

Tandheelkundige Materiaalkennis

door J. N. Tekenbroek, Hoogleraar te Groningen

Voorwoord

In een reeks van op elkaar aansluitende artikelen, zal een inleiding gegeven worden tot de tandheelkundige materiaalkennis.

Het eerste gedeelte zal na een inleidend hoofdstuk in afzonderlijke hoofdstukken respectievelijk behandelen: de bouw van vaste stoffen, atoombouw en periodiek systeem, de chemische en andere bindingskrachten, de zuiver elastische vormveranderingen bij kristallijne stoffen, de chemie der kunststoffen, de plastische vormveranderingen bij amorfe stoffen, de heterogene evenwichten bij metaalalliages.

In het tweede gedeelte zullen groepsgewijs de tandheelkundige materialen in de volgende hoofdstukken besproken worden:

de model-materialen en wassoorten, afdrukmassa's, cementen, porselein, tandheelkundige kunstharsen, amalgaam, metaalalliages. Het geheel zal driehonderd bladzijden, verdeeld over 12 artikelen omvatten.

Vele dezer artikelen, vooral van het eerste gedeelte, zullen er zich niet toe lenen vluchtig doorgelezen te worden, maar een aandachtige lezing en bestudering vragen, die mogelijk een prikkel kunnen vormen, om te grijpen naar chemische en fysische handboeken voor een nadere verdieping in de betreffende onderwerpen.

In de tandheelkundige vakbladen vindt een toenemende stroom van artikelen over de materialen een plaats. Stuit men bij het doorlezen van een dergelijke verhandeling op een meer theoretische kwestie, waarover men zich wat nader wil oriënteren, dan vindt men mogelijk in deze reeks van artikelen een bij de hand staande bron daartoe.

HOOFDSTUK I, INLEIDING

1. *Het practisch en het theoretisch kennen van een materiaal*

Er is geen ander beroep aan te wijzen, dat met een dergelijk groot aantal uiteenlopende materiaalsoorten te maken heeft dan de tandheelkunst. De kennis van de materialen vormt dan ook één van de problemen, waartegenover de tandheerkunde zich bij haar verdere wetenschappelijke ontplooiing geplaatst ziet.

Bij de kennis van een materiaal moet men een verschil maken tussen het **practisch kennen** van een materiaal en het **theoretisch kennen**.

Een smid, die in zijn eeuwenoude beroep, jarenlang dag in dag uit, het ijzer smeedt, kent dit materiaal praktisch door en door. De metallurg van het hoogovenbedrijf echter heeft een heel andere kennis van het smeedijzer; beide soorten van kennis zijn onontbeerlijk voor de samenleving. Voor de tandarts is de praktische kennis d.w.z. het op de juiste wijze kunnen verwerken van de materialen, natuurlijk een eerste vereiste; maar kan hij met deze kennis alleen volstaan?

Uit de leerprogramma's der tandheelkundige opleidingen over de gehele wereld blijkt, dat deze vraag ontkennend beantwoord wordt; de theoretische materiaalkennis komt op alle studieprogramma's als leervak voor. Hiervoor bestaan meerdere redenen en enige daarvan volgen hieronder.

Tandheelkundige materialen worden in het agressieve milieu van de mond toegepast en staan daar aan mechanische, thermische en chemische invloeden bloot, terwijl er bovendien de nodige eisen uit cosmetisch en biologisch oogpunt (niet giftig, verdraagzaam voor de weefsels) aan worden gesteld. Het gevolg van deze veelzijdige eisen is, dat geen enkel materiaal daaraan volkomen voldoet en dat de fabrikanten om begrijpelijke redenen er naar streven de materialen te veranderen en daarnaast ook steeds met nieuwe materiaalsoorten op de tandheelkundige markt komen.

In de tandheelkundige tijdschriften, de leer- en de handboeken treft men een toenemende stroom van publicaties over de materialen, terwijl ook talloze reclamebrochures van de tandarts een kritische beoordeling vragen. Dat een behoorlijke theoretische kennis van de materialen daarvoor nodig is, behoeft geen verder betoog.

Bovendien zal een dergelijke kennis het op de juiste wijze verwerken van de materialen ten goede komen, terwijl ook het klinische beoordelen van een materiaal zowel als het juiste formuleren van de klinische waarnemingen er door bevorderd wordt. Zoals iedere wetenschap dat beoogt, stelt een behoorlijk theoretisch inzicht de tandarts in staat op de juiste wijze over de materialen te kunnen spreken en om daarover aangesproken te kunnen worden. Dit plaatst de tandarts als academicus ook op dit gebied boven zijn tandtechnische hulpkracht, de tandtechnicus.

Het practisch kunnen verwerken van een materiaal is een vaardigheid die niet uit een leerboek of op de collegebanken geleerd kan worden. Hiervoor zijn practische oefeningen nodig, die bij de praeklinische oefeningen dan ook geenszins verwaarloosd worden.

Hier zal de theoretische kennis der tandheelkundige materialen behandeld worden, waarbij rekening zal worden gehouden met de beperkingen, die opgelegd moeten worden omdat een tandarts geen volleerd metallurg, porselein-chemicus, cement-chemicus, kunststof-chemicus enz. behoeft te zijn.

Uit ervaring weet men, dat de ene stof hard is b.v. diamant, de andere stof zacht b.v. was. Glas is bros; zuiver goud is buigzaam, rubber heeft de merkwaardige eigenschap zeer elastisch te zijn. Om de mechanische eigenschappen van materialen nader te bestuderen, zijn methoden uitgewerkt, waarmede men de mate van hardheid, buigzaamheid, rekbaarheid enz. in objectieve cijfers kan bepalen.

Wetenschappelijk legt men zodoende de eigenschappen der materialen op een onderling vergelijkbare wijze vast. De kennis van deze onderzoeksmethoden en van hun uitkomsten, vormt tezamen met de kennis der chemische samenstelling van de materialen **het phaenomenologische gedeelte** van de materiaalkennis.

Het ligt in de aard van de menselijke geest naar een verklaring te zoeken waarom b.v. de ene stof hard en de andere stof zacht is. Waarom is rubber zo elastisch? Is er mogelijk in de wijze waarop in een materiaal als rubber de moleculen t.o.v. elkaar gerangschikt en aan elkaar gebonden zijn een oorzaak aan te geven voor die eigenschap? De menselijke geest zoekt naar een **atomistische verklaring** van de eigenschappen der materialen.

Diamant en grafiet zijn beide stoffen die in de tandheelkunde gebruikt worden. Diamant vanwege zijn hardheid als slijpmiddel, het grafiet, dat tussen de vingers gewreven zacht en vettig aanvoelt, vindt toepassing als smeermiddel. Het merkwaardige is, dat beide stoffen chemisch dezelfde samenstelling hebben; zij bestaan beide uit zuiver koolstof. Vanwaar nu dit grote verschil in eigenschappen?

Diamant zowel als grafiet zijn gekristalliseerde stoffen. De koolstofatomen nemen in die kristallen geordende plaatsen t.o.v. elkaar in en zijn daarbij onderling door krachten gebonden, die de mate van vastheid der stof bepalen; hoe sterker die bindingskrachten, hoe steviger de stof.

Beschouwt men de structuur van het diamant- en van het grafietkristal (zie fig. 1 en fig. 2), dan blijkt, dat bij diamant de koolstofatomen in alle richtingen op dezelfde wijze gebonden zijn. Het grafietkristal heeft een andere bouw; hierin komen lagen voor waarin de koolstofatomen onderling sterk gebonden zijn, maar tussen die lagen, die op een aanzienlijk grotere afstand van elkaar gelegen zijn, heersen veel zwakkere bindingen.

Bij het uitoefenen van een kracht op een grafietkristal glijden die lagen over elkaar heen en dit veroorzaakt het zachte, vette gevoel, als men grafiet tussen de vingers wrijft. Een diamantkristal laat zich

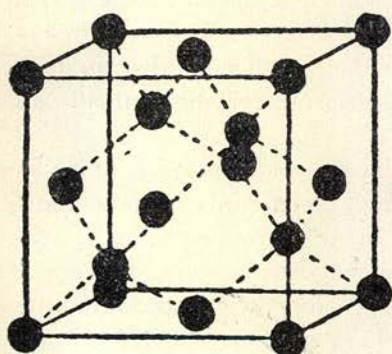


Fig. 1. Kristalrooster van diamant

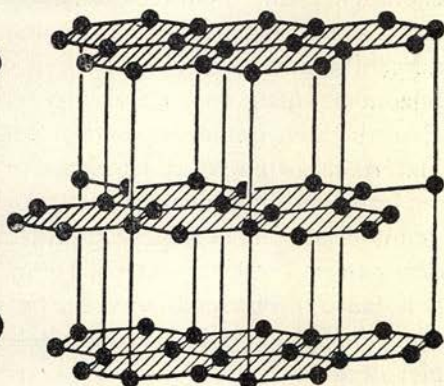


Fig. 2. Het kristalrooster van grafiet

echter niet gemakkelijk vergruizen; de in alle richtingen gelijk werkende, en in dit geval zeer sterke, bindingskrachten verzetten zich daartegen en maken het diamant tot een zeer harde stof.

Waarop hier bij grafiet en diamant in het kort gewezen werd, namelijk dat het verschil in mechanische eigenschappen van deze beide stoffen verklaard kan worden uit de wijze waarop de atomen t.o.v. elkaar georiënteerd en aan elkaar gebonden zijn, geldt algemener. **Het zoeken naar het verband tussen de structuur en de eigenschappen van een stof** staat bij de materiaalkennis thans terecht op de voorgrond. Niet alleen dat men naar de verklaring zoekt van de eigenschappen aan de hand van de structuur, maar men gaat reeds omgekeerd te werk. Indien men een stof met een bepaalde eigenschap wil hebben, zoekt men naar een stof met een structuur, waarvan men een dergelijke eigenschap verwachten kan. Als zo'n stof nog niet bestaat, dan tracht men aan een reeds bestaan-

de stof structureel wat te veranderen; soms gaat men zelfs nog verder en tracht een nieuwe stof te maken met de gezochte structuur.

De kunststoffen hebben het o.a. aan een dergelijke gang van zaken te danken, dat zij stormenderhand een groot toepassingsgebied hebben kunnen vinden.

Niet alleen voor het vervaardigen van de materialen heeft deze richting in de materiaalkennis zijn waarde, ook degene, die de materialen toepast heeft daarvan nut. Het kunnen steunen op een verklarend inzicht in de structuur van de materialen staat tegenover de droge kennis van los van elkaar staande eigenschappen en chemische samenstellingen der materialen; het eerste zal het juiste toepassen en beoordelen van de materialen ten goede komen. Een dergelijke meer algemene basis voor de materiaalkennis is in het bijzonder nuttig voor de verbruikers der tandheelkundige materialen, die zich immers tegenover een zo grote verscheidenheid van materiaalsoorten geplaatst zien.

Het is om die redenen wenselijk dat de tandarts zijn kennis van de materialen moet kunnen grondvesten op enig inzicht in de bouw der materie in het algemeen. De moderne chemie en physica hebben daaromtrent reeds zoveel als gemeengoed naar voren weten te brengen, dat het ook de academisch gevormde, wiens studierichting niet deze beide vakken direct betreft, in staat stelt tot een nuttig inzicht op dat gebied te kunnen komen.

De eerste hoofdstukken zullen daarom gewijd zijn aan de bouw van de vaste stoffen in het algemeen.

HOOFDSTUK II

DE BOUW VAN VASTE STOFFEN

§ 1. *Realiteit der atomen*

De scheikunde geeft aan, dat in de natuur ruim 90 chemische **elementen** voorkomen, waaruit alle voorkomende stoffen zijn samengesteld. De elementen op hun beurt denkt men zich opgebouwd uit **atomen**; dat waren bij **definitie** aanvankelijk de kleinste gelijksoortige deeltjes waarin men zich een element te verdelen dacht. Maar ook de atomen heeft men niet ongedeeld gelaten; men heeft er een positief geladen kern met daaromheen een wolk van negatief geladen electronen in leren onderscheiden. Dat thans de atoomkernen aan de beurt zijn om verder gesplitst te worden, daarover berichten bijna dagelijks de couranten.

Bij de atomen blijvende, dringt zich de vraag op: hoe is men tot hun realiteit, hun werkelijk bestaan, gekomen?

Uit het feit, dat de chemische elementen bij het vormen van verbindingen steeds in constante gewichtsverhoudingen met elkaar reageren, heeft men de **verbindingsgewichten** der verschillende elementen kunnen vaststellen; dat zijn dus de gewichtsverhoudingen, waarin de elementen met elkaar verbindingen aangaan.

Bij definitie heeft men toen als het **atoomgewicht** van een element aangenomen, het verbindingsgewicht van een element als men het verbindingsgewicht van waterstof op 1 stelt (later heeft men daartoe het element zuurstof genomen, waarvan men het atoomgewicht op 16,000 stelde). En eveneens bij definitie werd een **gram-atoom** van een element bepaald als het aantal grammen, dat gelijk is aan het atoomgewicht; b.v. een gramatoom zwavel is 32 gram, zijnde het atoomgewicht van zwavel 32.

Dit alles leerde echter niets omtrent het eventuele werkelijke bestaan van de atomen; het was zuiver hypothese.

De realiteitsvraag kwam verder toen men wist aan te geven, dat een gramatoom van alle elementen hetzelfde aantal atomen bevat en wel $6,03 \times 10^{23}$, (**het Avogadrogetal**); daarmee kan men immers b.v. het gewicht van een atoom uitrekenen. Deze belangrijke natuurconstante, het Avogadrogetal, heeft men langs verschillende, van elkaar onafhankelijke, wegen kunnen bepalen en daarbij steeds dezelfde waarde gevonden, hetgeen de juistheid van dit getal boven twijfel stelt.

Eén van deze wegen, en wel die, waarbij men gebruik maakt van interferentieverschijnselen, die optreden als men een smalle Röntgenstraal door een kristallijne stof laat gaan, zal nader besproken worden.

Eerst echter de vraag: bij welke afmetingen komt men terecht als men zich naar de wereld van de atomaire dimensies gaat begeven en welke lengtemaat wordt daar gebruikt?

Naar de microcosmos gaande wordt de kleinste lengtemaat der macrocosmos, de millimeter, een te grove lengte-eenheid. Men ging er daarom toe over de mm in duizend delen te verdelen en gebruikt deze nieuwe lengtemaat, de **mikron**, μ (mu), in de wereld der microscopische dimensies. Voor de submicroscopische wereld was de mikron echter weer te grof. De mikron werd op zijn beurt in duizend stukjes gedeeld en zo ontstond de **millimikron**, de **m** μ , die dus gelijk is aan $1/1000 \times 1/1000$ mm = 1 miljoenste mm. Voor

de wereld der atomaire dimensies ging men nog een stap verder, zij het niet meer zo'n grote stap. Hier bedient men zich van een lengte-eenheid, genaamd de **Ångström-Eenheid**, die $1/10$ m μ is.

1 ÅE is dus het tienmillioenste deel van een millimeter.

Stelt men zich een atoom als een bol voor, hetgeen een te verdedigen geschematiseerde voorstelling is, dan schommelt de atoomdiameter van de verschillende elementen tussen 2 tot 5 ÅE. Dit is dus de wereld waar wij naar toe moeten; en welke fysieke hulpmiddelen staan ten dienste om tot die microcosmos door te dringen?

§ 2. *Oplossend vermogen van het microscoop*

Van het gewone microscoop leert men bij de natuurkunde, dat het oplossend vermogen, d.i. het kleinste deeltje dat daarmee nog zichtbaar gemaakt kan worden, ongeveer $0,2 \mu$ **groot** is.

Het is de natuurkundige Abbe geweest die de formule voor het oplossend vermogen van een microscoop gegeven heeft:

$$y = \frac{\lambda}{2 A} = \frac{\lambda}{2 \times n \sin \frac{\alpha}{2}}$$

waarin y = de afmeting van het deeltje

λ = de golflengte van het gebruikte licht

n = de brekingsindex van het milieu waarin het object zich bevindt (gewoonlijk in de lucht, bij gebruik van olie-immersie in olie)

α = de hoekapertuur van het objectief

A = de numerische apertuur van het objectief ($A = n \sin \frac{\alpha}{2}$)

Bij invoering van de getallen:

$\lambda = 0.6 \mu$, dat is het gemiddelde tussen $0.4 - 0.8 \mu$, zijnde dit de golflengten die aan weerszijden het zichtbare spectrum begrenzen

$n = 1.5$, de brekingsindex van de immersie-olie.

$\alpha = 180^\circ$, de theoretisch grootst mogelijke hoekapertuur van het objectief

dus:

$$y = \frac{0.6 \mu}{2 \times 1\frac{1}{2} \sin 90} = \frac{0.6 \mu}{3} = 0.2 \mu.$$

Uit deze formule blijkt, dat hoe kleiner de golflengte van het gebruikte licht is, hoe groter het oplossend vermogen wordt.

Met **ultraviolet licht**, dat een golflengte heeft kleiner dan 0.4μ , komt men inderdaad iets verder, maar zelfs bij benadering bereikt men daarmee de atomaire dimensies niet, die immers bij 2 Ångström-Eenheden liggen en dus nog een factor 1000 kleiner zijn. In **Röntgenstralen** heeft men golven met een golflengte in de buurt van 1 \AA , en hiermede kan men inderdaad de wereld der atomen binnendringen.

Maar juist door hun kleine golflengte kunnen Röntgenstralen in de glazen lenzen van een microscoop niet meer afgebogen worden, waardoor zij niet tot beeldvorming kunnen worden gebracht. Een Röntgenstraal gaat ongebroken door de glazen lenzen heen.

Bij gebruik van Röntgenstralen moet daarom een andere fysieke eigenschap van de electromagnetische golven te hulp geroepen worden en wel het **interferentieverschijnsel**, teneinde daarmee nader te kunnen worden ingelicht omtrent de realiteitsvraag bij de atomen.

Alvorens daarop in te gaan vragen eerst het ultramicroscoop en het electronenmicroscoop als fysieke hulpmiddelen om de microcosmos binnen te dringen, enige aandacht.

§ 3. *Het ultramicroscoop*

Laat men een lichtstraal gaan door een heldere, maar wat opaliserende, oplossing, zoals vele colloïdale oplossingen dat geven, dan neemt men daarin duidelijk de loop van de lichtstraal waar. Dit effect, dat de naam draagt van Tyndall-effect, is analoog aan het verschijnsel dat men b.v. in een bioscoopzaal kan constateren; de lichtstraal uit het projectietoestel wordt zichtbaar door de rook en stofdeeltjes in de zaal.

De colloïdale deeltjes in een vloeistof verstrooien het licht dat op hen valt; brengt men onder een microscoop een met een colloïdale oplossing gevulde kleine cuvet, waardoorheen men zijdelings een sterk geconcentreerde lichtstraal laat gaan, dan neemt men door het microscoop kijkend tegen een donkere achtergrond puntsgewijze lichtopflinkingen waar. Deze heldere lichtpunten vertonen o.a. op fraaie wijze de Brown'se beweging. Het zijn de colloïdale deeltjes in de oplossing, die op deze wijze hun aanwezigheid, zij het indirect demonstreren en wel deeltjes van dusdanig kleine afmetingen, dat zij onder gewone omstandigheden bekeken onder het microscoop,

niet direct waarneembaar zijn. Voor de meeste colloïdale stoffen moeten de deeltjes minstens 30 à 40 $\mu\mu$. groot zijn willen zij ultra-microscopisch indirect waarneembaar zijn. Dit is dus een factor 5 à 6 kleiner dan de afmeting van het kleinste met een gewone microscoop nog waarneembaar deeltje, waarvan de afmeting immers zoals hier boven werd aangegeven 0.2 μ was d.i. 200 $\mu\mu$.

§ 4. *Het electronenmicroscop*

Voor tal van gebieden heeft dit moderne instrument grote waarde; ook in de tandheelkundige literatuur treft men reeds publicaties over onderzoekingen, waarbij van het electronenmicroscop gebruik is gemaakt. Het is dan ook nuttig, wat georiënteerd te zijn over de werking en de mogelijkheden van dit instrument.

Electronen zijn negatief geladen deeltjes en een stroom van electronen, die zich vrij door de ruimte (in vacuum) beweegt, wordt, omdat het hier elektrisch geladen deeltjes betreft, zowel in een **magnetisch als in een elektrisch veld** afgebogen. Hier geschiedt

dan feitelijk hetzelfde als bij de buiging van gewone lichtstralen door de glazen lenzen van het microscoop, en daarop berust de mogelijkheid om electronenstralen tot beeldvorming te brengen, hetgeen bij Röntgenstralen niet mogelijk is.

De stroom van electronen, de electronenstraal, verkrijgt men door electronen, die, zoals dat ook in een Röntgenbuis gebeurt, uit een gloeidraad naar buiten treden, in een sterk elektrisch veld een grote snelheid te geven. In het electronenmicroscop wordt de electronenstraal, na door het te onderzoeken object te zijn gegaan, door een reeks van lenzen, geen glazen maar **magnetische lenzen** in dit geval, tot beeldvorming gebracht (fig. 3).

Het gevormde beeld wordt op een fotografische plaat opgevangen, dan wel op een fluorescerend scherm zichtbaar gemaakt.

De moderne physica leert een electronenstraal tevens als een golfbeweging op

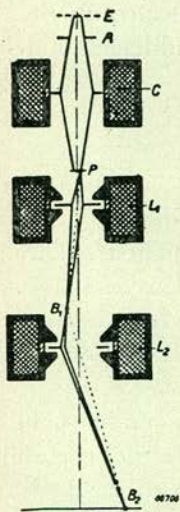


Fig. 3. Schema van de stralengang bij het electronenmicroscop. E, electronenbron; A, diafragma; C, magnetische condensor; P, object; L₁, magnetische „objectief,“; L₂, magnetisch „oculair“; B, beeld op fluorescentiescherm of fotografische plaat

te vatten. De golflengten die hierbij optreden zijn uiterst klein, ongeveer $100 \times$ kleiner nog dan die bij Röntgenstralen. (Het betreft hier echter geen golven van electromagnetische aard zoals bij lichtstralen en Röntgenstralen; later komt dit nog ter sprake).

Het oplossend vermogen van een electronenmicroscop is belangrijk groter dan dat van een gewoon microscoop. Konden met een gewone microscoop uiterlijk deeltjes van 0.2μ waargenomen worden, bij het electronenmicroscop is dit teruggebracht tot deeltjes van 0.002μ . ($= 20 \text{ \AA}$).

Een beperking bij electronenmicroscopie is, dat deze stralen een zeer gering doordringingsvermogen hebben, hetgeen niet te verwonderen is aangezien een electronenstraal tenslotte een stroom is van materiële deeltjes, zij het van deeltjes met een zeer kleine massa (de massa van een electron is 9.1×10^{-28}). De dikte van het object, dat men met het electronenmicroscop wil bestuderen, mag niet meer zijn dan 1μ . Indien men oppervlakken, b.v. een metaal- of een tandoppervlak met dit microscoop wil onderzoeken, dan worden daarvan eerst afdrucken genomen. Na onder een hoge druk met een kunsthars een afdruk van het te onderzoeken oppervlak te hebben gemaakt, wordt op die afdruk in een zeer hoog vacuum een kwarts-laagje gesublimeerd tot een dikte van $\pm 1 \mu$. Door het oplossen van het kunsthars krijgt men dit dunne vliesje (replica) vrij, hetwelk men dan met doorvallende electronenstralen bestudeert.

§ 5. *Röntgeninterferentiebeelden van kristallen*

Zoals reeds opgemerkt werd kunnen Röntgenstralen niet tot beeldvorming gebracht worden, en berust hun toepassing om iets omtrent de realiteit der atomen en hun rangschikking in kristallen te ontsluiëren op het verschijnsel der interferentie.

De aethertrillingen van lichtstralen, ultraviolette of Röntgenstralen kunnen elkaar opheffen; zij doen dit als twee stralen, die cohaerent moeten zijn (van eenzelfde lichtpunt afkomstig) bij samentreffen $\frac{1}{2}$ in phase met elkaar verschillen.

Twee cohaerente lichtstralen, waarvan de ene aan de bovenzijde, de andere aan de onderzijde van een uiterst dun glazen plaatje teruggekaatst worden, doven elkaar uit als het optisch wegverschil tussen beide stralen gelijk is aan een halve golflengte of een oneven veelvoud daarvan. Gebruikt men wit licht dan ontstaan spectraal kleuren, omdat de verschillende golflengten van het witte licht

afzonderlijk worden uitgedoofd; de regenboogkleuren bij een zeepbel ontstaan door een dergelijke interferentie. De elementaire natuurkunde der middelbare school behandelt ook de buigings- en interferentieverschijnselen die optreden als men een lichtstraal door een **tralie of rooster** laat gaan (fig. 4).

Een tralie maakt men door op een glazen plaatje een groot aantal fijne lijnen te krassen op regelmatige maar kleine afstand van elkaar b.v. een paar honderd krassen op 1 mm.

Doorloopt een dunne lichtbundel van evenwijdige lichtstralen een dergelijk rooster, dan treden er interferentieverschijnselen op, waarvan men het beeld op een fotografische plaat of een scherm kan opvangen.

Dit interferentiebeeld geeft, als men monochromatisch licht gebruikt, een reeks van donkere en lichte strepen te zien. Uit de af-

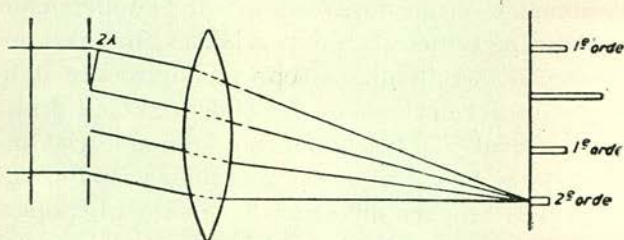


Fig. 4. Buiging door een tralie. De van links komende lichtstraal (waarvan slechts twee evenwijdige stralen getekend zijn) doorloopt het rooster, waarvan de krassen op de tekening schematisch door de onderbroken streeplijn zijn aangegeven. Een lens ontwerpt een beeld op het aan de rechterzijde getekende scherm

stand van de interferentielijnen op het scherm, welke afstand men meten kan, is men in staat de afstand tussen de krassen van het tralie, de zogenaamde **roosterconstante**, nauwkeurig te berekenen.

Nu hebben Röntgenstralen golflengten, die vijf duizend maal kleiner zijn dan de golflengten van het zichtbare licht. Om van stralen met dergelijke kleine golflengten buigings- en interferentieverschijnselen te krijgen met een tralie of rooster, zou men de krassen van zo'n tralie zeer dicht op elkaar moeten aanbrengen en wel zo dicht dat een dergelijke tralie niet te maken is.

Maar hier komt de natuur de physicus tegemoet. In de kristallijne stoffen namelijk worden hem natuurlijke tralies gegeven, die zodanig fijn zijn, dat er inderdaad buiging optreedt als een smalle Röntgenstraal door een kristal geleid wordt en het interferentiebeeld dat daarbij ontstaat kan men op een fotografische plaat vastleggen.

Een verantwoorde schematische voorstelling doet de atomen als harde bollen opvatten, die in een kristal op regelmatige wijze t.o.v. elkaar gerangschikt zijn. Afhangende van de atoomdiameters der in een kristal voorkomende atoomsoorten en van de aard hunner onderlinge bindingskracht kan dat op zeer vele wijzen. Schudt men b.v. een doos, waarin zich gelijkgroote knikkers bevinden, dan rangschikken deze zich in rijen naast en op elkaar. De rangschikking, die men aldus bij de knikkers verkrijgt, is inderdaad een rangschikking die men in de natuur bij de kristallen van enkele eenvoudige stoffen aantreft.

De rijen van atomen kan men opvatten als de strepen of krassen van een tralie (fig. 5). Dergelijke evenwijdige strepen van atoomrijen komen in zo'n kristallaag niet alleen in één richting voor, zoals

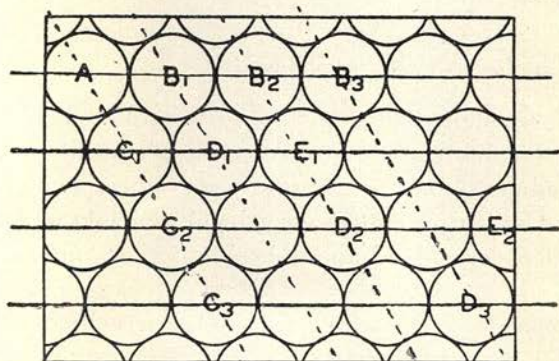


Fig. 5. De bollen $AB_1B_2B_3$; $AC_1C_2C_3$; $AD_1D_2D_3$; AE_1E_2 liggen op rechte rijen op gelijke afstanden van elkaar

bij het eenvoudige op glas gekraste tralie van zoëven, maar in verschillende richtingen laten zich deze rijen hier aanwijzen. De afstand tussen de evenwijdige rijen atomen in een kristal bedraagt slechts enige Ångström-Eenheden.

Bij het op glas gekraste tralie heeft men slechts met een tweedimensionaal tralie te maken. In de kristallen treft men onder verschillende hoeken met elkaar vlakken aan, waarin de atomen gerangschikt liggen in rijen. Naast de buigingsverschijnselen door de atoomrijen in die verschillende vlakken, wordt de smalle Röntgenstraal, die het kristal doorloopt, bovendien nog tussen verschillende vlakken in het kristal heen en weer gereflecteerd. Het interferentiebeeld dat tenslotte resulteert en dat men op een scherm opvangt is veel ingewikkelder dan dat van het gewone licht bij het op glas ge-

kraste tralie. Doch evenals men daarbij door uitmeting van het interferentiebeeld de afstand der traliestrepn (de roosterconstante) kan uitrekenen, stelt het Röntgeninterferentiebeeld bij kristallen, in staat daaruit de roosterafmetingen in het kristal te berekenen. Dit zijn inderdaad geen eenvoudige berekeningen, die tot de taak van de physicus en van de kristallograaf behoren.

Langs deze weg kan men de afstand tussen de „traliestrepn” in het kristal vaststellen en heeft dan in werkelijkheid de afstand tussen de atomen in het kristal leren kennen. Dat betekent dat men kan uitrekenen hoeveel atomen er op een lengte-eenheid in het kristal voorkomen, en ook hoeveel er in de volume-eenheid en de gewichtseenheden voorkomen. Zo vindt men dus met behulp van deze methode het aantal atomen per gramatoom, welk aantal het gezochte getal van Avogadro is.

§ 6. *Laue- en Debye-Scherrer-diagrammen*

De Röntgenbuigingsbeelden van vaste stoffen hebben bij het materiaalonderzoek een nuttige toepassing gevonden; in menige tandheelkundige publicatie wordt over onderzoekingen verslag gedaan, waarbij van deze methode gebruik gemaakt werd.

Hoe worden dergelijke buigingsbeelden opgenomen en hoe zien zij eruit?

Een schematische voorstelling van de bij dergelijke onderzoekingen gebruikte opstelling geeft fig. 6. Het is de opstelling, die door **L a u e** het eerst gebruikt werd en de verkregen interferentiebeelden noemt men **Laue-diagrammen**.

Veronderstellen wij dat hier een Zinkblende (Zn S)-kristal, dat in kubische vorm kristalliseert, onderzocht wordt. Een smalle Röntgenstraal (diameter 1 mm) doorloopt het kristal, dat kristallogra-

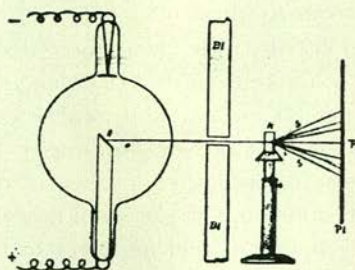


Fig. 6. A: anode. Bl: spleet, die slechts een nauwe bundel doorlaat. K: kristal S.S.: afgebogen stralen. P: centrale vlek. Pl: plaat

fisch georiënteerd op een statiefje is opgesteld. Het kristal wordt namelijk zo opgesteld, dat de Röntgenstraal evenwijdig aan een ribbe van de kubus door het kristal heen gaat.

Het buigingsbeeld wordt op een fotografische plaat opgevangen en fig. 7 geeft het Röntgenbuigingsbeeld, het Laue-diagram, dat aldus bij het ZnS-kristal ontstaat. Het bestaat uit een reeks van

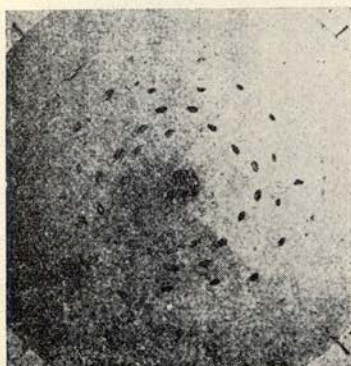


Fig. 7

om een middelpunt gegroepede zwarte punten; dit zijn de plaatsen waar de Röntgenstraal de fotografische plaat getroffen heeft. Inplaats van een enkele donkere stip in het midden, die bij een ongestoorde doorgang van het Röntgenlicht zou ontstaan, vertoont het buigingsveld deze reeks van georiënteerde zwarte punten. Uit hun onderlinge ligging, hun afstand van het middelpunt, en hun mate van zwarteheid zijn de physicus en de kristallograaf in staat zich een duidelijk beeld te construeren van de ligging en de afstand der atomen en der vlakken in het kristal t.o.v. elkaar.

Zou men bij deze opstelling het kristal over een bepaalde hoek gedraaid neerzetten, dan doorloopt de Röntgenstraal het ZnS-kristal in een andere kristallografische richting; men verkrijgt dan een wat verdraaid buigingsbeeld, dat echter specifiek is voor die richting. Laat men gedurende het opnemen van de buigingsfoto, dat ongeveer een uur duurt, het kristal langzaam ronddraaien, dan ontstaat een buigingsbeeld, dat concentrische cirkels te zien geeft. Ook uit een dergelijk interferentiebeeld laten zich de structuur en de afmetingen van het kristalrooster vaststellen.

Een variatie op „de draaikristalmethode” is, dat men inplaats van één kristal, een buisje met **kristalpoeder** van de te onderzoe-

ken stof gebruikt en door de smalle Röntgenstraal laat doorlopen. De kleine kristalletjes van het poeder liggen schots en scheef door elkaar, zodat de Röntgenstraal ongeveer zoals bij een draaiend

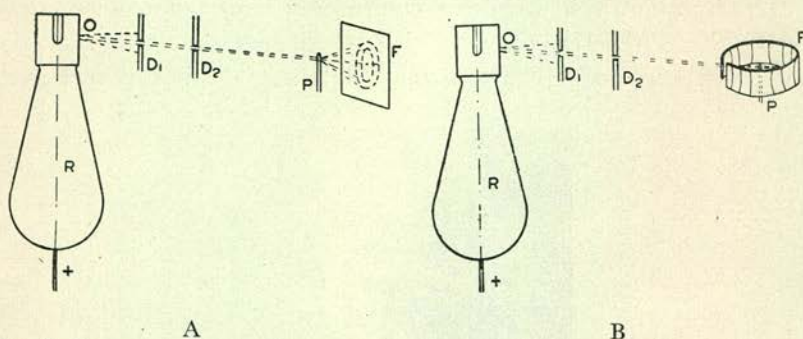


Fig. 8. R = röntgenbuis, O = venster, D₁ en D₂ diafragma's, P = buisje met kristalpoeder, F = vlakke film (fig. 8A) en concentrische film (fig. 8B)

kristal de kristallografische structuur in alle richtingen doorloopt. Dit is de methode die Debye en Scherrer toepassen. Fig. 8 geeft schematisch de opstelling aan bij Debye-Scherrer-opnamen. Door het concentrisch aanbrengen van de filmstrook rond het te onderzoeken kristalpoeder, wordt slechts een deel van bui-

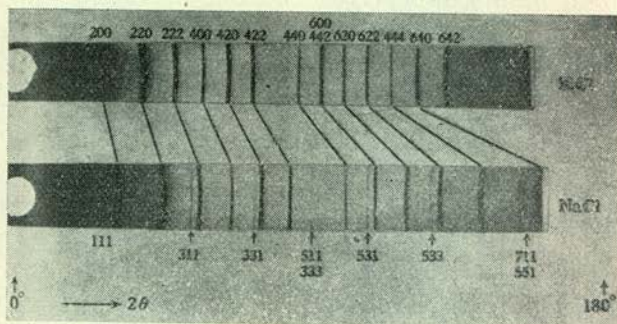


Fig. 9. Debye-Scherrer-opname van NaCl en KCl

gingscirkels op de film vastgelegd; fig. 9 is een voorbeeld van een Debye-Scherrer-diagram.

Iedere gekristalliseerde stof geeft een voor de betreffende stof karakteristiek Debye-Scherrer beeld en men is in staat om aan de hand van de Debye-Scherrer foto een onbekende stof te identificeren. Een voordeel van deze analysemethode is o.a., dat men uiterst weinig van de te onderzoeken stof nodig heeft en dat dit bij het onderzoek niet verloren gaat.

§ 7. *De kristalsystemen*

Voor een begrip van de inwendige bouw der verschillende materialen is het gewenst een weinig georiënteerd te zijn omtrent de systematiek der kristalvormen en omtrent de bouw van de kristallen.

De wetenschap die zich bezighoudt met de bestudering der kristalvormen en de bouw der kristallen is de **kristallografie**. De verschillende stoffen kristalliseren in zeer uiteenlopende vormen, b.v. kubische, prismatische, octaedrische en vele andere soms vrij ingewikkelde geometrische vormen.

Men treft in de natuur, door groeistoringen, meestal afwijkingen aan van de ideale kristalvormen. Zonder dat men bepaalde voorzorgen neemt om bij het uitkristalliseren een ongestoorde groei in alle richtingen te garanderen krijgt men geen zuiver kubische, prismatische, octaedrische, etc. kristallen. De kristallograaf echter herkent door ervaring en eventuele meting van de hoeken, die de verschillende kristalvlakken met elkaar maken ook aan een vervormd kristal de ideale grondvorm.

Als men een bepaalde kristalvorm wil beschrijven, begint men naar een stelsel van **drie coördinatie-assen** in de kristalvorm te zoeken, waarmede men op de eenvoudigste wijze de aan de kristalvorm voorkomende vlakken, ribben en hoekpunten kan aangeven.

Naar de aard van dit assenstelsel worden de kristalvormen in een **zestal kristalsystemen** ondergebracht.

Men spreekt hierbij van **gelijkwaardige** en van **ongelijkwaardige** assen; gelijkwaardige assen zijn assen waarvan door de kristalvlakken even grote stukken worden afgesneden, en ongelijkwaardig zijn twee assen wanneer de kristalvlakken van de ene as een korter of langer stuk afsnijden dan van de andere.

De zes kristalsystemen met opgave van hun assenstelsel zijn:

1. **regulaire systeem**, drie gelijkwaardige onderling loodrecht op elkaar staande assen.

2. **tetragonale systeem**, twee gelijkwaardig loodrecht op elkaar staande assen, met loodrecht daarop één derde ongelijkwaardige as.

3. **hexagonale systeem**, drie gelijkwaardige assen die in een vlak gelegen zijn en hoeken van 120° met elkaar maken en loodrecht daarop een ongelijkwaardige as.

4. **rhombische systeem**, drie ongelijkwaardige loodrecht op elkaar staande assen.

5. **monokliene systeem**, drie ongelijkwaardige assen, waarvan twee loodrecht op elkaar.

6. **trikliene systeem**, drie ongelijkwaardige assen, die willekeurige hoeken met elkaar maken.

Een zestal eenvoudige kristalvormen, respectievelijk behorende bij de zes verschillende kristalsystemen, worden in fig. 10 als voorbeeld gegeven.

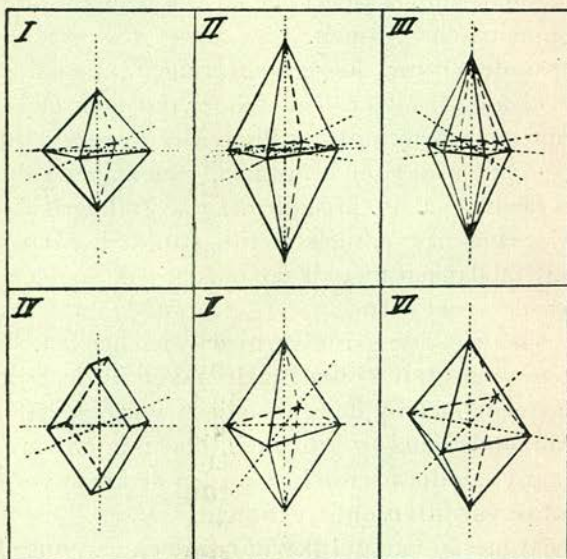


Fig. 10

- I regulaire bipyramide, van de drie hoofdassen worden door alle vlakken gelijke stukken afgesneden.
- II tetragonale bipyramide, van de verticale hoofdas wordt een groter (of een kleiner) stuk afgesneden.
- III hexagonale bipyramide, van de verticale hoofdas wordt een groter (of een kleiner stuk) afgesneden dan van de drie horizontale hoofdassen.
- IV rhombische prisma, van de drie loodrecht op elkaar staande hoofdassen worden door de kristalvlakken ongelijke stukken afgesneden.
- V monokliene bipyramide, ongelijke stukken worden van de hoofdassen door de vlakken afgesneden.
- VI trikliene bipyramide, van de drie hoofdassen, die willekeurige hoeken met elkaar maken worden ongelijke stukken afgesneden.

De zes kristalsystemen worden onderverdeeld in **klassen**. Deze klassen onderscheiden zich van elkaar door het aantal **symmetrie-elementen**, dat men aan de kristalvorm kan vaststellen.

Symmetrie-elementen zijn: **vlakken van symmetrie**, **assen**

van symmetrie (2-tallig, 3-tallig, 4-tallig of 6-tallig) en het centrum van symmetrie.

Wat een vlak van symmetrie is bij een kristalvorm behoeft amper toelichting; het verdeelt een kristalvorm in twee gelijke helften, die elkaars spiegelbeeld zijn. Als men om een as van symmetrie een kristalvorm laat draaien, dan bepaalt het aantal malen, dat bij draaiing over 360° dezelfde stand wordt ingenomen, de „talligheid” van die as. De as b.v. die men door een kubus aanbrengt loodrecht op het midden van één zijner zes vlakken is een as van viertallige symmetrie. Viermaal neemt de kubus bij een draaiing over 360° om die as dezelfde stand in. De as die bij een kubus de middelpunten van twee tegenover elkaar staande ribben verbindt, is tweetallig. Een voorbeeld van een drietallige as vindt men eveneens bij een kubus als men door twee tegenover elkaar gelegen hoekpunten een as aanbrengt. Zestallige assen vindt men alleen bij het hexagonale stelsel.

Een centrum van symmetrie treft men o.a. in een kubus maar b.v. niet in een pyramide. Ieder vlak, ribbe of hoekpunt van de kubus heeft t.o.v. het middelpunt der kubus symmetrisch aan de andere zijde eenzelfde vlak, ribbe of hoekpunt. Dit middelpunt is een centrum van symmetrie, en een dergelijk centrum vertoont b.v. een pyramide niet.

Het hier zeer in het kort aangegeven stelsel van kristalssystemen en klassen kan alle voorkomende kristalvormen onderbrengen. De kristalvormen worden met Griekse namen, die veelal betrekking hebben op hun uiterlijke vorm aangeduid, b.v. prisma, kubus, tetraeder (viervlak), octaeder (achtvlak), dodekaeder (twaalfvlak) etc. (er komen ook veel ingewikkelder vormen voor, die dan ingewikkelder namen dragen).

Als men b.v. bij de bespreking van het in de tandheelkunde zoveel gebruikte gips leert dat het ongebrande, in de natuur als delfstof voorkomende gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) monokliene kristallen heeft en de gebrande gips (ongeveer $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, het hemihydraat) rhombische kristallen heeft, dan is men aan de hand van de hier gegeven uiteenzettingen over de kristalssystemen georiënteerd wat dit betekent.

§ 8. *Kristallijne stoffen*

De kristallijne stoffen, waarvan enige voorbeelden zijn: marmer, alle metalen, paraffine, de meeste gesteenten etc., zijn in hun ge-

bruikelijke vorm **microkristallijn**. Zij bestaan uit talrijke kleine kristallen, die in allerlei richtingen door elkaar liggen en met grillige vlakken aan elkaar grenzen. Die kleine kristallen noemt men de **kristallieten**. De mechanische eigenschappen van een kristallijne stof worden dus niet alleen bepaald door de rangschikking en bindingskrachten in de kristallieten, maar tevens door de aard, vorm,

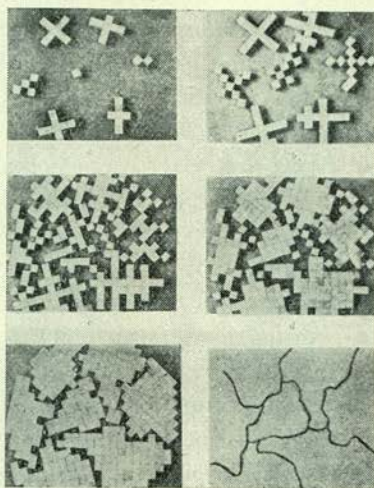


Fig. 11. Het ontstaan en de structuur van een micro-kristallijne stof

grootte der kristallieten en door de cohaesie-krachten die er tussen de kristallieten onderling heersen.

Fig. 12 geeft een schematische voorstelling van het ontstaan en de opbouw van een microkristallijne stof.

Men spreekt van een „**een-kristal**” of „**enkel-kristal**”, wanneer men met slechts één enkel kristal te maken heeft. Voor wetenschappelijke doeleinden worden soms voorwerpen, b.v. een staaf, waarmede trekproeven worden genomen, uit een „**één-kristal**” vervaardigd.

§ 9. *Microscopische bouw der kristallen*

De **bouwstenen** van een kristal kunnen zijn **atomen** (voorbeeld: diamant), **ionen** (voorbeeld: een NaCl-kristal) of **moleculen** (voorbeeld: suikerkristal). Deze bouwstenen zijn volgens een bepaald **patroon** in het kristalrooster gerangschikt.

Een gebloemd behang kent men als men de bepaalde combinatie van bloemen, het patroon, kent; door parallel verschuiving van dit patroon langs de muur kan men zich het gehele behang voorstellen.

De **elementaircel** van een kristal is het patroon waaruit men door parallel verschuiving, doch thans door de ruimte, het kristalrooster opgebouwd kan denken. Men kent een kristalrooster als men de desbetreffende elementaircel kent. De wijze van ordening der bouwstenen in de kristallen is bij iedere stof verschillend; het patroon, de elementaircel, wordt bepaald door de **vorm** en de **afmeting** van de atomen, moleculen of ionen, die het beschouwde kristal opbouwen. Verder hebben daarop invloed de **aard**, **richting** en **grootte** van de krachten die deze bouwstenen samenbinden. Dit kunnen ongerichte krachten zijn b.v. electrostatische krachten, of gerichte krachten, zoals valentiekrachten bij het koolstofatoom; (deze en andere bindingskrachten zullen later besproken worden).

Er is een grote verscheidenheid van elementaire cellen; iedere gekristalliseerde stof heeft zijn karakteristiek patroon. Verschillende stoffen kunnen wel volgens eenzelfde patroon, dus met eenzelfde elementaircel, kristalliseren, maar dan onderscheiden zij zich nog van elkaar door de afstand tussen hun atomen, moleculen of ionen; de **roosterconstante** is dan verschillend.

Het **coördinatiegetal** bij een roostertype is het aantal directe naburen, waarmede een bepaald atoom of molecule direct verbonden is. Is het coördinatiegetal 8, dan is ieder atoom of molecule in het kristal direct met 8 naburen verbonden.

In fig. 12 worden drie eenvoudige elementaire cellen als voorbeeld gegeven en wel: **de gecenterde kubus** (coördinatiegetal 8), **de kubische dichte bolpakking of vlak gecenterde kubus** (coördinatiegetal 12), **de hexagonale dichte bolpakking** (coördinatiegetal 12).

De kubische dichte bolpakking is de meest dichte pakking, die men aan bollen kan geven. Als men een stel knikkers in een doosje zo dicht mogelijk op elkaar wil brengen, hetgeen men door schudden kan gedaan krijgen, dan ontstaat een dergelijke oriëntering van bollen t.o.v. elkaar. In de kristallen van de metalen komen de drie hier vermelde elementaire cellen als regel voor. Dat vele metalen eenzelfde kristalrooster hebben, heeft, zoals dit later zal worden besproken, belangrijke gevolgen.

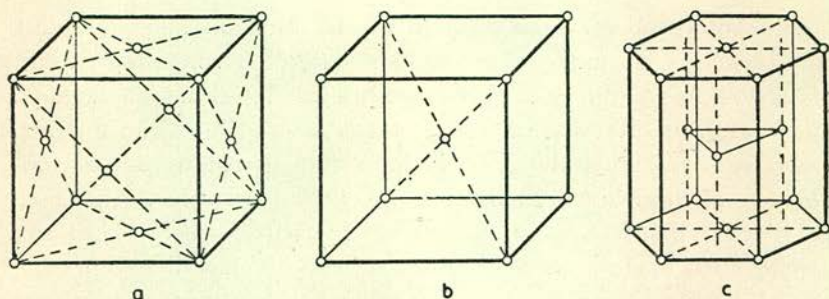


Fig. 12. Bij de vlak gecenterde kubus of kubische dichte bolpakking (a) bevinden zich in het midden van de zes kubusvlakken zes atomen of moleculen (maar geen in het centrum). Het is de meest compacte wijze waarop men onderling gelijke ballen kan samenpakken. (Coördinatiegetal 12).

Bij de gecenterde kubus (b) zijn de acht hoekpunten van de kubus bezet, terwijl zich in het centrum van de kubus eveneens een atoom of molecule bevindt. (Coördinatiegetal 8).

De hexagonale dichte bolpakking (c), die slechts in de kristallen van het hexagonale stelsel voorkomt, heeft een zeszijdig regelmatig prisma als ruimte-element. Tussen het bovenvlak en het ondervlak van het prisma bevinden zich nog drie atomen of moleculen, waardoor eveneens een zeer dichte bolpakking gevormd wordt. (Coördinatiegetal 12).

§ 10. *Amorfe stoffen*

Bij het uitkristalliseren zoeken de atomen, moleculen of ionen van een stof, gegeven hun vorm en gegeven het type en de grootte van de aanwezige bindingskracht, een dusdanige oriëntering t.o.v. elkaar, dat de energie-inhoud zo klein mogelijk is. Dit belangrijke principe, het streven naar de **geringste energie-inhoud**, beheerst de vorm, die een stof aanneemt.

Dat niet alle stoffen kristalliseren en meerderen **amorf** blijven, d.w.z. dat hun moleculen zich in vaste toestand niet op geordende wijze t.o.v. elkaar oriënteren, heeft meerdere oorzaken. Eén van de hoofdoorzaken is, dat bij amorfe stoffen het energie-verschil tussen de **geordende** en de **ongeordende** toestand niet groot genoeg is om onder de omstandigheden waaronder zo'n stof tot de vaste toestand overgaat, de belemmeringen die het komen tot een geordende rangschikking in de weg staan, te overwinnen. De grootte en de aard van de bindingskracht tussen de moleculen en hun vorm spelen daarbij een overheersende rol.

De hardheid, de vastheid en alle andere mechanische en fysieke eigenschappen van de vaste stoffen, zowel kristallijn als amorf, worden bepaald door de aard en grootte van de bindingskrachten,

die tussen hun bouwstenen, de moleculen, atomen of ionen, heersen.

Het is van belang deze bindingskrachten nader te bezien, en om een bespreking daarvan mogelijk te maken, is het noodzakelijk eerst terug te vallen op wat chemische en physische kennis en wel op de kennis omtrent het periodiek systeem en omtrent de atoombouw.

(Wordt vervolgd)