor de eisen die men aan de objectieflens van een astronomische kijker moet stellen.

NB Vraag: Wat valt er te zeggen van de lichtstralen die van een ster - oppervlak vertrekken en de objectieflens treffen?

Antw.:



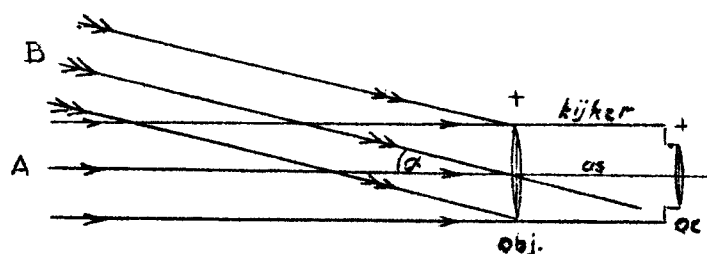
De stralen die van het steroppervlak vertrekken en de objectieflens RS treffen liggen binnen de kegelmantel PQRS.

Daar de afstand tussen de ster en RS IMMENS GROOT is t.o.v. DE DIAMETER VAN DE STER, is de hoek tussen de stralen PS en QR zo klein, dat deze natuurkundig niet

meer meetbaar is: NATUURKUNDIG GESPROKEN LOPEN DE STRALEN PS en QR ONDERLING EVENWIJDIG.

Dit geldt dan ook voor alle lichtstralen, die van het steroppervlak vertrekken en de objectieflens treffen.

Conclusie: ALLE LICHTSTRALEN DIE VAN EENZELFDE STER-OPPERVLAK VERTREKKEN EN DE OBJECTIEFLENS VAN DE KIJKER TREFFEN VORMEN EEN EVENWIJDIGE BUNDEL.



In nevenstaande figuur is de as van de kijker gericht naar ster A.

De van ster A afkomstige lichtstralen vormen de evenwijdige bundel →

De lichtstralen van de zich op de hemelbol in de buurt van A bevindende ster B vormen de evenwijdige bundel →

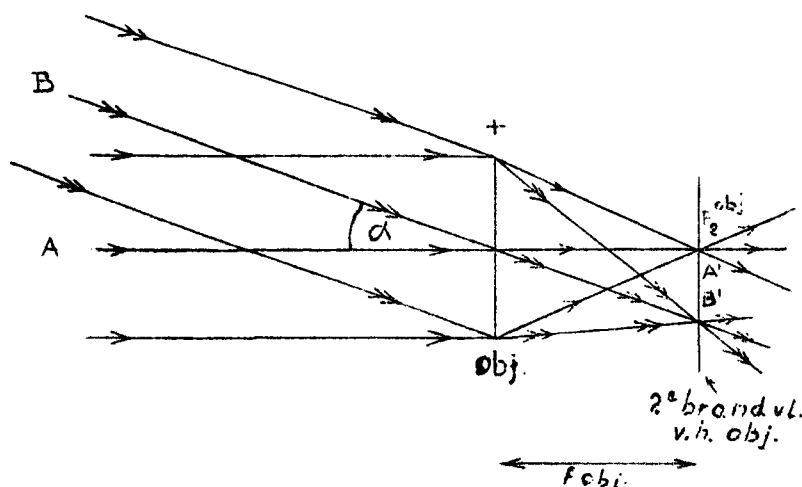
Hoek α is de hoek waaronder men de sterren A en B op de hemelbol ziet met het ongewapende oog.

Vraag: Wat valt er te zeggen van het reële beeld dat de objectieflens van een ster ontwerpt?

Antw.: Omdat de van een ster afkomstige lichtstralen een evenwijdige stralenbundel vormen waarvan de stralen evenwijdig lopen aan de hoofdas of aan een bij-as van de objectieflens, is het beeld dat de objectieflens van de ster vormt:

1°) EEN ENKEL LICHPUNT, dat

2°) In het tweede brandpunt VAN DE HOOFDAS, resp. HET TWEEDE BRANDPUNT VAN DE BIJ-AS LIGT.



Licht-PUNT A' is het reële beeld van ster A, lichtPUNT B' is het reële beeld van ster B. A' en B' liggen in het TWEE DE BRANDVLAK van de objectieflens.

Vraag: Aan welke eis (of eisen) moet de objectieflens voldoen?

Antw.: Stel, dat de as van de kijker gericht is op een sterrenhoop waarvan A en B twee sterren zijn. Omdat de beeldpunten A' en B' in het tweede brandvlak van de objectieflens liggen, is de afstand A'B' recht evenredig met de brandpuntsafstand van de objectieflens: immers $A'B' = f_{obj} \cdot \text{tg } \alpha$.

Welnu: naarmate de afstand A'B' groter is, des te beter zal het praktisch mogelijk zijn om met behulp van een loupe (de oculairlens) een groot netvliesbeeld te verkrijgen van de boog AB van de hemelbol, zodat de samenstelling van de sterrenhoop duidelijk waarneembaar wordt.

Conclusie: Teneinde het praktisch mogelijk te maken om van een zeer klein deel van de hemelbol een groot netvliesbeeld te verkrijgen, is het nodig dat de objectieflens een ZIEER GROTE BRANDPUNTSAFSTAND heeft, dus een zeer zwakke lens is.

Er is echter nog een tweede voorwaarde waaraan de objectieflens van de astronomische kijker moet voldoen, want het netvliesbeeld moet niet alleen GROOT, maar ook een BEHOORLIJKE LICHTSTERKTE HEBBEN. zijn,

Opdat het oog een HELDER netvliesbeeld van de sterren A en B krijgt, is nodig dat A' en B' HELDERE lichtpunten zijn, d.w.z. in A' moet veel lichtenergie van ster A samenkomen en in B' veel lichtenergie van ster B.

De objectieflens moet dus zoveel mogelijk lichtenergie van de sterren opvangen.

Welnu: De hoeveelheid lichtenergie die de objectieflens van een ster opvangt is rechtevenredig met het kwadraat van de halve middellijn van de objectieflens.

Conclusie: Om te bereiken dat het waarnemende oog een HELDER netvliesbeeld van de sterren krijgt is nodig, dat de objectieflens van de astronomische kijker een GROTE MIDDELIJN heeft.

(Grote astronomische kijkers hebben objectieflenzen waarvan de diameter groter is dan 1 meter.

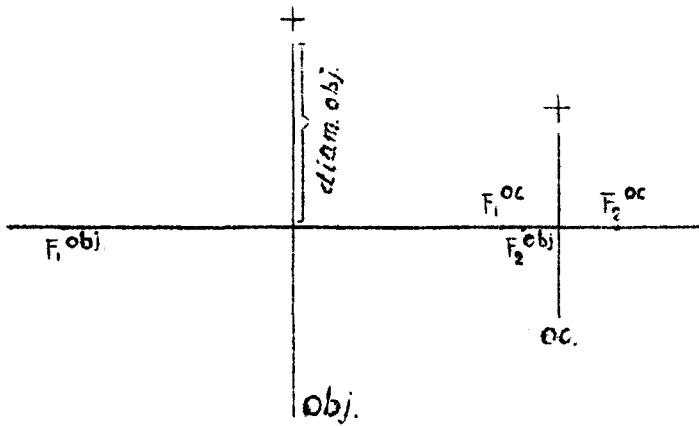
De diameter van de oogpupil is bij zwak licht ongeveer 10 mm = 0,01 m. Heeft de objectieflens van de kijker een diameter van 1 meter, dan ontvangt de objectieflens dus 10000 maal zoveel lichtenergie van een ster als het ongewapende oog. Met zo'n kijker kan men dus sterren waarnemen die met het blote oog niet te zien zijn!)

Eindconclusie: De objectieflens van een astronomische kijker moet:

- I een grote brandpuntsafstand en
- II een grote middellijn hebben.

2) Het principe van de astronomische kijker.

2) Het principe van de astronomische kijker.



Zoals in punt 1) reeds is aangegeven, bestaat de astronomische kijker in principe uit twee op enige afstand van elkaar geplaatste positieve lenzen waarvan de hoofdassen samenvallen, n.l. de objectieflens en de oculairlens.

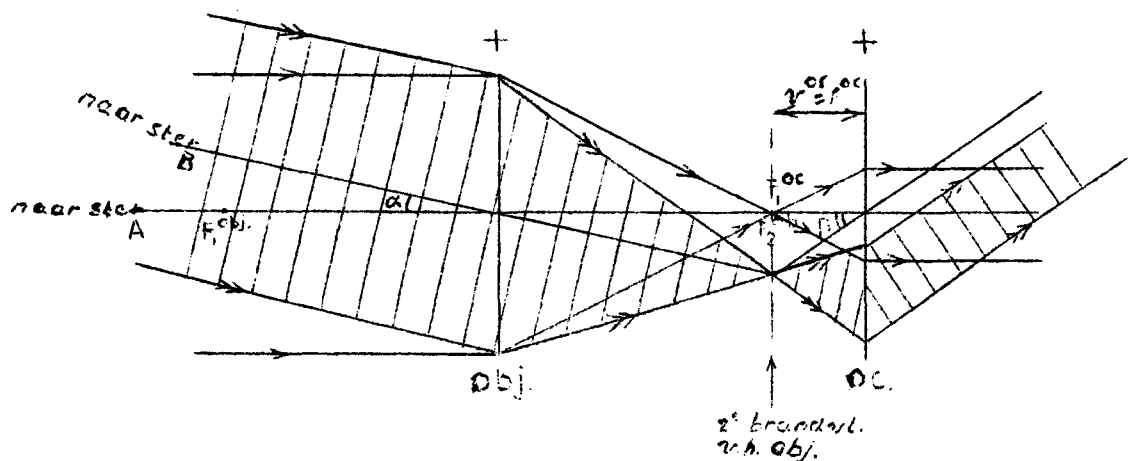
De objectieflens heeft een grote brandpuntsafstand en een grote middellijn.

Het beeld dat de objectieflens van een ster ontwerpt, is een reëel licht-PUNT, dat gelagen is IN HET TWEEDE BRANDVLAK VAN DE OBJECTIEFLENS.

De oculairlens fungeert als loupe en heeft dus een kleine brandpuntsafstand.

3) Bijzondere gevallen.

Geval I De instelling voor een ongeaccommodeerd normaal oog.

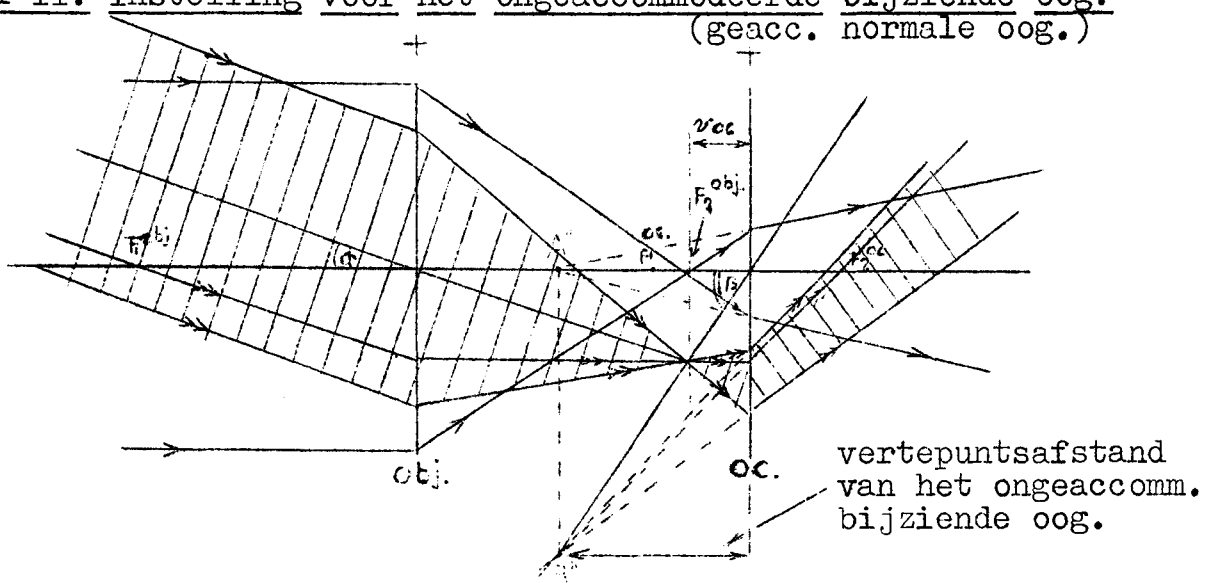


We veronderstellen, dat de as van de kijker naar een ster A gericht is, en dat de getekende bijas van de objectieflens gericht is naar ster B.

α is de hoek waaronder het ongewapende oog de sterren A en B op de hemelbol ziet.

β is de hoek waaronder het ongeaccommodeerde normale oog deze sterren in de kijker ziet.

Geval II. Instelling voor het ongeaccommodeerde bijziende oog.
(geacc. normale oog.)



De as van de kijker is weer gericht op ster A, de bij-as van de objectieflens is gericht op ster B. De oculairlens vormt van de sterren A en B de virtuele beeldpunten A''B''.

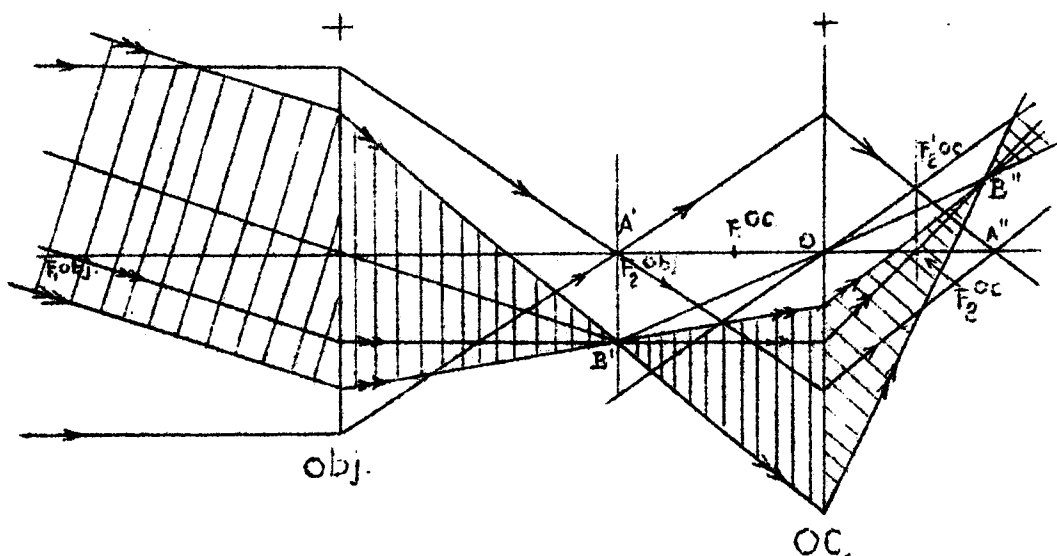
Bij de sommen nemen we aan, dat A'' in de projectie van B'' op de hoofdas ligt.

Is de kijker nu ingesteld voor een ongeaccommodeerd oog, dan moet A'' dus in het vertepunt van dit oog liggen.

α is de gradenboog tussen de sterren A en B op de hemelbol; β is de hoek waaronder het ongeaccommodeerde bijzien de oog de sterren via de kijker ziet.

Opmerking: Bij deze instelling van de kijker moet een normaal oog accommoderen op de virtuele beeldsafstand van A''. Zou A'' in het nabijheidspunt van een oog liggen, dan zou bovenstaande figuur de constructie geven voor het geval, dat de kijker is ingesteld voor een maximaal accommoderend oog.

Geval III Instelling voor een reëel eindbeeld.



A'' en B'' zijn de reële eindbeelden van de sterren A en B. In bovenstaande figuur hebben we deze beeldpunten afzonderlijk geconstrueerd.

(Om het punt A'' te vinden hebben we de bij-as OF_2' moeten trekken.)

Bij de sommen doen we, alsof A'' in de projectie van B'' op de hoofdas ligt.

4) De angulaire vergroting van een astronomische kijker.

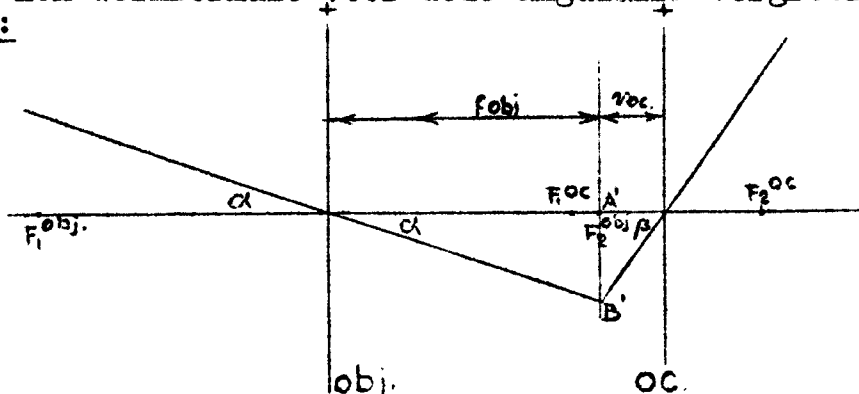
Definitie. Onder de angulaire vergroting van de astronomische kijker bij een bepaalde instelling, verstaat men de verhouding van de hoek waaronder men twee hemelpunten in de kijker ziet, en de hoek waaronder men deze hemelpunten zonder kijker ziet.

Dus:

$$N_{\text{ang}} = \frac{\beta}{\alpha}$$

Gevraagd: Een werkformule voor deze angulaire vergroting.

Oplossing:



$$N_{ang} = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha} = \frac{\frac{A'B'}{v_{oc}}}{\frac{A'B'}{f_{obj}}} = \frac{A'B'}{v_{oc}} \times \frac{f_{obj}}{A'B'} = \frac{f_{obj}}{v_{oc}}$$

Conclusie:

$$N_{ang} = \frac{f_{obj}}{v_{oc}}$$

Als de kijker is ingesteld voor het ongeaccommodeerde normale oog,
dan is,

$$v_{oc} = f_{oc}$$

Dus dan is

$$N_{ang} = \frac{f_{obj}}{f_{oc}}$$

Opmerkingen: a) Uit de laatste formule blijkt duidelijk, dat de brandpuntsafstand van de objectieflens groot moet zijn t.o.v. de brandpuntsafstand van de oculairlens om een groot netvliesbeeld van de boog AB van de hemelbol te verkrijgen.

b) Men dient zich goed te realiseren, dat een astronomische kijker niet het beeld VAN EEN STER vergroot: Het beeld van èèn ster is altijd een lichtpunt. Met een kijker ziet men de ster alleen helderder dan met het blote oog.
Wat vergroot wordt is DE HOEK waaronder men TWEE sterren ziet!

5) De astronomische kijker gericht op de zon of de maan.

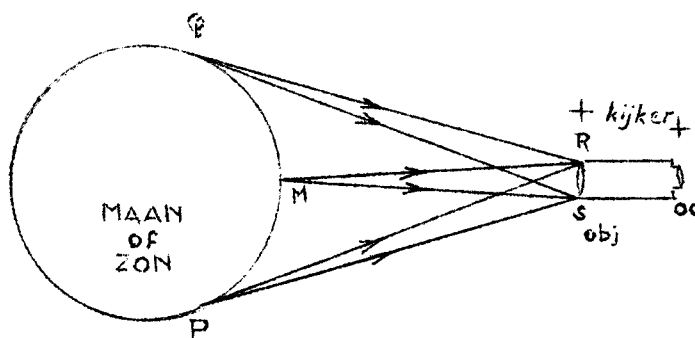
In punt 1_b van deze paragraaf hebben we gezien, dat de lichtstralen die van een steroppervlak vertrekken en de objectieflens treffen, natuurkundig gesproken, een evenwijdige stralenbundel vormen, omdat de diameter van de ster te verwaarlozen klein is t.o.v. de afstand van de ster tot de objectieflens.

De diameter van de zon is echter niet te verwaarlozen t.o.v. de afstand aarde-zon.

Hetzelfde geldt voor de diameter van de maan.

Vraag: Stel dat de as van de kijker naar de maan gericht is: Wat valt er dan te zeggen van de lichtstralen die van een punt van het maanoppervlak vertrekken en de objectieflens treffen?

Antw.:



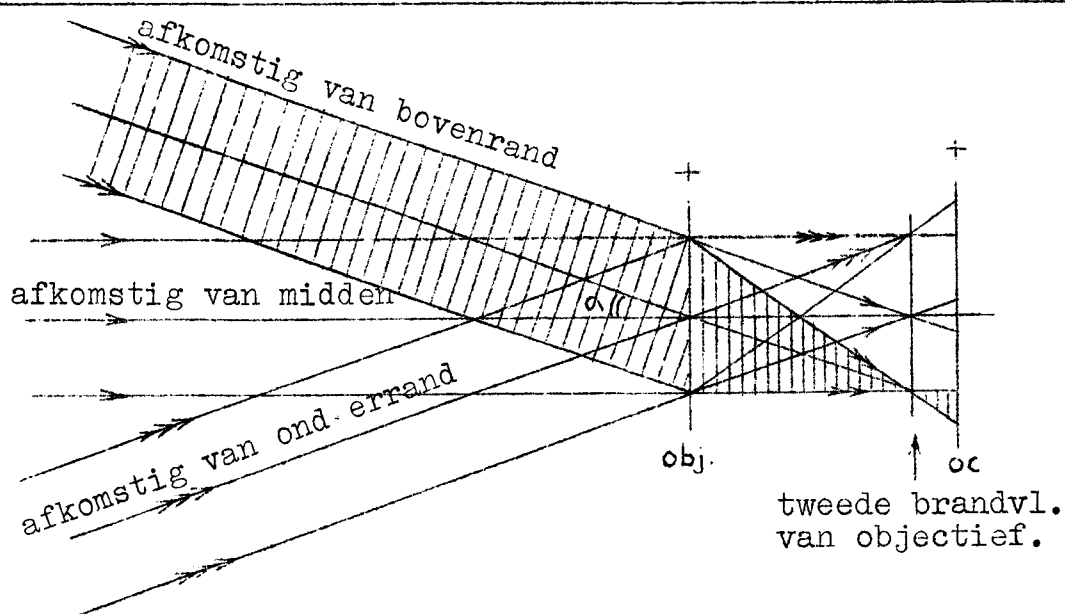
In bovenstaande figuur is de as van de kijker naar het middelpunt M van de maan gericht.

De van M afkomstige stralen die de objectieflens treffen vormen de kegel MRS.

De diameter van de objectieflens RS is echter te verwaarlozen klein t.o.v. de afstand van M tot de objectieflens.

Natuurkundig gesproken, is de tophoek van deze kegel dus NUL graden, d.w.z.: de lichtstralen van de kegel MRS vormen een EVENWIJDIGE STRALENBUNDEL.

Dit geldt dus voor iedere stralenbundel die uit een punt van het maanoppervlak vertrekt en de objectieflens treffen.

Conclusie:

- 1^o) De lichtstralen die afkomstig zijn van een punt van het maanoppervlak en de objectieflens treffen, vormen een evenwijdige stralenbundel.
- 2^o) De objectieflens vormt van de maan een reëel beeld, dat IN HET TWEEDE BRANDVLAK VAN DE OBJECTIEFLENS ligt.
- 3^o) α is de hoek waaronder men de STRAAL van de maanschijf ziet.
Is de as van de kijker naar het middelpunt van de zon gericht, dan komen we tot dezelfde conclusies.

Opmerking:

De hoek waaronder we de MIDDELLIJN van de zon zien met het ongewapende oog, bedraagt gemiddeld $31'59,2''$; voor de middellijn van de maan bedraagt deze hoek, als de maan in het zenith staat, $30'30''$.

Uit het feit dat er totale zonsverduisteringen optreden waarbij de zonschijf precies door de maanschijf bedekt wordt, volgt, dat er situaties zijn waarbij wij de middellijn van de zon en de middellijn van de maan onder dezelfde hoek zien.

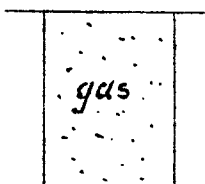
Par. 6. Projectie-toestel; fotografische camera. → zie Schw. II.

HOOFDSTUK VII.

G A S S E N.Deel I. De spanning van een afgesloten hoeveelheid gas.§ 1. Het gedrag van de moleculen van een gas.

- 1) Wat valt er te zeggen van HET VOLUME van een bepaalde hoeveelheid gas?

Antwoord: We doen de volgende proef. We vullen een cilinder met METHYLMERCAPTAAN (CH_3SH), een gas met een ondraaglijke stank. De cilinder wordt afgesloten door een glasplaat. In de cilinder bevindt zich dus een bepaald aantal moleculen van dit gas. Nemen we de glasplaat weg, dan bemerken we dat het gas zich binnen enkele minuten door het hele lokaal verspreid heeft.



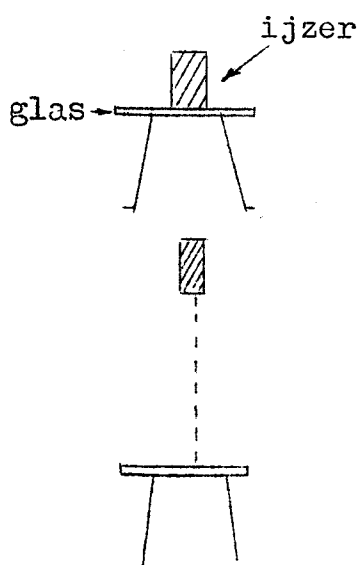
Conclusie: Een bepaalde gewichtshoeveelheid gas heeft GEEN VAST VOLUME: de moleculen van een gas doorkruisen de HELE ruimte die aan het gas geboden wordt.

- 2) Wat volgt hieruit over de SAMENHANG tussen de moleculen van een gas?

Antw.: De moleculen van een gas hebben GEEN SAMENHANG.

- 3)
- Oefenen de moleculen van een gas dan geen aantrekkende krachten op elkaar uit?

Antw.: De moleculen van een gas zijn "gewone" moleculen: ze oefenen ook "gewoon" aantrekkende krachten op elkaar uit, MAAR deze krachten zijn VEEL KLEINER dan de cohaesiekrachten van vaste stoffen of vloeistoffen, met het gevolg dat de moleculen van een gas bij de normaal voorkomende temperaturen TE VEEL BEWEGINGS-ENERGIE OM ELKAAR TE KUNNEN VASTGRIJPEN.



Wat bewegingsenergie is, kunnen we als volgt duidelijk maken: Op een driepoot leggen we een stuk vensterglas en plaatsen daarop een stuk ijzer dat niet zo zwaar is dat het door het glas zakt. In deze rusttoestand kan het stuk ijzer dus niets uitrichten.

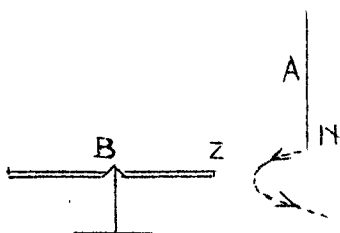
Nu tillen we het stuk ijzer b.v. een meter verticaal omhoog en laten het dan los. Tijdens zijn val krijgt het stuk ijzer een steeds groter wordende snelheid.

Je begrijpt wat er gaat gebeuren als het vallende stuk ijzer op de glasplaat aankomt: rinkeldekink!!

DOOR ZIJN VAART EN ZIJN ZWAARTE heeft het stuk ijzer dus het vermogen gekregen om iets uit te richten, n.l. het stuk glas te versplinteren. Men zegt nu, dat het stuk ijzer tijdens zijn val BEWEGINGSENERGIE gekregen heeft.

→ BEWEGINGSENERGIE IS DUS EEN COMBINATIE VAN MASSA EN VAART: ALS MASSA VAART KRIJGT, DAN KAN ER IETS GEBEUREN!

Ieder gasmolecuul heeft massa en vaart, dus bewegingsenergie. Dat deze bewegingsenergie zo groot kan zijn, dat de moleculen elkaar ondanks hun cohaesiekrachten niet kunnen vasthouden, maken we duidelijk aan de hand van de aantrekkende krachten die twee ongelijknamige magneetpolen op elkaar uitoefenen.



Proef: Opstelling zie figuur.

We bewegen de noordpool N van A SNEL langs de zuidpool Z van B → N en Z grijpen elkaar NIET;

We bewegen N LANGZAAM langs Z → N en Z grijpen elkaar WEL.

Conclusie uit vraag 3): De moleculen van een gas oefenen wel aantrekkende krachten op elkaar uit. Bij de normaal voorkomende temperaturen hebben de moleculen van een gas echter te veel BEWEGINGS-ENERGIE om elkaar te kunnen vasthouden.

- 4) Hoe zijn de gasmoleculen aan hun bewegingsenergie gekomen?

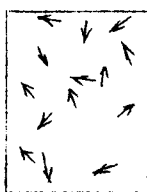
Antw.: Dat de gasmoleculen bewegingsenergie hebben is een GEVOLG van verwarming.
VERWARMEN WIL ZEGGEN: DE MOLECULEN BEWEGINGSENERGIE GEVEN.

- 5) Wat zal er gebeuren als men een afgesloten hoeveelheid zuurstofgas heel sterk afkoelt?

Antw.: Bij voldoende sterke afkoeling wordt de bewegingsenergie van de zuurstofmoleculen zo klein, dat ze elkaar WEL kunnen vasthouden; er zal zich dan VLOEIBARE ZUURSTOF vormen, eventueel VASTE ZUURSTOF.

- 6) Hoe moeten we ons een gas voorstellen?

Antw.: Het woord GAS is een KUNSTWOORD, door de natuurkundige VAN HELMONT (± 1600) gemaakt naar het griekse woord CHAOS.



Men moet zich een gas voorstellen als een zwerm muggen. De moleculen van een gas schieten zonder samenhang met grote snelheden luk-raak door elkaar. Ieder molecuul vliegt door tot het tegen een ander molecuul of de wand opbotst.

Opmerking: We moeten ons wel herinneren dat de moleculen elkaar gaan afstoten als hun afstand kleiner wordt dan de "neutrale" afstand. Deze afstotende krachten worden onbeperkt groot als de afstand tussen de moleculen "nadert tot nul"; ze zijn dus bestand tegen iedere vaart. De moleculen zullen elkaar dus bij een botsing NIET AANRAKEN. Daardoor komt het dat de moleculen niet verslijten.

- 7) Maak duidelijk dat een bepaalde hoeveelheid gas GEEN BEPAALD VOLUME heeft, maar dat de moleculen IEDERE ruimte doorkruisen die aan het gas geboden wordt.

Antw.: De moleculen van een gas schieten ZONDER SAMENHANG door tot ze ergens tegen opbotsen. Daardoor komt het dat de gasmoleculen de HELE SPEELRUIMTE doorkruisen die aan de gegeven moleculen geboden wordt.

- 8) Hebben de moleculen van een bepaald gas bij een bepaalde temperatuur allemaal een EVEN GROTE SNELHEID?

Antw.: Neen! De moleculen van een gas schieten luk-raak door elkaar. Daarbij hebben de gekste botsingen plaats. Het is b.v. mogelijk dat twee moleculen tegelijk tegen een derde molecuul opvliegen enz. Bij zo'n gecompliceerde botsingen is het meestal zo dat een of meer moleculen hun bewegingsenergie geheel of gedeeltelijk moeten afstaan aan een of meer andere moleculen.

|| Dit heeft tot gevolg DAT ER BIJ IEDERE TEMPERATUUR ZEER SNELLE EN OOK ZEER LANGZAME MOLECULEN ZIJN.

Een snel molecuul kan t.g.v. een ongelukkige botsing even later een langzame molecuul worden en een langzaam molecuul kan t.g.v. een gelukkige botsing even later een zeer snel molecuul zijn; geen enkel molecuul kan "voorspellen" of het een fractie van een seconde later tot de snelle of de langzame moleculen zal behoren!

Op het eerste oog schijnt het dus, alsof we bij de beweging van de gasmoleculen te doen hebben met een volledige chaos. TOCH IS ER ENIGE ORDENING IN DEZE WANORDE!

Bij de botsingen tussen de moleculen gaat immers geen energie verloren, maar DRAAGT HET ENE MOLECUUL SLECHTS BEWEGINGSENERGIE OVER AAN HET ANDERE MOLECUUL: DE TOTALE HOEVEELHEID BEWEGINGSENERGIE VAN ALLE MOLECULEN TESAMEN BLIJFT

DUS CONSTANT zolang de temperatuur van het gas constant blijft.

Deze totale bewegingsenergie van alle moleculen tesamen gedeeld door het aantal moleculen noemt men DE GEMIDDELDE BEWEGINGS-ENERGIE VAN DE GASMOLECULEN.

BIJ EEN GEGEVEN TEMPERATUUR BLIJFT DE GEMIDDELDE BEWEGINGS-ENERGIE VAN DE GASMOLECULEN DUS CONSTANT.

Conclusie: De moleculen van een gas bewegen luk-raak door elkaar. Dit heeft tot gevolg dat er bij iedere temperatuur zeer snelle en ook zeer langzame moleculen zijn. Er is echter een ordening in deze wanorde: ZOLANG DE TEMPERATUUR CONSTANT BLIJFT, BLIJFT OOK DE GEMIDDELDE BEWEGINGSENERGIE VAN DE MOLECULEN CONSTANT.

Opmerking a) In de tweede ronde zullen we zien, dat er een streng wetmatig verband bestaat tussen de temperatuur en de gemiddelde bewegingsenergie van de moleculen. Als de temperatuur gegeven is, staat het vast hoe groot de gemiddelde bewegingsenergie van de moleculen is. Bij eenzelfde temp. hebben de moleculen van alle gassen een evengrote gemiddelde bewegingsenergie. Deze gemiddelde bewegingsenergie is groter naarmate de temperatuur hoger is.

b) Bij 20° C. (b.v.) hebben de moleculen van waterstofgas gemiddeld dezelfde bewegingsenergie als de moleculen van zuurstof. Zuurstofmoleculen zijn echter veel zwaarder dan waterstofmoleculen. Wat volgt hieruit over de gemiddelde SNELHEID van waterstof en zuurstof-moleculen bij 20° C?

Antwoord: Bewegingsenergie is een combinatie van massa en vaart; de zware zuurstofmoleculen moeten dus bij 20° C. gemiddeld minder vaart hebben dan de lichte waterstofmoleculen.

c) Er is nog een tweede ordening in de wanordelijke beweging van de gasmoleculen. De luk-raak beweging van de gasmoleculen heeft tot gevolg dat de gemiddelde verdeling van de moleculen over de ruimte van het vat constant blijft.

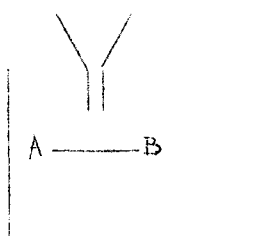
d) In het komende zullen we steeds zeggen, dat de moleculen van een afgesloten hoeveelheid gas zich in een "geordende wanorde" luk-raak door elkaar bewegen. Met "geordende wanorde" bedoelen we dan:

1^o) dat de gemiddelde bewegingsenergie constant blijft, en

2^o) dat de gemiddelde verdeling van de moleculen over de ruimte van het vat constant blijft.

§ 2. De druk of de spanning van een gas.

1) Inleidende proef.



In een lege aquariumbak plaatsen we een zeer gevoelige brievenweger.

a) We laten èèn hagelkorrel vanaf een zekere hoogte op de plaat AB vallen. De hagelkorrel veert tegen AB terug en springt in de bak. Intussen zien we de balans even uitslaan.

Conclusie: Tijdens de botsing tegen AB oefende de vallende hagelkorrel een naar beneden gerichte kracht uit op de plaat AB.

- b) Met behulp van een trechter laten we een onafgebroken, gelijkmatige "regen" van hagelkorrels op de plaat AB neerkomen. Iedere hagelkorrel veert terug tegen AB en komt in de bak terecht. TIJDENS DEZE ONAFGEBROKEN GELIJKMATIGE REGEN VAN HAGELKORRELS OP AB WIJST DE GEWICHTSAANWIJZER EEN CONSTANT GEWICHT AAN. Voor de brievenweger is het dus alsof de plaat AB is belast met een brief die het aangewezen gewicht heeft.

Conclusie: De onafgebroken gelijkmatige regen van hagelkorrels op AB heeft voor AB dezelfde uitwerking als EEN CON- STANTE, LOODRECHT OP AB STAANDE KRACHT.

- c) Laten we deze onafgebroken, gelijkmatige regen van hagelkorrels vanaf een groter hoogte op AB neerkomen, dan wijst de gewichtsaanwijzer een groter gewicht aan.

- 2) Wat verstaat men ook weer onder EEN DRUK?

Antw.: Een druk is een force-werking MET EEN AANGRIJPINGSOPPERVLAK. Onder de GROOTTE van een druk verstaat men het aantal grf van deze force PER cm^2 .

Heeft de plaat AB van de brievenweger een oppervlak van 25 cm^2 . en wijst de gewichtsaanwijzer 200 gram aan, dan oefent de onafgebroken, gelijkmatige regen van hagelkorrels op AB dus een druk uit van $\frac{200}{25} = 8 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$.

- 3) Verklaar, dat de moleculen van een afgesloten hoeveelheid gas een druk uitoefenen tegen de wanden van het vat.

Antw.:



De moleculen van het afgesloten gas bewegen in een "geordende wanorde" luk-raak door elkaar; ieder molecuul schiet door tot het tegen een ander molecuul of de wand opbotst.

We beschouwen nu een willekeurig vlakje AB van de wand van het vat. Op ieder ogenblik botsen er miljarden gasmoleculen tegen AB; AB voelt dus VOORTDUREND een stootkracht van de gasmoleculen uit het inwendige van het vat.

Omdat de gemiddelde verdeling van de gasmoleculen over de ruimte van het vat constant blijft en ook de gemiddelde bewegings-energie van de gasmoleculen constant blijft, kunnen we zeggen, dat AB een ONAFGEBROKEN GELIJKMATIGE "REGEN" VAN GASMOLECULEN uit het inwendige van het vat te verduren heeft, die voor AB dezelfde uitwerking heeft als een constante loodrecht op AB staande force-werking met AB tot aangrijpingsoppervlak.

Deze force-werking PER cm^2 noemt men de druk of de spanning van het afgesloten gas.

Conclusie: De moleculen van een afgesloten hoeveelheid gas oefenen een druk uit tegen de wanden van het vat.

- NB 4) Wat verstaat men precies gezegd onder de druk (of de spanning) van een afgesloten hoeveelheid gas?

Antw.: Onder de druk of de spanning van een afgesloten hoeveelheid gas verstaat men DE BLIJVENDE KRACHT PER cm^2 die de moleculen van het gas t.g.v. de voortdurende botsingen tegen de wand van het vat uitoefenen.

- 5) Door welke grootheden wordt de grootte van de druk van een afgesloten hoeveelheid gas bepaald?

Antw.: 1^o) door het aantal gasmoleculen per KUBIEKE CENTIMETER van de afgesloten ruimte.

(b.v. naarmate er meer lucht in een fietsband gepompt wordt, wordt de band HARDER)

- 2°) door de gemiddelde stootkracht van de moleculen. De stootkracht wordt bepaald door de bewegingsenergie; de gemiddelde bewegingsenergie van de gasmoleculen wordt bepaald door de temperatuur. Dat de temperatuur werkelijk een rol speelt kunnen we merken als we een hard opgepompte fietsband in de zon zetten.

Conclusie: De druk (of de spanning) van een afgesloten hoeveelheid gas wordt bepaald door het aantal gasmoleculen PER cm^3 en door de temperatuur van het afgesloten gas.

D E E L II De druk van de buitenlucht.

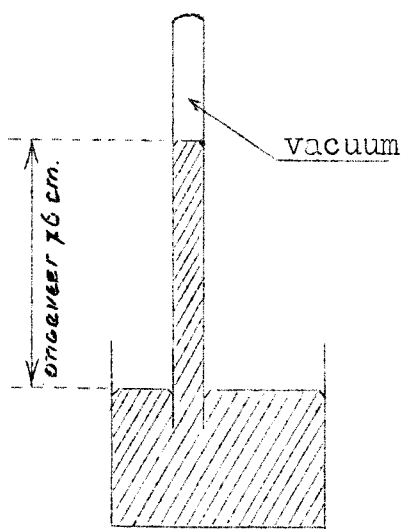
§ 1. De proef van TORRICELLI.

(Evangeliste Torricelli; 1608 - 1647; leerling van Galileï)

1) Beschrijf de proef van Torricelli.

Antw.:

a) De opstelling van de proef.



We nemen een ongeveer èèn meter lange, smalle glazen buis die aan èèn uiteinde afgesloten is. We houden de buis verticaal met het open uiteinde naar boven en vullen de buis geheel met kwik. We sluiten nu het open uiteinde af met een vinger, draaien de buis om en steken het met de vinger dicht gehouden uiteinde van de buis enige cm's in een met kwik gevulde bak.

Daarna nemen we de vinger van de opening weg zodat het kwik in de verticaal gehouden buis vrij in de bak zou kunnen stromen.

b) Wat er gebeurt.

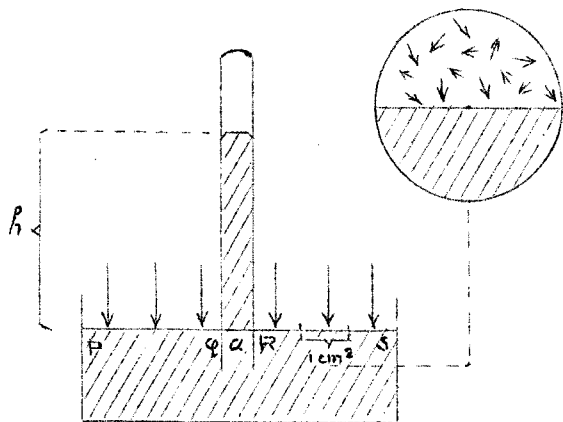
Aanvankelijk stroomt er een hoeveelheid kwik uit de verticale buis in de bak MAAR HET NIVEAU VAN HET KWIK IN DE BUIS DAALT NIET TOT

HET KWIKNIVEAU IN DE BAK; er stroomt zoveel kwik uit de verticale buis in de bak TOT HET KWIKNIVEAU IN DE BUIS (ongeveer) 76 cm. HOGER STAAT DAN HET KWIK IN DE BAK.

Boven het kwik in de buis bevindt zich dan een LUCHTLEDIGE RUIMTE, het z.g. VACUUM VAN TORRICELLI.

2) Verklaar het feit, dat het kwik in de buis van Torricelli hoger staat dan het kwik in de bak.

antw.:



De moleculen van de lucht bombarderen het kwikoppervlak. Als we het konden horen zouden we een roffel horen.

Iedere cm^2 van het kwikoppervlak voelt deze roffel ALS EEN BLIJVENDE KRACHT: DEZE BLIJVENDE KRACHT PER cm^2 NOEMT MEN DE DRUK VAN DE BUITEN LUCHT.

Het kwikoppervlak PQRS (zie fig.) staat dus geheel onder de druk van de buitenlucht; als de buitenlucht "haar zin kreeg" zou ze het kwik in de bak naar beneden persen. VOLGENS DE WET VAN PASCAL plant deze druk zich op iedere cm^2 MET DEZELFDE STERKTE voort; het vlakje

a (in de buis van Torricelli op dezelfde hoogte als PQRS) voelt dus PER cm^2 een NAAR BOVEN gerichte kracht, die gelijk is aan de druk van de buitenlucht.

Wil het vlakje a IN RUST blijven, dan moet ACTIE = REACTIE.
BOVEN het vlakje a moet dan dus een kwikkolom staan, die zo lang is dat:

DE DRUK van de kwikkolom h = DE DRUK VAN DE BUITENLUCHT.

Opmerking: Deze vergelijking kunnen we ook vinden door de hoofdwet der hydrostatica toe te passen.

Volgens deze wet moet immers:

de druk op a = de druk op PQRS

Dus:

$$P_{\text{kwikkolom h}} = P_{\text{buitenlucht}}$$

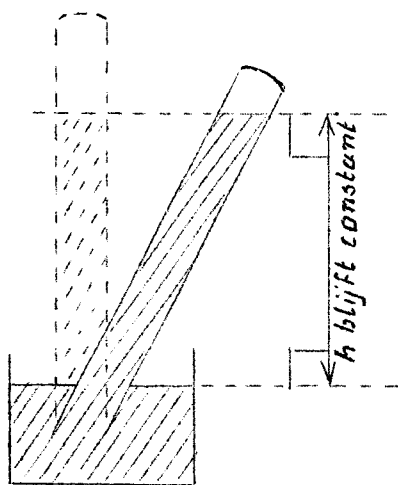
3) Welke rol speelt het vacuum in de buis van Torricelli?

Antw.: Het vacuum heeft GEEN ENKELE WERKING, want NIETS kan NIETS doen!

NB. Het kwik in de buis van Torricelli wordt dus NIET door het vacuum naar boven gezogen, maar door de buitenlucht naar boven GEPERST.

4) Wat gebeurt er als we de buis van Torricelli scheef houden?

Antw.:



Houden we de buis van Torricelli scheef DAN BLIJFT DE LOODRECHTE AFSTAND TUSSEN HET KWIKNIVEAU IN DE BUIS EN HET KWIKNIVEAU IN DE BAK ONVERANDERD.

Let wel, de LOODRECHTE AFSTAND! Met betrekking tot de loodrechte afstand van de kwikniveaus speelt de stand van de buis van Torricelli dus geen rol!

5) Wat weten we dus als we HET HOOGTEVERSCHIL tussen het kwikniveau in de bak en het kwikniveau in de buis van Torricelli weten?

Antw.: Dan weten we DE DRUK VAN DE BUITENLUCHT.

De proef van Torricelli levert ons dus een BAROMETER op.
(baros (gr) = zwaarte, druk)

6) Wat wil zeggen, DE BAROMETERSTAND IS 76 cm?

Antw.: Dit wil zeggen, dat de buitenlucht in staat is om bij de proef van Torricelli een verticale kwikkolom van 76 cm. op te houden.

7) Als de buis van Torricelli nu eens heel breed was, zou dat verschil maken?

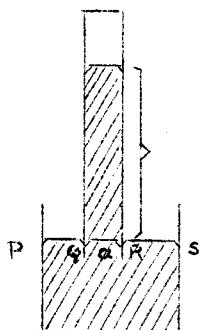
Antw.: Het gaat om DE DRUK, dus de kracht PER cm^2 . De breedte van de buis heeft dus geen invloed op het hoogteverschil tussen het kwikniveau in de bak en het kwikniveau in de buis van Torricelli.

NB. 8) Gegeven: De barometerstand is 76 cm.

Gevraagd: Hoeveel $\frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$ is de druk van de buitenlucht?

Oplossing: blz. 7.

Oplossing:



$$P_a = h \times S = 76 \times 13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

$$P_a = P_{\text{buitenlucht tegen PQRS}}$$

Dus:

$$P_{\text{buitenlucht}} = 76 \times 13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

Notatie: De druk van de buitenlucht wordt aangegeven door de letter b.
(b van barometerstand)

Conclusie: Als de barometerstand 76 cm is, is de druk van de buitenlucht:

$$b = 76 \times 13,6 = 1033,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

N.B. Zovaak de verticale kwikkolom EÉN cm. hoog is, zo vaak is de druk van de buitenlucht $13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$

9) In welke eenheden wordt de luchtdruk aangegeven?

Antw.: 1°) in cm. kwik $\rightarrow 1 \text{ cm. kwik} = 13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$

2°) in cm. water $\rightarrow 1 \text{ cm. water} = 1 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$

3°) in atmosfeer $\rightarrow 1 \text{ ATM.} = 76 \text{ cm. kwik.}$
zegge: ZES en zeventig cm. kwik.

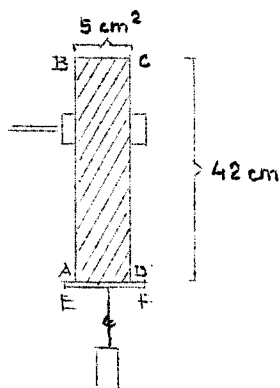
4°) in millibar $\rightarrow 1000 \text{ millibar} = 75,006 \text{ cm. kwik.}$
afgerond: 75 cm. kwik.

10) Opgave. Gegeven: De barometerstand is 76 cm. kwik.

Gevr.: Hoe lang is de (verticale) ALCOHOL kolom ($S = 0,8 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$) die door de buitenlucht kan opgehouden worden?

Oplossing:

11) Opgave:



Gegeven: ABCD (zie fig.) is een bekerglas met een hoogte van 42 cm. en een bodemoppervlak van 5 cm^2 . Het bekerglas is voor de proef geheel gevuld met alcohol ($S.g. 0,8 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^3}$) en afgesloten door een los plaatje EF dat 100 gram weegt. De rand AD van het bekerglas is ingevet, zodat het bekerglas hermetisch door het plaatje wordt afgesloten. Daarna is het bekerglas omgedraaid en met het losse plaatje naar beneden in een statief vastgezet.

Gevraagd: a) Waarom valt het plaatje niet naar beneden?

b) Hoeveel gram kan men aan het plaatje hangen voordat dit op het punt staat te vallen?

D E E L III. De spanning van een afgesloten hoeveelheid gas.

§ 1. De eenheden.

- 1) In welke eenheden wordt de druk van een afgesloten hoeveelheid gas aangegeven?

Antw.: In de eenheden waarin ook de druk van de buitenlucht wordt aangegeven, dus in cm. kwik, atmosfeer, $\frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$ of millibar.

- 2) Wat wil zeggen: Een afgesloten hoeveelheid gas heeft een spanning van 80 cm. kwik?

Antw.: Tegen iedere cm^2 van de wand drukt het gas met een kracht die een kwikkolom van 80 cm. zou kunnen ophouden.

- 3) Gegeven: Een afgesloten hoeveelheid gas heeft een druk van 90 cm. kwik.

Gevraagd: De druk in $\frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$.

Opl.: 1 cm. kwik = $13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$

$$\text{Dus } p = x = 1224 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

- 4) Gegeven: Een afgesloten hoeveelheid gas heeft een druk van $680 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$

Gevraagd: De druk in cm. kwik.

Opl.: $13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2} = 1 \text{ cm. kwik.}$

$$\text{Dus } p = \text{————} = 50 \text{ cm. kwik.}$$

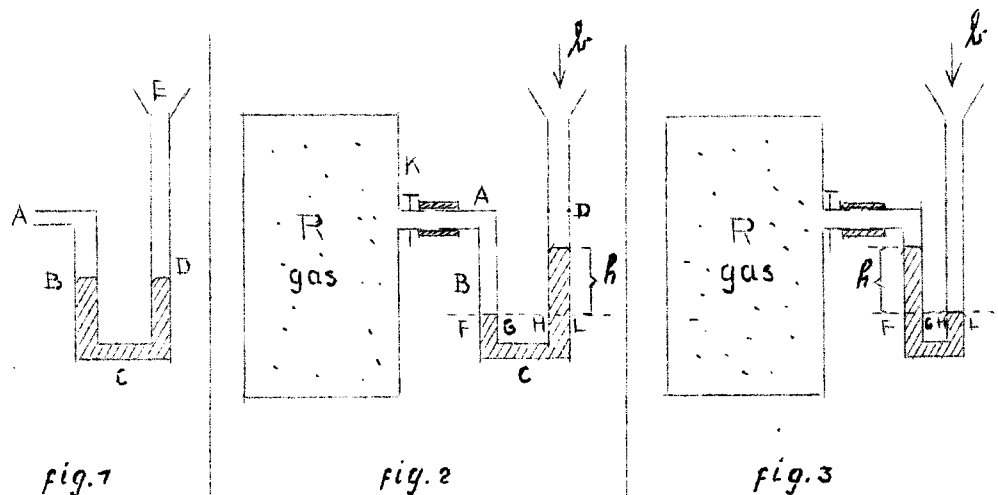
§ 2. Manometers.

- 1) Wat is een manometer.

Antwoord: Dit is een apparaat om de druk van een afgesloten hoeveelheid gas te bepalen, dus de druk van een gas in een afgesloten ruimte.

- 2) De OPEN MANOMETER: Maak een tekening van de OPEN MANOMETER en laat zien hoe men daarmee de spanning van een afgesloten gas bepaalt.

Antwoord:



Bij fig. 1: De OPEN manometer is een driemaal rechthoekig omgebogen buis ABCDE waarvan de delen B en D verticaal staan. Het uiteinde A is open en wordt straks doormiddel van een gummi-slang verbonden met een gasruimte. Het uiteinde E is ook open en blijft voortdurend in

verbinding met de buitenlucht. Aan het open zijn van E dankt de manometer de naam OPEN manometer.

B, C en D vormen twee communicerende vaten. Deze worden gedeeltelijk gevuld met kwik.

Zolang A in verbinding staat met de buitenlucht, staan de kwikniveaus in B en C gelijk.

Bij fig. 2: Een afgesloten hoeveelheid gas in R is via een geopende kraan K en een korte gummislang verbonden met de opening A. De lucht in de ruimte boven het kwik van buis B krijgt dus dezelfde spanning als het gas in A.

In de situatie van fig. 2 staat het kwikniveau in buis D HOGER dan het kwikniveau in buis B. Dit wijst er op, dat de spanning van het afgesloten gas in R groter is dan de druk van de buitenlucht.

Hoe groot is de spanning van het afgesloten gas?

Het antwoord op deze vraag vinden we door de hoofdwet der hydrostatica toe te passen op het scheidingsvlak door HET LAAGSTE van de twee kwikniveaus in de communicerende vaten.

We vinden: $DE\ DRUK_{op\ FG} = DE\ DRUK_{op\ HL}$

Dus: $P_{gas} = h + b\text{ cm. kwik.}$

Anders geschreven:

$$P_{gas} = b + h\text{ cm. kwik.}$$

Bij fig. 3: In deze situatie is de spanning van het afgesloten gas in R KLEINER dan de druk van de buitenlucht.

We vinden de druk van het afgesloten gas in R door de hoofdwet der hydrostatica toe te passen op het scheidingsvlak door HET LAAGSTE van de twee kwikniveaus in de communicerende vaten.

We vinden: $DE\ DRUK_{op\ FG} = DE\ DRUK_{op\ HL}$

Dus: $P_{gas} + h = b\text{ cm. kwik.}$

Dus:

$$P_{gas} = b - h\text{ cm. kwik.}$$

Opmerkingen: a) Leer deze formules NIET van buiten; bij de bepaling van de spanning van het afgesloten gas volg men het volgende recept:

a) teken het scheidingsvlak door het LAAGSTE kwikniveau en

β) pas de hoofdwet der hydrostatica toe.

b) Het is duidelijk, dat de open manometer van "hanteerbare" afmetingen, alleen kan gebruikt worden als de spanning van het afgesloten gas niet veel verschilt van de barometerstand.

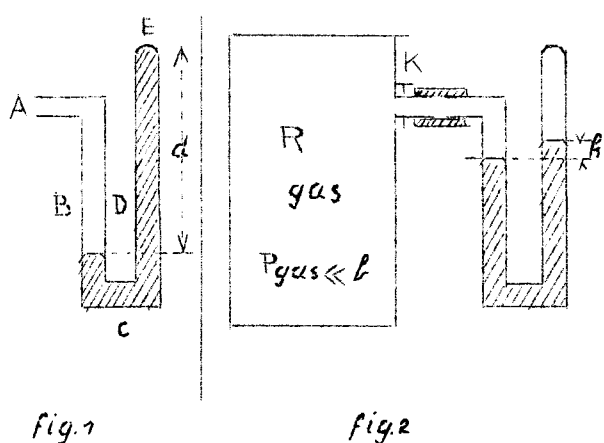
Wat zou er immers na het openen van de kraan K gebeuren als de spanning van het afgesloten gas b.v. 3 atm. was, of als deze spanning b.v. 0,01 cm kwik was?

Vraag: || Welke lengten zouden de buizen B en D minstens moeten hebben om de open manometer bruikbaar te maken voor spanningen van 3 atm., resp. 0,01 cm. kwik?

3) De GESLOTEN MANOMETER.

Teken een gesloten manometer en laat zien hoe men daarmee de spanning van een afgesloten gas kan bepalen MITS deze spanning (VEEL) KLEINER is dan de barometerdruk.

Antwoord:



Bij fig. 1: De gesloten manometer is eveneens een drie maal recht-hoekig omgebogen buis ABCD. Het uiteinde A is open; het uiteinde E is dicht, vandaar de naam GESLOTEN manometer.

De buis D heeft een lengte van ongeveer 20 cm, dus < 76 cm.

Men heeft de buis ABCD eerst luchtledig gepompt en daarna heeft men de buitenlucht een bepaalde hoeveelheid kwik in de buis laten persen, zò dat de buis D GEHEEL en de buis B voor een klein gedeelte gevuld is met kwik (zie fig.)

Zolang A in verbinding staat met de buitenlucht, wil de buitenlucht het kwikniveau in buis D b cm. hoger hebben dan in B.

Het glas bij E voelt dan dus van het kwik een opwaartse druk van

$$b - d \text{ cm. kwik.}$$

Bij fig. 2: De met gas gevulde ruimte R is via de geopende kraan K en een korte gummislang verbonden met de ruimte boven het kwik in buis B.

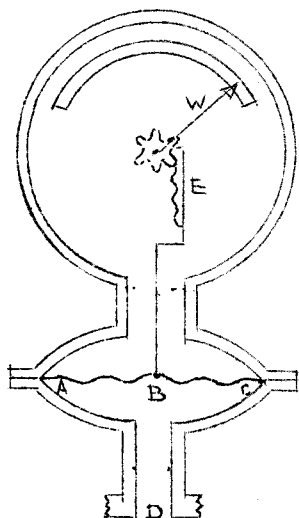
Is de spanning van het gas in R kleiner dan d cm. kwik, dan ontstaat de situatie van fig. 2. Boven het kwikniveau in buis D bevindt zich dan een luchtledige ruimte. Passen we nu de hoofdwet der hydrostatica toe op het scheidingsvlak door het laagste kwikniveau (dit is nu per sè het niveau in buis B) dan volgt:

$$P_{\text{gas}} = h \text{ cm. kwik.}$$

- Opmerkingen:
- Het kwikniveau in buis B moet per sè lager staan dan het niveau in buis D. Anders zou het gas in R een negatieve spanning hebben, hetgeen absurd is.
 - De gesloten manometer is alleen bruikbaar als de spanning van het gas in R zeer veel kleiner is dan de barometerdruk. Vandaar de naam manometer; manòs (grieks) = dun, ijl. Dus een meter voor de spanning van een ijl gas.
 - Het is niet noodzakelijk dat buis D kleiner is dan 76 cm. Maak zelf een tekening voor het geval dat in de situatie van fig. 1 het uiteinde E b.v. 100 cm. hoger ligt dan het kwikniveau in buis B.

Vraag: In welk geval bestaat er meer kans dat het glas bij E zal breken; in de situatie van fig. 1, of in die van fig. 2?

- 4) We hebben nu twee manometers besproken; de open- en de gesloten manometer. Het zijn toepassingen van de hoofdwet der hydrostatica. Als vloeistof gebruikten we kwik. Daarom noemt men deze manometers resp. de open- en de gesloten KWIK manometer. In principe kan natuurlijk ook een andere vloeistof gebruikt worden. Daarom vat men bovengenoemde manometers samen onder de naam VLOEISTOF-MANOMETERS.
- 5) METAALMANOMETER.



Het voornaamste onderdeel van de metaalmanometer is de cirkelvormige concentrisch GEGOLFDE plaat ABC waarvan de rand AC onwrikbaar en hermetisch is vastgeklemd.

Doordat de plaat ABC aldus gegolfd is, is het punt B in verticale richting beweegbaar.

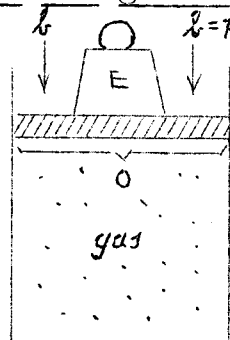
De manometer wordt bij D verbonden met de ruimte waarin zich het gas bevindt waarvan men de spanning wil bepalen. Is deze spanning groter dan de druk van de buitenlucht, dan gaat het punt B omhoog. Deze beweging wordt via E en een tandrad overgebracht op de wijzer W die daardoor tegen de wijzers van de klok in langs een geijkte schaalverdeling strijkt.

De metaalmanometer wordt gebruikt voor het bepalen van de spanning in gascilinders, stoomketels enz.

Bovenstaande metaalmanometer heet de manometer van SCHÄFFER en BUDENBERG. In de techniek wordt ook nog een ander type metaalmanometer gebruikt (van BOURDON). Dit type laten wij buiten beschouwing omdat de werking daarvan voor ons moeilijkheden oplevert.

NB. § 3. De spanning van een afgesloten hoeveelheid gas in een verticale cilinder met vrij beweegbare zuiger.

Eerst een getallenvoorbeeld.



$$\left\{ \begin{array}{l} G=40000 \text{ gr.} \\ E=28000 \text{ gr.} \\ O= 200 \text{ cm}^2. \end{array} \right.$$

Gegeven.

In een verticale cilinder bevindt zich een hoeveelheid gas.

De cilinder wordt afgesloten door een VRIJ BEWEEGBARE zuiger die $G = 40000$ gr. weegt en waarvan het oppervlak O (zie fig.) gelijk is aan 200 cm^2 .

Op de zuiger staat een "extra" gewicht $E = 28000$ gr.

De barometerstand $b = 76$ cm.

Gevraagd: De spanning van het afgesloten gas.

Oplossing: We moeten eerst goed nagaan wat de gegevens betekenen. De cilinder staat verticaal; d.w.z. dat de krachten G (het gewicht van de zuiger) en E (het extra gewicht) LOODRECHT STAAN OP HET OPPERVLAK O . De druk van de buitenlucht staat altijd loodrecht op O .

De zuiger is vrij beweegbaar, d.w.z. dat een overkracht naar boven of naar beneden de zuiger in de richting van die overkracht doet bewegen, hoe klein die overkracht ook is.

DE VRIJ BEWEEGBARE ZUIGER KAN DUS ALLEEN IN RUST ZIJN ALS DE TOTALE NAAR BOVEN GERICHTE KRACHT DIE HET AFGESLOTEN GAS TEGEN HET OPPERVLAK O UITOEFENT GELIJK IS AAN DE TOTALE NAAR BENEDEN GERICHTE KRACHT DIE HET OPPERVLAK O ONDERVINDT VAN DE BUITENLUCHT, HET GEWICHT VAN DE ZUIGER EN HET EXTRA GEWICHT SAMEN.

Maar als de TOTALE krachten aan elkaar gelijk zijn, moeten ook DE TOTALE PER CM² VAN O werkende krachten aan elkaar gelijk zijn.

De DRUKKEN aan weerskanten van het vlak O moeten dus aan elkaar gelijk zijn.

WIL DE ZUIGER DUS IN RUST ZIJN, DAN MOET

$$P_{\text{gas}} = b + (\text{DE DRUK van G + E op O}) \text{ cm. kwik.}$$

In ons getallen-voorbeeld moet dus:

$$P_{\text{gas}} = 76 + (\text{DE DRUK van G + E op O}) \text{ cm. kwik.}$$

Hoe groot is de DRUK van G + E op O ?

$$\text{Antw.: } G + E = 40000 + 28000 = 68000 \text{ grf.}$$

$$O = 200 \text{ cm}^2.$$

DE DRUK van G + E op O is dus:

$$\frac{68000}{200} = 340 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

Hoeveel cm. kwik is de druk van G + E op O ?

$$\text{Antw.: } 1 \text{ cm. kwik} = 13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

Zovaak 13,6 dus begrepen is op 340, zo vaak is de druk van G + E op O gelijk aan 1 cm. kwik.

De druk van G + E op O is dus:

$$\frac{340}{13,6} = 25 \text{ cm. kwik.}$$

Hoe groot is dus de spanning van het afgesloten gas?

$$\text{Antw.: } P_{\text{gas}} = 76 + (\text{DE DRUK van G + E op O})$$

$$\text{dus } P_{\text{gas}} = 76 + 25 = \underline{101 \text{ cm. kwik.}}$$

Algemeen: Wanneer is de zuiger in rust?

$$\text{Antw.: Als } P_{\text{gas}} = b + (\text{DE DRUK van G + E op O}) \text{ cm kwik.}$$

Hoeveel $\frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$ is de druk van G + E op O ?

$$\text{Antw.: } G \text{ en } E \text{ uitgedrukt in GRAMMEN} \quad \text{Let hier op!}$$

$$O \text{ in cm}^2.$$

Dan is:

$$\text{DE DRUK van G + E op O} = \frac{G + E}{O} \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

Hoeveel cm. kwik is de druk van G + E op O?

$$\text{Antw.: } 1 \text{ cm. kwik is } 13,6 \frac{\text{grf}}{\text{cm}^2}$$

Zovaak 13,6 begrepen is op $\frac{G+E}{O}$, zo vaak is de druk van G + E op O dus 1 cm. kwik.

Nu weten we uit de rekenkunde dat een breuk door een getal gedeeld wordt als we DE NOEMER van die breuk met dat getal VERMENIGVULDIGEN.

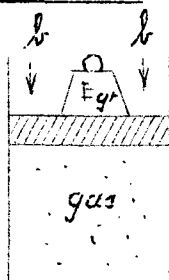
$$\text{DE DRUK van G + E op O is dus } \frac{G + E}{O \times 13,6} \text{ cm.kwik.}$$

Hoe groot is dus de spanning van het afgesloten gas?

Antw.:

$$P_{\text{gas}} = b + \frac{G+E}{O \times 13,6} \text{ cm. kwik.}$$

Conclusie:

CONCLUSIE:

De spanning van een afgesloten hoeveelheid gas in een verticale cilinder met vrij beweegbare zuiger is gelijk aan:

$$P_{\text{gas}} = b + \frac{G+E}{O \times 13,6} \text{ cm. kwik.}$$

N.B.

Hierin is: P_{gas} de spanning van het gas in cm. kwik.

b de barometerstand in cm. kwik.

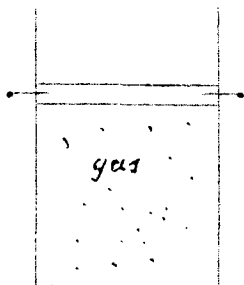
G het gewicht van de zuiger in GRAMMEN

E het (eventuele) EXTRA gewicht in GRAMMEN

O het (met het gas in aanraking zijnde) oppervlak van de zuiger in CM^2 .

DEEL IV. DE WET VAN BOYLE (Robert Boyle; Ier; 1627 - 1691)

1)



Opgave. We nemen een afgesloten hoeveelheid gas in een cilinder met VERSTELBARE zuiger. De zuiger is dus NIET VRIJ beweegbaar, maar kan hoger of lager gezet worden. We veranderen het gasvolume, MAAR ZORGEN ER VOOR DAT DE TEMPERATUUR CONSTANT BLIJFT.

Gevr.: Hoe verandert de spanning van het gas?

Oplossing. We weten dat de spanning van een afgesloten hoeveelheid gas bepaald wordt door:

1°) het aantal moleculen PER cm^3 .

2°) de gemiddelde stootkracht van de moleculen.

Nu blijft de temperatuur constant, dus ook de gemiddelde bewegingsenergie, dus ook de gemiddelde stootkracht.

Stel, we verkleinen het gasvolume tot de helft, ER KOMEN DAN DUS TWEE MAAL ZO VEEL GASMOLECULEN PER cm^3 . Iedere cm^2 van de wand krijgt dus op ieder ogenblik TWEE MAAL ZO VEEL EVEN HARDE STOTEN. De spanning (of druk) van het afgesloten gas is dus TWEE MAAL ZO GROOT geworden.

Maken we het gasvolume 3 x ZO GROOT, dan wordt de spanning HET DERDE DEEL van de oorspronkelijke spanning.

Getallen voorbeeld:

Volume	Spanning	Spanning x volume.
10 L.	80 cm.	10 x 80 = 800
5 L.	160 cm.	x = 800
50 L.		x =
20 L.		x =
enz.		

Wat is hierbij merkwaardig?

Antw.: Dat van de gegeven afgesloten hoeveelheid gas het product $P \times V$ altijd dezelfde waarde heeft, MITS de temperatuur constant blijft.

Wie heeft deze merkwaardigheid het eerst ontdekt?

Antw.: Robert Boyle.

Daarom noemt men deze merkwaardigheid DE WET VAN BOYLE.

Hoe luidt de wet van Boyle in woorden?

Antw.:
 VAN EEN AFGESLOTEN HOEVEELHEID GAS
 IS
 BIJ GELIJK BLIJVENDE TEMPERATUUR
 HET PRODUCT VAN SPANNING EN VOLUME
 VÓÓR DE PROEF
 GELIJK AAN
 HET PRODUCT VAN SPANNING EN VOLUME
 NÁ DE PROEF.

Waar gaat het bij de wet van Boyle dus om ?

Antw.: om (SPANNING x VOLUME) vòòr de proef en
 (SPANNING x VOLUME) nà de proef.

Onder welke voorwaarden zijn die producten aan elkaar gelijk?

Antw.: Als aan TWEE voorwaarden voldaan is
 1°) Het gas moet AFGESLOTEN zijn en
 2°) DE TEMPERATUUR MOET CONSTANT BLIJVEN.

Hoe luidt de wet van Boyle in formule?

Antw.:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

M I T S

het gas afgesloten is en DE TEMPERATUUR

CONSTANT BLIJFT.

N.B.

b.v. $P_1 = 90 \text{ cm.}$

$V_1 = 5 \text{ L.}$

$V_2 = 15 \text{ L.}$

temp. constant

Gevr.: P_2

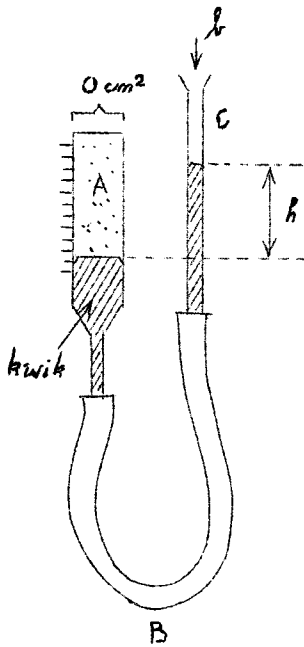
Boyle: $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$

$90 \times 5 = P_2 \times 15$

$P_2 = 30 \text{ cm. kwik}$

2) We hebben nu een wet DOOR REDENERING afgeleid zonder te rade te gaan bij de natuur zelf. Het is dus nog zeer de vraag of een gas zich in de werkelijkheid inderdaad volgens de wet van Boyle gedraagt!

Dit maken we uit door een proef: DE PROEF VAN BOYLE.

a) Het toestel.

A is een afgesloten ruimte. Hierin bevindt zich een hoeveelheid gas (b.v. lucht) Kleur het gas rood. OVER DEZE AFGESLOTEN HOEVEELHEID GAS GAAT DE PROEF.

De buis A is voorzien van een schaalverdeling; boven staat nul en verder streepjes op afstanden van 1 cm. De buis A heeft een doorsnede van 0 cm^2 .

IEDER SCHAALEDEEL VERTEGENWOORDIGT DUS EEN VOLUME VAN $0 \times 1 = 0 \text{ cm}^3$.

In nevenstaande tekening heeft het afgesloten gas dus een volume van $10,5 \times 0 \text{ cm}^3$.

B is een gummi slang.

C is een verticale glazen buis die van boven open is.

De buis C kan hoger en lager gezet worden.

Het gas in A wordt van de buitenlucht afgesloten door het kwik in B en C.

Hoe groot is de spanning van het afgesloten gas in A ?

Antw.: Passen we de hoofdwet der hydrostatica toe op het laagste van de twee kwikniveaus, dan volgt:

b)
$$P_{\text{gas}} = b + h \text{ cm. kwik.}$$

b) Wat wij bij de proef DOEN.

Verschuiven we de buis C verticaal naar boven (de gummi slang gaat dan mee) dan stijgt het kwikniveau in buis C, maar OOK het kwikniveau in buis A. Het afgesloten gas in A krijgt daardoor dus een kleiner volume en dus een grotere spanning.

Het nieuwe volume V_2 kunnen we aflezen op de schaalverdeling langs buis A; de nieuwe spanning is gelijk aan $P_2 = b + h_2 \text{ cm.kw.}$ Aldus kunnen we het afgesloten gas in A een "willekeurig" volume geven en door toepassing van de hoofdwet der hydrostatica op het laagste van de twee kwikniveaus, de bijbehorende spanning bepalen.

De temperatuur van het afgesloten gas blijft constant.

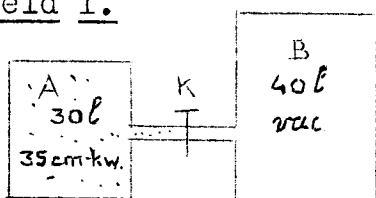
We doen nu een serie waarnemingen van V en de bijbehorende P van het gas in A en gaan dan na of het product $P \times V$ steeds dezelfde waarde heeft.

c) Waarnemingen.

b	h	P	V	$P \times V$

d) Resultaat: Bij een school proef zijn de waarnemingen niet wetenschappelijk nauwkeurig; ondanks deze onnauwkeurigheid blijft het product $P \times V$ vrij aardig in de buurt van hetzelfde getal.

Conclusie: De wet van Boyle komt inderdaad uit!

3) Voorbeelden van sommen over de wet van Boyle.Voorbeeld I.

Geg.: A en B zijn twee vaten die door het openen van de kraan K met elkaar verbonden worden. Aan het begin van de proef is de kraan K dicht.

$$V_A \text{ (tot aan de kraan)} = 30 \text{ liter}$$

$$V_B \text{ (tot aan de kraan)} = 40 \text{ liter}$$

In A bevindt zich zuurstofgas met een spanning van 35 cm. kwik; B is vacuum.

Men opent de kraan K, maar zorgt er voor dat de temperatuur constant blijft.

Gevr.: De spanning van het zuurstofgas na het openen van de kraan.

Opl.: De som handelt dus over de afgesloten hoeveelheid gas die zich, voordat de kraan K geopend wordt, in vat A bevindt. (Wijs deze hoeveelheid gas aan door de ruimte A b.v. te kleuren).

Wat gebeurt er met deze hoeveelheid gas als K geopend wordt?

Antwoord. Omdat B vacuum is en het gas uit A dus NIET kan tegengehouden worden, stroomt als K geopend wordt, een gedeelte van het gas uit A naar B. De spanning in A neemt daardoor AF en de spanning in B TOE; er stroomt zoveel gas van A naar B tot de spanning in beide vaten evengroot geworden is. De temperatuur is niet veranderd.

Wat is er dus eigenlijk gebeurd?

Antwoord. Een afgesloten hoeveelheid gas dat vòòr de proef een spanning van 35 cm. en een volume van 30 L. had heeft bij dezelfde temperatuur een volume van

$$30 + 40 = 70 \text{ liter gekregen.}$$

Dus:

vòòr	nà
$P_1 = 35 \text{ cm.}$	$P_2 = ?$
$V_1 = 30 \text{ L.}$	$V_2 = 70 \text{ L.}$
$t_1 = \text{constant.}$	$t_2 = t_1 = \text{constant.}$

Hoe groot is dus de spanning nà de proef?

Antwoord. Omdat de temperatuur constant blijft, geldt nu de wet van Boyle:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

$$\text{dus: } 35 \times 30 = P_2 \times 70$$

$$\text{dus: } 15 = P_2$$

Conclusie: Na het openen van de kraan K krijgt het zuurstofgas een spanning
 $P_2 = 15 \text{ cm. kwik.}$

Opmerking: Het is natuurlijk niet nodig dat bij iedere som zo'n verhaal wordt OPGESCHREVEN. Het is wel nodig dat men bij iedere som goed overdenkt WAT ER EIGENLIJK GEBEURT. Bij het oplossen van een som over gassen volg men het volgende schema:

1^o) Wijs het gas aan waar de som over gaat.

2^o) Vul in:

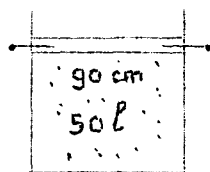
vòòr	nà
$P_1 =$	$P_2 =$
$V_1 =$	$V_2 =$
$t_1 =$	$t_2 =$

Als $t_1 = t_2$ geldt de wet van Boyle.

Dan is dus:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Voorbeeld II.



Geg.: Een cilinder met verstelbare zuiger heeft een inhoud van 50 L. en is gevuld met een hoeveelheid gas, spanning 90 cm. Bij constante temperatuur verstelt men de zuiger, zò dat het gas een spanning krijgt van 150 cm.

Gevr.: a) Het volume na de proef.

Oplossing:

vòòr		nà
$P_1 =$		$P_2 =$
$V_1 =$		$V_2 =$
$t_1 = t_2 = \text{constant.}$		

Temp. constant, dus wet van Boyle.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

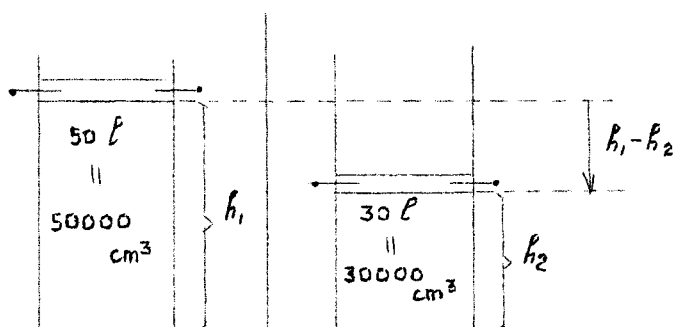
$$x = x$$

$$\text{Dus:} \quad = V_2$$

Conclusie: Het volume na de proef is 30 Liter.

Gevraagd b) Als het oppervlak van de zuiger 500 cm² is, hoeveel cm. en in welke richting heeft men de zuiger dan moeten verplaatsen.

Oplossing:

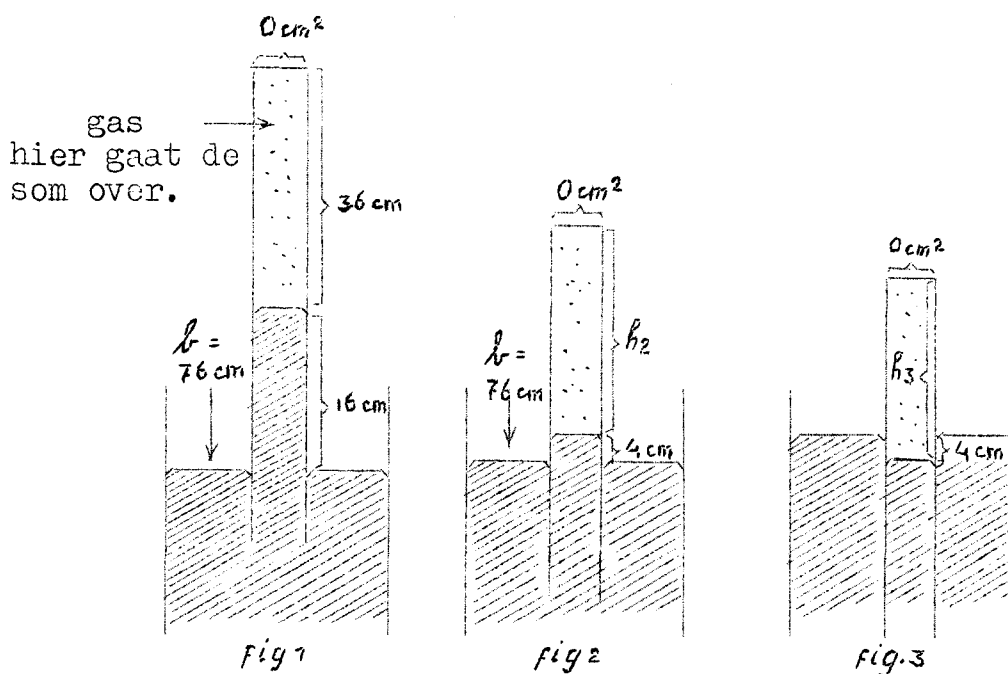


$$\begin{aligned} V &= O \times h \\ 50000 &= 500 \times h_1 \\ h_1 &= 100 \text{ cm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V &= O \times h \\ 30000 &= 500 \times h_2 \\ h_2 &= 60 \text{ cm.} \end{aligned}$$

$$h_1 - h_2 = 40 \text{ cm.}$$

Conclusie: Men heeft de zuiger 40 cm. naar beneden moeten verplaatsen.

Voorbeeld III.

Gegeven: In een buis van Torricelli (zie fig. 1) bevindt zich boven het kwik een gaskolom ter lengte van 36 cm. De doorsnede van de buis is 0 cm². Het kwik in de buis staat 16 cm. HOGER dan het kwik in de bak. De barometerstand is 76 cm. Men duwt de buis omlaag totdat het kwik in de buis nog slechts 4 cm. HOGER staat dan in de bak (fig. 2).

Gevr.: a) Hoe lang is dan de gaskolom in de buis; hoeveel cm. steekt de buis dan uit boven het kwik in de bak?

Oplossing:

vòòr: fig. 1.

Hoofdwet op laagste kwik niveau:

$$76 = 16 + P_{\text{gas}}$$

$$\text{Dus: } P_1 = \quad \text{cm kwik}$$

$$V_1 = 36 \times 0 \text{ cm}^3$$

nà: fig. 2.

$$76 = 4 + P_{\text{gas}}$$

$$\text{Dus: } P_2 = \quad \text{cm kwik}$$

$$V_2 = h_2 \times 0 \text{ cm}^3$$

Temperatuur constant, dus Boyle:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

$$\times 36 \times 0 = \quad \times h_2 \times 0$$

$$\text{Dus:} \quad = \quad \times h_2$$

$$\text{Dus:} \quad h_2 = 30 \text{ cm.}$$

Conclusie: De lengte van de gaskolom is 30 cm.; de buis steekt 34 cm. uit boven het kwik in de bak.

Gevr.: b) Men duwt de buis verder omlaag totdat het kwik in de buis 4 cm. LAGER staat dan het kwik in de bak. Hoe lang is dan de gaskolom en hoeveel cm. steekt de buis dan uit boven het kwik in de bak?

Oplossing.: blz. 19.

Oplossing:

vòòr: fig. 1.
Hoofdwet op laagste
kwikniveau:

$$76 = 16 + P_{\text{gas}}$$

$$P_1 = 60 \text{ cm. kwik}$$

$$V_1 = 36 \times 0 \text{ cm}^3.$$

na: fig. 3:

Hoofdwet op laagste
kwikniveau:

$$P_{\text{gas}} = 4 + 76 \text{ cm. kw.}$$

$$P_3 = 80 \text{ cm. kwik.}$$

$$V_3 = h_3 \times 0 \text{ cm}^3.$$

Temperatuur constant, dus Boyle:

$$60 \times 36 \times 0 = 80 \times h_3 \times 0$$

$$60 \times 36 = 80 \times h_3 \quad (80 = 4 \times 20)$$

$$3 \times 9 = h_3$$

$$h_3 = 27 \text{ cm.}$$

Conclusie: De lengte van de gaskolom in fig. 3 is 27 cm; de buis steekt 27 - 4 = 23 cm. uit boven het kwik in de bak.

Opmerking: Op het eerste oog lijken deze "Torricelli-sommen" veel moeilijker dan de anderen. Dit is echter maar schijn.

Recept:

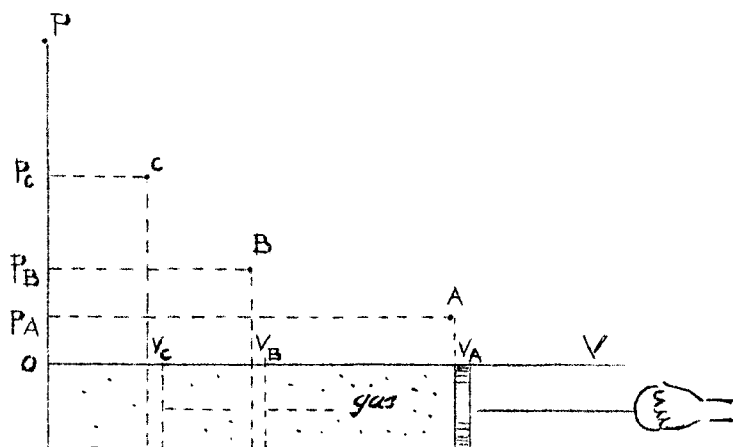
1^o) Kleur de afgesloten hoeveelheid gas, waar de som over gaat, in de situatie vòòr en nà de proef, en

2^o) vul in:

	vòòr	nà
$P_1 =$		$P_2 =$
$V_1 =$		$V_2 =$

Temp.constant; dus Boyle.

NB 4) Grafische voorstelling bij de wet van Boyle.



In de bovenstaande figuur beschouwen we een cilinder met verstelbare zuiger. In de cilinder bevindt zich een hoeveelheid gas.

Bij het volume V_A is de spanning van het gas P_A .

We tekenen deze spanning P_A aan op de lijn OP die in O loodrecht staat op de lijn OV.

Construeren we nu de rechthoek met OV_A en OP_A tot zijden, dan vinden we het GRAFIEKPUNT A.

Is omgekeerd het grafiekpunt A gegeven, dan kunnen we het volume V_A en de DAARBIJ behorende spanning P_A van het afgesloten gas construeren. De halflijn OV noemt men de VOLUME-AS; de halflijn OP de SPANNINGS-AS.

De loodlijn vanuit het grafiekpunt A op de volume-as geeft dus de spanning van het afgesloten

gas bij het volume V_A aan.

Verkleinen we het volume BIJ CONSTATE TEMPERATUUR tot de helft, dus tot V_B , dan wordt de spanning van het afgesloten gas twee - maal zo groot. We vinden dan het grafiekpunt B.

Verkleinen we het gasvolume, steeds bij constante temperatuur, tot V_C ($= \frac{1}{2}V_B = \frac{1}{4}V_A$) dan vinden we het grafiekpunt C, enz.

Vraag: De grafiekpunten A, B, C enz. zijn elk "het vierde hoekpunt" van een rechthoek.

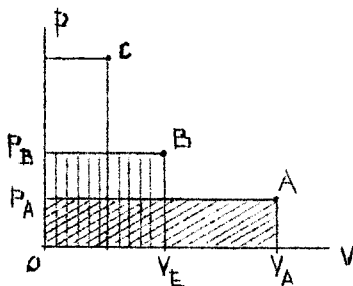
Wat valt er te zeggen over deze rechthoeken?

Antw.: Het afgesloten gas volgt de wet van Boyle.

Dus $P_A \times V_A = P_B \times V_B = P_C \times V_C = \text{enz.}$

Maar $P_A \times V_A$ is gelijk aan HET OPPERVLAK van de rechthoek waarvan het grafiekpunt A het vierde hoekpunt is; $P_B \times V_B$ het oppervlak van de rechthoek waarvan B het vierde hoekpunt is, enz.

Conclusie:



Volgens de wet van Boyle moeten de doördinatenrechthoeken waarvan de grafiekpunten de vierde hoekpunten zijn, EEN ONDERLING GELIJK OPPERVLAK HEBBEN.

Vraag: Wat verstaat men nu onder de grafiek bij de wet van Boyle?

Antw.: Hieronder verstaat men de wiskundige lijn die door de grafiekpunten A, B, C enz. gaat.

Vraag: Welke vorm heeft deze grafieeklijn?

Antw.: De grafieeklijn is dus de verzameling van de vierde hoekpunten van de rechthoeken waarvan de oppervlakken aan elkaar gelijk zijn; ze heeft een streng bepaalde vorm, want uitgaande van het gegeven punt A kan men de andere punten van de verzameling punt voor punt construeren.

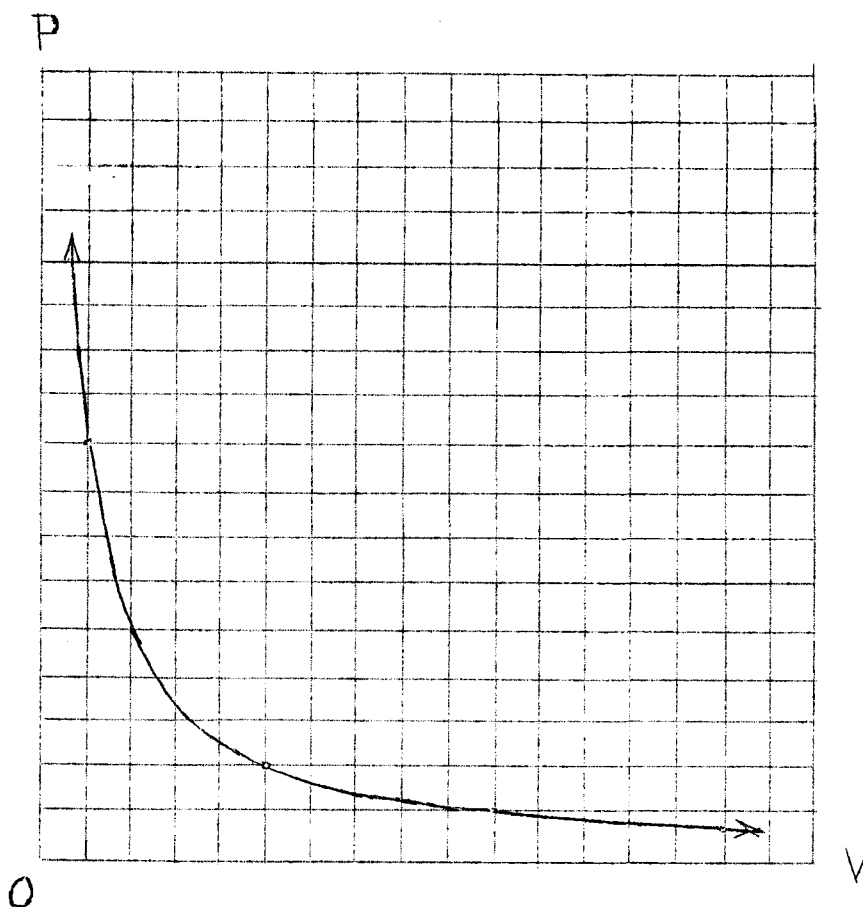
Uit bovenstaande figuur blijkt direct dat de grafieeklijn NIET RECHT kan zijn, maar GEBOGEN moet zijn. De punten A, B, C enz. liggen immers niet op een rechte lijn.

Is het misschien een cirkel?

Heel beslist niet!

Dit zien we duidelijk als we grafiekpunten construeren die behoren bij een kleine V_{gas} of een grote V_{gas} .

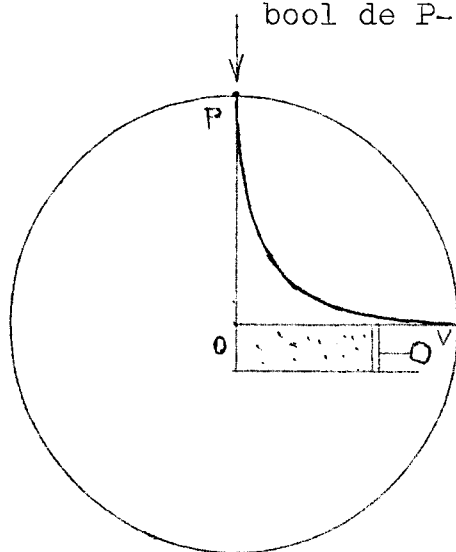
Constructie op blz. 21.



De grafieklijn is een vloeiend gebogen lijn, die steeds dichterbij de spanningsas komt naarmate het gasvolume kleiner wordt, en steeds dichterbij de volume-as naarmate het gasvolume groter wordt.
 In de wiskunde heet zo'n lijn een HYPERBOOL.
 Wij zullen deze grafieklijn DE HYPERBOOL VAN BOYLE noemen.

Hoe loopt deze lijn verder?

hier raakt de hyperbool de P-as.



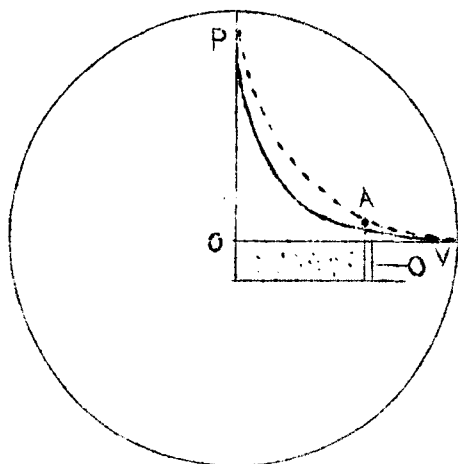
We tekenen de hele wereld binnen een cirkel; de omtrek van die cirkel is dus het oneindige! Welnu, de hyperbool van Boyle raakt de P-as in het oneindig verre punt van de P-as, en raakt de V-as in het oneindig verre punt van de V-as. De hyperbool van Boyle is dus een soort spinnewebdraad die in het oneindige aan de spannings- resp. volume-as bevestigd is.

Vraag: Stel, dat we de proef herhaalden bij een HOGERE constante temperatuur. Hoe zou de hyperbool van Boyle dan lopen?

Antw.:

Het grafiekpunt A zou dan dus hoger moeten liggen.

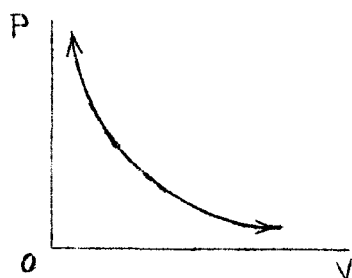
Zie blz. 22



De hyperbool van Boyle zou dan dus "strakker gespannen" zijn, maar raakt ook dan in het oneindige aan de assen.

Opmerking: Met het oog op hetgeen we later krijgen is het van belang om uitdrukkelijk vast te stellen dat de hyperbolen van eenzelfde afgesloten gas bij verschillende temperaturen NIET EVENWIJDIG lopen!

Conclusie uit punt 4.



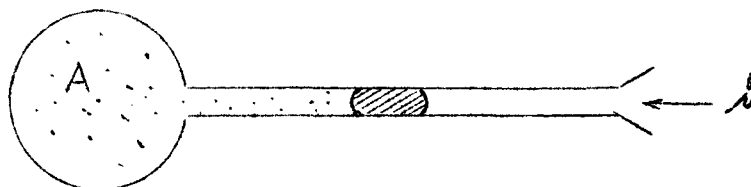
De grafiek bij de wet van Boyle.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

is een HYPERBOOL die in het oneindige RAAKT aan de coördinaat - assen.

D E E L V. DE UITZETTING VAN GASSEN BIJ VERWARMING ONDER CON- STANTE DRUK.

- 1) Beschrijf een proef die iets leert over de uitzetting van een gas bij verwarming onder constante druk.



De kwikdruppel is in rust, d.w.z. DAT DE SPANNING VAN HET GAS IN A GELIJK IS AAN DE DRUK VAN DE BUITENLUCHT.

Antwoord: A is een ballon met een horizontale steel, waarvan het uiteinde open is. In de ballon bevindt zich een hoeveelheid lucht. In de horizontale steel bevindt zich een kwikdruppel DIE HET GAS IN A AFSLUIT VAN DE BUITENLUCHT.

We verwarmen nu het gas in A een weinig b.v. door onze hand tegen de ballon te houden. We zien nu dat de kwikdruppel zeer snel een flink stuk naar rechts verschuift.

Verklaring: Verwarmen wil zeggen, de moleculen meer bewegingsenergie geven. Bij de verwarming van de ballon krijgen de gasmoleculen in A dus meer bewegingsenergie, met het gevolg dat de spanning van het gas in A toeneemt en dus groter wordt dan de barometerdruk.

Het gas in A oefent dus een overdruk uit op de kwikdruppel met het gevolg dat de kwikdruppel niet meer in rust kan blijven, maar naar rechts moet bewegen. Bij deze beweging van de kwikdruppel naar rechts krijgt het gas in A een groter volume, met het gevolg DAT DE OVERDRUK AFNEEMT.

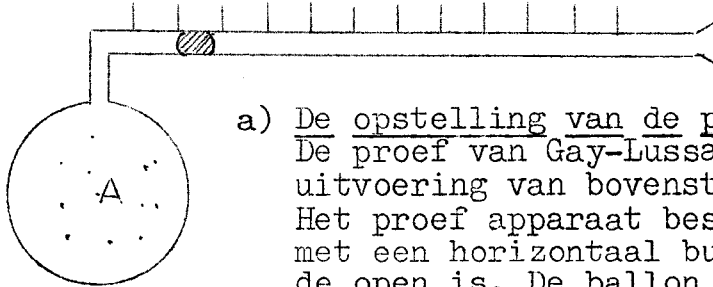
De kwikdruppel verschuift zoveel naar rechts tot de spanning van het verwarmde gas in A weer gelijk is geworden

aan de druk van de buitenlucht.

WAAR HET ONS NU OM GAAT is, dat de kwikdruppel EEN FLINK STUK naar rechts moet verschuiven voordat de spanning van het verwarmde gas weer gelijk geworden is aan de spanning aan het begin van de proef (i.c. de druk van de buitenlucht).

Concl.: Gassen zetten zeer veel uit bij verwarming onder constante druk.

- 2) We vragen nu HOEVEEL het volume van een afgesloten hoeveelheid gas verandert bij verwarming onder constante druk.
Dit is het eerst onderzocht door de Franse natuurkundige GAY-LUSSAC. (Joseph Louis Gay-Lussac; 1778 - 1850)



a) De opstelling van de proef.

De proef van Gay-Lussac is een enorm verfijnde uitvoering van bovenstaande "klas-proef".

Het proef apparaat bestaat uit een ballon met een horizontaal buisje waarvan het uiteinde open is. De ballon en het buisje zijn van

KWARTS GLAS. Dit is een glassoort met een uiterst kleine kubieke uitzettingscoëfficiënt, zodat de volumevermeerdering van de ballon t.g.v. een verwarming kan verwaarloosd worden.

In A bevindt zich een hoeveelheid gas. Dit gas wordt van de buitenlucht afgesloten door een vrij beweegbare kwikdruppel in het horizontale buisje.

HET HORIZONTALE BUISJE IS GECALIBREERD, d.w.z. voorzien van een schaalverdeling, ZODAT HET VOLUME VAN HET AFGESLOTEN GAS KAN AFGELEZEN WORDEN.

Omdat het horizontale buisje aan de andere kant OPEN is, kan de vrij beweegbare kwikdruppel alleen in rust zijn ALS DE SPANNING VAN HET AFGESLOTEN GAS GELIJK IS AAN DE DRUK VAN DE BUITENLUCHT.

Bij verwarming van het gas in A zal de kwikdruppel dus zolang verschuiven TOTDAT DE SPANNING VAN HET AFGESLOTEN GAS WEER GELIJK GEWORDEN IS AAN DE DRUK VAN DE BUITENLUCHT. De kwikdruppel zorgt er dus voor dat de spanning van het afgesloten gas tijdens de hele proef CONSTANT gelijk blijft aan de druk van de buitenlucht.

Daar de druk van de buitenlucht in de korte tijdsduur van de proef niet verandert, kunnen we zeggen DAT BIJ DEZE PROEF EEN AFGESLOTEN HOEVEELHEID GAS VERWARMD WORDT ONDER CONSTANTE DRUK.

De vraag is nu HOE HET VOLUME VAN HET AFGESLOTEN GAS DAARBIJ VERANDERT.

b) De proef.

Gay-Lussac geeft A de temperatuur 0° C. en bepaalt HET VOLUME van het gas; daarna geeft hij A de temperatuur 1° C. en bepaalt weer HET VOLUME van het afgesloten gas.

Door aftrekking vindt hij hoeveel cm^3 het gas bij deze verwarming van 0° C. \rightarrow 1° C. is uitgezet.

Daarna herhaalt hij de proef bij 2° C, 3° C, 4° C, 100° C enz.

Op deze manier bepaalt hij dus DE VOLUME VERMEERDERING PER GRAAD VERWARMING ONDER CONSTANTE DRUK.

c) RESULTAAT.

1 $^{\circ}$) PER GRAAD VERWARMING ONDER CONSTANTE DRUK neemt het volume van het afgesloten gas met EEN CONSTANT BEDRAG toe.

2 $^{\circ}$) Dit bedrag is $\frac{1}{273}$ VAN HET VOLUME dat deze afgesloten hoeveelheid gas HAD bij 0° C. en de geg. constante druk.

3 $^{\circ}$) DE SOORT VAN HET GAS DOET HIERBIJ NIETS TER ZAKE:
ALLE GASSEN HEBBEN DEZELFDE KUBIEKE UITZETTINGS-COEFFICIENT n.l. :

$\frac{1}{273}$

Dit resultaat staat bekend als DE VOLUME-WET VAN GAY-LUSSAC.

Hoe luidt de volume-wet van Gay-Lussac?

Antwoord:

N.B.

verwarmt men
een afgesloten hoeveelheid gas
onder constante druk
dan neemt het volume PER GRAAD verwarming toe
met $\frac{1}{273}$ deel
van het volume dat deze afgesloten hoeveelheid gas
HAD
bij 0° C. en
de gegeven constante druk.

3) FORMULES bij de volume-wet van Gay-Lussac.

Deze formules zijn dezelfde als die voor de kubieke uitzetting van een vaste stof, alleen met deze bijzonderheid, dat voor ALLE GASSEN $\gamma = \frac{1}{273}$.

Formule I. $\Delta V_{\text{per graad}} = \frac{1}{273} V_0$ MITS P constant is.

Formule II.

$$\begin{array}{l} | t_2 \\ | \\ | t_1 \\ \downarrow \end{array} \quad \Delta V_{t_1 \rightarrow t_2} = \frac{1}{273} \cdot V_0 \cdot (t_2 - t_1)$$

Formule III.

$$\begin{array}{l} | t^\circ\text{C} \\ | \\ | 0^\circ\text{C} \\ \downarrow \end{array} \quad \begin{array}{l} \text{Geg.: } V_0 \\ \text{Gevr: } V_t \\ \text{Opl.: } V_t = V_0 + \text{wat er bij komt.} \\ V_t = V_0 + \left(\begin{array}{l} \text{wat er PER} \\ \text{GRAAD bijkomt} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{l} \text{aantal gr.} \\ \text{boven } 0^\circ\text{C.} \end{array} \right) \\ \text{dus: } V_t = V_0 + \frac{1}{273} \cdot V_0 \cdot t \end{array}$$

$$\text{dus: } \boxed{V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} \cdot t \right)}$$

Formule IV.

$$\begin{array}{l} | t_2^\circ\text{C} \\ | \\ | t_1^\circ\text{C} \\ \downarrow \end{array} \quad \begin{array}{l} V_{t_1} : V_{t_2} = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t_1 \right) : V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t_2 \right) \\ = \left(1 + \frac{1}{273} t_1 \right) : \left(1 + \frac{1}{273} t_2 \right) \\ = \frac{273 + t_1}{273} : \frac{273 + t_2}{273} \\ = (273 + t_1) : (273 + t_2) \end{array}$$

$$\text{Dus: } \boxed{V_{t_1} : V_{t_2} = (273 + t_1) : (273 + t_2)}$$

In woorden: Verwarmt men een afgesloten hoeveelheid gas onder constante druk, dan verhouden de volumina zich als $(273 + t_1) : (273 + t_2)$

Getallenvoorbeeld bij formule IV.Gegeven: $V_{27^{\circ}} = 100$ liter.Men verwarmt onder constante druk tot 147° C.Gevraagd: a) $V_{147^{\circ}}$.

Oplossing:

$$V_{27^{\circ}} : V_{147^{\circ}} = (273 + 27) : (273 + 147)$$

$$100 : V_{147^{\circ}} = 300 : 420$$

Dus: $V_{147^{\circ}} = 140$ liter.

Gevraagd: b) Welke volumeverandering ondergaat deze afgesloten hoeveelheid gas bij afkoeling van 147° C \rightarrow -3° C.

Oplossing: I

$$V_{147^{\circ}} : V_{-3^{\circ}} = (273 + 147) : (273 - 3)$$

$$140 : V_{-3^{\circ}} = 420 : 270$$

Dus: $V_{-3^{\circ}} = 90$ liter.

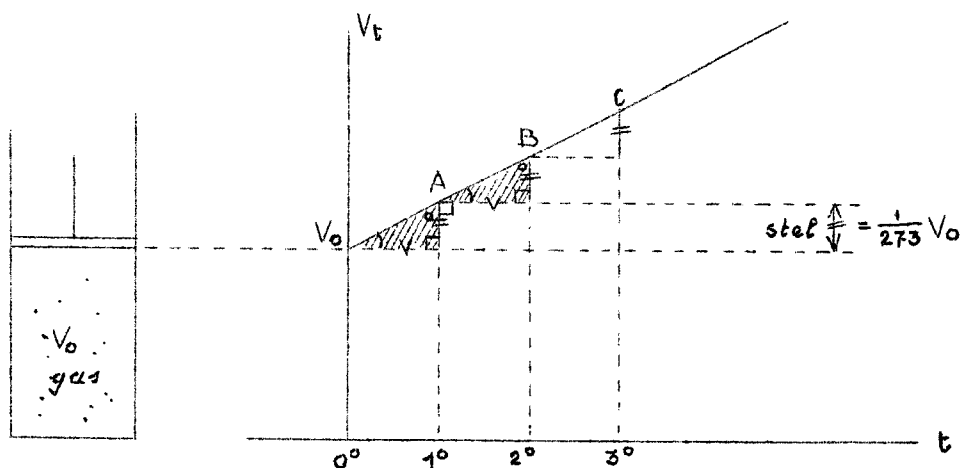
$V_{147^{\circ}} = 140$ liter } Bij de afkoeling onder constante
 $V_{-3^{\circ}} = 90$ liter } druk van $147^{\circ} \rightarrow -3^{\circ}$ C. wordt het
 volume 50 liter kleiner.

Oplossing: II

$$V_{27^{\circ}} = 100$$
 liter } Per 120° verwarming onder con-
 $V_{147^{\circ}} = 140$ liter } stante druk neemt het volume
 40 liter toe.

We koelen af van $147^{\circ} \rightarrow -3^{\circ}$ C., dit zijn 150° C.
 Het volume neemt daarbij dus AF met

$$\frac{150}{120} \times 40 = 50 \text{ liter.}$$

4) Grafische voorstelling.Opgave: Teken een grafische voorstelling die de volumeverandering in beeld brengt van een afgesloten hoeveelheid gas bij verwarming onder constante druk.Oplossing:

Het afgesloten gas wordt verwarmd onder constante druk: bij iedere graad temperatuurstijging neemt het volume toe met $\frac{1}{273} \cdot V_0$.

Bij 1° C wordt het volume dan aangegeven door het grafiekpunt A;
 bij 2° C " " " " " " " " " " " " B;
 enz.

Bewering: De grafiekpunten V_0 , A, B, enz. liggen op een RECHTE lijn.Bewijs:

Bewijs: De gearceerde $\triangle \triangle$ zijn congruent (Z H Z)

$$\text{dus: } \begin{array}{l} \angle \gamma = \angle \gamma \\ \angle o = \angle o \\ \angle A\Gamma = 90^\circ \end{array} \quad \angle V_oAB = \underbrace{\angle o + \angle \gamma}_{90^\circ} + \underbrace{\angle \Gamma}_{90^\circ} = 180^\circ.$$

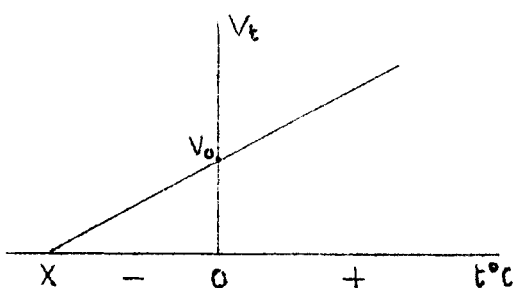
Dit bewijs kunnen we voortzetten voor de grafiekpunten A, B, C enz.

Conclusie: De verzameling van de grafiekpunten is een RECHTE lijn door het punt V_o .

Bewering: Deze rechte lijn snijdt de temperatuur-as in het punt -273°C .

Bewijs: Per graad verwarming neemt het volume TOE met $\frac{1}{273} \cdot V_o$. De grafieklijn is dus een rechte lijn die door V_o schuin NAAR BOVEN loopt.

Trekken we de grafieklijn naar links door, dan zien we, dat deze grafieklijn de temperatuur-as onherroepelijk moet snijden in een punt X op het NEGATIEVE gedeelte van de temperatuur-as.



De temperatuur-coördinaat van het punt X kunnen we gemakkelijk berekenen: PER GRAAD AFKOELING neemt het volume AF met $\frac{1}{273} \cdot V_o$.

In het punt X is het volume NUL. Te beginnen bij 0°C . moeten we het afgesloten gas dus 273° afkoelen om in het punt X te komen.

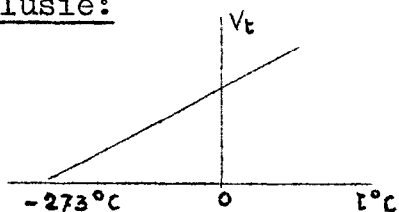
Anders afgeleid:

$$\left. \begin{array}{l} V_t = V_o \left(1 + \frac{1}{273} t\right) \\ \text{In X is } V_t = 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} 0 = V_o \left(1 + \frac{1}{273} t\right) \\ 0 = \left(1 + \frac{1}{273} t\right) \end{array}$$

V_o valt weg, doet dus niets ter zake!

$$\begin{array}{l} \text{Dus:} \\ 0 = 1 + \frac{1}{273} t \\ -1 = \frac{1}{273} t \\ t = -273^\circ \text{C}. \end{array}$$

Conclusie:



De rechte lijn snijdt de temperatuur-as in het punt -273°C .

De waarde van V_o doet daarbij niets ter zake!

Vraag.: Als men dus een afgesloten hoeveelheid gas onder constante druk afkoelt moet volgens het bovenstaande HET VOLUME van het afgesloten gas bij -273°C . NUL worden. Maar hoe kan dat; hoe kan nu een hoeveelheid gas een volume NUL hebben?

Antw.: Deze vraag zet ons op het ogenblik "mat". In de 2^e ronde (B4 of 5B) zullen we de volume-wet van Gay-Lussac geheel wiskundig afleiden uit de bewegingen van de gasmoleculen. We zullen dan echter zien dat deze wet alleen geldig is als de gasmoleculen twee heel bijzondere eigenschappen hebben, n.l.

1^o) Ieder gasmolecuul moet de afmetingen hebben van een wiskundig PUNT, dus congruent zijn met een wiskundig PUNT. Zo'n gasmolecuul moet dus EEN WISKUNDIG PUNT MET GEWICHT zijn.

2^o)

2^o) De gasmoleculen mogen onderling GEEN KRACHTEN OP ELKAAR UITOEFENEN, noch aantrekkende, noch afstotende.
Ze kunnen dus tegen elkaar aan liggen zonder iets van elkaar te merken.

Vraag: Kan een afgesloten hoeveelheid gas waarvan de moleculen deze bijzondere eigenschappen hebben, bij afkoeling onder constante druk het volume NUL krijgen?

Antw.: Inderdaad, als we dit gas zo ver afkoelen DAT DE MOLECULEN VAN HUN EIGEN GEEN BEWEGINGSENERGIE MEER HEBBEN; deze moleculen laten zich dan "willoos" stijf tegen elkaar drukken, en als men b.v. 1000 meetkundige punten tegen elkaar drukt is hun gezamenlijk volume nog NUL.
Hieruit volgt dus tevens, dat de moleculen van een ideaal gas bij -273° C. GEEN BEWEGINGSENERGIE meer hebben.
We komen hier op terug.

Vraag: Bestaat er in de werkelijkheid een gas waarvan de moleculen deze twee bijzondere eigenschappen hebben?

Antw.: Zo'n gas bestaat in de werkelijkheid NIET. We kunnen ons zo'n gas wel FANTASEREN.
Zo'n gas noemt men een IDEEAAL GAS.
Onder "ideaal zuurstofgas" verstaat men dan een denkbeeldig gas waarvan ieder molecuul EEN WISKUNDIG PUNT IS MET HET GEWICHT VAN EEN ECHT ZUURSTOFMOLECUUL.

Conclusie: De volume-wet van Gay-Lussac geldt alleen voor een IDEEAAL GAS.

Vraag: Hoe zit het met de wet van Boyle; geldt die ook alleen maar voor een ideaal gas?

Antw.: Inderdaad, de wet van Boyle en alle gaswetten die we nog krijgen gelden alleen maar voor IDEALE GASSEN.

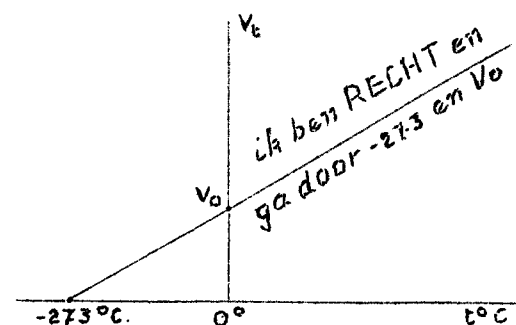
Vraag: Maar wat hebben wij dan aan die gaswetten?

Antw.: De gaswetten en de formules die wij krijgen beschrijven de gedragingen van afgesloten hoeveelheden gas BIJ BENADERING, maar nog zo nauwkeurig DAT WIJ GEEN FOUT ZOUDEN OPMERKEN.

Als wij door toepassing van een gaswet b.v. het volume van een afgesloten hoeveelheid gas berekenen, vinden we het volume dat deze afgesloten hoeveelheid gas ZOU GEHAD HEBBEN ALS HET GAS IDEEAAL WAS. Van onze uitkomst komen de eerste vier decimalen dan overeen met de eerste vier decimalen van de werkelijke waarde van het volume. Wij vinden b.v. 3,6825 liter en de werkelijke waarde is 3,6827 liter. Maar dat verschil zouden wij bij een proef helemaal niet opmerken!

|| Bij de sommen kunnen wij dus doen ALSOF ALLE WERKELIJKE GASSEN IDEALE GASSEN ZIJN.

EINDCONCLUSIE OVER DE GRAFIEK BIJ DE VOLUMEWET VAN GAY-LUSSAC.

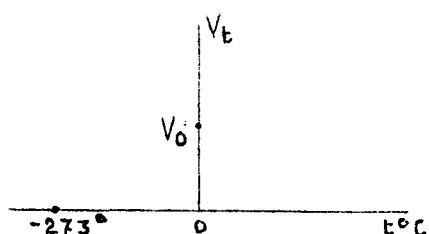


De grafiek die in beeld brengt hoe HET VOLUME van een afgesloten hoeveelheid IDEEAAL GAS bij verwarming onder constante druk verandert ALS FUNCTIE VAN DE TEMPERATUUR, is
EEN RECHTE LIJN
door het punt -273° C. op de temperatuur-as en het punt V_0 op de volume-as.

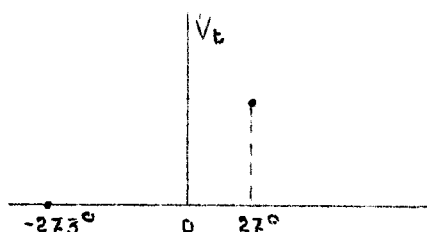
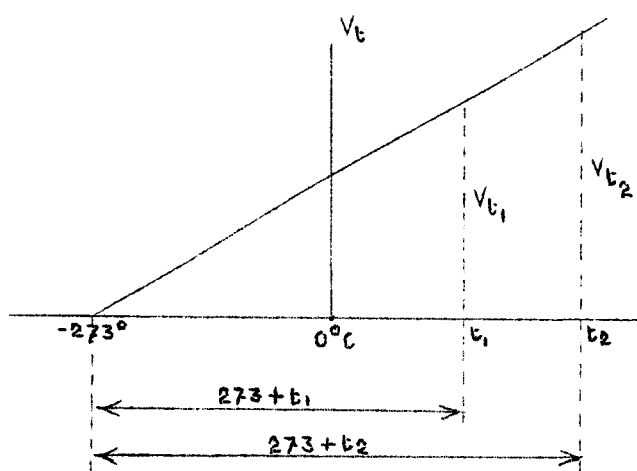
N.B. Wij doen alsof alle gassen ideale gassen zijn.

5) Constructie-opgaven.

a)

Gegeven: -273 en V_0 Gevraagd: Construeer V_{27}

b)

Gegeven: -273 en V_{27} Gevraagd: α) Construeer V_0 β) Construeer V_{87} γ) Wijs de volumevermeerdering aan bij verwarming van $27^\circ \rightarrow 87^\circ$ C.6) Theorie.Gegeven: De grafiek van het volume van een afgesloten hoeveelheid gas als functie van de temperatuur bij verwarming onder constante druk.Gevraagd: a) Wijs in deze grafiek de volumina aan bij de temperaturen t_1 en t_2 $^\circ$ C.b) Welk meetkundig verband bestaat er tussen V_{t_1} en V_{t_2} ?Oplossing: Uit gelijkvormigheid van driehoeken volgt:

$$V_{t_1} : V_{t_2} = (273 + t_1) : (273 + t_2)$$

Hiermee is formule IV (zie blz. 24) ook meetkundig bewezen.c) Kan een ideaal gas een temperatuur hebben die LAGER is dan -273° C.?

Antwoord: Bij -273° C. heeft het afgesloten gas het volume NUL. De moleculen zitten t.g.v. de constante druk stijf tegen elkaar; ze zijn dus bij -273° C. niet meer in staat OM EEN BEWEGINGSRUIMTE VOOR ZICH OP TE EISEN; ZE HEBBEN BIJ -273° C. VAN HUN EIGEN GEEN BEWEGINGS-ENERGIE MEER.

Zoals we weten wordt de temperatuur bepaald door de gemiddelde bewegingsenergie van de moleculen.

De moleculen kunnen echter niet minder bewegingsenergie hebben dan GEEN bewegingsenergie.

Het ideale gas kan dus geen lagere temperatuur hebben dan -273° C.

Conclusie: -273° C. is DE LAAGSTE TEMPERATUUR die een ideaal gas KAN hebben.

d) Kan b.v. een stuk ijzer wel een lagere temperatuur hebben dan -273° C.

Antwoord: Op deze vraag kunnen wij nu nog geen begrijpbaar-makend antwoord geven, wel in de 2^e ronde. We zullen dan zien dat -273° C. inderdaad VOOR ALLE STOFFEN DE LAAGSTE TEMPERATUUR IS.

|| -273° C. IS DUS DE LAAGSTE TEMPERATUUR DIE IN DE NATUREN KAN VOORKOMEN.

e) Hoe noemt men de temperatuur $-273^{\circ}\text{C}.$?

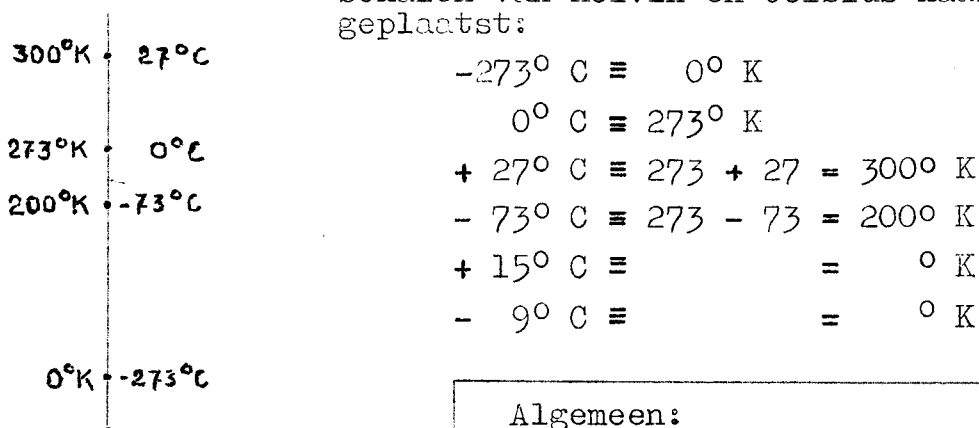
Antwoord: $-273^{\circ}\text{C}.$ noemt men HET ABSOLUTE NULPUNT.

g) Celsius nam $0^{\circ}\text{C}.$ tot nulpunt van de temperatuurschaal.

Is er ook een temperatuurschaal die HET ABSOLUTE NULPUNT tot nulpunt van de schaal heeft?

Antwoord: De engelse natuurkundige KELVIN (WILLIAM THOMSON, LORD KELVIN OF LARGS; 1824 - 1907) was de eerste natuurkundige die bewees dat -273° de laagste temperatuur was die in de natuur kan voorkomen. HIJ NAM DIT ABSOLUTE NULPUNT TOT NULPUNT VAN DE TEMPERATUURSCHAAL; als eenheid van temperatuurverschil nam hij de graad Celsius. Ter ere van Kelvin heeft men deze temperatuurschaal naar hem genoemd.

KELVIN CELSIUS In nevenstaande figuur zijn de temperatuurschalen van Kelvin en Celsius naast elkaar geplaatst:



Algemeen:

$$t^{\circ}\text{C} \equiv (273 + t)^{\circ}\text{K}$$

Kelvin begint dus gewoon 273° LAGER dan Celsius te tellen.

Benaming: Is de temperatuur aangeduid volgens de temperatuurschaal van Kelvin dan noemt men dit DE ABSOLUTE TEMPERATUUR, die dus altijd is uitgedrukt in graden KELVIN, $^{\circ}\text{K}$.

Notatie: De absolute temperatuur wordt aangeduid door de HOOFDLETTER T.
De temperatuur in $^{\circ}\text{C}.$ wordt aangeduid door de kleine letter t.

Welk verband bestaat er dus tussen T en t ?

Antwoord:

$$T = 273 + t$$

h) In vraag b vonden we:

$$V_{t_1} : V_{t_2} = (273 + t_1) : (273 + t_2)$$

Wat stellen de termen $(273 + t_1)$ en $(273 + t_2)$ dus voor?

Antwoord: De ABSOLUTE temperaturen vòòr en nà de proef.

$$273 + t_1 = T_1$$

$$273 + t_2 = T_2$$

i) Hoe kan bovenstaande evenredigheid dus geschreven worden?

Antwoord:

$$V_I : V_{II} = T_I : T_{II}$$

In woorden: Verwarmt men een afgesloten hoeveelheid (ideaal) gas onder constante druk, dan verhouden de volumina zich als de bijbehorende ABSOLUTE temperaturen.

7) Sommen.

8) Opgave.



fig.1



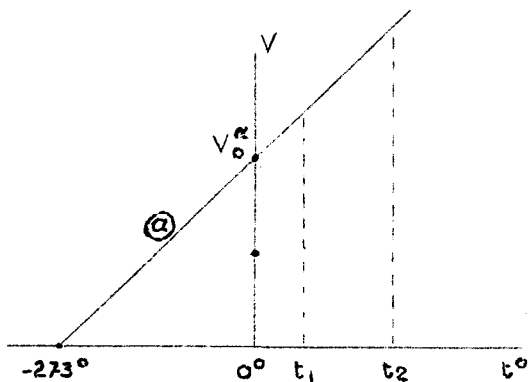
fig.2

Gegeven: In een cilinder met vrij beweegbare zuiger bevindt zich een hoeveelheid (ideaal) gas. We verwarmen het gas van de temperatuur $t_1^\circ \text{C}$. naar $t_2^\circ \text{C}$.

- a) terwijl het gas een spanning heeft van P cm. kwik. (fig.1)
- b) terwijl het gas een spanning heeft van $2P$ cm. kwik. (fig.2)

Gevraagd: 1^o) Construeer de grafiek voor geval b) als de grafiek voor geval a) gegeven is.

Constructie:



De grafiek voor geval b) is ook een rechte die gaat door op de temp.-as en V_0^b op de volume-as.

Omdat $P_b = 2P$ is

$$V_0^b =$$

Gevraagd: 2^o) Wijs ΔV in de gevallen a) en b) aan. Welk verband bestaat er tussen ΔV_a en ΔV_b ?

DEEL VI.

Verwarming van een afgesloten hoeveelheid gas bij
CONSTANT VOLUME.

- 1) We beschouwen nu een afgesloten hoeveelheid gas in een ruimte waarvan HET VOLUME CONSTANT blijft bij verwarming of afkoeling.



We verwarmen het gas.

Gevraagd: Welke grootte moet nu veranderen?

Antwoord: De spanning van het gas!

De moleculen van het afgesloten gas krijgen bij deze verwarming immers

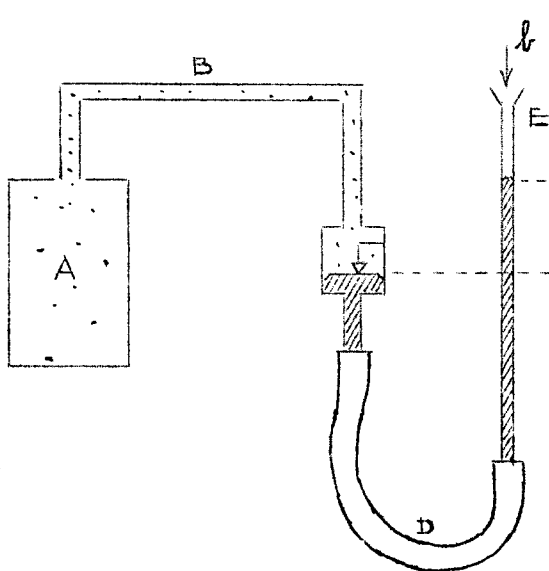
MEER BEWEGINGSENERGIE, DUS MEER STOOTKRACHT.

Omdat het volume constant blijft, blijft het gemiddelde aantal moleculen per cm^3 wel constant, maar de moleculen bewegen sneller. Bij hogere temperatuur zal eenzelfde molecuul de wand per seconde dus VAKER en HARDER treffen dan bij lagere temperatuur.

Bij hogere temperatuur krijgt iedere cm^2 van de wand per seconde dus MEER EN HARDERE STOTEN d.w.z. bij hogere temperatuur en constant volume neemt DE SPANNING van het afgesloten gas TOE.

- 2) We vragen weer HOEVEEL de spanning PER GRAAD VERWARMING toeneemt. Deze kwestie is ook voor het eerst onderzocht door GAY-LUSSAC. De wet die hij toen ontdekte noemt men DE SPANNINGSWET VAN GAY-L.
- NB 3) Bespreek de proef van Gay-Lussac over de spanningsverandering van een afgesloten hoeveelheid gas bij verwarming onder constant volume.

- a) De opstelling van de proef: het toestel.



Een ballon van kwarts-glas is via een twee-maal recht-hoekig omgebogen buis B verbonden met de ruimte C boven een kwikoppervlak. In A, B en C bevindt zich de hoeveelheid gas waar de proef over gaat.

In C is een verticaal naar beneden wijzende scherpe punt aangebracht. Het kwik in C staat precies tot aan die scherpe punt. (Dat ziet men hieraan, dat het spiegelbeeld van de punt raakt aan de punt zelf).

D is een gummislang; E een verticale buis die van boven open is.

- b) Hoe bereikt men dat tijdens de hele proef HET VOLUME van het afgesloten gas in A, B en C CONSTANT blijft?

Antwoord: We zorgen er voor dat de scherpe punt in C voortdurend RAAKT aan het kwikoppervlak.

Wordt het afgesloten gas b.v. verwarmd, dan zal het afgesloten gas het kwikoppervlak in C naar beneden duwen.

Door de buis E dan omhoog te trekken kunnen we bereiken dat het kwik in C weer aan de scherpe punt raakt. Als dit het geval is zullen we zeggen DAT HET TOESTEL SCHERP IS INGESTELD.

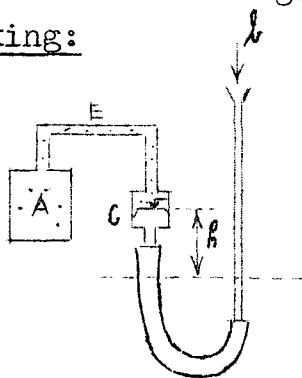
- c) Hoe groot is de spanning van het afgesloten gas?

Antwoord: Passen we in bovenstaande figuur de hoofdwet der hydrostatica toe op het LAAGSTE van de kwikniveaus in

C en E, dan volgt:

$$P_{\text{gas}} = b + h \text{ cm. kwik.}$$

Opmerking:



Vaak zijn A, B en C gevuld met een VERDUND gas, d.w.z. dat het afgesloten gas een LAGE SPANNING heeft.

De situatie is dan zoals nevenstaande figuur aangeeft.

Passen we nu de hoofdwet der hydrostatica toe op het laagste kwikniveau dan volgt:

$$P_{\text{gas}} + h = b$$

dus: $P_{\text{gas}} = b - h \text{ cm. kwik.}$

d) Welke waarnemingen worden er achtereenvolgens verricht?

Antwoord: We geven het afgesloten gas eerst de temp. 0°C. en bepalen -bij scherpe instelling van het toestel- de spanning P_0 .

Dan geven we het afgesloten gas de temp. 1°C. en bepalen -na opnieuw scherp te hebben ingesteld- de spanning P_1 . Door aftrekking vinden we de spanningsvermeerdering.

Vervolgens herhalen we de proef bij $4^{\circ}, 5^{\circ}, \dots, 100^{\circ} \text{C.}$ ALDUS VINDEN WE DE SPANNINGSVERMEERDERING PER GRAAD VERWARMING.

e) Wat leren deze waarnemingen?

Antwoord: 1°) De spanning neemt PER GRAAD verwarming met HETZELFDE bedrag toe.

2°) Deze spanningsvermeerdering PER GRAAD is $\frac{1}{273}$ deel van de spanning die deze afgesloten hoeveelheid gas had bij 0°C. en het gegeven constante volume.

3°) Deze spanningsvermeerdering per graad verwarming is voor alle gassen even groot.

Dit resultaat staat bekend als de SPANNINGSWET van GAY - LUSSAC.

Hoe luidt de spanningswet van Gay-Lussac?

Antwoord: Verwarmt men een afgesloten hoeveelheid gas onder CONSTANT VOLUME dan neemt de spanning PER GRAAD verwarming toe met $\frac{1}{273}$ deel van de spanning die deze afgesloten hoeveelheid gas HAD bij 0°C. en het gegeven constante volume.

4) Formules bij de spanningswet van Gay-Lussac.

Formule I. $\Delta P_{\text{per graad}} = \frac{1}{273} \cdot P_0$, MITS V constant is.

Formule II. $\left. \begin{array}{l} \Delta P \\ \text{bij verw.} \\ t_1 \rightarrow t_2 \end{array} \right\} = \frac{1}{273} \cdot P_0 \cdot (t_2 - t_1)$

Formule III. $\left. \begin{array}{l} t \\ 0 \end{array} \right\} P_t = P_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right)$

Formule IV.

K	C
$273+t_2$	t_2
$273+t_1$	t_1
0°K	0°C
	-273°C

N.B.

$$P_I : P_{II} = (273 + t_I) : (273 + t_{II})$$

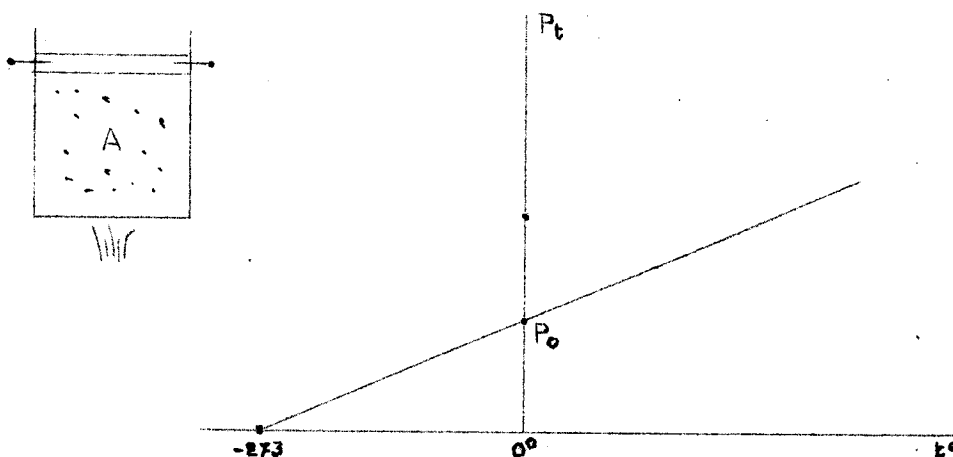
Dus:

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

In woorden:

Verwarmt men een afgesloten hoeveelheid gas onder constant volume dan verhouden de spanningen zich als de bijbehorende absolute temperaturen.

- 5) Opgave: a) Teken een grafische voorstelling die de spanningsverandering in beeld brengt als men een afgesloten hoeveelheid gas verwarmt onder constant volume.

Oplossing:

Toelichting: De spanning neemt bij deze verwarming onder constant volume PER GRAAD verwarming toe met $\frac{1}{273} \cdot P_0$. De grafiek is dus een RECHTE lijn door het punt -273°C op de temperatuur-as en het punt V_0 op de volume-as.

- Opgave: b) We brengen de temperatuur van het gas in A (zie boven) terug op 0° en persen dan bij 0°C . het gas samen tot het volume de helft wordt. Daarna zetten we de zuiger weer vast.

Gevraagd: α) Teken in bovenstaande figuur de grafiek van de spanningsverandering bij dit nieuwe volume.

- β) Hoe verhouden zich de spanningsveranderingen PER GRAAD verwarming in de opgaven a en b?

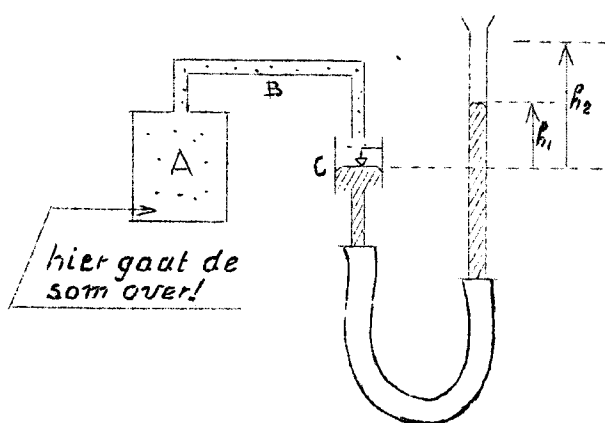
Antwoord: Als 1 : 2.

Hieruit blijkt duidelijk waarom er in de spanningswet staat, dat de spanning per graad verwarming toeneemt met $\frac{1}{273}$ deel van de spanning die het gas had bij 0°C . EN HET GEGEVEN CONSTATANTE VOLUME.

- 6) Temperatuurmeting met behulp van het door Gay-Lussac gebruikte toestel.

a) Getallen-voorbeeld.

(zie blz. 34)

a) Getallen-voorbeeld.

Gegeven: Het toestel wordt op twee verschillende dagen scherp ingesteld.

$$\begin{aligned} \text{I)} \quad b_1 &= 76 \text{ cm.} \\ h_1 &= 15 \text{ cm.} \\ t_1 &= 0^\circ \text{ C.} = 273^\circ \text{ K.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{II)} \quad b_2 &= 75 \text{ cm.} \\ h_2 &= 25 \text{ cm.} \\ t_2 &= ? \end{aligned}$$

Oplossing: Dit is dus een som over een afgesloten hoeveelheid gas, waarvan HET VOLUME constant blijft.

I		II
$P_I = \quad + \quad = 91 \text{ cm.}$		$P_{II} = \quad + \quad = 100 \text{ cm.}$
$T_I = 273^\circ \text{ K.}$		$T_{II} = \quad ?$

Volume constant.

Dus:

$$\begin{aligned} P_I : P_{II} &= T_I : T_{II} \\ 91 : 100 &= 273 : T_{II} \end{aligned}$$

Dus:

$$T_{II} = 300^\circ \text{ K.} = 27^\circ \text{ C.}$$

Conclusie: De temperatuur van het afgesloten gas op de tweede dag is dus 27° C.

b) Waar kan dit toestel dus voor gebruikt worden?

Antwoord: In bovenstaand voorbeeld hebben we het toestel gebruikt om de temperatuur te bepalen in het lokaal waarin het toestel staat.

Door A b.v. in een vloeistof te steken, kan men de temperatuur van die vloeistof bepalen.

Conclusie: Dit toestel is eigenlijk EEN THERMOMETER.

c) Hoe noemt men dit toestel?

Antwoord: EEN GASTHERMOMETER.

d) Met welk gas wordt de gasthermometer bij voorkeur gevuld?

Antwoord: De spanningswet van Gay-Lussac geldt eigenlijk alleen voor een IDEEAAL GAS. Daarom vult men de gasthermometer bij voorkeur met het gas dat het meest lijkt op een ideaal gas: d.i. HELIUM.

De temperatuur die men dan vindt, is de meest nauwkeurige benadering van de WARE temperatuur.

e) Wijzen de andere thermometers dan NIET de ware temp. aan?

Antwoord: Alle thermometers zijn geijkt voor 0° C. en 100° C. De afstand op de temperatuurschaal tussen de merktekens 0° C. en 100° C. zijn "zo maar" in honderd gelijke delen verdeeld, zonder dat men zeker weet of gebruikte stoffen gelijkmatig uitzetten.

Steekt men b.v. verschillende vloeistofthermometers tegelijk in een vat met verwarmd water, dan wijst de ene thermometer b.v. 60° C. aan, een andere 59° C. , een derde 61° C. enz.

De "gewone" thermometers wijzen dus alleen bij 0° C. en 100° C. de WARE temperatuur aan.

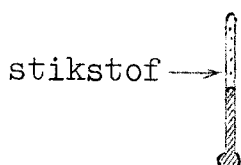
f) Waarom gebruikt men dus in de wetenschap een GASTHERMOMETER?

Antwoord: Omdat de gasthermometer de enige thermometer is die
ALTIJD en AUTOMATISCH DE WARE TEMPERATUUR aanwijst.

6) Geef een overzicht van alle thermometers die wij tot nu toe gehad hebben.

Antwoord:

I. VLOEISTOF THERMOMETERS:



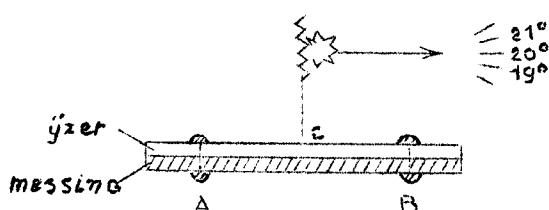
kwikthermometer.

alcoholthermometer

pentaanthermometer (-200° C.)

kwikthermometer met stikstof-vulling;
geschikt voor hoge temperaturen ($+750^{\circ}$);
explosie gevaar!

II. METAAL THERMOMETERS:



Twee repen van verschillend metaal (b.v. ijzer, $\alpha = 0,000012$ en messing, $\alpha = 0,000019$) die b.v. bij 20° C. dezelfde lengte hebben, worden bij deze temperatuur (20° C.) op twee plaatsen aan elkaar geklonken.

Bij 20° C. heeft men dan dus een RECHTE "BIMETAAL" reep gekregen. De reep wordt in de punten A en B ondersteund, zodat A en B

"vaste" punten zijn van het instrument.

Deze bimetaalreep is via een "tandradconstructie" verbonden met een wijzer waarvan de punt langs een schaalverdeling kan strijken. Bij 20° C. staat de punt op de merkstreep 20° C.

Bij STIJGING van de temperatuur ZET de MESSING reep MEER UIT dan de ijzeren reep, met het gevolg dat de bimetaalreep zich KROMT met de holte naar beneden, \smile , zodat het punt C DAALT en de wijzerpunt OMHOOG gaat; bij DALING van de temperatuur krimpt de messing reep het meest IN, zodat punt C STIJGT en de wijzerpunt DAALT.

Bovenstaande figuur geeft het principe van de metaal-thermometer.

In de praktijk is de reep bimetaal vaak spiraalvormig opgewonden; het uiteinde in het middelpunt van de spiraal is dan vast, het andere uiteinde van de spiraal is verbonden met het draaipunt van een wijzer.

Voorziet men de punt van de wijzer van een schrijfstift dan kan men een metaal-thermometer gedurende lange tijd het temperatuurverloop laten aantekenen op een draaiende trommel (thermograaf).

III



GASTHERMOMETER: WIJST ALTIJD DE WARE TEMPERATUUR AAN.



In laboratoria gebruikt men kwikthermometers die GRAAD VOOR GRAAD geijkt zijn met een gasthermometer.

D E E L VII

DE WET VAN BOYLE - GAY - LUSSAC.

1) Inleiding. We hebben tot nu toe drie gaswetten gehad. Deze gaswetten handelden over de spanning P , het volume V en de absolute temperatuur T van een AFGESLOTEN hoeveelheid gas. In elk van deze wetten bleef èèn van de grootheden P , V en T CONSTANT.

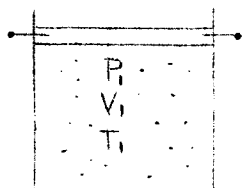
I) T constant \rightarrow Wet van Boyle $\rightarrow P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$

II) P constant \rightarrow Vol.wet van Gay-L. $\rightarrow V_1 : V_2 = T_1 : T_2$

III) V constant \rightarrow Spanningsw. van Gay-L. $\rightarrow P_1 : P_2 = T_1 : T_2$

We beschouwen nu weer een afgesloten hoeveelheid gas, MAAR VERANDEREN TWEE VAN DE GROOTHEDEN P , V en T . De natuur zorgt dan voor de verandering van de derde grootheid. We vragen nu naar het verband tussen P_1 , V_1 , T_1 en P_2 , V_2 en T_2 .

2) Opgave:



Gegeven: Van een afgesloten hoeveelheid gas is de spanning P_1 cm. kwik, het volume V_1 cm³., de temp. T_1 °K.

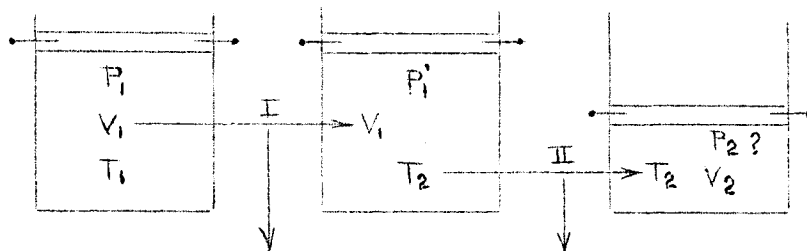
We verwarmen het gas tot T_2 °K. en maken het volume V_2 cm³.

Gevraagd: P_2 .

Oplossing: De situatie vòòr en nà de proef is dus als volgt:

vòòr		nà
Spanning P_1	→	P_2 ?
Volume V_1	→	V_2 gegeven
abs.temp. T_1 °K	→	T_2 °K gegeven

We splitsen de proef in twee delen:



We laten het vol.constant en verwarmen het gas tot de temperatuur T_2 °K.

We laten de temp.constant gelijk aan T_2 °K en maken het volume gelijk aan het verlangde volume V_2 .

Berekening:

Deel I: Het afgesloten gas volgt de spanningswet van Gay-L.

$$P_1 : P_1' = T_1 : T_2$$

Hierin is P_1' de onbekende; we gaan deze oplossen.

In een evenredigheid is het product van de buitentermen gelijk aan het product van de binnentermen, dus:

$$P_1' \cdot T_1 = P_1 \cdot T_2$$

Beide leden delen door T_1 :

$$P_1' = \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1}$$

Deel II: Het afgesloten gas volgt nu de Wet van Boyle:

vòòr		nà
Spanning P_1'	$= \frac{P_1 \cdot T_2}{T_1}$	Spanning P_2 ?
Volume V_1		Volume V_2 gegeven.

Dus:

$$P_1' \times V_1 = P_2 \times V_2$$

P_1' invullen:

$$\frac{P_1 \cdot T_2}{T_1} \times V_1 = P_2 \times V_2$$

Uit deze vergelijking kunnen we P_2 oplossen. Daarmee is de vraag beantwoord. Zoals deze vergelijking er nu staat is deze echter te onoverzichtelijk om te dienen "als formule". Daarom gaan we deze vergelijking "omwerken":

Een quotiënt wordt met V_1 vermenigvuldigd als men de teller met V_1 vermenigvuldigt, dus:

$$\frac{P_1 \times V_1 \times T_2}{T_1} = P_2 \times V_2$$

We delen beide leden door T_2 : Een quotiënt wordt door T_2 gedeeld als men de teller door T_2 deelt, dus:

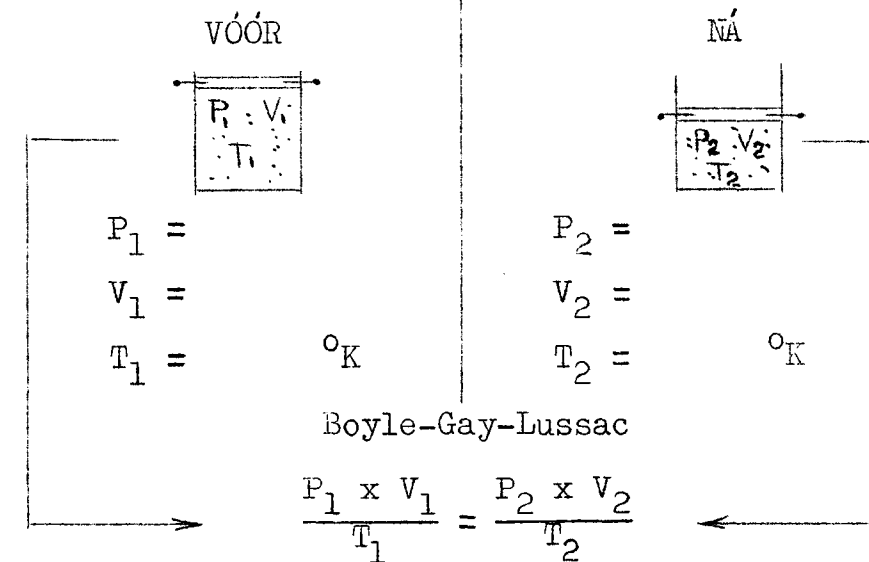
$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}$$

Deze vergelijking noemt men de wet van Boyle - Gay - Lussac.

In woorden:

Van een afgesloten hoeveelheid gas is het product van spanning en volume gedeeld door de ABSOLUTE temperatuur VÓÓR de proef gelijk aan het product van spanning en volume gedeeld door de ABSOLUTE temperatuur NÁ de proef.

Dus:



N.B.

N.B.

N.B.

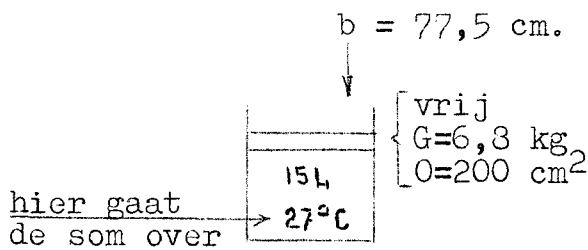
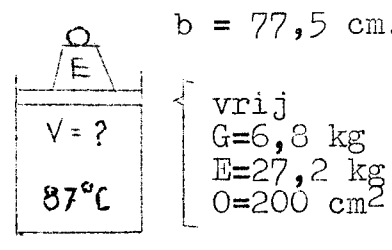
3) Voorbeelden van sommen.

- 1) In een verticale cilinder met vrij beweegbare zuiger bevindt zich 15 L. stikstofgas van 27°C . De zuiger weegt 6,8 kg. en heeft een oppervlak van 200 cm^2 . Op de zuiger plaatst men een extra gewicht van 27,2 kg. en verwarmt het afgesloten gas tot 87°C .

De barometerstand is 77,5 cm.

Gevraagd: a) Het volume van het afgesloten gas na de proef.

Oplossing:

vòòr	nà
$b = 77,5\text{ cm.}$ 	$b = 77,5\text{ cm.}$ 
$P_1 = 77,5 + \frac{\quad}{x}$ $P_1 = 77,5 + 2,5 = 80\text{ cm}$ $V_1 = 15\text{ L.}$ $T_1 = 273 + 27 = 300^{\circ}\text{ K}$	$P_2 = 77,5 + \frac{\quad}{x}$ $P_2 = 77,5 + 12,5 = 90\text{ cm.}$ $V_2 = \quad ?$ $T_2 = 273 + 87 = 360^{\circ}\text{ K.}$

Boyle-Gay-Lussac.

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}$$

Dus:

$$\frac{80 \times 15}{300} = \frac{90 \times V_2}{360}$$

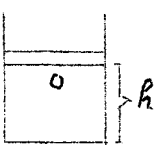
Dus:

$$V_2 = 16\text{ liter.}$$

Conclusie: Het afgesloten gas heeft na de proef een volume van 16 liter.

Gevraagd: b) Hoeveel cm. en in welke richting is de zuiger verschoven?

Oplossing:

	$V_1 = 0 \times h_1$ $15000 = 200 \times h_1$ $h_1 = 75\text{ cm.}$	$V_2 = 0 \times h_2$ $16000 = 200 \times h_2$ $h_2 = 80\text{ cm.}$
---	---	---

Conclusie: De zuiger is 5 cm. naar boven gegaan.

- II) In een buis van Torricelli bevindt zich boven het kwik een gas kolom die 32 cm. lang is. Het kwik in de buis staat 4 cm. HOGER dan het kwik in de bak. De temperatuur van het afgesloten gas is 11°C .

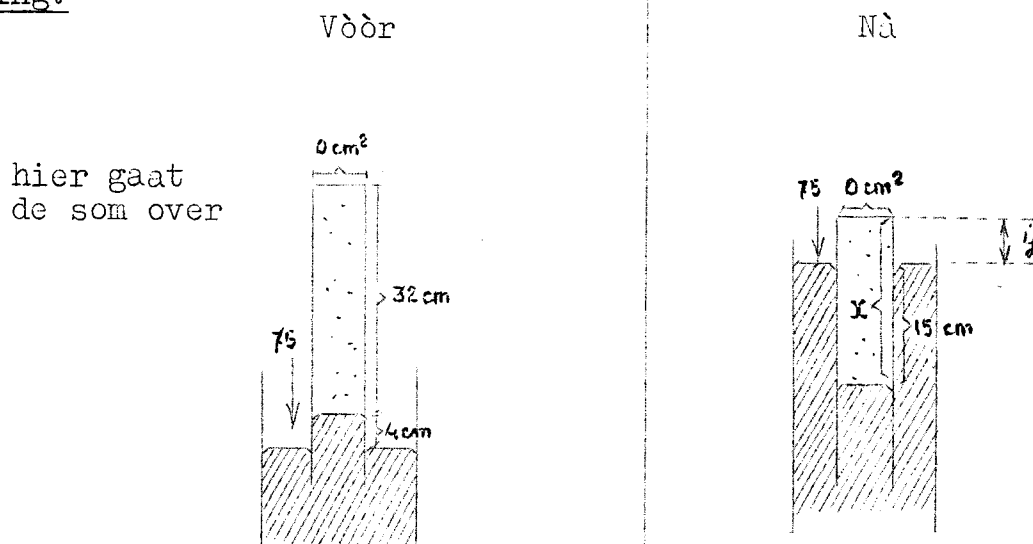
Men koelt het afgesloten gas af tot -3°C . en drukt de buis zoveel omlaag dat het kwik in de buis 15 cm. LAGER staat dan het kwik in de bak. De barometerstand tijdens de proef is 75 cm.

Gevraagd: a) De nieuwe lengte van de gaskolom.

Oplossing:

Gevraagd: a) De nieuwe lengte van de gaskolom.

Oplossing:



$$\begin{aligned}
 75 &= + \\
 P_1 &= 71 \text{ cm.} \\
 V_1 &= 32 \times 0 \text{ cm}^3. \\
 T_1 &= 273 + 11 = 284^\circ \text{ K.}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= + \\
 P_2 &= 90 \text{ cm.} \\
 V_2 &= x \times 0 \text{ cm}^3. \\
 T_2 &= 273 - 3 = 270^\circ \text{ K.}
 \end{aligned}$$

Boyle-Gay-Lussac

$$\frac{P_1 \times V_1}{T_1} = \frac{P_2 \times V_2}{T_2}$$

Dus:

$$\frac{71 \times 32 \times 0}{284} = \frac{90 \times x \times 0}{270}$$

Dus:

$$x = 24 \text{ cm.}$$

Conclusie: Na de proef heeft de gaskolom een lengte van 24 cm.

Gevraagd: b) Hoever steekt de buis dan uit boven het kwik in de bak?

Oplossing: Uit bovenstaande figuur volgt:

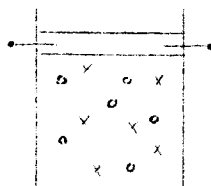
$$\begin{aligned}
 x &= y + 15 \\
 24 &= y + 15 \\
 y &= 9
 \end{aligned}$$

Conclusie: Na de proef steekt de buis van Torricelli 9 cm. uit boven het kwik in de bak.

Opmerking: In veel sommen van dit type wordt gevraagd hoeveel cm. en in welke richting men de buis van Torricelli heeft moeten verschuiven. In deze vorm gesteld, is deze vraag eigenlijk niet te beantwoorden, want, terwijl de buis van Torricelli daalt, stijgt het kwik in de bak. Bij die vragen wordt dan STILZWIJGEND verondersteld, dat de kwikbak zo groot is, DAT DE NIVEAU-VERANDERING VAN HET KWIK IN DE BAK KAN VERWAARLOOSD WORDEN. In dat geval, heeft men in bovenstaande som de buis van Torricelli $36 - 9 = 27$ cm. naar beneden moeten verschuiven.

DEEL VIII DE WET VAN DALTON. (1766 - 1844)

1) Het probleem.



Deze wet handelt over een MENGSEL van twee of meer gassen DIE GEEN SCHEIKUNDIGE WERKING OP ELKAAR UITOEFENEN.

In nevenstaande figuur bevindt zich in een cilinder met vaststaande zuiger een mengsel van b.v. zuurstofgas (o) en stikstofgas (x). Deze gassen hebben vanzelfsprekend dezelfde temperatuur.

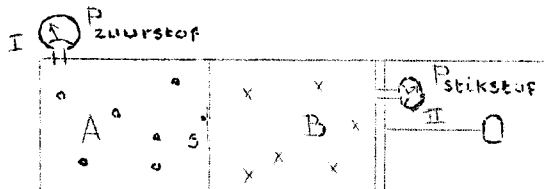
We hebben dus eigenlijk twee afgesloten hoeveelheden van twee verschillende gassen die geen scheikundige werking op elkaar uitoefenen bij een bepaalde temperatuur verenigd in eenzelfde ruimte.

Als de zuurstof zich bij deze temperatuur ALLEEN in die ruimte bevond, zou deze de spanning P_{zuurstof} gehad hebben; als de stikstof zich bij deze temperatuur ALLEEN in die ruimte bevond zou deze de spanning P_{stikstof} gehad hebben.

DE VRAAG IS NU: HOE GROOT IS DE SPANNING VAN HET MENGSEL?

Deze kwestie is het eerst onderzocht door de Engelse natuurkundige DALTON.

2) Proef.



In A bevindt zich een hoeveelheid zuurstof, spanning P_{zuurstof} , aangewezen door de manometer I.

In B bevindt zich een hoeveelheid stikstof, spanning P_{stikstof} , aangewezen door de manometer II.

Het volume van de ruimte B is gelijk aan het volume van ruimte A. In beide ruimten heerst dezelfde temperatuur. Als het stikstofgas in B zich dus bij deze temperatuur alleen in de ruimte A bevond, zou manometer I de spanning aanwijzen die nu door manometer II wordt aangewezen.

We verschuiven de zuiger naar links. Door de overdruk in B gaat de klep S (zie fig.) open en stroomt het gas van B de ruimte A binnen. Aldus persen we het gehele zich in B bevindende gas in de ruimte A. We zorgen er echter voor dat de temperatuur constant blijft.

De manometer I wijst nu de spanning van het mengsel van zuurstof en stikstof aan.

HOE GROOT IS DEZE SPANNING NA DE PROEF?

WAARNEMING: De spanning van het mengsel van zuurstof en stikstof in de ruimte A blijkt gelijk te zijn aan DE SOM VAN DE SPANNINGEN die deze hoeveelheid zuurstof en deze hoeveelheid stikstof zouden hebben als ze zich bij de gegeven temperatuur ALLEEN in de ruimte A zouden bevinden.
Dus:

$$P_{\text{mengsel}} = P_{\text{zuurstof alleen}} + P_{\text{stikstof alleen}}$$

Dit resultaat staat bekend als de Wet van Dalton.

3) Hoe luidt de wet van Dalton?

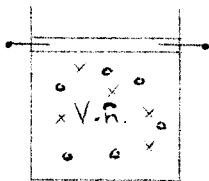
Antwoord: De spanning van een mengsel van gassen die geen scheikundige werking op elkaar uitoefenen is gelijk aan de rekenkundige som van de spanningen die ieder van deze gassen zouden hebben als ze zich bij de gegeven temperatuur ALLEEN in de gegeven ruimte zouden bevinden.

Dus:

$$P_{\text{mengsel gas I en II}} = P_{\text{gas I alleen}} + P_{\text{gas II alleen}}$$

4) In de tweede ronde zullen we deze wet theoretisch bewijzen voor ideale gassen. Op het ogenblik hebben we nog te weinig wiskundige hulpmiddelen om dat bewijs te kunnen volgen.

5) Nadere beschouwing.



Gegeven: In een cilinder bevindt zich een mengsel van zuurstof en stikstof.

Gevraagd: Wat zegt de wet van Dalton nu eigenlijk?

Antwoord: De wet van Dalton zegt eigenlijk, dat de zuurstof doet ALSOE DE STIKSTOF ER NIET IS, en de stikstof doet ALSOE DE ZUURSTOF ER NIET IS.

Sommen over een mengsel van twee (ideale) gassen zijn dus eigenlijk TWEE SOMMEN IN EEN SOM:

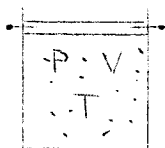
zuurstof		stikstof
Spanning $P_{\text{zuurstof alleen}}$		Spanning $P_{\text{stikstof alleen}}$
Volume V liter		Volume V liter
Temp. $T^{\circ} \text{K.} = T_{\text{in vat}}$		Temp. $T^{\circ} \text{K.} = T_{\text{in vat}}$

Dalton:

$$P_{\text{mengsel}} = P_{\text{zuurstof alleen}} + P_{\text{stikstof alleen}}$$

6) Sommen.

7) OVERZICHT van alle gaswetten die wij tot nu toe gehad hebben.



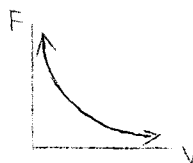
ALLE GASWETTEN HEBBEN BETREKKING OP EEN AFGESLOTEN HOEVEELHEID GAS.

De formules leggen verband tussen de grootheden P , V en T van deze afgesloten hoeveelheid gas.

T CONSTANT \rightarrow Boyle.

in formule: $P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$ mits t constant.

in grafiek:

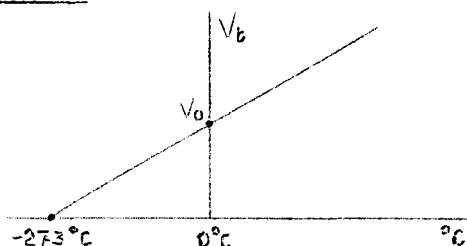


hyperbool van Boyle.

P CONSTANT \rightarrow Volume-wet van Gay-Lussac.

$$\begin{cases} \Delta V = \frac{1}{273} \cdot V_0 \cdot \Delta T \\ \text{in formule: } V_t = V_0 \left(1 + \frac{1}{273} t\right) \\ V_I : V_{II} = T_I : T_{II} \end{cases}$$

in grafiek:



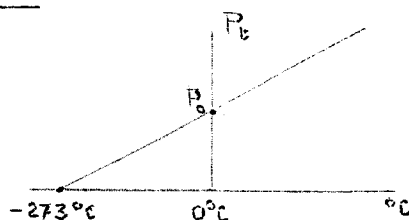
Rechte door -273 op de temp.-as en V_0 op de volume-as.

V CONSTANT → Spanningswet van Gay-Lussac.

in formule:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta P = \frac{1}{273} \cdot P_0 \cdot \Delta T \\ P_t = P_0 \left(1 + \frac{1}{273} t \right) \\ P_I : P_{II} = T_I : T_{II} \end{array} \right.$$

in grafiek:



Rechte door -273
op de temp.-as en
 P_0 op de spannings
as.

P, V en T van een afgesloten
hoeveelheid gas veranderen

Boyle - Gay - Lussac

In formule:

$$\frac{P_I \times V_I}{T_I} = \frac{P_{II} \times V_{II}}{T_{II}}$$

Opmerking: De wet van Boyle - Gay - Lussac
overkoepelt de andere gaswetten.

Mengsels van gassen die geen
scheikundige werking op el-
kaar uitoefenen.

Wet van Dalton.

In formule:

$$P_{\text{mengsel}} = P_{\text{gas I alleen}} + P_{\text{gas II alleen}}$$

8) OVERZICHT VAN DE SOMMEN.

Typen van sommen.

Type I. CILINDER sommen.

A) met VRIJ BEWEEGBARE zuiger.

hier gaat de som over

hier gaat de som over

$$P_{\text{gas}} = b + \frac{G + E}{0 \times 13,6} \text{ cm.kw.}$$

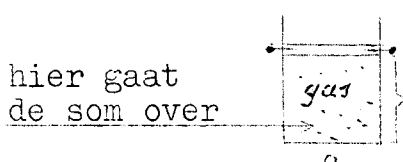
$$P_{\text{gas}} = b \text{ cm.kw.}$$

$$P_{\text{gas}} = b - \frac{G + E}{0 \times 13,6} \text{ cm.kw.}$$

P en b in cm. kwik
G in GRAMMEN
E in GRAMMEN
O in cm^2 .

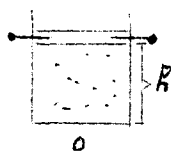
Let hier op !

B) met VERSTELBARE zuiger.



De zuiger is nu een vaste wand. De
in A vermelde formules gelden nu NIEET.
 $V_{\text{gas}} = O \times h \text{ cm}^3$.

C) De verschuiving van de zuiger.



$$V_I = 0 \times h_I \rightarrow h_I \quad \text{door } h_I \text{ en } h_{II} \text{ met}$$

$$V_{II} = 0 \times h_{II} \rightarrow h_{II} \quad \text{elkaar te vergelijken kan men uitmaken}$$

HOEVEEL en IN WELKE RICHTING de zuiger verschoven is.

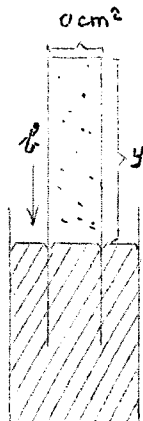
Type II. TORRICELLI sommen.

hier gaat de som over.



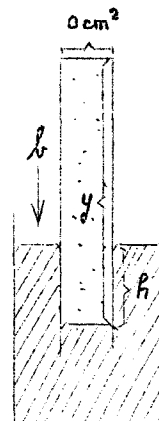
$$P_{\text{gas}} = b - h \text{ cm.kw.}$$

$$V_{\text{gas}} = 0 \times y \text{ cm}^3.$$



$$P_{\text{gas}} = b \text{ cm.kw.}$$

$$V_{\text{gas}} = 0 \times y \text{ cm}^3.$$



$$P_{\text{gas}} = b + h \text{ cm.kw.}$$

$$V_{\text{gas}} = 0 \times y \text{ cm}^3.$$

Type III. Verbonden vaten met gelijke temperatuur.

hier gaat de som over.



Na het openen van de kraan K verspreidt het gas in A zich over de ruimten A + B.

$$\text{Dus: } V_{\text{na}} = V_A + V_B$$

Bevindt zich in B ook een hoeveelheid gas, dan verspreidt dit zich na het openen van de kraan eveneens over de ruimten A en B.

Na het openen van de kraan bevindt zich in A + B een mengsel van twee gassen.

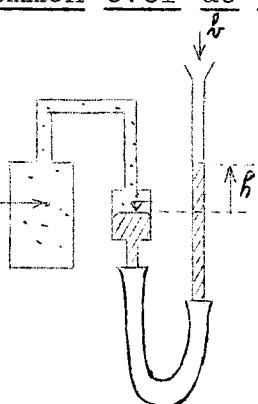
Volgens Dalton is dan:

$$P_{\text{mengsel}} = P_{\text{gas I}} + P_{\text{gas II}}$$

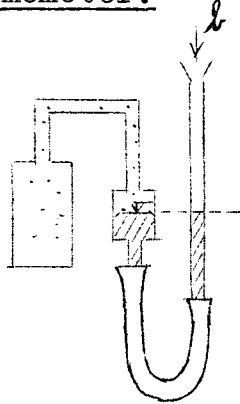
alleen in alleen in
A + B A + B

Type IV. Sommen over de gasthermometer.

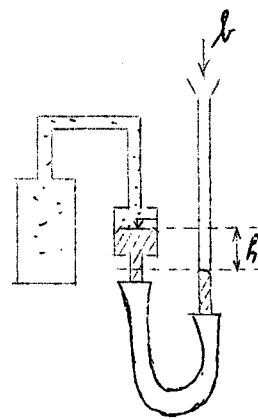
hier gaat de som over



$$P_{\text{gas}} = b + h \text{ cm.kw.}$$



$$P_{\text{gas}} = b \text{ cm.kw.}$$



$$P_{\text{gas}} = b - h \text{ cm.kw.}$$

Bij een proef met de gasthermometer blijft het VOLUME van het afgesloten gas CONSTANT:

Dus altijd de SPANNINGSWET VAN GAY - LUSSAC.

Recept voor de oplossing van de sommen.

- 1) Maak een eenvoudige tekening van de situatie vòòr en nà de proef. Wijs de afgesloten hoeveelheid gas aan waar de som over gaat. (b.v. kleuren)
Van deze afgesloten hoeveelheid gas kan dan altijd èèn van de grootheden P of V UIT DE SITUATIE bepaald worden.
- 2) Vul in:

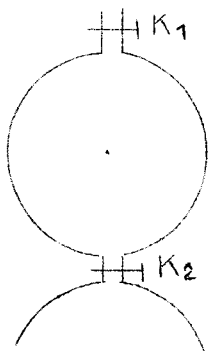
	vòòr		nà
$P_I =$		$P_{II} =$	
$V_I =$		$V_{II} =$	
$T_I =$	$^{\circ}K$	$T_{II} =$	$^{\circ}K$

Uit deze tabel blijkt welke gaswet er toegepast moet worden.

D E E L IX. OF EEN AFGESLOTEN HOEVEELHEID GAS GEWICHT HEEFT.

- 1) Bewijs door proeven dat een afgesloten hoeveelheid gas gewicht heeft.

Antwoord:



We nemen een ballon van nevenstaand model. De kraan K_1 wordt gebruikt als de ballon via een gummislang rechtstreeks wordt aangesloten op een luchtpomp; kraan K_2 als de ballon via een luchtpomptafel wordt aangesloten op een luchtpomp.

Men kan het ook zo inrichten, dat K_2 op een luchtpomptafel geplaatst wordt en K_1 verbonden wordt met een ander gasreservoir: K_2 open, K_1 dicht \rightarrow de lucht wordt uit de ballon gepompt. Dan K_2 dicht, K_1 open \rightarrow de ballon wordt met een ander gas gevuld.

Proef 1. We wegen de ballon terwijl deze gevuld is met lucht van 1 atmosfeer. Daarna pompen we de ballon leeg en wegen deze opnieuw. De ballon weegt dan ongeveer 2,5 gram MINDER.

Conclusie: Een afgesloten hoeveelheid lucht heeft gewicht.

Proef 2. We vullen de luchtledige ballon met waterstofgas van 1 atmosfeer en wegen de ballon daarna weer. Het blijkt dat deze dan ongeveer 0,16 gram zwaarder geworden is.

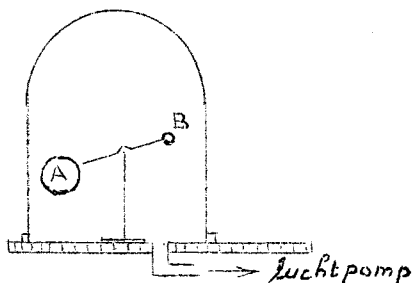
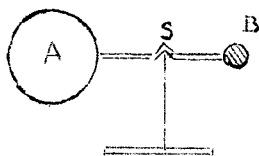
Conclusie: Een afgesloten hoeveelheid waterstofgas heeft ook gewicht, maar het weegt minder dan een gelijk volume lucht met dezelfde spanning en dezelfde temperatuur.

Algemene conclusie: Iedere afgesloten hoeveelheid gas heeft gewicht.

Gelijke volumina van verschillende gassen met dezelfde spanning en temperatuur hebben echter VERSCHILLENDE gewichten.

- 2) Bewijs door een proef, dat een lichaam in een gas "gedompeld" een OPWAARTSE KRACHT ondervindt, overeenkomstig de wet van Archimedes.

Antwoord:



Voor deze proef hebben we een z.g. BAROSCOOP nodig. Dit is een kleine hefboom (steunpunt S) met aan het ene uiteinde een glazen ballonnetje A (zie fig.) en aan het andere uiteinde een metalen bolletje B waarvan het volume veel kleiner is dan het volume van A. De afstand van het bolletje B tot het steunpunt S is regelbaar. We regelen deze afstand zo, dat de hefboom nauwkeurig horizontaal staat.

We plaatsen nu de horizontaal ingestelde baroscoop onder een stolp op een luchtpomptafel en pompen de stolp luchtledig.

Waarneming: Tijdens het wegpompen van de lucht blijft de hefboom NIET horizontaal, maar neemt een hellende stand in met de "grote" ballon A onder en de "kleine" bol B boven. Deze helling neemt ziender-ogen

toe naarmate de lucht in de stolp ijler wordt. De helling is het grootst als de stolp vacuum is.

Verklaring: Toen de baroscoop in de lucht horizontaal was ingesteld ondervond ballon A van de lucht een opwaartse kracht die gelijk was aan het gewicht van de door A verplaatste lucht; het bolletje B ondervond een opwaartse kracht die gelijk was aan het gewicht van de door B verplaatste lucht.

Omdat A een groter volume heeft dan B, ondervond A in de lucht dus ook een grotere opwaartse kracht dan B. Is het volume van A b.v. 10 x het volume van B, dan was de opwaartse kracht die A in de lucht ondervond ook 10 x zo groot als de opwaartse kracht die B ondervond.

De horizontale stand van de hefboom in lucht was dus niet "eerlijk" omdat A van de lucht een grotere opwaartse kracht ondervond dan B. Tijdens het vacuum pompen van de stolp werden beide opwaartse krachten teruggebracht tot NUL: Verliest B daarbij G gram aan opwaartse kracht, dan verliest A b.v. 10 x G gram aan opwaartse kracht. De hefboom kan in het vacuum dus geen horizontale stand meer innemen, maar moet doorslaan in de richting van A.

Uit de hellende stand die de hefboom tenslotte inneemt kan men berekenen, dat de opwaartse krachten die A resp. B van de lucht ondervonden inderdaad gelijk waren aan de gewichten van de hoeveelheden lucht die A resp. B verplaatsten.

Conclusie: Een lichaam dat door een gas omgeven wordt, ondervindt van het gas een opwaartse kracht die gelijk is aan HET GEWICHT van de hoeveelheid gas die door het lichaam verplaatst wordt.
Dit is DE WET VAN ARCHIMEDES VOOR GASSEN.

Opgave: Een lichaam weegt in lucht 100 gram. Het verplaatst 1 gr. lucht.
Hoeveel weegt dit lichaam in het vacuum?

Antw.: 101 gram.

Vraag: Wanneer is het "slimmer" om goud in vacuum te wegen; als je het koopt of als je het verkoopt?

H O O F D S T U K VIII

D A M P E N.

D E E L I. Het verdampen aan het oppervlak.

- 1) Welk verschijnsel wordt bedoeld met verdampen aan het oppervlak?

Antwoord: We doen de volgende proef. We nemen drie filtreerpapier-tjes.

Het eerste dompelen we in WATER. Om wat "show" te hebben plakken we het tegen de vensterruit. Na ongeveer een uur is het papier zoveel gedroogd dat het niet meer tegen de ruit blijft plakken.

Het tweede filtreerpapier-tje bevochtigen we geheel met ALCOHOL en plakken het eveneens tegen de vensterruit. Na ongeveer 20 minuten valt het van de ruit af; het papier is dan zoveel gedroogd dat het niet meer tegen de ruit blijft plakken.

Het derde filtreerpapier-tje bevochtigen we geheel met ETHER. In de korte tijdsduur dat we dit met ether bevochtigde filtreerpapier-tje van de experimenteertafel naar de ruit brengen is het papier al zoveel gedroogd dat het niet meer tegen de ruit blijft plakken.

Uit deze proeven besluiten we dat vloeistoffen die aan de openlucht zijn blootgesteld OPDROGEN, voor en na maken de vloeistofmoleculen zich los uit de vloeistofmassa en gaan als vrije moleculen bewegen tussen de moleculen van de lucht. Daardoor komt het dat de reuk van de vloeistof zich in korte tijd in het lokaal verspreidt. Bij ether b.v. merkt men dit zeer duidelijk.

Dit opdrogen van de vloeistof gebeurt ook als men een hoeveelheid vloeistof op een "horlogeglas" giet. IN de vloeistof zelf ziet men dan niets gebeuren. Het opdrogen moet dus hierin bestaan dat de vloeistofmoleculen voor en na AAN HET OPPELVIAK van de vloeistof de vloeistofmassa verlaten.

Welnu, dit verschijnsel noemt men VERDAMPEN AAN HET OPPELVIAK.

- NB 2) De verklaring van het verdampen aan het oppervlak.

We zullen deze verklaring geven in de vorm van een serie-vraag.

- a) Hoe moeten we ons een vloeistof voorstellen?

Antwoord: Deze vraag hebben we vroeger al eens beantwoord. We moeten nu echter iets aan dat antwoord toevoegen.

We zeiden; de moleculen van een vloeistof hebben WEL SAMENHANG maar GEEN VASTE samenhang. De moleculen van een vloeistof trekken elkaar aan; ze hebben gemiddeld TE VEEL bewegingsenergie om elkaar op een vaste plaats te houden, echter gemiddeld TE WEINIG bewegingsenergie om uit elkaar te zwermen. (Te groot voor servet, maar te klein voor tafellaken!)

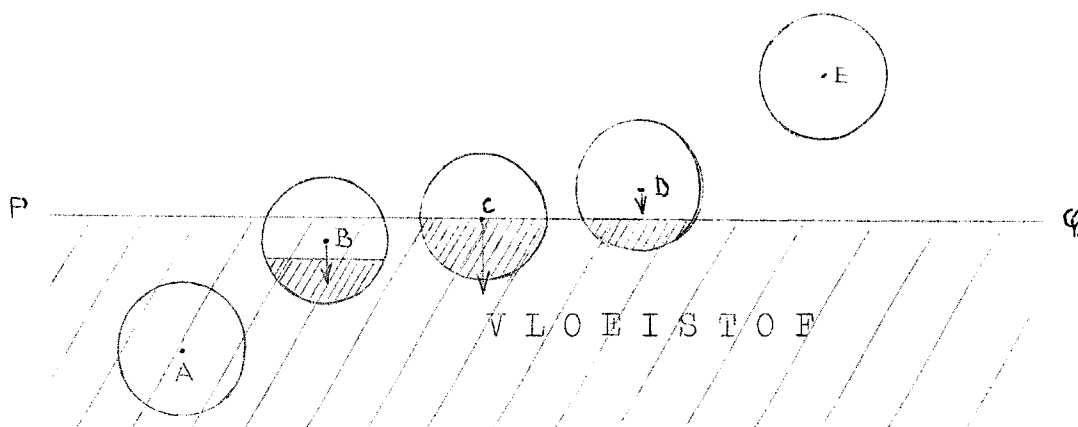
Een hoeveelheid vloeistof moeten we ons dus voorstellen als een samenhoping van moleculen die luk-raak door elkaar schieten, maar gemiddeld te weinig bewegingsenergie hebben om de onderlinge samentrekkende krachten te overwinnen.

Ieder molecuul in het inwendige van de vloeistof schiet door tot het tegen andere moleculen opbotst. Bij deze onophoudelijk voorkomende botsingen zullen de vloeistofmoleculen bewegingsenergie uitwisselen. Deze uitwisseling van energie heeft tot gevolg, DAT ER BIJ IEDERE TEMPERATUUR IN EEN VLOEISTOF ZEER SNELLE EN ZEER LANGZAME MOLECULEN ZIJN.

- b) Welk gevolg heeft het bestaan van de cohesiekrachten voor de moleculen aan het oppervlak van een vloeistof?

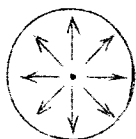
Antwoord:

Antwoord:



In bovenstaande figuur is PQ een vloeistofoppervlak. Het gaat ons nu om de krachten die de vloeistofmoleculen op verschillende plaatsen onder, op of boven het vloeistofoppervlak VAN DE ANDERE VLOEISTOFMOLECULEN ondervinden.

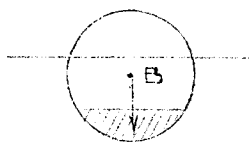
Het molecuul A bevindt zich diep in het inwendige van de vloeistof. De rijkwydte van de krachten die twee moleculen op elkaar uitoefenen is beperkt: Het molecuul A oefent alleen op de moleculen binnen de getekende cirkel (eigenlijk bol) een aantrekkende kracht uit en ondervindt omgekeerd ook alleen maar van de moleculen die zich binnen deze cirkel (bol) bevinden een aantrekkende kracht.



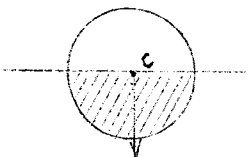
Deze cirkel (bol) is voor het molecuul A om zo te zeggen "de hele wereld"; van hetgeen zich buiten deze bol bevindt heeft het molecuul A "geen weet". Welnu, het molecuul A wordt in zijn wereld gelijkmatic door andere moleculen omringd; het wordt dus IN IEDERE RICHTING EVEN HARD AANGETROKKEN.

Er is dus geen richting waarin de trekkracht groter is. De moleculen van de wereld ^{van A} dwingen het molecuul A dus NIET om in een bepaalde richting te gaan bewegen.

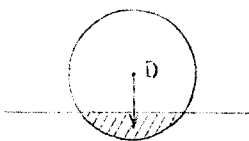
Het molecuul B heeft in zijn wereld meer moleculen onder zich dan boven zich. In de richting verticaal naar beneden is de trekkracht dus het grootst; het molecuul B ondervindt van de andere vloeistofmoleculen EEN EXTRA NAAR HET INWENDIGE VAN DE VLOEISTOF TOE GERICHTE KRACHT.



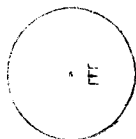
Het molecuul C ondervindt van de vloeistofmoleculen in zijn wereld een EXTRA naar het inwendige van de vloeistof toe gerichte kracht DIE GROTER IS dan de extra kracht die het molecuul B ondervindt.



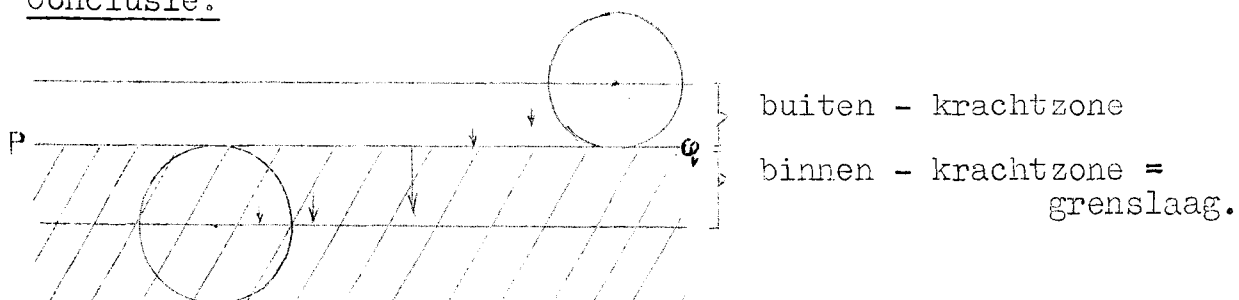
Het molecuul D bevindt zich boven het vloeistofoppervlak. Zijn wereld reikt echter nog tot in de vloeistof. Het molecuul D ondervindt dus nog een aantrekkende kracht van de vloeistof.



Het molecuul E ondervindt geen kracht meer van de vloeistof; de wereld van het molecuul E ligt geheel boven de vloeistof.



Conclusie:

Conclusie:

Aan weerskanten van het vloeistofoppervlak PQ bestaat dus een KRACHTZONE, een buiten-zone en een binnen-zone. De binnen-zone noemt men DE GRENSLAAG VAN DE VLOEISTOF. De moleculen die zich in een van deze zones bevinden ondervinden van de vloeistof een EXTRA kracht die hen naar het INWENDIGE van de vloeistof wil trekken.

b1) Vraag: Wat willen de in de krachtzones werkzame krachten eigenlijk?

Antw.: Deze krachten willen de vloeistofmoleculen die zich in deze zones bevinden naar het inwendige van de vloeistof trekken.

b2) Vraag: Wat zou er gebeuren als de in de krachtzones werkzame krachten VOLLEDIG hun zin kregen?

Antw.: Dan zouden alle vloeistofmoleculen zich dieper dan de grenslaag IN HET INWENDIGE van de vloeistofmassa bevinden, de hoeveelheid vloeistof had dan dus alleen maar een inwendige, MAAR GEEN OPPELVAK.

b3) Vraag: Kan dat?

Antw.: Natuurlijk NIET! Een hoeveelheid vloeistof heeft altijd een bepaald VOLUME ($M = V \times S$), en een volume heeft altijd een begrenzing, dus een oppervlak. De in de krachtzones werkende krachten kunnen dus onmogelijk volledig hun zin krijgen! Van de andere kant heeft de natuur met deze krachten rekening te houden.

b4) Vraag: Waar zal de natuur dus naar streven?

Antw.: De natuur zal er naar streven om de in de krachtzones werkzame krachten ZOVEEL MOGELIJK hun zin te geven, maar zij zal er tegelijk voor zorgen dat de gegeven hoeveelheid vloeistof het vereiste volume krijgt. Het eindresultaat moet dus zijn:

1°) dat de gegeven hoeveelheid vloeistof HET VERBODEN VOLUME heeft, en

2°) dat de in de krachtzones werkende krachten ZOVEEL MOGELIJK hun zin krijgen.

b5) Vraag: Hoe bereikt de natuur dit resultaat?

Antw.: De natuur bereikt dit resultaat door de hoeveelheid vloeistof

MET BEHOUD VAN HET VEREISTE VOLUME

ZO'N V O R M TE GEVEN

DAT

HET VLOEISTOFOPPELVAK

ZO KLEIN MOGELIJK IS.

Het bestaan van de krachtzones heeft dus tot gevolg, dat een hoeveelheid vloeistof altijd zo'n VORM aanneemt DAT HET OPPELVAK onder de gegeven omstandigheden ZO KLEIN MOGELIJK is.

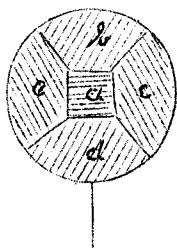
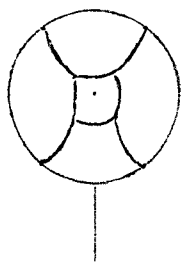
b6) Vraag: Bewijs door een proef dat een hoeveelheid vloeistof er INDERDAAD naar streeft om HAAR OPPELVAK zo klein mogelijk te maken.

Antw.:

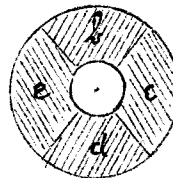
Antw.:

We nemen een cirkelvormige draad. In de cirkel is met garen een net geknoopt dat slap hangt. (zie fig.)

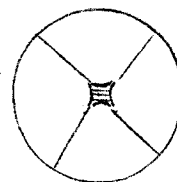
We dompelen de cirkel even in zeepwater. In iedere maas van het net komt dan een zeepvlies.



prik a door →



prik b, c, d en e door →



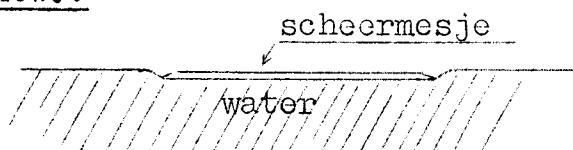
Conclusie: Een hoeveelheid vloeistof streeft er steeds naar om HAAR OPPERVLAK zo KLEIN MOGELIJK te maken.

b7) Vraag: Waarom zijn regendruppels altijd rond en nooit kubusvormig?

Antw.: Omdat een ronde vorm een KLEINER OPPERVLAK heeft dan een vorm met scherpe kanten.

b8) Vraag: Bewijs door een proef, dat de grenslaag van een vloeistof oppervlak iets kan dragen.

Antw.:



Leg een droog, ingevet scheermesje op een wateroppervlak. Hoewel het mesje van staal is, dus een groter soortelijk gewicht heeft dan water, ZINKT HET NIET, maar blijft op het

wateroppervlak liggen alsof het water een windkussen is. Dit "boven blijven" is echter GEEN DRIJVEN, want als we het mesje aan een kant onder water duwen gaat het ZINKEN. Het mesje werd DOOR DE GRENSLAAG GEDRAGEN.

Eigenlijk bewijst deze proef TWEE DINGEN:

- 1°) dat de grenslaag inderdaad bestaat, en
- 2°) dat de grenslaag iets kan dragen.

Opmerking: Toch moeten we ons de grenslaag van een vloeistof NIET voorstellen als b.v. het vel van een pudding. De grenslaag is een KRACHTZONE die met een elastisch vlies dit gemeen heeft, dat beiden streven naar een zo klein mogelijk oppervlak. De grenslaag heeft dus iets "samentrekkends". Aan deze samentrekkende werking is het te danken dat het scheermesje OP het wateroppervlak bleef liggen als op een windkussen.

b9) Vraag: Bespreek een proef die iets leert over DE STERKTE van de grenslaag.

Antw.: We nemen een dun, chemisch zuiver glazen buisje, steken dit verticaal in een vloeistof en trekken het er dan weer uit. Het blijkt dat de vloeistof dan NIET HELEMAAL uit het buisje stroomt, maar dat er een, van de soort van de vloeistof afhankelijke, hoeveelheid onder in het buisje blijft hangen.

Resultaat: blz. 50.

Het molecuul C heeft genoeg bewegingsenergie om de beide krachtzones te doorbreken EN ZO HELEMAAL LOS TE KOMEN VAN DE VLOEISTOF.

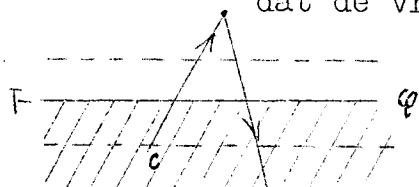
C gaat dan als een vrij molecuul "op excursie" tussen de luchtmoleculen. HET MOLECUUL C IS AAN HET OPPERVIAK UIT DE VLOEISTOF VERDAMPT.

Conclusie: Het bestaan van de krachtzones heeft tot gevolg dat ALLEEN DE SNELSTE vloeistofmoleculen de vloeistof aan het oppervlak kunnen verlaten en zich als vrije moleculen tussen de luchtmoleculen kunnen gaan bewegen.

Vraag: Wat is verdampen aan het oppervlak dus voor een verschijnsel?

Antw.: Verdampen aan het oppervlak is het verschijnsel dat de snelste vloeistofmoleculen de twee, aan het vloeistofoppervlak bestaande krachtzones doorbreken en zich als vrije moleculen tussen de luchtmoleculen gaan bewegen. Dit verdampen aan het oppervlak noemt men ook wel VERVLIEGEN.

Opmerking: Nadat het molecuul C vrij geworden is vliegt het door totdat het tegen een ander molecuul opbotst. Zo komt het dat de vrij geworden moleculen zich verspreiden.



Het kan echter ook gebeuren, dat een molecuul "pech" heeft en t.g.v. een botsing met een lucht molecuul wordt teruggekaatst in de vloeistof.

Aldus kan het ook gebeuren dat er lucht moleculen in de vloeistof terecht komen.

Ter oriëntatie. In het nu afgehandelde punt 2 van hoofdstuk VIII hebben we een verklaring gekregen van het verdampen aan het oppervlak en tegelijk een beter begrip van wat dit verdampen eigenlijk is.

Kort samengevat komt deze verklaring hierop neer, dat er aan het vloeistofoppervlak twee krachtzones bestaan en dat alleen de snelste moleculen van de vloeistof in staat zijn om door deze twee krachtzones heen te dringen. Van een vloeistofmolecuul dat deze twee krachtzones doorbreekt en zich aldus losmaakt van het vloeistof geheel zegt men, DAT HET AAN HET OPPERVIAK UIT DE VLOEISTOF VERDAMPT.

3) Heeft er bij iedere temperatuur waarbij de vloeistof als vloeistof bestaat verdamping aan het oppervlak plaats?

Antw.: Ja, want bij iedere temperatuur waarbij de vloeistof als vloeistof bestaat zijn er in de vloeistof zeer snelle moleculen die meer dan genoeg bewegingsenergie hebben om de twee krachtzones te doorbreken. Hoe HOGER de temperatuur is, HOE GROTER HET AANTAL van deze zeer snelle moleculen is.

4) Vervliegen alle vloeistoffen?

Antw.: Alle vloeistoffen vervliegen op de duur. Maar niet alle vloeistoffen vervliegen EVEN SNEL; bij de ene vloeistof zijn de krachtzones sterker dan bij de andere vloeistof. Ether vervliegt zeer snel; kwik zeer langzaam.

Opmerking: Als men met ether of kwik werkt dient men de nodige voorzichtigheid in acht te nemen; etherdamp werkt verdovend; kwikdamp is GIFTIG.

5) Hoe lang gaat dit vervliegen door?

Antw.: Het vervliegen WIL altijd doorgaan tot de vloeistof op is. Het kan echter gebeuren, dat de ruimte boven de vloeistof met damp verzadigd raakt (zie later) In dat geval gaat het vervliegen nog door, maar er keren dan per seconde evenveel (pech hebbende) dampmoleculen in de vloeistof terug als er uit verdampen.

6)

6) Hoe kan men DE SNELHEID van het vorvliegen van een gegeven hoeveelheid vloeistof bevorderen?

Antw.: 1°) Door de vloeistof te verwarmen; het aantal zeer snelle moleculen neemt dan toe.

2°) Door het oppervlak te vergroten; de zeer snelle moleculen die zich eerst diep in het inwendige van de vloeistof bevonden komen dan in de buurt van het oppervlak. ("Madame, waarom hangt U de was aan de waslijn?")

3°) Door de kans op terugvliegen in de vloeistof ("pech hebben") te verminderen:

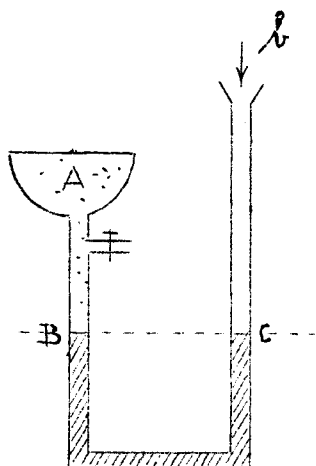
a) door verse lucht langs het vloeistofoppervlak te laten stromen ("Madame, waarom hangt U bij voorkeur de was in de wind?")

b) door de damp boven de vloeistof weg te zuigen.

7) Stelling: Bij het verdampen aan het oppervlak daalt de temperatuur van de vloeistof.

Bewijs I: door een proef.

a) Het toestel: de THERMOSCOOP.



A is een van boven afgeplatte ballon die verbonden is met een OPEN manometer.

In A bevindt zich een afgesloten hoeveelheid lucht waarvan de spanning gelijk is aan de druk van de buitenlucht. (Dit heeft men bereikt door de kraan K eerst te openen en na enige tijd te sluiten) De vloeistofniveaus B en C staan dus gelijk, d.w.z. liggen in eenzelfde horizontaal vlak.

Voor deze vloeistof neemt men bij deze proef olie, om bij een drukverschil tussen de lucht in A en de buitenlucht een groot niveauverschil te krijgen tussen de vloeistofoppervlakken B en C.

Vraag: Wat zal er gebeuren als we de ballon A VERWARMEN?

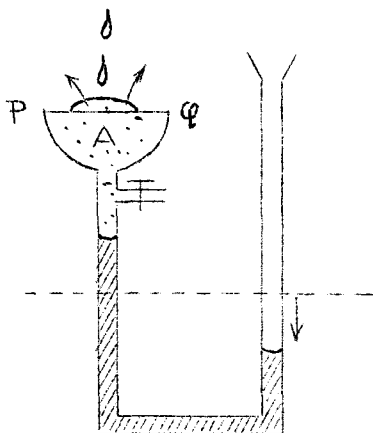
Antw.: De spanning van het gas in A zal toenemen; het niveau B zal dus **DALEN** en het niveau C **STIJGEN**.

Vraag: Wat zal er gebeuren als we de ballon A AFKOELEN?

Antw.: De spanning in A zal dan afnemen; het niveau B zal dus **STIJGEN** en het niveau C **DALEN**.

Conclusie: Als het niveau C stijgt wil dit zeggen, dat het gas in A wordt **VERWARMD**; als het niveau C **DAALT** wil dit zeggen dat het gas in A wordt **AFGEKOELD**.

b) Wat wij doen en wat daarbij wordt waargenomen.



Op de afgeplatte bovenkant PQ van A druppelen we een behoorlijke hoeveelheid ether.

Er gebeuren nu **TWEE** dingen:

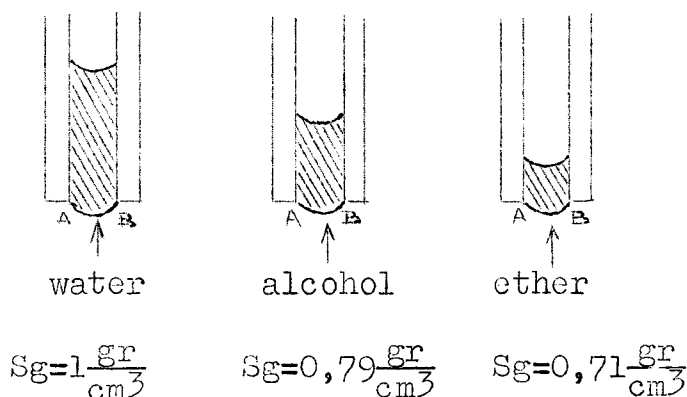
1°) de ether verdampt, en

2°) het niveau bij C **DAALT**.

Gevolgtrekking:

Uit het feit, dat het niveau C daalt moeten we besluiten, dat het gas in A wordt **AFGEKOELD**. Omdat er verder niets anders gebeurt, dan dat de op PQ gedruppelde ether verdampt aan het oppervlak, moeten

Resultaat:



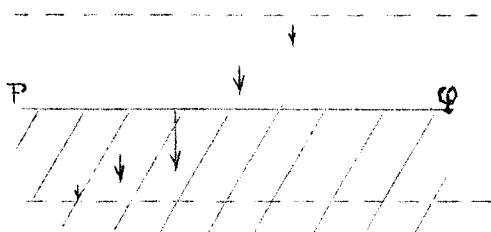
Er blijft zoveel vloeistof in het buisje hangen als de grenslaag AB (zie fig.) kan dragen.

De grenslaag van ether is dus zwakker dan de grenslaag van alcohol, want hoewel het soortelijk gewicht van ether KLEINER is dan dat van alcohol, is de achter gebleven etherkolom KORTER dan die van alcohol; de grenslaag van alcohol op haar beurt is zwakker dan die van water.

b10) Vraag: Waar hangt het van af of een vloeistof een sterke of een zwakke grenslaag heeft?

antw.: Van de cohaesiekrachten tussen de moleculen; hoe sterker deze cohaesiekrachten zijn, des te sterker is ook de grenslaag.

EINDCONCLUSIE UIT b.



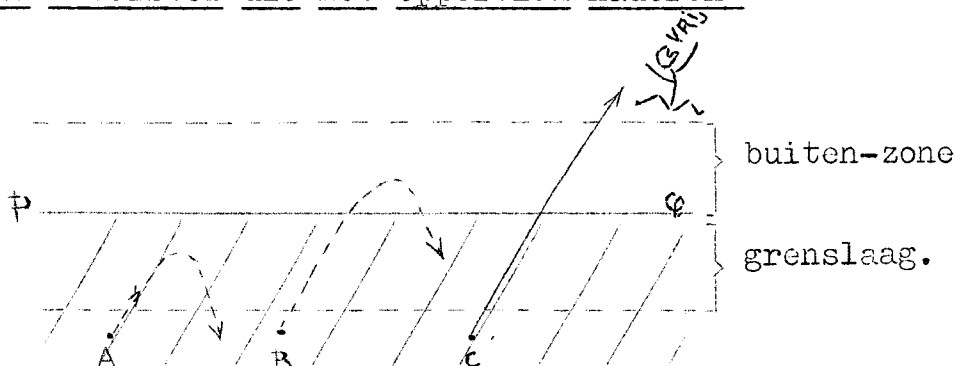
De cohaesiekrachten tussen de moleculen van een vloeistof hebben tot gevolg, dat er aan het vloeistofoppervlak TWEE krachtzones bestaan; de binnenzone heet de GRENSLAAG.

Het bestaan van deze krachtzones heeft TOT GEVOLG, dat de natuur er altijd naar zal streven om HET OPPERVLAK van een vloeistof ZO KLEIN MOGELIJK TE MAKEN.

Het heeft de schijn alsof deze krachtzones werken als een gespannen elastisch vlies.

C) Welk gevolg heeft het bestaan van deze krachtzones voor de moleculen van de vloeistof die het oppervlak naderen?

Antw.:



PQ is het vloeistof-oppervlak.

Het molecuul A heeft weinig bewegingsenergie; het dringt de grenslaag binnen, maar wordt direct teruggetrokken.

Het molecuul B heeft genoeg bewegingsenergie om de grenslaag te doorbreken, maar NIET genoeg energie om de terugtrekkende krachten van de buitenzone te weerstaan en keert weer terug in de vloeistof.

we besluiten, dat deze verdamping aan het oppervlak de oorzaak is van de afkoeling van het gas in A. Maar het gas in A kan bij deze proef alleen maar afkoelen als het GLAS van de ballon afkoelt; en dit glas kan alleen maar afkoelen ALS DE OP PQ LIGGENDE VLOEIBARE ETHER t.g.v. DE VERDAMPING AAN HET OPPERVLAKE AFKOELT.

Conclusie: Bij de verdamping a.h. oppervlak DAALT de temperatuur van de achtergebleven vloeistof.

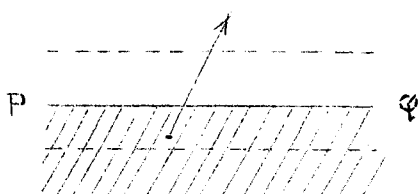
- c) Blazen we over de op PQ liggende ether, dan daalt het niveau C SNELLER.

Conclusie: Dit blazen bevordert dus DE SNELHEID van de verdamping.

- d) Herhalen we de proef met alcohol, dan is het effect kleiner; met water is het effect nog kleiner.

Conclusie: Verdamping aan het oppervlak heeft bij iedere vloeistof tot gevolg dat de temperatuur van de achtergebleven vloeistof daalt. De grootte van de temperatuursdaling per sec. is voor verschillende vloeistoffen verschillend.

Bewijs II. Door redenering.



Bij het verdampen aan het oppervlak verlaten de snelste moleculen de vloeistof; de langzame blijven achter.

De gemiddelde bewegingsenergie van de vloeistofmoleculen neemt dus AF. De temperatuur van de vloeistof DAALT dus.

DEEL II: Verdamping in een vacuum-ruimte.

- 1) Bij het verdampen aan het oppervlak doorbreken de snelste vloeistof-moleculen de twee aan het vloeistofoppervlak bestaande grenslagen, en gaan dan als vrije moleculen bewegen in de ruimte buiten de vloeistof. Zo'n vrij geworden vloeistofmolecuul noemt men een DAMP-molecuul; deze dampmoleculen tesamen noemt men DE DAMP van de vloeistof.

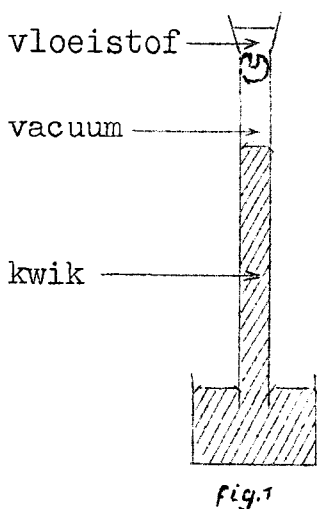
In deel I werd de vloeistof aan de open lucht blootgesteld; de verdamping aan het oppervlak ging toen door totdat de vloeistof op was.

In dit deel II willen we onderzoeken of deze verdamping aan het oppervlak, ongeacht de hoeveelheid vloeistof, ook zal blijven doorgaan tot alle vloeistof op is, als deze verdamping plaats heeft IN EEN AFGESLOTEN RUIMTE. Om de eventuele invloed van de lucht of andere gassen uit te sluiten, kiezen we voor deze ruimte een VACUUM-ruimte, n.l. de vacuum-ruimte in een buis van Torricelli.

We gaan nu een proef bespreken waarbij een hoeveelheid vloeistof DRUPPELSGEWIJS in een vacuum-ruimte van Torricelli gebracht wordt. Om de natuurkundige gebeurtenissen die zich bij deze allerbelangrijkste proef zoveel mogelijk tot hun recht te laten komen zullen we deze behandelen in de vorm van een serie-vraag.

- a) Maak een tekening van de opstelling van de proef.
Hoe bereikt men, dat de vloeistof DRUPPELSGEWIJS in het vacuüm gebracht wordt?

Antwoord:



Voor deze proef nemen we een speciale buis van Torricelli, n.l. een buis die van boven hermetisch van de buitenwereld is afgesloten door een z.g. druppelkraan:



Dit is een massieve glazen cilinder welke om een horizontale as draaibaar is. In de massieve cilinder bevindt zich een uitholling. Boven de kraan bevindt zich nog een reservoir dat gevuld wordt met de vloeistof waarvan we de verdamping in het vacuüm willen onderzoeken.

Aanvankelijk heeft de druppelkraan de stand van fig. 2; de holte in de massieve cilin-

der is dan naar boven toe gekeerd en is dus gevuld met vloeistof uit het reservoir boven de kraan. Draaien we nu de cilinder 180° om haar horizontale as, dan wordt de holte naar beneden gericht en VALT DE VLOEISTOF UIT DE HOLTE IN DE VACUÛMRUIMTE VAN DE BUIS.

Aldus bereiken we dat een hoeveelheid vloeistof DRUPPELSGEWIJS IN EEN VACUÛMRUIMTE GEBRACHT WORDT.

Is de holte in de massieve cilinder klein, dan zijn de druppels ook klein.

- b) Wat ziet men gebeuren nadat de eerste (zeer kleine) druppels in het vacuüm gebracht is?

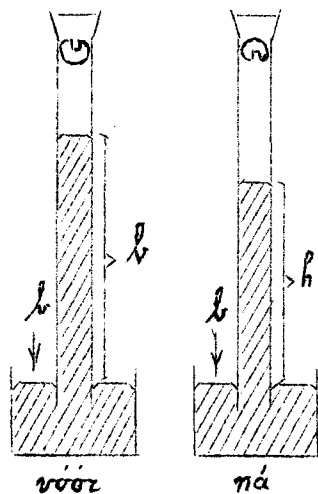
Antwoord:

Men ziet TWEE dingen gebeuren:

- 1^o) De vloeistofdruppel verdampt OGENBLIKKELIJK.

(Dit klopt met de bewering, dat drukvermindering DE SNELHEID van de verdamping BEVORDERT; in het vacuüm is de druk nul; dit is dus een uiterste geval, een z.g. limiet geval). De damp van een vloeistof is onzichtbaar.

- 2^o) Het kwikniveau in de buis van Torricelli DAALT t.o.v. het kwik in de bak; de kwikkolom in de buis wordt dus KORTER.



- c) Welke conclusie moet men trekken uit het feit dat de kwikkolom korter wordt?

Antwoord: Dat de afgesloten hoeveelheid damp in de ruimte boven het kwik EEN SPANNING heeft.

- d) Hoe groot is deze spanning?

Antwoord: Passen we in bovenstaande rechtse figuur de hoofdwet der hydrostatica toe op het laagste van de kwikniveaus, dus op het kwikniveau in de bak, dan volgt:

$$b = h + p_{\text{damp}}$$

Dus: $p_{\text{damp}} = b - h$ cm. kwik.

De spanning van de damp is dus gelijk aan het aantal cm. kwik dat de kwikkolom in de buis KORTER geworden is.

- e) We draaien de druppelkraan weer 180° , zodat de holte weer gevuld wordt met vloeistof, en draaien de kraan dan weer 130° verder, zodat de holte weer naar beneden gericht is en er dus de tweede vloeistofdruppel in de ruimte boven het kwik in de buis valt.

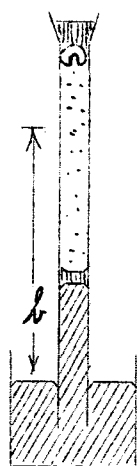
Wat gebeurt er met deze tweede druppel?

Antwoord: Als de druppels zeer klein zijn, zal deze tweede druppel ook verdampen, waarbij de kwikkolom in de buis ook weer korter wordt, de spanning van de afgesloten damp dus TOE NEEMT.

Bij voldoende kleine druppels is het mogelijk, dat de volgende druppels ook nog verdampen waarbij de kwikkolom in de buis telkens korter wordt en de spanning van de afgesloten damp dus telkens toeneemt; zolang er nog vloeistof verdampt, zolang wordt de kwikkolom in de buis korter, en zolang neemt de spanning van de afgesloten damp dus toe.

- f) Blijft dit zo doorgaan?

Antwoord:



Nee! Het blijkt, dat de in de ruimte boven het kwik gebrachte vloeistofdruppels slechts zolang verdampen TOT DE SPANNING VAN DE DAMP EEN HEEL BEPAALDE WAARDE BEREIKT HEEFT.

De vloeistofdruppels die daarna in deze ruimte gebracht worden verdampen NIET meer, maar gaan als vloeistof op het kwik in de buis liggen. Dit vloeistoflaagje oefent natuurlijk een druk uit op het kwik. Verreken men deze druk, dan blijkt, dat de spanning van de damp constant gelijk blijft aan de bepaalde waarde.

Conclusie: De spanning van een damp kan NIET GROTER WORDEN DAN EEN BEPAALDE WAARDE.

Benaming: Deze grootste spanning noemt men DE MAXIMUMSPANNING (van deze damp bij deze temperatuur, zie g)

- g) Waardoor wordt de waarde van de maximumspanning bepaald?

Antwoord: 1^o) Door de soort van de stof. We stellen in eenzelfde kwikbak DRIE van bovenstaande buizen naast elkaar op.

De eerste buis gebruiken we om bovenstaande proef te doen met WATER, de tweede om de proef te doen met ALCOHOL; de derde om de proef te doen met ETHER.

Het blijkt dan dat de maximumspanning van waterdamp kleiner is dan die van alcohol damp, en dat deze weer kleiner is dan die van etherdamp.

(Als we de proef met ether doen gaan we anders te werk, zie punt i.)

- 2^o) Door de temperatuur. Als we bij bovenstaande proeven de buizen van Torricelli (voorzichtig!) verwarmen, blijkt, dat de maximumspanning van een damp zeer sterk toeneemt bij stijgende temperatuur. We komen hier nog op terug.

NB We kunnen dus alleen spreken van DE MAXIMUM SPANNING VAN EEN BEPAALDE DAMP BIJ EEN BEPAALDE TEMPERATUUR.

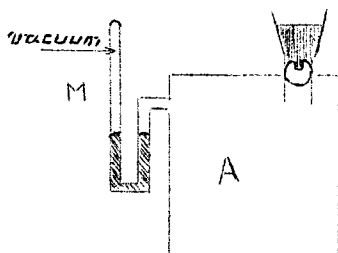
Notatie: p_t^{\max}

Tabel: P_t^{\max} in cm. kwik.			
Temp. °C.	Water	Alcohol	Ether
0°	0,5	1,3	18
10°	0,9	2,4	29
20°	2,0	4,0	44
30°	3,2	8,0	64
40°	5,5	13,5	92
50°	9,2	22	128
60°	15	35	173
70°	23	54	230
80°	36	81	300
90°	52	120	385
100°	76	170	486

- h) Bij een bepaalde temperatuur kan de spanning van een damp dus niet groter worden dan DE MAXIMUM SPANNING van DEZE damp bij DEZE temperatuur.

Wat volgt hieruit over HET AANTAL dampmoleculen dat zich bij de gegeven temperatuur in één cm³ kan bevinden?

Antwoord:



We kunnen deze vraag het gemakkelijkst beantwoorden als we de "druppelproef" in nevenstaande vorm herhalen. A is een vacuum-ruimte; M een gesloten manometer. Nadat de eerste druppel in de ruimte A gebracht is wijst de manometer een zekere spanning aan.

Deze spanning wordt veroorzaakt doordat zich dan in iedere cm³ van A een zeker aantal dampmoleculen bevinden die zich met een zekere (door de temperatuur bepaalde) gemiddelde bewegingsenergie luk-rack door elkaar bewegen.

Nadat de tweede druppel (waarvan we aannemen dat deze ook geheel verdampt) in de ruimte A gebracht is en de temperatuur zich weer hersteld heeft, wijst de manometer een 2 x zo grote spanning aan. Het aantal moleculen per cm³ is dan immers verdubbeld terwijl de gemiddelde bewegingsenergie van de moleculen dezelfde gebleven is.

Indien de derde druppel nog geheel verdampt zal de manometer bij de gegeven temperatuur een drie maal zo grote spanning aanwijzen enz.

Bij de gegeven temperatuur kan de spanning van de damp alleen maar toenemen DOORDAT HET AANTAL DAMPMOLECULEN PER cm³ toeneemt.

Nu wijst de proef uit, dat de spanning van de damp bij de gegeven temperatuur NIET GROTER KAN WORDEN DAN EEN HEEL BEPAALDE WAARDE.

Hieruit moeten we dus besluiten, dat er bij een gegeven temperatuur SLECHTS EEN HEEL BEPAALD AANTAL MOLECULEN VAN DE GEGEVEN DAMP IN EEN cm³ KUNNEN.

Is dit maximale aantal bereikt, dan worden de molecu-

len die uit een eventueel volgende druppel verdampen gewoon teruggestoten in de vloeistof.

NB.

Conclusie: BIJ EEN BEPAALDE TEMPERATUUR KUNNEN SLECHTS EEN HEEL BEPAALD AANTAL DAMP MOLECULEN VAN EEN BEPAALDE VLOEISTOF IN EEN cm^3 .

Op het ogenblik dat de spanning van een damp de maximale waarde voor de heersende temperatuur bereikt heeft, dus P_t^{max} , bevinden zich dus in iedere cm^3 van de dampruimte zoveel dampmoleculen ALS ER ZICH VAN DEZE DAMP BIJ DEZE TEMPERATUUR MAXIMAAL IN EEN cm^3 KUNNEN BEVINDEN.

Benaming: Een damp met het maximale aantal dampmoleculen per cm^3 noemt men EEN VERZADIGDE DAMP; zolang het aantal dampmoleculen per cm^3 nog KLEINER is dan het maximale aantal voor de heersende temperatuur, noemt men de damp ONVERZADIGD.

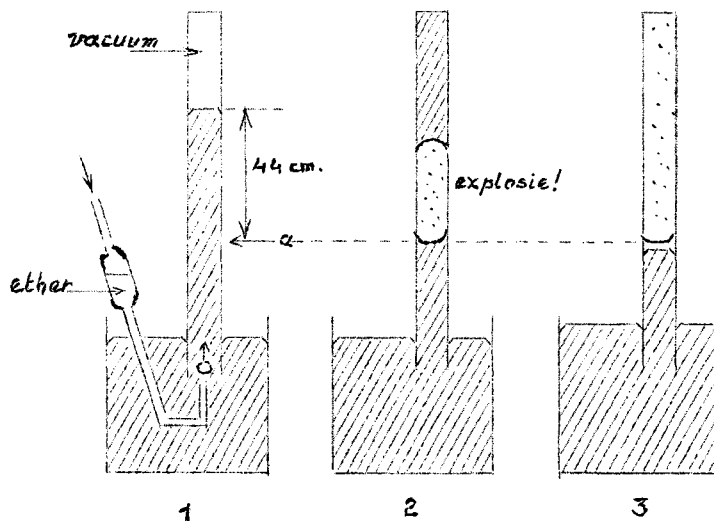
Vraag: Wat is een VERZADIGDE DAMP, wat een ONVERZADIGDE DAMP?

Antw.: Een VERZADIGDE DAMP is een damp waarvan het aantal dampmoleculen per cm^3 gelijk is aan het MAXIMALE AANTAL voor deze damp bij de heersende temperatuur. Een ONVERZADIGDE DAMP is een damp waarvan het aantal dampmoleculen per cm^3 KLEINER is dan het maximale aantal voor deze damp bij de heersende temperatuur.

- i) We hadden in eenzelfde kwikbak drie buizen van Torricelli met druppelkranen opgesteld. De eerste buis gebruikten we om de druppelproef te doen met water, de tweede om deze proef te doen met alcohol. De derde buis moest dienen om de proef te doen met ether. Nu lost het vet waarmee de tap van de druppelkraan is ingevet om de buis hermetisch af te sluiten, op in ether.

Hoe hebben we de proef met ether gedaan, en wat was daarbij te zien?

Antwoord:



Bij fig. 1. Deze figuur geeft de opstelling aan het begin van de proef.

Stel dat de temperatuur in het lokaal 20°C . is. Volgens de tabel is de max. spanning van etherdamp bij 20°C . gelijk aan 44 cm.

We plaatsen nu op de glazen buis met krijgt een streepje 44 cm. lager dan het kwikniveau in de

buis. (punt a, zie fig.)

Met een pipet brengen we nu een druppel ether onder in de buis van Torricelli.

Omdat het s.g. van ether kleiner is dan dat van kwik, stijgt de etherdruppel in de kwikkolom omhoog.

Men zou wellicht verwachten, dat deze etherdruppel "braaf" omhoog gaat totdat deze het kwikoppervlak in de buis bereikt.

Bij fig. 2. Dit gebeurt echter NIET: ZODRA DE ETHERDRUPPEL DE MERKSTREEP a IS GEPASSEERD, en dus een kwikkolom boven zich heeft gekregen waarvan de druk kleiner is dan de maximum spanning van de damp die bij de gegeven temperatuur door de vloeibare ether kan geproduceerd worden,

EXPLODEERT

DE ETHERDRUPPEL TOT ETHERDAMP.

Het kwik boven de druppel wordt daarbij tot boven in de buis geworpen. Na deze explosie stijgt de damp omhoog en valt het omhoog geworpen kwik weer naar beneden.

Staat het kwikniveau in de buis dan hoger dan de merkstreep a, dan zal zich deze explosie bij de volgende druppel met een kleiner effect herhalen.

Bij fig. 3. Zodra het kwikniveau in de buis gedaald is tot de merkstreep a zal iedere volgende druppel "braaf" in de kwikkolom opstijgen tot deze het kwikniveau bereikt heeft en dan als vloeistof op het kwik blijven liggen.

Vraag: Welke conclusie moeten we trekken uit het feit dat de eerste etherdruppel na het passeren van de merkstreep a explodeerde?

Antw.: Uit dit exploderen moeten we besluiten, dat vloeibare ether VAN BINNEN UIT de neiging heeft om in de damptoestand over te gaan; ze zal dit onmiddellijk doen zodra de druk op de vloeistof kleiner wordt dan de maximumspanning van de damp die door de vloeistof bij de heersende temperatuur kan geproduceerd worden.

Zo'n explosie doet zich ook voor als we bovenstaande proef doen met water, alcohol of een andere vloeistof.

NB

CONCLUSIE: EEN VLOEISTOF HEEFT VAN BINNEN UIT DE NEIGING OM IN DAMP OVER TE GAAN: ZE ZAL DIT EXPLOSIE-ACHTIG DOEN ZODRA DE DRUK OP DE VLOEISTOF KLEINER WORDT DAN DE MAXIMUMSPANNING VAN DE DAMP VAN DE VLOEISTOF BIJ DE HEERSENDE TEMPERATUUR.

NB

NB

Deze eigenschap zal het ons later gemakkelijk maken om sommige kookverschijnselen te verklaren.

j) Wat leren bovenstaande proeven ons in totaal?

Antwoord: 1°) Een vloeistof heeft VAN BINNEN UIT de neiging om in damp over te gaan; ze doet dit explosieachtig zodra de uitwendige druk op de vloeistof kleiner wordt dan de maximum spanning van de damp van deze vloeistof bij de heersende temperatuur.

2°) Drukvermindering bevordert DE SNELHEID van de verdamping.

3°) De damp van een kleurloze vloeistof is onzichtbaar.

4°) Een afgesloten hoeveelheid damp heeft een zekere spanning.

- NB 5°) De spanning van een damp kan bij een gegeven temperatuur NIET GROTER worden dan een bepaalde waarde. Deze spanning heet de maximum-spanning van deze damp bij deze temperatuur, P_t^{\max} .
- 6°) De maximum spanning hangt af:
- van de SOORT van de stof,
 - van de temperatuur: Bij stijgende temperatuur neemt de maximum spanning zeer sterk toe.
- NB 7°) Bij een bepaalde temperatuur kunnen slechts een heel bepaald aantal dampmoleculen van een bepaalde damp in één cm^3 . Is dit maximale aantal NOG NIET bereikt, dan heet de damp ONVERZADIGD; is dit maximale aantal wel bereikt, dan heet de damp VERZADIGD.

1) Vraag: Hoe is het te verklaren, dat er bij een bepaalde temperatuur slechts een heel bepaald aantal moleculen van een bepaalde damp in één cm^3 kunnen?

Antw.: De moleculen van een damp trekken elkaar aan, net als de moleculen van een vloeistof. Is de temperatuur LAAG, dan hebben de dampmoleculen van hun eigen (gemiddeld) weinig bewegingsenergie; de dampmoleculen hebben dan een grote aanloop nodig om bij botsing van elkaar los te blijven; er kunnen dan maar weinig dampmoleculen in één cm^3 . Wordt de TEMPERATUUR HOGER, dan krijgen de dampmoleculen van hun eigen (gemiddeld) meer bewegingsenergie; de aanloop MAG dan kleiner zijn. Bij hogere temperatuur kunnen er dus meer dampmoleculen in één cm^3 . Tenslotte krijgen we een temperatuur waarbij de moleculen van hun eigen (gemiddeld) zoveel energie hebben, dat ze geen aanloop meer nodig hebben om bij botsing van elkaar los te blijven. Deze temperatuur heet de KRITISCHE TEMPERATUUR VAN DEZE DAMP. BOVEN deze temperatuur noemt men de damp een GAS.

2) Vraag: Is er een wezenlijk verschil tussen een damp en een gas van dezelfde stof?

Antw.: Nee; alleen een verschil in bewegingsenergie van de moleculen.

3) Vraag: Wat verstaat men onder een PRECIES VERZADIGDE DAMP?

Antw.: Een afgesloten hoeveelheid damp noemt men precies verzadigd, als het maximale aantal dampmoleculen per cm^3 voor de heersende temperatuur bereikt is TERWIJL ZICH IN DE RUIMTE GEEN VLOEISTOF BEVINDT.

4) Vraag: Wat gebeurt er, als men een precies verzadigde damp onder constant volume verwarmt?

Antw.: Dan wordt de damp per se ONVERZADIGD.

5) Vraag: Wat valt er te zeggen van de damp als zich in een ruimte vloeistof en damp van dezelfde stof naast elkaar bevinden?

Antw.: Als er evenwicht is, is de damp per se verzadigd.

6) Test-vraag: Welk volume is kleiner: het volume van 5 gram precies verzadigde etherdamp van 40° of het volume van 5 gram precies verzadigde etherdamp van 100°C . ?

DEEL III van HOOFDSTUK VIII:

I S O T H E R M E N .

We gaan het gedrag van een damp nader bestuderen. We vragen n.l. hoe de spanning van een afgesloten hoeveelheid damp verandert als we het volume BIJ CONSTATE TEMPERATUUR verkleinen.

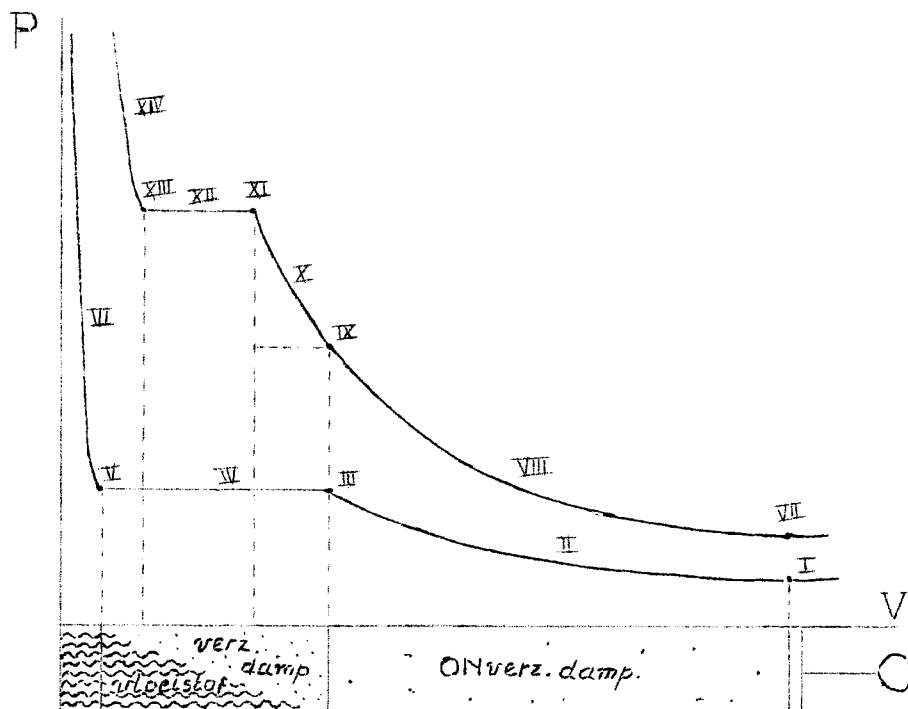
We maken een grafische voorstelling die deze verandering in beeld brengt.

Deze grafiek heet een ISOTHERM.

Definitie: Een isotherm is een grafische voorstelling die het verband in beeld brengt tussen de spanning en het volume van een bepaalde gewichtshoeveelheid stof bij een bepaalde temperatuur.

Let wel: Op de horizontale as van het coördinatenstelsel staat dus HET VOLUME van een gegeven afgesloten hoeveelheid stof bij constante temp.;

Op de verticale as staat de SPANNING.



Ad I. We hebben een cilinder met verstelbare zuiger. In de cilinder bevindt zich een hoeveelheid ONVERZADIGDE damp. De spanning van de damp wordt aangegeven door het grafiekpunt I. We gaan het volume verkleinen, maar zorgen er voor dat DE TEMPERATUUR tijdens de hele proef CONSTANT blijft.

Ad II. ZOLANG DE DAMP ONVERZADIGD IS, gedraagt deze zich als een gas. Bij deze volume-verkleining bij constante temperatuur neemt de spanning dus toe volgens de wet van BOYLE. De grafiek is dus een stuk van een hyperbool van Boyle; de grafiek volgt deze hyperbool van Boyle zolang TOT DE DAMP PRECIES VERZADIGD IS.

Ad III. Stel, dat de damp bij dit volume precies verzadigd is. DE SPANNING die de damp dan heeft IS DE MAXIMUM SPANNING van deze damp bij de gegeven constante temperatuur. HET VOLUME dat de gegeven hoeveelheid damp nu heeft, noemen we HET MINIMUM VOLUME VAN DEZE HOEVEELHEID DAMP BIJ DEZE TEMPERATUUR.

Definitie: Onder HET MINIMUM VOLUME VAN EEN BEPAALDE HOEVEELHEID DAMP BIJ EEN BEPAALDE TEMPERATUUR verstaat men het volume dat deze hoeveelheid damp heeft als deze bij de gegeven temperatuur PRECIES VERZADIGD is.

Opgave. Gegeven: P_I , V_I en P_t^{\max}

Gevraagd: Het minimum volume bij deze t .

Oplissing: Wet van Boyle.

$$P_I \times V_I = P_t^{\max} \times V_t^{\min}$$

Hieruit volgt V_t^{\min} .

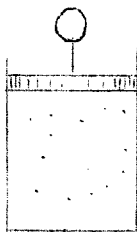
Ad IV. We gaan het volume verder verkleinen. Het aantal dampmoleculen PER cm^3 KAN ECHTER NIET MEER GROTER WORDEN. Bij deze volumeverkleining gaat dus een gedeelte van de damp CONDENSEREN, en wel zoveel, dat DE OVERBLIJVENDE DAMP de maximum spanning behoudt.

De grafiek wordt dus een recht lijnstuk EVENWIJDIG AAN DE VOLUME AS.

Vraag: Wat hebben we bij III en wat bij IV in het vat?

Antw.:

III



Bij III bevindt zich in de cilinder PRECIES VERZADIGDE DAMP.

IV



Bij IV bevindt zich in de cilinder VERZADIGDE DAMP + VLOEISTOF. Bij een bepaalde stand van de zuiger bestaan de verzadigde damp en de vloeistof naast elkaar EN LATEN ELKAAR VERDER "MET RUST".

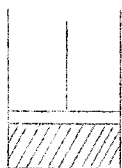
Dit "elkaar met rust laten" drukt men uit door te zeggen DAT DE VERZADIGDE DAMP EN DE VLOEISTOF MET ELKAAR IN EVENWICHT ZIJN.

Daarom noemt men het rechte lijnstuk IV HET GEBIED DER COEXISTERENDE FASEN.

Vraag: Hoe lang gaat dit rechte stuk door?

Antw.:

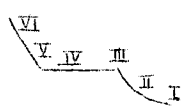
Het rechte stuk loopt door tot de zuiger (in de verticaal staande cilinder) VOOR HET EERST contact maakt met het vloeistof-oppervlak en dus JUIST alle damp is overgegaan in vloeistof.



Vraag: Hoe berekent men het volume van de vloeistof als het gewicht en het soortelijk gewicht bij de heersende temperatuur gegeven zijn?

Antw.: $M = V \times S \longrightarrow S = \frac{M}{V}$

Ad VI. We gaan het volume verder verkleinen. Een vloeistof is echter zo goed als onsamendrukbaar; willen we het volume nog verkleinen, dan moeten we ontzettend hoge drukken uitoefenen. De grafiek is dan ook een zeer steil omhoog lopende lijn.

De lijn  noemt men DE ISOTHERM VAN DEZE HOEVEELHEID DAMP BIJ DEZE TEMPERATUUR T_I °K.

Vervolg van de proef.

We brengen nu de zuiger weer terug in de stand I, wachten tot alle vloeistof weer verdampt is en de temperatuur zich weer hersteld heeft.

We hebben dan dus weer dezelfde situatie als aan het begin van bovenstaande proef, dus de situatie die gekenmerkt wordt door het grafiekpunt I.

We gaan de temperatuur nu een bepaald aantal graden VERHOGEN en zorgen er voor dat de temperatuur verder constant gelijk blijft aan de aldus verkregen hogere temperatuur T_{VII} °K.

We T_{VII} herhalen nu de hele proef.

Ad VII. Hoe kunnen we de nieuwe druk bij de nieuwe temperatuur T_{VII} uitrekenen?

Antw.: We komen van grafiekpunt I in grafiekpunt VII, door de onverzadigde damp te verwarmen onder constant volume; de damp volgt daarbij dus de Spanningswet van Gay-Lussac:

$$P_I : P_{VII} = T_I : T_{VII}$$

Ad VIII. We verkleinen het volume terwijl de temperatuur constant gelijk blijft aan T_{VII} . Zolang de damp onverzadigd is volgt deze daarbij de Wet van Boyle. De grafiek is dus weer een stuk van een hyperbool van Boyle.

Met nadruk wijzen we er op, dat de hyperbool VIII NIET EVENWIJDIG LOOPT aan de hyperbool II; de afstand I \rightarrow VII is kleiner dan de afstand III \rightarrow IX.

Ad IX. Het volume is nu gelijk aan V_{III} . Bij III was de damp precies verzadigd.

Vraag: Is de damp bij IX ook precies verzadigd?

Antw.: We komen van III in IX door de precies verzadigde damp III te verwarmen onder constant volume. Verwarmt men echter een precies verzadigde damp onder constant volume, DAN WORDT DEZE PER SE ONVERZADIGD.

Conclusie: Bij IX is de damp nog onverzadigd.

Vraag: Wat moeten we doen om de damp IX bij deze temperatuur verzadigd te krijgen?

Antw.: We moeten het volume verder verkleinen. De spanning neemt daarbij toe volgens de wet van Boyle.

Ad X. Vraag: Hoe lang gaat dit door?

Antw.: Tot de spanning gelijk geworden is aan de maximum spanning bij deze temperatuur, dus P_{VII}^{max} .

Ad XI. Stel, dat bij punt XI de dampspanning gelijk is aan de maximum-spanning P_{IVII}^{\max} . Het volume van de damp is nu gelijk aan het minimum-volume bij deze hogere constante temperatuur.

NB Vraag: Wat valt er te zeggen, als we het minimum-volume V_{XI} vergelijken met het minimum-volume V_{VIII} ?

Antw.: V_{XI} IS KLEINER DAN V_{VIII}

Dit is ook logisch, want bij een HOGERE TEMPERATUUR moeten er MEER dampmoleculen PER cm^3 zijn, WIL DE DAMP VERZADIGD ZIJN.

ALGEMENE CONCLUSIE:

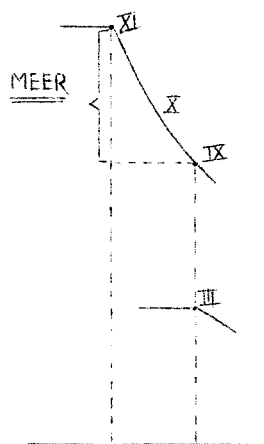
BIJ EEN HOGERE TEMPERATUUR BEHOORT EEN KLEINER MINIMUM VOLUME.

NB Vraag: Wat valt er te zeggen van P_{XI}^{\max} bij deze hogere temperatuur vergeleken met P_{III}^{\max} bij lagere temperatuur?

Antw.: P_{XI}^{\max} IS GROTER DAN P_{III}^{\max} .

NB STELLING: P^{\max} van een damp neemt bij stijgende temperatuur MEER TOE DAN DE SPANNINGSWET VAN GAY - LUSSAC AANGEeft.

Bewijs a: Door redenering.



Als we op P_{III}^{\max} de spanningswet van Gay-Lussac toepassen voor de verwarming van $T_{III} = T_I$ naar $T_{IX} = T_{VII}$, komen we in het punt IX; maar de damp is dan beslist ONVERZADIGD. Om de damp dan bij de constante temperatuur T_{IX} verzadigd te krijgen moeten we het volume verkleinen, en dus de spanning vergroten.

Bij de verwarming van $T_I \rightarrow T_{VII}$ neemt de maximumspanning van de damp het bedrag $P_{XI} - P_{IX}$ MEER TOE dan de spanningswet van Gay-Lussac aangeeft.

Bewijs b: Door berekening.

Geg.: P_{20}^{\max} voor waterdamp is 2,0 cm. kwik.

Gevr.: Welke uitkomst vinden we voor 100° als we de spanningswet van Gay-Lussac toepassen?

Antw.: $2 : P_{100} = 293 : 373$

dus $P_{100} = 2,6^-$ cm.

Maar P_{100}^{\max} voor waterdamp is volgens de tabel 76 cm.

De uitkomst volgens de wet van Gay-Lussac is dus VEEL TE KLEIN!

Conclusie: De maximum-spanning van een damp neemt bij stijgende temperatuur VEEL MEER toe dan de spanningswet van Gay-Lussac aangeeft.

Vraag:

Vraag: Welke zijn dus de natuurkundige redenen waarom de P^{\max} van een damp toeneemt bij stijgende temperatuur?

Antw.: P^{\max} van een damp neemt bij stijgende temperatuur om TWEE redenen toe:

- 1^o) Omdat de dampmoleculen bij een hogere temperatuur gemiddeld meer bewegingsenergie krijgen. Dit is gewoon!
- 2^o) Omdat er bij een hogere temperatuur meer dampmoleculen per cm^3 MOETEN zijn, wil de damp verzadigd zijn. Dit is de reden waarom de maximumspanning van een damp bij stijgende temperatuur MEER toeneemt dan de spanningswet van Gay-Lussac aangeeft.

Ad XII. Bij XI is de damp precies verzadigd. Gaan we het volume nu verder verkleinen, dan gaat een gedeelte van de damp condenseren, en wel zoveel, dat de overblijvende damp verzadigd blijft en dus de maximumspanning bij de gegeven temperatuur behoudt. In de grafiek krijgen we dus weer een recht lijnstuk evenwijdig aan de volume-as; het gebied der coëxisterende fasen.

Vraag: Het gebied der coëxisterende fasen gaat zo ver door tot de zuiger voor het eerst contact maakt met het vloeistofoppervlak. Is het volume waarbij dit het geval is nu groter dan, gelijk aan, of kleiner dan het volume V?

Antw.: Groter, immers:

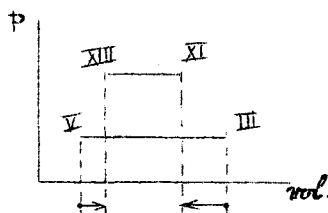
$$M = V \times S.$$

Bij hogere temperatuur is S kleiner, dus V groter.

Ad XIII. Het vloeistofvolume XIII is dus GROTER dan het vloeistofvolume V.

Vraag: Wat valt er te zeggen van het gebied der coëxisterende fasen XI \rightarrow XIII vergeleken met het gebied der coëxisterende fasen III \rightarrow V?

Antw.: Vergeleken met het gebied der coëxisterende fasen III \rightarrow V zijn er over het gebied XI \rightarrow XIII TWEE bijzonderheden te vermelden:



- 1^o) XI \rightarrow XIII ligt HOGER dan III \rightarrow V.
- 2^o) t.o.v. III \rightarrow V is het gebied XI \rightarrow XIII aan beide uiteinden INGEKORT.

Ad XIV. De vloeistof is zo goed als onsamendrukbaar: Als we het volume nog verder willen verkleinen zullen we zeer grote drukken moeten uitoefenen; de grafieklijn XIV is derhalve een steil omhoog lopende lijn.

De lijn VII \rightarrow XIV is de isotherm van de gegeven gewichtshoeveelheid stof bij de constant hogere temperatuur T_{VII} .

We brengen het volume weer terug tot I en wachten tot de temperatuur zich weer hersteld heeft. Daarna gaan we de temperatuur weer een aantal graden verhogen en herhalen de proef bij de aldus verkregen hogere temperatuur: We vinden de isotherm van de gegeven hoeveelheid stof bij deze hogere temperatuur.

Vraag: Wat valt er te zeggen van het nieuwe gebied der coëxisterende fasen?

Antw.: 1^o) Dit ligt weer hoger, en

2^o) is weer aan beide uiteinden ingekort.

Vraag: Het gebied der coëxisterende fasen wordt dus alsmaar KORTER bij hoger wordende temperatuur.
Wat wordt dit gebied der coëxisterende fasen ten slotte?

Antw.: EÉN PUNT.

Vraag: Hoe heet de temperatuur waarbij het gebied der coëxisterende fasen één punt wordt?

Antw.: De kritieke of kritische temperatuur van deze stof.

Vraag: Waarom heeft die temperatuur deze naam?

Antw.: BOVEN die temperatuur heeft de damp GEEN GEBIED DER COËXISTERENDE FASEN MEER: BOVEN die temperatuur zal de damp dus ONDANKS DE HEVIGSTE SAMENPERSING NIET MEER CONDENSEREN.
BOVEN DE KRITISCHE TEMPERATUUR IS DE DAMP DUS EEN GAS.

Vraag: Geef de definitie van de kritische temperatuur.

Antw.:

Definitie: De kritische temperatuur van een stof is de temperatuur waar beneden men moet zijn om de damp van die stof door samenpersing vloeibaar te maken.

Vraag: Wat is een gas dus eigenlijk?

Antw.: Een gas is een damp BOVEN haar kritische temperatuur.

Vraag: Heeft iedere stof een kritische temperatuur?

Antw.: Iedere stof die IN DAMPVORMIGE TOESTAND KAN VOORKOMEN heeft een kritische temperatuur. Dit zijn dus de stoffen die zijn opgebouwd uit moleculen VAN EENZELFDE SOORT.

Vraag: Wat valt er te zeggen van de kritische temperaturen van de verschillende stoffen?

Antw.: Iedere stof heeft een eigen kritische temperatuur.

T A B E L

Stof	Kr.temp.
kwik	+ 1470 °C.
water	+ 374,2 °C.
alcohol	+ 243 °C.
ether	+ 194 °C.
ammoniak	+ 133 °C.
kooldioxyde	+ 30,9 °C.
ethyleen	+ 9,5 °C.
zuurstof	- 118,8 °C.
stikstof	- 147,1 °C.
waterstof	- 239,9 °C.
helium	- 267,8 °C.

Vraag: Welke vorm heeft de isotherm van een stof BOVEN de kritische temperatuur van deze stof?

Antw.: Herhalen we de proef voor een temperatuur hoger dan de kritische temperatuur, dan blijft de spanning toenemen volgens de wet van Boyle: de isotherm is dan dus een hyperbool van Boyle.

Vraag: Wat heb je aan de isothermen?

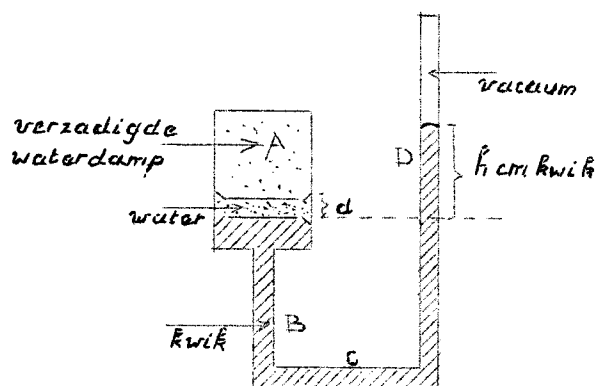
- Antw.: 1^o) De isothermen geven ons een goed OVERZICHT van het gedrag van een damp.
 2^o) De isothermen brengen in beeld, dat de maximum spanning van een damp bij stijgende temperatuur MEER toeneemt dan de spanningswet van Gay-Lussac aangeeft.
 3^o) De isothermen laten zien, dat er geen wezenlijk verschil bestaat tussen een damp en een gas van dezelfde stof.

DEEL IV van Hoofdstuk VIII:

De bepaling van P_t^{\max} van WATERDAMP voor verschillende temperaturen.

- 1) Vraag: Beschrijf een proef ter bepaling van de maximumspanning van waterdamp bij de momentele temperatuur in het lokaal.

Antw.:



De ruimte A is aangesloten op een gesloten manometer BCD, en wel zò, dat een gedeelte van A nog gevuld is met het kwik van de manometer. Op het kwik in A bevindt zich een laag water en daarboven een ruimte van Torricelli gevuld met waterdamp. Omdat zich in A water en waterdamp naast elkaar bevinden (co-existeren) moet de damp dus per sè verzadigd zijn. De temperatuur van de damp in A is gelijk aan de temperatuur van de omgeving, i.c. het lokaal.

De spanning van de damp is dus gelijk aan P_t^{\max} van waterdamp

bij de momentele temperatuur in het lokaal.

Door de hoofdwet der hydrostatica toe te passen op het laagste van de kwikniveaus vinden we:

$$P_{\text{damp}}^{\max} + p_{\text{vloeistof}} = h \text{ cm. kwik.}$$

$$\text{dus: } P_{\text{damp}}^{\max} = h - p_{\text{vloeistof}} \text{ cm. kwik.}$$

Hierin moet $p_{\text{vloeistof}}$ ook uitgedrukt zijn in cm. kwik.

Stellen we de hoogte van de laag water op het kwik in A gelijk aan d , dan volgt:

$$p_{\text{vloeistof}} = \frac{d \times S_{v1}}{13,6} \text{ cm. kwik.}$$

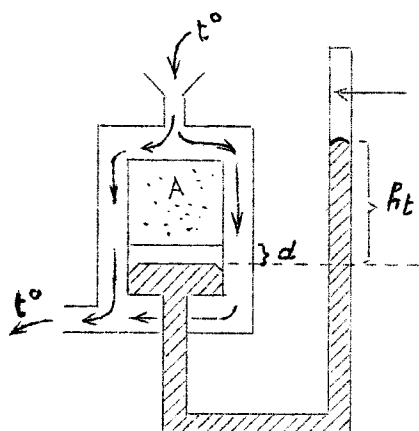
Dus:

$$P_{\text{damp}}^{\max} \text{ in A} = h - \frac{d \times S_{v1}}{13,6} \text{ cm. kwik.}$$

Zijn h , d en S bekend, dan vinden we uit deze vergelijking de maximum-spanning van de waterdamp in A bij de momentele temperatuur.

- 2) Vraag: Hoe kunnen we dit toestel geschikt maken voor het bepalen van de maximum spanning van waterdamp bij een willekeurig gekozen temperatuur.

Antw.:



We brengen om de wand van het vat A een z.g. mantelvat aan dat van boven een trechtervormige opening heeft en van onderen een uitlaat.

Tussen de wand van A en de wand van het mantelvat bestaat dus een lege ruimte.

We gieten nu in de trechter een vloeistof die de temperatuur heeft welke we aan de damp in A willen geven (b.v. $60^{\circ}\text{C}.$), en blijven deze bijgieten. Aldus kunnen we bereiken, dat de temperatuur van de damp in A constant gelijk blijft aan de gewenste temperatuur.

Is h_t het hoogteverschil tussen de kwikniveaus bij $t^{\circ}\text{C}.$, dan volgt:

$$P_{\text{damp in A}}^{\text{max. bij } t^{\circ}} = h_t - \frac{d \times S_{v1.}}{13,6} \text{ cm. kwik.}$$

We vinden dus de maximum spanning van de damp in A bij de temperatuur $t^{\circ}\text{C}.$, dus bij de temperatuur van de door de mantel stromende vloeistof.

Geven we de door de mantel stromende vloeistof achtereenvolgens verschillende temperaturen, dan kunnen we dus de max. spanning van de damp in A bij die verschillende temperaturen bepalen.

Aldus kunnen we P_t^{max} van de damp in A bepalen VOOR IEDERE TEMPERATUUR WAARBIJ IN A DAMP EN VLOEISTOF NAAST ELKAAR BESTAAN, d.w.z. met elkaar in evenwicht zijn.

- 3) Vraag: Hoe heet dit toestel?

Antw.: DAMPBAROMETER.

- 4) Resultaat.

Hier volgt een tabel van de maximumspanning van waterdamp tussen $-10^{\circ}\text{C}.$ en $+374^{\circ}\text{C}.$ (d.i. de kritische temperatuur van waterdamp). Voor de temperaturen $t/m 100^{\circ}\text{C}.$ is deze maximum-spanning uitgedrukt in cm. kwik; voor de temperaturen boven $100^{\circ}\text{C}.$ in ATMOSFEREN.

$t^{\circ}\text{C}.$	cm.kwik	$t^{\circ}\text{C}.$	cm.kwik	$t^{\circ}\text{C}.$	atm.
-10	0,208	50	9,198	100	1,0
- 5	0,313	55	11,748	150	4,7
0	0,460	60	14,879	200	15,4
10	0,917	65	18,694	250	39,2
15	1,270	70	23,308	300	84,8
20	1,739	75	28,850	350	163,2
25	2,355	80	35,642	374	217,8
30	3,155	85	43,300		
35	4,183	90	52,59		
40	5,491	95	63,40		
45	7,139	100	76,000		

Vraag: Wat leert de tabel (op blz.67) over de toename van de maximum spanning van een damp (i.c. waterdamp) bij stijgende temperatuur? Neemt deze maximum-spanning misschien toe volgens de spanningswet van Gay-Lussac?

Antw.: De spanningswet van Gay-Lussac luidt:

$$P_I : P_{II} = T_I : T_{II}$$

Anders geschreven:

$$\frac{P_I}{T_I} = \frac{P_{II}}{T_{II}}$$

Indien de maximum-spanning van een damp ZOU toenemen volgens de spanningswet van Gay-Lussac, dan moest dus

$$\frac{P_t^{\max}}{273 + t_1} = \frac{P_t^{\max}}{273 + t_2}$$

Berekenen we dit quotiënt voor $t = 0^\circ, 50^\circ, 100^\circ, 150^\circ, 200^\circ, 250^\circ, 300^\circ, 350^\circ$ en 374° , dan volgt:

t	$\frac{P_t^{\max}}{T}$	t	$\frac{P_t^{\max}}{T}$
0°	0,0017	250°	5,7
50°	0,0028	300°	11,2
100°	0,2	350°	20,1
150°	0,8	374°	25,6
200°	2,5		

Uit deze berekening blijkt, dat het quotiënt

$$\frac{P_t^{\max}}{273 + t}$$

NIET CONSTANT IS bij stijgende temperatuur, maar met steeds groter wordende sprongen toeneemt bij stijgende temperatuur. Daar de noemer van dit quotiënt toeneemt volgens de spanningswet van G.L., moet de teller bij stijgende temperatuur dus MEER toenemen dan de spanningswet van Gay-Lussac aangeeft, m.a.w. P_t^{\max} neemt bij stijgende temperatuur MEER TOE, dan de spanningswet van Gay-Lussac aangeeft. Dit kunnen we trouwens ook zien, als we de spanningswet toepassen op een willekeurige uit de tabel genomen waarde P_t^{\max} voor de verwarming van b.v. $t \rightarrow (t + 50)^\circ\text{C}$.

Voorbeeld: $P_{30^\circ\text{C}}^{\max} = 3,155 \text{ cm.}$

Gevraagd: P_{80} volgens de spanningswet.

Oplossing: $3,155 : P_{80} = 303 : 353$

$$303 \cdot P_{80} = 1113,715$$

$$P_{80} = 3,676 \text{ cm. kwik}$$

Volgens de tabel is $P_{80}^{\max} = 35,642 \text{ cm. kwik}$ }

Dus P_{80} volgens G.L. $\ll P_{80}^{\max}$.

Conclusie:

N.B.

Conclusie: DE MAXIMUM SPANNING van een damp NEEMT bij stijgende temperatuur M É É R TOE DAN DE SPANNINGSWET VAN GAY-LUSSAC AAN GEEFT.

Vraag: We kunnen de maximum spanning van een damp bij een bepaalde temperatuur dus NOOIT vinden met behulp van de spanningswet van Gay-Lussac.

Is er misschien een andere formule volgens welke we b.v. P_{800}^{\max} kunnen berekenen als P_{300}^{\max} gegeven is?

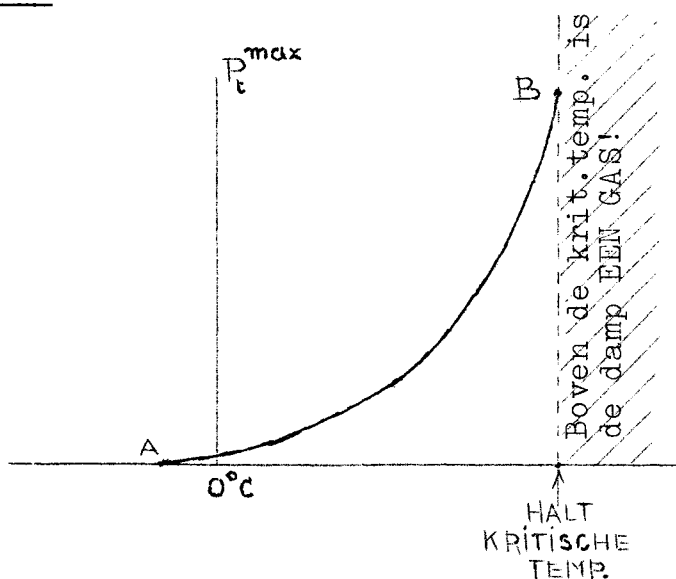
Antw.: NEE, althans niet voor ons.

Vraag: Hoe komen wij dan te weten hoe groot de maximum spanning van een damp bij een bepaalde temperatuur is?

Antw.: DOOR DEZE OP TE ZOEKEN IN EEN TABEL.

- 5) Opgave: Teken een grafische voorstelling die in beeld brengt hoe de maximum spanning van een damp (i.c. waterdamp) toeneemt bij stijgende temperatuur.
Hoe heet deze grafiek?

Antw.:



Nevenstaande figuur geeft een schets van deze grafiek: AB is de gevraagde grafieklijn.

Het is een krom NAAR BOVEN gebogen lijn, die STEEDS STELLER loopt naarmate de temperatuur stijgt.

De grafieklijn begint dus in een punt A van de (negatieve) temperatuursas en loopt door tot het punt B dat de maximumspanning van de damp BIJ DE KRITISCHE TEMPERATUUR aangeeft.

N.B. De grafieklijn houdt dus op bij de kritische temperatuur: BOVEN DE KRITISCHE TEMPERATUUR IS DE DAMP EEN GAS en heeft dan dus geen maximum spanning meer!

N.B. DE GRAFIEKLIJN AB NOEMT MEN DE DAMPLIJN VAN DEZE STOF.

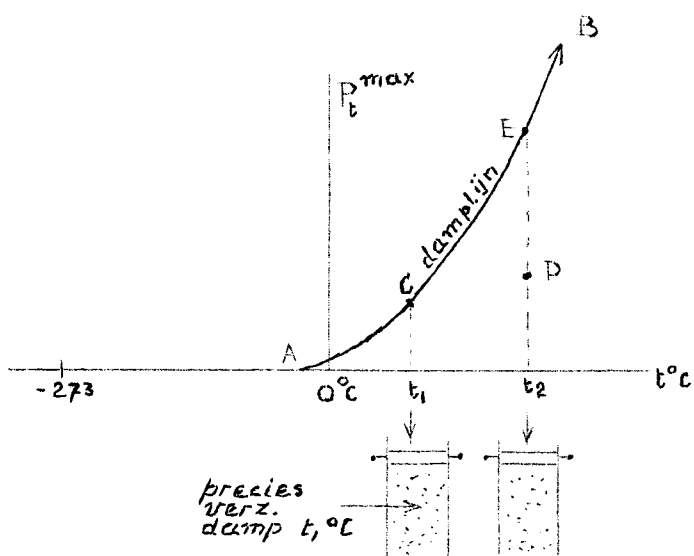
Vraag: Wat verstaat men onder de damplijn van een stof?

Antw.:

Definitie: Onder de damplijn van een stof verstaat men de grafieklijn die in beeld brengt hoe de maximumspanning van de damp van deze stof toeneemt bij stijgende temperatuur.

Opgave: blz. 70

Opgave.



In een ruimte met constant volume bevindt zich precies verzadigde waterdamp van t_1 °C.

We zijn in de grafiek dus in het punt C. (zie fig.) We verwarmen de damp tot de temperatuur t_2 .

Gevraagd:

- a) Wat gebeurt er met de precies verzadigde damp als deze bij constant volume verwarmd wordt?

Antw.: De damp wordt dan per se onverzadigd.

- b) Hoe neemt de spanning van de onverzadigd geworden damp toe bij de verwarming van $t_1 \rightarrow t_2$ °C.

Antw.: Volgens de spanningswet van Gay-Lussac.

- c) Teken in bovenstaande figuur de grafiek die in beeld brengt hoe de spanning van de onverzadigd geworden damp toeneemt bij verwarming van $t_1 \rightarrow t_2$ °C.
- d) Wijs in bovenstaande figuur de spanning van de gegeven hoeveelheid damp aan bij de temp. t_2 °C; wijs ook $p_{t_2}^{\max}$ aan.
- e) Wat besluit je hieruit?
- f) Veronderstel dat de gegeven damp zich bevindt in een cilinder met verstelbare zuiger. Welke verandering moeten we dan in de zuigerstand aanbrengen om te bereiken dat de damp bij de temp. t_2 °C. precies verzadigd wordt?

Antw.: We moeten de zuiger lager zetten, zodat het volume van de damp kleiner wordt. Bij hogere temperatuur moeten er immers meer moleculen per cm^3 . WIL de damp verzadigd zijn.

- N.B. g) Om welke redenen neemt de MAXIMUM-spanning van een damp dus toe bij stijgende temperatuur?

Antw.: Om TWEE redenen:

1°) Omdat de moleculen dan meer bewegingsenergie krijgen (C \rightarrow D)

2°) Omdat er bij hogere temperatuur meer moleculen per cm^3 moeten, wil de damp dan verzadigd zijn (D \rightarrow E)

- 6) Vraag: Welke merkwaardige getallen geeft de tabel van de maximum-spanning van waterdamp?

Antw.: BIJ 100 °C. IS DE MAXIMUMSPANNING VAN WATERDAMP PRECIES 76 cm. KWIK.

Vraag: Is dit toeval?

Antw.: Dit is GEEN toeval; zo heeft Celsius 100° gedefiniëerd!

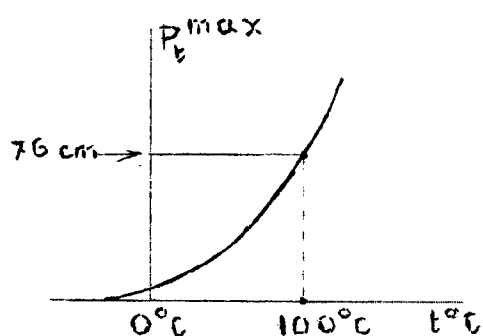
- N.B. Vraag: Definiëer 100° C.

Antw.: 100° C. is de temperatuur waarbij de maximum-spanning van WATERDAMP gelijk is aan 76 cm. kwik PRECIES.

Vraag: Wat besluit je uit elk van de volgende gegevens. Licht het antwoord toe aan de hand van de damplijn.

- a) In een ruimte bevindt zich verzadigde waterdamp van 100° C.

Antw.:



b) In een ruimte bevindt zich verzadigde waterdamp met een spanning van 76 cm.

Antw.:

c) In een ruimte bevindt zich bij 100 °C. waterdamp die een spanning heeft van 50 cm. kwik.

antw.:

d) In een ruimte bevindt zich ONVERZADIGDE waterdamp die een spanning heeft van 76 cm. kwik.

antw.:

7) Vraag: Is de dampbarometer alleen maar geschikt voor het bepalen van P_t^{\max} van WATERDAMP?

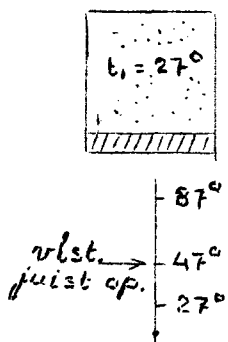
Antw.: Natuurlijk niet! Met behulp van de dampbarometer kan men P_t^{\max} van iedere damp bepalen voor de temperaturen waarbij zich in het reservoir A (zie fig. blz. 67) damp en vloeistof van dezelfde stof naast elkaar bevinden.

8) Tabel.

$t^{\circ}\text{C.}$	P_t^{\max} in cm. kwik.		
	water	alcohol	ether
0°	0,46	1,3	18
7°	0,75	2,0	25
10°	0,9	2,4	29
17°	1,4	3,5	39
20°	1,7	4,0	44
27°	2,7	6,5	57
30°	3,2	8,0	64
40°	5,5	13,5	92
47°	8,0	18	115
50°	9,2	22	128
60°	14,9	35	173
70°	23,3	54	230
80°	35,5	81	300
87°	45,0	102	350
90°	52,6	120	385
100°	76,000	170	486

Opgave: Teken in eenzelfde figuur (liefst op "grafiek-papier") de damplijnen van waterdamp, alcohol damp en etherdamp. Wijs voor iedere damp de temperatuur aan waarbij de maximum spanning 76 cm. kwik is.

N.B.9) SOMMEN OVER VERZADIGDE EN ONVERZADIGDE DAMPEN.

NB. 9) SOMMEN OVER VERZADIGDE- EN ONVERZADIGDE DAMPEN.Voorbeeld I.

In een ruimte met constant volume bevindt zich bij 27°C . een kleine hoeveelheid WATER en verzadigde WATERDAMP.

We gaan de temperatuur in deze ruimte geleidelijk verhogen; op het ogenblik dat $t = 47^{\circ}\text{C}$. IS JUIST AL HET WATER VERDAMPT, de damp is dan dus PRECIES verzadigd; we verhogen de temperatuur dan verder tot 87°C .

Gevr.: a) Hoe groot is de spanning van de damp bij 27°C ?

Antw.: Omdat er zich bij 27°C . ook water in de ruimte bevindt, moet de waterdamp per se verzadigd zijn, de spanning van de waterdamp moet dus gelijk zijn aan P_{27}^{max} . De waarde van P_{27}^{max} MOETEN WE OPZOEKEN IN DE TABEL.

Concl.: H_2O damp
 $P_{27} = P_{27}^{\text{max}} = 2,7 \text{ cm.}$

Gevr.: b) Wat bevindt zich in het vat bij de verwarming van 27° \rightarrow 47°C .

Antw.: VERZADIGDE DAMP en VLOEISTOF.
 Bij 47° zelf is JUIST alle vloeistof verdampt.

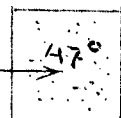
Gevr.: c) Hoe verandert de spanning van de damp bij de verwarming van 27° \rightarrow 47°C .

Antw.: volgens de tabel:

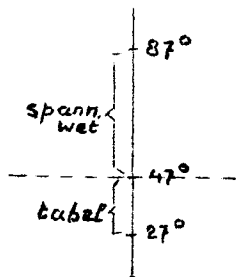
Spanning bij 27°	=	2,7 cm.
" " 30°	=	3,2 cm.
" " 40°	=	5,5 cm.
" " 47°	=	8,0 cm.

Bij 47° is de vloeistof JUIST op. De damp is dan dus PRECIES verzadigd. De spanning van de damp bij 47° is dus inderdaad gelijk aan 8,0 cm. kwik.

precies verz. wa-
 terdamp.



Gevr.: d) Wat gebeurt er met de precies verzadigde waterdamp van 47° als de temperatuur verder wordt verhoogd terwijl het volume constant blijft? Hoe neemt de spanning dan toe?



Antw.: De damp wordt dan ONVERZADIGD. Een onverzadigde damp gehoorzaamt aan de gaswetten. Omdat het volume constant blijft, neemt de spanning van de onverzadigd geworden waterdamp bij verdere verwarming dus toe volgens de spanningswet van Gay-Lussac.

Gevr.: e) Hoe groot is de spanning bij 87°C .

Antw.:

$$P_I : P_{II} = T_I : T_{II}$$

$$8,0 : P_{87^{\circ}} = 320 : 360$$

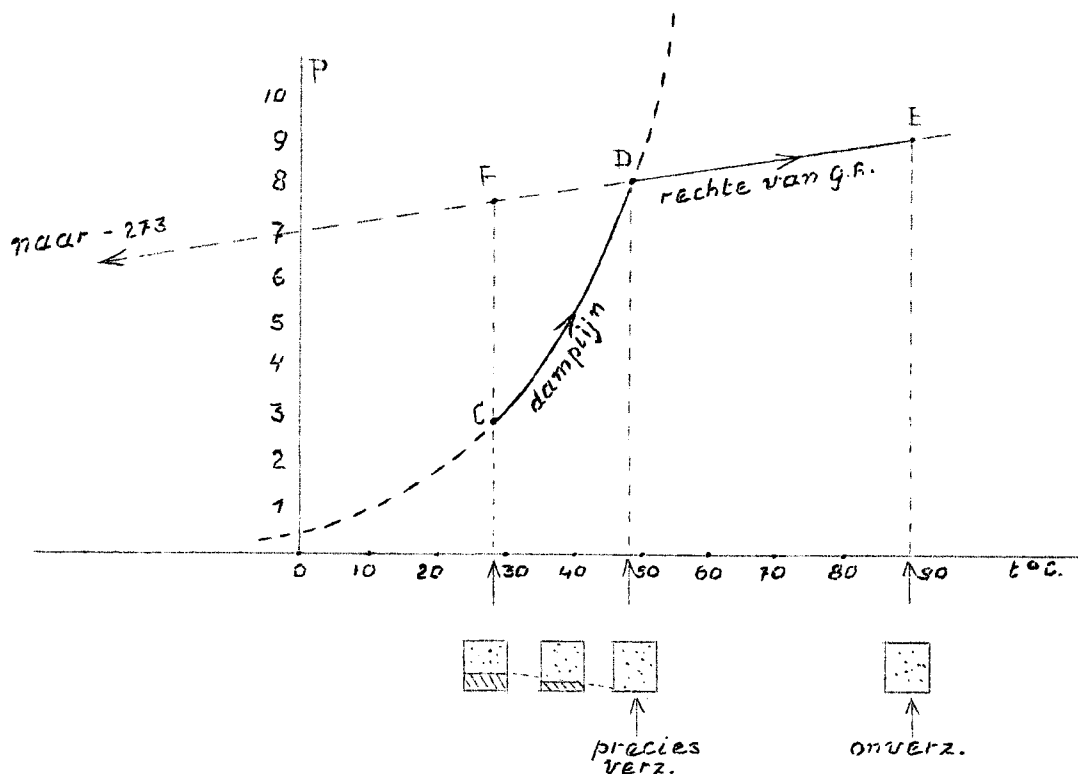
dus:

$$P_{87^{\circ}} = 9,0 \text{ cm.}$$

Gevr.: f)

Gevr.: f) Teken een grafische voorstelling die in beeld brengt hoe de spanning van de waterdamp is veranderd bij de verwarming van 27° tot 87° C.

Antw.:



Toelichting: $C \rightarrow D \rightarrow E$ is de gevraagde grafieklijn. Deze bestaat dus uit twee delen:

$C \rightarrow D$: Van 27° tot 47° neemt de spanning toe volgens de tabel. CD is dus een stuk van de DAMPLIJN.

$D \rightarrow E$: Van 47° tot 87° neemt de spanning toe volgens de spanningswet van Gay-Lussac. $D \rightarrow E$ is dus een stuk van de rechte lijn door -273° en het grafiekpunt D .

N.B. Bij 47° C. 'stapt de grafiek dus over' van de damplijn op de rechte van Gay-Lussac.

Opmerking: Uit bovenstaande figuur kunnen we duidelijk aflezen dat de maximumspanning van een damp bij stijgende temperatuur veel sterker toeneemt dan de spanningswet van Gay-Lussac aangeeft!

Gevr.: g) We hebben de temperatuur dus verhoogd van 27° tot 87° C; We gaan deze nu weer verlagen van 87° tot 27° C. Hoe verandert daarbij de spanning?

Antw.: In bovenstaande figuur dezelfde weg terug, dus van $E \rightarrow D \rightarrow C$.

$E \rightarrow D$: De damp is onverzadigd; de spanning neemt af volgens de spanningswet van Gay-Lussac.

In D : Bij 47° C. is de damp weer precies verzadigd.

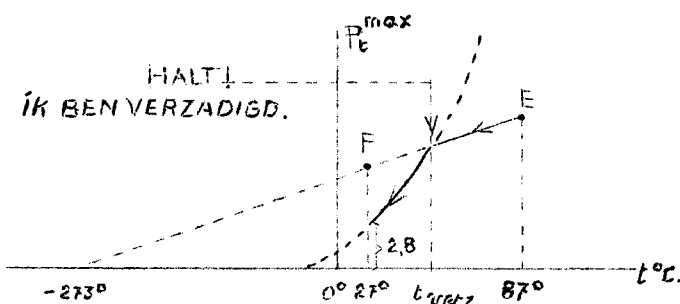
$D \rightarrow C$: Terwijl de temperatuur daalt van 47° tot 27° C. zal bij iedere graad een gedeelte van de damp CONDENSEREN, en wel zoveel, dat de spanning van de overblijvende damp op ieder ogenblik gelijk is aan de maximumspanning bij de momentele temperatuur, dus de spanning die door de tabel wordt voorgeschreven.

In C :

In C: Als de temperatuur 27°C . geworden is bevindt zich in de ruimte weer evenveel damp en vloeistof als aan het begin.

Gevr.: h) Stel, dat we vergeten dat de damp bij 47°C . verzadigd wordt en zonder meer de spanningswet van Gay-Lussac toepassen op de afkoeling van 87°C tot 27°C ., welke waarde vinden we dan voor de spanning bij 27°C ? In welk grafiekpunt komen we dan terecht?

Antw.:



$$P_{87^{\circ}\text{C}} : P_{27^{\circ}\text{C}} = (273+87) : (273+27)$$

$$9 \cdot P_{27^{\circ}\text{C}} = 360 : 300$$

$$P_{27^{\circ}\text{C}} = 7,5 \text{ cm. kwik.}$$

We vinden dan dus, dat ^{de}spanning van de waterdamp bij 27°C . gelijk zou moeten zijn aan 7,5 cm. kwik. In de grafiek zijn we vertrokken uit het punt E en via de spanningsrechte van Gay-Lussac terecht gekomen in het punt F.

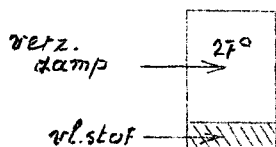
Vraag: KAN de waterdamp bij 27°C . de door het punt F aangeduide spanning van 7,5 cm. kwik hebben?

Antw.: ONMOGELIJK! Volgens de tabel van de maximumspanning van waterdamp kan waterdamp van 27°C . **TEN HOOGSTE** een spanning hebben van 2,8 cm. kwik.

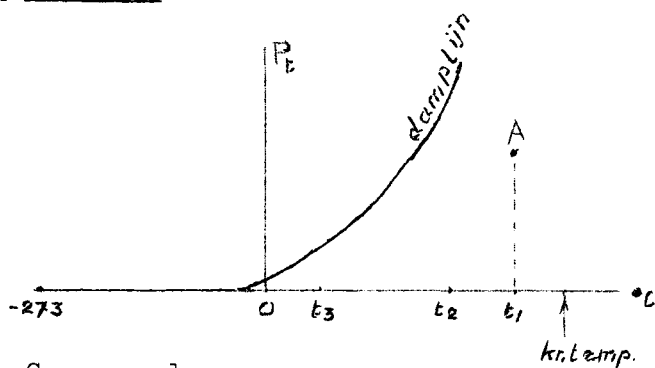
Bij 27°C . kan waterdamp dus **NOOIT**, never, niemals, jamais een spanning hebben van 7,5 cm. kwik. Het grafiekpunt F IS DUS EEN FOUT PUNT!

Vraag: Wat moet er dus gebeurd zijn?

Antw.: Bij de afkoeling van 87°C . tot 27°C . moet de waterdamp bij een zekere temperatuur tussen 87°C . en 27°C . verzadigd zijn geworden; vanaf deze temperatuur (t_{verz}) begon een gedeelte van de damp te condenseren, en wel zoveel, dat de overblijvende damp verzadigd bleef, bij 27°C . bevindt zich in het vat zoveel vloeistof en zoveel damp dat de damp **VERZADIGD** is en dus de spanning 2,8 cm. kwik heeft.



N.B. Opgave.



In een cilinder met verstelbare zuiger bevindt zich bij $t_1^{\circ}\text{C}$. een hoeveelheid damp waarvan de spanning in nevenstaande figuur wordt aangegeven door het punt A.

Gevraagd:

- Gevraagd:
- Is de damp bij de temp. $t_1^{\circ}\text{C}$. verzadigd of onverzadigd?
 - Zelfde vraag voor de temp. $t_2^{\circ}\text{C}$.
 - Zelfde vraag voor de temp. $t_3^{\circ}\text{C}$.
 - Wijs de temperatuur aan waarbij de damp PRECIES verzadigd is.
 - Men geeft de damp de temp. $t_2^{\circ}\text{C}$. en schuift de zuiger zoveel omlaag dat het dampvolume het derde deel wrdt van het oorspronkelijke volume. Wijs in bovenstaande figuur de spanning aan die de damp dan krijgt.

ALGEMENE OPMERKING.

In de sommen die handelen over een temperatuurverandering en/of een volumeverandering van een ONVERZADIGDE damp, wordt meestal NIET gegeven of de damp in de eindsituatie al dan niet verzadigd zal zijn. Hoe bepaalt men bij zo'n som de spanning van de damp in de eindsituatie?

Antwoord: Volgens het volgende recept:

- 1^o) Doe alsof de damp tot en met de eindsituatie ONVERZADIGD BLIJFT.

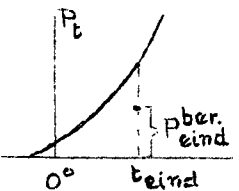
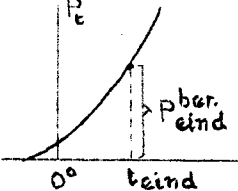
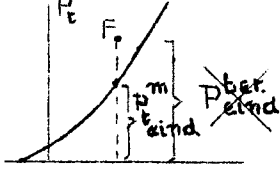
Vul dus in:

$P_1 =$	$P_2 =$
$V_1 =$	$V_2 =$
$T_1 =$	$T_2 =$
	$^{\circ}\text{K.}$

en pas de gaswet toe die een gas bij deze proef zou volgen.

Men vindt dan de spanning $P_{\text{eind}}^{\text{ber.}}$ die de damp in de eindsituatie moet hebben ALS DE DAMP TOT AAN DE EINDSITUATIE ONVERZADIGD BLIJFT.

- 2^o) Zoek in de tabel van P_t^{max} de waarde van de maximumspanning bij de eindtemperatuur op. Er zijn drie mogelijkheden:

$P_{\text{eind}}^{\text{ber.}} < P_{\text{teind}}^{\text{max}}$	$P_{\text{eind}}^{\text{ber.}} = P_{\text{teind}}^{\text{max}}$	$P_{\text{eind}}^{\text{ber.}} > P_{\text{teind}}^{\text{max}}$
		
<p>De damp is in de eindsituatie nog ONVERZADIGD dus:</p>	<p>De damp is in de eindsituatie PRECIES VERZADIGD dus:</p>	<p>FOUT! Een gedeelte van de damp is GECONDENSEERD. De overblijvende damp is verzadigd, dus:</p>
$P_{\text{eind}} = P_{\text{eind}}^{\text{ber.}}$	$P_{\text{eind}} = P_{\text{eind}}^{\text{ber.}}$	$P_{\text{eind}} = P_{\text{teind}}^{\text{max}}$

Sommen:

- 1) Geg.: In een ruimte met constant volume bevindt zich etherdamp; temperatuur 47°C ; spanning 64 cm. kwik. Men verlaagt de temperatuur tot 7°C .

Gevr.: a) Is de etherdamp bij 47°C . verzadigd of onverzadigd?

Antw.: De max.sp. van etherdamp bij 47° is 115 cm. De etherdamp heeft bij 47° de spanning 64 cm. De damp is dus bij 47° ONVERZADIGD.

- b) Bereken de spanning van deze etherdamp bij 7°C . in de veronderstelling, dat de damp onverzadigd blijft.

Antw.: Spanningswet van Gay-Lussac:

$$P_1 : P_{II} = T_I : T_{II}$$

$$64 : P_{7^{\circ}\text{C}} = 320 : 280$$

$$P_{7^{\circ}\text{C}} = 56 \text{ cm.}$$

- c) Kan etherdamp bij 7°C deze spanning hebben?

Antw.: De maximum spanning van etherdamp bij 7°C . is 25 cm., dus KLEINER dan 56 cm.
De berekende uitkomst (56 cm.) is dus onmogelijk.

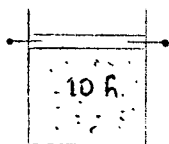
- d) Wat is er dus bij deze afkoeling gebeurd?

Antw.: Er is een gedeelte van de etherdamp gecondenseerd en wel zoveel, dat de overblijvende damp verzadigd is bij 7°C .

- e) Hoe groot is dus de spanning van de etherdamp in de eindsituatie?

Antw.: $P_{\text{eind}} = P_{7^{\circ}}^{\text{max}} = 25 \text{ cm. kwik.}$

- 2) Geg.: In een cilinder met verstelbare zuiger bevindt zich 10 liter alcohol damp van 27°C . en een spanning van 5 cm. Men zet de zuiger zoveel lager dat de inhoud van de cilinder 0,5 liter wordt en verhoogt tegelijk de temperatuur tot 87°C .



$$P_{27^{\circ}}^{\text{max}} = 6,5 \text{ cm}; P_{87^{\circ}}^{\text{max}} = 102 \text{ cm.}$$

Gevr.: De spanning van de alcohol damp in de eindsituatie.

Opl.: In de beginsituatie is de alcohol damp ONVERZADIGD.

voor	na
$P_1 = 5 \text{ cm.}$	$P_2 = ?$
$V_1 = 10 \text{ liter}$	$V_2 = 0,5 \text{ liter}$
$T_1 = 300^{\circ}\text{K.}$	$T_2 = 360^{\circ}\text{K.}$

Boyle-Gay-Lussac

$$\frac{5 \times 10}{300} = \frac{P_2 \times 0,5}{360}$$

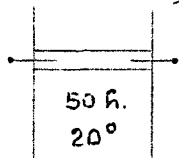
Volgens deze gaswet moet $P_2 = 120 \text{ cm.}$

MAAR..... $P_{87^{\circ}\text{C}}^{\text{max}} = 102 \text{ cm.}$

Er is dus alcohol damp gecondenseerd; de spanning van de damp in de eindsituatie is dus gelijk aan

$$P_{87^{\circ}\text{C}}^{\text{max}} = 102 \text{ cm. kwik.}$$

- 3) Geg.: In een cilinder met verstelbare zuiger bevindt zich 50 liter PRECIES VERZADIGDE etherdamp van 20°C .



$$P_{20^{\circ}}^{\text{max}} = 44 \text{ cm.}$$

Men zorgt er voor dat de temperatuur constant gelijk blijft aan 20°C ., maar verandert de inhoud van de cilinder.

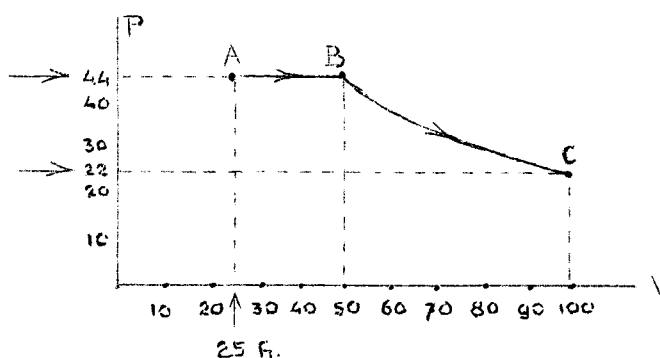
Gevr.: a) De spanning van de etherdamp als men de inhoud van de cilinder 25 liter maakt.

Opl.: 44 cm.

- b)

- b) Teken een grafische voorstelling die in beeld brengt hoe de spanning van de etherdamp verandert als men de inhoud van de cilinder vergroot van 25 liter tot 100 liter, en bereken de spanning in de eindsituatie.

Opl.: De temperatuur blijft constant. De grafiek is dus een stuk van de ISOTHERM van deze afgesloten hoeveelheid etherdamp bij 20° C.



Berekening van de spanning in de eindsituatie.

(V = 100 l.)

Als V = 50 liter is de damp PRECIES VERZADIGD. (geg.)
Bij VERDERE volume-vergroting onder constante temperatuur volgt de damp de wet van Boyle.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

$$44 \times 50 = P_2 \times 100$$

$$P_2 = 22 \text{ cm. kwik.}$$

N.B. Men mag dus pas een gaswet gaan toepassen op het ogenblik dat de damp PRECIES VERZADIGD geworden is.

DEEL V.

De wet van Dalton voor gassen en dampen.

Punt 1) Op blz. 40 hebben we de wet van Dalton voor gassen vermeld. Deze wet handelt over de spanning van EEN MENGSEL van twee of meer gassen die geen scheikundige werking op elkaar uitoefenen. Strikt genomen geldt deze wet alleen maar voor IDEALE gassen. Het exacte bewijs voor deze wet wordt in de 2^o ronde gegeven.

We beschouwen nu het geval dat zich in een ruimte een mengsel van een gas en een damp bevindt. De damp mag daarbij zowel verzadigd als onverzadigd zijn.

Hoe groot is nu de spanning van het mengsel?

Antw.: Als de moleculen van de damp en het gas geen scheikundige werking op elkaar uitoefenen NEMEN WE ZONDER BEWIJS AAN, DAT DE MOLECULEN VAN DE DAMP EN HET GAS ELKAAR NIET BEÏNVLOEDEN BIJ HUN BEWEGINGEN: de damp doet alsof het gas er niet is en het gas doet alsof de damp er niet is. We nemen dus aan, dat de wet van Dalton zonder meer geldig is voor een mengsel van een gas en een damp.

CONCLUSIE:

$$P_{\text{mengsel}} = p_{\text{gas}}^{\text{alleen}} + p_{\text{damp}}^{\text{alleen}}$$

Deze beschouwing geldt natuurlijk ook voor een mengsel van meerdere gassen en meerdere dampen; b.v. een mengsel van zuurstof, stikstof, waterdamp en etherdamp. Dit mengsel heeft dan VIER COMPONENTEN.

Vraag: Hoe luidt de wet van Dalton voor een mengsel van gassen en dampen?

N.B.

Antw.: De spanning van een mengsel van gassen en dampen die geen scheikundige werking op elkaar uitoefenen is gelijk aan de rekenkundige som van de spanningen die iedere component van het mengsel zou gehad hebben als deze zich bij de gegeven temperatuur ALLEEN in de gegeven ruimte had bevonden.

Punt 2) Opgaven.

- 1) In een ruimte met constant volume bevindt zich precies verzadigde kwikdamp. Men druppelt in die ruimte een hoeveelheid ether die geheel verdampt.

Gevr.: a) Gebeurt er iets met die kwikdamp?

b) Hoe groot wordt de spanning van het mengsel?

antw.: a) NIETS!

b) $P_{\text{mengsel}} = P_{\text{alleen}}^{\text{kwik}} + P_{\text{alleen}}^{\text{etherdamp}}$

- 2) In een cilinder met verstelbare zuiger bevindt zich lucht van 1 atm. Men druppelt zoveel ether in de cilinder dat de etherdamp precies verzadigd is. De maximumspanning van etherdamp bij de heersende temperatuur is 40 cm. kwik.

Men zet de zuiger nu lager totdat het volume van de afgesloten lucht de helft geworden is. De temperatuur blijft constant.

Gevr.: P_{mengsel} in de eindsituatie.

antw.: $P_{\text{mengsel}} = 2 \times 76 + 40 = 192$ cm. kwik.

- 3) Proefwerksom.

In een cilinder met verstelbare zuiger bevindt zich bij 37°C . een mengsel van lucht en etherdamp. De spanning van de etherdamp is 270 cm. kwik. De spanning van het mengsel is 450 cm. kwik. Het volume van het mengsel is 10 liter. Men koelt de cilinder af tot 7°C .*

Gevr.: a) Hoe groot is de spanning van het mengsel bij 7°C .

Antw.:

lucht

etherdamp

* m.sp. etherdamp bij 7°C . is 25 cm. kwik, bij 37°C . 350 cm. kwik.

$$P_1 = 450 - 270 = 180 \text{ cm.kwik.}$$

$$V_1 = 10 \text{ liter}$$

$$T_1 = 360^\circ \text{K.}$$

$$P_2 = ?$$

$$V_2 = 10 \text{ liter.}$$

$$T_2 = 280^\circ \text{K.}$$

Het volume blijft constant, dus geldt de spanningswet van G.L.

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

$$180 : P_2 = 360 : 280$$

$$P_2 = 140 \text{ cm. kwik}$$

In de eindsituatie is dus

$$P_{\text{lucht}} = 140 \text{ cm. kwik.}$$

$$P_1 = 270 \text{ cm.kwik. (onverz!)}$$

$$V_1 = 10 \text{ liter.}$$

$$T_1 = 360^\circ \text{K.}$$

$$P_2 = ?$$

$$V_2 = 10 \text{ liter.}$$

$$T_2 = 280^\circ \text{K.}$$

De etherdamp is aanvankelijk onverzadigd; het volume blijft constant.

We passen de spanningswet van G.L. toe.

$$P_1 : P_2 = T_1 : T_2$$

$$270 : P_2 = 360 : 280$$

$$P_2 = 210 \text{ cm. kwik}$$

MAAR... $P_{70^\circ \text{C}}^{\text{max}} = 25 \text{ cm. kwik}$

Er moet dus een gedeelte van de etherdamp gecondenseerd zijn en wel zoveel dat de overblijvende damp verzadigd is.

In de eindsituatie is de

spanning van de etherdamp
dus gelijk aan:

$$P_{70^{\circ}\text{C}}^{\text{max}} = 25 \text{ cm. kwik.}$$

Dalton:

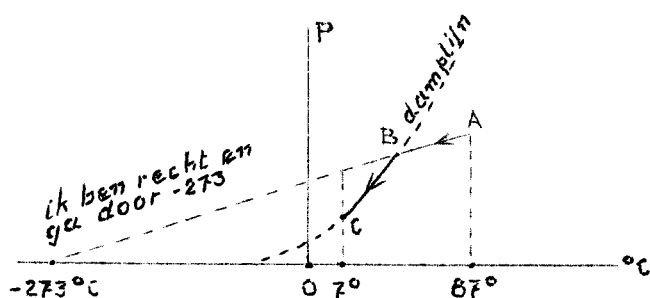
$$P_{\text{mengsel}} = P_{\text{lucht}} + P_{\text{etherdamp}}$$

In de eindsituatie is de spanning van het mengsel dus:

$$P_{\text{mengsel}} = 140 + 25 = 165 \text{ cm. kwik.}$$

Gevr.: b) Teken een grafiek die in beeld brengt hoe de spanning van de etherdamp is veranderd bij deze afkoe-
ling.

Antw.:



A → B → C is
de gevraagde
grafiek.

Gevr.: c) Als de temperatuur 7°C . geworden is, vergroot men
het volume. De temperatuur blijft 7°C .
Bereken met behulp van de wet van Boyle-Gay-Lussac
het volume waarbij de etherdamp precies verzadigd is.

Antw.: In de eindsituatie moet de spanning 25 cm. kwik zijn!

<u>Beginsituatie.</u>	<u>Eindsituatie.</u>
$P_1 = 270 \text{ cm. kwik.}$	$P_2 = 25 \text{ cm. kwik.}$
$V_1 = 10 \text{ liter.}$	$V_2 = ?$
$T_1 = 360^{\circ}\text{K.}$	$T_2 = 280^{\circ}\text{K.}$

Boyle-Gay-Lussac

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

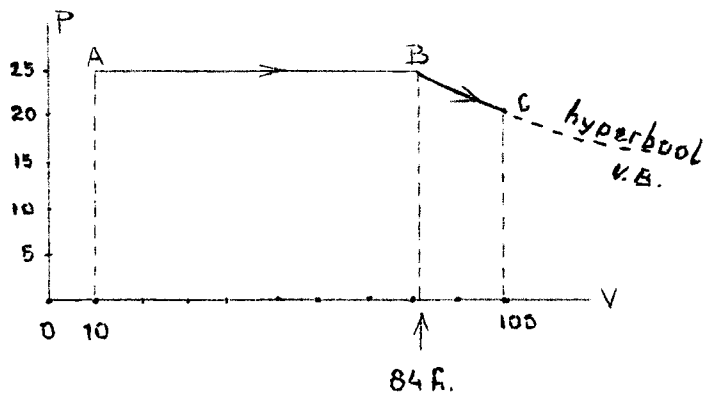
$$\frac{270 \times 10}{360} = \frac{25 \times V_2}{280}$$

$$V_2 = 84 \text{ liter.}$$

Conclusie: Het minimum volume van de gegeven hoeveelheid etherdamp bij 7°C . is 84 liter.

Gevr.: d) Teken een grafische voorstelling die in beeld brengt
hoe de spanning van de etherdamp verandert, als men
bij 7°C . het volume vergroot van 10 liter tot 100
liter. Welke spanning heeft de etherdamp dan gekre-
gen?

Antw.: De gevraagde grafiek moet een stuk van de ISOTHERM
zijn van de gegeven hoeveelheid etherdamp bij 7°C .



Van 84 liter tot 100 liter geldt de wet van Boyle.

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

$$25 \times 84 = P_2 \times 100$$

$$\underline{\underline{P_2 = 21 \text{ cm.}}}$$

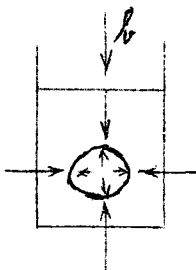
Concl.: A → B → C is de gevraagde grafiek.
In de eindsituatie heeft de etherdamp de spanning van 21 cm. kwik.

D E E L VI van HOOFDSTUK VIII.

Het verdampen IN de vloeistof.

§ 1. Inleiding.

De proef (blz. 57) waarbij vloeibare ether tot een zekere hoogte in een kwikkolom opstijgt en dan EXPLODEERT, heeft ons geleerd, dat een vloeistof VAN BINNEN UIT de neiging heeft om in damp over te gaan.



Vraag: In een bekersglas gieten we een hoeveelheid vloeistof. Als deze vloeistof VAN BINNEN UIT de neiging heeft om in damp over te gaan, waarom explodeert ze nu dan niet en vormt ze nu dan geen dampbellen in haar inwendige?

Antw.: Omdat de maximumspanning van de damp van deze vloeistof bij de heersende temperatuur KLEINER is dan de uitwendige druk

die op de vloeistof staat (i.c. de barometerdruk.)
Zou de vloeistof het bij de heersende temperatuur "in haar hoofd halen" om in haar inwendige een dampbel te vormen, dan zou die dampbel t.g.v. de druk die ze van haar omgeving ondervindt (b + de hydrostatische vloeistofdruk) onmiddellijk weer tot vloeistof worden samengeperst.

Concl.: Zolang de maximumspanning van de damp bij de heersende temperatuur lager is dan de uitwendige druk op de vloeistof, wordt de neiging van de vloeistof om te exploderen in toom gehouden door de uitwendige druk.

Vraag: Wat moet men dus doen als men wil bereiken dat zich in het inwendige van een vloeistof dampbellen vormen?

Antw.:

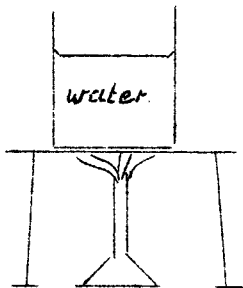
Antwoord: Men moet dan;

òf de temperatuur van de vloeistof verhogen,

òf de uitwendige druk verlagen.

In de komende paragrafen zullen we eerst het geval beschouwen dat er zich in het inwendige van een vloeistof dampbellen vormen t.g.v. een verwarming van de vloeistof; daarna het geval dat er zich in het inwendige van een vloeistof dampbellen vormen t.g.v. een verla- ging van de druk op de vloeistof.

§ 2) Verschijselen die optreden als water in een open vat wordt ver- warmd.



Zoals in nevenstaande figuur is aangegeven plaatsen we een bekerglas gevuld met water op een driepoot boven een gasvlam (aardgas). Het gaat ons nu om de natuurkundige verschijn- selen die zich achtereenvolgens in het water voor doen en vanzelfsprekend om de verklaring van deze verschijnselen.

We zullen deze verschijnselen en hun verkla- ring behandelen in de vorm van een serie- vraag.

a) Waarom beslaat de buitenkant van het bekerglas zodra de gas- vlam begint te branden?

Antw.: Branden is zich binden met zuurstof. Bij het branden van aardgas wordt H_2O gevormd dat zich in de vorm van damp in de vlam bevindt. De gasvlam is dus "kletsnat". Deze waterdamp stijgt (met het niet verbrande gas) door het kopergaas waar het bekerglas op staat, omhoog en komt in aanraking met de buitenwand van het bekerglas. Zolang dit bekerglas nog koud is, slaat deze waterdamp in de vorm van kleine druppeltjes neer tegen de buitenwand van het glas.

Gaandeweg wordt de wand van het bekerglas zoveel verwarmd dat het op de buitenwand neergeslagen water weer verdampt en de neerslag dus weer verdwijnt.

b) Waarom ontstaan er stromingen in het water?

Antw.: Boven $4^{\circ}C$. wordt het soortelijk gewicht van water klei- ner bij stijgende temperatuur. Het soortelijk lichtere water stijgt volgens de wet van Archimedes omhoog in het soortelijk zwaardere water. Boven $4^{\circ}C$. stijgt het warmere water dus omhoog in het koudere.

c) Welk gevolg hebben deze stromingen?

Antw.: Water is "van huis uit" een slechte warmtegeleider. Deze stromingen hebben tot gevolg dat de bovenlagen van de waterkolom ook verwarmd worden.

d) Na enige tijd zien we dat er op de bodem van het bekerglas kleine blinkende belletjes gevormd worden die voor en na opstij- gen naar het oppervlak van het water. Dit blijken LUCHT-bellet- jes te zijn.

Gevr.: Verklaar het ontstaan van deze luchtbelletjes.

Antw.: In "gewoon" water is altijd lucht opgelost. Water is echter niet in staat om willekeurig grote hoeveelheden lucht "gevangen te houden"; een gram water kan slechts een heel bepaald aantal grammen lucht vasthouden. Dit aantal is sterk afhankelijk van de temperatuur. BIJ STIJGENDE TEMPERATUUR NEEMT DE OPLOSBAARHEID VAN LUCHT IN WATER AF.

Welnu: in het gegeven water is een bepaald aantal gram- men lucht per gram water opgelost. Als nu de tempera- tuur van het gegeven water blijft stijgen krijgen we bij een zekere temperatuur de situatie dat het aantal

grammen lucht dat in feite per gram van het gegeven water is opgelost precies gelijk is aan het maximale aantal voor deze temperatuur. Stijgt de temperatuur nog verder, dan zou het gegeven water (als er niets gebeurde) OVERVERZADIGD worden van lucht. De overtollige lucht maakt zich door het vormen van luchtbelletjes vrij uit het water.

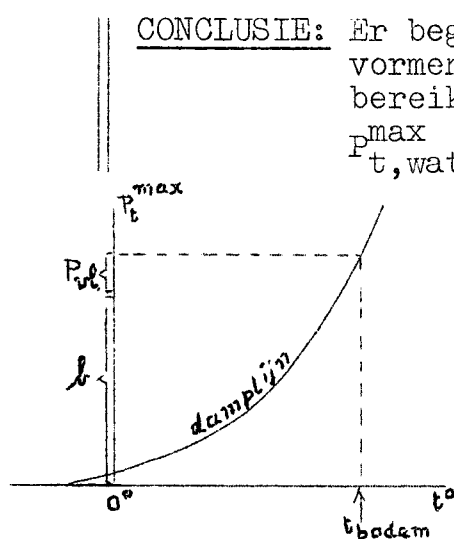
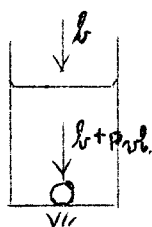
Opmerking: De vorming van deze luchtbelletjes blijft achterwege als men de proef doet met z.g. uitgekookt water, d.i. water dat enige tijd gekookt heeft en dientengevolge alle opgeloste lucht is kwijt geraakt. Uitgekookt water heeft een flauwe smaak.

e) Waarom blinken deze luchtbelletjes alsof ze verzilverd zijn?

Antw.: Deze vraag zullen we beantwoorden bij de behandeling van de terugkaatsing van het licht.

f) Bij welke temperatuur beginnen zich op de bodem WATERDAMPbellen te vormen? Wijs deze temperatuur aan in de grafiek van de damplijn.

Antw.: Evenals iedere vloeistof heeft water van binnen uit de neiging om in damp over te gaan: ER ZULLIEN ZICH OP DE BODEM DAMPBELLEN VORMEN ZODRA DEZE DAMPBELLEN OP DE BODEM KUNNEN BESTAAN. Welnu, de dampbellen kunnen op de bodem bestaan zodra de maximum-spanning van de damp gelijk is aan de druk die een dampbel op de bodem van haar omgeving ondervindt, dit is DE DRUK VAN DE BUITENLUCHT PLUS DE HYDROSTATISCHE DRUK VAN DE VLOEISTOPKOLOM.



CONCLUSIE: Er beginnen zich op de bodem dampbellen te vormen zodra het bodemwater de temperatuur bereikt heeft waarbij:

$$p_{t, \text{waterdamp}}^{\text{max}} = b + p_{\text{vloeistofkolom}}$$

In nevenstaande figuur stelt de kromme lijn de damplijn van waterdamp voor.

b is de barometerdruk; p_{vl} is de hydrostatische druk van de waterkolom. t_{bodem} is dan de temperatuur waarbij zich op de bodem dampbellen beginnen te vormen. Als $b = 76$ cm. kwik, is $b + p_{vl} > 76$ cm., dus $t_{\text{bodem}} > 100^\circ$, b.v. $t_{\text{bodem}} = 102^\circ$ C.

g) Waarmee zijn deze op de bodem gevormde dampbellen gevuld?

Antw.: Met VERZADIGDE WATERDAMP van de bodemtemperatuur.

h) Wat gebeurt er met de warmte die we verder toevoeren vanaf het moment dat zich op de bodem dampbellen vormen?

Antw.: Deze warmte wordt geheel gebruikt voor het vormen van waterdampbellen; het bodemwater heeft immers de temperatuur waarbij het KAN exploderen, EN DIT DUS OOK ZAL DOEN. Maar voor zo'n explosie IS ENERGIE NODIG.

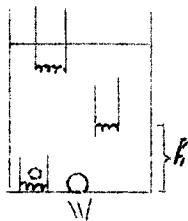
Vanaf het moment dat de temperatuur op de bodem de in bovenstaande grafiek aangewezen waarde t_{bodem} bereikt heeft, wordt de verder door de gasvlam toegevoerde warmte NIET meer gebruikt OM HET BODEM WATER TE VERWARMEN, maar OM DE EXPLOSIES bij het vormen van de waterdampbellen TE BEKOSTIGEN: Er ontstaat op de bodem per seconde zoveel damp als met de per seconde toegevoerde warmte kan bekostigd worden.

DE TEMPERATUUR OP DE BODEM BLIJFT DUS VERDER CONSTANT GELIJK AAN t_{bodem} .

Opmerking: De warmte die gebruikt wordt om het vormen van de dampbellen te bekostigen **BLIJFT DUS VOOR DE THERMOMETER VERBORGEN**. Daarom noemt men deze warmte ook wel **LATENTE WARMTE**.

N.B. i) Hoe is het gesteld met de temperatuur in de hogere vloeistoflagen op het ogenblik dat zich op de bodem DE EERSTE dampbellen vormen?

antw.: We doen de volgende proef: Zodra zich op de bodem de eerste dampbellen vormen steken we een elektrische verwarmingsspiraal in het water en houden deze op verschillende diepten.



Op de bodem: de warmte die de spiraal aan het water geeft wordt direct gebruikt om dampbellen te vormen.

Op de hoogte h boven de bodem: We zien niets gebeuren. Het water op deze hoogte is dus blijkbaar nog niet "rijp" om dampbellen te gaan vormen, d.w.z. de temperatuur van het water op de hoogte h is dus nog zo laag dat

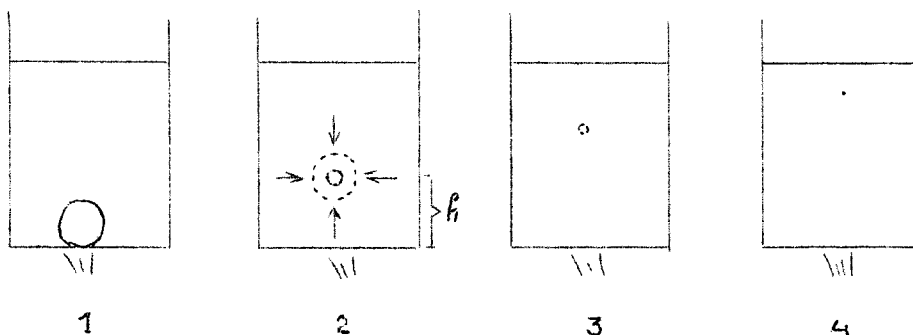
$$p_t^{\max} \text{ op hoogte } h \ll b + p_{\text{op hoogte } h}^{\text{vloeistof}}$$

Conclusie: Op het ogenblik dat zich op de bodem DE EERSTE dampbellen vormen, is de temperatuur in de HOGERE lagen nog zo LAAG dat

$$p_t^{\max} \text{ op hoogte } h \ll b + p_{\text{op hoogte } h}^{\text{vloeistof}}$$

N.B. j) Wat gebeurt er met DE EERSTE op de bodem gevormde dampbellen?

Antw.:



Bij fig. 1: De op de bodem gevormde dampbel is gevuld met verzadigde waterdamp van de bodemtemperatuur. Het soortelijk gewicht van waterdamp is kleiner dan het soortelijk gewicht van water; **DE DAMPBEL STIJGT DUS OMHOOG VOLGENS DE WET VAN ARCHIMEDES**.

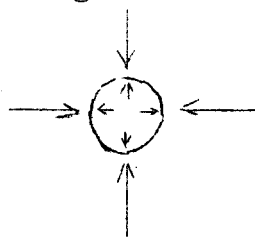
Bij fig. 2: Daardoor komt de dampbel dus in een hogere vloeistoflaag. In deze hogere vloeistoflaag is de temperatuur echter **LAGER** dan de temperatuur van het bodemwater. **DE OPGESTIEGEN DAMPBEL WORDT DUS AFGEKOELD; DE SPANNING VAN DE WATERDAMP IN DE DAMPBEL DAALT DUS**, en wel tot de waarde van p_t^{\max} bij de temperatuur van de vloeistoflaag waarin de dampbel zich momenteel bevindt, dus p_t^{\max} op hoogte h .

Nu komt de vraag waar dit hele betoog om draait: **KAN DE DAMPBEL ZICH NOG HANDHAVEN?**

Antw.: De EERSTE op de bodem gevormde dampbellen worden bij het opstijgen zo sterk afge-

koeld dat

$$p_t^{\max} \text{ op hoogte } h \ll b + p_{\text{op hoogte } h}^{\text{vl.}} \quad (\text{zie i})$$



De damp in de dampbel op hoogte h ondervindt van haar omgeving een alzijdige druk die veel groter is dan haar p^{\max} bij de momentele temperatuur; de omgeving voelt de dampbel als een zwakke plek met geringe weerstand.

Gevolg: DE OMGEVING VERKLEINT HET VOLUME VAN DE DAMPBEL EN PERST DAARBIJ DE DAMP IN DE DAMPBEL SAMEN TOT VLOEISTOF.

Bij fig. 3: Er gebeuren dus twee dingen:

- 1^o) de dampbel stijgt omhoog,
- 2^o) TIJDENS dit opstijgen verkleint de omgeving het volume van de dampbel en perst de damp in de bel dientengevolge weer samen tot vloeistof.

Bij fig. 4: Op enige hoogte boven de bodem is er van de dampbel als zodanig niets meer over; de damp is weer vloeistof geworden. Het is mogelijk, dat er zich in de op de bodem gevormde dampbel een kleine hoeveelheid LUCHT bevindt. In dat geval blijft er na de samenpersing van de dampbel een minuscuul luchtbelletje over dat het oppervlak bereikt.

<p><u>CONCLUSIE:</u></p>	<p>De EERSTE op de bodem gevormde dampbellen worden TIJDENS HET OPSTIJJEN DOOR DE OMGEVING SAMENGEPERST TOT VLOEISTOF.</p>
--------------------------	--

k) Welk gevolg heeft dit condenseren van de dampbellen voor de vloeistof?

Antw.: Voor de vorming van de dampbellen op de bodem was latente warmte nodig. Warmte is energie, en energie gaat nooit verloren. De latente warmte komt dus weer te voorschijn als de damp van de dampbel in de hogere lagen weer tot vloeistof wordt samengeperst, met het gevolg, dat de hogere vloeistoflagen verwarmd worden. De volgende op de bodem gevormde dampbel wordt bij het opstijgen dus minder sterk afgekoeld: DE VOLGENDE DAMPBEL KAN DUS HOGER KOMEN.

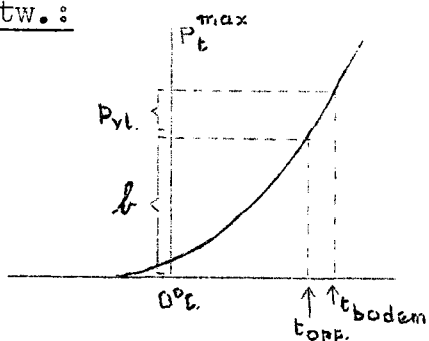
Conclusie: Het condenseren van de eerste dampbellen heeft TWEE gevolgen:

- 1^o) de vloeistof in de hogere lagen wordt extra verwarmd,

2°) de volgende dampbel zal hoger komen dan de voorgaande.
Tenslotte zullen de op de bodem gevormde dampbellen het vloeistofoppervlak bereiken.

1) Hoe hoog is de temperatuur aan het vloeistofoppervlak als de op de bodem gevormde dampbellen het oppervlak bereiken? Wijs deze temperatuur aan in de grafiek van de damplijn.

Antw.:



De dampbellen bereiken het oppervlak ALS ZE AAN HET OPPERVLAKE KUNNEN BESTAAN.
 De temperatuur aan het oppervlak moet dan dus zo hoog zijn, dat:
 $P_t^{max} = \text{druk op de vloeistof}$
 $P_t^{opp.} = b \text{ cm. kwik.}$
 Deze temperatuur is in nevenstaande figuur aangewezen als $t_{oppervlak}$.

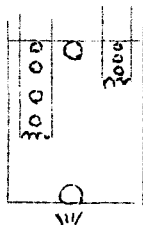
m) Hoe is het dan gesteld met de temperatuur in de overige punten van de vloeistof? Bewijs door een proef dat dit inderdaad zo is.

Antw.: In ieder punt van de vloeistof heeft de temperatuur nu zo'n waarde dat de dampbellen in ieder punt van de vloeistof kunnen bestaan.

Is X een willekeurig punt van de vloeistof, dan heeft de temperatuur in X nu zo'n waarde dat:

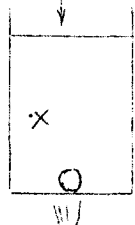
$$P_{bij\ t\ in\ x}^{max} = b + P_{in\ x}^{vloeistof}$$

Dit houdt in, dat de vloeistof in het punt X klaar moet staan om zelf in damp over te gaan. Als we dus in het punt X extra warmte aan de vloeistof toevoeren, moeten zich dus in X onmiddellijk dampbellen beginnen te vormen die het oppervlak bereiken.



Dat dit inderdaad gebeurt kunnen we bewijzen door een elektrische verwarmingsspiraal in de vloeistof te steken; waar we de spiraal ook houden, overal beginnen zich onmiddellijk dampbellen te vormen die het oppervlak bereiken.

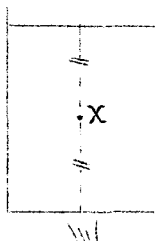
Conclusie: Als de op de bodem gevormde dampbellen het vloeistofoppervlak bereiken heeft de temperatuur in ieder punt van de vloeistof de waarde die nodig is opdat een dampbel in dat punt kan bestaan.



Is X een willekeurig punt in de vloeistof dan heeft de temperatuur in X zo'n waarde dat

$$P_{bij\ t\ in\ x}^{max} = b + P_{in\ x}^{vloeistof}$$

Proefwerkvraag: Geg.: X is een punt op de halve hoogte van de vloeistofkolom. De op de bodem gevormde dampbellen bereiken het oppervlak.



Gevr.: a) BEREDENEER, dat de temperatuur in x PER SIE LAGER MOET ZIJN dan de bodemtemperatuur en HÖGER MOET ZIJN dan de oppervlakte-temperatuur.

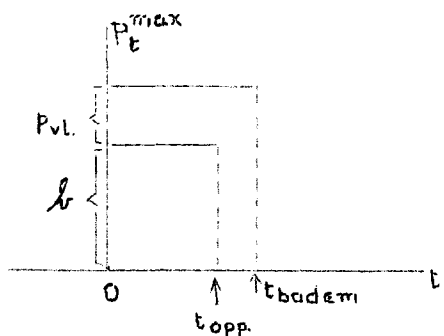
b) Wijs t_x aan in de grafiek van de damplijn.

c) Is t_x het gemiddelde van de bodem- en oppervlakte temperatuur?

N.B. n) Wanneer zegt men dat een vloeistof kookt?

Antw.: EEN VLOEISTOF KOOKT ALS ZICH IN IEDER PUNT VAN DE VLOEISTOF WAAR WARMTE WORDT TOEGEVOERD DAMPBELLEN VORMEN, DIE HET OPPERVLAK BEREIKEN.

N.B. o) als een vloeistof kookt is de temperatuur op de bodem HOGER dan de temperatuur aan het vloeistofoppervlak (zie grafiek bij vraag l); gaande van de bodem naar het oppervlak neemt de temperatuur geleidelijk af van t_{bodem} tot $t_{\text{oppervl.}}$ (zie grafiek)



$t_{\text{oppervlak}}$ wordt bepaald door de damplijn (dus door de soort van de stof) en door de druk die van buitenaf op de vloeistof wordt uitgeoefend, i.c. b.

t_{bodem} wordt BOVENDIEN bepaald door de hydrostatische druk van de vloeistofkolom op de bodem. Bij een bepaalde vloeistof en een bepaalde h kan t_{bodem} dus nog alle mogelijke waarden groter dan $t_{\text{opp.}}$ hebben, afhankelijk van de hoogte van de vloeistofkolom.

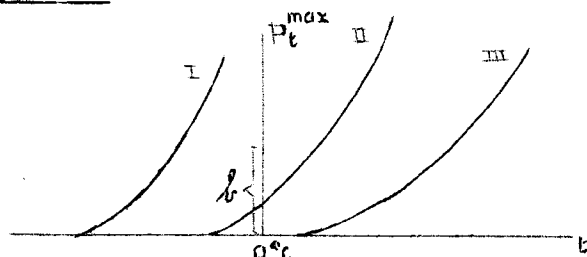
We vragen: WAT VERSTAAT MEN NU ONDER HET KOOKPUNT (of de kooktemperatuur) VAN EEN VLOEISTOF BIJ DE GEGEVEN UITWENDIGE DRUK b ?

Antw.: De in bovenstaande grafiek aangewezen $t_{\text{oppervlak}}$. Het is dus de temperatuur die het vloeistofoppervlak moet hebben opdat de dampbellen aan het oppervlak kunnen bestaan. We kunnen ook zeggen: Het is de temperatuur waarbij de max.spanning van de damp gelijk is aan de uitwendige druk op de vloeistof. De eerste zegswijze legt de nadruk op het natuurkundige gebeuren bij het koken n.l. het feit dat de op de bodem gevormde dampbellen het oppervlak bereiken; de tweede zegswijze verwijst naar de tabel van P_t^{max} . Daarom is de tweede zegswijze beter geschikt om als definitie te dienen van het kookpunt.

DEFINITIE:

ONDER HET KOOKPUNT (kooktemp.) VAN EEN VLOEISTOF BIJ EEN GEGEVEN UITWENDIGE DRUK VERSTAAT MEN DE TEMPERATUUR WAARBIJ DE MAXIMUM-SPANNING VAN DE DAMP VAN DIE VLOEISTOF GELIJK IS AAN DE GEGEVEN UITWENDIGE DRUK.

Opgave:



In nevenstaande figuur stellen de grafieklijnen I, II en III de damplijnen van drie verschillende stoffen voor.

Gevr.: Wijs voor elk van deze stoffen het kookpunt bij de uitwendige druk b aan.

p) Waar heeft de kokende vloeistof de temperatuur van het kookpunt?

Antw.: Aan het oppervlak.

q) Kan de kokende vloeistof aan het oppervlak een HOGERE temperatuur hebben dan de kooktemperatuur bij de heersende druk?

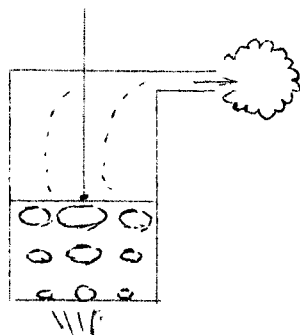
Antw.: NEE!

N.B. Het kookpunt bij een gegeven druk is de HOOGSTE OPPERVLAKTE TEMPERATUUR die de gegeven vloeistof bij de gegeven druk KAN hebben.

r) Hoe kan men met behulp van een thermometer het kookpunt van een vloeistof bepalen?

Antw.:

Theoretisch: Door het reservoir van de thermometer precies aan het vloeistof-oppervlak te houden.

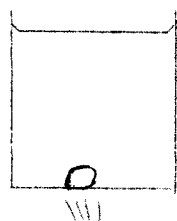


Practisch: Door de thermometer vlak boven het vloeistofoppervlak IN DE ONTWIJKENDE DAMP VAN DE KOKENDE VLOEISTOF TE HOUDEN (zie fig.) De thermometer wordt dan geheel omringd door de damp uit de dampbellen en neemt de temperatuur aan waarmee de dampbellen het vloeistof-oppervlak bereiken.

N.B. s) Waarom worden de dampbellen die in een KOKENDE vloeistof opstijgen, tijdens dit opstijgen GROTER?

Antw.: We moeten het volgende voorop stellen. Op iedere plaats in de kokende vloeistof heeft de temperatuur zo'n waarde dat:

$$p_t^{\max} \text{ ter pl.} = b + p_{\text{vloeistof ter plaatse}}$$



Op iedere plaats in de kokende vloeistof staat de vloeistof dus klaar om in damp over te gaan zodra er warmte wordt toegevoerd. Op iedere plaats in de kokende vloeistof kan een dampbel zich dus bij de temperatuur ter plaatse handhaven. Op geen enkele plaats in de kokende vloeistof zal ook maar iets van de damp van een dampbel condenseren.

Er zijn nu TWEE redenen op te noemen waarom een in een kokende vloeistof opstijgende dampbel tijdens dit opstijgen GROTER wordt.

1^o reden: Uitleg in delen.

- 1) Een dampbel op de bodem van het bekeerglas is gevuld met precies verzadigde damp van de bodemtemperatuur; het volume van de dampbel is dus gelijk aan het minimum-volume van deze gewichtshoeveelheid damp van de bodemtemperatuur.
- 2) Als deze dampbel opstijgt zal er niets van deze damp condenseren: De natuur zal er dus voor zorgen DAT HET VOLUME VAN DE DAMPBEL OP IEDERE HOOGTE GELIJK ZAL ZIJN AAN HET MINIMUMVOLUME VAN DEZE GEWICHTSHOEVEELHEID DAMP BIJ DE PLAATSELIJKE TEMPERATUUR.
- 3) Het isothermendiagram van een constante gewichtshoeveelheid damp heeft ons geleerd dat het minimum-volume TOENEEMT bij DALENDE temperatuur.
- 4) Welnu, gaande van de bodem naar het oppervlak neemt de temperatuur van de kokende vloeistof geleidelijk AF.
- 5) Dus moet het volume van een in een kokende vloeistof opstijgende dampbel tijdens dit opstijgen groter worden.

Toelichting van punt 2 voor de B kandidaten.

Het is NIET ZO, dat de dampbel in een hogere laag aangekomen eerst wordt afgekoeld en daarna het passende grotere minimum-volume aanneemt, maar ALS VOLGT: De omhoog stijgende dampbel heeft voor de komende hogere vloeistoflaag en een te hoge spanning en een te hoge temperatuur. Bij aankomst in de hogere vloeistoflaag ZET DE DAMPBEL UIT tot haar spanning gelijk geworden is aan $b + p_{\text{op deze hoogte}}^{\text{vloeistof}}$.

Bij dit uitzetten VERRICHT DE DAMP DUS ARBEID OP HAAR OMGEVING. Deze arbeid kost warmte, met het gevolg DAT DE TEMPERATUUR VAN DE DAMP DAALT, en wel tot die temperatuur waarvoor

$$P^{\text{max}} = b + p_{\text{op deze hoogte}}^{\text{vloeistof}}$$

Dus juist tot de temperatuur van die hogere vloeistoflaag.

Bij het omhoog gaan in de kokende vloeistof verbruikt DE TEMPERATUUR DUS HAAR WARMTEOVERSCHOT om de uitwerking van het spanningsoverschot (de volumevergroting van de bel) te bekostigen.

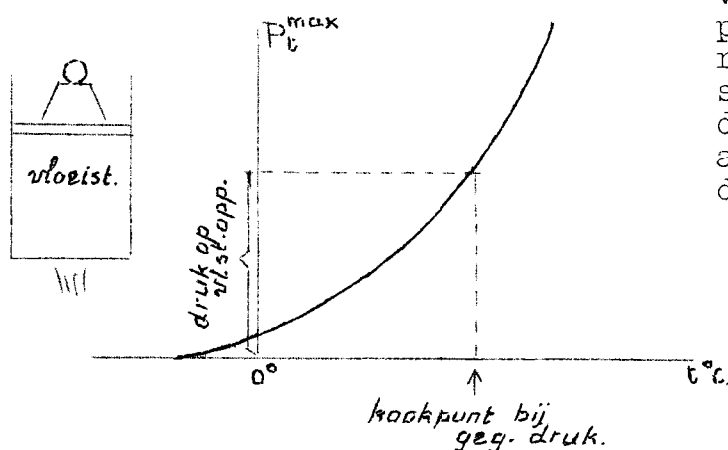
2^o reden: De opstijgende dampbel neemt in haar kielzog een beetje bodemwater mee naar boven. Maar dit bodemwater heeft voor de hogere lagen een te hoge temperatuur; het zal in de hogere lagen zijn warmteoverschot direct gebruiken om damp te vormen die zich bij de toch al groter wordende dampbel aansluit.

Eindconclusie: Er zijn twee redenen op te noemen waarom een in een KOKENDE vloeistof opstijgende dampbel tijdens dit opstijgen GROTER wordt.

§ 3. De invloed van de druk op het kookpunt van een vloeistof.

Vraag 1) Bewijs aan de hand van de damplijn dat de druk invloed heeft op het kookpunt van een vloeistof.

Antwoord:



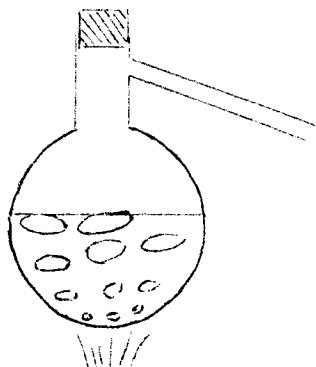
Het kookpunt van een vloeistof onder een bepaalde druk is de temperatuur waarbij de max. spanning van de damp van die vloeistof gelijk is aan de gegeven uitwendige druk.

Conclusie: Drukverhoging doet het kookpunt stijgen, drukverlaging doet het kookpunt dalen.

Vraag 2) Bewijs door een proef dat drukverlaging het kookpunt inderdaad doet dalen.

Antwoord:

Proef: De nummers geven de onderdelen aan.



I) In een destilleerkolf brengen we water aan de kook.

II) TERWIJL het water kookt draaien we de vlam eventueel nog hoger en sluiten A (zie fig.) aan op een luchtpomp.

WE ZIEN: 1) aanvankelijk kookt het water EXPLOESIE-achtig.

2) Na enige tijd gaat het water weer "gewoon" koken.

III) Maken we A dan weer vrij van de luchtpomp zodat de druk boven de vloeistof weer gelijk wordt aan de barometerdruk DAN HOUDT HET KOKEN ONMIDDELLIJK OP. Het duurt dan weer enige tijd voordat zich op de bodem "de eerste" dampbellen beginnen te vormen, die het nieuwe kookproces inluiden.

IV) Sluiten we vòòrdat het water opnieuw kookt A weer aan op de luchtpomp, dan begint het water ONMIDDELLIJK te koken.

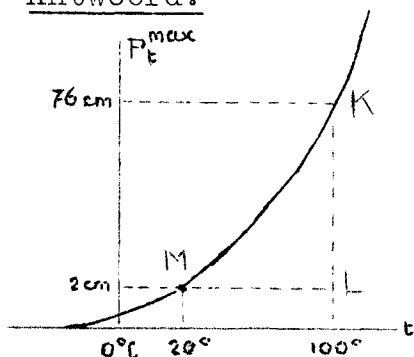
Conclusie: 1^o) Tijdens het explosieachtige koken DAALT de temperatuur van het water, ONDANKS DE HITTE VAN DE VLAM.

2^o) Bij een lagere druk behoort een lager kookpunt; m.a.w. DRUKVERLAGING DOET HET KOOKPUNT DALEN.

Vraag 3) Verklaar het feit, dat het water t.g.v. de drukverlaging aanvankelijk explosieachtig gaat koken en dat daarbij de temperatuur ondanks de hitte van de vlam DAALT.

Antwoord:

Zie ook de figuur bij vraag 2.



a) Als A vrij is, staat op het water de druk van de buitenlucht b.v. 76 cm. Het water wordt aan de kook gebracht; het kokende water heeft dan aan het oppervlak de temperatuur 100^o C.

De situatie aan het vloeistofoppervlak wordt in nevenstaande figuur aangegeven door het grafiekpunt K.

b) Nu wordt A aangesloten op een luchtpomp. We nemen aan dat deze luchtpomp de druk boven het water onmiddellijk verlaagt tot b.v. 2 cm. kwik en er verder voor zorgt dat de druk op de vloeistof 2 cm. kwik blijft.

Op het moment dat A verbonden wordt met de luchtpomp wordt de situatie aan het vloeistofoppervlak dus aangegeven door het grafiekpunt L.

c) I Bezien we bovenstaande grafiek in VERTICALE richting (laten we onze blik van L naar K gaan), dan zien we, dat het water zich nu in een natuurkundig onmogelijke situatie bevindt:

1^o) Het heeft VAN BINNEN UIT de neiging om in damp over te gaan,

2^o) Het KAN aan zijn oppervlak damp vormen die een spanning heeft van 76 cm. kwik, terwijl

3^o) de UITWENDIGE DRUK op het water slechts 2 cm. kwik is.

Onder deze omstandigheden MOET het water EXPLODEREN.

Zo'n explosie kost echter energie!

- II Bezien we bovenstaande grafiek in HORIZONTALE richting, (laten we onze blik van L naar M gaan), dan zien we dat het water zich in de situatie die door het punt L wordt aangegeven, 80° C. BOVEN HET KOOKPUNT BIJ DE UITWENDIGE DRUK VAN 2 cm. kwik BEVINDT. In de situatie die door het punt L wordt aangegeven heeft het water dus een oppervlaktetemperatuur die 80° C. HOGER is dan de oppervlaktetemperatuur die water onder de druk van 2 cm. kwik MAXIMAAL KAN HEBBEN. In de situatie L heeft het water dus EEN WARMTE (= energie) OVERSCHOT van 80° C. Het water zal dus van binnen uit gedwongen worden dit energie-overschot op een of andere manier te verbruiken.

Conclusie uit C I en II.

In de situatie die door het grafiekpunt L wordt aangegeven heeft het water:

- I Een SPANNINGS-OVERSCHOT, waardoor het water van binnen uit gedwongen wordt te EXPLODEREN. Zo'n explosie kost echter energie.
- II Een WARMTE (= energie) OVERSCHOT. Het water zal VAN BINNEN UIT gedwongen worden dit energie-overschot op een of andere manier te verbruiken.

- d) Wat zal het water dus gaan doen als het t.g.v. de verlagings van de uitwendige druk in de situatie L gebracht wordt?

Antwoord. Het water heeft een energie-OVERSCHOT. Het wil exploderen, maar zo'n explosie kost energie.

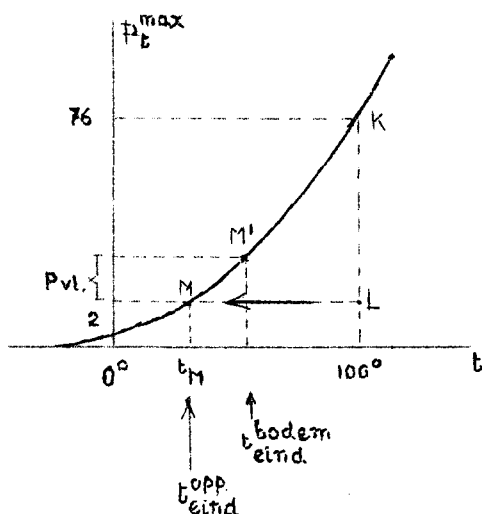
Gevolg: Het water zal zijn energieOVERSCHOT gebruiken als "explosie-energie":
ER ZAL ZOVEEL WATER EXPLOSIET IN DAMP OVERGAAN ALS ER MET HET WARMTE OVERSCHOT KAN BEKOSTIGD WORDEN.

- e) Welk gevolg heeft dit voor de temperatuur van het water? Welke waarden hebben t_{topp} en t_{bodem} in de eindsituatie?

Antwoord: Het water VERBRIJKT zijn warmte-OVERSCHOT om de explosieve verdamping te bekostigen: DE TEMPERATUUR VAN HET WATER MOET DUS DALEN en wel zodanig, DAT ER IN DE EINDSITUATIE NERGENS IN DE VLOEISTOF MEER EEN WARMTE-OVERSCHOT ZAL ZIJN (en dus ook nergens meer een spanningsoverschot).

Dit is het geval als de oppervlakte-temperatuur gelijk geworden is aan t_M (i.c. 20° C.) en de bodemtemperatuur t_{M1} .

Conclusie: De explosieve verdamping in de vloeistof heeft tot gevolg dat de oppervlakte-temperatuur DAALT TOT t_M en de bodemtemperatuur tot t_{M1} .



f) In welke toestand bevindt het water zich dan?

Antwoord: Het water bevindt zich dan in de toestand waarin het in elk van zijn punten klaar staat om onder de uitwendige druk van 2 cm. kwik in damp over te gaan; het water staat dus op het punt te gaan koken. Voert de omgeving (de vlam) warmte toe, dan kookt het water gewoon verder, natuurlijk met t_M tot kookpunt.

g) Tegenwerping. Hebben we in de punten c, d, e en f de hitte van de vlam niet vergeten? Kan de hitte van de vlam de boven beredeneerde temperatuurdaling niet voorkomen?

Antwoord: De hitte van de vlam kan de boven beredeneerde temperatuur-daling NIET voorkomen. In de situatie die door het grafiekpunt L wordt aangegeven KAN het water te enen male NIET MEER ALS VLOEISTOF, MAAR ALLEEN ALS DAMP, BESTAAN; krachtens zijn eigen natuur wordt het van binnen uit GEDREVEN om explosief in damp over te gaan en aldus zijn energie-overschot weg te werken.

Geen enkele vlam, hoe heet ook, is in staat om deze explosieve verdamping tegen te houden, en dus ook niet de daling van de temperatuur die noodzakelijk samen gaat met de explosieve verdamping.

De warmte die de vlam toevoert wordt NIET gebruikt om de vloeistof te verwarmen, maar wel om bij steeds lager wordende temperatuur dampbellen te vormen.

In de tijdsduur dat de situatie overgaat van het grafiekpunt L naar het grafiekpunt M, gebeuren er dus twee dingen:

- 1°) Door de explosieve verdamping verlaagt de vloeistof ZELF haar momentele temperatuur.
- 2°) De door de vlam toegevoerde warmte wordt gebruikt om damp te vormen bij die alsmaar lager wordende momentele temperatuur.

In de situatie van het grafiekpunt M blijft de momentele temperatuur constant en kookt de vloeistof, dank zij de vlam, gewoon verder.

EINDCONCLUSIE van vraag 3:

Verlaagt men de druk boven normaal kokend water, dan heeft dit tot gevolg dat er in het water EXPLOSIEVE verdamping plaats heeft. Tijdens deze explosieve verdamping DAALT de temperatuur van het water ondanks de hitte van de vlam tot de oppervlakte-temperatuur gelijk geworden is aan de kooktemperatuur bij de lagere druk.

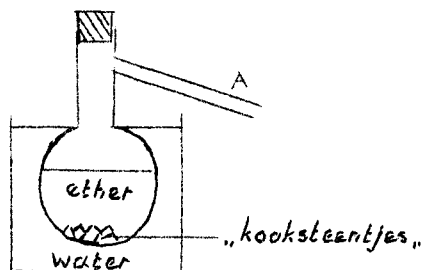
Benaming: Dit proces waarbij een vloeistof DOOR EXPLOSIEVE VERDAMPING ZELF HAAR TEMPERATUUR VERLAAGT noemt men in de populaire natuurkunde KOUD-KOKEN. (De officiële naam is: ADIABATISCHE VERDAMPING IN EEN VLOEISTOF. De term ADIABATISCH geeft aan dat het verdampingsproces geheel en alleen bekostigd wordt uit de energievoorraad van de vloeistof ZELF.)

Vraag 4. a) Wat verstaat men onder KOUDKOKEN?

Antwoord: Onder KOUDKOKEN (of adiabatische verdamping in een vloeistof) verstaat men het verschijnsel waarbij een vloeistof DOOR EXPLOSIEVE VERDAMPING ZELF HAAR TEMPERATUUR VERLAAGT.

b) Bespreek een proef, die bewijst, dat men ether kan dwingen zich koud te koken.

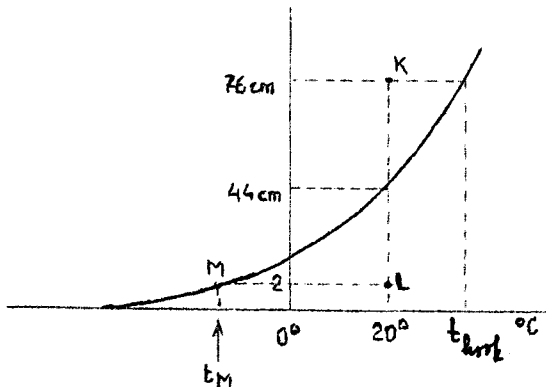
Antwoord: We vullen een destilleerkolf gedeeltelijk met ether. Bovendien laten we enkele "kooksteentjes" op de bodem van de kolf vallen. (Deze steentjes dienen als katalysator bij de explosieve verdamping. We gaan daar niet verder op in.) We plaatsen de kolf in een bekersglas met water. Het geheel heeft de temperatuur van het lokaal b.v. 20°C . Daarna sluiten we A (zie fig.) op een luchtpomp die de druk boven de ethervloeistof verlaagt tot ongeveer 2 cm. kwik en er verder voor zorgt dat deze druk 2 cm. blijft.



Wat er nu gebeurt:

- 1^o) De ethervloeistof begint explosief te koken.
- 2^o) Na enige tijd BEVRIEST het water in het bekersglas. Het vriest in het bekersglas "dat het kraakt"! Als we "geluk hebben" barst het bekersglas.

Verklaring:



- 1) In nevenstaande figuur stelt de kromme lijn de damplijn van ether voor. Deze reikt tot ver beneden 0°C . Als A nog vrij is staat op de ether de druk van de buitenlucht b.v. 76 cm.; de temperatuur van de ether is b.v. 20°C . In de grafiek bevinden we ons dus in het punt K, dus nog ver beneden het kookpunt van ether bij de druk van 76 cm.

- 2) We sluiten A aan op de luchtpomp. Aanvankelijk bevindt de ethervloeistof zich in de situatie die door het grafiekpunt L wordt aangegeven. Gevolg: de ethervloeistof begint explosief te verdampen en gebruikt haar warmte-overschot om in de situatie te komen die door het grafiekpunt M wordt aangegeven. De temperatuur van de vloeistof daalt dus tot haar oppervlakte-temperatuur gelijk geworden is aan t_M .

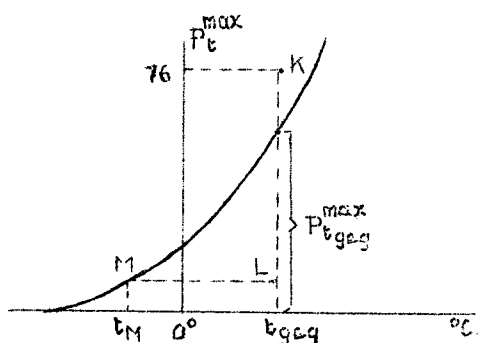
Welnu: t_M ligt ver beneden 0°C .

Het water in het bekersglas moet dus bevriezen.

c) Hoe kan men in het algemeen een vloeistof die de kamertemperatuur heeft dwingen zich koud te koken?

Antwoord: Door de druk boven de vloeistof zo sterk te verlagen dat het kookpunt bij die lagere druk beneden de kamertemperatuur ligt.

Men kan ook zeggen: door de uitwendige druk op de vloeistof zoveel te verlagen, dat deze **KLEINER WORDT DAN DE MAXIMUM-SPANNING VAN DE DAMP BIJ DE GEGEVEN TEMPERATUUR VAN DE VLOEISTOF.**

ALGEMENE CONCLUSIE.

MEN DWINGT EEN VLOEISTOF OM
ZICH KOUD TE KOKEN

ALS MEN

DE UITWENDIGE DRUK OP DE
VLOEISTOF KLEINER MAAKT DAN

Dus als: $P_{t_{gew}}^{max}$
 $P_{uitw. op vl.} < P_{t_{gew}}^{max}$.

Vraag 5. Hoe wordt dit koudkoken in de techniek toegepast?

Antw.: In de techniek van het dagelijkse leven wordt dit toegepast bij de ijskast, kunstijsbanen, diepvries enz.

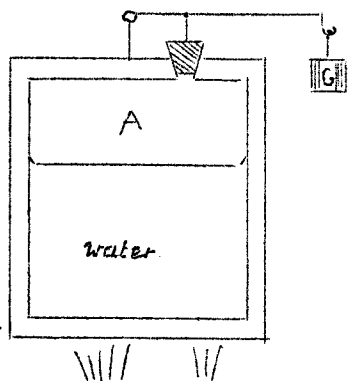
In de techniek van het laboratorium wordt dit toegepast voor het bereiken van ZEER lage temperaturen, b.v. temperaturen waarbij lucht vloeibaar wordt.

We komen hier in de tweede ronde zeer uitvoerig op terug.

Vraag 6. Wat verstaat men onder het NORMALE kookpunt van een vloeistof?

Antw.: Onder het normale kookpunt verstaat men het kookpunt bij een druk van 1 atm., dus 76 cm. kwik.

Vraag 7.



Gegeven: Een stalen vat van nevenstaande vorm. De ruimte A wordt van de buitenwereld afgesloten door de sluiters S (zie fig.) Indien de spanning in de ruimte A echter groter wordt dan een (volgens de hefboomwet) bepaalde waarde, wordt S omhoog getild en ontsnapt er damp uit A.

Vorbereiding van een proef: We nemen het gewicht G van de hefboom en draaien deze dan omhoog; S gaat dan mee omhoog zodat het vat geopend wordt.

Daarna vullen we het vat bijna geheel met water en brengen dit aan de kook.

De waterdamp verdrijft dan de lucht uit A.

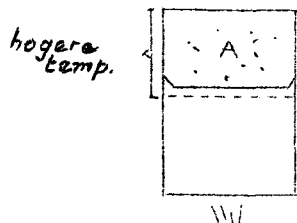
Als het water enige tijd gekookt heeft mogen we aannemen dat de ruimte A boven het water ALLEEN WATERDAMP BEVAT.

De proef: We draaien de hefboom weer in de horizontale stand, zodat S het vat afsluit en hangen het gewicht G aan de haak. De vlam blijft branden.

Gevr.: a) Kan het water nu gewoon blijven doorkoken?

Antwoord: Op het ogenblik dat het vat werd afgesloten was het water aan het koken; er waren dus dampbellen die juist aan het oppervlak aankwamen. De damp uit deze bellen voegt zich dus bij de zich reeds in A bevindende damp DIE ECHTER VERZADIGD IS en waarvan de temperatuur gelijk is aan de momentele oppervlakte temperatuur van het water. De nieuw in A aangekomen damp heeft ook deze temperatuur.

Men zou nu wellicht verwachten dat de nieuw in A aangekomen damp GEHEEL moet condenseren. Dit behoeft echter NIET, omdat er bij het condenseren WARMTE VRIJ KOMT waardoor de reeds in A aanwezige damp een hogere temperatuur krijgt, daardoor onverzadigd wordt en



dientengevolge meer dampmoleculen per cm^3 kan bevatten: Er zal slechts zoveel van de nieuw aangevoerde damp condenseren als nodig en voldoende is om een evenwichtstoestand te bereiken WAARIN DE ZICH DAN IN A BEVINDENDE DAMP VERZADIGD ZAL ZIJN BIJ EEN HOGERE TEMPERATUUR en de onmiddellijk met de damp in aanraking zijnde vloeistoflaag deze zelfde temperatuur heeft. In deze laag staat de vloeistof dus klaar om in damp over te gaan.

Bij temperaturen boven 100°C . (zie tabel blz. 67) neemt de maximum-spanning van waterdamp bijzonder sterk toe bij stijgende temperatuur. Doordat de damp in A bij een hogere temperatuur verzadigd geworden is, IS DE DRUK OP DE VLOEISTOF ZO STERK TOEGENOMEN DAT ER BIJ DE MOMENTELE TEMPERATUURSITUATIE IN DE VLOEISTOF GEEN DAMPBELLEN MEER KUNNEN BESTAAN en dus ook niet kunnen ONTSTAAN. De door de vlam toegevoerde warmte zal dus weer gebruikt worden OM HET WATER TE VERWARMEN.

ZODRA ECHTER HET WATER VAN DE BOVENSTE OPPERVLAKTE-LAAG WARMTE KRIJGT TOEGEVOERD ZAL DIT ONMIDDELLIJK IN DAMP OVERGAAN, hetgeen (zie boven) uiteindelijk tot gevolg heeft DAT DE SPANNING VAN DE DAMP IN A WEER TOENEEMT EN DUS OOK DE DRUK OP DE VLOEISTOF. Deze druk-toename op de vloeistof maakt het weer onmogelijk dat zich in de vloeistof dampbellen vormen enz.

CONCLUSIE: Zolang S het vat afsluit en de vlam warmte toevoert KAN HET in het vat aanwezige WATER NIET KOKEN: De (verzadigde) damp boven de vloeistof heeft op ieder ogenblik zo'n grote spanning DAT ZICH IN DE VLOEISTOF GEEN DAMPBELLEN KUNNEN VORMEN. Het water stijgt gestadig in temperatuur; er heeft echter alleen VERDAMPING AAN HET OPPERVLAAK plaats.

Gevr.: b) Wat valt er dus te zeggen van de waterdamp in A?

Antwoord: Drie dingen:

- 1^o) de damp is op ieder ogenblik verzadigd,
- 2^o) de damp stijgt gestadig in temperatuur, tenminste zolang S het vat afsluit en de vlam warmte toevoert,
- 3^o) haar spanning neemt (dan) toe volgens de damplijn.

Gevr.: c) Hoelang sluit S het vat af?

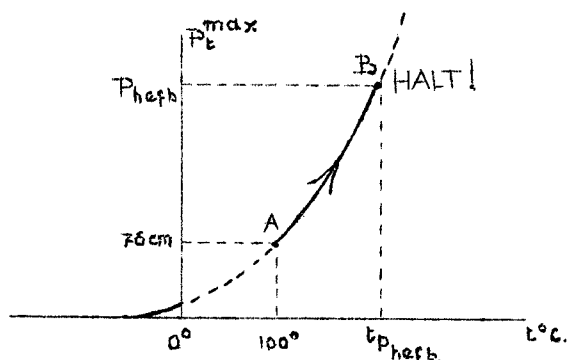
Antwoord: Zolang, tot de spanning van de damp de waarde bereikt heeft waarbij S omhoog geduwd wordt; dus de waarde waarbij de damp in staat is de hefboom op te tillen.

We zullen deze spanning P_{hefboom} noemen.

Gevr.: d) Teken een grafische voorstelling die in beeld brengt hoe de spanning van de waterdamp in A toeneemt vanaf het begin van de proef tot het ogenblik, dat S wordt opgetild.

Antwoord:

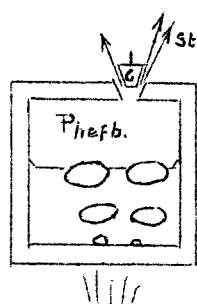
Antwoord:



AB is het gevraagde grafiek stuk: het is een deel van de damplijn.

Gevr.: e) Wat gebeurt er als de spanning van de waterdamp de waarde P_{hefboom} bereikt heeft?

Antwoord: Drie dingen:



- 1°) S wordt opgetild en de stoom SPUIT naar buiten.
- 2°) De spanning van de waterdamp in A blijft verder constant gelijk aan P_{hefboom} .
- 3°) Het water **BEGINT WEER TE KOKEN**, maar nu met de oppervlakte-temperatuur $t_{P_{\text{hefb}}}$.
(zie bovenstaande grafiek)

Gevr.: f) Hoe noemt men het vat dat bij bovenstaande proef werd gebruikt?

Antwoord: Papiniaanse pot.

(Denis Papin; 1647 - 1712; werd in 1672 assistent van Huygens; in 1688 hoogleraar te Maagdenburg; vond de z.g. snelkookpan uit, waarin spijzen bij temperaturen boven 100°C . gaar gekookt worden.)

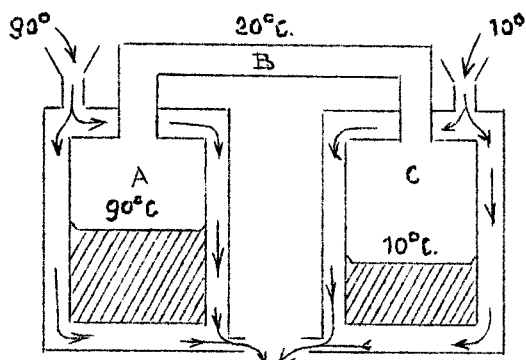
Gevr.: g) Noem een belangrijke technische toepassing van de Papiniaanse pot.

Antwoord: De stoomketel. (zie later: de stoommachine)

§ 4. Het beginsel van WATT.

(James Watt; 1736 - 1819; begon zijn loopbaan op 19-jarige leeftijd als instrumentmakersleerling te Londen; na één jaar werd hij wiskundig instrumentmaker aan de universiteit te Glasgow; vond de condensor uit; in 1775 nam hij de fabricage van stoommachines ter hand, welke spoedig een commercieel succes werd. Kronig)

Probleem.



Gegeven: A en C zijn twee door een buis B verbonden vaten, die elk voor een deel gevuld zijn met een en dezelfde vloeistof. Voor de rest bevindt zich A, B en C nog damp van deze vloeistof, maar ook **SLECHTS** damp van deze vloeistof, dus geen lucht of welk ander gas of welke andere damp dan ook. De vaten A en C hebben ieder een eigen mantelvat. Door het mantelvat van A laten we voortdurend vloe

stof van een CONSTANT HOGE TEMPERATUUR (HOGER dan de temperatuur in het lokaal) stromen. De temperatuur in het lokaal is b.v. 20°C ., we laten door de mantel van A water van 90°C . stromen. Hierdoor bereiken we dat de temperatuur in het inwendige van vat A constant gelijk is aan 90°C . Door het mantelvat van C laten we voortdurend vloeistof van een CONSTANT LAGE TEMPERATUUR (LAGER dan de temperatuur in het lokaal) stromen. We nemen daarvoor water van 10°C .: De temperatuur in het inwendige van vat C is dus voortdurend 10°C .

De kwestie is nu: Wat gaat er achtereenvolgens in de vaten A, B en C gebeuren.

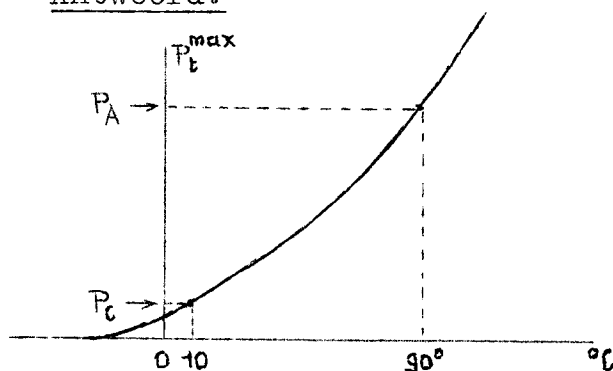
We zullen deze gebeurtenissen op de voet volgen in de vorm van een serie-vraag.

Gevr.: a) Wat valt in de beginsituatie te zeggen van de damp in A en C?

Antwoord: Boven de vloeistof in A bevindt zich verzadigde damp van 90°C .; boven de vloeistof in C verzadigde damp van 10°C .

Gevr.: b) Wat valt er te zeggen van de spanningen die de damp heeft in A en C? Wijs deze aan in de grafiek van de damplijn.

Antwoord:



De spanning van de damp in A is gelijk aan P_{90}^{max} ; de spanning van de damp in C is gelijk aan P_{10}^{max} .

Gevr.: c) Wat valt er te zeggen als men de grootte van de spanning in A vergelijkt met die in B?

Antwoord: $P_A \gg P_B$

Gevr.: d) Welk gevolg heeft dit?

Antwoord: Dit heeft tot gevolg, dat er een DAMPSTROMING zal optreden van vat A via B naar vat C.

Gevr.: e) Uit A verdwijnt dus damp; in C komt er damp bij. Welk gevolg heeft dit?

Antwoord:

Gevolg voor A.

In A wordt de damp even onverzadigd. Er zal onmiddellijk zoveel vloeistof aan het oppervlak verdampen dat de damp weer verzadigd wordt.

Conclusie: In A VERDAMPT VLOEISTOF AAN HET OPPERVLAAK.

Gevolg voor C.

In C is de damp reeds verzadigd. DE NIEUW AANGEKOMEN DAMP zal dus MOETEN CONDENSEEREN.

Conclusie: in C CONDENSEERT de nieuw aangekomen damp.

Gevr.: f) De hoeveelheid vloeistof in A neemt dus AF, in C neemt deze toe.

Op een gegeven ogenblik is de vloeistof in A juist op; de damp in A is dan dus PRECIES VERZADIGD.

Houdt de dampstroming dan op?

Antwoord: Nee, want de spanning van de damp in A is dan nog gelijk aan P_{90}^{max} en dus nog steeds groter

dan de spanning van de damp in C die immers gelijk is aan P_{100}^{\max} .

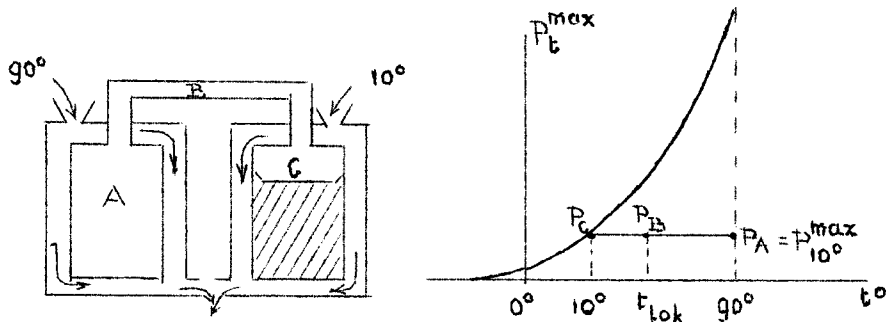
De dampstroming gaat dan dus nog door!

Gevr.: g) Hoe lang gaat de dampstroming dan nog door?

Antwoord: TOT DE SPANNING VAN DE DAMP IN A (en ook in B) GELIJK GEWORDEN IS AAN DE SPANNING VAN DE DAMP IN C, dus gelijk geworden is aan de maximum-spanning van de damp bij 10° C.

Gevr.: h) Hoe is de situatie in A, B en C als de dampstroming is opgehouden?

Antwoord:



Als de dampstroming is opgehouden, is $P_A = P_B = P_C = P_{100}^{\max}$.

De horizontale lijn $P_A P_B P_C$ brengt de spanningssituatie in A, B en C in beeld.

Uit de grafiek lezen we het volgende af:

- 1^o) In de eindsituatie is de damp in A ONVERZADIGD; haar temperatuur is nog steeds 90° C., maar haar spanning is gelijk geworden aan P_{100}^{\max} .
- 2^o) De damp in B is dan eveneens ONVERZADIGD; haar temperatuur is gelijk aan t_{lokaal} ; haar spanning is eveneens gelijk geworden aan P_{100}^{\max} .

Gevr.: i) Wat zal er gebeuren als we, uitgaande van bovenstaande eindsituatie, de temperatuur in C verder verlagen tot b.v. 2° C.?

Antwoord: Dan zal er weer een dampstroming optreden die gericht is van A via B naar C. Er zal zoveel damp uit A en B wegtrekken en in C condenseren TOT DE SPANNING IN IEDER PUNT VAN DE VERBONDEN VATEN GELIJK GEWORDEN IS AAN P_{20}^{\max} , dus gelijk aan de maximum-spanning van de damp in het vat MET DE LAAGSTE TEMPERATUUR. Een damp trekt dus zolang van een warme plek naar een koude plek totdat de spanning van de damp op de warme plek gelijk geworden is aan de maximum-spanning van de damp bij de temperatuur van de koude plek.

Welnu: Dit verschijnsel noemt men HET BEGINSSEL VAN WATT.

Gevr.: j) Hoe luidt het beginsel van Watt?

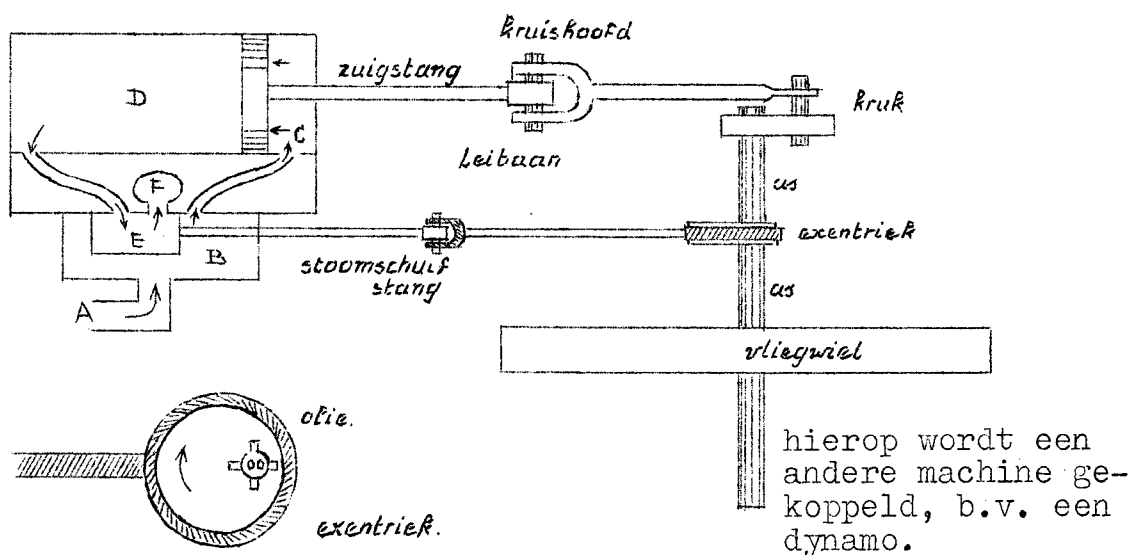
Antwoord: Bevindt zich in twee verbonden vaten van verschillende temperatuur EEN soort vloeistof met zijn damp, dan stroomt de damp van het vat met de hoogste temperatuur naar het vat met de laagste temperatuur. Deze dampstroming gaat zolang door tot in ieder punt van de verbonden vaten afgenomen is tot en gelijk geworden is aan de maximum-spanning van de damp bij de temperatuur van het vat met de laagste temperatuur.

In de eindsituatie bevindt zich in het vat met de laagste temperatuur vloeistof en verzadigde damp; het vat

met de hoogste temperatuur en de verbindingbuis zijn dan gevuld met ONVERZADIGDE DAMP waarvan de temperatuur gelijk is aan de plaatselijke, constant gehouden temperatuur en de spanning gelijk is aan de maximumspanning van de damp in het vat met de laagste temperatuur.

Par. 5. De stoommachine.

a) De arbeid cilinder.



Onderdelen:

A voert stoom aan uit een stoomketel.

B is de schuifkast.

E is de schuif (Watt)

C ontvangt in de situatie van bovenstaande figuur stoom uit de ketel.

D Staat in deze situatie via E en de uitlaat F in verbinding met de buitenlucht of een condensor.

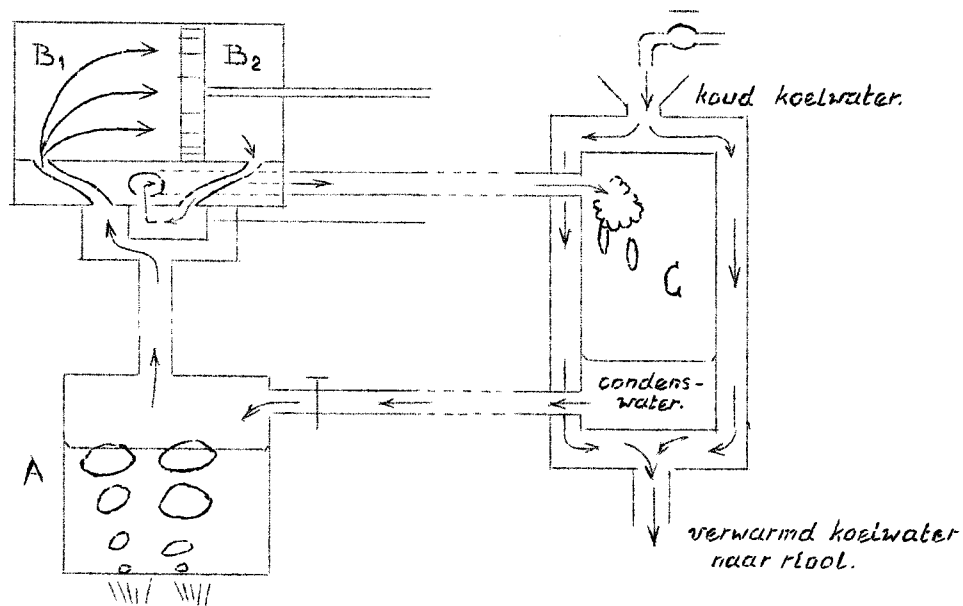
De verse stoom in C heeft een hogere spanning dan de stoom in D.

Ten gevolge van die hogere spanning beweegt de zuiger (in de situatie van bovenstaande figuur) naar links.

Als de zuiger links is aangekomen is E verschoven zò dat D in verbinding staat met A (en C met F)

Het vliegwiel dient om de zuiger over het "dode punt" heen te helpen.

- b) De kring: ketel arbeid-cilinder condensor ketel.
Hoe bij een stoommachine WARMTE IN ARBEID WORDT OMGEZET.



Bovenstaande figuur geeft een SCHEMATISCH beeld van de onderdelen van een stoommachine die iets met DE STOOM te maken hebben.

Deze onderdelen zijn:

- A) DE KETEL. Deze moet er voor zorgen dat er voor iedere zuigerslag voldoende stoom aanwezig is.
- B) DE ARBEIDCILINDER.
- C) DE CONDENSOR. Het koude koelwater dat van boven door de mantel van de condensor stroomt, zorgt er voor dat de temperatuur in C blijvend veel lager is dan de temperatuur in de arbeidcilinder.

In de situatie van bovenstaande figuur staat de ruimte C in verbinding met de ruimte B₂ van de arbeidcilinder; volgens het beginsel van Watt stroomt de stoom in B₂ "uit eigen beweging" van B₂ naar de ruimte C; ze wil de spanning in B₂ gelijk maken aan p_{max} in C. De uit eigen beweging uit B₂ wegtrekkende stoom biedt dus weinig weerstand aan de (in deze situatie) naar rechts bewegende zuiger, met het gevolg, dat de verse stoom die B₁ binnen stroomt de zuiger GEMAKKELIJK naar rechts kan duwen.

De uit B₂ weggetrokken stoom condenseert in C. Het aldus ontstane water noemt men CONDENSATER.

Bij dit condensereren komt warmte vrij. Deze warmte en ook de warmte die onttrokken moet worden om het condenswater af te koelen, WORDT DOOR HET KOELWATER MEEGENOMEN IN HET RIOOL; DEZE WARMTE GAAT DUS VERLOREN (bm te krietten, meer!)

Het condenswater, dat nog altijd een temperatuur heeft van b.v. 40° C. WORDT TERUGGE-VOERD NAAR DE KETEL om het water in de ketel aan te vullen. Dit betekent een kleine "warmte winst" voor de ketel.

N.B. HET WATER VAN DE KETEL VOERT DUS EEN KRINGLOOP UIT!

Vraag: Welk nut heeft de condensor?

Antwoord: Het nut van de condensor is TWEE-voudig:

- 1^o) Het "uit eigen beweging wegtrekken" van de afgewerkte stoom heeft tot gevolg dat de VERSE stoom de zuiger van de arbeidcilinder GEMAKKELIJK vooruit kan duwen. Zonder condensor zou de verse stoom altijd de tegenwerking van de buitenlucht ondervinden bij het vooruit duwen van de zuiger.
- 2^o) Het in de ketel terugstromende condenswater betekent een warmte-winst voor de ketel.

Vraag: Wordt bij een stoommachine WARMTE OMGEZET IN ARBEID?

Antwoord: Ja! Immers: een vuurhaard brengt het water in de ketel aan de kook; de ontstane stoom doet een zuiger bewegen; de bewegende zuiger brengt een as aan het draaien; op deze as zijn arbeid verrichtende machines gekoppeld.

|| Conclusie: Bij een stoommachine wordt warmte omgezet in arbeid.

Vraag: Wordt ALLE warmte die in de vuurhaard bij de verbranding van de brandstof vrij komt, omgezet in nuttige machine-arbeid?

Antwoord: Nee! Slechts een gedeelte van de in de vuurhaard geproduceerde warmte wordt omgezet in arbeid waar de fabrikant wat aan heeft. De rest gaat verloren aan "noodzakelijke verliezen".

Deze verliezen zijn:

- I) De hete ketel verwarmt de omgeving; de stokers hebben het "snik heet". Er stroomt dus warmte uit de machine naar buiten. Deze warmte is voor de machine VERLOREN.
- II) De rook die uit de schoorsteen verdwijnt is nog warm; deze warmte is dus ook voor de machine VERLOREN.
- III) De wrijving tussen de onderdelen van de machine eist een gedeelte van de opgewekte arbeidsenergie op.
- IV) Het koelwater dat door de mantel van de condensor stroomt, neemt een zeer grote hoeveelheid warmte mee in het riool.

Vraag: De verliezen I, II en III zouden we misschien kunnen opheffen door het water in de ketel electrisch te verwarmen, de wanden van de machine volkomen te isoleren van de omgeving en de wrijvingsvlakken perfect te oliën. Dan blijft er nog het verlies IV. Welk "NATUURKUNDIG WONDER" zou er moeten gebeuren om het verlies IV op te heffen?

Antwoord: Dan zou het verwarmde koelwater bereid moeten zijn om de "gestolen warmte" SPONTAAN (dus zonder dat wij daar iets voor behoeften te doen) TERUG TE GEVEN AAN DE KETEL.

Als we dan het verwarmde koelwater (b.v. 40° C.) om de buitenwand van de zeer hete ketel (b.v. 200° C.) heen zouden leiden, zou dit de "gestolen warmte" spontaan terug moeten geven aan de ketel. Maar dit is NATUURKUNDIG ONMOGELIJK: ALS TWEE LICHAMEN VAN VERSCHILLENDE TEMPERATUUR MET ELKAAR IN CONTACT KOMEN, IS HET ONMOGELIJK DAT HET LICHAAM MET DE LAAGSTE TEMPERATUUR WARMTE AFSTAAT AAN HET LICHAAM MET DE HOOGSTE TEMPERATUUR.

Deze onmogelijkheid noemt men de TWEEDE HOOFDWET VAN DE WARMTELEER. De eerste hoofdwet zegt dat er geen warmte - energie tot niets kan gaan en ook geen warmte-energie uit niets kan ontstaan.

Conclusie: Het is onmogelijk om het verlies IV op te heffen, daarvoor zou een "natuurkundig wonder" nodig zijn.

Vraag: Wat verstaat men onder het nuttig effect van een stoom-
machine?

Antwoord: Onder het nuttig effect van een stoommachine verstaat men het gedeelte van de in de vuur-
haard geproduceerde warmte dat in machine-arbeid wordt omgezet.

Bij een kleine stoommachine is dit slechts 2%; bij de allerbeste zware stoommachine is dit 15%.

Vraag: Wat is voor onze natuurkunde-studie het belangrijkste van de stoommachine?

Antwoord: DAT WARMTE IN ARBEID KAN OMGEZET WORDEN.

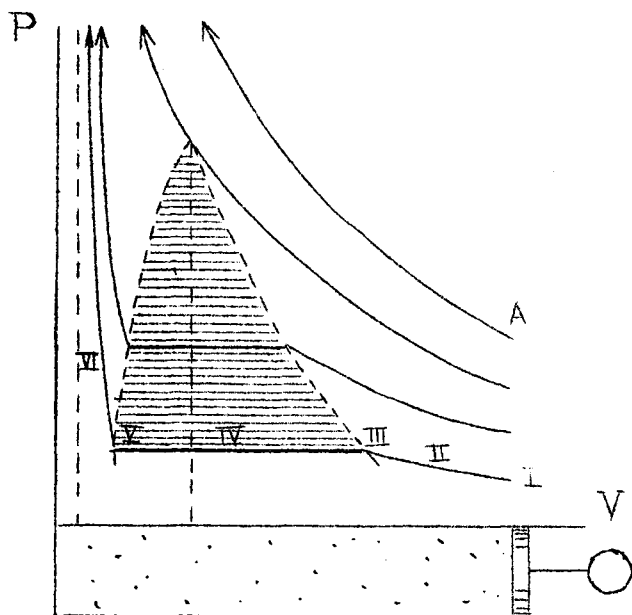
We komen hier nog op terug.

Henric van Veldeke College.
Maastricht.

DEEL VII van HOOFDSTUK VIII:

DAMP EN GAS.

1. De KRITISCHE TEMPERATUUR van een stof.



Nevenstaande figuur geeft een schets van de isothermen van een afgesloten hoeveelheid stof bij verschillende temperaturen.

Op blz. 62 e.v. hebben we gezien DAT en WAAROM de gebieden der coëxisterende fasen bij stijgende temperatuur AAN BEIDE KANTEN WORDEN INGEKORT. Er zal dus ook een temperatuur zijn waarbij het gebied der coëxisterende fasen NUL is. Deze temperatuur noemt men DE KRITISCHE TEMPERATUUR VAN DEZE STOF.

Wat dat "kritische" betekent gaan we nu bespreken.

Vraag: We geven de afgesloten hoeveelheid stof het volume V_I en een temperatuur DIE HOGER IS DAN DE KRITISCHE TEMPERATUUR, b.v. de temperatuur behorende bij het grafiekpunt A. De stof verkeert dan zeker in de dampvormige toestand. We zorgen er voor dat de damp deze temperatuur behoudt en gaan het volume verkleinen.

De vraag is nu: In welk opzicht verschilt het gedrag van de damp bij deze samenpersing BOVEN de kritische temperatuur met het gedrag bij een samenpersing ONDER de kritische temperatuur.

Antwoord: Het verschil bestaat hierin DAT ER BIJ DE SAMENPERSING BOVEN DE KRITISCHE TEMPERATUUR GEEN GEBIED DER COEXISTERENDE FASEN OPTREEDT: BOVEN DE KRITISCHE TEMPERATUUR KAN DE DAMP DUS NIET MEER TOT VLOEISTOF SAMENGEPERST WORDEN.

Vraag: als men uitgaande van de situatie die door het grafiekpunt A wordt aangegeven, het volume alsmaar verkleint, wordt dit tenslotte zo klein, dat de moleculen van de stof NOG MINDER BEWEGINGSRUIMTE HEBBEN DAN ZE HEBBEN IN SITUATIE V, dus als de stof vloeibaar is. IS DE STOF DAN OOK NIET VLOEIBAAR?

Antwoord: Beslist NIET! Want als men, na zo'n hevige samenpersing, het volume weer vergroot vliegen de moleculen OOK WEER ONMIDDELIJK UIT ELKAAR en doorkruisen DE GEHELE, nu grotere, RUIMTE VAN HET VAT.

Conclusie: Hoe hevig men de stof boven de kritische temperatuur ook samenperst, ZE WORDT NIET MEER VLOEIBAAR.

Vraag: Hoe komt dat?

Antwoord: Boven de kritische temperatuur hebben de moleculen van de stof VAN HUN EIGEN zoveel bewegingsenergie DAT DE COHAESIE KRACHTEN TUSSEN DE MOLECULEN NIET MEER TOEREIKEND ZIJN OM DE MOLECULEN BINNEN ELKAARS "WERELD" (attractie-sfeer) TE HOUDEN.

BOVEN de kritische temperatuur KUNNEN DE MOLECULEN VAN DE STOF DUS GEEN SAMENHANG MEER HEBBEN.

Vraag:

Vraag: ONDER de kritische temperatuur kan de stof in de damptoestand voorkomen. Maar de moleculen van een damp hebben toch ook GEEN SAMENHANG. Waarin verschilt deze damptoestand dan van de toestand BOVEN de kritische temperatuur?

Antwoord: Inderdaad hebben de moleculen van een damp geen samenhang; ze doorkruisen de gehele, willekeurig grote ruimte die aan de damp geboden wordt. MAAR, als men een onverzadigde damp voldoende samenperst wordt deze geheel vloeibaar, en er is een verdampingsproces nodig om de moleculen dan weer uit elkaar te krijgen. Het verschil met de toestand BOVEN de kritische temperatuur bestaat dus in het KUNNEN HEBBEN van samenhang: BOVEN de kritische temperatuur KUNNEN de moleculen van de stof GEEN SAMENHANG MEER HEBBEN.

Vraag: Waar slaat de term 'kritische' in kritische temperatuur dus op?

Antwoord: Op het al dan niet KUNNEN HEBBEN van samenhang: BOVEN de kritische temperatuur KUNNEN de moleculen van een stof GEEN SAMENHANG MEER HEBBEN; ONDER de kritische temperatuur kunnen de moleculen dat WEL, want de stof kan dan vloeibaar zijn en zelfs vast.

Conclusie:

BOVEN:	{	De stof verkeert in een damptoestand waarin de moleculen GEEN SAMENHANG MEER <u>KUNNEN</u> HEBBEN.
← KRITISCHE TEMPERATUUR.		
ONDER:	{	De moleculen kunnen WEL samenhang hebben. De stof kan zijn: dampvormig en/of vloeibaar en/of vast.

Vraag: Hoe luidt de definitie van de kritische temperatuur van een stof?

Antwoord:

Definitie: Onder de kritische temperatuur van een stof verstaat men de temperatuur WAAR ONDER men moet zijn om een damp van die stof door samenpersing vloeibaar te kunnen maken.

Vraag: Hoe noemt men de damptoestand waarin de stof BOVEN haar kritische temperatuur verkeert?

Antwoord: Die toestand noemt men DE GASTOESTAND.

Een GAS is dus een damp BOVEN HAAR KRITISCHE TEMPERATUUR.

Vraag: In de natuur komen stoffen voor die men in het dagelijkse leven alleen maar als gassen kent b.v. zuurstof en stikstof. Hebben deze stoffen dan ook een kritische temperatuur?

Antwoord: Inderdaad hebben deze stoffen ook ieder een kritische temperatuur, maar deze liggen ver beneden 0°C., zò ver, dat men vroeger dacht dat deze stoffen geen kritische temperatuur hadden. Men sprak toen van PERMANENTE GASSEN. Daartoe behoorden: zuurstof, stikstof, waterstof en helium.

Hier volgt een tabel van de kritische temperaturen van deze 'permanente' gassen:

Stof	Krit.temp.
zuurstof	-118,82 °C.
stikstof	-147,13 °C.
waterstof	-239,91 °C.
helium	-267,84 °C.

Helium heeft van alle in de natuur voorkomende stoffen de laagste kritische temperatuur (-267,84 ≈ 5°K.)

Vraag: Hebben ALLE stoffen een kritische temperatuur?

Antwoord: Alle stoffen DIE IN DAMPVORM KUNNEN VOORKOMEN hebben een kritische temperatuur die echter voor iedere stof een andere waarde heeft; van de "permanente" gassen ligt de kritische temperatuur ver onder 0°C .; er zijn echter ook stoffen waarvan de kritische temperatuur ver BOVEN 0°C . ligt.

Tabel	
stof	krit. temp.
koolzuur	+ 30,9 $^{\circ}\text{C}$.
ether	+ 194 $^{\circ}\text{C}$.
alcohol	+ 243 $^{\circ}\text{C}$.
water	+ 374,2 $^{\circ}\text{C}$.
kwik	+ 1470 $^{\circ}\text{C}$.

Vraag: Waar hangt het eigenlijk vanaf of een stof een hoge of een lage kritische temperatuur heeft?

Antwoord: Van de cohaesiekrachten tussen de moleculen: Zijn de COHAESIE-krachten tussen de moleculen GROOT, dan heeft de stof een HOGE kritische temperatuur; zijn de cohaesie-krachten KLEIN, dan heeft de stof een LAGE kritische temperatuur.

§ 2. Het vloeibaar maken van gassen.

Vraag: Wat moet men doen als men een hoeveelheid gas vloeibaar wil maken?

Antwoord: Twee dingen:

- 1 $^{\circ}$) Afkoelen tot beneden de kritische temperatuur,
- 2 $^{\circ}$) Samenpersen.

Vraag: Gaat dit vloeibaar maken altijd even gemakkelijk?

Antwoord: Bij stoffen met een hoge kritische temperatuur gaat dit gemakkelijk; bij zuurstof, stikstof, waterstof en helium is dit zeer moeilijk. Bij deze stoffen krijgen we te maken met het grote natuurkundige probleem: hoe bereikt men temperaturen in de buurt van het absolute nulpunt?

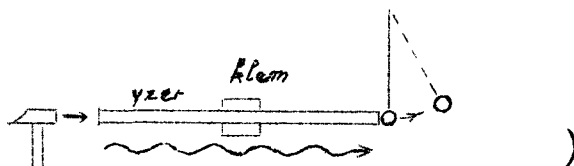
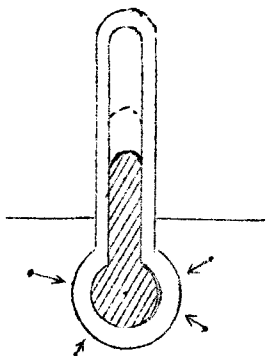
Deze kwestie zal in de tweede ronde uitvoerig behandeld worden.

HOOFDSTUK IX : WARMTELEER.DEEL I. TEMPERATUUR.§ 1. Het BEGRIP temperatuur.

Vraag 1) Verklaar, dat de kwikdraad in een kwikthermometer langer wordt als men de thermometer in een vloeistof steekt waarvan de moleculen gemiddeld MEER BEWEGINGSENERGIE hebben dan de moleculen van het kwik.

Antwoord: De moleculen van de vloeistof botsen tegen het glas van de thermometer. De glas moleculen geven de stoten door aan de kwikmoleculen.

(Dat een vaste stof inderdaad een stoot kan doorgeven, bewijzen we door de volgende proef:



De kwikmoleculen krijgen dus MEER BEWEGINGSENERGIE. Dit heeft tot gevolg, dat de kwikmoleculen een grotere bewegingsruimte voor zich gaan opeisen; het kwik in de thermometer zet dus uit en we zien de kwikdraad langer worden.

WE ZEGGEN NU, dat de vloeistof EEN HOGERE TEMPERATUUR HEEFT dan de kwikthermometer aanvankelijk had.

Vraag 2) Wanneer hebben twee lichamen DEZELFDE TEMPERATUUR?

NB.

Antwoord: Twee lichamen hebben dezelfde temperatuur als de moleculen van het ene lichaam GEMIDDELD DEZELFDE BEWEGINGSENERGIE HEBBEN als de moleculen van het andere lichaam.

Vraag 3) Wat IS temperatuur dus eigenlijk?

Antwoord: Temperatuur is een maatstaf voor de gemiddelde bewegingsenergie van de moleculen. Een lichaam heeft de temperatuur 0° C. als de moleculen van dat lichaam gemiddeld dezelfde bewegingsenergie hebben als de moleculen van normaal smeltend ijs; een lichaam heeft de temperatuur 100° C. als zijn moleculen gemiddeld dezelfde bewegingsenergie hebben als de moleculen van de damp van normaal kokend water.

Vraag 4) Wat wil zeggen: een lichaam stijgt 1° C. in temperatuur?

Antwoord: Dit wil zeggen dat de gemiddelde bewegingsenergie van de moleculen van het lichaam met een heel bepaald bedrag is toegenomen. Dit bedrag is het honderste deel van de gemiddelde ENERGIE TOENAME bij verwarming van 0° C. tot 100° C.

§ 2. Het meten van temperaturen.

Vraag 1) Geef een voorbeeld waaruit blijkt, dat ons geval NIET geschikt is voor het meten van temperaturen.

Vraag 2) Waardoor wordt het mogelijk om temperaturen te meten?

Antwoord: De natuur zorgt er voor, dat de stoffen OBJECTIEVE natuurkundige veranderingen ondergaan bij verandering van de temperatuur, dus veranderingen die geheel onafhankelijk zijn van het gevoel.

Kent men de formules van deze veranderingen, dan kan men uit deze veranderingen de temperatuur bepalen.

Voorbeelden: 1) lineaire uitzetting; formule
 $l_t = l_0 (1 + \alpha t)$

2) de spanningsvermeerdering van een gas bij verwarming onder constant volume; formule

$$P_I : P_{II} = T_I : T_{II}$$

In de loop van de cursus zullen we nog meer veranderingen leren kennen die karakteristiek zijn voor het veranderen van de temperatuur.

Vraag 3) Geef een overzicht van de thermometers die wij tot nu toe gehad hebben.

Antwoord: zie blz. 35.

DEEL II. WARMTE OP ZICH BESCHOUWD.

§ 1. Wezen en ontstaan van warmte.

Vraag 1) Wat IS warmte?

Antwoord: Warmte is bewegingsenergie van de moleculen.

Vraag 2) Noem enige processen waarbij warmte ontstaat.

Antwoord: 1°) Bij verbranding. (ENDOTHERM SCHEIK. proces)

2°) Bij wrijving. (Natuurk. proces)

3°) Bij samenpersing v.e. gas. (" ")

4°) Bij een elektrische stroom. (" ")

5°) Bij bestraling v.e. lichaam. (" ")

§ 2. TRANSPORT van warmte.

Vraag 1) Op welke manieren kan warmte van de ene plaats naar een andere getransporteerd worden?

Antwoord: 1°) door GELEIDING

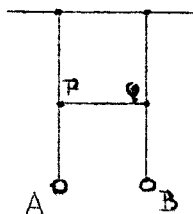
2°) door STROMING

3°) door STRALING.

Vraag 2a) Verklaar het warmtetransport door GELEIDING bij vaste stoffen.

Antwoord: We doen eerst drie proeven.

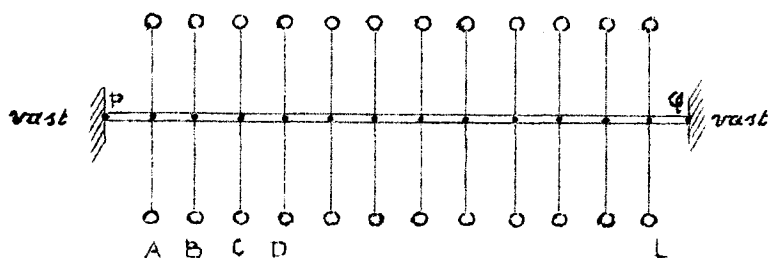
Proef I. Twee gekoppelde slingers.



We houden B (zie fig.) vast en brengen A aan het slingeren. Daarna laten we B los. We zien, dat A zijn "slinger-energie" geheel afstaat aan B; na enige tijd hangt A dus stil en is B aan het slingeren. Daarna geeft B zijn "slinger-energie" weer GEHEEL terug aan A, en begint het spel opnieuw. Dit blijft zo doorgaan totdat de energievoorraad t.g.v. de DEMPING is uitgeput.

Conclusie: De koppeling PQ bewerkstelligt, dat de "slinger-energie" die wij A gegeven hebben heen en weer "pendelt" tussen A en B.

Proef II. De torsie -draad.



Nevenstaande figuur geeft een BOVENAANZICHT van het toestel: Een strak gespannen metalen BAND PQ met "dwarsstaven" A, B, C enz. op onderling gelijke afstanden.

Deze dwarsstaven zijn in hun zwaartepunt aan de band PQ geklonken.

We houden B en C vast en brengen de dwarsstaaf A in trilling. Daarna laten we B en C tegelijk los.

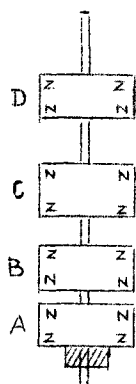
We zien dan DAT DE TRILLINGSENERGIE VAN A EERST GEHEEL WORDT DOORGEGEVEN AAN B, DAARNA GEHEEL AAN C, DAN AAN D, enz.

De metalen band PQ zorgt er dus voor, dat de trillingsENERGIE van A zich VERPLAATST langs de rij van de dwarsstaven: L stuurt deze energie weer terug in de rij.

Conclusie: Een koppeling (i.c. de metalen band) zorgt er voor dat trillingsenergie wordt doorgegeven.

Proef III. De "zweef-magneten".

A, B, C en D zijn ringvormige magneten om een verticale staaf van een niet magnetiseerbare stof.



De magneten A en B keren hun noordpolen naar elkaar toe; A en B stoten elkaar dus af. B en C stoten elkaar af omdat ze hun zuidpolen naar elkaar toekeren; C en D stoten elkaar af omdat ze hun noordpolen naar elkaar toekeren.

Kregen de magneten dus "hun zin" dan zou eerst D, dan C en dan B de lucht in vliegen; de zwaartekracht zorgt er echter voor dat ze boven elkaar blijven "zweven".

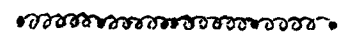
De magneten A, B, C en D zijn dus nu ook gekoppeld, maar door "onzichtbare" krachten. BRENGEN WE A NU IN TRILLING, DAN GAAN DE MAGNETEN B, C en D MEE TRILLEN. De energie voor deze trillingen moeten WIJ leveren!

Conclusie uit de proeven I, II en III.

Iedere koppeling, van welke aard dan ook, zorgt er voor dat trillingsenergie wordt DOORGEGEVEN.

→ Nu we deze proeven gezien hebben, kunnen we HET WARMTE-TRANSPORT DOOR GELEIDING bij vaste stoffen gemakkelijk verklaren.

Verklaring:

A B C D E
 enz.

De moleculen van een vaste stof zijn door onzichtbare elektrische krachten QUASI-ELASTISCH met elkaar verbonden, d.w.z. het is ALSOF de opvolgende moleculen

door veertjes verbonden zijn.

Wordt nu het molecuul A (zie fig.) in trilling gebracht, dan zorgt de quasi-elastische binding er voor, dat de trillingsENERGIE van A WORDT DOORGEGEVEN aan de opvol-

gende moleculen.

Welnu, dit DOORGEVEN van moleculaire trillingsenergie noemt men WARMTEGELEIDING of warmtetransport door geleiding.

Opmerking: Alle vaste stoffen geleiden de warmte, maar niet alle vaste stoffen geleiden de warmte even SNEL. Daarom spreekt men van GOEDE en SLECHTE warmtegeleiders. METALEN zijn in het algemeen GOEDE warmtegeleiders. Waarom dit zo is kunnen we nu nog niet verklaren.

Proef: Hou met de ene hand een koperstaaf en met de andere hand een even lange glazen staaf in dezelfde vlam. Welke staaf laat je het eerst los? Herhaal de proef met koper en ijzer.

Vraag 2b)

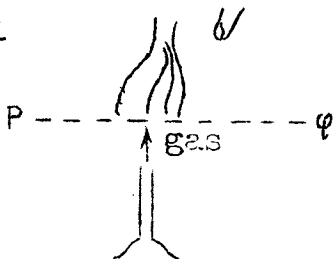


fig. 1

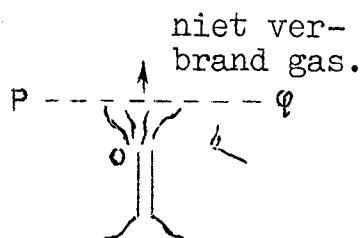


fig. 2.

Bij fig. 2) We houden een brandende lucifer ONDER PQ. Gevolg: ONDER PQ ontstaat een gasvlam die slechts reikt van O (zie fig.) TOT DE ONDERKANT VAN PQ; BOVEN PQ ontstaat GEEN VLAM.

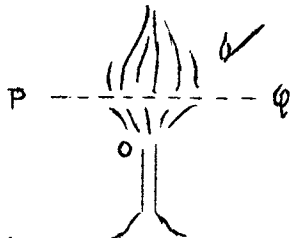


fig.3.

In nevenstaande figuren is PQ een z.g. KOPERGAASJE. Dit is een rechthoekig netwerk van dunne rechte koperdraden met kleine mazen. Onder het kopergaasje staat een gasbrander.

We sluiten de gasbrander aan op de gasleiding; het aardgas stroomt uit de brander naar boven en passeert ongehinderd de mazen van PQ.

We doen nu twee proeven:

Bij fig. 1) We houden een brandende lucifer BOVEN PQ. Gevolg: het gas BOVEN PQ BEGINT TE BRANDEN; het gas ONDER PQ NIET.

We sluiten de gastoevoer af en wachten tot het kopergaasje is afgekoeld. Daarna openen we de gaskraan weer.

Toch wordt het uit de brander stromende gas op zijn weg van O naar PQ NIET GEHEEL verbrand; het niet verbrande gas stroomt door de mazen van PQ omhoog. Houden we n.l. de brandende lucifer OOK BOVEN PQ (zie fig. 3) dan ontstaat BOVEN PQ OOK EEN GASVLAM.

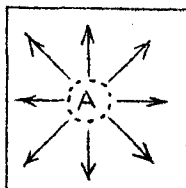
Conclusie uit de situaties van fig. 1 en fig. 2:

EEN GASVLAM KAN NIET DOOR DE MAZEN VAN EEN KOPERGAASJE HEEN DRINGEN.

→ De vraag luidt nu: verklaar dit.

Verklaring in delen:

- Zowel in de situatie van fig. 1 als in die van fig. 2 komt slechts een klein gedeelte van het kopergaasje in rechtstreeks contact met de gasvlam, al naar gelang de "middellijn" van de vlam. Er wordt dus ook slechts een klein oppervlak van het gaasje b.v. de cirkel A (zie fig.) RECHTSTREEKS door de vlam verhit.
- Nu is koper een ZEER GOEDE WARMTEGELEIDER. De aan A toegevoerde warmte WORDT DUS ZEER SNEL OVER HET GEHELE OPPERVLAK VAN HET GAASJE VERDEELD. Het aldus in zijn geheel verwarmde gaasje staat zijn verkregen warmte in een gestadig tempo af aan de omringende "koude" lucht.
- Mits de vlam niet TE HEET is, heeft dit tot gevolg, DAT DE TEMPERATUUR VAN HET KOPERGAASJE LAGER BLIJFT DAN DE

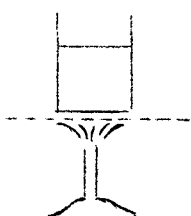


ONTSTEKINGSTEMPERATUUR VAN AARDGAS (d.i. de temperatuur die het gas minstens moet hebben om te kunnen branden.) HET KOPERGAASJE WORDT DAN DUS NIET HEET GENOEG OM HET GAS AAN DE ANDERE KANT VAN HET GAASJE TE ONTSTEKEN.

- d) Bij een zeer hete vlam krijgt A per sec. meer warmte dan er door de koperdraden per seconde kan afgevoerd worden. In dat geval gaat A na korte tijd gloeien en bereikt dan een temperatuur die HOGER is dan de ontstekings temperatuur van het gas; het gas aan de andere kant van het gaasje begint dan dus ook te branden.

Vraag 2c) Wanneer en om welke reden gebruikt men in de praktijk een kopergaasje?

Antwoord: Als men een glazen vat gevuld met een of andere stof wil verwarmen boven een gasvlam. Dank zij de warmte-geleidende werking van het kopergaasje wordt het glazen vat dan GELIJKMATIG verwarmd, zodat de kans op "springen" tot een minimum wordt beperkt. ZONDER kopergaasje zou het glas NIET GELIJKMATIG door de vlam verwarmd worden zodat de kans groot is dat het glas zal springen.



Vraag 2d) Wat valt er in verband met de warmtegeleiding te zeggen van VLOEISTOFFEN?

Antwoord: Vloeistoffen zijn slechte warmtegeleiders. Voor water kunnen we dit als volgt aantonen: We vullen een reageerbuisje met water en laten daarin een met ijzerdraad verzwaard stuk ijs zinken. (Ijs drijft op water!) We houden nu het bovenste gedeelte van de waterkolom in een gasvlam (zie fig.) Na korte tijd begint het water BOVEN in het buisje te KOKEN, ZONDER DAT HET IJS OP DE BODEM SMELT.



Nog een ander feit: Kwik wordt bij -39°C . vast. Het warmte geleidend vermogen van kwik in vloeibare toestand bij -39°C . is slechts $\frac{1}{3}$ deel van het warmtegeleidend vermogen van VAST kwik van -39°C .

Conclusie: In vloeibare toestand hebben de stoffen een veel kleiner warmtegeleidend vermogen dan in vaste toestand.

Vraag 2e) Wat valt er in dit verband te zeggen over GASSEN?

Antwoord: Het warmtegeleidend vermogen van alle gassen is KLEINER dan dat van vloeistoffen. Gassen zijn dus SLECHTE WARMTEGELEIDERS.

Van normale LUCHT is het warmtegeleidend vermogen $\frac{3}{100}$ deel van dat van water;

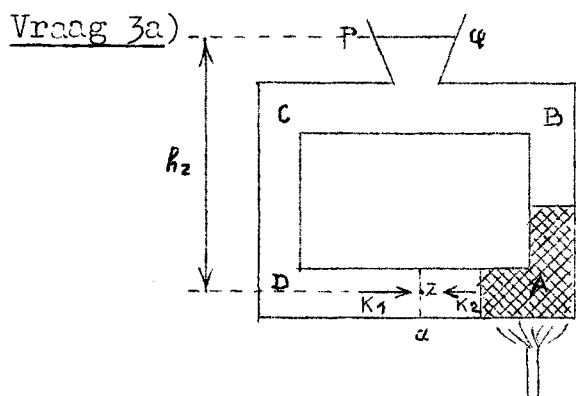
van normale WATERSTOF is het warmtegeleidend vermogen $\frac{21}{100}$ deel van dat van water.

Niet alle gassen zijn dus EVEN slechte warmtegeleiders; van alle gassen is WATERSTOF de beste warmtegeleider.

Vraag 2f) Waarom is een "grof gebreide" wollen trui lekker warm?

Zelf beantwoorden.

Vraag 3a) blz. 110



Gegeven een rechthoekig gebogen glazen buis van nevenstaand model, gevuld met water van de kamertemperatuur. Het hoekpunt A is omwikkeld met koperdraad. Het is n.l. de bedoeling dat het hoekpunt A aanstonds door een gasvlam verwarmd wordt. Het warmte-geleidende koper moet er dan voor zorgen dat het glas van de buis GELIJKMATIG verwarmd wordt.

Gevraagd: a) Verklaar dat het water in de rechthoekige buis in de richting A → B → C → D → A gaat stromen zodra de gasvlam onder het hoekpunt A geplaatst wordt.

Antwoord: De temperatuur van het water in de buis is hoger dan 4°C . Bij verwarming boven 4°C neemt het soortelijk gewicht van water af. Bij A wordt het soortelijk gewicht van het water dus kleiner dan bij B, kleiner dan bij C en kleiner dan bij D. We beschouwen nu het vlakje a in de vloeistof (zie fig.) dat z tot zwaartepunt heeft. Uit de hydrostatica weten we dat:

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \rho_a \times h_z \times S_{\text{water links van a}} \\ K_2 &= \rho_a \times h_z \times S_{\text{water rechts van a}} \\ S_{\text{water links van a}} &> S_{\text{water rechts van a}} \end{aligned} \right\} K_1 > K_2$$

Het vlakje a kan dus ONMOGELIJK IN RUST zijn; het wordt NAAR RECHTS gedreven. Dientengevolge kan het water in de buis ABCDA ook niet in rust blijven, maar moet gaan bewegen in de richting A → B → C → D → A.

Gevraagd: b) Het bij A verwarmde water stijgt dus omhoog van A naar B. Behoudt dit water die hogere temperatuur?

Antwoord: Al stromende komt dit water bij B in contact met de koudere glaswand van de buis EN GEEFT DUS EEN GEDEELTE VAN DE BIJ A VERKREGEN WARMTE AF AAN DE GLASWAND B; verder stromende geeft het een ander gedeelte van de bij A verkregen warmte af aan de glaswand bij C, enz.

Conclusie: Al stromende geeft het bij A verwarmde water de van de vlam ontvangen warmte af aan de achtereenvolgende delen van de buis. Daarbij koelt het zelf af, maar worden de achtereenvolgende delen van de buis verwarmd.

Gevraagd: c) Wat doet het door de buis stromende water dus eigenlijk?

Antwoord: Het transporteert de van de vlam ontvangen warmte naar de achtereenvolgende delen van de glaswand van de buis.

Gevraagd: d) Hoe noemt men dit warmtetransport?

Antwoord: Warmtetransport DOOR STROMING.

Gevraagd: e) Wat is het wezenlijke van het warmtetransport door stroming?

Antwoord: Dat een verwarmde stof zich eerst van een warmere naar een koudere omgeving begeeft en dan aan die koudere omgeving warmte afstaat.

Vraag 3b) Waarin bestaat precies gezegd het verschil tussen het warmte-transport door geleiding en het warmte-transport door stroming?

Antwoord: Bij het warmte-transport DOOR GELEIDING wordt de warmte-energie VAN MOLECUUL TOT MOLECUUL DOORGEGEVEN;

Bij het warmte-transport DOOR STROMING begeben een groep energierijke moleculen zich EERST VAN EEN WARMERE OMGEVING NAAR EEN KOUDERE OMGEVING en staan DAARNA energie af aan de moleculen van de koudere omgeving.

Vraag 3c) Noem een technische toepassing van het warmtetransport door stroming.

Antwoord: De centrale verwarming.

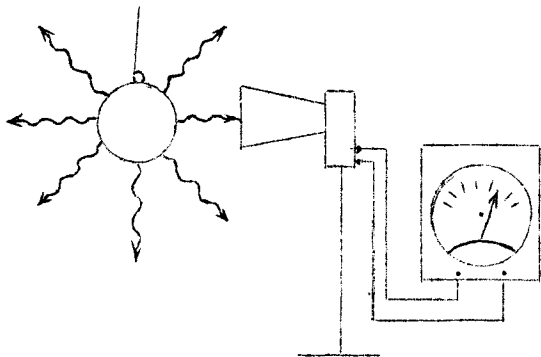
Vraag 4a) Bewijs door een proef, dat een verwarmd lichaam OOK ALS HET NIET GLOEIT, EEN STRALING UITZENDT.

Antwoord:

Inleiding tot de proef. Bij de proef zullen we een z.g. THERMO-ELEMENT gebruiken. Dit is een apparaat dat licht stralen kan opvangen EN DE ENERGIE VAN HET OPGEVANGEN LICHT OMZET IN ELECTRISCHE ENERGIE.

Houden we een brandende gloeilamp voor de "ontvanger" van dit apparaat dan wijst een, met het apparaat verbonden ampère-meter een stroom aan.

De proef:



We verwarmen een metalen bolletje in een gasvlam, maar zo DAT HET BOLLETJE NIET GLOEIT.

Houden we het aldus verwarmde bolletje voor de ontvanger van een thermo-element dat in serie geschakeld is met een gevoelige ampèremeter, dan zien we de ampèremeter een stroom aanwijzen.

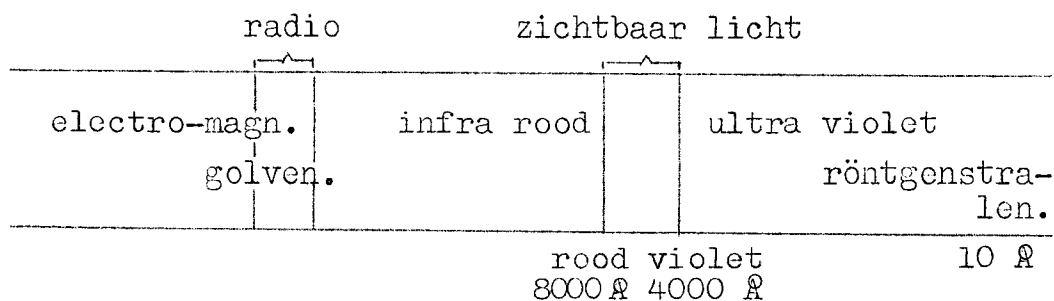
Conclusie: Van het verwarmde metalen bolletje gaat een (voor het menselijk oog onzichtbare) straling uit.

Vraag 4b) (Tegenwerping) Kan bovenstaand verschijnsel niet "gewoon" verklaard worden door aan te nemen dat de lucht optreedt als warmtegeleider?

Antwoord: Nee! Daarvoor hebben we drie degelijke argumenten:

- 1°) Lucht is een zeer slechte warmtegeleider. Werd bovenstaand effect veroorzaakt door een warmtegeleiding door de lucht, dan moest de ampèremeter slechts TRAAG reageren op een AFSTANDSVERANDERING van het bolletje tot de ontvanger van het thermoelement. Het tegendeel is waar: bewegen we het verwarmde bolletje naar de ontvanger toe, dan wordt de uitslag van de ampèremeter ONMIDDELLIJK groter. Bij bovenstaande proef speelt de warmte-geleiding door de lucht DUS GEEN ROL.
- 2°) Herhaalt men bovenstaande proef in een VACUUMruimte, dan is het effect, bij overigens gelijke omstandigheden, GROTER. De lucht speelt bij bovenstaande proef dus eigenlijk alleen maar een STORENDE rol! Hieruit blijkt duidelijk, dat we bij bovenstaande proef te doen hebben met een warmte (- energie)-transport dat niets te maken heeft met geleiding of stroming.

- 3^o) In de 2^o ronde zullen we zien, dat men DE GOLF-LENGTTEN van de door het verwarmde bolletje uitgezonden stralen KAN METEN.
Voor de volledigheid vermelden we het resultaat.
(1 Å = 10⁻¹⁰ m.)



de door het bolletje uitgezonden stralen.

Conclusie: Het verwarmde metalen bolletje zendt een voor het oog onzichtbare electro-magnetische straling uit.

Vraag 4c) Waardoor wordt deze straling veroorzaakt?

Antwoord: Door de warmtebeweging van de electrisch geladen deeltjes waaruit de stof is opgebouwd.

NB. Van de warmte (= energie) die bij de verwarming aan het bolletje werd toegevoerd WORDT DUS EEN GEDEELTE OMGEZET IN ELECTROMAGNETISCHE STRALINGSENERGIE.

Omdat deze straling samenhangt met de temperatuur van het bolletje, noemt men deze straling TEMPERATUURSTRALING (ook wel WARMTESTRALING).

In de tweede rond zullen we hier uitvoerig op terug komen.

Vraag 4d) De gang van zaken is dus als volgt: We hebben een metalen bolletje verwarmd. Tengevolge van de daardoor veroorzaakte warmtebeweging van de electrisch geladen deeltjes in het metaal, gaat er van het bolletje een voor het oog niet waarneembare electromagnetische straling uit. Deze straling noemt men temperatuurstraling. Deze (temperatuur)stralen planten zich in de ruimte buiten het bolletje voort en wel op dezelfde wijze als lichtstralen of radiogolven dat doen.

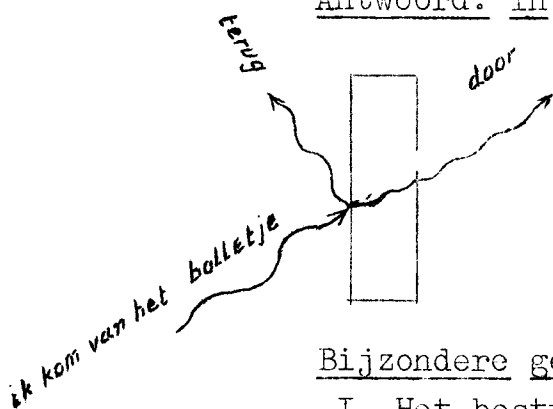
Gevraagd: Wat gebeurt er IN HET ALGEMEEN als deze stralen een ander lichaam treffen? Wat in bijzondere gevallen?

Antwoord: In het algemeen zal er dan met een "warmtestraal" hetzelfde gebeuren als er zou gebeuren met een lichtstraal, d.w.z.;

- 1^o) een gedeelte wordt teruggekaatst,
- 2^o) een gedeelte van de stralingsenergie wordt door het bestraalde lichaam GEABSORBEERD en omgezet in warmte of een andere energiesoort,
- 3^o) de rest wordt doorgelaten.

Bijzondere gevallen:

- I. Het bestraalde oppervlak is EEN VOLKOMEN GLAD METAAL OPPERVLAK. (b.v. een kwik oppervlak).
In dit geval KAATST HET BESTRAALDE OPPERVLAK DE TEMPERATUURSTRALEN (VRIJWEL) VOLLEDIG TERUG.

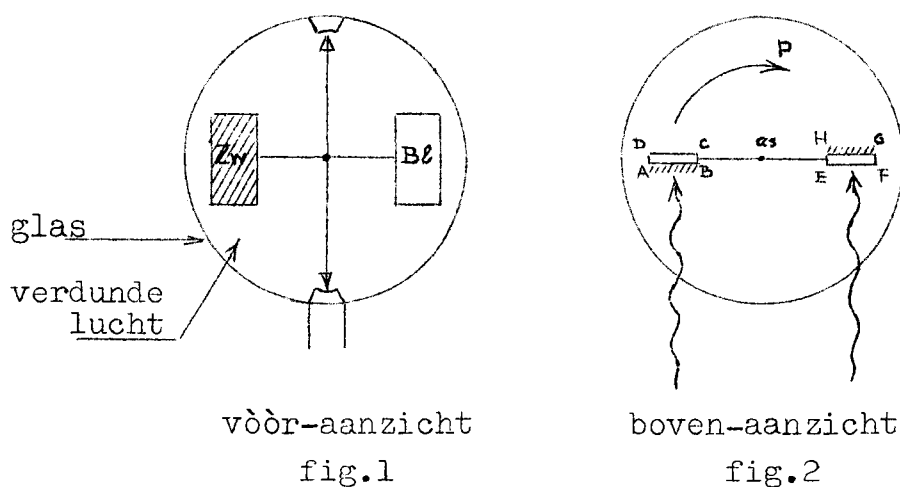


II. Het bestraalde oppervlak is DOF ZWART.

In dit geval WORDEN DE TEMPERATUUR-STRALEN (vrijwel) GEHEEL GEABSORBEERD, en wordt de energie van deze stralen vrijwel geheel OMGEZET IN WARMTE.

Vraag 4e) Verklaar de werking van de RADIOMETER.

Antwoord:

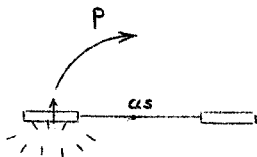


De oppervlakken AB en GH zijn DOF-ZWART (met roet bedekt); DC en EF zijn blinkende metaaloppervlakken.

Wat wij doen: We bestralen de oppervlakken AB en EF tegelijk met licht- of warmtestralen (zie fig.2)

Dit heeft tot gevolg, dat het "molentje" gaat draaien in de richting die door de pijl p in fig. 2 wordt aangewezen.

Verklaring: Het roet op AB absorbeert de opvallende stralen en zet de energie daarvan om in warmte, zodat de temperatuur van deze roetlaag stijgt. DE AAN DEZE ROETLAAG RAKENDE LUCHTLAAG WORDT DUS OOK VERWARMD EN ZET DIEN TENGEVOLGE IN ALLE RICHTINGEN UIT. Daardoor krijgt "de wiek" AB een stoot in de richting van de pijl p.



Het blinkende metaal oppervlak EF kaatst de opvallende stralen zonder meer terug. Het oppervlak EF wordt dus niet verwarmd, dus ook de luchtlaag niet die aan EF raakt. Bij EF gebeurt dus niets bijzonders.

Van het molentje AB-EF krijgt dus alleen de wiek AB een stoot: HET MOLENTJE GAAT DUS DRAAIEN IN DE RICHTING VAN DE PIJL p.

Opmerkingen: 1) Is EF een niet blinkend metaal-oppervlak, maar b.v. bedekt met een verfstof, dan draait het molentje toch in de richting van de pijl p. Hieruit volgt, DAT EEN DOF ZWART OPPERVLAEK MEER STRALINGSENERGIE ABSORBEERT DAN WELK ANDER OPPERVLAEK DAN OOK.

2) De wand van de radiometer is van glas. Uit het feit dat het molentje desondanks draait, blijkt, dat glas zowel lichtstralen als warmtestralen doorlaat.

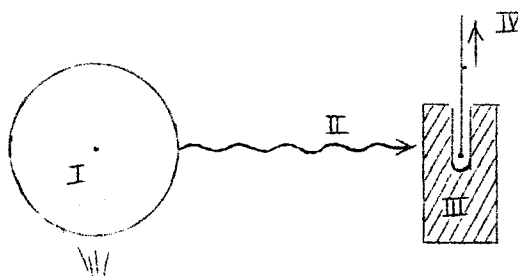
Vraag 4f) Waarom is de werking van de radiometer voor ons van belang?

Antwoord: De werking van de radiometer maakt het voor ons zeker **DAT EEN LICHAAM WARMTESTRALIEN KAN ABSORBEREN EN DE ENERGIE DAARVAN KAN TERUG- OMZETTEN IN WARMTE.**

Vraag 4g) Geef een schematisch overzicht van de natuurkundige gebeurtenissen die in de vragen 4 a,b,c,d,e,f zijn besproken.

Ga aan de hand van dit overzicht na of er bij deze gebeurtenissen kan gesproken worden van WARMTE-TRANSPORT.

Antwoord:



ad I. Een metalen bolletje werd verwarmd.

ad II. t.g.v. de daardoor ontstane warmtebeweging van de electrisch geladen deeltjes in het metaal gaat van het bolletje een voor het oog onzichtbare straling uit die zich in de ruimte buiten het bolletje voortplant op dezelfde wijze als radio- of lichtgolven dat zouden doen als ze van het bolletje waren uitgegaan.

ad III. Een lichaam op enige afstand van het bolletje wordt getroffen door de van het bolletje uitgaande straling.

ad IV. Het lichaam zal tenminste een gedeelte van de opvallende stralen absorberen en de energie daarvan omzetten in warmte.

Is hierbij sprake van warmte-transport?

De warmte-energie die het lichaam III in temperatuur doet stijgen is van origine afkomstig van het verwarmde bolletje I: Deze warmte-energie had oorspronkelijk in I de vorm van warmte, kreeg toen de vorm van stralingsenergie II, "stak in deze gestalte over" van I naar III en werd door het lichaam III weer terug omgezet in warmte.

Hier is dus inderdaad sprake van warmtetransport.

Welnu: DIT warmtetransport noemt men **WARMTE-TRANSPORT DOOR STRALING.**

Vraag 4h) Wat is dus het wezenlijke van het warmte-transport door straling?

Antwoord: 1^o) Dat een verwarmd lichaam een gedeelte van de ontvangen warmte-energie omzet in stralingsenergie.

2^o) Dat die warmte-energie "in de vormomping van stralingsenergie" door de aether naar een ander lichaam wordt overgebracht.

3^o) Dat dit andere lichaam de ontvangen stralingsenergie terug-omzet in warmte.

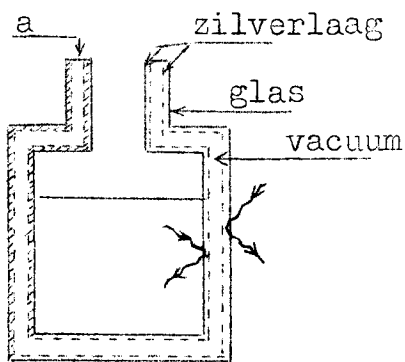
EINDCONCLUSIE OVER WARMTE TRANSPORT.

Er zijn DRIE manieren waarop warmte-energie van de ene plaats naar de andere kan getransporteerd worden:

- 1°) DOOR GELEIDING: de warmte-energie wordt van molecuul tot molecuul doorgegeven.
- 2°) DOOR STROMING: een hoeveelheid verwarmde stof beweegt in haar geheel naar een koudere plaats en staat daar warmte-energie af aan de moleculen uit haar nieuwe omgeving.
- 3°) DOOR STRALING: Warmte-energie wordt door de electrisch geladen deeltjes van een verwarmd lichaam omgezet in stralingsenergie, plant zich in deze gestalte in de ruimte voort tot ze een ander lichaam treft, en wordt door het getroffen lichaam terug-omgezet in warmte.

Vraag 5) Verklaar de warmte-isolerende werking van een vat van DEWAR (thermosfles)

Antwoord: Een Dewar-vat bestaat uit een dubbelwandig glazen vat. De ruimte tussen de twee glaswanden is HOOG-VACUUM. De naar het vacuum toegerichte binnen kanten van de wanden zijn beide "gevoerd" met een zilverlaag. Het vat wordt zonodig van boven afgesloten met een kurken stop. Stel, dat het vat gedeeltelijk gevuld is met een vloeistof waarvan de temperatuur hoger is dan de temperatuur van de omgeving. Kan deze vloeistof dan warmte afstaan aan de omgeving:



a) door geleiding?

Het gedeelte van de binnenwand dat in aanraking is met de hete vloeistof, heeft natuurlijk de hoge temperatuur van de vloeistof.

GLAS is een zeer slechte warmtegeleider: alleen op de lange duur zal er via het glas van de binnenwand warmte naar de buitenwand geleid worden.

ZILVER is een zeer GOEDE warmtegeleider: als de zilverlaag bij de rand a (zie fig.) niet onderbroken is moeten we op de koop toe nemen, dat deze zilverlaag een klein "warmte-lek" veroorzaakt. Toch moet deze zilverlaag er zijn om een groter lek te voorkomen (zie ben.)

HET VACUUM geleidt de warmte vanzelfsprekend NIET.

b) door stroming?

Omdat er niets beweegt kan er ook geen warmte-transport zijn door stroming.

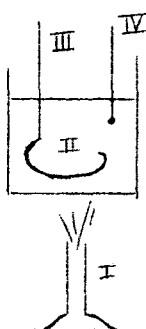
c) door straling?

De hoog-glanzende zilverlaag kaatst de warmtestralen terug.

Conclusie: De warme vloeistof in het vat van DEWAR zal op de lange duur haar warmte afstaan aan de omgeving; het warmte-transport PER SECONDE is echter, dank zij de verzilverde vacuummantel, tot een minimum teruggebracht.

DEEL III van HOOFDSTUK IX.C A L O R I M E T R I E.§ 1. Het begrip CALORIE.

We gaan nu spreken over HOE-VEEL-HEID warmte. Daartoe doen we twee gedachten-proeven, die beide betrekking hebben op een verwarming van WATER.

De opstelling:

I is een BUNSENBRANDER die iedere seconde DEZELFDE HOE-VEEL-HEID WARMTE aan de vloeistof geeft.

II is een hoeveelheid WATER.

III is een ROERDER; door voortdurend te roeren zorgen we er voor dat alle punten van de vloeistof dezelfde temperatuur hebben.

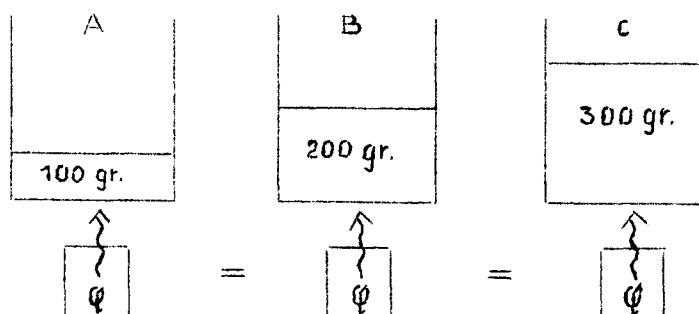
IV is een THERMOMETER.

Eerste proef: We verwarmen het water eerst EÉN minuut en bepalen de temperatuursstijging. Daarna laten we het water afkoelen tot de begintemperatuur. Dan verwarmen we het water TWEE minuten en bepalen weer de temperatuursstijging. We laten het water weer afkoelen tot de begintemperatuur en verwarmen het daarna DRIE minuten; enz.

RESULTAAT: We zien, dat de temperatuur van het water BIJ IEDERE GELIJKE PORTIE WARMTE MET HETZELFDE AANTAL GRADEN STIJGT.

CONCLUSIE: DE TEMPERATUURSTIJGING IS RECHT EVENREDIG MET DE HOEVEELHEID TOEGEVOERDE WARMTE.

Tweede proef:



We nemen drie hoeveelheden water, resp. 100, 200 en 300 gram, en voeren aan elk van deze hoeveelheden een EVEN GROTE WARMTE-PORTIE Q TOE. (De hoofdletter Q is in de warmteleer het symbool voor een hoeveelheid warmte).

RESULTAAT: Het blijkt, dat de temperatuur in A 2 x zoveel graden stijgt als in B en 3x zoveel graden als in C.

CONCLUSIE: Bij gelijke warmte-toevoer IS DE TEMPERATUURSTIJGING OMGEKEERD EVENREDIG MET DE HOEVEELHEID WATER.

CONCLUSIE UIT BOVENSTAANDE PROEVEN:

IEDERE GRAM WATER HEEFT
EEN HEEL BEPAALDE HOEVEELHEID WARMTE
NODIG OM
EEN GRAAD IN TEMPERATUUR TE STIJGEN.

Welnu, DEZE hoeveelheid warmte neemt men in de natuurkunde tot EENHEID VAN HOE-VEEL-HEID WARMTE.

Deze eenheid heet EEN CALORIE.

DEFINITIE:

EEN CALORIE
IS DE HOEVEELHEID WARMTE
DIE NODIG IS OM
É É N G R A M
W A T E R
É É N G R A A D
IN TEMPERATUUR TE DOEN STIJGEN

Vraag: Doet het is ter zake, waar deze graad ligt op de thermometer?

Antwoord: Volgens het bovenstaande NIET. Maar het bovenstaande is ingesteld op de practijk van het dagelijkse leven (waarin men niet veel acht slaat op "de cijfers achter de komma"). Wetenschappelijk nauwkeurige metingen wijzen echter uit, dat de hoeveelheid warmte-energie die nodig is om één gram water te verwarmen van b.v. $0^{\circ}\text{C} \rightarrow 1^{\circ}\text{C}$. NIET PRECIES gelijk is aan de hoeveelheid warmte nodig voor de verwarming van b.v. $77^{\circ} \rightarrow 78^{\circ}\text{C}$. In de tweede ronde zullen we een calorie als volgt definiëren: Een calorie is de hoeveelheid warmte die nodig is om een gram water TE VERWARMEN van $14,5^{\circ} \rightarrow 15,5^{\circ}\text{C}$. In de eerste ronde doen we echter alsof het niets ter zake doet waar deze graad ligt op de thermometer.

§ 2. Opgaven.

Opgave 1. Hoeveel calorieën zijn er nodig om 500 gram water te verwarmen van $30^{\circ} \rightarrow 50^{\circ}\text{C}$.

Oplossing: $Q = x \times 1 \text{ cal.} = 10000 \text{ cal.}$

Opgave 2. Aan 300 gram water voert men 1200 cal. toe.

Gevraagd: Hoeveel graden stijgt dit water in temperatuur?

Oplossing: $\Delta t = \text{————} = 4^{\circ}\text{C}$.

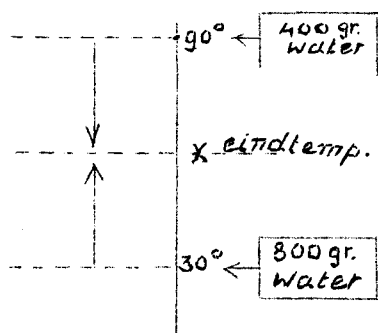
Opgave 3.

Zie blz. 118.

N.B. Opgave 3. Men MENGHT 800 gram water van 30° C. met 400 gram water van 90° C.

Gevraagd: De eindtemperatuur.

Oplossing:



Het water van 90° C. zal in temperatuur DALEN, het water van 30° C. zal in temperatuur STIJGEN, TOTDAT BEIDE HOEVEELHEDEN DEZELFDE TEMPERATUUR X GEKREGEN HEBBEN.

Daarbij zal het water van 90° dus caloriën afstaan aan het water van 30° C.

Omdat er, volgens de eerste hoofdwet der natuur, geen energie tot niets kan gaan en ook geen energie uit niets kan ontstaan, moet:

HET AANTAL OPGENOMEN CAL. = HET AANTAL AFGESTANE CAL.
 DOOR HET WATER VAN 30° DOOR HET WATER VAN 90°.

WARMTE BALANS

OPGENOMEN CAL.	AFGESTANE CAL.
1) <u>Wie neemt warmte op?</u> 800 gram water stijgen (X-30)° in temperatuur.	1) <u>Wie staat warmte af?</u> 400 gram water dalen (90-X)° in temperatuur.
2) <u>Hoeveel caloriën worden opgenomen?</u> 800 x (X-30) x 1 cal.	2) <u>Hoeveel caloriën worden afgestaan?</u> 400 x (90-X) x 1 cal.
O = A	
$800(X - 30).1 = 400(90 - X).1$	
$2X - 60 = 90 - X$	
$3X = 150$	
$X = 50$	

Conclusie: De eindtemperatuur is 50° C.

Opmerking: Met nadruk wijzen we op het belang van de warmtebalans; het oplossen van een calorimetrie-som is altijd een kwestie van het opstellen van een warmtebalans.

Warmte Balans.

Opgenomen cal.	Afgestane cal.
1) <u>Wie neemt warmte op?</u> -----	1) <u>Wie staat warmte af?</u> -----
2) <u>Hoeveel caloriën worden opgenomen?</u> -----	2) <u>Hoeveel caloriën worden afgestaan?</u> -----
O = A	

§ 3) De SOORTELIJKE WARMTE van een stof.

Voert men aan 100 gram WATER 1000 cal. toe, dan stijgt de temperatuur 10° C.; voert men aan 100 gram LOOD 1000 cal. toe, dan blijkt de temperatuur ongeveer 323° C. te stijgen.

Hieruit volgt:

1 gram LOOD heeft MINDER cal. nodig om èèn graad in temperatuur te stijgen dan 1 gram WATER.

Aldus heeft iedere stof haar eigen SOORTELIJKE WARMTE.

DEFINITIE: Onder de SOORTELIJKE WARMTE VAN EEN STOF verstaat men HET AANTAL CALORIEËN dat nodig is om EËN GRAM VAN DIE STOF EËN GRAAD in temperatuur te doen stijgen.

De soortelijke warmte van een stof wordt aangeduid door de kleine letter c.

Vraag: Wat wil zeggen: $c_{\text{lood}} = 0,031 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^{\circ}\text{C}}$?

Antwoord: dat we 0,031 cal. nodig hebben om èèn gram lood èèn graad te verwarmen

Vraag: Wat is de eenheid van soortelijke warmte?

Antwoord: De eenheid van soortelijke warmte is

$$1 \frac{\text{cal}}{\text{gram} \times ^{\circ}\text{C}}$$

(spreek uit: een cal. per gram per $^{\circ}$ C.)

Vraag: Van welke stof is $c = 1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^{\circ}\text{C}}$?

Antwoord: Van water.

TABEL			
Stof	Soortelijke warmte		
Alcohol	0,58	$\frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^{\circ}\text{C}}$	
Glas	0,19	"	
Koper	0,09	"	
Kwik	0,033	"	
Lood	0,031	"	
Zilver	0,055	"	
Ijzer	0,105	"	
Naftaline	{ VAST	0,3	"
	{ VLOEIBAAR	0,4	"
Paraffine	{ VAST	0,59	"
	{ VLOEIBAAR	0,64	"
Water	{ VAST	0,5	"
	{ VLOEIBAAR	1,000	"

Vragen over voorgaande tabel.

- a) Geef voor elke stof afzonderlijk de betekenis van de in de tweede kolom vermelde getallen.
- b) Hangt de soortelijke warmte van een stof af van de aggregatie-toestand waarin de stof verkeert?

antwoord: $c_{\text{vast}} < c_{\text{vloeibaar}}$

- c) Waarom staat in de tabel $c_{\text{water}} = 1,000 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$; wat betekenen die nullen?

Antwoord: In dit verband betekenen die nullen, dat de hoeveelheid warmte die nodig is om één gram water 1°C . te verwarmen PER DEFINITIE één calorie is. (exacter: om 1 gram water te verwarmen van $14,5^\circ \rightarrow 15,5^\circ\text{C}$.)

- d) De soortelijke warmten van de andere in deze tabel vermelde vaste stoffen en vloeistoffen zijn allemaal KLEINER

DAN $1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$

Is dit regel of toeval?

Antwoord: Dit is REGEL: WATER HEEFT VAN ALLE VASTE STOFFEN EN VLOELSTOFFEN DE GROOTSTE SOORTELIJKE WARMTE.

N.B. LET ER BIJ DE SOMMEN ALTIJD OP OF JE UITKOMST MOGELIJK IS!

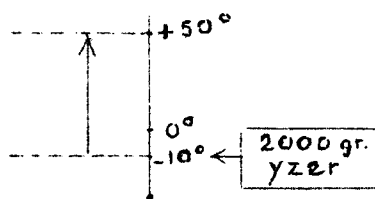
- e) Hebben GASSEN ook een soortelijke warmte?

Antwoord: Natuurlijk, maar bij gassen maakt het verschil of deze verwarmd worden ONDER CONSTANT VOLUME of ONDER CONSTANTE DRUK. In het laatste geval heeft het afgesloten gas extra warmte-energie nodig om de omgeving opzij te duwen om zich zo het grotere volume te verschaffen dat door de volumewet van Gay-Lussac wordt voorgeschreven. We komen hier in de tweede ronde uitvoerig op terug.

4. Opgaven.

- I. Hoeveel cal. zijn er nodig om 2 kg. ijzer te verwarmen van -10° tot $+50^\circ\text{C}$. ?

Oplossing:



Volgens de tabel is $c_{\text{ijzer}} = 0,105 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$

Dus:

$$Q = 2000 \times 0,105 \times 60 = 12600 \text{ cal.}$$

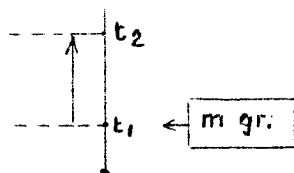
$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$\text{gram} \times \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C} = \text{cal.}$$

- II. Hoeveel cal. zijn er nodig om m gram van een stof met soortelijke warmte $c \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$ te verwarmen van t_1 naar t_2 $^\circ\text{C}$.?

N.B. Oplossing:

N.B.



N.B.

$$Q = m \times c \times (t_2 - t_1) \text{ cal.}$$

$$\downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow$$

$$\text{gram} \times \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}} \times ^\circ\text{C} = \text{cal.}$$

§ 5. DE WARMTE CAPACITEIT VAN EEN LICHAAM.

Eerst een paar getallenvoorbeelden om duidelijk te maken waar het om gaat.

1) Gegeven: Een stuk ijzer weegt 400 gram.

Gevraagd: Hoeveel cal. zijn er nodig om dit STUK IJZER èèn graad te verwarmen?

$$\text{Oplossing: } Q_{\text{per } 0^{\circ}\text{C}} = 400 \times 0,105 = 42 \frac{\text{cal}}{0^{\circ}\text{C}}$$

$$\downarrow \qquad \qquad \downarrow$$

$$\text{gram} \times \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times 0^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{cal}}{0^{\circ}\text{C}}$$

Conclusie: Dit STUK ijzer heeft dus PER GRAAD verwarming 42 cal. nodig.

2) Gegeven: Een koperen bakje weegt 500 gram. $c_{\text{koper}} = 0,09 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times 0^{\circ}\text{C}}$

Gevraagd: Hoeveel cal. zijn er nodig om DIT BAKJE IN ZIJN GEHEEL 1°C . te verwarmen?

$$\text{Oplossing: } Q_{\text{per } 0^{\circ}\text{C}} = 500 \times 0,09 = 45 \frac{\text{cal}}{0^{\circ}\text{C}}$$

$$\downarrow \qquad \qquad \downarrow$$

$$\text{gram} \times \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times 0^{\circ}\text{C}} = \frac{\text{cal}}{0^{\circ}\text{C}}$$

Conclusie: DIT LICHAAM (een koperen bakje) heeft dus PER GRAAD verwarming 45 cal. nodig.

3) Gegeven: Een stoel bestaat uit 5000 gram ijzer. ($c = 0,105 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times 0^{\circ}\text{C}}$) en 700 gram hout ($c = 0,6 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times 0^{\circ}\text{C}}$)

Gevraagd: Hoeveel cal. heeft DIT LICHAAM (de stoel in zijn geheel) nodig PER GRAAD verwarming?

$$\text{Oplossing: } Q_{\text{per } 0^{\circ}\text{C}} = 5000 \times 0,105 + 700 \times 0,6 = 945 \frac{\text{cal}}{0^{\circ}\text{C}}$$

Conclusie: DIT LICHAAM heeft PER GRAAD verwarming 945 cal. nodig.

Aldus kunnen we voor ieder lichaam uitrekenen hoeveel cal. dit IN ZIJN GEHEEL nodig heeft PER GRAAD verwarming. Deze uitkomst geven we een naam: de warmtecapaciteit van het lichaam.

Definitie: Onder DE WARMTE CAPACITEIT VAN EEN LICHAAM verstaat men HET AANTAL CALORIEËN dat HET LICHAAM IN ZIJN GEHEEL nodig heeft PER GRAAD VERWARMING.

Vraag: Wat is de eenheid van warmtecapaciteit?

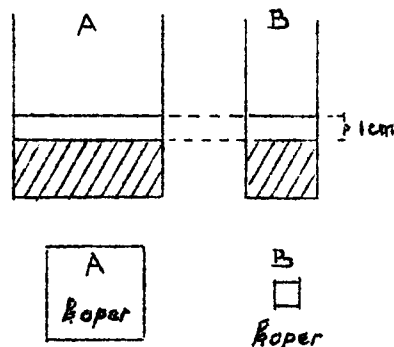
Antwoord: De eenheid van warmtecapaciteit is $1 \frac{\text{cal}}{0^{\circ}\text{C}}$

Vraag: Wat wil zeggen: een koperen bakje heeft een warmtecapaciteit van $45 \frac{\text{cal}}{0^{\circ}\text{C}}$?

Antwoord: Dat er 45 cal. nodig zijn om dit bakje èèn graad in temperatuur te doen stijgen.

Vraag: Wat betekent het woord capaciteit?

Antwoord: Het woord capaciteit is afgeleid van CAPAX = kunnende bevatten.



Vat A heeft meer vloeistof nodig dan vat B om het niveau met 1 cm. te doen stijgen: vat A heeft een grotere vloeistofcapaciteit dan vat B.

Het koperen lichaam A heeft meer cal. nodig dan het koperen lichaam B om de temperatuur met 1°C . te doen stijgen.

A heeft een grotere warmtecapaciteit dan B.

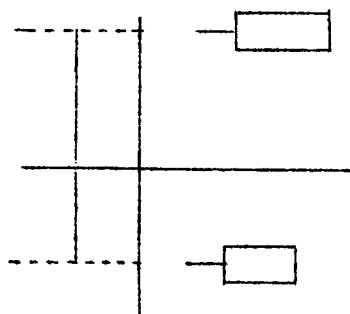
Opmerking: In oude boeken wordt in plaats van warmtecapaciteit het woord

WATERWAARDE gebruikt. In plaats van te zeggen; een bakje heeft een warmtecapaciteit van $45 \frac{\text{cal}}{^{\circ}\text{C}}$, zegt men dan; het bakje heeft een waterwaarde van 45 gram, d.w.z. dat het bakje PER GRAAD verwarming evenveel calorieën opneemt als 45 gram water opnemen per graad verwarming.

§ 6. De warmte-uitwisseling tussen twee lichamen.

Vraag: Hoe wordt de warmteuitwisseling tussen twee lichamen van verschillende temperatuur geregeld, als men deze lichamen met elkaar in aanraking brengt?

Antw.: Door TWEE wetten:



I. Het lichaam van de hoogste temperatuur zal warmte afstaan aan het lichaam van de laagste temperatuur TOTDAT BEIDE LICHAMEN DEZELFDE TEMPERATUUR GEKREGEN HEBBEN.

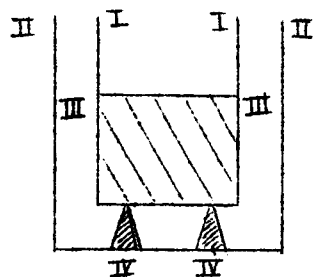
II. Het aantal opgenomen calorieën = het aantal afgestane calorieën, dus

$$Q = A.$$

§ 7. De CALORIMETER.

Vraag 1) Maak een eenvoudige tekening van een calorimeter.

Antwoord:



Nevenstaande figuur geeft een schematische tekening van een calorimeter in de eenvoudigste uitvoering.

→ II is een blinkend metalen bakje; de wand van II vormt de BUITENWAND van de calorimeter.

→ IV zijn twee kurken voetjes; kurk is een slechte warmte-geleider.

→ I is een eveneens blinkend metalen bakje meestal van koper, dat op de kurken voetjes rustend, binnen het vat II geplaatst is.

De wand van I vormt de BINNENWAND van de calorimeter.

Het bakje I wordt straks gevuld met een hoeveelheid water waarvan het gewicht bekend is en ook de temperatuur nadat het in I gebracht is.

In dit water brengt men dan een bekende gewichtshoeveelheid van een andere stof met een bekende ANDERE temperatuur als die van het water in I.

Daarom noemt men het bakje I HET MENG VAT van de calorimeter.

→ III is de ruimte tussen de binnen- en de buiten wand van de calorimeter. In de bovenstaande uitvoering is III gevuld met lucht; in een betere uitvoering is III opgevuld met watten (katoen) of wol, beiden zeer slechte warmtegeleiders. Waar het om gaat is, dat III een WARMTEISOLERENDE MANTEL tussen de wanden I en II vormt.

Vraag 2) Waarom moeten de wanden I en II blinken?

Antwoord: OM HET WARMTE-TRANSPORT DOOR STRALING van het inwendige van bakje I naar de omgeving of omgekeerd ONMOGELIJK TE MAKEN, althans tot een minimum te beperken.

Vraag 3) Waarvoor dient de warmteisolerende mantel III ?

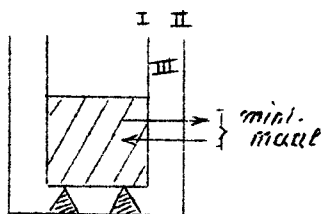
Antwoord: OM HET WARMTE-TRANSPORT DOOR GELEIDING tegen te gaan.

Vraag 4) Kan er via I, II en III WARMTE-TRANSPORT DOOR STROMING plaats hebben?

Antwoord: Nee, want er beweegt niets.

Vraag 5) Welke natuurkundige werking heeft het samenstel van de twee blinkende metalen wanden I en II met daartussen de isolerende mantel III dus voor de mengstoffen die zich in het mengvat I bevinden?

Antwoord:



Dit samenstel van de twee blinkende metalen wanden I en II met daartussen de isolerende mantel III werkt als EEN WAND, DIE HET WARMTE-TRANSPORT door geleiding, stroming en straling van de mengstoffen in I naar buiten of omgekeerd TOT EEN MINIMUM BEPERKT.

We kunnen dit samenstel I + II + III dus beschouwen als TOTALE WAND van het mengvat I, dus ook als de totale wand van de calorimeter.

Vraag 6) Wat is een calorimeter?

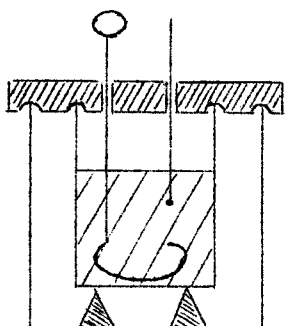
Antwoord: Een calorimeter is een mengvat waarvan de totale wand is samengesteld uit twee blinkende metalen wanden met daartussen een isolerende mantel.

Vraag 7) Wat is HET DOEL van een calorimeter?

Antwoord: Een calorimeter heeft tot doel een mengvat te zijn waarvan de totale wand "geen" warmte doorlaat, noch door geleiding, noch door straling, noch door stroming.

Vraag 8) Is een calorimeter in de boven getekende toestand gereed voor een mengproef?

Antwoord: Nee!



Op de eerste plaats moet de calorimeter van boven worden afgesloten. Het blijkt voldoende te zijn als dit geschiedt door een deksel van een warmte-isolerende stof, b.v. hout of bakeliet.

Op de tweede plaats moet er voor gezorgd worden dat men de temperatuur van de vloeistof in het mengvat kan bepalen. Daartoe is in het deksel een opening geboord waardoor een

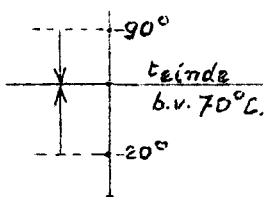
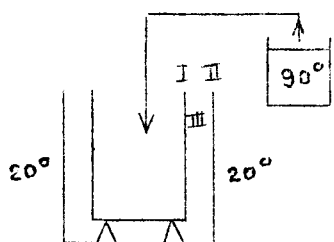
thermometer gestoken wordt waarvan het reservoir tot in de vloeistof reikt.

Op de derde plaats moet men er voor zorgen dat de vloeistof in het mengvat in ieder punt DEZELFDE TEMPERATUUR HEEFT, anders zou de thermometer niet DE MOMENTELE TEMPERATUUR van de mengstoffen aanwijzen. Daarom brengt men in het mengvat een ROERDER waarvan de steel door een tweede opening in het deksel naar buiten steekt. Door deze roerder op en neer te bewegen bereikt men twee dingen:

- 1°) dat de vloeistof in het mengvat momenteel in ieder punt dezelfde temperatuur heeft en,
- 2°) dat de mengproef in een sneller tempo verloopt. (Zie ben.)

§ 2. DE WARMTE-CAPACITEIT VAN EEN CALORIMETER.

Vraag 1)



Gegeven: Een lege calorimeter waarvan alle onderdelen de temperatuur 20°C . hebben.

In het mengvat giet men een hoeveelheid water van 90°C .

Gevr. a) BEHOUDT het water als het in de calorimeter gebracht is, de temperatuur 90°C . ?

Antwoord: Zodra het water in de calorimeter komt, komt het in onmiddellijk contact met de (metalen) binnenwand van de calorimeter.

Welnu, de temperatuur van binnenwand was, vòòr dat het water in het mengvat kwam, 20°C .

Gevolg: Zodra het water van 90°C zich in de calorimeter bevindt zal er een warmteuitwisselingsproces beginnen tussen dit water en de binnenwand I van de calorimeter, waarbij het water zoveel in temperatuur daalt en de binnenwand zoveel in temperatuur stijgt, TOT BEIDEN DEZELFDE TEMPERATUUR gekregen hebben, b.v. 70°C . Deze gezamenlijke temperatuur van het water en de binnenwand van de calorimeter, zullen we kortweg DE EINDTEMPERATUUR noemen.

Conclusie: Nadat het water van 90° in het mengvat van 20° gebracht is, zal het in temperatuur DALEN.

De reden daarvan is, DAT DE BINNENWAND VAN DE CALORIMETER WARMTE OPNEEMT VAN HET WARMERE WATER WAARMEE DEZE WAND IN ONMIDDELLIJK CONTACT STAAT

$$20^{\circ} < t_{\text{einde}} < 90^{\circ}$$

Vraag b) Als de binnenwand van glas geweest was, zou deze dan ook warmte hebben opgenomen van het water van 90°C . ?

Antwoord: Natuurlijk! Maar het zou langer geduurd hebben voordat zich het temperatuur-evenwicht tussen het water en de binnenwand had ingesteld.

Daarom geeft men de voorkeur aan een metalen binnenwand.

Vraag c) In het antwoord op vraag a) hebben we gezegd, dat het water van 90° in temperatuur moet dalen omdat de binnenwand van de calorimeter met zijn temp. 20°C . warmte moet opnemen van dit water.

Is deze beschouwing wel volledig; neemt de mantel III dan geen warmte op?

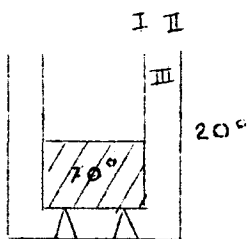
Antwoord: Bij het opstellen van de warmte-balans (zie sommen) zullen we veronderstellen DAT ER VAN DE WARMTE DIE DE BINNENWAND I OPNEEMT NIETS WORDT DOORGEGEVEN AAN DE MANTEL III OF AAN DE BUITENWAND II OF AAN DE OMGEVING.

In werkelijkheid gebeurt dit WEL. De uitkomst die de warmte-balans ons oplevert klopt dus niet met de werkelijkheid: In een DISCUSSIE zullen we dan vermelden of onze uitkomst te groot of te klein is.

We gaan hier bij de sommen verder op in.

Conclusie: Brengt men in een lege calorimeter waarvan alle onderdelen de temperatuur 20° C. hebben, water van een hogere temperatuur, DAN ZAL DE BINNENWAND VAN DE CALORIMETER WARMTE OPNEMEN; het in de calorimeter gebrachte water zal zolang in temperatuur DALEN en de binnenwand zal zolang in temperatuur stijgen TOT BEIDEN DEZEELFDE TEMPERATUUR GEKREGEN HEBBEN.

Bij het opstellen van de warmtebalans nemen we echter aan, dat de isolerende mantel III, de buitenwand II en de omgeving GEEN WARMTE OPNEMEN OF AFSTAAN; ze nemen dus ook niet deel aan de bepaling van de eindtemperatuur van het water in het mengvat.



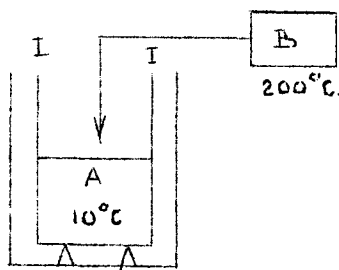
Vraag d) Welk onderdeel van de calorimeter neemt echter ALTIJD deel aan de bepaling van de eindtemperatuur van het water in het mengvat?

Antwoord: De BINNENWAND van de calorimeter.

Vraag e) Wat valt er dus te zeggen van de temperatuur van de binnenwand van de calorimeter als zich in het mengvat een hoeveelheid water bevindt?

Antwoord: VANAF HET OGENBLIK DAT ER TEMPERATUUR-EVENWICHT IS INGETREDEN tussen de binnenwand en het water in het mengvat, d.w.z. vanaf het ogenblik dat er geen warmte-uitwisseling meer plaats heeft tussen de binnenwand van de calorimeter en de vloeistofvulling IS DE TEMPERATUUR VAN DE BINNENWAND GELIJK AAN DE TEMPERATUUR VAN HET WATER IN HET MENG VAT.

Vraag f) In een calorimeter bevindt zich een hoeveelheid water A van 10° C. (in temperatuur-evenwicht met de binnenwand. Dit laatste zeggen we er voortaan niet meer bij.) We brengen in dit water een stuk ijzer B van 200° C.



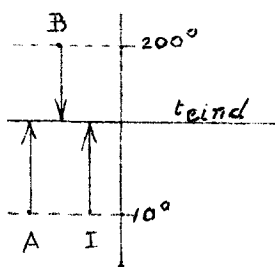
Gevr.: a) Wie staat bij deze "meng"-proef warmte af?

Antw.: Het ijzer zal in temperatuur DALEN en dus warmte afstaan.

Gevr.: b) Wie neemt bij deze proef warmte op?

Antw.: Het water A zal natuurlijk in temperatuur stijgen. WE MOGEN ECHTER NIET VERGETEN DAT HET WATER A IN ONMIDDELLIJK WARMTE-CONTACT STAAT MET DE BINNENWAND I VAN DE CALORIMETER:

ZODRA DE TEMPERATUUR VAN HET WATER A HOGER WORDT DAN DE BEGINTEMPERATUUR 10° C. ZAL DE BINNENWAND I WARMTE GAAN OPNEMEN VAN HET WATER A.



Bij deze mengproef zijn er dus TWEE dingen die warmte opnemen, n.l.:

N.B. 1°) het water A
2°) DE BINNENWAND VAN DE CALORIMETER.

Gevr.: λ) Het ijzer B staat dus warmte af, het water A en de binnenwand I nemen warmte op.
Hoe lang gaat dit warmte-uitwisselingsproces door?

Antw.: Dit warmte-uitwisselingsproces gaat door TOTDAT HET STUK IJZER B, HET WATER A EN DE BINNENWAND I DEZELFDE TEMPERATUUR GEKREGEN HEBBEN.
Dit ogenblik noemen we HET EINDE VAN DE PROEF; de dan heersende gezamenlijke temperatuur heet DE EINDTEMPERATUUR.

Bij deze mengproef daalt het stuk ijzer dus $(200 - t_{\text{eind}})$ °C. in temperatuur en stijgen het water A en de binnenwand I dus IEDER $(t_{\text{eind}} - 10)$ °C.

Deze mengproef DUURT VANAF het ogenblik dat het stuk ijzer B in het water komt TOT het ogenblik dat B, A en I eenzelfde temperatuur, de eindtemperatuur t_{eind} , bereikt hebben.

Vraag g) (ter verantwoording van de didactiek)

In bovenstaande vragen wordt "wijdlopig" gehandeld over de binnenwand I van de calorimeter. Waarom was dat nodig?

Antwoord: Dit was nodig om het goed tot ons te laten doordringen DAT DE BINNENWAND VAN DE CALORIMETER ALTIJD DEELNEEMT AAN HET WARMTE-UITWISSELINGSPROCES VAN DE MENGPROEF: ER MOET DUS OOK ALTIJD OP DE WARMTEBALANS VERMELD WORDEN HOEVEEL CALORIEËN DOOR DE BINNENWAND VAN DE CALORIMETER WORDEN OPGENOMEN OF AFGESTAAN.

N.B. Vraag h) Wat verstaat men onder DE WARMTECAPACITEIT VAN EEN CALORIMETER?

Antwoord: ONDER DE WARMTE-CAPACITEIT VAN EEN CALORIMETER verstaat men HET AANTAL CALORIEËN DAT PER GRAAD VERWARMING DOOR DE BINNENWAND VAN DE CALORIMETER WORDT OPGENOMEN.

N.B.

N.B.

Vraag i) Wat wil zeggen, de warmte-capaciteit van een calorimeter is $50 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$?

Antwoord: Dat de binnenwand van de calorimeter PER GRAAD verwarming 50 cal. opneemt.

Vraag j) Als de warmte-capaciteit van de calorimeter die bij de proef van vraag f gebruikt werd, $50 \frac{\text{cal}}{^\circ\text{C}}$ is, hoeveel cal. neemt "de calorimeter" dan op bij die mengproef?

Antwoord: $50 \times (t_{\text{einde}} - 10)$ cal.

Vraag 2) Bespreek een proef ter bepaling van de warmte-capaciteit van een calorimeter.

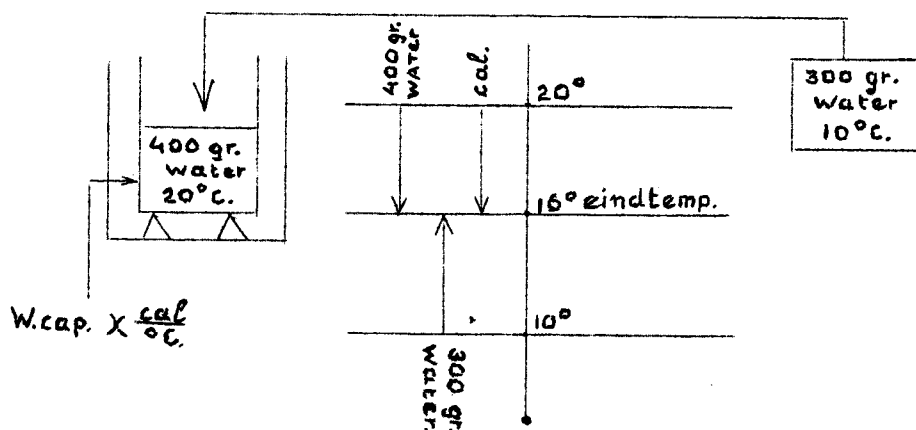
Antwoord (in de vorm van een som)

Gegeven: In een calorimeter bevindt zich 400 gram water van 20°C .

Men brengt er in 300 gram water van 10°C .
De eindtemperatuur is 16°C .

Gevraagd: De warmte-capaciteit van de calorimeter.

Oplossing: Stel, de warmte-capaciteit van de cal.m. is $x \frac{\text{cal}}{\text{C}}$



WARMTE-BALANS

O	A
1) <u>Wie neemt warmte op?</u> 300 gr. water stijgt 6°C .	1) <u>Wie staat warmte af?</u> a) 400 gr. water daalt 4°C . b) De calorimeter daalt 4°C .
2) <u>Hoeveel cal. worden opgenomen?</u> $x \quad x \quad 1 = 1800 \text{ cal.}$	2) <u>Hoeveel cal. worden afgestaan?</u> a) $x \quad x = 1600$ b) $x \quad X = 4X$
totaal $\underline{1800 \text{ cal.}}$	totaal $\underline{1600 + 4X}$
$0 = A$	
$1800 = 1600 + 4X$	
$200 = 4X$	
$X = 50$	

Conclusie: De warmte-capaciteit van de calorimeter is $50 \frac{\text{cal}}{\text{C}}$

Vraag 3) Bespreek een proef ter bepaling van de soortelijke warmte van koper.

Antwoord: (in de vorm van een som)

Gegeven: In een calorimeter (w.cap. = $60 \frac{\text{cal}}{\text{C}}$) bevindt zich 300 gram water van 10°C .

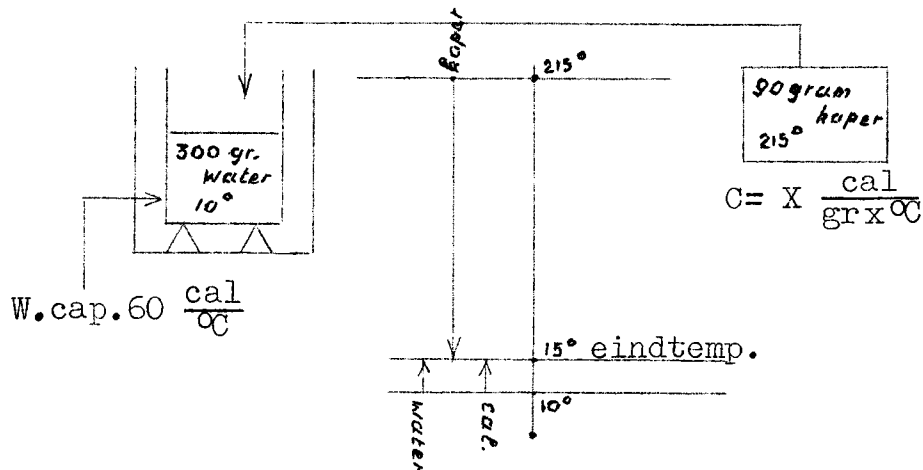
Men brengt in het water een stuk koper dat 90 gram weegt en een temperatuur heeft van 215°C .

De eindtemperatuur is 15°C .

Gevraagd: De soortelijke warmte van koper.

Oplossing:

Oplossing:



WARMTE - BALANS

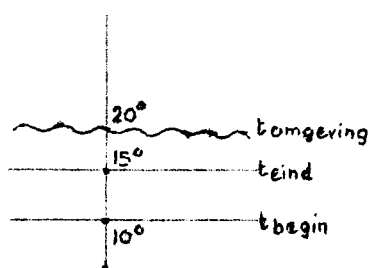
O	A
1) <u>Wie neemt warmte op?</u>	1) <u>Wie staat warmte af?</u>
a) 300 gr. water stijgt 5°C.	90 gr. koper daalt 200° C.
b) de cal. stijgt 5°C.	
2) <u>Hoeveel cal. worden opgenomen?</u>	2) <u>Hoeveel cal. worden afge- staan?</u>
a) 300 x x = 1500 cal.	90 x x = 18000X cal.
b) x = 300 cal.	
Totaal 1800 cal.	Totaal 18000X cal.
O = A	
1800 = 18000X	
X = 0,1	

Conclusie: $C_{\text{koper}} = 0,1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$

Discussie. Gegeven: De temperatuur van de omgeving is 20° C.

Vraag a: Bij het opstellen van de warmte-balans hebben we verondersteld, dat de totale wand van de calorimeter "ideaal warmte-proof" was. In werkelijkheid laat de wand altijd een beetje warmte door. Is er bij deze proef warmte door de wand gestroomd? Zo ja, in welke richting?

Antwoord:



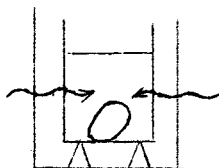
Op het ogenblik dat de proef begon was de temperatuur in het mengvat 10° C.; aan het einde van de proef (dus op het ogenblik dat het water, de binnenwand en het koper eenzelfde temperatuur gekregen hadden) was de temperatuur in het mengvat 15° C.

TIJDENS DE GEHELE PROEF IS DE TEMPERA- TUUR IN HET MENG VAT DUS LAGER DAN DE TEMPERATUUR VAN DE OMGEVING.

Conclusie:

Conclusie:

TIJDENS DE PROEF IS ER DOOR DE WAND WARMTE VAN BUITEN NAAR BINNEN GESTROOMD.



Vraag b: Op de warmte-balans staat, dat alleen het koper warmte afstaat, wie staat echter in werkelijkheid OOK nog warmte af aan het water en de binnenwand?

Antw.: De omgeving.

Vraag c: We weten niet hoeveel cal. er tijdens de proef door de wand naar binnen stromen. We stellen dit aantal Y. Hoe had de slotvergelijking van de balans dus moeten luiden? Wat volgt hieruit over de verkregen uitkomst $C_{\text{koper}} = 0,1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$?

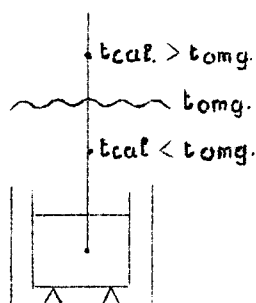
Antw.: De slotvergelijking had moeten luiden:
 $1800 = 18000 X + Y$

$$\text{Dus: } X = \frac{1800 - Y}{18000} = 0,1 - \frac{Y}{18000} \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$$

Hieruit volgt DAT DE VERKREGEN UITKOMST TE GROOT IS: de wetenschappelijke waarde van C_{koper} moet dus KLEINER zijn dan $0,1 \frac{\text{cal}}{\text{gr} \times ^\circ\text{C}}$

Vraag 4) Hoe probeert men in het algemeen de fout t.g.v. "het warmte lek" van de calorimeter te vermijden?

Antwoord: in delen:



1°) ALS en ZOLANG de temperatuur in het mengvat HOGER is dan de temperatuur van de omgeving, stroomt er door de wand warmte VAN BINNEN NAAR BUITEN, dus $\leftarrow \rightleftarrows \rightarrow$; ALS en ZOLANG de temperatuur in het mengvat LAGER is dan de temperatuur van de omgeving, stroomt er door de wand warmte van BUITEN NAAR BINNEN, dus: $\leftleftarrows \rightarrow$

2°) Men probeert het nu zo in te richten, dat er gedurende de ene helft van de proef evenveel warmte van buiten naar binnen stroomt als er in de tweede helft van binnen naar buiten stroomt.

3°) Wij zullen steeds veronderstellen (hoewel dit in de werkelijkheid niet altijd het geval is) dat de temperatuur in het mengvat tijdens de mengproef IN EEN GESTADIG TEMPO van de begintemperatuur naar de eindtemperatuur gaat.

Bij die veronderstelling heeft men er geen rekening mee te houden, dat de temp. van de omgeving in het 1^e gedeelte van de proef daalt, (of stijgt) en in het 2^e gedeelte van de proef stijgt (of daalt).

DEEL IV van HOOFDSTUK IX.VERANDERING VAN AGGREGATIE TOESTAND.Inleiding.

Vraag: Wat is een aggregatietoestand?

Antw.: Een aggregatietoestand is een toestand van samenhang der moleculen.

Vraag: In welke aggregatietoestanden kan een werkelijke stof voorkomen?

Antw.: Een werkelijke stof kan voorkomen in:

- a) vaste,
- b) vloeibare,
- c) damp of gasvormige toestand.

We gaan nu spreken over de overgang van de ene toestand in de andere; van de ene fase in de andere fase.

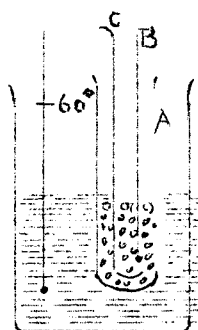
Deze overgangen zijn:

<u>A</u> Oplossen, uitkristalliseren	}	Scheikunde.
<u>B</u> Smelten, stollen.	}	Natuurkunde.
<u>C</u> Verdampen, condenseren.		
<u>D</u> Sublimeren, rijpen.		

SMELTEN - STOLLEN.

Par. 1) De eigenschappen.

1) De proef:



In een REAGEERBUIS A (zie fig.) brengen we een hoeveelheid vaste paraffine. De THERMOMETER B gebruiken we tijdens de proeven om de verschillende temperaturen te meten. Door voortdurend roeren met de ROERDER C, zorgen we er voor dat alle punten van de vloeistof in de reageerbuis dezelfde temperatuur hebben.

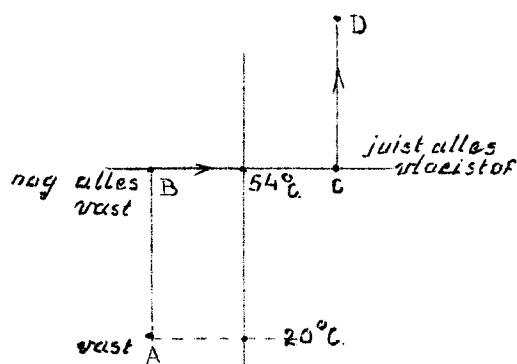
Het geheel plaatsen we in een bekerglas met water, dat een temperatuur heeft van $= 60^{\circ} \text{C}$.

2) Vraag: Wat constateert men op de thermometer tijdens deze proef?

Antw.: De temperatuur van de vaste paraffine stijgt geleidelijk

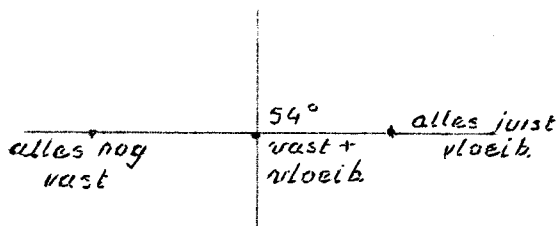
en wordt tenslotte 54°C . Bij deze temperatuur begint zich vloeibare paraffine te vormen.

Tijdens het smelten blijft de temperatuur constant, ofschoon we warmte toevoeren. Denk aan de temperatuur van het omringende water, dit is 60°C . Blijven we nu roeren, dan blijft de temperatuur 54°C tot alle vaste paraffine vloeibaar geworden is.



Conclusie: (blz. 131.)

Conclusie: Bij een temperatuur van 54° C. kan paraffine zowel vast als vloeibaar zijn.



Men zegt nu, dat de vaste en de vloeibare fase met elkaar in evenwicht zijn.

Vraag: Wat zal er gebeuren, wanneer men per seconde meer warmte toevoert?

Antw.: Voert men per seconde meer warmte toe, dan zal men het smeltproces alleen maar bespoedigen.

Vraag: Wat wil zeggen, bij 54° C. zijn de vaste en vloeibare fase met elkaar in evenwicht?

Antw.: Dat wil zeggen, dat de natuur geen neiging heeft om verandering te brengen in de fase.

Vraag: In een reageerbuisje bevindt zich vloeibare paraffine van 54° C. Men werpt er vaste paraffine van 54° in. Zal er iets gebeuren?

Antw.: Nee! Bij 54° C. immers zijn de vaste en vloeibare fase met elkaar in evenwicht.

Vraag: In een calorimeter bevindt zich paraffine (vast en vloeibaar) met elkaar in evenwicht. Wat volgt hieruit?

Antw.: Hieruit volgt, dat de temperatuur per sé 54° moet zijn.

Vraag: In een smeltkroes bevindt zich een vast, wit-gloeiend stuk ijzer van 1530° C. Wat kan men hieruit besluiten?

Antw.: Dat het smeltpunt van ijzer 1530° C. is, of hoger.

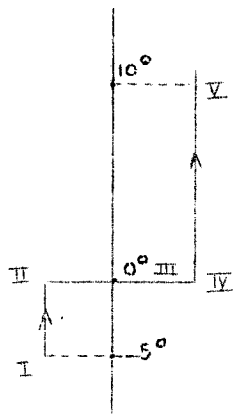
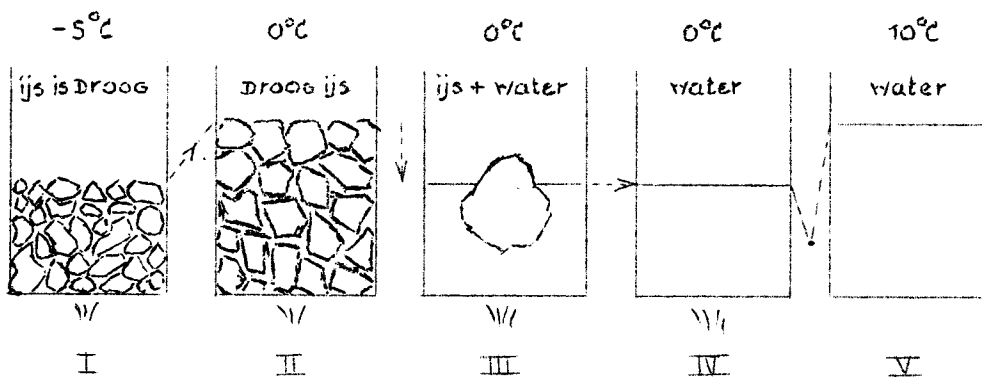
Vraag: Is het geen tegenspraak; warmte toevoeren zonder dat de temperatuur stijgt?

Antw.: Dit zou een tegenspraak zijn, als er niets gebeurde. Maar er gebeurt wel degelijk iets. De paraffine smelt; de moleculen van de paraffine verbreken zelfstandig hun samenhang. Dit verbreken van de samenhang kost warmte. De latente warmte die tijdens het smelten wordt toegevoerd, wordt dus gebruikt om de vaste samenhang te verbreken. Deze energie blijft in verborgen vorm in de vloeistof aanwezig. Zij komt tijdens het stollen weer te voorschijn.

CONCLUSIE: Er is warmte nodig om vaste paraffine van 54° C. om te zetten in vloeibare paraffine van 54° C.

Vraag: Hoe verandert de temperatuur als we ijs van -5° C. verwarmen tot $+10^{\circ}$ C. ?

Antw.: In de figuren op blz. 132 is aangegeven hoe de temperatuur verandert, als we ijs van -5° C. verwarmen tot $+10^{\circ}$ C.



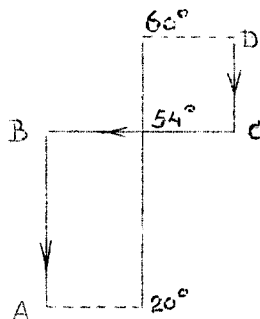
Vraag: Wat zou gebeuren als bij III de vlam werd uitgedraaid?

Antw.: Niets; de fasen zijn in evenwicht!

Vraag: Wat is smelten?

Antw.: Smelten is het verschijnsel dat de moleculen van een vaste stof bij een bepaalde temperatuur, de toegevoerde warmte gebruiken om hun vaste samenhang te verbreken en vloeistof te worden.

Vraag: Wat gebeurt als we paraffine afkoelen van $60^{\circ} \rightarrow 20^{\circ} \text{ C.}$?



Vraag: Beredeneer, dat tijdens het stollen warmte vrijkomt.

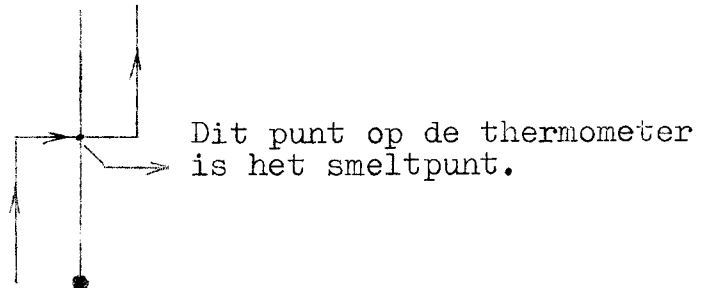
Antw.: Van $60^{\circ} \rightarrow 20^{\circ}$ blijven we aan een stuk warmte onttrekken. Ook bij de overgang van C \rightarrow B. Hoewel we warmte onttrekken, blijft toch de temperatuur constant. Dit kan alleen als de warmte van binnen uit wordt aangevuld en dit gebeurt bij het stollen van de stof.

CONCLUSIE: Tijdens het stollen, - als vloeibare paraffine van 54° C. overgaat in vaste paraffine van 54° C. - komt dus warmte vrij.

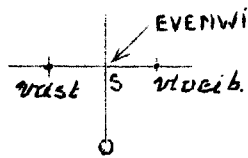
Par. 2) HET SMELTPUNT.

- 1) Vraag: Wat verstaat men onder het smeltpunt van een stof bij een bepaalde druk?

Antw.: Onder het smeltpunt van een stof bij een bepaalde druk verstaat men, het punt, aangegeven in onderstaande figuur.



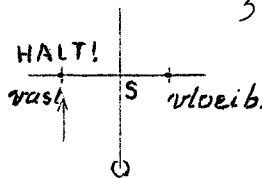
DEFINITIE: 1°) Onder het smeltpunt van een stof, bij een bepaalde druk, verstaat men de temperatuur, waarbij onder deze druk de vaste en de vloeibare fase met elkaar in evenwicht zijn.



2°) Onder het smeltpunt van een stof bij een bepaalde druk verstaat men de temperatuur, waarbij, bij deze druk de vaste fase in de vloeibare fase overgaat, MITS men warmte toevoert.



3°) Onder het smeltpunt van een stof bij een bepaalde druk verstaat men de HOOGSTE temperatuur, die de stof in vaste toestand kan hebben.



In deze stof wordt hardnekkig over de druk gesproken. We zullen zien dat de druk invloed heeft op het smeltpunt.

Onder het normale smeltpunt verstaat men het smeltpunt bij 1 atmosfeer.

We hebben dus 3 definities van het smeltpunt.

Deze wijzen hetzelfde punt op de thermometer aan, maar brengen elk iets anders onder de aandacht.

2) TABEL.

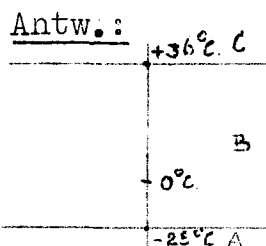
Smeltpunten in °C.			
Alcohol	- 114	Goud	1063
Helium (25 at)	- 272	Koper	1083
Kwik	- 39	Lood	327
Paraffine	54	Wolfraam	3400
Ijzer	1500	Zuurstof	- 218
Water (vast)	0	Ether	- 116
Waterstof	- 259	Aluminium	660

CONCLUSIE: De normale smeltpunten van de verschillende stoffen liggen ver uit elkaar, b.v.:

Wolfraam 3400 °C.
Ijs 0 °C.
Waterstof - 259 °C.

- 3) Vraag: Welke stoffen kennen we in het dagelijks leven als vast, vloeibaar of dampvormig?

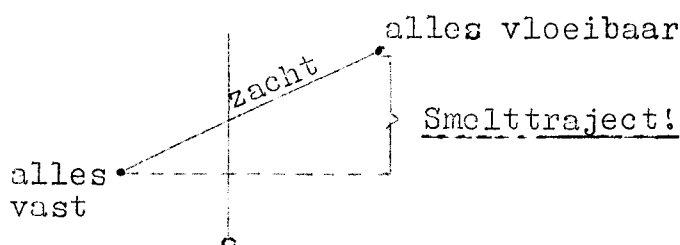
Antw.:



a Stoffen met normale smeltpunt in A kennen we als vloeistof of damp.
 b Stoffen met normale smeltpunt in B kennen we in 3 fasen.
 c Stoffen met normale smeltpunt in C kennen we als vast.

- 4) Vraag: Hebben alle stoffen een scherp bepaald smeltpunt?

Antw.: Alle zuivere, ongemengde stoffen hebben een scherp bepaald, normaal smeltpunt.
 Mengsels hebben een smelttraject.



- 5) Vraag: Wat verstaat men onder het stolpunt van een stof bij een bepaalde druk?

Antw.: Onder het stolpunt van een stof bij een bepaalde druk verstaat men de temperatuur, waarbij de vaste en vloeibare fase met elkaar in evenwicht zijn bij deze druk.

- 6) Vraag: Welk verband bestaat er tussen het smeltpunt en het stolpunt?

Antw.: Het smeltpunt van een zuivere stof is op de thermometer gelijk aan het stolpunt van die stof, omdat in beide gevallen vast en vloeibaar met elkaar in evenwicht zijn.

- 7) Vraag: Wat verstaat men onder het verschijnsel der onderkoeling?

Antw.: Het verschijnsel der onderkoeling in het verschijnsel, dat een vloeistof verschillende graden beneden zijn normale stolpunt, vloeibaar blijft.

- 8) Toon het bestaan van dit verschijnsel aan door een proef.

De proef: In een reageerbuis verhitten we natrium-thio-sulfaat ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) tot 80°C . Het smeltpunt van $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ is 45°C . \rightarrow vloeibare fase bij 80°C .
 Hierna brengen we de vloeistof over in een zuiver reageerbuisje, dan koelen we de vloeistof af onder een flinke waterstraal tot b.v. 6°C . We gaan dan van A naar B. We passeren dus het stolpunt, maar de stof blijft vloeibaar. \rightarrow Het is dus mogelijk, dat een stof beneden zijn stolpunt nog in vloeibare toestand is. De stof heet dan onderkoeld.

- 9) Vraag: Van een vloeistof weet men dat deze bij 10°C . in vloeibare toestand verkeert.
 Wat besluit men hieruit?

Antw.: a) Bij een stof die niet onderkoeld is, is bij deze druk het smeltpunt 10°C . of lager.
 b) Bij een stof die wel onderkoeld is, is bij deze druk het smeltpunt hoger dan 10°C .

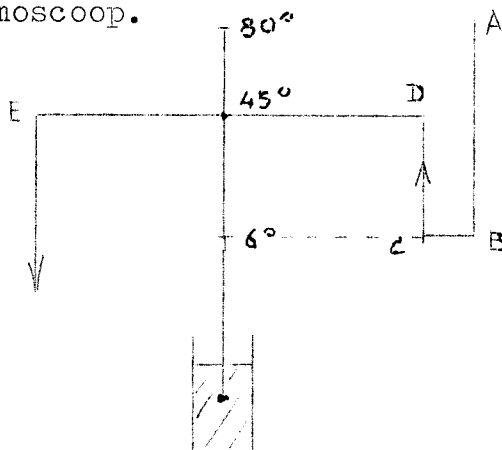
- 10) Vraag: Hoe bewijzen we nu dat de vloeistof werkelijk onderkoeld is?

Antw.: Dat de vloeistof werkelijk onderkoeld is kunnen we bewijzen met behulp van de proef met de dubbele thermoscoop.

* en hebben dus helder, vloeibaar $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

We brengen een kristalletje $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ in de vloeistof. We zien dat het kristal groeit en constateren dat de temperatuur stijgt tot 45°C .

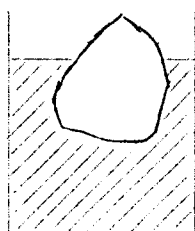
Deze temperatuurstijging tonen we aan met behulp van de dubbele thermoscoop.



- 11) Vraag: Wat gebeurt er als we het reageerbuisje in water van 45° plaatsen?
Antw.: Dan verandert er niets meer! Wat vast is blijft vast en wat vloeibaar is blijft vloeibaar.
- 12) Vraag: Wat gebeurt er als we voortdurend warmte blijven onttrekken?
Antw.: Dan stolt de vloeistof bij gelijke temperatuur tot alles vast is. Daarna daalt de temperatuur.
- 13) Vraag: Bij C was de temperatuur 6° . We werpen er een koud kristal in. Hoe is het nu mogelijk dat de temperatuur stijgt tot D?
Antw.: Bij het stollen komt "latente" warmte vrij. Deze latente warmte doet de temperatuur stijgen tot D.
- 14) Vraag: Wat bewijst deze proef dus?
Antw.: Deze proef bewijst:
 1^o) Dat een vloeistof onderkoeld kan zijn,
 2^o) Dat bij het stollen warmte vrij komt.
- 15) Vraag: Welke stoffen hebben dit verschijnsel van onderkoeling?
antw.: Alle stoffen die in vaste vorm een kristal-vorm hebben, hebben het onderkoelings-verschijnsel. m.a.w. alle stoffen, waarvan in vaste vorm de moleculen verplicht zijn, bepaalde figuren te vormen. (zie scheikunde, kristallografie)
- 16) Vraag: Kan het verschijnsel van onderkoeling ook voorkomen bij water?
Antw.: Water in vaste vorm (ijs) bestaat uit kristallen. Het water moet dan wel zuiver en uitgekookt zijn!

Par. 3) VOLUMEVERANDERING bij het SMELTEN.

1)



IJs drijft op water. Beredeneer hieruit dat ijs bij het smelten moet inkrimpen.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Bewijs: } S_{\text{ijs}} < S_{\text{water}} \\ M = V \times S \\ M_{\text{ijs}} = M_{\text{water}} \end{array} \right\} \therefore V_{\text{ijs}} > V_{\text{water}}$$

Bij het smelten moet S_{ijs} groter worden \longrightarrow
 V wordt kleiner.

- 2) Vaste paraffine zinkt in vloeibare paraffine.
Beredeneer hieruit dat paraffine bij het smelten uitzet.

Bewijs: (theoretisch)

$$S_{\text{vaste paraff.}} > S_{\text{vl.b.paraff.}}$$

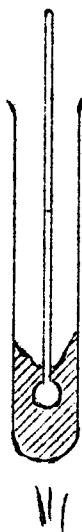
$$M = V \times S$$

Bij het smelten wordt S kleiner
V wordt groter.

Bewijs: (proef-ondervindelijk)

In een reageerbuis brengen we een hoeveelheid vaste paraffine, en plaatsen hierin een thermometer. Met behulp van een bunsenbrander wordt de buis vervolgens verhit.

Achtereenvolgens zien we, dat;



a) zich bij 54° vloeibare paraffine begint te vormen,

b) deze temperatuur constant blijft, totdat alle vaste paraffine vloeibaar geworden is.

Het volume van de vloeibare paraffine heeft nu een bepaalde waarde.

c) Nemen we de vlam onder de reageerbuis weg, dan koelt de vloeibare paraffine weer af. De temperatuur blijft 54° ., tot alle vloeibare paraffine vast geworden is.

d) Vergelijken we het nu verkregen volume van de vaste paraffine, met het volume in b) genoemd, dan zien we duidelijk een verschil.

CONCLUSIE: Het oppervlak van de weer vast geworden paraffine vertoont (reeds bij 54°C.) zeer duidelijk een uitholling; het volume van vast paraffine is kleiner als van vloeibaar paraffine!

- 3) Sommige stoffen zetten bij het smelten uit, en sommige krimpen in.

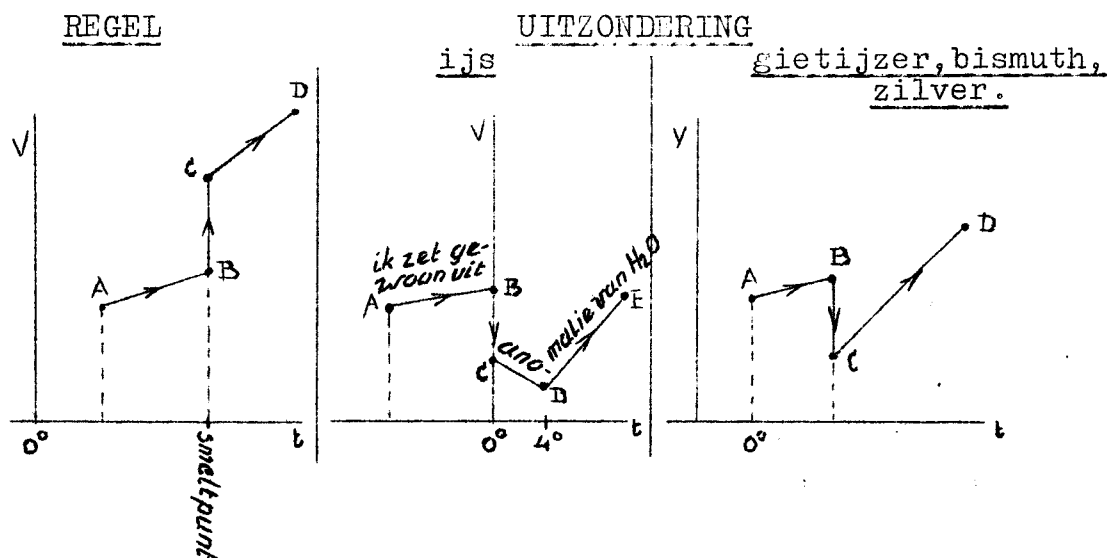
a) Wat is regel, en wat is uitzondering?

Regel is dat de stoffen uitzetten.

Uitgezonderd zijn vier stoffen, t.w.:

- ijs,
- gietijzer,
- bismuth,
- zilver.

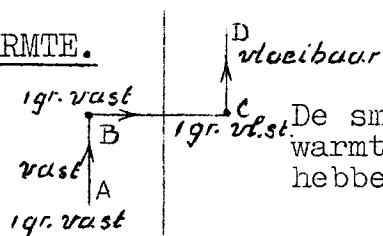
b) Teken een grafische voorstelling die de Δv bij het smelten in beeld brengt.



anomalie = onregelmatigheid.

Par. 4) DE INVLOED VAN DE DRUK OP HET SMELTPUNT.1) Vraag: Wat verstaat men onder het normale smeltpunt?Antw.: Onder het normale smeltpunt verstaat men het smeltpunt bij een druk van 76 cm. kwik.2) Beredeneer dat bij stoffen die bij het smelten uitzetten, drukverhoging het smeltpunt doet stijgen.Antw.: De hogere druk werkt het uitzetten (smelten) tegen. Om te kunnen smelten hebben de moleculen nu meer energie nodig \rightarrow smeltpunt hoger.3) Beredeneer dat drukverhoging het smeltpunt doet dalen, bij stoffen die bij het smelten inkrimpen.Antw.: De hogere druk bevordert het inkrimpen \rightarrow smeltpunt lager.CONCLUSIE: 1) Bij stoffen die uitzetten bij het smelten doet drukverhoging het smeltpunt stijgen.2) Bij stoffen die inkrimpen bij het smelten, doet drukverhoging het smeltpunt dalen.Par. 5) DE SMELTINGSWARMTE.

1)

De smeltingswarmte is de latente warmte die we PER GRAM stof nodig hebben om van B naar C te gaan.

2)

DEFINITIE: Onder de smeltingswarmte van een stof verstaat men, het aantal calorieën dat nodig is om EEN GRAM van die stof BIJ HET SMELTPUNT over te voeren, van de vaste naar de vloeibare fase.

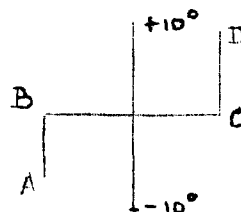
Vraag: Waarom staat er uitdrukkelijk: BIJ HET SMELTPUNT.Antw.: Omdat alleen bij het smeltpunt latente warmte is.Vraag: Wat wil zeggen; de smeltingswarmte van ijs is $80 \frac{\text{cal}}{\text{gram}}$.Antw.: De smeltingswarmte van ijs is $80 \frac{\text{cal}}{\text{gram}}$, wil zeggen, dat we 80 calorieën nodig hebben om 1 gram ijs van 0° over te voeren in 1 gram water van 0° .Vraag: Wat is de eenheid van smeltingswarmte?Antw.: De een van smeltingswarmte = $\frac{\text{cal}}{\text{gram}}$ Vraag: Soms geeft men de smeltingswarmte aan met de kleine letter r (niet internationaal).Wanneer nu gegeven is, dat de smeltingswarmte van een stof = $r \frac{\text{cal}}{\text{gram}}$ is, hoeveel calorieën zullen dan nodig zijn, om m gram van die stof bij het smeltpunt over te voeren van de vaste in de vloeibare fase.Antw.:

$$Q = m \times r \text{ cal.}$$

Vraag: Hoeveel cal. zijn nodig om 50 gram ijs van -10°C . over te voeren in 50 gram water van $+10^{\circ} \text{C}$.?Geg.: zie blz. 138

Vraag: Hoeveel cal. zijn nodig om 50 gram ijs van $-10^{\circ} C.$ over te voeren in 50 gram water van $+10^{\circ} C.$?

Geg.: $C_{ijs} = 0,5 \frac{cal.}{gr \times ^{\circ}C}$
 $r_{ijs} = 80 \frac{cal.}{gr.}$
 $C_{water} = 1 \frac{cal.}{gr \times ^{\circ}C}$



Opl.: $Q \ A \rightarrow B = 50 \times 0,5 \times 10 = 250 \text{ cal.}$
 $Q \ B \rightarrow C = 50 \times 80 = 4000 \text{ cal.}$
 $Q \ C \rightarrow D = 50 \times 1 \times 10 = 500 \text{ cal.}$
4750 cal.

Het benodigd aantal cal. is dus 4750.

Vraag: Wat verstaat men nu onder de stollingswarmte van een stof?

Antw.: Onder de stollingswarmte van een stof verstaat men het aantal calorieën dat vrij komt, als één gram van die stof bij het stolpunt overgaat van vloeibaar naar vast.

SMELTINGSWARMTE = STOLLINGSWARMTE.

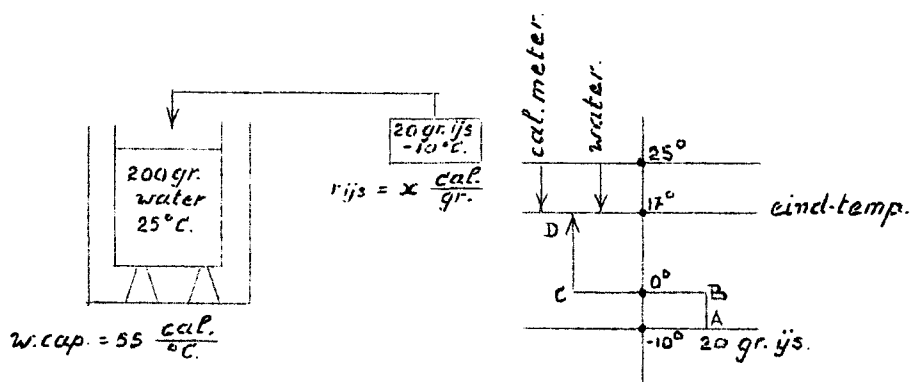
3) Beschrijf een proef ter bepaling van de smeltingswarmte van ijs.

We doen deze proef in de vorm van een som! B & St. 203.

Geg.: In een calori-meter bevindt zich 200 gram water van $25^{\circ} C.$ Hierin brengt men eerst 20 gram ijs van -10° , waardoor de temperatuur daalt tot $17^{\circ} C.$ De waterwaarde of warmtecapaciteit van de calorimeter is 55 en de soortelijke warmte van ijs 0,5

Gevr.: De smeltingswarmte van ijs.

Opl.:



WARMTE - BALANS.

O	A
1) Wie neemt warmte op? $A \rightarrow B: 20 \text{ gr. ijs stijgen } 10^{\circ}.$ $B \rightarrow C: 20 \text{ gr. ijs smelten.}$ $C \rightarrow D: 20 \text{ gr. water stijgen } 17^{\circ}.$	1) Wie staat warmte af? a) 200 gr. water dalen $8^{\circ}.$ b) calorimeter daalt $8^{\circ}.$
2) Hoeveel cal. worden opgenomen? $A \rightarrow B: 20 \times 0,5 \times 10 \text{ cal.} = 100 \text{ cal.}$ $B \rightarrow C: 20 \times X \text{ cal.} = 20X \text{ cal.}$ $C \rightarrow D: 20 \times 1 \times 17 \text{ cal.} = 340 \text{ cal.}$	2) Hoeveel cal. worden afgestaan? a) $200 \times 1 \times 8 \text{ cal.} = 1600 \text{ cal.}$ b) $55 \times 8 \text{ cal.} = 440 \text{ cal.}$
$0 = A$	
$440 + 20X \text{ cal.} = 2040 \text{ cal.}$	
$20X = 1600$	
$X = 80 \frac{cal.}{gr.}$	

CONCLUSIE: $r_{ijs} = 80 \frac{cal.}{gr.}$

De vraag dringt zich naar voren, of men hier niet beter zou kunnen beginnen met ijs van 0° .

Theoretisch is dit beter, maar praktisch kan men bij kamertemperatuur dit niet klaar krijgen. Maar dan moeten we nu weten welke de soortelijke warmte is van ijs, en hoe groot.

Dit is helemaal geen moeilijkheid.

We stellen $C_{ijs} = y$ en doen dan de proef 2 keer met andere gewichts hoeveelheden.

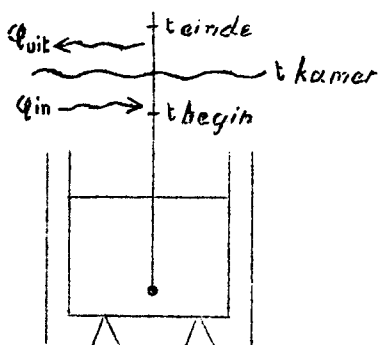
Behalve dat het ijs droog is, moet het nog aan een voorwaarde voldoen om de proef tot een goed einde te brengen. Het ijs mag n.l. geen lucht bevatten en moet derhalve helder zijn. Mat ijs bevat lucht, en lucht heeft een grote soortelijke warmte, > 1 .

4) Vraag: Waarom gebruiken we een calorimeter?

Antw.: Een calorimeter wordt gebruikt om, noch de warmte van binnen naar buiten, noch de warmte van buiten naar binnen te laten gaan.

Geen enkele calorimeter is volmaakt "warmte-proof".

In de tijdsduur dat de temperatuur in de calorimeter lager is dan de kamer-temperatuur, stroomt warmte van buiten naar binnen.



In de tijdsduur dat de temperatuur in de calorimeter hoger is dan de kamer-temperatuur, stroomt warmte van binnen naar buiten.

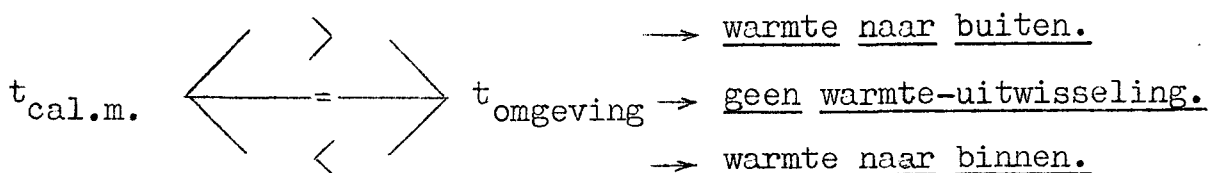
Deze Q_{in} en Q_{out} zijn niet bekend.

Hoe probeert men nu te bereiken dat de fout door dit warmte-lek tot een minimum beperkt blijft?

Hoe men dit in het laboratorium doet, is ons te moeilijk.

We nemen daarom stilzwijgend aan, dat de tijdsduur waarin de temp. cal. meter $<$ kamer-temperatuur = tijdsduur waarin temp. cal. meter $>$ kamer-temperatuur.

Welnu, dan hoeven we er alleen maar voor te zorgen dat t_{begin} en t_{einde} symmetrisch liggen t.o.v. de kamertemperatuur.



5) Stel dat er in totaal y calorieën naar buiten gestroomd zijn, hoe moet de balans dan gecorrigeerd worden?

$$0 = A - y.$$

Stel dat er y calorieën naar binnen stromen, hoe moeten we de balans dan corrigeren?

$$0 = A + y.$$

Sommen B.&St.

198-199-201-202-204.

Par. 6) VERDAMPEN - CONDENSEREN.

- 1) We hebben reeds beschouwd, het verdampen aan het oppervlak (blz. 46 Hfdst. VIII) en het verdampen in de vloeistof, (blz. 80) In beide gevallen gaat de vloeistof over van de vloeibare fase in de damp-fase.

Voor beide overgangen is warmte nodig, en wel per gram vloeistof is voor de beide overgangen dezelfde hoeveelheid warmte nodig.

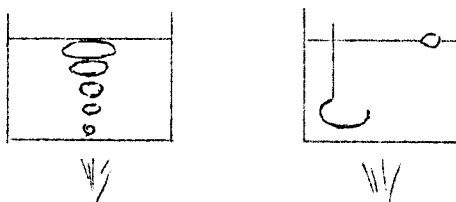
Par. 7) VERDAMPINGSWARMTE.

- 1) Inleiding:

We beschouwen een bekersglas, gevuld met vloeistof, en voeren zo veel warmte toe, tot de vloeistof kookt.

De grote kwestie is nu, dat elke laag vloeistof haar eigen temperatuur heeft. We kunnen deze moeilijkheid elimineren, door met een roerder ervoor te zorgen dat de vloeistof gelijkmatig verwarmd wordt.

Dus: $t_{\text{oppervlak}} = t_{\text{in iedere plaats van de vloeistof.}}$



- 2) Vraag: Waar vormen zich het eerst dampbellen?

Antw.: Aan het oppervlak, want daar is de druk kleiner dan op de bodem.

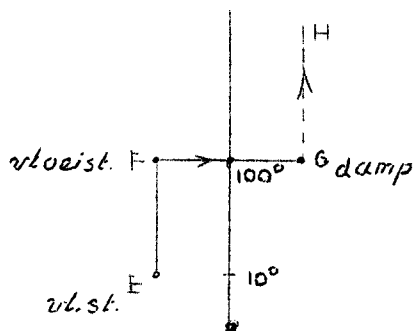
Vraag: Hoe groot is P_{dampbel} ?

Antw.: $P_{\text{dampbel}} = P_{\text{buitenlucht}}$

Gegeven: In een bekersglas bevindt zich een vloeistof met temperatuur $+10^{\circ}\text{C.}$, en een kookpunt van $+100^{\circ}\text{C.}$

Gevraagd: Hoe verandert t , als we de vloeistof zo verwarmen, dat alle vloeistof verdampt is.

Oplossing:



- 3) Het begrip VERDAMPINGSWARMTE.

Vraag: De latente warmte nodig per gram vloeistof om van F naar G te gaan, noemt men de verdampingswarmte; Hoe zou men dit nu kunnen definiëren?

DEFINITIE.

DEFINITIE: Onder de verdampingswarmte van een vloeistof, bij een bepaalde temperatuur, verstaat men, het aantal calorieën dat nodig is om

ÉÉN GRAM

van die vloeistof

BIJ DIE TEMPERATUUR

geheel over te voeren in

ÉÉN GRAM

precies verzadigde damp van die temperatuur.

Vraag: Wat wil zeggen; de verdampingswarmte van water = $539 \frac{\text{cal}}{\text{gram}}$?

Antw.: De verdampingswarmte van water = $539 \frac{\text{cal}}{\text{gram}}$ wil zeggen, dat er 539 calorieën nodig zijn, om 1 gram water van 100°C. over te voeren in 1 gram precies verzadigde waterdamp van 100°C.

Vraag: Wat is de eenheid van verdampingswarmte?

Antw.: De eenheid van verdampingswarmte is $\frac{\text{cal}}{\text{gram}}$. Deze eenheid wordt wel aangegeven door de letter R.

T A B E L

stof	verd.w.	stof	verd.w.
alcohol	202	water	539
ether	90	waterstof	110
helium	189	zuurstof	51
kwik	68	zwavel	360

Vraag: Wat verstaat men onder de condensatiewarmte?

Antw.: Onder de condensatiewarmte van een damp, bij een bepaalde temperatuur verstaat men, het aantal calorieën dat vrij komt, als 1 gram precies verzadigde damp van die temperatuur overgaat in 1 gram vloeistof van diezelfde temperatuur.

Opmerking: Bij damp kan men ook zo iets hebben als onderkoeling. Men spreekt dan van oververzadigde damp. Hierop gaan we nu niet verder in. Op 5 en 6 B zullen we dit echter uitvoerig behandelen.

Vraag: Welk verband bestaat er tussen de verdampingswarmte en de condensatiewarmte van dezelfde vloeistof, bij dezelfde temperatuur.

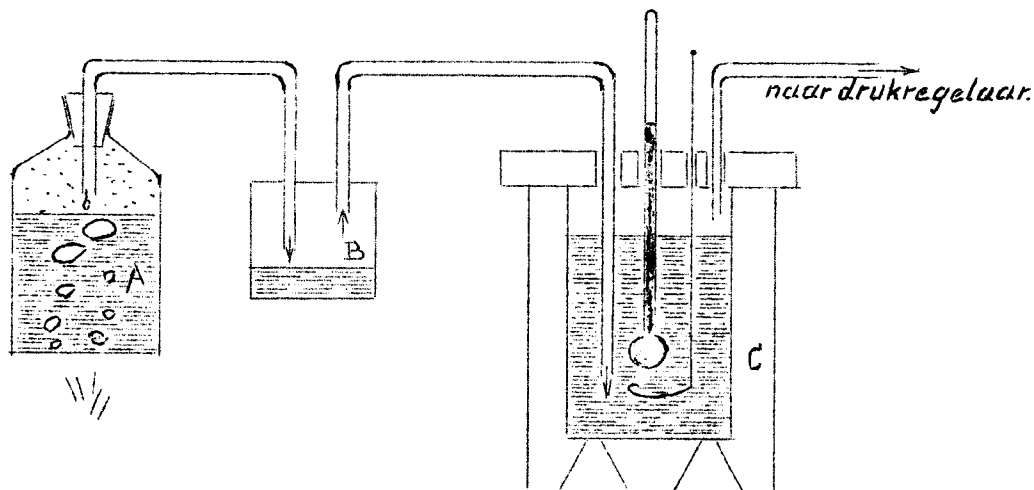
Antw.: Het verband tussen verdampingswarmte en condensatiewarmte is: ze zijn gelijk.

N.B.: Beschrijf een proef ter bepaling van de verdampingswarmte van waterdamp bij 100°C.

Voor opstelling van deze proef zie volg. blz.

N.B.

Opstelling van de proef ter bepaling van de verdampingswarmte van waterdamp bij 100° C.



We krijgen nu enkele vragen naar aanleiding van de hierboven aangegeven proef ter bepaling van de verdampingswarmte van waterdamp.

Vraag 1) Waarvoor dient het "filtervat" B ?

Antw.: Het filtervat B dient, om het water op te vangen dat zou kunnen condenseren.

Vraag 2) Hoe hoog is de temperatuur van de damp als deze in de calorimeter komt?

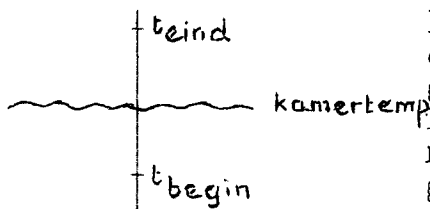
Antw.: $t_{\text{damp}} = t$, waarbij $P_{\text{damp}}^{\text{in}}$ gelijk is aan $P^{\text{drukregelaar}}$.

Vraag 3) Waarom staat in bovenstaand antwoord P^{in} ?

Antw.: De damp die de calorimeter binnenkomt is persé verzadigd, want in B zijn damp en vloeistof naast elkaar aanwezig.

Vraag 4) Wat doet men achtereenvolgens?

Antw.: We bepalen t_{begin} en wegen de calorimeter. Dan laten we er zolang stoom doorgaan tot dat t_{eind} en t_{begin} symmetrisch liggen t.o.v. de kamertemperatuur.

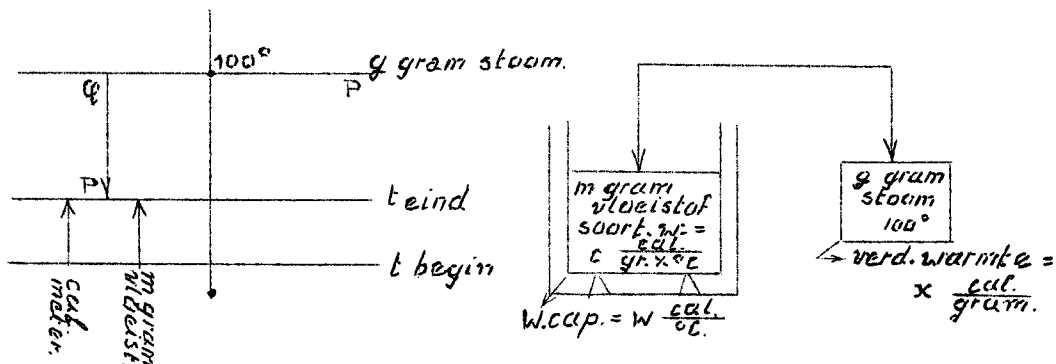


Hierna wegen we de calorimeter opnieuw. We weten dan hoeveel damp er gecondenseerd is.

Vraag 5) Leg nogmaals uit waarom begin- en eindtemperatuur symmetrisch moeten liggen t.o.v. de kamertemperatuur.

Antw.: Om het warmtelek van de calorimeter te elimineren.

Stel een vergelijking op, waaruit de condensatiewarmte (= verdampingswarmte) kan berekend worden.



W A R M T E B A L A N S

O	A
1) \underline{a} cal. meter stijgt $(t_{\text{eind}} - t_{\text{begin}})^{\circ}$ \underline{b} m gram vloeistof stijgen $(t_{\text{eind}} - t_{\text{begin}})^{\circ}$	1) \underline{a} g gram stoom condenseert P - Q \underline{b} g gram water dalen $(Q - R)$ $(100 - t_{\text{eind}})^{\circ}$
2) \underline{a} W x $(t_{\text{eind}} - t_{\text{begin}})$ cal. \underline{b} m x C x $(t_{\text{eind}} - t_{\text{begin}})$ cal.	2) \underline{a} g x λ cal. \underline{b} g x $(100 - t_{\text{eind}})$ x 1 cal.
O = A	
$\{W + m \times C\} \times (t_{\text{eind}} - t_{\text{begin}}) = gx + g (100 - t_{\text{eind}})$	

Sommen B & St.
 223 t/m 232.
 230 - 231 !!

MACHINES

Par. 1. DE STOOMMACHINE.

Een uitvoerige verhandeling over de stoommachine is te vinden op blz. 98 par. 5 van dit dictaat.

Par. 2. DE STOOMTURBINE.

Bij de behandeling van de stoommachine (Par. 5, blz. 98) hebben we gezien, dat de heen- en weergaande beweging van de zuiger moet worden omgezet in een draaiende beweging. De grote verliezen aan arbeid, welke we hierbij zagen optreden, hadden tot gevolg; een aanmerkelijke vermindering van het nuttig effect. Dit bezwaar nu, is bij de stoomturbine ondervangen.

Bij de stoomturbine, - uitgevonden door de Engelsman
Sr. Ch.E. PARSONS, Ingenieur; *1854 †1931 -
treffen we de navolgende, integrerende onderdelen aan:

- a) de STOOMKETEL,
- b) het LOOPWIEL of schoepenrad. (zie fig.)

In de stoomketel wordt water omgezet in stoom met een spanning van 10 tot 100 atmosfeer.

Door deze stoom te leiden door buizen, voorzien van een speciaal gevormde uitlaat, (zie fig.) krijgt de uittredende dampstraal een snelheid die zeer groot kan worden. Zij kan zelfs uitgaan ver boven de snelheid van het geluid.

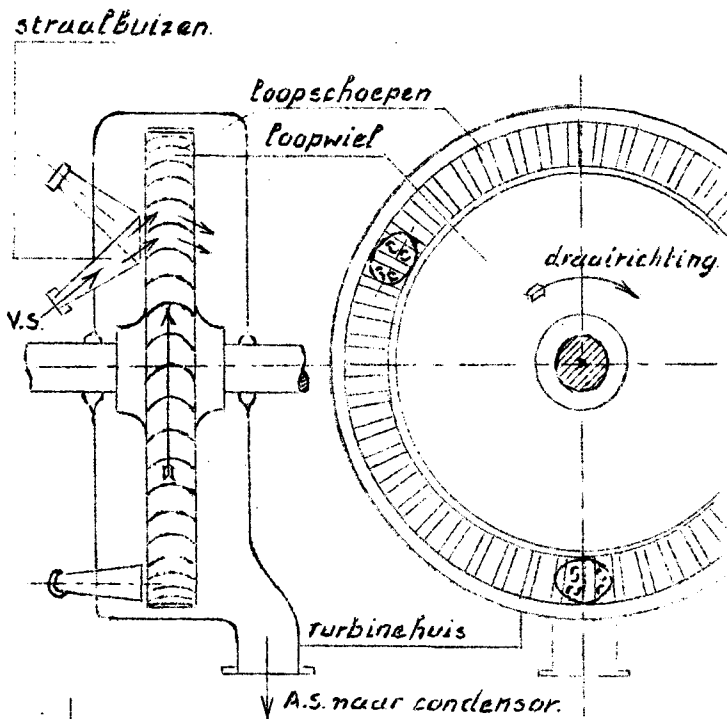
Deze gevormde geluidsnelle dampstraal, kan onmogelijk in deze toestand ten volle benut worden. Immers, wanneer de dampstraal zò gericht wordt tegen de schoepen van een schoepenrad, wordt het aantal omwentelingen per seconde, - het z.g. toerental - van het loopwiel zo groot, dat dit voor praktisch gebruik ongeschikt blijkt.

Via een tandrad-overbrenging zou men het toerental dan weer moeten verlagen om tot een "handzaam" gebruik te komen.

Echter zou dit weer aanzienlijke arbeidsverliezen opleveren. In de praktijk, zal men dus de snelheid van de dampstraal dienen te verminderen, en wel zoveel, dat de omwentelingen van het loopwiel een bepaald aantal niet overschrijden.

De werking van de stoomturbine is als volgt:

Op de as worden meerdere loopwielen achter elkaar gemonteerd, terwijl zich op de mantel van de turbine vaststaande schoepen bevinden, zgn. "leischoepen". Tegen de schoepen van het eerste loopwiel richt men de dampstraal. Deze verandert hierbij van richting en wordt dan tussen de leischoepen door, naar de schoepen van het tweede loopwiel geleid, zo, dat de dampstraal weer in zijn oorspronkelijke richting gekeerd, tegen deze schoepen blaast, enz.



Vraag: Verklaar hoe het komt, dat de "gang" van de stoomturbine zeer gelijkmatig is?

Antw.: De onmiddellijk draaiende beweging welke de stoomturbine levert, het afwezig zijn van tandrad-overbrengingen, krukas, vliegwiel enz., zijn oorzaak van een zeer gelijkmatige gang van de stoomturbine.

Vraag: Wat kan men zeggen van de bouw van de stoomturbine.

Antw.: Vergelijken met de stoommachine, heeft de turbine een veel compacter bouw en ontbreken er gevaarlijke uitwendig bewegende delen, zoals vliegwiel, enz.

Vraag: Wat kan men zeggen van het nuttig effect van de stoomturbine.

Antw.: Het nuttig effect van de stoomturbine is bijna twee-maal zo groot als van de stoommachine, n.l. 20 tot 25%.

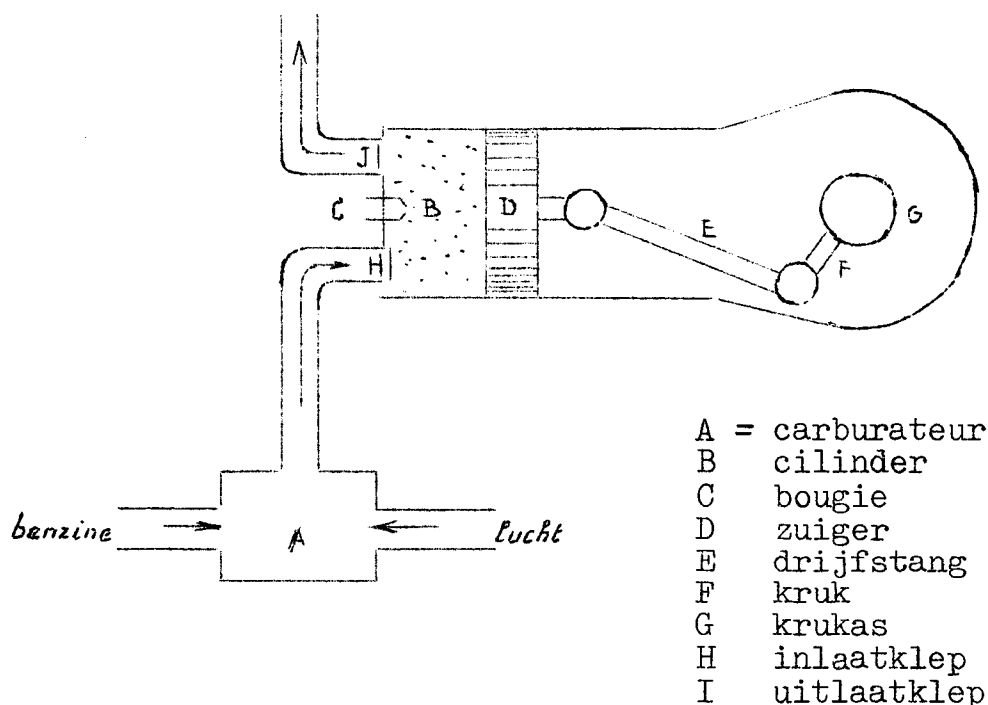
Pa

Par. 3. De EXPLOESIE- en BENZINE MOTOR. (Motoren waarbij zeer snelle verbranding optreedt).

Vraag: Waaruit bestaat de arbeid, die door een explosie-motor wordt geleverd?

Antw.: De arbeid die door een explosiemotor wordt geleverd bestaat uit, de verbrandingswarmte die vrijkomt als een brandbaar mengsel van gas (of damp) en lucht door middel van een elektrische vonk tot zeer snelle ontbranding, tot explosie komt.

Maak een eenvoudige tekening van de 4-takt motor en vermeld de integrerende onderdelen.



Integrerende delen van deze motor zijn:

- a) de carburateur A
- b) de cilinder B
- c) de bougie C

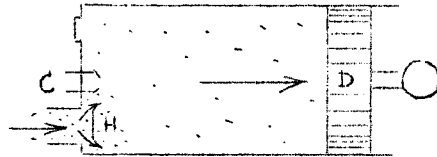
In de CARBURATEUR wordt de toegevoerde (vloeibare) benzine omgezet in dampvormige benzine. Dit noemt men het "vergassen". Eveneens wordt in de carburateur de toegevoerde lucht in de juiste verhouding gemengd met de benzine-damp. Dit in de carburateur gevormde gasmengsel wordt in de CILINDER tot explosie gebracht, door middel van de BOUGIE.

Deze bestaat in feite uit twee metalen pennen, - geïsoleerd door een porceleinen omhulsel - waartussen een elektrische vonk (hoogspanning) kan overslaan.

De WERKING van de VIERTAKTmotor:

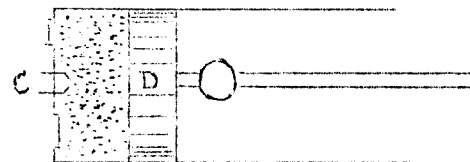
1^e TAKT - AANZUIGSLAG.

Zuiger D (zie fig.) beweegt zich naar rechts. Automatisch wordt nu in laatklep H geopend. Het explosieve gasmengsel stroomt nu vanuit de carburateur via inlaat en inlaatklep H in de cilinder B. Heeft de zuiger zijn uiterste stand bereikt, dan wordt de inlaat weer gesloten.



2^e TAKT - COMPRESSIESLAG.

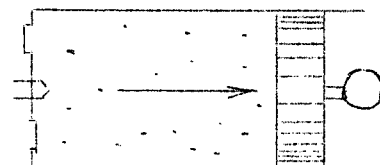
De zuiger D beweegt zich naar links; de spanning van het explosieve gasmengsel stijgt hierdoor tot 10 à 15 atm. Heeft de zuiger zijn uiterste stand bij na bereikt, dan springt bij de bougie C een



vonk over. Deze vonk veroorzaakt een explosie van het gasmengsel; er komt warmte vrij. De temperatuur van de gassen stijgt plaatselijk tot $\pm 1600^{\circ}$ C. In de cilinder wordt de spanning ongeveer 30 atm.

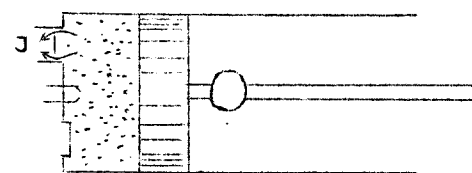
3^e TAKT - ARBEIDSSLAG.

Arbeid wordt verricht, wanneer de zuiger door de spanning van de ontstane verbrandingsgassen weer naar rechts wordt gedreven.



4^e TAKT - UITLAATSLAG.

Automatisch, wordt nu na de arbeidsslag de uitlaatklep I geopend. Door het zich naar links bewegen van de zuiger, perst deze de verbrandingsgassen uit de cilinder. Hierna sluit de uitlaat, en herhaalt zich het boven beschreven proces.



Vraag: Waarom moet de cilinder gekoeld worden.
Welk gevolg heeft deze koeling voor het nuttig effect?

Antw.: Ernstige beschadigingen van de cilinders, scheuren en zelfs smelten, kunnen het gevolg zijn van de grote hoeveelheid warmte, welke in korte tijd vrij komt bij explosie van het gasmengsel. Door de cilindermantel met water of lucht te koelen, wordt de warmte afgevoerd en kan men deze beschadigingen voorkomen. Het nuttig effect wordt hierdoor kleiner, omdat een gedeelte van de warmte, dat in arbeid zou worden omgezet, door afkoeling verloren gaat.

Vraag:

Vraag: Welk groot bezwaar heeft de explosiemotor en hoe wordt de zuiger over de dode punten heen geholpen?

Antw.: Een onregelmatige gang van de motor is het gevolg van de sterk veranderlijke kracht die de zuiger ondervindt.

Door een zwaar vliegwiel zou dit kunnen worden vermeden.

Naarmate er meer cilinders gekoppeld worden aan de gemeenschappelijke krukas, op een dusdanige manier dat deze as telkens na een halve omwenteling de stoot van èèn drijfstaang van een cilinder ondervindt, wordt de "gang" van de motor gelijkmatiger, en wordt tevens de mogelijkheid van het optreden van "dode" punten voorkomen.

Vraag: Welk is het nuttig effect van benzinemotoren?

Antw.: Het nuttig effect van benzinemotoren bedraagt ongeveer 30%. Dit is de geleverde arbeid die ontstaat uit de vrijkomende verbrandingswarmte.

Par. 4. De DIESELMOTOR. (Motoren, waarbij langzame verbranding optreedt).

RUDOLF DIESEL; * 1858 - † 1913;

Duits ingenieur. Construeerde in 1897 de naar hem genoemde DIESELMOTOR.

De dieselmotor is in principe gelijk aan de benzinemotor, echter zonder ontsteking door-middel van een bougie. (hoogspanning)

Wanneer de cilinder gevuld is met lucht, wordt deze lucht - door de zuiger in èèn richting te bewegen - zeer sterk gecompriëerd, tot 30 à 40 atmosfeer. De temperatuur van de lucht stijgt hierbij tot ongeveer 600° C.

De ontbrandings-temperatuur van ruwe olie, - de brandstof voor de dieselmotor, - ligt ver beneden de temperatuur van de gecompriëerde lucht.

Bij dit proces wordt dus arbeid omgezet in warmte.

We kunnen ons dit als volgt voorstellen.

De zuiger stoot tegen de luchtmoleculen in de cilinder. De gemiddelde snelheid van de luchtmoleculen wordt hierdoor groter, met als gevolg, dat de temperatuur van de lucht stijgt. Is de lucht gecompriëerd, dan wordt in de cilinder zeer fijn verdeelde, vloeibare olie geblazen. Door de hoge temperatuur in de cilinder ontbrandt deze olie. Vonk-explosie met behulp van een bougie is in dit geval dus volledig overbodig.

Vraag: Men spreekt bij een diesel-motor, - in tegenstelling tot de explosie-motor, - van een langzame, gelijkmatige verbranding.

Welk gevolg heeft dit voor de zuiger?

Antw.: Doordat er geen explosie plaats heeft in de cilinder, maar men hier te doen heeft met een gelijkmatige verbranding, zal de druk op de zuiger vrijwel constant zijn. De "gang" van de dieselmotor zal daardoor gelijkmatiger zijn dan bij een explosie-motor.

Slotopmerking:

Door de langzame, gelijkmatige verbranding, behoeft bij de diesel motor niet zoveel warmte afgevoerd te worden als bij een benzine-motor waar bij de explosie zeer veel warmte vrij komt.

Bij het samenpersen van de lucht ontstaat hier warmte. Het gevolg hiervan is, dat de temperatuur zal stijgen.

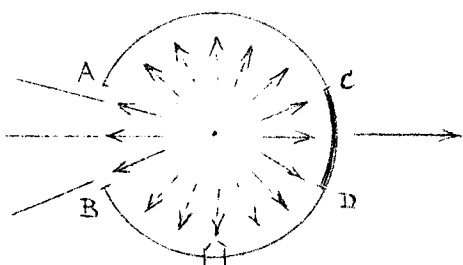
Bij het samenpersen van de lucht is geen brandstof aanwezig. Er bestaat dus geen gevaar voor explosie.

Hierdoor kan men de compressiespanning veel hoger opvoeren dan bij de benzinemotor.
 Het nuttig effect van de dieselmotor zal dus groter zijn dan van de benzinemotor. Dit bedraagt ongeveer 35%.
 Een zwaardere constructie van deze motor is vereist, als gevolg van deze grotere spanning.

Par. 5. De STRAALMOTOR. (reactiemotor.)

Het principe. Het principe van de straalmotor berust op de wet:

ACTIE = REACTIE.



Wanneer in een metalen bol, een mengsel van gas en lucht, elektrisch tot ontbranding wordt gebracht, zal overal op de wand van de bol een even grote kracht worden uitgeoefend.

Gevolg: De bol blijft in rust.

Maken we in diezelfde bol een opening AB, (zie fig.) dan zal, bij het elektrisch tot ontbranding brengen van het zich in de bol bevindende mengsel, het deel AB geen kracht ondervinden, ter-

wijl het diametraal gelegen deel CD wel een kracht ondervindt, reactie-kracht genaamd.

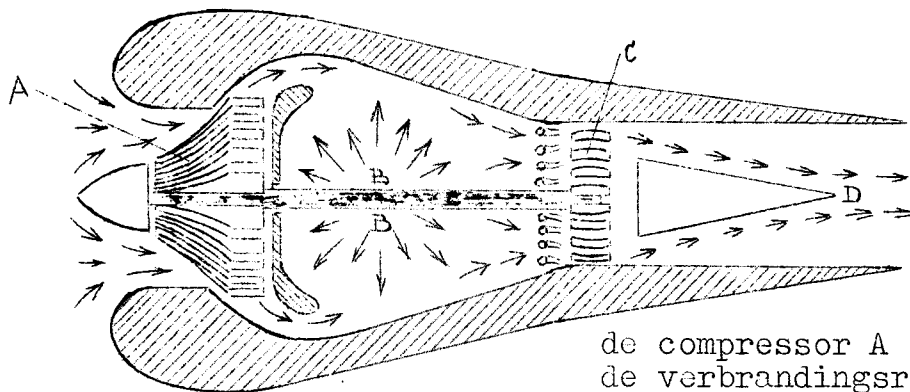
Gevolg: De bol zal naar RECHTS bewegen.

Volgens dit principe heeft, als eerste 's Gravesande, een motor gebouwd.

Willem, Jakob 's GRAVESANDE * 1688 † 1742;
 Nederlands natuurkundige; Hoogleraar aan de universiteit van Leiden.

De Engelsman Sir F. Whittle, 1906 - ; ontwikkelde in de voor-oorlogse jaren, de eerste goed werkende straalmotor. Deze straalmotor bestaat in principe uit een gasturbine, zie tek., verbonden met een z.g. straalruimte.

Integrerende onderdelen van de straalmotor zijn:



de compressor A
 de verbrandingsruimte B
 de turbine C
 de straalruimte D.

De werking van de straalmotor is als volgt:

Turbine C zorgt voor aandrijving van de compressor A.

De lucht heeft dan nog een grote snelheid, als zij de turbine is gepasseerd. Als de lucht dan bij D de straalruimte uittreedt, heeft zij zo'n kracht, dat zij als het ware de motor vooruit stuwt.

STUWKRACHT = REACTIEKRACHT.