

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000303983

xxx

882

7.X.51/1901

Mikroskop

Kasofusys



Association internationale pour l'essai des matériaux.

Internat. Verband für die Materialprüfungen der Technik.

Congrès de Budapest 1901.

Kongress in Budapest 1901.

MÉTALLOGRAPHIE ET MÉCANIQUE

par F. Osmond et G. Cartaud.

Metallmikroskopie und Mechanik

von F. Osmond und G. Cartaud.

4/3

Les Matériaux de Construction.

Baumaterialienkunde.

VI^{ème} année. No. 18.

VI. Jahrgang. Heft 18.

STUTTGART 1901.

Redaction: } H. Giessler, Prof^r
Administration: }

Druck: }
Expedition: } Stähle & Friedel.

F. N. 24375.



XXX
882

J-X. 51/1901



nr inw. 1902

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

III 33944

Akc. Nr. 2831/49

Métallographie et mécanique.

Par F. Osmond et G. Cartaud.

A l'ancien partage de la matière entre les trois états solide, liquide et gazeux, tend à se substituer une classification nouvelle et qui ne connaît plus que deux états: l'état amorphe et l'état cristallisé. On parle aujourd'hui de liquides cristallisés et de corps, solides en apparence, qui sont des liquides pour les physicochimistes.

En fait, les deux classifications peuvent subsister côte à côte et nous servir tour à tour. La première, plus superficielle, n'invoque que le témoignage de nos sens; l'autre s'appuie sur des propriétés plus cachées et sur une connaissance plus profonde de la structure. Mais comme c'est précisément la structure des corps qui fait le principal sujet de cette communication, c'est aussi la seconde classification que nous devons mettre au premier plan.

»L'état amorphe«, dit M. *Le Chatelier*¹⁾, »est celui dans lequel toutes les propriétés sont identiques dans toutes les directions autour de chaque point. L'état cristallisé, au contraire, est caractérisé par ce fait que les propriétés de la matière comportant une orientation varient autour de chaque point avec la direction considérée et que cette variation se fait suivant une loi définie, la même en tous les points d'une même masse homogène«; d'où les formes géométriques extérieures et la clivabilité.

Mais un corps donné est rarement formé d'un cristal unique. Nous, constructeurs ou métallurgistes, nous avons toujours affaire, comme nous l'ont appris les classiques travaux du Prof. *Tschernoff*, à des colonies complexes où les cristaux n'ont pas pu se développer librement et se sont mutuellement limités par des faces grossièrement planes en formant des polyèdres pseudo-cristallins que l'on peut nommer des *grains cristallins* ou, pour abrégé, des *grains*.

Ces modes de structure, c'est-à-dire l'absence de structure pour l'état amorphe et la structure à grains cristallins pour l'état cristallisé, sont ceux que la matière prend spontanément sous l'influence des forces moléculaires et, éventuellement, de la pesanteur. Et, pour cette raison, on peut les appeler structures *spontanées* ou *congénitales*.

Mais l'emploi de matériaux bruts de coulée, sans être rare, n'est pas le cas le plus fréquent. Le plus

souvent, nous soumettons nos pièces moulées à un traitement thermique ou à un traitement mécanique ou aux deux, pour en modifier la qualité ou la forme: nous leur donnons ainsi, par l'action de forces extérieures, une structure *artificielle* ou *déterminée* qui se substitue ou se superpose à la structure congénitale. Et, dans tous les cas, quand nous mettons en oeuvre dans nos constructions les pièces finies qui sortent de la forge, ce n'est pas pour les laisser se reposer: c'est pour les soumettre à la loi du travail et de la fatigue qui est aussi celle des êtres vivants. Nous leur demandons de résister à certains efforts que nous tâchons, en maîtres équitables et surtout prudents, de proportionner à leurs forces. Mais ces efforts, modeleurs de la matière, comme ils impriment aux mains, au corps des artisans les stigmates professionnels, tendent à déformer les métaux et à leur imposer une dernière structure artificielle dont la limite, que nous atteignons parfois malgré nous, est la désintégration.

Les modes de structure ainsi imposés aux corps par les forces extérieures et leur combinaison avec les modes de structure spontanés, tel est le sujet que nous essayerons, sinon de traiter, du moins d'esquisser dans cette note. Et, pour mettre un peu d'ordre dans une question aussi touffue, nous examinerons successivement l'action des forces:

- 1° sur les liquides;
- 2° pendant le passage de l'état liquide à l'état solide;
- 3° sur les corps solides amorphes;
- 4° sur les corps solides cristallisés.

L

Liquides.

Les liquides sont ordinairement le type des corps amorphes. Si cependant une goutte d'un liquide est soustraite à l'action de la pesanteur, comme dans les expériences de *Plateau*, par suspension dans un autre liquide, de même densité que le premier et non miscible à lui, cette goutte devient sphérique, c'est-à-dire qu'elle prend une forme géométrique bien définie. Et si plusieurs gouttes semblables se juxtaposent comme les gouttelettes d'huile dans une sauce mayonnaise ou comme les bulles d'air dans l'eau de

¹⁾ Annales des Mines, février 1897.

savon, elles se polyédrisent mutuellement et l'ensemble prend une structure cellulaire très analogue à celle des corps cristallisés considérés comme des amas de grains. Ainsi, dès maintenant, la structure cellulaire nous apparaît comme la structure naturelle des corps amorphes quand on les empêche de se rassembler, les cellules polyédriques étant le résultat de la mutuelle déformation de sphères originelles.

Mais, comme nous l'allons voir, on peut aussi la produire sans l'intervention d'un corps diviseur étranger.

A. Structure déterminée par l'action de la chaleur et de la pesanteur.

Les premières expériences sur les courants de convection dans les liquides ont été faites par *Tyndall* et *von Besold*: on en doit de toutes récentes et de très originales à *M. Bénard*.¹⁾ Nous les décrirons avec quelques détails.

Une couche mince horizontale, primitivement amorphe, d'un liquide quelconque est traversée de bas en haut par un flux de chaleur. Quand le régime permanent est établi, cette couche se trouve divisée en un assemblage de prismes hexagonaux réguliers à axe vertical dont le diamètre est du même ordre de grandeur que l'épaisseur du liquide (Fig 1). C'est la structure cellulaire régulière. Chaque prisme hexagonal ou cellule est un tourbillon fermé. La fig. 2 est une coupe par un azimut d'un tel tourbillon: elle montre les filets liquides et le sens de la circulation. Le liquide chaud s'élève dans la partie voisine de l'axe de la cellule, se refroidit dans les portions des trajectoires voisines de la surface libre où le mouvement est centrifuge, redescend le long de la paroi latérale, revient enfin vers le centre par les filets centripètes du fond et ainsi de suite indéfiniment. Dans chaque azimut, il y a un point de vitesse linéaire nulle que tous les filets enveloppent. La surface libre n'est pas plane: le centre de chaque hexagone est déprimé; les sommets ternaires sont des sommets topographiques; chaque côté de l'hexagone est une ligne de faite dont le milieu est un col.

Mais le régime permanent qui vient d'être décrit ne s'obtient que dans des conditions expérimentales parfaites et, dans tous les cas, il est précédé par un régime variable. Dans la période initiale, les premiers centres d'ascension, produits dans la couche inférieure dilatée, sont dus à des maximum locaux infiniment petits de force ascensionnelle et distribués au hasard. Ces premiers centres donnent naissance à des tourbillons qui sont d'abord de révolution; mais, très vite, leur nombre croît; ils se rencontrent deux à deux, se déforment et se déplacent mutuellement. De chaque rencontre naît une surface plus ou moins

verticale de part et d'autre de laquelle les rotations sont de sens contraires; resserré entre tous les plans verticaux qui le séparent de ses voisins, chaque tourbillon est devenu polygonal. Désormais, l'identité des dimensions et des forces vives sera la loi de l'équilibre stable définitif pour l'ensemble de ces tourbillons: si leur nombre est trop grand, les plus petits sont condamnés à disparaître; si leur nombre est trop petit, les plus grands, comprimés dans une direction, deviendront instables et une nouvelle coupure se produira. La fig. 3 représente une des phases de l'état variable, avec une division cellulaire demi-régulière: la photographie a été obtenue en mêlant au liquide des poussières lamellaires brillantes qui s'orientent de façon que leur grande surface soit parallèle aux courants liquides; les courants horizontaux réfléchissent donc vivement la lumière tandis que le courant ascendant central donne un cône d'ombre dégradé et les courants descendants le long des cloisons un trait noir étroit. Sur la figure reproduite, les sommets quaternaires sont assez nombreux. Le passage au régime permanent se fait par la disparition de ces sommets quaternaires; chacun d'eux est généralement remplacé par deux sommets ternaires, grâce à l'apparition d'un côté supplémentaire, comme le montre la fig. 4, où deux photographies successives sont superposées; la première, en traits forts, contient trois sommets quaternaires dont deux ont disparu sur la seconde, prise deux minutes plus tard et reproduite en traits fins; en même temps, les angles et les côtés se régularisent.

A épaisseur de liquide égale, le diamètre des cellules varie avec la température. Si donc on fait varier cette dernière, le nombre des cellules par unité de surface varie également: quand ce nombre augmente, la multiplication résulte toujours de l'apparition instantanée d'une coupure qui, d'une cellule, en fait deux; cette coupure est préparée par l'allongement de la cellule mère dont les longs côtés se courbent jusqu'à ce que la nouvelle cloison s'établisse entre eux. Quand le nombre des cellules va en décroissant, une cloison séparant deux cellules glisse jusqu'à ce que l'une de ces deux cellules disparaisse; jamais une cloison ne disparaît sur place.

B. Structure déterminée par les vibrations.

Si, à la surface d'un liquide indéfini, on fait vibrer deux plans verticaux rectangulaires, on détermine deux systèmes d'ondes pareillement rectangulaires. L'intersection de deux ondes mobiles, appartenant respectivement à chacun des deux systèmes, décrit une droite à 45° par rapport aux traces des plans; le long de cette droite, la composition des ondulations crée un maximum de déformation. Si la surface est finie et assez petite, rectangulaire par exemple, les ondes directes interfèrent avec les ondes réfléchies et on obtient un régime d'ondes stationnaires où les

¹⁾ Revue générale des sciences pures et appliquées, t. XI, pp. 1259 et 1309, 15 et 30 décembre 1900; et thèse, *Gauthier-Villars*, Paris 1901.

intersections sont encore à 45° . Ces phénomènes, bien connus en optique et en acoustique, ont été étudiés expérimentalement, dans le cas des liquides, par le physicien anglais *Vincent*.¹⁾ L'un de nous s'en est aussi occupé en collaboration avec M. *Chéneveau*. On peut les varier de beaucoup de manières en modifiant la forme des cuvettes, celle des styles vibrants, la fréquence des vibrations etc. et vérifier ainsi les lois de la réflexion, de la réfraction et de la propagation. Nous ne pouvons pas donner ici à ce sujet tous les développements qu'il comporte: nous nous bornerons à un cas particulier sur lequel nous aurons à nous appuyer plus tard, celui d'un point *O* et de deux plans parallèles *AF*, *CG* (fig. 5) vibrant isochroniquement à la surface d'un liquide indéfini. On démontrerait facilement que, dans ce cas, l'intersection d'une onde circulaire et d'une onde plane décrit une parabole dont l'axe passe par le point *O* et est perpendiculaire aux plans *AF*, *CG*. La fig. 5 réunit l'ensemble des paraboles conjuguées décrites par l'ensemble des trois systèmes d'ondes: les ondes mobiles génératrices sont figurées en traits discontinus et les intersections fixes en traits pleins. Si l'on suppose successivement que les lignes *DE* et *BH* soient un plan matériel fixe, on aura successivement les deux demi-schémas *DEFG* et *BHCG*, suivant que les ondes planes seront perpendiculaires ou parallèles au plan fixe. Enfin, dans une cuvette rectangulaire vibrante avec un style au milieu de l'un des côtés, les quatre côtés émettront des ondes rectilignes, le style des ondes demi-circulaires et les choses se passeront comme si les deux demi-schémas *DEFG* et *BHCG* étaient superposés: c'est-à-dire que la surface de la cuvette sera divisée, abstraction faite des réflexions, par les ondes directes mobiles et par les quatre systèmes de paraboles fixes, conjugués deux à deux, que décrivent les intersections des premières. La fig. 6, obtenue par l'introduction d'un obstacle dans une cuvette rectangulaire remplie de mercure et animée d'un mouvement vibratoire, montre, inégalement développés, deux des systèmes de paraboles, sans préjudice des ondes directes et des intersections à 45° des ondes rectilignes.

Cette division des liquides par les vibrations est toujours accompagnée de mouvements tourbillonnaires que l'on peut montrer en projetant de la poudre de lycopode à la surface du mercure. La fig. 7 est une de celles que l'on peut obtenir ainsi avec une cuvette circulaire.

II.

Passage de l'état liquide à l'état solide.

Quand un corps passe rapidement de l'état liquide à l'état solide, il semble probable que sa surface

¹⁾ Phil. Mag., juin 1897, p. 411; février 1898, p. 191, septembre 1898, p. 290; octobre 1899, p. 338.

pourra enregistrer les dénivellations quelconques dont elle était sillonnée au moment de la solidification. Et cette méthode a été, sinon appliquée, du moins indiquée par *Barthélemy* dès 1874.¹⁾

L'application a été faite par l'un de nous aux métaux facilement fusibles, étain, plomb, cadmium, zinc, bismuth. Mais si on laisse le métal liquide se refroidir lentement, c'est surtout la cristallisation qui s'inscrit. Pour surprendre, comme par une photographie instantanée, les phénomènes de transition, il faut rendre la solidification rapide. On y réussit en coulant le métal sur une glace inclinée ou en le laissant tomber en gouttes sur une glace horizontale où il s'écrase.

La surface inférieure, au contact du verre, en prend généralement le poli, sauf aux endroits où le métal a été soulevé par des soufflures. La surface libre, au contraire, enregistre:

- A. La structure du liquide.
- B. Les mouvements du liquide au moment de la solidification.
- C. La structure cristalline du solide.

A. Sauf pour le bismuth qui cristallise avec une facilité extrême et qui n'a jamais donné que les trémies connues, on obtient un réseau cellulaire que nous considérons comme caractéristique de l'état liquide et qui rappelle beaucoup, le régime variable de *Bénard* (fig. 3). Seulement, les apparences sont interverties: c'est-à-dire que le centre est en relief et les cloisons en creux, peut être parce que celles-ci ont été solidifiées les dernières et ont supporté le retrait. Les cellules, analogues aux cellules des tissus épidermiques, ont 4, 5, plus souvent 6 côtés (fig. 8, plomb, 300 diam.); elles peuvent posséder, surtout dans le zinc, un sorte de noyau en saillie (fig. 9, zinc, 300 diam.). La solidification brusque permet de saisir les phases de développement ou de rétraction et de prendre sur le fait la scissiparité décrite par *Bénard*: les noyaux eux-mêmes semblent prendre part à la division en s'étirant et en s'étranglant pour se couper en deux noyaux quelquefois tangents à la cloison nouvelle; ailleurs, on peut voir, dans certaines cellules, des amorces de cloisons qui, partant de deux côtés opposés, tendent à se rejoindre en laissant entre elles un canal plus ou moins étroit (fig. 10, zinc, 400 diam.).

B. Les cellules peuvent être orientées par les mouvements qui animaient le liquide au moment de la solidification. La fig. 11 (110 diam.) a été obtenue en projetant une goutte de zinc fondu sur une plaque de verre; on y voit de grands tourbillons cellulaires et les filets de ces tourbillons sont formés par des files de cellules primaires qui étaient vraisemblablement elles mêmes de petits tourbillons.

¹⁾ Ann. de chim. et de phys., série 5, t. I, p. 100, 1874.

Il est remarquable qu'on retrouve très généralement cette structure ou quelque chose de fort analogue dans les alliages eutectiques. La fig. 12 (123 diam.) en donne un bon exemple emprunté à M. *Heyn*¹⁾ c'est l'eutectique cuivre-oxydure de cuivre. Les granulations cellulaires, au fur et à mesure de leur solidification dans les milieux agités, seraient orientées et classées par les filets tourbillonnaires; elles pourraient aussi rester isolées dans les milieux calmes, d'où la structure ponctuée, également fréquente dans les eutectiques.

C. Mais la structure cellulaire, qui est celle du liquide, n'empêche pas la formation de la structure cristalline, quand cette dernière appartient normalement au solide; et la façon dont ces deux structures se combinent entre elles donne lieu à des observations assez curieuses. Voici de l'étain (fig. 13, 250 diam.); coulé sous une épaisseur convenable, il présente un mélange de cellules et de cristallites. Les cellules qui, sous leur forme primordiale, sphérique avant la polyédrisation, sont probablement les globulites des minéralogistes, s'ordonnent pour former les cristallites du type arrondi: le passage est ici pris sur le fait. Le zinc (fig. 14, 150 diam.) nous en offre un autre exemple. Il est vraisemblable que chaque cellule devient, en se solidifiant, un embryon cristallin, dès lors susceptible d'orientation. C'est ce que nous voyons nettement dans le plomb (fig. 15, 150 diam.); chaque cellule est le lieu d'un petit cristal et ces petits cristaux sont orientés de même dans l'aire d'un même grain cristallin; la division cellulaire n'en reste pas moins visible, mais toutes les cellules d'un grain prennent une allure générale qui leur est commune et les distingue de celles du grain voisin. Cependant, les limites du grain cristallin ne coïncident pas toujours exactement avec celles des cellules intégrantes; une même cellule peut appartenir à deux grains différents, comme le montre la fig. 16 (plomb, 300 diam.) sur laquelle on a fait apparaître, par une légère déformation, à la fois les limites des grains et les stries parallèles caractéristiques par leur direction de chacun d'eux.

III.

Corps solides amorphes.

A. Structure déterminée par la chaleur.

Les verres, ou du moins certains verres, montrent, attaqués par l'acide fluorhydrique, la structure cellulaire parfaitement développée, telle qu'elle a été obtenue par *Bénard* dans les liquides et telle que nous l'avons vue sur le plomb (fig. 8). Seulement, les cloisons sont en relief au lieu d'être en creux. Cette structure est bien réelle: c'est-à-dire qu'elle n'est pas due, comme on pourrait le croire,

à la limitation mutuelle de champs d'attaque développés à partir des points les plus attaquables; il suffit en effet, pour la faire apparaître, de chauffer le verre au rouge, ce qui entraîne un commencement de déformation (fig. 17, 400 diam.). Dans les régions moins chauffées et à peine déformées, la polyédrisation n'est pas complètement révélée et on voit les noyaux globulitiques, point de départ de la cellule (fig. 18, 400 diam.). Après attaque par l'acide fluorhydrique, ces cellules peuvent montrer des stries rayonnantes qui rappellent les filets tourbillonnaires vus en plan.

Dans d'autres verres, les cellules tendent à se grouper en cristallites (fig. 19, 150 diam.), comme nous l'avons antérieurement remarqué sur le zinc (fig. 14) et sur l'étain (fig. 13).

B. Structure déterminée par dilatation ou contraction.

Quand un corps se contracte dans tous les sens, par refroidissement ou autrement, les surfaces se mettent en tension et, si le corps considéré n'est pas suffisamment plastique, il se produit un réseau de craquelures qui le divisent en cellules. Ces cellules sont généralement beaucoup plus grandes que les précédentes, souvent visibles à l'oeil nu: craquelures de la couverte des faïences, des argiles desséchées, etc. On peut les faire apparaître sur la gélatine à peu près sèche en traitant la surface par l'alcool absolu qui achève la dessiccation (fig. 20, 85 diam.). Si la surface en tension était pratiquement indéfinie, on aurait une division en prismes hexagonaux (basaltes); les corps de petites dimensions se séparent en prismes normaux aux surfaces; pour des dimensions convenables, on a ces mêmes prismes à la périphérie et, à l'intérieur, des polyèdres grossièrement inscriptibles dans la sphère et qui tendent vraisemblablement vers le dodécaèdre rhomboïdal.

Cette structure peut être incomplète, c'est-à-dire que les cellules ne se ferment pas toujours: leurs côtés se réduisent alors à des rayons partant de sommets ordinairement ternaires ou quaternaires. Elle peut aussi être latente: dans les plaques photographiques au gélatinobromure, pendant le fixage, les derniers restes du sel d'argent dessinent souvent, avant de disparaître, un réseau de cet ordre.

C. Structure déterminée par l'application des forces extérieures.

Pour traiter ici cette question, nous ne sommes pas obligés de nous adresser à des corps vraiment amorphes, au sens absolu du mot. Nous pouvons considérer comme tels les corps cristallisés formés de grains cristallins d'orientation quelconque, pourvu que les grains de la structure congénitale soient très petits par rapport aux mailles du réseau structural déterminé par les forces extérieures. Or, cette condition est généralement remplie par toutes les roches

¹⁾ Mitteil. aus den k. techn. Versuchsanstalten 1900, p. 315, Fig. 5, Taf. IV.

au point de vue des grandes déformations géologiques, par tous les métaux usuels de bonne qualité au point de vue des déformations visibles aux yeux.

Sous l'action de telles forces, on crée en chaque point des efforts de traction, de compression et de glissement simultanés. L'étude de la répartition de ces efforts a fait notamment l'objet des savantes recherches de M. *Rejto*, bien connues des membres de ce congrès¹⁾, mais dont le côté mathématique échappe à notre programme et qui, au surplus, seront beaucoup mieux développées par leur auteur.

Pour rester dans le domaine purement expérimental, nous rappellerons que, dans le cas supposé le plus simple, celui de la traction ou de la compression simples de prismes à section rectangulaire, il peut se former deux systèmes de surfaces de déformation et éventuellement de rupture, les unes parallèles ou perpendiculaires à la direction de l'effort, les autres obliques par rapport à cette même direction. Nous appellerons le premier système *direct*, le second système *oblique*.

»Soumis à un effort de traction, les corps cassants se rompent perpendiculairement à la direction de l'effort.«

»Soumis à la compression, ils peuvent se diviser en fragments parallèles à l'effort de compression. Des cubes de verre, de pierre dure, éclatent sous la compression en aiguilles perpendiculaires aux plateaux entre lesquels ils sont comprimés« (*Rondelet*²⁾). Chaque tranche parallèle aux plateaux est en effet étirée dans les deux sens perpendiculaires et se divise exactement comme dans le cas du retrait, c'est-à-dire par traction. Si, en même temps, les sections perpendiculaires aux plateaux changent de forme, ce qui n'arrive pas seulement dans les corps plastiques, mais aussi, sous le passage des ondes, dans tous les corps possibles, les sections parallèles aux plateaux, inégalement étirées, tendent à se séparer les unes des autres par glissement: d'où la schistosité et, à la limite, la rupture. Dans une tôle d'acier terminée au rouge sombre, le laminage produit une stratification de la perlite et, même dans la ferrite, des couches inégalement écrouies, inégalement attaquables par les réactifs chimiques; les lignes claires de la fig. 21 (250 diam.) ont été creusées en 15 secondes par l'acide nitrique étendu de 4 volumes d'eau sur la coupe polie d'une tôle schisteuse d'acier doux; les sillons sont parallèles, dans leur ensemble, à la surface de la tôle, avec déviations locales secondaires résultant de la micro-structure, c'est-à-dire de la présence de la perlite et de la division granulaire de la ferrite. Cette origine de la schistosité a d'ailleurs été mise en évidence

par les expériences synthétiques des géologues, *Daubrée*¹⁾ et M. *Stanislas Meunier*.²⁾

Le système oblique a été également décrit par les mêmes savants. *Daubrée*, en comprimant entre deux plaques de fonte des parallépipèdes de mastic à mouler (mélange de cire d'abeilles et de plâtre avec une certaine quantité de résine, avait obtenu la fissuration de la masse suivant la figure 22. M. *Stanislas Meunier* a laissé se rétracter une bande de caoutchouc primitivement tendue et enduite de stéarine: la stéarine se clive en rhomboïdes réguliers (fig. 23 A) en remplaçant la stéarine par des plaques de plâtre de 3 centimètres d'épaisseur et de consistance convenable, on a des divisions analogues avec failles et rejets (fig. 23 B). Dans tous les cas, on réalise ainsi quelque chose de tout à fait semblable aux clivages et on voit qu'il est absolument légitime d'assimiler la structure déterminée par les efforts aux structures congénitales.

Sur les métaux, les premières remarques relatives au système oblique ont été faites par *Lüders*; mais les recherches de beaucoup les plus poussées sont celles de M. le Commandant *Hartmann*.³⁾ Les lignes obliques sont caractérisées par ce fait qu'elles font avec la direction de l'effort un angle plus grand que 45° sur les éprouvettes de traction et l'angle complémentaire sur les éprouvettes de compression. On peut d'ailleurs les obtenir avec la plus grande facilité et sans le secours d'aucune machine en étirant entre les doigts des bâtons de mastic des vitriers ou en brisant par flexion une mince feuille de gélatine (fig. 24, 200 diam.).

Peut-être faut-il rapporter à la même cause les lignes de faiblesse conjuguées, à peu près rectangulaires entre elles, que M. *Stead* a trouvées, sans pouvoir les reproduire à volonté, sur certaines tôles minces d'acier extra-doux⁴⁾ (fig. 25).

A notre avis, les lignes obliques sont (ou du moins peuvent être) les intersections des ondes directes, absolument semblables aux intersections des rides sur une cuvette rectangulaire remplie d'un liquide en vibration. Il peut sembler paradoxal de comparer la surface d'un métal à celle d'une nappe liquide

»Que toujours quelque vent empêche de calmer.«

Mais les rides sur les métaux déformés ont été directement observées par M. le Commandant *Mengin*⁵⁾ et nos ouvrages sont soumis à de perpétuelles vibrations.

¹⁾ Etudes synthétiques de géologie expérimentale. *Dunod*, Paris 1879.

²⁾ La géologie expérimentale. *Alcan*, Paris, 1899.

³⁾ Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts. *Berger-Levrault*, Paris 1896.

⁴⁾ Journal of the Iron and Steel Institute, 1898, part I.

⁵⁾ Comptes rendus, t. CXXIV, p. 681, 29 mars 1897.

¹⁾ Congrès de l'association internationale pour l'essai des matériaux, Budapest 1901. Réd.

²⁾ Les lignes entre guillemets sont extraites du rapport présenté par M. *Mesnager* au congrès des méthodes d'essai tenu à Paris en 1900.

Les interférences des ondes directes mobiles sont des lignes fixes; elles s'inscriraient par une déformation permanente, alors que les ondes mobiles ne s'inscrivent pas aussi facilement, parce que la rencontre de deux ondes produit une déformation qui est la somme des déformations élémentaires et que la limite élastique sera dépassée en ce point avant de l'être sur le parcours des ondes génératrices.

Il y a cependant une différence entre les liquides et les solides: dans les premiers, les lignes d'interférence sont à 45° sur les directions des ondes rectilignes rectangulaires; dans les solides, l'angle est plus ou moins différent de 45° . Pour expliquer cette différence, il est nécessaire de faire une hypothèse; plusieurs sont possibles: on peut supposer, par exemple, que la vitesse de propagation des ondes est plus grande dans le sens de la compression que dans le sens de la traction.

La déformation et la rupture qui la termine se font tantôt suivant le système direct, tantôt suivant le système oblique, plus souvent suivant les deux à la fois. Le système direct prédomine plutôt dans les corps fragiles. Ainsi, quand on poinçonne par choc une lame de verre, on exerce une traction tangentielle selon les cercles concentriques à l'impact: le verre se fend perpendiculairement à cette traction, c'est-à-dire suivant des rayons; en même temps, comme la matière ne peut obéir aux déformations qu'elle tend à subir sur le passage des ondes, il se fait d'autres fêlures circulaires autour de l'impact (fig. 26). Ces fentes mêmes empêchent la formation du système oblique qui n'apparaît pas ici, du moins sur la surface de verre. Il apparaît fort bien au contraire si l'on remplace le verre par de la gélatine, pourvu que cette substance ne soit pas trop sèche (fig. 27, 150 diam.); et il s'y trouve seul.

Passons maintenant à un cas plus compliqué: celui d'un prisme droit allongé reposant sur une plaque d'appui par une de ses faces et comprimé sur la face opposée par un couteau perpendiculaire aux longues arêtes.

Le schéma des déformations, construit d'après les expériences de M. *Hartmann* et d'autres (fig. 28), comporte finalement sur une face latérale:

- 1° Un renflement à peu près concentrique au poinçon avec deux anticlinaux plus accentués suivant les lignes OX , dans la région où l'effet de compression est le moins neutralisé par des effets de traction opposés.
- 2° Deux systèmes de lignes conjuguées AB , $A'B'$ tournant leur concavité vers le point de pression.
- 3° Des lignes courbes MN tournant aussi leur concavité vers le poinçon, mais symétriques par rapport à l'axe vertical de la figure.

4° Des lignes $M'N'$ partant en divergeant de l'arête supérieure, ces dernières ordinairement peu développées et peu visibles.

La déformation concentrique au poinçon est l'effet des ondes directes: elle se produit avec formation corrélative de la structure schisteuse, si le corps essayé s'y prête.

Les autres lignes de déformation peuvent être rapportées au système oblique, c'est-à-dire aux intersections des ondes directes. Le point de pression O est un centre d'émission d'ondes circulaires; le support CG émet des ondes planes parallèles et l'étirage résultant de l'enfoncement du couteau est aussi l'origine d'un système d'ondes planes perpendiculaires aux précédentes. Nous avons donc réuni toutes les conditions de la fig. 5 (surface liquide) et le résultat est aussi le même. On voit immédiatement que le schéma de la fig. 28 peut résulter de la superposition des deux demi-schémas $DEFG$, $BCHG$ de la fig. 5. Les lignes AB , $A'B'$ de la fig. 28 appartiendraient au système paraboles conjuguées du rectangle $DEFG$ de la fig. 5; les lignes MN , $M'N'$ de la fig. 28 au système de paraboles conjuguées du rectangle $BCHG$ de la fig. 5. En fait, dans le cas des solides, si la vitesse des ondes de compression est différente de la vitesse des ondes de traction, les lieux d'intersection ne sont plus des paraboles; ce sont des ellipses ou des hyperboles selon que les ondes circulaires sont plus lentes ou plus rapides que les ondes planes avec lesquelles elles se rencontrent; mais l'aspect général du schéma, si l'on se contente d'une première approximation, n'en est pas très modifié.

Naturellement, il faudrait aussi tenir compte, dans une analyse complète, de la solidarité que la cohésion établit entre les parties d'une masse solide, solidarité qui n'existe pas dans les liquides, et aussi des variations de vitesse des ondes quand elles traversent des milieux inégalement comprimés ou dilatés, il résulte de là des perturbations diverses, mais qui ne vont pas jusqu'à masquer des similitudes qui nous paraissent évidentes.

Il est à remarquer que le réseau créé par les forces n'est pas tout d'abord un réseau de faiblesse si la limite élastique diffère de la charge de rupture. Ce réseau est l'ensemble des lieux de déformation maximum. Si le corps considéré est susceptible de déformations permanentes, les parties déformées les premières cessent de se déformer jusqu'à ce que toute la masse ait subi une déformation égale. Les forces créent donc une infinité de réseaux successifs jusqu'à l'origine de la striction et, pendant la striction, jusqu'à la rupture; la striction elle-même entraîne des réseaux secondaires, ce sont les réseaux les derniers en date qui apparaissent sur les cassures.

IV.

Corps solides cristallisés.

Le problème général que nous nous sommes posé devient de plus en plus complexe. Les corps cristallisés ont la structure cristalline, par définition et la structure granulaire qui est la conséquence de la limitation des cristaux. Nous avons vu qu'ils pouvaient garder simultanément la structure cellulaire des liquides en prenant l'état solide; ainsi, dans un beau cristal de fer à clivages cubiques, l'attaque par l'acide azotique fait encore retrouver cette structure (fig. 29, 100 diam., attaque de 30 secondes par l'acide azotique à 10 p. 100; fig. 30, 150 diam., attaque pendant 5 minutes par le chlorure double de cuivre et d'ammonium, puis pendant 90 secondes par l'acide azotique à 10 p. 100). Enfin, l'action des efforts tend à créer une structure déterminée par la propagation et la répartition des ces efforts.

Voici, par exemple, une cassure par clivage de galène qui montre, à côté de clivages certainement cristallins, des lignes courbes d'une autre origine (fig. 31, 250 diam.). Voici maintenant la cassure d'un cube de pyrite martiale (fig. 32, 250 diam.); cette cassure est parfaitement conchoïdale, tout comme celles du verre (fig. 33, 150 diam.) qui ont été si soigneusement étudiées par M. le Prof. *Martens*.¹⁾

La solution complète de notre problème consisterait à trouver, dans chaque cas particulier, comment les diverses structures, congénitales et déterminées, se combinent entre elles, et, cette solution, nous n'avons pas la prétention de l'apporter.

A. Structure déterminée par dilatation ou contraction.

Ces conditions sont réalisées par le chauffage et le refroidissement subséquent. Mais la question est alors compliquée par l'intervention de la chaleur et l'on ne sait guère actuellement quelle est la part de cette dernière et celle des tensions ou compressions qui résultent de son application. Ce qui paraît certain, c'est que, à chaque température, correspond une grosseur de grain maximum qui est atteinte d'autant plus rapidement que la température considérée est plus haute. Le développement du grain du fer gamma était connu depuis longtemps, mais M. *Stead*, en y consacrant un temps suffisamment long, a également réussi à développer le grain du fer à l'état alpha, c'est-à-dire au dessous de 700 degrés. Par contre, le phénomène inverse, la diminution du grain pendant le refroidissement, ne paraît pas se produire. La croissance du grain pendant le chauffage serait donc irréversible et dépendrait uniquement d'un processus de cristallisation. Telle est en effet l'opinion reçue; nous ne pouvons cependant nous empêcher de faire remarquer l'analogie entre cette

croissance du grain et le développement du volume des cellules dans les expériences de M. *Bénard*.

B. Structure déterminée par l'application des forces extérieures.

La question a été étudiée à deux points de vue très différents, surtout par M. *Hartmann* qui ne s'occupe pas de la structure congénitale et par MM. *Ewing* et *Rosenhain* qui ne s'occupent que d'elle.¹⁾

M. *Hartmann* prend la déformabilité comme un fait et cherche les lois de la répartition des déformations; MM. *Ewing* et *Rosenhain* cherchent le mécanisme des déformations indépendamment de leur répartition et l'expliquent:

1° par la production de macles.

2° par des glissements finis le long des plans de clivage.

Les deux points de vue ne sont pas incompatibles. Les déformations d'ensemble peuvent être réglées par les lois de la distribution des efforts, lois générales et indépendantes de la nature des corps, tandis que les déformations élémentaires relèveraient de la cristallographie dans les corps cristallisés. Mais, pris séparément, ces deux points de vue sont trop exclusifs. Il est hors de doute que la structure congénitale joue son rôle: en admettant que les lois de la distribution des efforts doivent déterminer une certaine ligne de rupture, s'il existe, entre deux points de cette ligne, une ligne de faiblesse, même plus longue, il est clair que la rupture suivra cette ligne de faiblesse et les lois de la distribution des efforts n'auront donné que le tracé général.

D'autre part, les idées de MM. *Ewing* et *Rosenhain* semblent incomplètes, puisqu'elles ne s'appliquent qu'aux corps cristallisés et qu'il existe des corps amorphes déformables.

La déformation par production de macles est évidemment possible, comme l'ont prouvé depuis longtemps les travaux des minéralogistes que nous résumerons rapidement avec le secours d'une très intéressante monographie de M. *Heyn*.²⁾ D'après *Reusch* et *Baumhauer*, si on exerce une pression contre les angles *C* et *E* d'un rhomboèdre par clivage de spath calcaire, ou qu'on appuie perpendiculairement une lame de couteau sur l'arête désignée par une flèche (fig. 34), on obtient une déformation telle que le plan diagonal *AECG* (fig. 35), supposé divisé en trois parties I, II, III par les parallèles *IL* et *KM* à *AE*, *CG*, s'articule autour de ces parallèles; l'angle *L'MK* est égal à l'angle *AEM*, c'est à dire que la lamelle *L'I'KM* appartient, après déformation, à un rhombe qui est placé par rapport au rhombe *EACG* en position de macle. Comme les articulations telles que *IL*, *KM*, sont en nombre illimité et que la

¹⁾ Philosophical Transactions, t. 193, p. 353.

²⁾ Zeitschrift d. Ver. deutsch. Ing., t. XXXIV, année 1900.

¹⁾ Stahl und Eisen, avril 1887.

formation des lamelles peut se produire parallèlement aux trois arêtes EA , AD , AB de la fig. 34, le rhomboèdre primitif peut s'adapter intimement par ce processus à l'espace quelconque qui lui est imposé par la déformation.

Que ce mode de déformation s'applique aux métaux, cela est très plausible. En fait, M. *Heyn* pense l'avoir observé dans le cas du fer et MM. *Ewing* et *Rosenhain* en donnent des exemples tirés du cuivre et du plomb (fig. 36, plomb déformé d'après *Ewing* et *Rosenhain*, 1000 diam.).

Il reste cependant une difficulté: les macles abondent dans beaucoup de métaux et d'alliages et y appartiennent à la structure congénitale ou à la structure déterminée par le recuit. Exemples: les laitons recuits de 0 à 35 de zinc¹⁾, le cuivre rouge recuit²⁾, les alliages de fer et de nickel au dessus de 25 p. 100 de nickel³⁾, le fer gamma.⁴⁾ Une question se pose donc dans chaque cas particulier, à savoir si les macles mises en évidence par la déformation d'une surface polie appartaient à la structure antérieure ou si elles sont le résultat de la déformation elle-même. MM. *Ewing* et *Rosenhain* pensent avoir le droit d'adopter la seconde hypothèse en se fondant sur ce fait qu'une première et légère déformation de leurs échantillons n'avait pas montré les macles. Mais cela est-il bien concluant? Dans le plomb coulé sur verre, sur la surface tournée du côté du verre, nous trouvons en certains endroits où le métal ne s'était pas moulé sur le support, l'aspect représenté par la fig. 37 (250 diam.) et qui rappelle fort la fig. 36 de MM. *Ewing* et *Rosenhain*, bien que nous n'ayons pas déformé notre métal. Encore est-il douteux que nous soyons bien ici en présence de véritables macles, en raison de l'arrondi des angles dans certaines bandes; il est plus probable que nous avons affaire à des gradins ou empilements cristallins.

Le second mode de déformation invoqué par MM. *Ewing* et *Rosenhain*, par glissement le long des plans de clivage, a aussi été décrit par les minéralogistes, notamment par *Mügge* que nous citons encore d'après M. *Heyn*. Dans ce cas, il n'y a que substitution de certaines molécules à d'autres; la structure intime n'est pas modifiée et le déplacement ne se traduit que par l'apparition de stries sur les faces qui sont coupées par les directions de plus facile déplacement. Ces stries sont dites *stries de translation*. Dans le cuivre, d'après *Mügge*, la translation est parallèle aux faces de l'octaèdre. Ce sont ces

stries de translation qui se montrent, par suite de la déformation des coupes, dans les expériences d'*Ewing* et *Rosenhain*. Cependant ces auteurs nous paraissent avoir trop généralisé une idée d'ailleurs juste en elle-même. Ainsi, on obtient après déformation sur les surfaces préalablement polies d'acier doux (fig. 38, 800 diam.) des lignes courbes et fourchues qu'il nous paraît bien difficile de rattacher à la structure cristalline. Si on pose un parallépipède rectangle d'acier doux sur un support plan et qu'on appuie un couteau sur la face supérieure perpendiculairement aux arêtes, on détermine sur la face latérale polie, entre autres déformations, un groupe de lignes de *Lüders* conjuguées dont nous avons parlé plus haut (lignes AB , $A'B'$ de la fig. 28). Si maintenant on regarde la préparation à un grossissement suffisant, on trouve que les stries, sur les grains de ferrite qui en portent, sont orientées en chaque point parallèlement à l'un des systèmes de lignes de *Lüders* qui se coupent en ce point (fig. 39, 200 diam.).

Mais les métaux usuels, formés de grains cristallins, orientés cristallographiquement dans toutes les directions possibles, ne se prêtent pas très bien à l'étude de ces questions. Il paraît préférable d'opérer sur des cristaux simples dont la structure cristalline soit connue d'avance. Malheureusement, de tels échantillons ne sont pas communs. Nous en devons un à la libéralité de M. Le Prof. *Tschernoff*: c'est un fragment de loup de four *Martin* d'où l'on peut séparer par clivage des cubes assez gros pour nos essais.¹⁾ L'attaque par le chlorure double de cuivre et d'ammonium donne de belles figures de corrosion cubiques parallèles aux faces du cube (fig. 40, 1200 diam.); de plus, l'attaque par le même réactif, ou mieux par l'acide nitrique concentré, trace des lignes droites qui sont inclinées les unes à 1:1, les autres à 1:2 par rapport aux arêtes du cube. Ce sont les lignes de *Neumann*, bien connues des savants comme *Tschermak*, *Linck*, *Cohen*, qui, particulièrement à Vienne, se sont occupés de l'étude des fers météoriques. Sur l'origine de ces lignes, on n'est pas très bien d'accord. On sait que les plans dont elles sont les traces interceptent sur les arêtes du cube des longueurs qui sont entre elles comme 1:1 et 2, peut être aussi comme 1, 2 et 2. Certains y voient des clivages, d'autres des lamelles en position de macles (fig. 41, 7 diam.).

Quoi qu'il en soit, d'après les idées de MM. *Ewing* et *Rosenhain*, la déformation d'une face du cube devrait faire apparaître: 1° les figures cubiques de corrosion; 2° les lignes de *Neumann*; 3° éventuellement des macles, et rien autre chose.

En fait, par une déformation lente, on ne montre aucune ligne parallèle aux arêtes du cube. Par contre,

¹⁾ De semblables pièces ont été aussi examinées antérieurement par M. *Stead* (loco citato) et par M. *Heyn* (Mitteil. techn. Versuchsanst., 1898, p. 310).

¹⁾ *Charpy*, Bull. de la Soc. d'encouragement, série 5, t. I, p. 180, février 1886.

²⁾ *Heyn*, loco citato.

³⁾ *Osmond*, Annales des Mines, série 9, t. XVII, janvier 1900, fig. 37 à 39, pl. IV.

⁴⁾ *Saniter*, Journal Iron and Steel Inst., 1898, part I, p. 206, pl. XXII à XXIV.

on a bien les lignes de *Neumann*, les mêmes qui étaient révélées par l'acide, et, en outre, une multitude de lignes sans aucun rapport avec la cristallisation connue.

Le mode de déformation le plus souvent employé a été celui qui nous a déjà servi de préférence, la pression d'un couteau contre une face, la face opposée étant appuyée contre un plan et l'une des faces latérales perpendiculaires au couteau servant à l'examen micrographique. Ici, toutes les faces du solide en expérience sont des faces du cube. A l'œil ou sous un faible grossissement, on trouve un bourrelet en relief autour du couteau avec les deux anticlinaux *OX* de la fig. 28 et les lignes de *Neumann* que l'acide avait indiquées sur une attaque antérieure effacée par un polissage subséquent. Sous un grossissement plus fort, on remarque, surtout de chaque côté du point comprimé, un grand nombre de fines lignes courbes qui, d'après leur forme et leur position, correspondent aux lignes conjuguées *AB, A'B'* de la fig. 28; ce sont donc des lignes de *Lüders* microscopiques; elles sont effacées et non accentuées par une attaque; quand elles rencontrent une ligne de *Neumann*, ce qui est le cas de la fig. 42 (250 diam.), elles sont souvent déviées ou interrompues par elle.

Si la même déformation est produite par choc, elle ouvre quantité de lignes de *Neumann* que ne montraient ni la déformation lente ni l'attaque par l'acide nitrique (fig. 43, 50 diam.); la large ligne sombre avec rejet est un clivage cubique).

Si on repolit la face étudiée après en avoir enlevé les reliefs à la lime, et qu'on l'attaque par le chlorure double de cuivre et d'ammonium, on voit (fig. 44, 25 diam.) que les régions peu déformées ont gardé leur structure et que, sous les grandes déformations, il s'est formé un système double de franges paraissant alternativement sombres et brillantes. Regardées à fort grossissement (fig. 45, 1200 diam.), les unes ont encore conservé, ou à peu près leurs alignements cristallins; mais les lignes de division se sont multipliées et accentuées parallèle-

ment à un seul des clivages cubiques, le clivage perpendiculaire semblant atrophié; les autres se sont gardées intactes. Ici, les déformations sont bien liées à la cristallisation. On trouve aussi, mais plus rarement (fig. 46, 1200 diam.), des figures de corrosion où les carrés primitifs se sont transformés en parallélogrammes ou en rectangles.

La conclusion est que les lignes de déformation ont plusieurs origines, les unes appartenant à la structure cristalline, les autres ne dépendant que de la distribution des efforts. La rupture est particulièrement facile là où les lignes des deux ordres tendent à suivre la même direction.

Cette communication n'est, bien entendu, qu'un essai imparfait, mais perfectible, pour classer les travaux qui ont été poursuivis dans des directions différentes par les minéralogistes, les géologues, les mécaniciens, les physiciens, les métallurgistes, etc., les rapprocher les uns des autres et mieux montrer ce qu'il reste à faire pour les compléter au profit de la science de l'emploi des matériaux. La métallographie touche à tant de sujets qu'elle est obligée d'emprunter de toutes parts; mais, si elle reçoit beaucoup, elle donne aussi quelque chose.

Ces échanges entre sciences nous remettent en mémoire une belle légende de ce pays. Un jour, Sainte Elisabeth de Hongrie portait des provisions à ses pauvres: elle rencontra son mari, le margrave de Thuringe qui, trouvant peut être un peu excessive la charité ardente de sa femme, voulut savoir ce qu'elle cachait dans les pans de son manteau. Le manteau s'ouvrit et il en tomba des roses.

Nous tous qui fréquentons ces congrès, nous sommes des pauvres, pauvres de connaissances sûres; mais notre pauvreté n'exclut pas l'esprit de charité et chaque membre apporte ici, pour les partager, les petites provisions de faits ou d'idées qu'il lui a été donné d'amasser. Seulement, quand nous ouvrons nos manteaux, il n'en tombe pas de roses. Le miracle est au-dessus de notre puissance.



Metallmikroskopie und Mechanik.

Von F. Osmond und G. Cartaud.

Die alte Einteilung der Materie in feste, flüssige und gasförmige Körper scheint einer neuen zu weichen, welche nur noch zwei Zustandsformen kennt, nämlich den amorphen und den krystallisierten. Man spricht heutzutage von krystallisierten Flüssigkeiten und andererseits von Körpern, die scheinbar fest sind, die aber für den Physiker und Chemiker Flüssigkeiten darstellen.

Übrigens können beide Einteilungssysteme nebeneinander bestehen und uns von Fall zu Fall Dienste leisten. Das erstere, mehr oberflächlicher Art, stützt sich auf die Wahrnehmung durch unsere Sinne, das andere dagegen auf mehr verborgene Eigenschaften und auf eine gründliche Kenntnis der Strukturverhältnisse der Körper. Nachdem nun aber in vorliegender Mitteilung gerade die Struktur der Körper die Hauptrolle spielt, so wollen wir uns an die zweite Klassifizierung halten.

„Im amorphen Zustand“, sagt *Le Chatelier*¹⁾, „sind nach allen Richtungen um jeden Punkt herum die Eigenschaften der Materie die nämlichen. Der krystallisierte Zustand dagegen ist dadurch gekennzeichnet, dass diejenigen Eigenschaften der Materie, welche der Orientierung fähig sind, um jeden Punkt herum mit der Richtung sich ändern und dass diese Aenderung sich nach einem bestimmten Gesetz vollzieht, das für alle Punkte ein und derselben homogenen Masse das nämliche ist. Hieraus erklären sich die äussern geometrischen Formen und die Spaltbarkeit.“

Ein beliebiger Körper aber besteht selten aus einem einzigen Krystall. Wir Konstrukteure und Metallurgen haben es, wie uns die klassischen Arbeiten von Prof. *Tschernoff* gelehrt haben, stets mit zusammengesetzten Anhäufungen zu thun, in welchen sich die Krystalle nicht frei entwickeln konnten, sondern gegenseitig durch annähernd ebene Flächen begrenzt sind und auf diese Weise pseudokrystallinische Polyeder bilden, die man als Krystallkörner, oder kurzweg als Körner bezeichnen kann. Diese Eigenschaften, d. h. das Fehlen jeder Struktur

im amorphen Zustand und die krystallinisch-körnige Struktur im krystallinischen Zustand, nimmt die Materie unter dem Einfluss molekularer Kräfte, eventuell auch unter dem Einfluss der Schwerkraft spontan an. Man nennt daher diese Eigenschaften spontane oder angeborene (kongenitale).

Rohe Gussstücke gelangen, wenn auch nicht selten, doch in der Regel nicht ohne weiteres in Verwendung. Gewöhnlich werden gegossene Stücke noch einer thermischen oder mechanischen Behandlung oder allen beiden unterworfen, um ihre Eigenschaften und ihre Form zu verändern; wir geben ihnen so durch Einwirkung äusserer Kräfte eine künstliche oder ganz bestimmte Struktur, welche die ursprüngliche entweder ersetzt oder deckt. In allen Fällen, wo wir fertige Stücke, die die Schmiede verlassen, in unsern Konstruktionen dem Betrieb übergeben, geschieht dies nicht, um sie der Ruhe zu überlassen, sondern um sie dem Gesetz der Arbeit und der Ermüdung zu unterstellen, gerade so, wie es bei den lebenden Wesen der Fall ist. Wir verlangen von ihnen, dass sie gewisse Anstrengungen aushalten, welche wir übrigens als gerechte und vornehmlich kluge Meister ihren Kräften anpassen trachten. Aber diese Beanspruchungen, welche die Materie umformen, gleichwie sie den Händen und dem Körper von Arbeitern den berufsmässigen Stempel aufdrücken, zielen darauf ab, die Metalle zu deformieren und ihnen eine letzte künstliche Struktur zu geben, deren Grenze, welche wir oft wider Willen erreichen, im Zerfall des Stückes besteht.

Diese Strukturformen, welche den Körpern sowohl durch äussere Kräfte, wie auch in Verbindung mit der ursprünglichen Struktur auferlegt werden, wollen wir nachstehend, wenn auch nicht ausführlich zu behandeln, so doch zu skizzieren versuchen.

Um in eine so verwickelte Frage etwas Ordnung zu bringen, werden wir hintereinander die Einwirkung der Kräfte

1. auf Flüssigkeiten,
2. beim Uebergang vom flüssigen in den festen Zustand,

¹⁾ Annales des mines, Februar 1897.

3. auf feste amorphe Körper,
4. auf feste kristallisierte Körper eingehend untersuchen.

I.

Flüssigkeiten.

Die Flüssigkeiten bilden für gewöhnlich den Typus der amorphen Körper. Wenn man jedoch einen Tropfen einer Flüssigkeit der Wirkung der Schwerkraft entzieht, indem man ihn, etwa wie bei den Versuchen von *Plateau*, in einer andern Flüssigkeit suspendiert, welche die nämliche Dichte besitzt wie die erste, und mit welcher er sich nicht mischt, so wird der Tropfen kugelförmig, d. h. er nimmt eine genau bestimmte geometrische Form an. Und wenn mehrere solcher Tropfen aufeinander lagern, wie die Öltröpfchen in einer Mayonnaise-Sauce oder wie die Luftblasen in Seifenwasser, so nehmen sie polyedrische Gestalt und das Ganze eine zellenförmige Struktur an, ähnlich den körnigen Anhäufungen bei kristallisierten Körpern. Die Cellularstruktur erscheint uns somit als die natürliche Struktur amorpher Körper, sofern die Teile dieser letzten am Zusammenschluss verhindert werden. Die polyedrischen Zellen sind das Resultat von deformierten Kugeln. Wie wir aber sehen werden, kann die Cellularstruktur auch ohne das Dazwischentreten eines Fremdkörpers hervorgerufen werden.

A. Struktur, die durch die Wärme und Schwerkraft hervorgerufen wird.

Die ersten Versuche über Wärmeübertragungsströme (Konvektions-Ströme) in Flüssigkeiten sind von *Tyndall* und von *Bezold* angestellt worden; neuere und sehr originelle Versuche dieser Art verdanken wir *Bénard*.¹⁾ Sie mögen hier etwas eingehender angeführt werden.

Durch eine dünne, horizontale, ursprünglich amorphe Schicht einer beliebigen Flüssigkeit lässt man von unten nach oben einen Wärmestrom streichen. Wenn der Beharrungszustand erreicht ist, so findet man, dass die Schicht in ein System von regulären hexagonalen Prismen mit vertikaler Axe geteilt ist, deren Durchmesser von derselben Grössenordnung ist, wie die Dicke der Flüssigkeit (Fig. 1). Jedes hexagonale Prisma oder jede Zelle bildet einen geschlossenen Wirbel. Fig. 2 stellt einen Vertikalschnitt durch die Axe eines solchen Wirbels dar und zeigt das Strömungsbild, sowie die Richtung des Kreislaufs an. Die erwärmte Flüssigkeit steigt in dem der Axe benachbarten Teil der Zelle in die Höhe, kühlt sich in dem Teil der Bahn, der der freien Oberfläche zunächst liegt, und wo die Bewegung

eine zentrifugale ist, ab, steigt längs der Seitenwand hinunter und kehrt schliesslich in zentripetaler Richtung längs des Grundes gegen die Mitte zurück und so fort. In jedem Vertikalschnitt giebt es einen Nullpunkt, den alle Strömungsadern einhüllen. Die Oberfläche ist nicht eben. Der Mittelpunkt eines jeden Sechsecks ist vertieft. Die Eckpunkte desselben sind Kulminationspunkte, die Seiten des Sechsecks sind einer Firstlinie zu vergleichen, die in der Mitte eingesenkt ist.

Man erhält den soeben beschriebenen Beharrungszustand jedoch nur unter ganz günstigen Versuchsbedingungen; auf jeden Fall geht ihm aber ein veränderlicher Zustand voran.

Im Anfangsstadium des Versuchs verdanken die ersten Auftriebszentren, die sich in der untern ausgedehnten Flüssigkeitsschicht bilden, ihre Entstehung ausserordentlich kleinen, lokalen Maxima von Auftriebskräften, die in der Flüssigkeit unregelmässig verteilt sind. Aus diesen Zentren entstehen Wirbel, welche anfänglich Rotationskörper bilden. Sehr bald wächst aber ihre Zahl. Sie stossen aufeinander und verschieben sich gegenseitig.

Aus jeder Begegnung entsteht eine mehr oder weniger vertikale Berührungsfläche, zu deren beiden Seiten eine Rotation im entgegengesetzten Sinn stattfindet. Eingeklemmt zwischen Vertikalebene, die ihn von seinen Nachbarn trennen, nimmt jeder Wirbel eine polygonale Gestalt an. Von jetzt an bedingt die Gleichheit der Abmessungen und lebendigen Kräfte den endgiltigen stabilen Gleichgewichtszustand sämtlicher Wirbel. Ist deren Zahl zu gross, so müssen die kleinern verschwinden, ist dagegen ihre Zahl zu klein, so werden die grössten, welche in einer Richtung zusammengedrückt sind, in ihrem Gleichgewichtszustand gestört und es wird eine Trennung erfolgen. Fig. 3 stellt eine Phase des variablen Zustandes dar, mit einer halb regelmässigen Zellenverteilung. Die Photographie ist dadurch erhalten worden, dass man der Flüssigkeit blättchenförmigen glänzenden Staub beimischte. Die einzelnen Blättchen orientieren sich nun derart, dass ihre breite Fläche parallel mit dem Flüssigkeitsstrom verläuft. Die horizontalen Strömungen reflektieren daher lebhaft das Licht, während der mittlere aufsteigende Strom einen abgetönten Schattenkegel, und die längs den Scheidenwänden absteigenden Strömungen einen schmalen schwarzen Strich hervorrufen. Auf der erwähnten Figur beobachtet man Kulminationspunkte, in welchen vier Linien zusammenlaufen, ziemlich häufig. Der Übergang zum Beharrungszustand ist nun dadurch gekennzeichnet, dass diese vierzähligen Punkte, wie wir sie nennen wollen, verschwinden. In der Regel wird jeder solche Punkt durch zwei dreizählige ersetzt, zufolge Auftretens einer Ergänzungsseite, wie aus Fig. 4 hervorgeht, in welcher zwei hintereinander aufgenommene Photographien auf-

¹⁾ *Revue générale des sciences pures et appliquées*, Band XI, Seite 1259 und 1309, 15. und 30. Dezember 1900, sowie Thèse *Gauthier-Villars*, Paris 1901.

einandergelegt wurden. Die erste in starken Strichen gezeichnete Figur zählt drei vierzählige Kulminationspunkte; auf der zweiten in feineren Strichen wiedergegebenen Photographie, welche zwei Minuten später aufgenommen wurde, sind zwei dieser Punkte bereits verschwunden; gleichzeitig wurden die Winkel und Seiten regelmässiger.

Bei gleicher Dicke der Flüssigkeitsschicht ändert sich der Durchmesser der Zellen mit der Temperatur. Vermindert man daher die letztere, so ändert sich auch die Zahl der Zellen pro Flächeneinheit. Vermehrt sich dieselbe, so rührt diese Vermehrung stets von dem momentanen Auftreten eines Einschnitts her, durch welchen aus einer Zelle zwei entstehen. Diese Trennung wird durch die Verlängerung der Mutterzelle vorbereitet, deren Längsseiten sich so weit krümmen, bis zwischen beiden eine neue Scheidewand entsteht. Bei einer Verringerung der Zahl der Zellen verschiebt sich die Scheidewand zwischen zwei Zellen so lange, bis eine der beiden Zellen verschwindet; nie aber wird eine Scheidewand auf ihrer ursprünglichen Stelle einfach verschwinden.

B. Struktur, die durch Schwingungen hervorgerufen wird.

Wenn man auf der Oberfläche einer unbegrenzten Flüssigkeit zwei vertikale, rechtwinklig zu einander stehende Ebenen vibrieren lässt, so werden zwei ähnliche rechtwinklige Wellensysteme hervorgerufen. Der Schnitt von zwei beweglichen Wellen, von denen jede einem der beiden Systeme angehört, beschreibt eine gerade Linie, die mit den Fusslinien der Ebenen einen Winkel von 45° bildet. Längs dieser Geraden erzeugt die Verschmelzung der Wellenbewegungen eine maximale Deformation. Wenn die Oberfläche begrenzt und ziemlich klein ist, z. B. rechteckig, so schneiden sich die direkten Wellen mit den reflektierten und man erhält ein System von stationären Wellen, deren Schnittlinie ebenfalls einen Winkel von 45° bildet. Diese in der Optik und Akustik wohlbekannten Erscheinungen sind für Flüssigkeiten von dem englischen Physiker *Vincent*¹⁾ auf experimentellem Wege untersucht worden. Auch einer von uns beiden hat sich gemeinschaftlich mit Herr *Chéneveau* mit dieser Frage beschäftigt. Man kann diese Versuche in mannigfaltiger Weise vornehmen, indem man z. B. die Form der Gefässe, oder die Art der Wellen, oder die Häufigkeit der Vibrationen ändert und auf diese Weise die Gesetze der Reflexion, der Brechung und der Fortpflanzung kontrolliert.

Wir können hier diesen Gegenstand nicht in seinem vollen Umfang behandeln, sondern beschränken uns auf einen bestimmten Fall, auf welchen wir uns später stützen müssen. Es ist dies der Fall, mit

¹⁾ Phil. mag., Juni 1897, p. 411; Februar 1898, p. 191; September 1898, p. 290; Oktober 1899, p. 338.

einem Punkt *O*, und zwei parallelen Ebenen *AF* und *CG* (Fig. 5), die gleichzeitig an der Oberfläche einer beliebigen Flüssigkeit vibrieren. Man kann leicht nachweisen, dass in diesem Fall der Schnittpunkt einer kreisförmigen und einer ebenen Welle eine Parabel beschreibt, deren Axe durch den Punkt *O* geht und senkrecht zu den Ebenen *AF* und *CG* steht. Fig. 5 giebt das Gesamtbild der zusammengehörigen Parabeln, die durch die drei Wellensysteme erzeugt werden. Die beweglichen, erzeugenden Wellenlinien sind durch gestrichelte, die festen Schnitte durch ausgezogene Linien gekennzeichnet. Wenn man nacheinander annimmt, dass die Linien *DE* und *BH* feste Ebenen darstellen, so erhält man die beiden Schema *DEFG* und *BHCG*, je nachdem die ebenen Wellen senkrecht oder parallel zur festen Ebene stehen. Es werden also in einem rechteckigen vibrierenden Gefäss mit einer Nadel in der Mitte einer Seite die vier Seiten geradlinige Wellen aussenden, die Nadel jedoch halbkreisförmige Wellen. Der ganze Vorgang vollzieht sich also, als ob die beiden Bilder *DEFG* und *BHCG* übereinandergelegt wären, d. h. die Oberfläche des Gefässes wird, abgesehen von den Reflexbewegungen, durch die direkten beweglichen Wellen und durch die vier fixen Parabelsysteme, von denen je zwei und zwei verbunden sind und die durch den Schnitt der ersten entstehen, geteilt.

Fig. 6, welche durch Einführung eines Fremdkörpers in ein rechteckiges mit Quecksilber gefülltes Gefäss erhalten worden, das in vibrierende Bewegung versetzt wurde, zeigt in ungleicher Entwicklung zwei Parabelsysteme, abgesehen von den direkten Wellen und den unter 45° geneigten Schnittlinien der geradlinigen Wellen.

Diese Teilung der Flüssigkeiten durch Wellenbewegung ist stets von wirbelartigen Bewegungen begleitet, die man dadurch hervorrufen kann, dass man Lycopodiumpulver auf die Oberfläche von Quecksilber bringt. Fig. 7 erhält man bei Anwendung von kreisförmigen Gefässen.

II.

Übergang vom flüssigen in den festen Zustand.

Wenn ein Körper plötzlich vom flüssigen in den festen Zustand übergeht, so scheint es wahrscheinlich, dass dessen Oberfläche die etwaigen Unebenheiten, von denen sie im Augenblick der Erstarrung durchfurcht war, festhält. Diese Methode ist von *Barthélemy* im Jahre 1874, wenn auch nicht angewendet, so doch angegeben worden¹⁾ und wurde von einem von uns beiden auf die leicht schmelzbaren Metalle wie Zinn, Blei, Cadmium, Zink und

¹⁾ Ann. de chim. et de phys., série 5, t. I, p. 100, 1874.

Wismut angewendet. Lässt man das flüssige Metall langsam erkalten, so macht sich hauptsächlich die Krystallisation bemerklich.

Um die Übergangserscheinungen rasch wie bei einer photographischen Momentaufnahme festzuhalten, muss die Erstarrung schnell vor sich gehen. Es gelingt dies, wenn man entweder das Metall auf einen geneigten Spiegel ausgiesst, oder es tropfenweise auf einen horizontalen Spiegel fallen lässt, wo es sich ausbreitet. Die untere Fläche, die das Glas berührt, nimmt gewöhnlich dessen Politur an, ausser an den Stellen, wo das Metall infolge von Blasen steigt. Die freie Oberfläche dagegen zeigt uns

- A. die Struktur der Flüssigkeit,
- B. die Bewegungen derselben im Augenblick der Erstarrung,
- C. die krystallinische Struktur des festen Körpers.

A. Ausser beim Wismut, welches mit einer ausserordentlichen Leichtigkeit krystallisiert und welches nur die bekannten trichterförmigen Krystallbildungen giebt, erhält man stets ein Zellennetz, welches wir als charakteristisch für den flüssigen Zustand betrachten können, und das in Vielem an den wechselnden Zustand nach *Bénard* erinnert (Fig. 3); bloss sind die äussern Erscheinungen umgekehrt, d. h. das Zentrum ist erhöht und die Scheidewände vertieft; letztere Erscheinung rührt vielleicht davon her, dass die Trennungsflächen zuletzt erstarrt sind und dem Schwinden unterworfen waren. Die Zellen besitzen, ähnlich wie das Hauptgewebe, vier oder fünf, noch öfter aber sechs Seiten (Fig. 8, Blei, 300fache Vergrösserung).

Sie können auch, besonders beim Zink, eine Art vorspringenden Kern besitzen (Fig. 9, Zink, 300fache Vergrösserung). Die plötzliche Erstarrung gestattet die verschiedenen Phasen der Entwicklung und Zusammenziehung zu verfolgen und die von *Bénard* beschriebene Spaltung festzustellen. Die Kerne selbst scheinen an der Trennung sich zu beteiligen, indem sie sich strecken und einschnüren, um in zwei Kerne zu zerfallen, die zuweilen die neue Scheidewand berühren. Andererseits kann man auch in einigen Zellen Ansätze von Scheidewänden sehen, welche von zwei entgegengesetzten Seiten ausgehend dazu neigen, sich zu verbinden, und zwischen welchen ein mehr oder weniger enger Kanal offen bleibt (Fig. 10, Zink, 400fache Vergrösserung).

B. Die Zellen können auch durch die Bewegungen, denen die Flüssigkeit im Augenblick der Erstarrung ausgesetzt war, eine bestimmte Richtung aufweisen. Fig. 11 (110fache Vergrösserung) wurde dadurch erhalten, dass ein Tropfen geschmolzenes Zink auf eine Glasplatte gebracht wurde; man bemerkt auf diesem Bild grosse Zellenwirbel, und die Netze dieser Wirbel werden durch Reihen primärer Zellen

gebildet, die wahrscheinlich selber wieder kleine Wirbel darstellen.

Es ist bemerkenswert, dass man ganz allgemein diese Struktur oder etwas sehr Ähnliches in den eutektischen Legierungen findet. Fig. 12 (120fache Vergrösserung) liefert ein gutes Beispiel hierfür, das von Herrn *Heyn*¹⁾ stammt. Es bezieht sich auf die eutektische Legierung Kupfer-Kupferoxydul. Die zellenartigen Kornbildungen nehmen in dem Mass, als sie in dem bewegten mittleren Teil erstarren, durch die Wirbelnetze bestimmte Richtungen ein; sie könnten übrigens in dem ruhigeren Teil auch vereinzelt bleiben. Davon rührt die punktierte Struktur her, die man in den eutektischen Legierungen ebenfalls häufig findet.

C. Die zellenartige Struktur, welche den Flüssigkeiten eigen ist, verhindert aber die Bildung einer krystallinischen Struktur keineswegs, sofern diese bei den betreffenden festen Körpern eine normale Erscheinung ist. Die Art und Weise, wie diese beiden Strukturen sich gegenseitig kombinieren, führt zu eigentümlichen Erscheinungen.

So zeigt z. B. Zinn (Fig. 13, 250fache Vergrösserung), das in angemessener Dicke gegossen wurde, ein Gemenge von Zellen und Krystallen. Die Zellen, welche ursprünglich vor ihrer Polyedrisierung kugelförmige Gestalt haben und wahrscheinlich mit den „Globuliten“ der Mineralogen identisch sind, gruppieren sich zu abgerundeten Krystallen. Dieser Übergangspunkt ist im Bilde festgehalten.

Das Zink (Fig. 14, 150fache Vergrösserung) zeigt uns ein anderes Verhalten. Es ist wahrscheinlich, dass jede Zelle bei ihrer Erstarrung zu einem Krystall-embryo wird, welcher eine bestimmte Richtung anzunehmen im Stande ist. Das sehen wir z. B. deutlich beim Blei (Fig. 15, 250fache Vergrösserung). Jede Zelle ist der Sitz eines kleinen Krystalles und diese Krystalle sind ihrerseits wieder in dem Raum eines Krystallkorns nach einer bestimmten Richtung gelagert. Die zellenartige Einteilung bleibt nichtsdestoweniger sichtbar, aber alle Zellen eines Kornes nehmen eine bestimmte Richtung an, welche sie von denjenigen eines benachbarten Kornes unterscheidet. Indessen fallen die Grenzen eines Krystallkorns nicht immer genau mit denjenigen der Zellen zusammen, die sie zusammensetzen. Ein und dieselbe Zelle kann zwei verschiedenen Körnern angehören, wie aus Fig. 16 (Blei, 300fache Vergrösserung) ersichtlich. In dieser Figur sind durch eine leichte Deformation gleichzeitig die Grenzen der Körner, sowie die für jedes derselben charakteristischen parallelen Streifen sichtbar gemacht worden.

¹⁾ Mitteil. aus den k. techn. Versuchsanstalten 1900, p. 315, Fig. 5, Taf. IV.

III.

Feste amorphe Körper.**A. Durch Wärme hervorgerufene Struktur.**

Die Gläser, oder wenigstens einige derselben, zeigen, wenn sie mit Flusssäure behandelt werden, eine vollständig ausgeprägte Zellularstruktur, wie sie von *Bénard* für Flüssigkeiten erhalten worden, und wie wir sie soeben beim Blei (Fig. 8) kennen gelernt haben. Doch sind die Zellwände erhaben, anstatt vertieft. Diese Struktur ist dem Glas wirklich eigen und entsteht nicht, wie man etwa glauben könnte, durch die gegenseitige Begrenzung einzelner geätzter Felder, die ihrerseits ihren Ursprung in den gegen das Ätzen empfindlichsten Stellen haben. Um diese Struktur hervorzurufen, genügt es in der That, das Glas auf Rotglut zu erhitzen, wodurch eine leichte Deformation bewirkt wird (Fig. 17, 400fache Vergrößerung). An den weniger erhitzten und kaum deformierten Stellen ist die Polyedrisierung noch nicht vollständig geworden und man bemerkt die Globulitkerne, welche den Ausgangspunkt der Zelle bilden (Fig. 18, 400fache Vergrößerung). Nach Behandlung mit Flusssäure zeigen diese Zellen oft eine glänzende Streifung, welche an die von oben betrachteten Wirbelströmungen erinnert.

In andern Gläsern neigen die Zellen dazu, sich zu Krystallen zu gruppieren (Fig. 19, 150fache Vergrößerung), wie wir es schon früher beim Zink (Fig. 14) und Zinn (Fig. 13) beobachtet haben.

B. Struktur, die durch Ausdehnung und Zusammenziehen hervorgerufen wird.

Wenn ein Körper sich nach allen Richtungen zusammenzieht, sei es infolge von Abkühlung oder aus anderen Ursachen, so treten an seiner Oberfläche Spannungen auf. Wenn der betreffende Körper nicht genügend plastisch ist, so bildet sich ein Netz von Rissen, das ihn in Zellen einteilt. Diese Zellen sind im allgemeinen viel grösser als die vorhin besprochenen und oft dem freien Auge sichtbar. Hierher gehören die Oberflächenrisse von Steingutgeschirr, von ausgetrockneten Thonen u. s. w. Man kann solche Risse auch auf beinahe trockener Gelatine erzeugen, indem man deren Oberfläche mit absolutem Alkohol behandelt, welcher die Austrocknung vollendet (Fig. 20, 85fache Vergrößerung). Wenn die im Spannungszustand befindliche Fläche als unbegrenzt betrachtet wird, so würde eine Teilung in hexagonale Prismen stattfinden (Basalt). Körper mit geringen Dimensionen scheiden sich in Prismen, welche normal zu der Oberfläche stehen; bei angemessenen Dimensionen findet man diese Prismen an der Peripherie, im Innern dagegen in Kugeln eingeschriebene Polyeder, welche sich dem Rhombendodekaeder zu nähern scheinen.

Diese Struktur ist oft unvollständig, da die Zellen sich nicht völlig schliessen. Ihre Seiten reduzieren

sich dann zu Strahlen, welche gewöhnlich von drei- oder vierzähligen Kulminationspunkten ausgehen; diese Struktur kann auch verborgen sein. So zeichnen auf den in der Photographie gebräuchlichen Bromsilbergelatineplatten während dem Fixieren, die letzten Spuren des Silbersalzes, bevor sie verschwinden, oft ein derartiges Netz auf.

C. Struktur, die durch Wirkung äusserer Kräfte hervorgerufen wird.

Bei Behandlung dieser Frage ist es nicht nötig, dass wir wirklich amorphe Körper, in der strengsten Bedeutung des Wortes, in Betracht ziehen. Wir dürfen als solche auch krystallisierte Körper betrachten, die aus Krystallkörnern beliebiger Orientierung bestehen, vorausgesetzt, dass die Körner ursprünglicher Struktur, im Verhältnis zu den Maschen des Strukturnetzes, das durch die äusseren Kräfte hervorgerufen wird, sehr klein sind. Diese Bedingung trifft nun in der Regel bei allen Gesteinen zu, mit Bezug auf die grossen geologischen Formveränderungen, ferner bei allen gebräuchlichen Metallen guter Qualität, hinsichtlich der von blossen Auge sichtbaren Änderungen.

Unter der Einwirkung dieser Kräfte treten in jedem Punkt gleichzeitig Zug-, Druck- und Gleiterscheinungen auf. Die Verteilung dieser Beanspruchungen ist namentlich durch die wissenschaftlichen Untersuchungen *Rejöv's* bekannt geworden, der den Teilnehmern des Kongresses ¹⁾ wohl bekannt ist. Der mathematische Teil dieser Untersuchungen gehört jedoch nicht in den Rahmen dieses Berichtes, und wird übrigens weit besser durch den Autor selber entwickelt werden.

Um bei den rein experimentellen Versuchen zu bleiben, sei daran erinnert, dass im einfachsten Fall, wenn ein Prisma von rechteckigem Querschnitt Zug- oder Druckbeanspruchung ausgesetzt wird, zwei Systeme von Oberflächenänderung, oder sogar Bruch auftreten können, das eine parallel oder senkrecht zur Krafrichtung, das andere schräg zu dieser nämlich Richtung. Das erstere nennen wir das direkte, das zweite das schräge System.

„Unter Zugbeanspruchung brechen spröde Körper senkrecht zur Krafrichtung; unter Druck dagegen können sie parallel zur Druckrichtung in Bruchstücke zerfallen, Würfel aus Glas oder hartem Gestein zerspringen unter Druck zu Nadeln, die senkrecht zu den Platten stehen, zwischen welchen sie gelagert waren“ (*Rondelet*²⁾).

Jede parallel zu den Druckplatten liegende Schicht wird in Wirklichkeit nach zwei senkrecht zu einander

¹⁾ Kongress des Internationalen Verbandes für die Materialprüfung der Technik, Budapest 1901. Die Red.

²⁾ Die in Anführungszeichen stehenden Sätze stammen aus dem Bericht, der von Herrn *Mesnager*, dem Pariser Materialprüfungskongress von 1900 vorgelegt worden ist.

liegenden Richtungen gestreckt und zerteilt sich genau so wie beim Zusammenziehen, d. h. durch Zug. Wenn gleichzeitig die senkrecht zu den Druckplatten stehenden Schnitte ihre Form ändern, was nicht nur bei plastischen Körpern vorkommt, sondern auch bei allen möglichen Körpern, wenn sie Schwingungen ausgesetzt sind, so werden die zu den Druckplatten parallelen, ungleichmässig gedehnten Schnitte das Bestreben haben, sich voneinander durch Gleiten zu trennen; von daher rührt die schieferartige Struktur und schliesslich der Bruch.

In einem bei Dunkelrotglut fertig gewalzten Blech erzeugt das Walzen eine Schichtung des Perlits und ruft sogar im Ferrit ungleichmässig harte Schichten hervor, die durch chemische Agentien verschieden stark angegriffen werden. Die hellen Linien in Fig. 21 (250 fache Vergrösserung) sind binnen 15 Sekunden durch Salpetersäure, die mit 4 Vol. Wasser verdünnt wurde, auf dem polierten Querschnitt eines schiefen Flusseisenblechs erzeugt worden. Die Furchen sind auf der Oberfläche des Bleches im grossen Ganzen parallel, mit lokalen Abweichungen, welche von der Mikrostruktur herrühren, d. h. vom Perlit und der körnigen Verteilung des Ferrits. Der Ursprung der Schieferigkeit ist übrigens durch die synthetischen Versuche der Geologen *Daubrée*¹⁾ und *Stanislaus Meunier*²⁾ klar gelegt worden.

Das schiefe System ist durch die nämlichen Gelehrten beschrieben worden. *Daubrée*, welcher parallelo-pipedische Probekörper aus Kitt (einem Gemisch von Bienenwachs und Gips mit einem gewissen Zusatz von Harz) zwischen zwei gusseisernen Platten komprimierte, erhielt eine Spaltung der Masse nach Fig. 22. *Stanislaus Meunier* liess ein vorher gestrecktes Kautschukband, das mit Stearin bestrichen war, sich zusammenziehen. Das Stearin spaltete sich in reguläre Rhomboide (Fig. 23 A). Ersetzt man das Stearin durch Gipsplatten von 3 cm Dicke, welche eine entsprechende Konsistenz besitzen, so erhält man eine ähnliche Einteilung mit Spalten und Verwerfungen (Fig. 23 B). In allen diesen Fällen wird eine der Spaltbarkeit analoge Erscheinung bewirkt, und wie man sieht, ist man völlig berechtigt, die durch äussere Beanspruchungen hervorgerufene Struktur der ursprünglichen Struktur gegenüberzustellen.

Bei den Metallen sind die ersten auf das schiefe System bezüglichen Beobachtungen von *Lüders* gemacht worden, aber die eingehendsten Versuche dieser Art stammen von Kommandant *Hartmann*³⁾ her.

Die schiefen Linien sind dadurch gekennzeichnet, dass sie auf den Probestäben für Zug mit der Kraft- richtung einen Winkel bilden, der grösser ist als 45° ,

¹⁾ Etudes synthétiques de géologie expérimentale. *Dunod*, Paris 1879.

²⁾ La géologie expérimentale. *Alcan*, Paris 1899.

³⁾ Distribution des déformations dans les métaux soumis à des efforts. *Berger-Levrault*, Paris 1896.

und auf den Druckprobekörpern den entsprechenden Ergänzungswinkel. Man kann diese Linien übrigens mit der grössten Leichtigkeit und ohne Zuhilfenahme irgendwelcher Maschine dadurch erhalten, dass man zwischen den Fingern Stäbe aus Glaserkitt auszieht oder dass man ein dünnes Blatt Gelatine durch Biegung bricht (Fig. 24, 200 fache Vergrösserung).

Auf die nämliche Ursache darf man vielleicht jene nahezu senkrecht zu einander stehenden Linien zurückführen, welche *Stead*, ohne sie jedoch selbst hervorrufen zu können, auf gewissen dünnen Blechen aus besonders weichem Flusseisen beobachtet hat.¹⁾ Fig. 25. Unserer Ansicht nach, sind möglicherweise die schrägen Linien, die Schnitte direkter Wellen ganz ähnlich denjenigen, welche in einem mit einer Flüssigkeit gefüllten rechteckigen Gefäss entstehen, wenn die Flüssigkeit in Schwingungen versetzt wird. Es kann zwar einigermaßen paradox erscheinen, die Oberfläche eines Metalls mit derjenigen einer Flüssigkeit zu vergleichen, welche durch einen Wind in steter Bewegung erhalten wird.

Aber auf deformierten Metallen sind die erwähnten Furchen durch den Kommandanten *Mengin*²⁾ direkt beobachtet worden und zudem sind unsere Bauwerke stetigen Vibrationen ausgesetzt. Die Schnitte direkter beweglicher Wellen stellen feststehende Linien dar. Diese können sich durch bleibende Formänderungen eher geltend machen, als die beweglichen Wellenlinien, da die Begegnung zweier Wellen eine Formänderung bewirkt, welche gleich der Summe der beiden einzelnen Formänderungen ist und die Elastizitätsgrenze in diesen Punkten früher überschritten wird, als auf dem Verlauf der ursprünglichen Wellen. Es besteht übrigens ein Unterschied zwischen den Flüssigkeiten und den festen Körpern. Bei den erstern sind die Kreuzungslinien der Wellen unter einem Winkel von 45° zu den Richtungen der geradlinigen einen rechten Winkel bildenden Wellenlinien geneigt. Bei den festen Körpern dagegen ist dieser Winkel mehr oder weniger von 45° verschieden. Um diesen Unterschied zu erklären, muss man zu einer Hypothese Zuflucht nehmen, deren mehrere möglich sind. Man kann beispielsweise annehmen, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen in der Druckrichtung eine grössere ist als in der Zugrichtung. Die Deformation und der schliesslich eintretende Bruch vollziehen sich bald nach dem direkten, bald nach dem schrägen System, noch öfters nach beiden zusammen. Das direkte System herrscht mehr bei brüchigen Körpern vor. Wenn man z. B. mittelst Schlag aus einer Glasplatte ein Loch ausstanzen will, so wird im Angriffspunkt ein tangentieller Zug nach konzentrischen Kreisen ausgeübt. Das

¹⁾ Journal of the Iron and Steel Institute, 1898, part I.

²⁾ Comptes rendus t. CXXIV, p. 681, 29 mars 1897.

Glas spaltet sich senkrecht zu dieser Zugrichtung, d. h. strahlenförmig; gleichzeitig bilden sich aber um den Angriffspunkt noch andere Risse, da die Substanz den Formveränderungen, welche sie unter der Wellenbewegung erleidet, nicht zu folgen vermag. Diese Spalten selbst verhindern die Bildung des schrägen Systems, das hier nicht auftritt, wenigstens nicht an der Oberfläche des Glases. Dagegen wird es sehr gut sichtbar auf Gelatine, vorausgesetzt, dass dieselbe nicht zu trocken ist (Fig. 27, 150fache Vergrößerung). In diesem Fall ist nur dieses Netz zu bemerken.

Betrachten wir nun einen etwas komplizierten Fall, nämlich ein gerades längliches Prisma, welches mit einer seiner Längsseiten auf einer Unterlage ruht und auf dessen entgegengesetzter Seite eine Schneide angreift.

Das Schema der Formveränderungen, das nach den Versuchen von *Hartmann* und anderen konstruiert wurde, zeigt sich auf den Seiten in folgenden Erscheinungen:

1. Eine mit der Schneide annähernd konzentrisch verlaufende Ausbauchung mit zwei deutlich ausgeprägten sattelförmigen Erhebungen im Sinne der Linie OX , und zwar an der Stelle, wo die Druckwirkung durch die in entgegengesetzter Richtung wirkende Zugbeanspruchung am wenigsten aufgehoben ist.
2. Zwei konjugierte Liniensysteme AB und $A'B'$, die ihre konkaven Seiten dem Druckpunkt zukehren.
3. Gekrümmte Linien MN , die ebenfalls ihre konkave Seite der Schneide zukehren und symmetrisch zur Vertikalaxe der Figur liegen.
4. Linien $M'N'$, die in divergierender Richtung von der oberen Kante ausgehen und für gewöhnlich nur wenig ausgeprägt und schwer sichtbar sind.

Die konzentrische Formänderung an der Schneide ist die Wirkung der direkten Wellen; sie entsteht unter gleichzeitiger Bildung einer schiefriegen Struktur, sofern der Körper für eine solche empfänglich ist. Die anderen Deformationslinien stehen mit dem schiefen System in Zusammenhang, d. h. mit den Schnittlinien der direkten Wellen. Der Druckpunkt O bildet ein Ausgangszentrum für kreisförmige Wellen, die Unterlage CG sendet ebene parallele Wellen aus; ebenso ist die Streckung, die durch den Eindruck der Schneide entsteht, die Quelle eines Systems ebener Wellen, die zu den vorhingenannten senkrecht stehen. Wir sehen somit hier alle Bedingungen der Fig. 5 (flüssige Oberfläche) erfüllt, sowie auch das Resultat das nämliche ist.

Man ersieht auch sofort, dass das Schema der Fig. 28, aus der Übereinanderlagerung der beiden Halbschemata $DEFG$ und $BCHG$ der Fig. 5 entstehen kann. Die Linien AB und $A'B'$ der Fig. 28 ent-

sprechen dem System konjugierter Parabeln des Rechtecks $DEFG$ der Fig. 5, die Linien MN und $M'N'$ der Fig. 28 dem System konjugierter Parabeln des Rechtecks $BCHG$ (Fig. 5). In Wirklichkeit sind bei festen Körpern, wenn die Geschwindigkeit der Druckwellen von derjenigen der Zugwellen verschieden ist, die Schnitte keine Parabeln mehr, sondern entweder Ellipsen oder Hyperbeln, je nachdem die kreisförmigen Wellen langsamer oder geschwinder verlaufen, als die ebenen Wellen, denen sie begegnen; aber das allgemeine Bild des Schemas wird dadurch, wenn man sich mit einem vorläufigen Näherungswert begnügen will, nicht wesentlich verändert.

Bei einer umfassenden Untersuchung muss natürlich auch dem Zusammenhang Rechnung getragen werden, welchen die Kohäsion unter den einzelnen Teilen einer festen Masse hervorruft und der in Flüssigkeiten nicht vorhanden ist, ferner den Geschwindigkeitsänderungen der Wellen, wenn letztere eine ungleichmässig zusammengedrückte oder bereits erweiterte Materie durchstreichen. Hieraus entstehen verschiedene Störungen, die jedoch nicht imstande sind, gleichförmige Erscheinungen, welche völlig klar liegen, zu verschleiern.

Es ist ferner zu bemerken, dass das Netz, das durch die Kräfte erzeugt wird, vorerst nicht ein Netz der schwächsten Stellen darstellt, wenn die Elastizitätsgrenze von der Bruchlast verschieden ist, sondern das Netz ist bloss die Gesamtheit der am stärksten deformierten Stellen. Wenn der Versuchskörper bleibenden Formveränderungen zugänglich ist, so werden die zuerst deformierten Teile in ihrer weiteren Formveränderung solange innehalten, bis die ganze Masse eine gleichmässige Deformierung erlitten. Die Kräfte erzeugen daher bis zum Eintritt der Einschnürung eine Unzahl sich hintereinander folgender Netze, und auch während der Kontraktion noch solche bis zum Bruch; die Kontraktion als solche erzeugt ebenfalls ein Netz zweiter Ordnung, welches auf den Bruchflächen zuletzt auftritt.

IV.

Feste krystallisierte Körper.

Die allgemeine Aufgabe, die wir uns gestellt, wird immer verwickelter. Die krystallisierten Körper haben die durch die Definition festgelegte krystallinische Struktur, ferner eine Kornstruktur, welche eine Folge der Begrenztheit der Krystalle ist. Wir haben auch gesehen, dass die Krystalle gleichzeitig auch die Cellularstruktur der Flüssigkeiten annehmen können, wenn diese in den festen Zustand übergehen. So kann in einem tadellosen Eisenkrystall mit Würfel-Spaltflächen durch Behandlung mit Salpetersäure diese Struktur noch nachgewiesen werden. Fig. 29 (100fache Vergrößerung) wurde erhalten durch Behandlung des Eisens mit Salpetersäure (10:100) während 30 Sekunden, Fig. 30 (150fache Vergrößerung)

durch Behandlung während 5 Minuten mit Kupfer-Ammonium-Chlorür und nachherige Ätzung während 90 Sekunden mit verdünnter Salpetersäure (10 : 100). Schliesslich wird auch durch äussere Kräfte eine Struktur hervorgerufen, die von der Art der Fortpflanzung und Verteilung dieser Kräfte abhängig ist. Fig. 31 (250 fache Vergrösserung) zeigt beispielsweise eine Bruchfläche von Bleiglanz nach den Spaltungsflächen, auf welcher neben ausgeprägten krystallinischen Spalten gekrümmte Linien von zweifellos anderem Ursprung ersichtlich sind. Fig. 32 (250fache Vergrösserung) zeigt die Bruchfläche eines Pyritwürfels. Dieser Bruch ist vollständig muschelartig, wie die Brüche von Gläsern (Fig. 33, 150fache Vergrösserung), die von Herrn Prof. *Martens* sehr eingehend untersucht worden sind.¹⁾

Die vollständige Lösung unserer Aufgabe bestünde darin, für jeden einzelnen Fall festzustellen, wie die verschiedenen Strukturen, sowohl die ursprüngliche wie die künstlich hervorgerufene, sich gegenseitig kombinieren. Aber diese Aufgabe wollen wir hier nicht zu lösen versuchen.

A. Struktur, die durch Ausdehnung und Zusammenziehung hervorgerufen wird.

Diese beiden Versuchsbedingungen können durch Erhitzung und nachherige Abkühlung erhalten werden. Indessen wird die Frage durch das Auftreten der Wärme kompliziert, denn es ist schwierig festzustellen, welchen Anteil bei dem Versuch die Wärme als solche, und welche Wirkung die Spannungen oder Druckerscheinungen, die durch die Wärme hervorgerufen werden, ausüben. Soviel scheint sicher zu sein, dass jeder Temperatur eine maximale Korngrösse entspricht, welche um so rascher erreicht wird, je höher die Temperatur ist. Die Gamma-Kornbildung des Eisens war seit langer Zeit bekannt, aber Herrn *Stead*, der sich längere Zeit mit dieser Frage beschäftigte, ist es auch gelungen, das Eisenkorn im Alpha-Zustand zu erhalten, d. h. unterhalb 700°. Andernteils scheint sich die umgekehrte Erscheinung, die Verkleinerung des Kornes, während der Abkühlung nicht zu vollziehen. Die Vergrösserung des Kornes durch Erhitzung scheint eine dauernde zu sein, die ausschliesslich von einem Krystallisationsprozess abhängt, was auch der allgemeinen Auffassung entspricht. Wir können aber nicht umhin, auf die Übereinstimmung aufmerksam zu machen, die zwischen der Vergrösserung des Kornes und der Volumenvergrösserung der Zellen im Sinne der *Bénard'schen* Versuche besteht.

B. Struktur, die durch Einwirkung äusserer Kräfte hervorgerufen wird.

Diese Frage ist nach zwei sehr verschiedenen Gesichtspunkten behandelt worden, einerseits von

Hartmann, der die ursprüngliche Struktur bei Seite liess, andererseits von *Ewing* und *Rosenhain*, welche sich nur mit dieser allein beschäftigten.¹⁾

Hartmann nimmt die Deformierungsfähigkeit als eine Thatsache hin und sucht nach den Gesetzen der Verteilung der Formveränderungen. *Ewing* und *Rosenhain* erforschen den Mechanismus der Formänderungen, unabhängig von ihrer Verteilung und erklären ihn:

1. durch die Bildung von Zwillingen,
2. durch Gleiterscheinungen längs den Spaltflächen.

Die beiden Gesichtspunkte sind übrigens nicht unvereinbar. Die Gesamtformveränderungen vollziehen sich nach den Gesetzen der Verteilung der Kräfte; diese Gesetze sind allgemeiner Natur und unabhängig von der Beschaffenheit der Körper. Die elementaren Formveränderungen dagegen hängen in krystallisierten Körpern von Krystallisationserscheinungen ab. Aber für sich betrachtet sind diese Anschauungen zu ausschliesslich. Zweifelsohne spielt die ursprüngliche Struktur ebenfalls eine Rolle. Nehmen wir an, dass die Gesetze über die Verteilung der Kräfte eine bestimmte Bruchlinie bedingen, so wird, wenn zwischen zwei Punkten dieser Linie eine vielleicht sogar längere Linie geringerer Kohäsion besteht, der Bruch selbstverständlich längs dieser Linie erfolgen und die Gesetze über die Verteilung der Kräfte haben nur als allgemeiner Wegweiser gedient.

Andernteils scheint der Gedankengang der Herren *Ewing* und *Rosenhain* unvollständig zu sein, da er nur auf krystallisierte Körper anwendbar ist, es aber auch amorphe deformierbare Körper giebt.

Deformierung durch Zwillingsbildung ist zweifellos möglich, wie es seit langer Zeit durch die Arbeiten einer Reihe von Mineralogen bewiesen ist, die wir an Hand einer sehr interessanten Studie von *Heyn*¹⁾ kurz aufzählen wollen.

Wenn man nach *Reusch* und *Baumhauer* gegen die Ecken *C* und *E* eines Rhomboeders, das durch Spalten von Kalkspat erhalten worden, einen Druck ausübt oder wenn man eine Messerschneide senkrecht gegen die durch einen Pfeil (Fig. 34) bezeichnete Kante drückt, so wird eine Formänderung in der Weise erzeugt, dass die Diagonalebene *AECG* (Fig. 35), die durch die Parallelen *IL*, *KM* und *AE* in die drei Teile I, II und III zerlegt, gedacht werden kann, sich in diesen Parallelen knickt. Der Winkel *L'MK* ist gleich dem Winkel *AEM*, d. h. die Lamelle *L'I'KM* gehört nach ihrer Deformation einem Rhombus an, welcher gegenüber dem Rhombus *EACG* in Zwillingsstellung steht. Da Knickungen, wie diejenigen in *IL* und *KM* in unbegrenzter Zahl vorkommen können und die Lamellenbildung parallel zu den drei Kanten

¹⁾ Philosophical transactions, t. 193, p. 353.

¹⁾ Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, B. XXXXIV, Jahrgang 1900.

¹⁾ Stahl und Eisen, April 1887.



EA, *AD* und *AB* in Fig. 34 auftreten kann, so kann das ursprüngliche Rhomboeder durch diesen Prozess sich jedem beliebigen Raum anpassen, der ihm durch die Formveränderung vorgeschrieben wird.

Dass diese Art der Deformation bei den Metallen vorkommt, ist sehr wahrscheinlich. In der That glaubt Herr *Heyn* sie beim Eisen beobachtet zu haben, und die Herren *Ewing* und *Rosenhain* führen Beispiele an für Kupfer und Blei. (Fig. 36 zeigt deformiertes Blei nach *Ewing* und *Rosenhain* bei 1000facher Vergrößerung.) Es besteht aber noch eine Schwierigkeit. Zwillinge sind in vielen Metallen und Legierungen im Überfluss vorhanden und gehören entweder zu deren ursprünglicher oder der durch Anlassen erzeugten Struktur, z. B. beim Messing mit 0—35 Teilen Zink¹⁾, beim rot angelassenen Kupfer²⁾, bei Eisen-Nickellegierungen mit mehr als 25% Nickel³⁾, beim Gamma-Eisen.⁴⁾ In jedem einzelnen Fall drängt sich die Frage auf, ob die auf einer polierten Fläche durch Deformation hervorgerufene Zwillingsbildung der ursprünglichen Struktur angehört oder ob sie das Produkt der Deformation selbst ist. Die Herren *Ewing* und *Rosenhain* halten die zweite Hypothese für die richtige und stützen sich hierbei auf die Tatsache, dass eine erste und leichte Deformation ihrer Versuchsstücke keinerlei Zwillinge hervorgerufen hat. Aber kann daraus wirklich ein Schluss gezogen werden? Auf Glas gegossenes Blei zeigt auf der dem Glas zugewendeten Seite, an den Stellen, wo das Metall sich nicht an die Unterlage angeschmiegt hat, ein Bild, wie es Fig. 37 (250 mal vergrößert) darstellt, das lebhaft an die Fig. 36 der Herren *Ewing* und *Rosenhain* erinnert, obwohl wir unser Metall nicht deformiert haben. Angesichts der abgerundeten Winkel in einigen Bändern ist es übrigens zweifelhaft, ob es sich hier wirklich um Zwillinge handelt. Viel wahrscheinlicher ist es, dass wir es hier mit Krystallstufen oder Krystallanhäufungen zu thun haben.

Die zweite Art der Formveränderung, auf die sich die Herren *Ewing* und *Rosenhain* berufen, nämlich die Deformation durch Gleiten längs den Spaltflächen, ist ebenfalls durch Mineralogen beschrieben worden, besonders durch Hrn. *Mügge*, den wir noch neben Hrn. *Heyn* anführen. In diesem Falle handelt es sich bloss um die Substituierung gewisser Moleküle durch andere; die innere Struktur wird nicht verändert und die Verschiebung äussert sich nur durch das Auftreten von Streifen auf denjenigen Seiten, welche durch die Richtungen, in welchen am leichtesten eine Verschiebung stattfindet, geschnitten

¹⁾ *Charpy*, Bull. de la Soc. d'encouragement, série 5, t. I, p. 180, févr. 1886.

²⁾ *Heyn*, loco citato.

³⁾ *Osmond*, Annales des Mines, série 9, t. XVII, jan. 1900, fig. 37 à 39, pl. IV.

⁴⁾ *Saniter*, Journal Iron and Steel Inst. 1898, part I. p. 206, pl. XXII—XXIV.

werden. Diese Streifen nennt man Schiebungsstreifen. Beim Kupfer findet nach *Mügge* diese Verschiebung parallel zu den Seiten des Oktaeders statt. Diese Schiebungsstreifen sind es auch, welche infolge der Deformation der Schnittflächen bei den Versuchen von *Ewing* und *Rosenhain* auftreten. Indessen scheinen diese Forscher eine an sich richtige Idee zu sehr verallgemeinert zu haben. So erhält man auf den vorher polierten Flächen weichen Stahls (Fig. 38, 800fache Vergrößerung) nach der Deformation gebogene und gabelförmig gespaltene Linien, welche schwerlich mit der krystallinischen Struktur in Verbindung gebracht werden können. Wenn man ein rechteckiges Parallelepiped aus weichem Stahl auf eine ebene Unterlage bringt und auf die obere Fläche, senkrecht zu den Kanten, eine Schneide aufsetzt, so erscheint auf der polierten Seitenfläche nebst anderen Deformationen, eine Gruppe konjugierter *Lüder'sche* Linien, von denen wir weiter oben gesprochen. (Linien *AB* und *A'B'* der Fig. 28). Betrachtet man nun das Präparat bei hinreichender Vergrößerung, so findet man, dass die Streifen auf den Ferritkörnern in jedem Punkt parallel zu einem der beiden Systeme *Lüder'scher* Linien orientiert sind, die sich in jenem Punkte schneiden (Fig. 39, 200fache Vergrößerung). Doch eignen sich die gewöhnlichen Metalle, deren Krystallkörner in krystallinischer Beziehung nach allen möglichen Richtungen orientiert sind, nicht gut zum Studium dieser Fragen. Es ist vorteilhafter, diese Versuche an einfachen Krystallen, deren krystallinische Struktur von vornherein bekannt ist, vorzunehmen. Leider sind solche Versuchsstücke nicht überall zu haben. Wir verdanken ein solches der Freigebigkeit von Herrn Professor *Tschernoff*. Es ist ein Bruchstück aus einer Ofensau eines Martinofens, aus welchem durch Spaltung für unsere Versuche hinlänglich grosse Stücke gewonnen werden konnten.¹⁾ Durch Behandlung mit Kupfer-Ammoniumchlorür erhält man prächtige würfelartige Ätzfiguren parallel zu den Seiten des Würfels (Fig. 40, 1200fache Vergrößerung); ausserdem bekommt man durch Behandlung mit derselben Flüssigkeit oder noch besser mit konzentrierter Salpetersäure gerade Linien, die im Verhältnis 1:1 oder 1:2 zu den Kanten des Würfels geneigt sind. Es sind dies die sog. *Neumann'schen* Linien, welche Gelehrten, wie *Tschermak*, *Linck*, *Cohen*, die sich namentlich in Wien mit dem Studium der Meteor-eisen beschäftigt haben, wohl bekannt waren.

Über die Herkunft dieser Linien ist man noch nicht ganz einig. Man weiss nur, dass die Ebenen, deren Spur sie darstellen, auf den Kanten der Würfel Längen abteilen im Verhältnis von 1:1:2, vielleicht auch im Verhältnis von 1:2:2. Einige Forscher

¹⁾ Derartige Stücke sind schon früher von Herrn *Stead* untersucht worden (bereits citiert) und von Herrn *Heyn*. (Mitteil techn. Versuchsanstalten 1898, p. 310.)

fassen sie als Spaltlinien auf, andere als Lamellen in Zwillingstellung (Fig. 41, 7fache Vergrößerung).

Wie dem auch sei, werden nach *Ewing* und *Rosenhain* durch die Deformation einer Seite eines Würfels folgende Erscheinungen hervorgerufen:

1. würfelförmige Ätzfiguren,
2. die *Neumann'schen* Linien,
3. eventuell Zwillinge

und weiter nichts anderes.

In der That ruft eine langsame Formveränderung keinerlei zu den Kanten des Würfels parallel verlaufende Linien hervor. Dagegen beobachtet man die *Neumann'schen* Linien, dieselben, die durch Behandlung mit Säure nachgewiesen werden und ausserdem eine Menge von Linien, die in keinerlei Beziehung zu den bis jetzt bekannten Krystallisationsvorgängen stehen.

Die am häufigsten angewendete Art der Formveränderung, die auch unseren Betrachtungen vorwiegend zu Grunde lag, besteht in dem Druck einer Schneide gegen eine Seite. Die entgegengesetzte Seite ruht dabei auf einer ebenen Unterlage, während eine der zu der Schneide senkrecht stehenden Seitenflächen zur mikrographischen Untersuchung dient. In unserem Fall sind alle Seiten des festen Versuchskörpers Seiten eines Würfels. Mit blossen Auge oder bei schwacher Vergrößerung beobachtet man um die Schneide herum eine wulstförmige Erhebung mit den zwei Sätteln *OX*, nach Fig. 28, ferner die *Neumann'schen* Linien, welche durch eine frühere Behandlung mit Säure hervorgerufen, durch nachheriges Polieren aber wieder ausgelöscht worden. Bei stärkerer Vergrößerung bemerkt man, namentlich zu beiden Seiten des komprimierten Punktes, eine grosse Zahl feiner gebogener Linien, welche nach Form und Lage den konjugierten Linien *AB* und *A'B'* der Fig. 28 entsprechen; es sind dies die mikroskopischen Linien von *Lüders*, die durch Behandeln mit Säuren verwischt und nicht stärker hervorgehoben werden. Treffen sie mit einer *Neumann'schen* Linie zusammen, wie z. B. in Fig. 42 (250fache Vergrößerung), so werden sie oft abgelenkt oder durch dieselbe unterbrochen.

Wenn die nämliche Deformation durch Stoss hervorgerufen wird, so entstehen eine Unmenge *Neumann'scher* Linien, wie sie weder bei langsamer Formänderung, noch durch Behandlung mit Salpetersäure erhalten werden (Fig. 43, 50fache Vergrößerung). Die breite dunkle Linie, welche eine Verwerfung zeigt, ist eine Würfel-Spaltfläche.

Wenn man die untersuchte Fläche wieder aufpoliert, nachdem die Erhebungen derselben vorher weggefeilt worden und dieselbe mit Kupfer-Ammoniumchlorür behandelt, so beobachtet man (Fig. 44, 25fache Vergrößerung), dass die nur wenig deformierten Teile ihre Struktur beibehalten und dass sich unter den starken Deformationen ein doppeltes

System von abwechselnd dunkeln und heller scheinenden Fransen gebildet hat. Bei stärkerer Vergrößerung betrachtet (Fig. 45, 1200fache Vergrößerung) sieht man, dass ein Teil dieser Fransen ihre krystallinische Richtung im grossen Ganzen beibehalten hat; aber die Teilungslinien haben sich vervielfacht und sind deutlich parallel zu einer einzigen der Würfelspaltflächen, während die dazu senkrecht stehende Spaltung verkümmert erscheint; die andern sind unversehrt geblieben.

In diesem Fall stehen also die Deformationen mit der Krystallisation in engem Zusammenhang. Man beobachtet auch, wenn auch seltener (Fig. 46, 1200fache Vergrößerung), Ätzfiguren, in welchen sich die ursprünglichen Quadrate in Parallelogramme oder Rechtecke verwandelt haben.

Aus allem geht hervor, dass die Deformationslinien verschiedenen Ursprung haben; die einen gehören der krystallinen Struktur an, die andern hängen einzig und allein von der Verteilung der Kräfte ab. Ein Bruch tritt besonders leicht da ein, wo die Linien beider Systeme ungefähr die nämliche Richtung verfolgen.

Vorliegende Mitteilung ist, wohl verstanden, nur ein unvollständiger, jedoch der Vervollkommnung fähiger Versuch, der den Zweck verfolgt, die Arbeiten, die nach den verschiedenen Richtungen hin von Mineralogen, Geologen, Mechanikern, Physikern und Metallurgen etc. ausgeführt worden sind, zu klassifizieren, einander gegenüberzustellen. Er soll aber auch klarlegen, was noch zu thun übrig bleibt, um diese Arbeiten zum Nutzen der Materialprüfungswissenschaft zu ergänzen. Die Metallographie berührt so vielerlei Gegenstände, dass sie genötigt ist, sich die Forschungen in anderen Gebieten zu Nutzen zu machen. Aber wenn sie dies thut, so leistet sie andererseits auch etwas.

Dieser wechselseitige Austausch zwischen den Wissenschaften ruft uns eine hübsche Sage dieses Landes in Erinnerung. Die heilige Elisabeth von Ungarn verteilte einst Gaben unter die Armen. Da begegnete sie ihrem Gemahl, dem Markgrafen von Thüringen, welchem die so eifrige Freigebigkeit seiner Frau vielleicht etwas übertrieben vorkommen mochte. Er wollte darum wissen, was sie in den Falten ihres Gewandes verborgen hatte. Der Mantel öffnete sich und was herausfiel waren Rosen.

Wir alle, die wir an diesem Kongress teilnehmen, sind Arme und arm an positivem Wissen; aber unsere Armut schliesst den Wohlthätigkeitssinn nicht aus. Jeder Teilnehmer kommt hierher, um seine bescheidenen Vorräte an Thatsachen und Gedanken, die ihm zu sammeln beschieden war, zu verteilen. Nur wenn wir unsere Mäntel entfalten, fallen daraus keine Rosen, denn dieses Wunder zu vollbringen geht über unsere Kräfte!

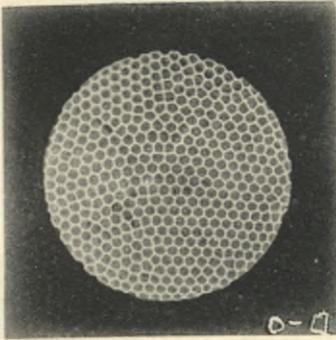


Fig. 1.

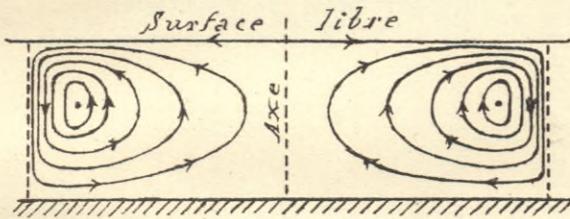


Fig. 2.

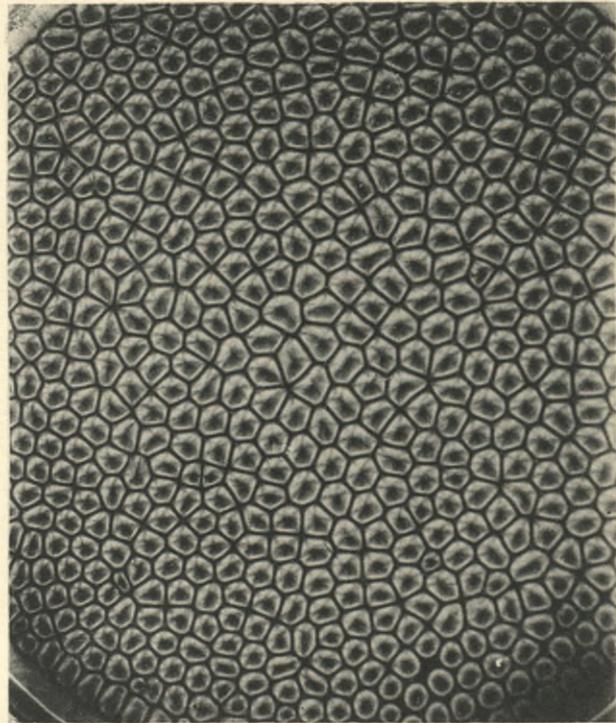


Fig. 3.

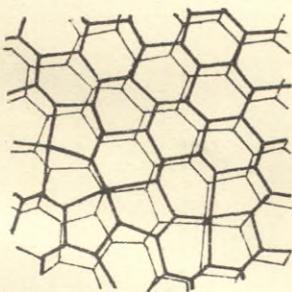


Fig. 4.

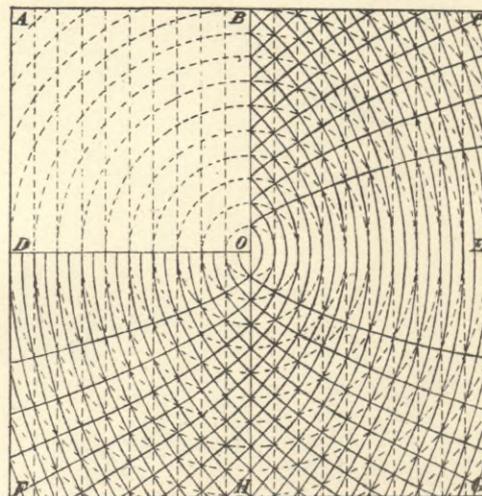


Fig. 5.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

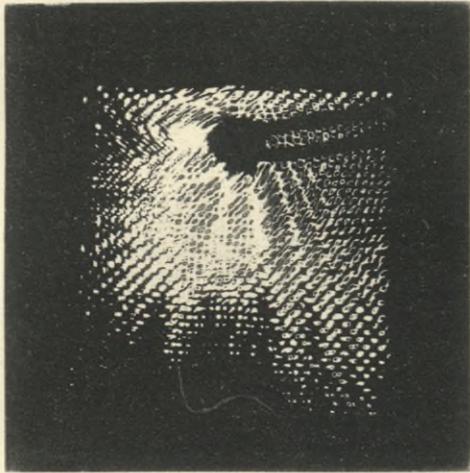


Fig. 6.

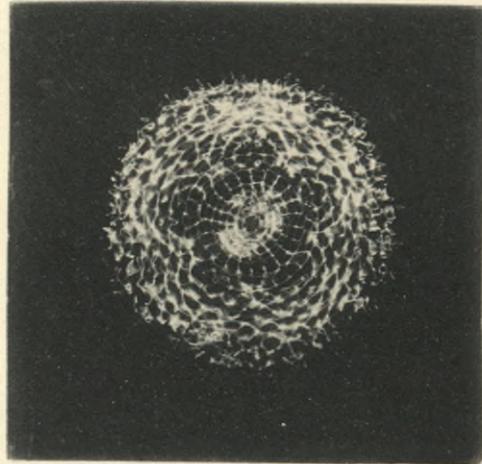


Fig. 7.

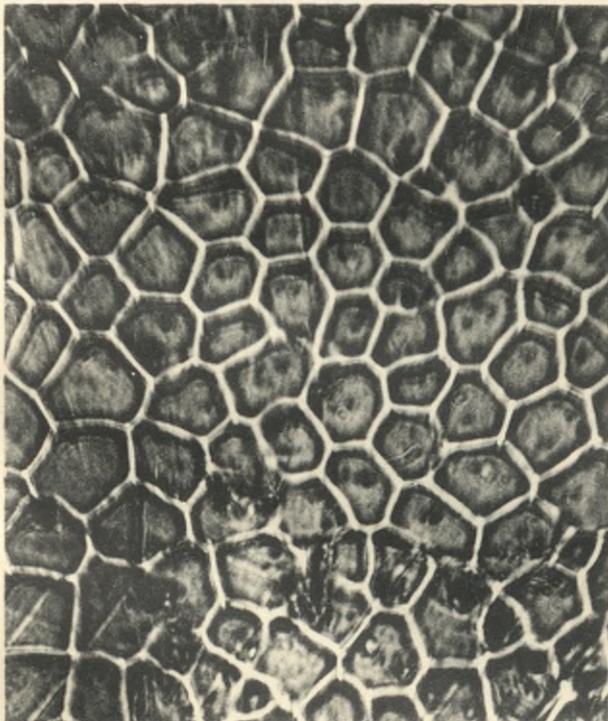


Fig. 8.
300 diam.
300 fache l. Vergr.

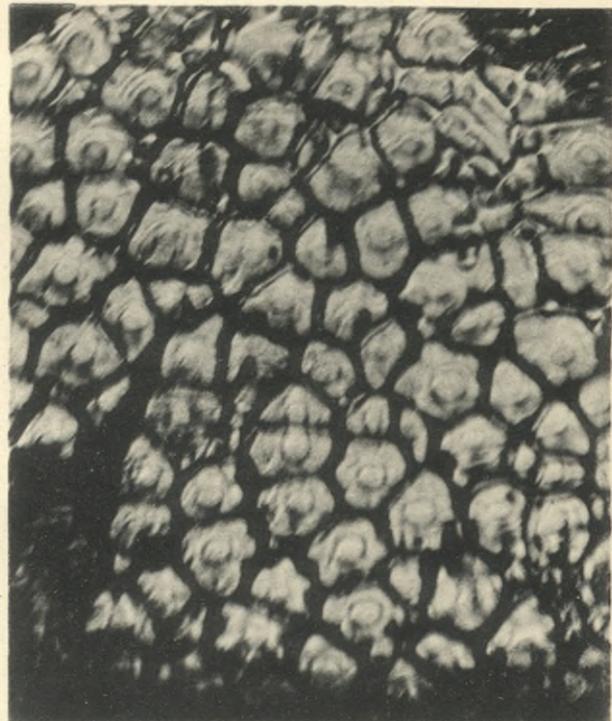


Fig. 9.
300 diam.
300fache l. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

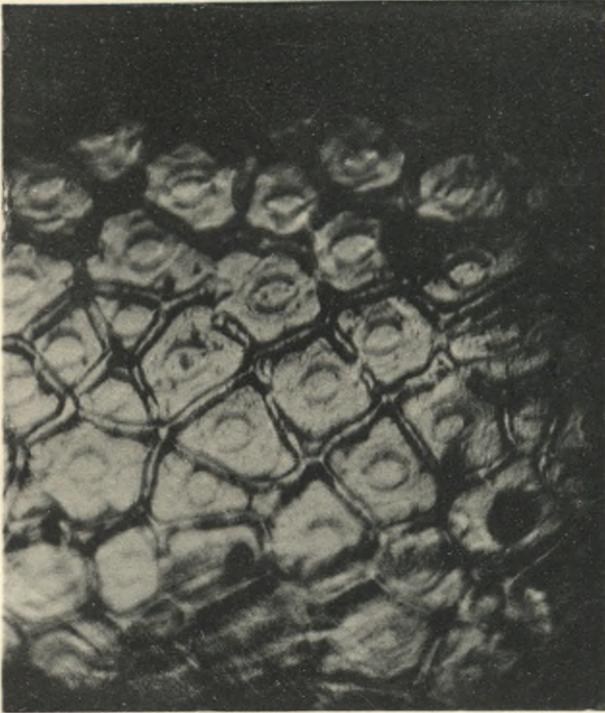


Fig. 10.
400 diam.
400fache l. Vergr.

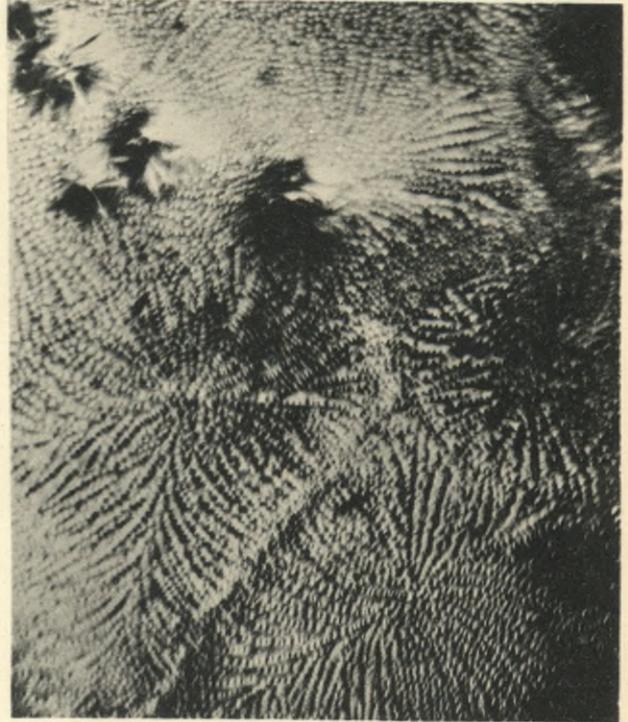


Fig. 11.
110 diam.
110fache l. Vergr.

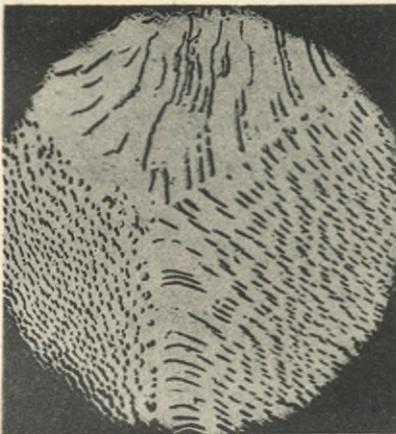


Fig. 12.
123 diam.
123fache l. Vergr.



Fig. 13.
250 diam.
250fache l. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW



Fig. 14.
150 diam.
150 fache l. Vergr.

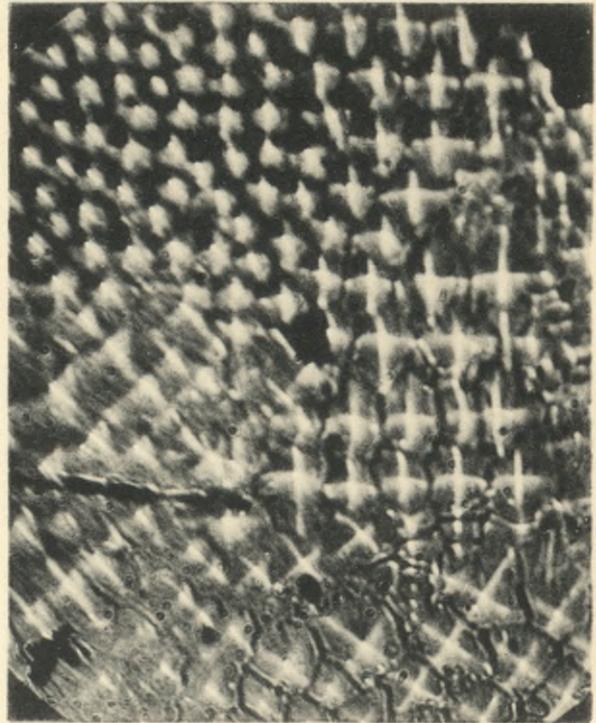


Fig. 15.
250 diam.
250 fache l. Vergr.



Fig. 16.
300 diam.
300 fache l. Vergr.

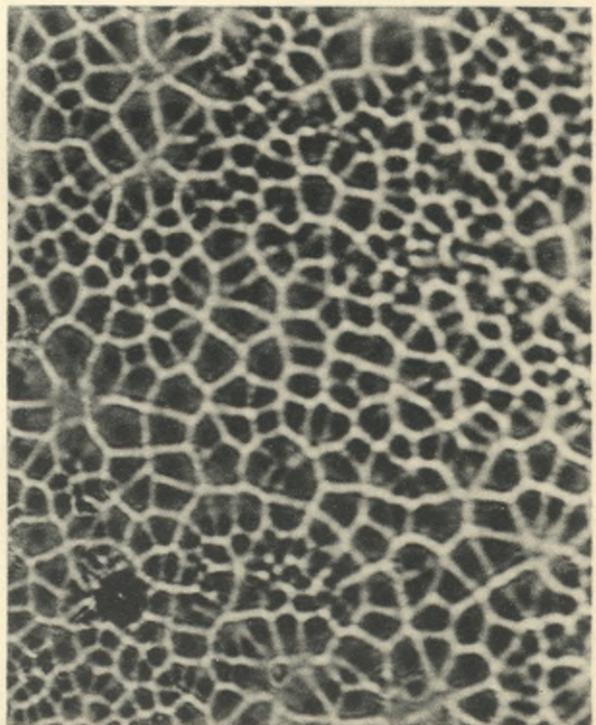


Fig. 17.
400 diam.
400 fache l. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

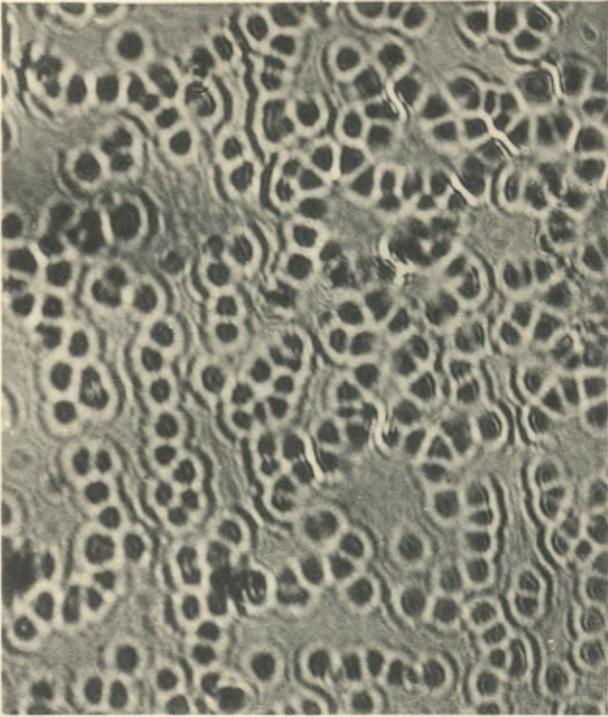


Fig. 18.
400 diam.
400fache l. Vergr.



Fig. 19.
150 diam.
150fache l. Vergr.

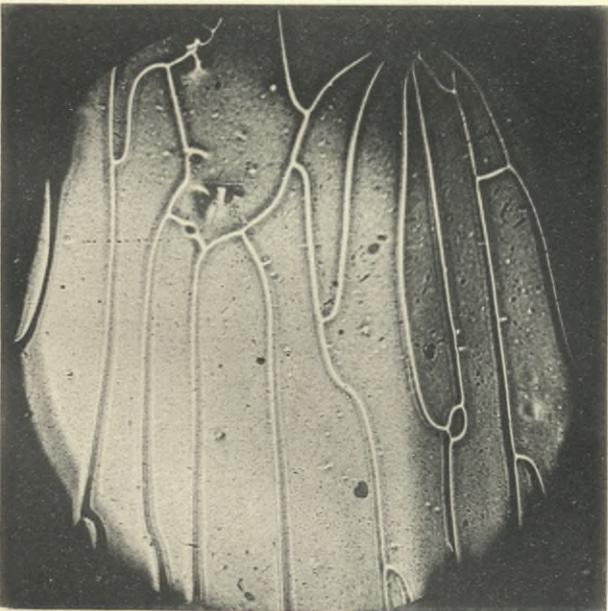


Fig. 20.
85 diam.
85fache l. Vergr.

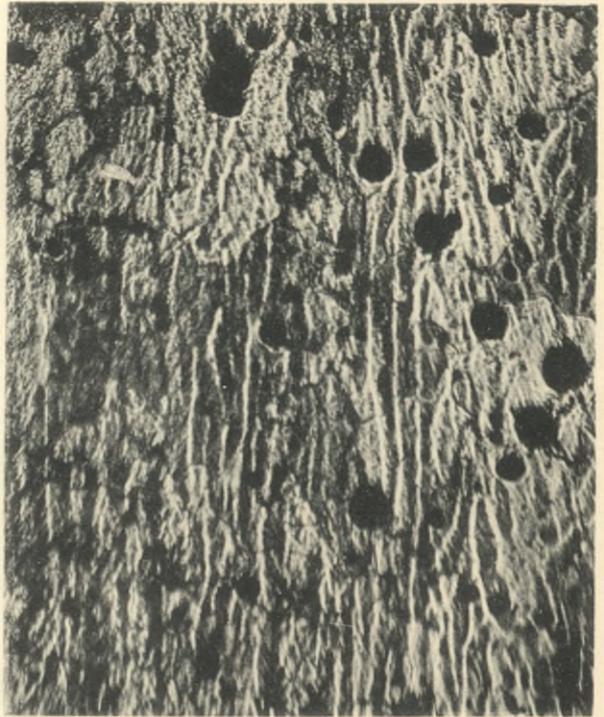


Fig. 21.
250 diam.
250fache l. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

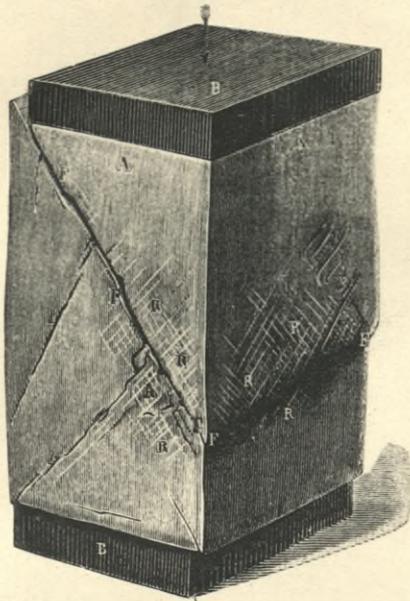
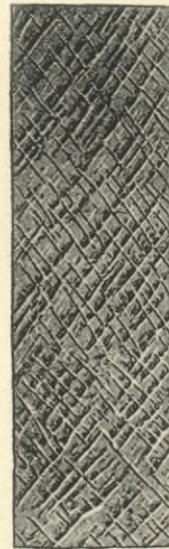


Fig. 22.



A. Fig. 23. B.

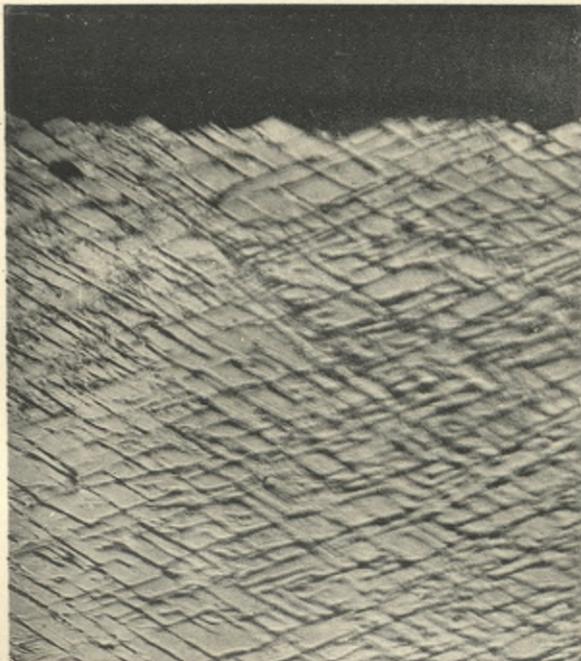


Fig. 24.
200 diam.
200 fache l. Vergr.

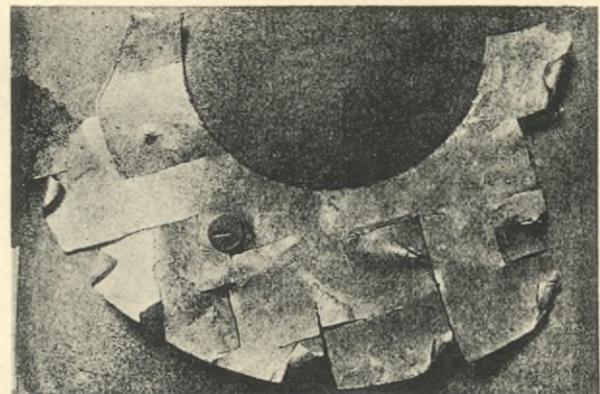


Fig. 25.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

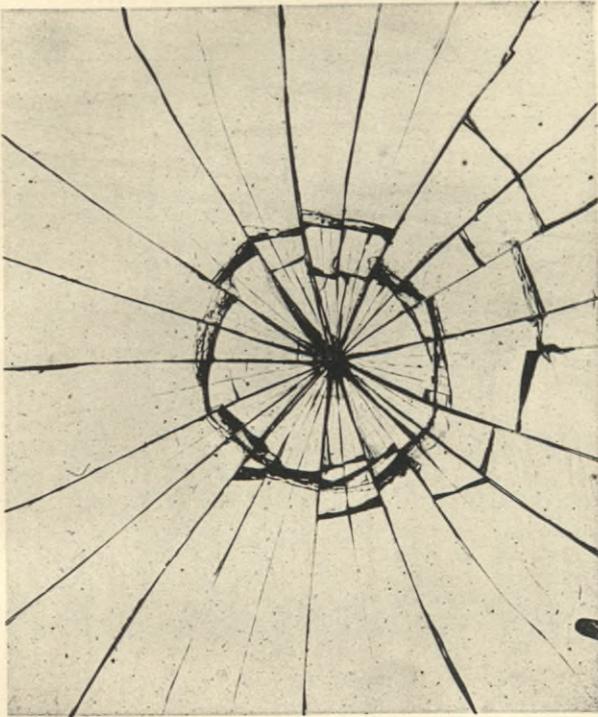


Fig. 26.

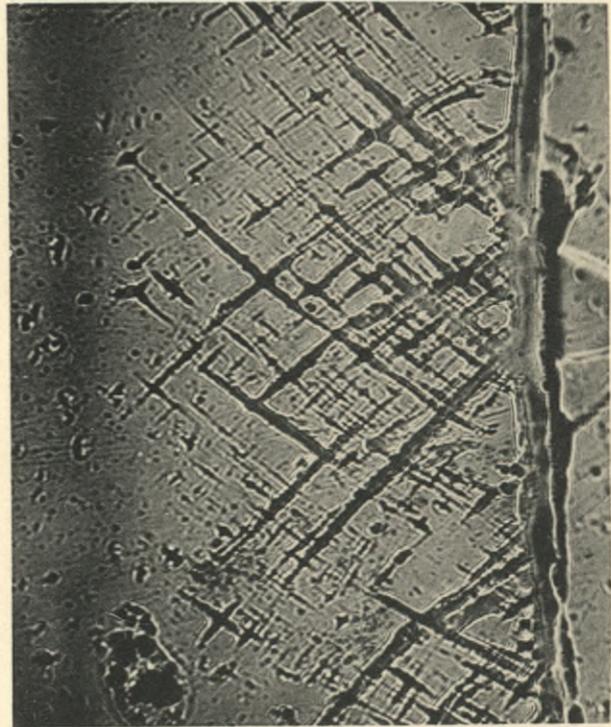


Fig. 27.

150 diam.
150fache I. Vergr.

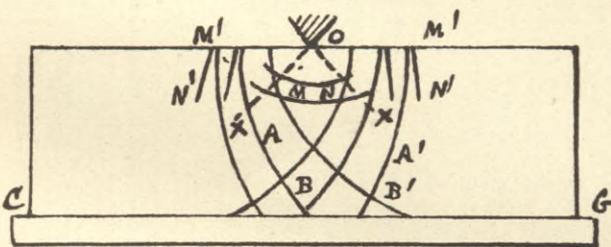


Fig. 28.

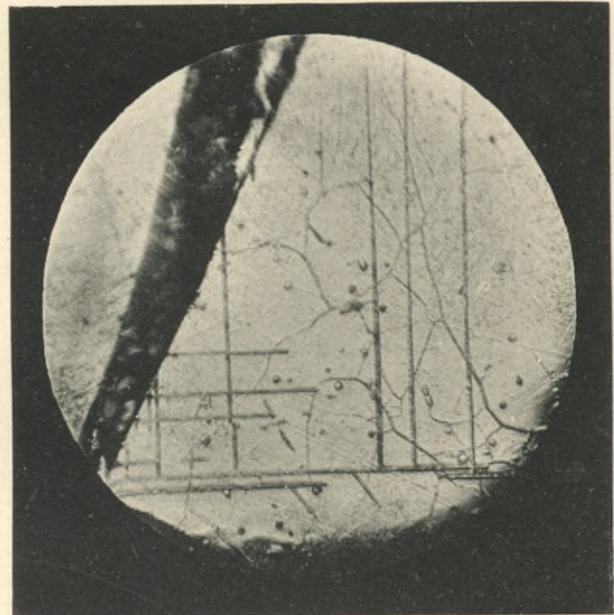


Fig. 29.

100 diam.
100fache I. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

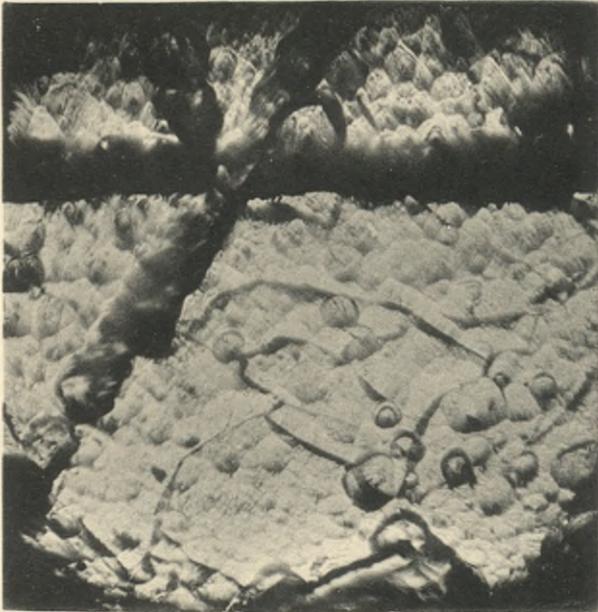


Fig. 30.
150 diam.
150fache l. Vergr.



Fig. 31.
250 diam.
250fache l. Vergr.



Fig. 32.
250 diam.
250fache l. Vergr.



Fig. 33.
150 diam.
150fache l. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

Fig. 34.

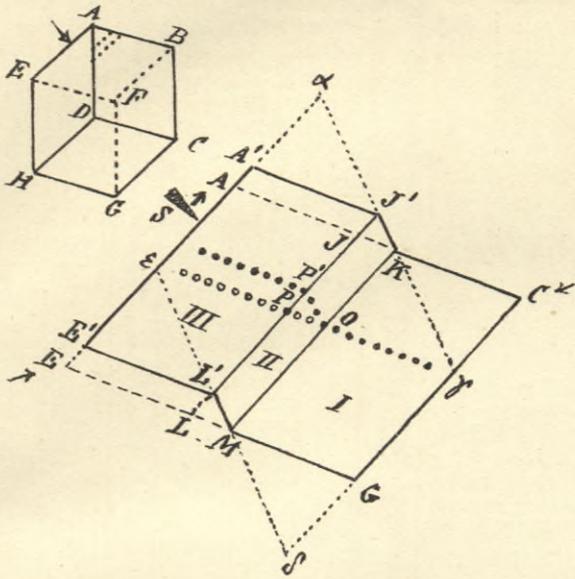


Fig. 35.

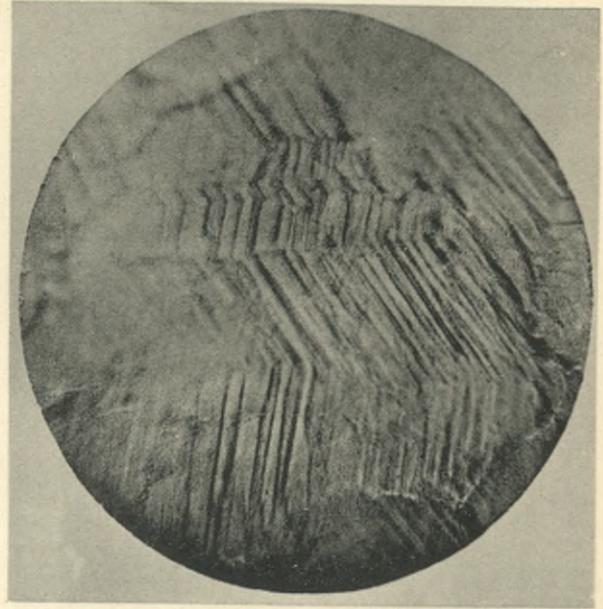


Fig. 36.

1000 diam.
1000fache l. Vergr.

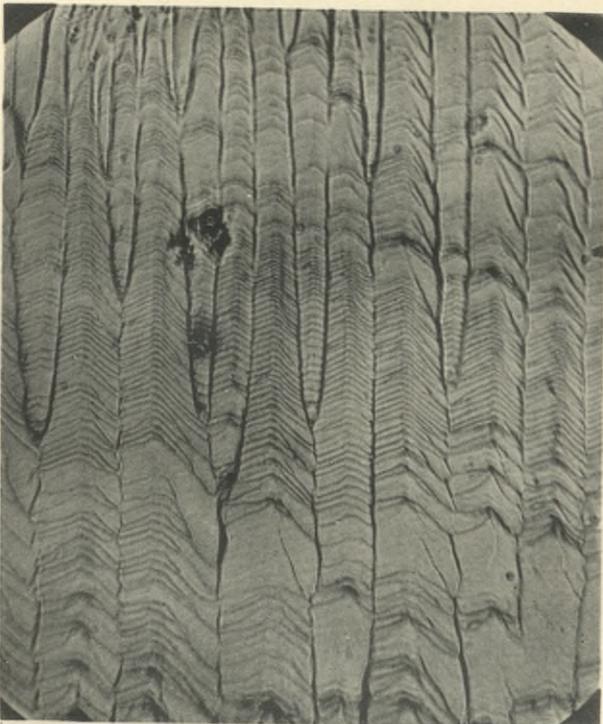


Fig. 37.

250 diam.
250fache l. Vergr.



Fig. 38.

800 diam.
800fache l. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW



Fig. 39.
200 diam.
200 fache l. Vergr.

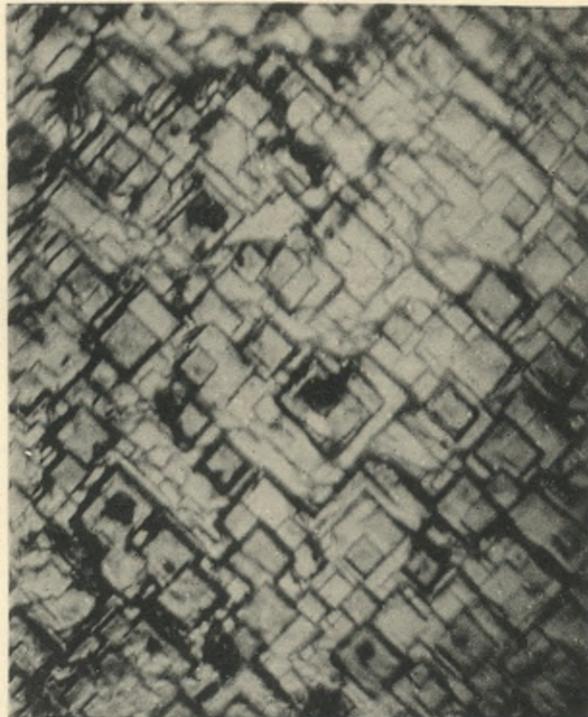


Fig. 40.
1200 diam.
1200fache l. Vergr.

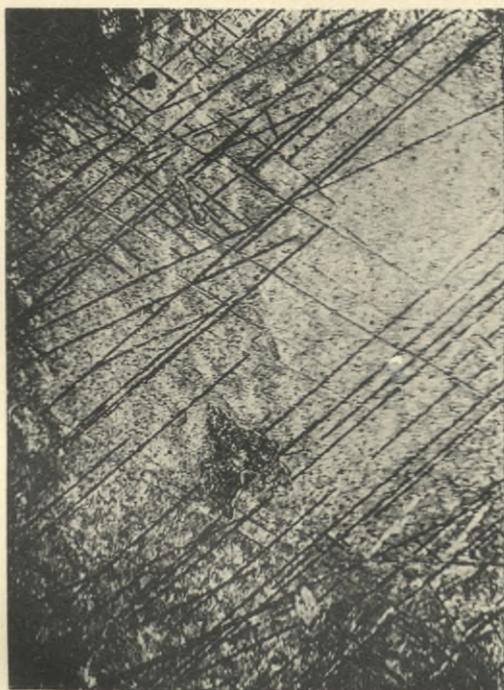


Fig. 41.
7 diam.
7fache l. Vergr.

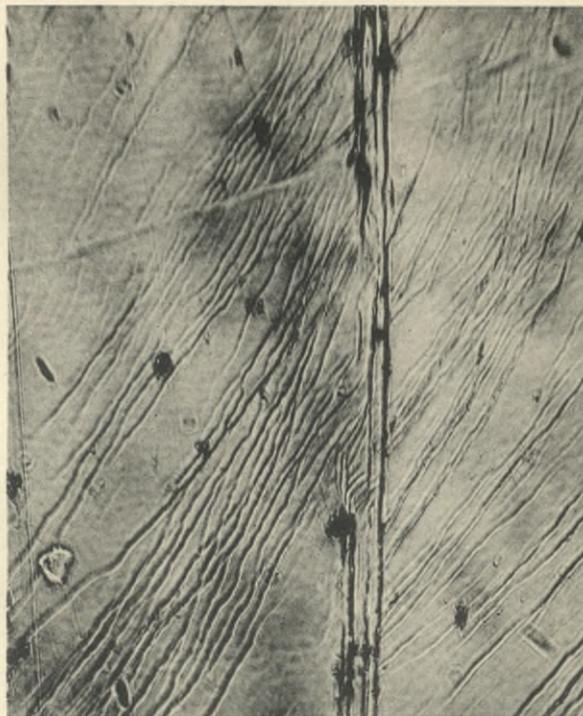


Fig. 42.
250 diam.
250fache l. Vergr.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

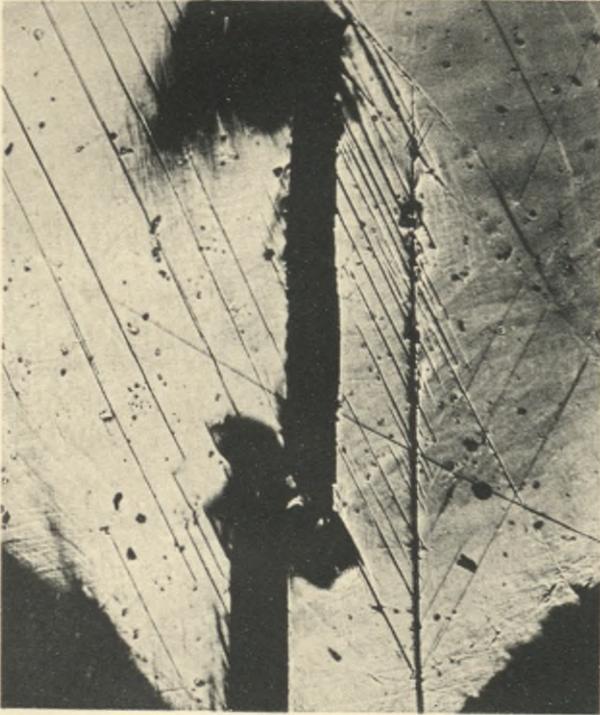


Fig. 43.
50 diam.
50fache l. Vergr.

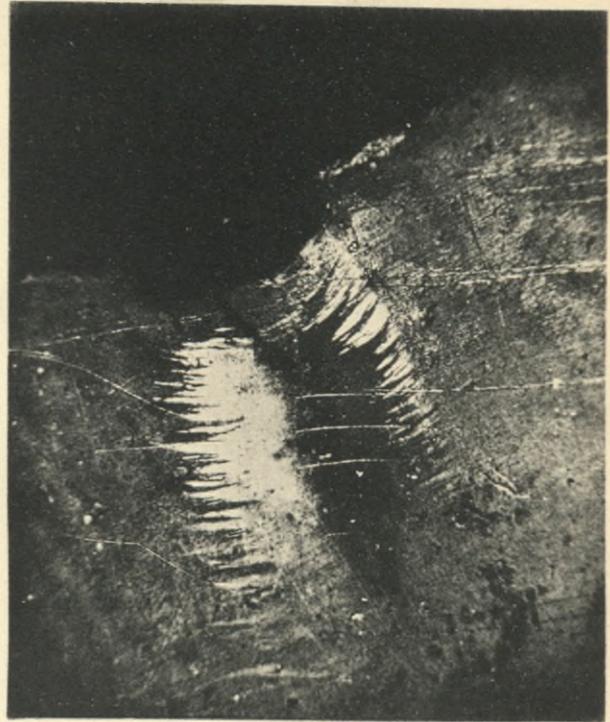


Fig. 44.
25 diam.
25fache l. Vergr.



Fig. 45.
1200 diam.
1200fache l. Vergr.

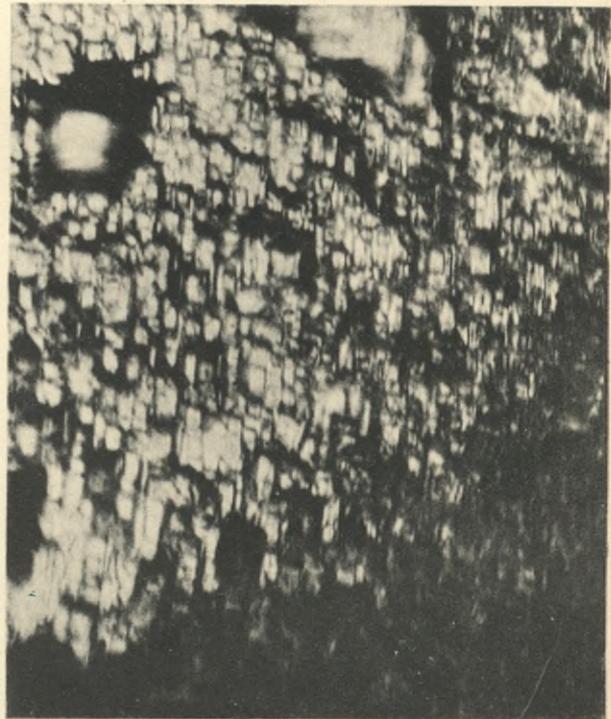


Fig. 46.
1200 diam.
1200fache l. Vergr.

СЛУЖБА ЗАШТИТЕ И БЕЗБЕДНОСТИ

Београд, 15. 11. 1945.

BIBLIOTEKA POLITECHNICZNA
KRAKÓW

S. 61

Biblioteka PK

J.X.51

/ 1901

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000303983