

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 27 (1936)
Heft: 11

Artikel: La tâche du chimiste dans la construction des machines électriques : rapport et discussion
Autor: Boller, W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057503>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 19.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

EDITEUR ET ADMINISTRATION:

S. A. Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei, Zurich 4
Stauffacherquai 36/40

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXVII^e Année

N^o 11

Vendredi, 29 Mai 1936

La tâche du chimiste dans la construction des machines électriques.

Rapport

présenté à l'Assemblée de discussion de l'ASE du 23 novembre 1935, à Olten,
par W. Boller, Zurich-Oerlikon,

et

Discussion.

620.1 : 621.313

L'auteur, M. le Dr Boller, chimiste aux Ateliers de Construction Oerlikon, commence par préciser la nature et le sens du travail d'un chimiste dans une fabrique de machines et d'appareils électriques. Il expose ensuite ce domaine important d'application de la chimie à l'aide de quelques exemples de méthodes d'essai qui intéressent aussi le non-chimiste: le contrôle des propriétés des métaux, surtout du fer et de l'acier, l'examen des ruptures par fatigue et de différents autres phénomènes intéressants de destruction, l'analyse des huiles isolantes et des vernis à base de résines synthétiques.

D'autres questions concernant les matières isolantes sont traitées au cours de la discussion, de même que les théories nouvelles sur les propriétés mécaniques des matières premières (rupture par fatigue, méthodes d'essais d'endurance), la corrosion sélective, les tensions de déformation, la topochimie, etc.

Der Referent, Herr Dr. W. Boller, Chemiker der Maschinenfabrik Oerlikon, umschreibt einleitend die Natur und den Sinn der Tätigkeit eines Chemikers in einer Fabrik elektrischer Maschinen und Apparate. Dieses wichtige Anwendungsgebiet der Chemie wird dann anhand einiger Beispiele von Prüfungsarten, die auch den Nichtchemiker interessieren, erläutert: Es kommt zur Sprache die Überwachung der Eigenschaften metallischer Werkstoffe, besonders des Eisens und der Stähle, und die Untersuchung von Ermüdungsbrüchen und verschiedener anderer interessanter Zerstörungen. Ferner wird die Untersuchung der Isolieröle und der Kunstharzlacke behandelt.

In der Diskussion werden weitere Fragen der Isolierstoffe erörtert; ferner kommen die neueren Anschauungen über die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe zur Sprache (Ermüdungsbrüche, Dauerprüfmethoden), weiter die selektive Korrosion, die Reckspannungen, die Topochemie u. a.

Lorsque je fus engagé par les Ateliers de Construction Oerlikon au titre d'ingénieur-chimiste — il y a plus de 15 ans de cela —, mes nouveaux collègues se demandèrent souvent: «Que vient donc faire un chimiste parmi nous? Quel rapport peut-il exister entre la chimie et la construction ou la fabrication des machines et appareils électriques?»

En peu de temps, je réussis cependant à convaincre ces sceptiques de l'utilité de ma fonction, car les grandes entreprises de construction électrique ont en effet très souvent à résoudre de nombreux problèmes d'ordre purement chimique et offrent ainsi à un chimiste un champ d'activité très intéressant. Je ferai toutefois remarquer dès maintenant qu'un chimiste ayant passé avec succès ses examens dans une école polytechnique n'est pas toujours apte à devenir le chimiste d'une entreprise d'une autre branche. Il est nécessaire qu'il transforme dans une certaine mesure sa façon de penser, sinon il ne lui sera pas possible d'obtenir la confiance des ingénieurs et de les sortir de leur réserve. Il va de soi que c'est au chimiste de s'adapter au langage et aux façons de penser des ingénieurs, et non le contraire.

Mais dès que le chimiste a obtenu ce résultat, son importance est pleinement reconnue et sa collaboration aux travaux des ingénieurs porte alors tous ses fruits.

L'essai des matériaux est considéré comme étant la principale activité du chimiste dans une fabrique de machines électriques. En effet, l'essai des matériaux a de nos jours une grande importance. Mais cela n'a pas toujours été ainsi, et on se bornait autrefois aux essais mécaniques et électriques. Ces essais ont naturellement conservé toute leur valeur et se sont de plus en plus perfectionnés et complétés. Le chimiste doit donc s'assimiler également ce domaine, car durant la période de crise que nous traversons, l'essai général des matériaux est souvent confié à la direction d'un seul employé.

Le but de ce rapport est de fournir quelques renseignements sur l'activité du chimiste dans les entreprises de construction de machines électriques. Je ne traiterai pas les problèmes d'ordre purement scientifique et me bornerai à la description de quelques types d'essais qui intéresseront également ceux qui ne sont pas chimistes. Je parlerai tout d'abord

de l'essai des métaux et des parties métalliques des machines, essai ayant une grande importance pour toutes les entreprises. Le chimiste doit surtout contrôler par des analyses la constance de la pureté et de la composition des matériaux métalliques. Je ne m'étendrai pas plus sur cette activité purement chimique. Les propriétés des métaux ne sont pas exclusivement dues à leur composition. En effet, selon le traitement qu'a subi le métal, ses propriétés peuvent être fort différentes, bien que sa composition soit identique. Ces questions sont du ressort de la *métallographie*, dont je vais dire quelques mots.

En passant de l'état de fusion à l'état solide, les métaux purs forment des cristaux. Comme tous les corps à solidification cristalline, ils présentent un point de fusion bien caractérisé. Au-dessus de ce point, tout est liquide et au-dessous tout est solide. On sait que les autres corps ne se comportent pas tous de cette manière. Ainsi, les verres fondus ne passent que peu à peu à l'état solide lorsqu'ils sont refroidis lentement. Ils deviennent de plus en plus visqueux. Finalement, la viscosité devient infiniment grande. Il n'y a point de température bien déterminée pour la solidification ou la fusion de ces corps. C'est à cette caractéristique que les verres doivent leur propriété d'être optiquement identiques dans toutes les directions, tandis que les cristaux présentent dans les diverses directions des propriétés différentes, par exemple des indices de réfraction différents.

Quand il s'agit d'un métal pur, le refroidissement a lieu selon des lois simples, mais il devient plus compliqué dans le cas de mélanges de plusieurs métaux ou de métaux avec des composés métalliques, tels que les carbures, siliciures, phosphures, etc. Selon le genre et la quantité des adjuvants, le refroidissement est différent et il se forme également des cristaux de différents types. La métallographie a pour but de rendre ces cristaux visibles pour pouvoir étudier leurs caractéristiques. Comme on le sait, on polit à fond une certaine surface de la pièce métallique à examiner. Elle est traitée ensuite par un acide très étendu ou par un sel métallique à réaction acide. Selon leur genre et aussi selon leur position, les cristaux sont plus ou moins attaqués. La surface polie présente alors un relief. Du fait de la petitesse des cristaux, la surface traitée apparaît plus ou moins régulièrement mate à l'œil nu. Pour l'étudier, on se sert d'un microscope spécial qui diffère des microscopes à transparence utilisés en biologie par le fait que l'éclairage de l'objet a lieu à travers l'objectif, c'est-à-dire du dessus.

Considérons par exemple le fer et le carbone :

Le fer se combine avec le carbone à une température d'environ 720° C et donne du carbure de fer. Cette combinaison comporte environ 93 % de fer et 7 % de carbone. Elle présente un caractère métallique et se distingue principalement du fer par sa dureté beaucoup plus élevée. Ce carbure est soluble dans le fer en fusion. Mais cette solubilité du carbure de fer diminue constamment lorsque la tem-

pérature baisse lentement. En-dessous de 730° C, cette solubilité est pratiquement nulle. Le carbure de fer se comporte toutefois différemment selon que le fer en fusion en contient une quantité plus ou moins grande (fig. 1).

Considérons un alliage renfermant environ 50 % de carbure, ou 3,5 % de carbons. On constate tout d'abord que le point de solidification est plus bas que pour le fer pur. Ce dernier se solidifie à environ 1500° C, tandis qu'avec notre alliage les premières particules solides ne commencent à se former qu'à partir de 1280° C. Si l'on recueille ces particules pour les analyser, on constate que la teneur en carbure est devenue plus faible que dans l'alliage primitif. Il s'ensuit qu'elle a dû augmen-

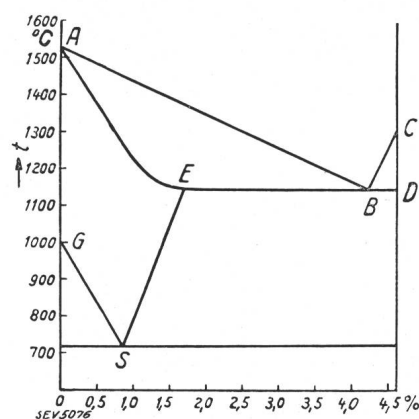


Fig. 1.
Diagramme du système fer-carbone.

ter dans la partie encore liquide, comme le montre d'ailleurs l'analyse. Ce phénomène s'explique par le fait que la solubilité du carbure dans le fer à 1300° C dépasse 50 %, c'est-à-dire que notre alliage à 50 % de carbure n'est pas saturé. Les cristaux de fer et de carbure de fer qui se forment sont désignés en métallographie sous le nom de «cristaux composés». A mesure que la température s'abaisse, d'autres cristaux composés se forment, dont la teneur en carbure est plus élevée que celle des premiers cristaux, sans atteindre toutefois celle de l'alliage en fusion. Ce n'est qu'à 1140° C que les cristaux formés contiennent autant de carbure que le métal en fusion. La teneur atteint alors 65 %, ce qui correspond à 4 % de carbone. Mais à ce moment toute la masse est solidifiée. Cette partie qui se solidifie en dernier lieu est appelée «ledeburite». C'est un *eutectique*, c'est-à-dire l'alliage le plus fluide des deux composants, le fer et le carbure de fer. Dans un alliage qui renferme plus de 65 % de carbure ou plus de 4 % de carbone, les cristaux composés qui se forment en premier lieu présentent une teneur en carbure plus élevée que le reste de l'alliage. Au fur et à mesure du refroidissement, la teneur en carbure diminue de plus en plus, jusqu'à ce que l'eutectique atteigne à nouveau une teneur de 4,3 % en carbone et se solidifie brusquement.

Les transformations ne sont toutefois pas terminées après la solidification complète. Les cristaux composés à teneur en carbure continuent à se décomposer en carbure libre et en cristaux composés

à plus faible teneur en carbure. Après refroidissement complet, le métal obtenu est de la *fonte blanche*, point de départ p. ex. de la fabrication de la fonte malléable (fig. 2). Du fait de sa forte teneur en carbure de fer, cette fonte est dure et cassante. En métallographie, le carbure de fer est appelé «*cémentite*».

Lorsque le métal en fusion est refroidi très lentement et que le fer renferme encore une assez grande quantité de silicium, il se produit une décomposition encore plus forte du carbure en graphite et en fer ou du moins en parties à moindre teneur en carbone. On obtient ainsi de la *fonte grise* (fig. 3).

Un alliage à plus faible teneur en carbure, qui renferme par exemple 10 % de carbure (environ 0,7 % C), présente un tout autre caractère. La première solidification commence peu au-dessous de 1500° C. Les particules solides sont également des cristaux composés de fer et de carbure de fer, mais la quantité de carbure disponible n'est cependant pas suffisante pour permettre la formation de l'eutectique.

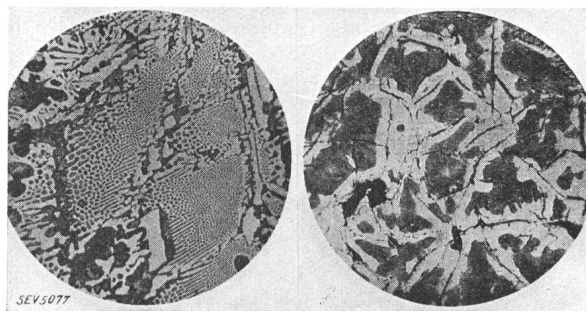


Fig. 2.
Fonte blanche.

Fig. 3.
Fonte grise.

tectique. La solidification a donc lieu à une température plus élevée. Le métal solidifié se compose uniquement de cristaux composés à différentes teneurs en carbure. Toutefois, au fur et à mesure du refroidissement, ces différences sont sensiblement réduites. Vers 800° C, les cristaux composés commencent à se décomposer. Dans le cas de notre alliage à 0,7 % de carbone, le fer pur se sépare tout d'abord, ce qui augmente la teneur en carbure du reste de la masse (fig. 4). Il se forme ainsi à nouveau un eutectique appelé «*perlite*» et composé de couches alternatives de carbure et de fer (fig. 5). C'est le cas pour les aciers au carbone. Lorsque l'on chauffe un tel acier à 800° C, le carbure se dissout dans le fer et l'on atteint à nouveau l'état observé précédemment dans les cristaux composés. Dans cet état, le métal se laisse facilement déformer, par «*forgeage*» ou par «*emboutissage*». Si l'acier à la température de dissolution du carbure dans le fer est brusquement refroidi, par exemple par immersion dans l'eau, la décomposition en fer et en perlite n'a pas le temps de se produire. On obtient ainsi une dissolution solide à la température ordinaire. Dans cet état, l'acier est dur et cassant. Ce procédé est

utilisé très fréquemment en pratique (acier trempé) (fig. 6).

J'ai dit que, par ce refroidissement brutal, nous avions ramené à la température ordinaire la solu-

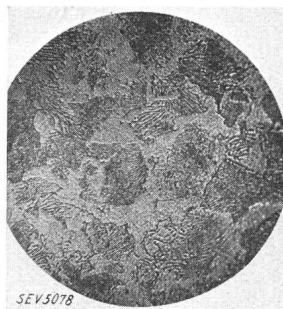


Fig. 4.
Perlite dans de la ferrite.

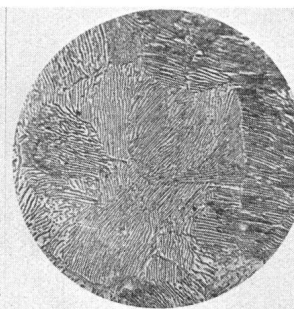


Fig. 5.
Perlite pure.

tion solide qui n'est stable qu'à une température plus élevée, et que ceci est dû au fait que la décomposition n'a pas le temps de se produire à cause du refroidissement très rapide. Cela n'est pas tout à fait exact. En réalité, une transformation s'est tout de même produite. Or, on peut également empêcher cette transformation si l'on a soin d'allier à l'acier certains métaux en grandes quantités, tels que du nickel ou du manganèse. Ces adjuvants transposent la température de transformation à la température du local (fig. 7). Ces aciers présentent la propriété remarquable d'être non-magnétiques, propriété dont on fait souvent usage en technique. Ce phénomène est surtout remarquable dans les aciers au nickel, car les deux composants sont magnétiques. Ce phénomène s'explique par le fait que les aciers au carbone deviennent eux aussi brusquement non magnétiques, lorsqu'ils ont atteint par échauffement progressif la température de formation de la dissolution solide du carbure dans le fer. Dans

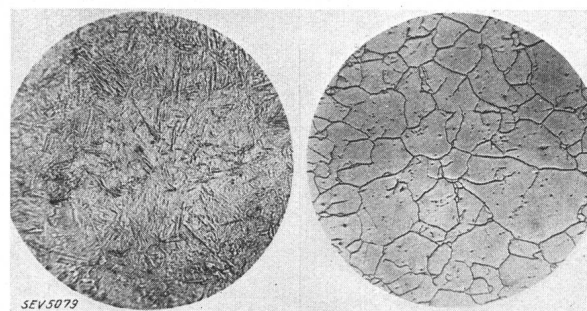


Fig. 6.
Structure de l'acier au carbone trempé.

Fig. 7.
Structure d'un acier au manganèse et au nickel non magnétique.

d'autres métaux et alliages, les phénomènes sont entièrement différents, mais cela nous conduirait trop loin.

Dans les laboratoires des usines qui travaillent les métaux, la métallographie doit également s'occuper d'autres problèmes.

Supposons qu'un arbre de moteur se soit brisé à son entrée dans le palier. Le constructeur suppose que le métal présentait un défaut. Au microscope, on constate l'aspect typique d'une cassure par fatigue (fig. 8). L'essai métallographique montre que la structure du métal est très serrée autour de la cas-

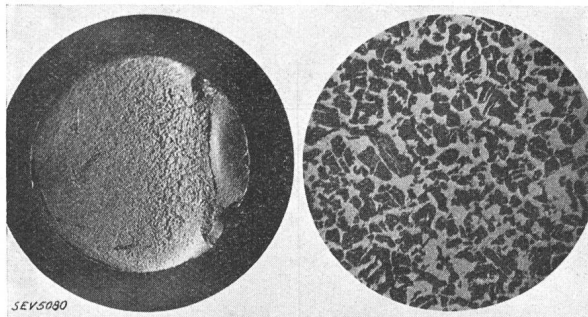


Fig. 8.
Rupture d'un arbre par
fatigue.

Fig. 9.
Structure dans le voisinage
immédiat de la rupture de
l'arbre de fig. 8.

sure (fig. 9). Les surfaces sombres sont celles de l'eutectique fer-carbure de fer, tandis que les plus claires sont celles du fer pur. Si la cassure était due à un défaut du métal, la structure présenterait certainement des irrégularités ou des inclusions de laitier. Cela n'étant pas le cas, la cassure n'est pas due à un défaut du métal. Elle provient manifestement d'un défaut de construction, peut-être d'un trop faible congé du profil au passage du tourillon à celui du diamètre normal de l'arbre.

Supposons maintenant qu'un autre arbre se soit brisé au même endroit, bien que le congé ait été amplement dimensionné (fig. 10). L'examen d'une surface polie perpendiculairement à l'axe montre que la couche à la périphérie de l'arbre présente, jusqu'à

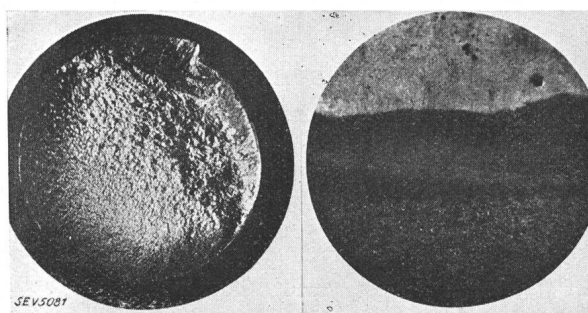


Fig. 10.
Rupture d'un arbre par
fatigue.

Fig. 11.
Structure dans le voisinage
immédiat de la rupture de
l'arbre de fig. 10.

environ 1 cm de profondeur, une structure entièrement différente de celle du reste du métal de l'arbre (fig. 11). La couche extérieure présente en outre de nombreux pores et des inclusions de laitier. Le diamètre de cet arbre avait été renforcé par un apport de métal à la soudure autogène. Ce procédé est dan-

gereux, car il se produit des tensions, qui peuvent toutefois être supprimées par un recuit. En outre, les pores et les inclusions de laitier agissent comme des entailles, surtout lorsqu'ils sont coupés par un tournage subséquent. La résistance aux oscillations des arbres traités de la sorte est fortement réduite; les conditions pour l'établissement d'une cassure par fatigue sont ainsi données.

Des parties en fonte grise à parois minces ne se laissent pas usiner en certains endroits. Le microscope montre la présence d'aiguilles de carbure de fer (fig. 12). La fonte est donc partiellement blanche, ce qui se produit aisément lorsque la quantité de silicium est insuffisante au qu'il y a un excès de manganèse, ou lorsque la teneur en soufre est trop élevée. L'analyse chimique montre quelles sont les causes possibles ayant amené cet état de choses.

Les tubes en laiton d'un réfrigérant pour l'eau de condensation d'une installation de turbines à vapeur présentent des trous d'aiguilles». Ce phénomène peut provenir, comme on le sait, de diverses causes. L'examen décèle dans le laiton la présence d'inclusions de laitier finement réparties. Aux endroits où ces inclusions ressortent, il se forme des

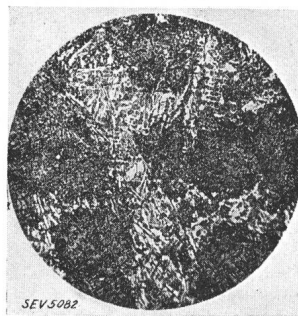


Fig. 12.

Aiguilles de carbure de fer
dans de la fonte grise.

éléments locaux, surtout lorsqu'il s'agit d'inclusions de charbon. Le laiton se dissout. Le cuivre se sépare sous forme spongieuse, car il est le métal le plus noble de l'alliage. Ces électrodes de cuivre dissolvent encore plus fortement le laiton.

La métallographie montre également que les métaux auxquels sont mélangées d'autres matières ne se solidifient pas uniformément, mais que le rapport des mélanges diffère selon les endroits de la pièce solidifiée. On constate en général que les impuretés augmentent à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie. Ce phénomène provient du fait que le point de fusion de cette matière est généralement abaissé par le mélange d'une seconde matière, même si cette dernière présente un point de fusion plus élevé que la première. Nous avons vu un cas de ce genre avec les alliages de fer et de carbure de fer. J'ai également indiqué que deux matières peuvent se dissoudre l'une dans l'autre à une température élevée, mais que cette solubilité n'existe plus à des températures moins élevées. Ce phénomène est également fréquent. Lors du refroidissement lent du métal en fusion, les particules qui se séparent les premières sont naturellement celles

qui ont le point de fusion le plus élevé, c'est-à-dire du métal relativement pur. Le métal encore liquide se charge donc d'un peu plus d'impuretés. La solidification se poursuivant toujours de l'extérieur à l'intérieur, les matières mélangées sont de plus en plus nombreuses vers le centre du corps métallique qui se solidifie. Selon que les deux corps constituent un eutectique, c'est-à-dire un mélange de composition déterminée, dont le point de fusion est inférieur à celui de tous les autres mélanges possibles, ou si au contraire le corps mélangé a le point de fusion le plus bas, on rencontrera à l'intérieur de la fonte soit un enrichissement de l'eutectique, soit un enrichissement du corps mélangé. Ces enrichissements constituent évidemment des irrégularités dans la composition et fournissent des résistances inégales. Ils sont donc indésirables, car non seulement ils réduisent la résistance, mais en outre ils favorisent l'attaque par corrosion. La métallographie sait déceler ces inégalités et reconnaître leur nature. Dans l'acier, ce danger est surtout causé par le phosphore et le soufre.

Le phosphore forme avec le fer du phosphure de fer, soluble dans le fer (comme c'est le cas du carbure de fer) jusqu'à une teneur de 10,9 %, c'est-à-dire de 1,7 % de phosphore. Le fer contenant du phosphore est relativement cassant et sensible aux chocs.

Le soufre donne également avec le fer du sulfure de fer, qui n'est plus soluble dans le fer solide. Pendant la solidification, il se forme autour des cristaux un réseau. A la température de forgeage, le sulfure fond déjà. Comme corps étranger entre les cristaux, il diminue leur cohésion et ainsi la résistance du métal. Au cours du forgeage, il cause des craquelures.

Ces quelques détails suffisent pour montrer comment la métallographie, aidée par des recherches chimiques, peut découvrir les causes des défauts. En pratique, il s'agit très souvent d'expliquer la cause d'un défaut, lorsque le matériel n'a pas donné les résultats attendus. La cause ne se trouve souvent pas du tout là où on pourrait le supposer. Même si l'avarie ne peut pas être supprimée par ces essais subséquents, les expériences ainsi obtenues servent du moins à éviter le renouvellement d'une avarie de ce genre.

Le travail du chimiste ne se borne pas à l'examen des métaux. En électrotechnique, le grand domaine des isolants a une importance aussi considérable.

Une des matières très importantes pour le constructeur de machines électriques est l'*huile isolante*. Autrefois, les huiles isolantes étaient essayées presque exclusivement au point de vue de leur pouvoir isolant et surtout de leur résistance à la perforation. Les expériences pratiques ont toutefois montré bientôt que les valeurs de perforations élevées ne sont pas seules déterminantes. Même si l'on avait constaté à la livraison une bonne valeur

de perforation, il pouvait arriver que l'huile d'un transformateur se transformât en relativement peu de temps en un liquide foncé, boueux et malodorant. La tension de perforation n'atteignait plus alors qu'une fraction de la valeur primitive. La résistance de l'isolement au coton des enroulements avait fortement diminué.

Une autre huile, travaillant pourtant dans les mêmes conditions, ne présentait par contre presque aucune modification après la même durée de service, et l'état de l'isolement au coton était resté excellent. Les chimistes furent alors chargés de découvrir les raisons de ces différences et surtout de mettre au point des méthodes d'essai, permettant de déterminer d'avance la conservation des huiles fraîches pendant une durée utile. Un grand nombre de méthodes de ce genre ont été mises au point dans tous les pays. Elles sont presque toutes basées sur le même principe, qui consiste à soumettre l'huile pendant un certain temps à des conditions bien déterminées, semblables à celles de la pratique, et de constater les modifications que l'huile a subies. L'huile qui présente les moindres modifications après ce traitement est naturellement l'huile la mieux appropriée. Cette constatation peut paraître très simple et l'on s'étonnera peut-être du grand nombre des méthodes d'essais mises au point. Cela tient entre autres au fait que l'on ne peut pas imiter simplement les conditions de service, car les modifications de l'huile seraient si lentes que l'indication des résultats obtenues ne pourrait pas avoir lieu à temps utile. Les effets dangereux doivent donc être intensifiés d'une façon ou d'une autre. On a ainsi songé à augmenter la température, et l'une des anciennes méthodes consistait à chauffer l'huile à 150° C pendant 50 h. par exemple, puis à déterminer sa coloration et sa teneur en boue. Divers auteurs, entre autres Stäger, ont étudié cette méthode et ont constaté que les modifications de l'huile à cette température sont d'une tout autre nature que celle qui se produisent aux températures de 90 à 110° C dans les transformateurs.

Une autre méthode essayait de rendre plus sévères les conditions de service en introduisant dans l'huile de l'oxygène pur. Mais le désavantage est le même que dans la méthode précédente, car l'oxygène pur provoque dans l'huile d'autres modifications que l'air. Je ne puis pas mentionner ici toutes les propositions et leurs désavantages. Je me bornerai donc à décrire la méthode d'essai établie par Stäger dans les laboratoires de la S. A. Brown, Boveri & Cie, et adoptée par l'ASE après quelques modifications.

Stäger a constaté que la température de 120° C est une température critique pour l'huile, par le fait qu'au-dessus de 120° C les molécules d'huile commencent à se décomposer. D'autre part, la présence de cuivre nu provoque une accélération de la détérioration observée dans le transformateur et due en grande partie à une oxydation. En consé-

quence, la méthode suisse ne procède qu'à une température peu élevée: 112° C, mais avec une surface de cuivre fortement accrue, l'éprouvette étant constituée par un récipient en cuivre. L'essai a lieu à l'air libre. La durée est de 168 heures. Dans ces conditions, les meilleures de nos huiles subissent une modification notable. Pour constater le vieillissement, on détermine chimiquement la quantité des acides et des boues. On constate également jusqu'à quel point des fils de coton sont affaiblis par l'action de l'huile et de ses produits d'oxydation pendant la durée de l'épreuve.

Cette diminution de la résistance du fil de coton est une des caractéristiques de la méthode suisse. Elle constitue un critère très important, car on a constaté que dans certaines huiles et après une certaine durée de service, l'isolement des enroulements est sensiblement affaibli, bien que la teneur en acides et en boues semble être encore négligeable. Le chimiste comprend aisément ce phénomène. Selon le genre des hydrocarbures composant une huile, la nature des produits intermédiaires de décomposition dus à l'oxydation peut être très différente. Dans certaines conditions, il peut se former des corps dans lesquels l'oxygène absorbé n'est pas fixé et peut facilement être abandonné à d'autres corps appropriés, tels que la cellulose, qui est une des matières principales du coton. Une fois la destruction opérée, le produit intermédiaire renfermant de l'oxygène n'est plus qu'un acide organique simple, dont l'action est beaucoup moins néfaste.

D'autres types d'huiles peuvent s'oxyder sans produire de combinaisons dangereuses. Dans ce cas, le coton n'est pas attaqué, bien que la teneur en acides soit aussi élevée et même supérieure.

La méthode suisse pour l'essai des huiles de transformateurs a donné d'excellents résultats depuis plusieurs années. Les nombreuses huiles impropres, qui étaient vendues autrefois comme huiles isolantes, ont complètement disparu du marché.

Une autre classe d'isolants dont le perfectionnement est dû en grande partie à la chimie est celle des *verniss isolants*. Autrefois, les vernis isolants étaient généralement des dissolutions de gomme-laque et de quelques autres résines naturelles. Depuis lors, on a constaté que certains autres produits sont également appropriés à cet usage et que leurs propriétés permettent des applications techniques que l'on ne pouvait pas réaliser avec les dissolutions de résines.

Pour les enroulements de transformateurs et d'autres appareils, soumis en permanence à l'action de l'huile chaude, les meilleurs vernis sont ceux à base d'huiles siccatives. Il s'agit en principe de dissolutions d'huile de lin plus ou moins oxydée et d'huile de bois de Chine, ainsi que des siccatifs dans la benzine. Ces siccatifs sont des oxydes de plomb, de manganèse ou de cobalt, cuits dans de la colophane jusqu'à complète dissolution. Les vernis noirs renferment en outre de l'asphalte ou du bitume.

Pour que ces vernis satisfassent pleinement à leur tâche, le séchage et le durcissement doivent être parfaitement corrects. Ce processus comporte deux phases distinctes. Tout d'abord, le dissolvant doit s'évaporer. Ensuite l'huile se durcit et forme une pellicule. Ce durcissement provient d'une oxydation subséquente de l'huile. Il ne peut se produire que lorsque l'air peut bien pénétrer, sinon le vernis ne se durcit jamais complètement. Ces couches de vernis ne sont naturellement pas résistantes à l'huile. Elles se dissolvent donc dans l'huile des transformateurs et provoquent souvent une formation de boues plus rapide.

Le chimiste de l'entreprise doit constamment veiller à ce que ces vernis soient traités correctement. Au cours de la première phase, lors de l'évaporation du solvant, la température ne doit pas être trop élevée, sinon il se formerait déjà une pellicule à la surface avant que le solvant des couches plus profondes se soit évaporé. Il en résulterait des poches de vernis liquide. Ces poches se forment souvent aux arêtes inférieures et aux bords. Quand ces poches sont dans l'huile, une oxydation et un durcissement de ces poches n'est plus possible. La mince pellicule est rapidement détruite et le vernis liquide pénètre alors dans l'huile.

Comme dans le cas des huiles isolantes, l'essai de ces vernis à l'huile se fait selon le principe du vieillissement à des conditions de service plus sévères, après avoir vérifié le degré de viscosité, la durée du séchage, etc. Les éprouvettes de vernis sont soumises à l'action de l'air sous une température élevée, pendant une durée déterminée; on vérifie ensuite si l'élasticité de la pellicule s'est amoindrie. En outre, des éprouvettes de couches de vernis correctement durcis sont plongées dans de l'huile chaude et l'on observe si la pellicule s'amollit, si l'huile prend une couleur plus foncée et a une plus forte teneur en acides que celle soumises aux mêmes contraintes, mais sans la présence d'éprouvettes de vernis.

Pour l'imprégnation des enroulements, on utilise souvent des vernis à base de résine artificielle d'un tout autre genre que les vernis à l'huile dont je viens de parler. Un grand nombre de résines artificielles différentes ont été créées. Malgré cela, les bakélites qui sont, chimiquement parlé, des produits de condensation du phénol et de l'aldéhyde formique, ont conservé jusqu'à présent toute leur importance. Cette position avantageuse est due à leur propriété de devenir infusibles et insolubles dans tous les solvants connus, après avoir été simplement chauffées à des températures jusqu'à 200° Celsius. La réaction chimique entre l'aldéhyde formique et le phénol n'exige pour se produire qu'une faible quantité de catalyseurs (agissant comme l'huile siccative pour la formation de la pellicule dans les vernis à l'huile). A la température du local, la réaction est très lente. En revanche, aux températures supérieures à 100° C, la formation du produit définitif a lieu en quelques minutes ou

en quelques heures, selon le genre de catalyseur. Les premiers produits de réaction sont facilement solubles dans l'alcool, de sorte que l'on peut obtenir des vernis à l'alcool. Contrairement aux vernis à l'huile, leur durcissement n'exige pas la présence de l'oxygène, mais simplement un chauffage. Dans le cas de la bakélite, on distingue trois phases, c'est-à-dire les états A, B et C. A et C correspondent respectivement à l'état soluble du début et à l'état insoluble de la fin. B constitue une phase intermédiaire où la matière gonfle dans un solvant, mais sans se dissoudre, comme c'est le cas de la gélatine dans de l'eau froide. La transformation n'a naturellement pas lieu brusquement, mais très progressivement.

Le grand désavantage de ces résines artificielles réside dans le fait que, lors du passage de la forme A à la forme C, les réactions chimiques qui se produisent donnent naissance à des produits gazeux et à de l'eau. A la température nécessaire, cette eau se transforme en vapeur et provoque des vides dans la masse encore plastique. La résine se gonfle comme de la pâte à gâteaux. On peut éviter ce phénomène en procédant au durcissement en vase clos et sous une pression supérieure à la pression de vaporisation de l'eau à la température en question. L'eau ne peut alors plus former de bulles de vapeur, mais seulement de fines gouttelettes d'eau qui restent là où elles se sont formées. L'eau est ainsi répartie moléculairement dans la résine. On pourrait supposer que l'isolation en est rendue moins bonne, mais ce n'est pas le cas, car les différentes gouttelettes d'eau n'ont aucune communi-

cation entre elles et sont enrobées par la résine. La présence de l'eau se fait cependant sentir par le fait que les constantes diélectriques sont plus élevées, ce qui est généralement indésirable. En effet, dans le cas de matières à structure stratifiée, où des couches de résine artificielle alternent avec des couches de papier par exemple, les couches présentant les plus faibles constantes diélectriques absorbent une tension relativement plus élevée.

Dans l'essai des résines artificielles rentrant dans le domaine du chimiste, il est intéressant d'observer la perte de poids que subit la matière en passant de l'état A à l'état C. Les vapeurs qui s'échappent sont examinées au point de vue de leur composition. La partie principale est de l'eau; mais on y rencontre également de l'aldéhyde formique et des dérivés du phénol, ainsi que des parties du catalyseur.

On détermine en outre la quantité de résine qui est restée soluble après durcissement normal de la masse. Il arrive en effet souvent que la résine ne soit pas entièrement transformée en corps insoluble. La connaissance du degré de l'insolubilité a parfois une grande importance, par exemple pour les enroulements de moteurs qui sont soumis à l'action de vapeurs dégagées par des solvants, comme cela se produit fréquemment dans l'industrie chimique.

Dans ce qui précède, j'ai essayé de montrer par quelques exemples quelles sont les tâches qui incombent au chimiste d'une entreprise s'occupant de la construction de machines électriques. J'espère vous avoir donné ainsi une notion de la diversité de notre champ d'activité.

Diskussion.

Der Vorsitzende, Herr Direktor M. Schiesser, Präsident des SEV, dankt dem Referenten, Herrn Dr. Boller, bestens für das interessante Referat. Die Arbeit des Chemikers im Elektromaschinenbau ist ein weites und schwieriges und vor allem wichtiges Feld. Man denke nur an die Vorausbestimmung der Alterung von Isolierstoffen, die ungleich schwieriger als die Feststellung der Materialeigenschaften im Anlieferungszustand, aber für den Konstrukteur eine wichtige Angelegenheit ist.

Ein weiteres unabgeklärtes Gebiet ist die Frage der Ermüdungsbrüche, deren Bedeutung grösser sein kann als die geläufige Werkstoffprüfung. Neu und interessant ist dann vor allem das ganze Gebiet der synthetischen Stoffe. Der Vorsitzende eröffnet die Diskussion.

Herr Dr. de Senarclens, Schweizerische Isola-Werke Breitenbach: Vous nous permettez tout d'abord de dire à Monsieur le Docteur W. Boller, avec quel plaisir nous avons entendu son exposé et de le remercier d'avoir bien voulu préciser quelques données encore très vagues dans notre esprit. Il est deux domaines dans lesquels nous serions heureux de faire appel à l'expérience de Monsieur le D^r Boller. Il nous a rappelé que le chimiste de la grande industrie électrique devait entre autre analyser d'une part des bakélites, d'autre part des vernis gras. C'est à ce chimiste-analyste que je voudrais avoir recours.

A. Tout d'abord la question de la bakélite. Monsieur le D^r Boller a certainement établi lui-même des méthodes d'analyse ayant pour but de déceler les bakélites répondant aux exigences de l'industrie électrique. Il a fait allusion, dans son exposé, à la détermination du pourcentage en phénol libre, en eau, en aldéhyde formique (méthanal), etc. Nous

serions très désireux de savoir si Monsieur le D^r Boller a pu établir une corrélation entre l'analyse chimique et les qualités diélectriques de la bakélite. L'analyse n'est-elle qu'un moyen d'éliminer les bakélites dont la condensation a été très défectueuse, ou permet-elle de se faire une idée exacte des qualités isolantes du produit?

Nous avons cherché à résoudre cette question. Partant de l'idée que la bakélite pure, composée probablement d'alcools phénoliques à un degré de polymérisation plus ou moins avancé, était un parfait isolant, nous nous sommes appliqués à obtenir un phénoplaste présentant le maximum de pureté possible. Nous avons, par des méthodes de condensation qu'il serait fastidieux de décrire, par des lavages successifs, enfin par une distillation à l'alcool butylique permettant d'éliminer l'eau, obtenu un produit que l'analyse chimique nous a permis de considérer comme pur. Nous l'avons soumis aux essais électriques habituels et constaté à notre confusion, que la tangente de l'angle de pertes n'était pas inférieure à celle obtenue en mesurant des phénoplastes dont la condensation avait été soignée, mais pour laquelle les précautions prises pendant la fabrication avaient été bien moindres. Nous avons poursuivi nos essais et cherché à savoir quelle influence pouvaient avoir le phénol libre, l'eau, l'aldéhyde formique et les électrolytes, employés généralement comme catalyseurs, sur les qualités diélectriques de la bakélite. Nous avons constaté que la principale influence de ces corps, était, mis à part les électrolytes et peut-être l'aldéhyde formique, de retarder la polymérisation, voire même de la rendre pratiquement impossible. Mieux que cela: nous avons fait un résol contenant 7 % de phénol libre et 5 % d'eau, et qui, même en milieu basique, se troublait au cours de la polymérisation.

Nous l'avons chauffé, ce produit trouble, pendant des semaines à 105° C, jusqu'à ce qu'il soit redevenu transparent par élimination de l'eau et, partant, du phénol libre et avons déterminé périodiquement ses propriétés diélectriques, à savoir la tangente de l'angle de pertes dans le sens transversal. Nous avons constaté:

1° que les propriétés diélectriques s'améliorent nettement au cours des semaines de chauffage,

2° et c'est cela qui nous paraît important, que la courbe présentait un maximum qui laisserait supposer ou bien que le produit parfaitement pur est moins bon, électriquement parlant, que le produit contenant encore 1 % de phénol libre et 1 % d'eau, ou bien que la masse atteint un état qu'on pourrait appeler une surpolymérisation et dans lequel je ne voudrais pas m'aventurer. Il n'est à notre idée qu'une analyse chimique qui donne une idée assez exacte des propriétés diélectriques de la bakélite. C'est celle qui, par distillation sèche, donne le pourcentage en phénol lié, probablement à l'état d'éther phénylique. Le pourcentage des bakélites étudiées variait entre 10 et 24 %. Ce sont celles qui contenaient le moins de phénols liés qui se sont montrées les meilleurs isolants. Nous nous permettons donc de reposer à Monsieur le D^r Boller la question suivante:

Ses expériences sont-elles différentes des nôtres et est-il de l'avis que l'analyse chimique, que nous sommes loin de considérer comme inutile, sert non pas seulement à éliminer les bakélites tout à fait défectueuses, mais qu'elle permet encore de se faire une idée exacte des qualités diélectriques du produit analysé?

B. Question des vernis gras. Le second domaine dans lequel nous serions heureux d'avoir recours à l'expérience de M. le D^r Boller, est celui des vernis gras d'imprégnation et leur analyse par les chimistes des entreprises électriques. Les chimistes, bien souvent très absorbés par d'autres problèmes, n'ont pas la possibilité de consacrer le temps nécessaire à l'étude des vernis d'imprégnation, domaine complexe entre tous. Ils en sont fréquemment réduits à faire quelques réactions rapides puis à élaborer un cahier des charges. Les fabricants de vernis reçoivent le dit cahier et constatent généralement ceci: des maisons faisant des imprégnations de bobinages semblables exigent des vernis diamétralement opposés et qui de plus, ne paraissent pas toujours adaptés à l'emploi qu'on désire en faire. Un petit exemple: Quatre maisons faisant des appareils semblables exigent les vernis jaunes à l'étuve suivants:

	A	B	C	D
séchage à 110° C	1 h	3 h	> 6 h < 16 h	36 h

et pourtant la durée de séchage conditionne à peu près toutes les propriétés du vernis. Il est vrai qu'une seule maison a indiqué le support sur lequel les essais de séchage doivent être faits. Or, un vernis qui sèche en 2 heures 30 sur le zinc exige 4 heures 30 sur carton et 12 heures sur cuivre.

Le vernis universel, séchant rapidement, résistant à l'action de l'eau, des acides, des bases, des huiles chaudes et des halo-

gènes, ne vieillissant que très lentement, n'existe pas. Il faut choisir entre quelques unes de ces propriétés. Il nous semble donc qu'il n'est qu'un moyen de résoudre d'une manière satisfaisante cette question très complexe du vernis d'imprégnation; c'est de charger le spécialiste en vernis en qui on a placé sa confiance, de résoudre la question, en contact avec le chimiste de l'entreprise électrique et en présence de tous les facteurs intervenant au moment du séchage: stand d'imprégnation, nature du bobinage, question d'ordre commercial, etc. ... Il n'est pas douteux que de graves erreurs seront évitées, que le constructeur recevra le vernis qu'il désire et que les essais des spécialistes seront en ce sens plus faciles qu'ils connaîtront le but à atteindre.

Herr Dr. W. Boller, Referent: Unsere Arbeiten über das Gebiet der Kunstharze führten bloss zu Prüfmethode, die erlauben, Produkte von der Verwendung auszuschliessen, die den Anforderungen im allgemeinen oder für irgendwelche Spezialzwecke nicht genügen.

Die Fragen, wie sich verschiedene Ausgangsmaterialien sowie verschiedene Behandlungsarten bei der Herstellung der Kunstharze im fertigen Material auswirken, hat meines Wissens Herr Dr. Stäger bearbeitet. Soviel ich mich erinnere, verhalten sich Kresole wesentlich anders als Phenol.

(Da Herr Dr. de Senarclens nicht mehr anwesend war, äusserte sich der Referent über seine Anfrage betreffend die Isolierlacke auf Oelbasis nicht mehr.)

Herr Dr. H. Stäger, Zürich: Als Ergänzung zu den Ausführungen des Herrn Dr. Boller möchte ich mir erlauben, noch einige Beispiele aus der Werkstoffkunde zu erwähnen. Im Zusammenhang mit der Entwicklung der modernen Technik war es mehr und mehr nötig, alle möglichen Eigenschaften der Werkstoffe zu erforschen. Es genügt denn auch keinesfalls z. B. nur die Kenntnis des mechanischen Verhaltens. Der Referent hat bereits an Hand einiger Beispiele gezeigt, inwieweit die naturwissenschaftliche Erkenntnis nötig ist, um die Eigenschaften der Werkstoffe zu erfassen.

Während bis vor noch nicht allzulanger Zeit lediglich die statischen Prüfmethode zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe des Maschinenbaues herangezogen wurden, ging man in neuerer Zeit dazu über, in ausgedehntem Masse dynamische Spezialmethoden beizuziehen, um das Verhalten von Werkstoffen im Betrieb bei wechselnden Dauerbeanspruchungen zu verstehen. Es ist ja kennzeichnend, dass trotz der umfangreichen statischen Prüfmethode und der sorgfältigen Prüfungen in dieser Hinsicht 90 % aller heute vorkommenden Brüche im Maschinenbau als Dauerbrüche bezeichnet werden müssen. Erst mit Hilfe der *Dauerprüfmethode* bei wechselnden Beanspruchungen war es möglich, die genaue Spannungsverteilung in einem Konstruktionsteil zu erfassen und dann Mittel und Wege zu finden, um die Spannungsspitzen abzubauen und für eine gleichmässige Verteilung der Spannungen zu sorgen. Diese Erkenntnis führte denn auch zur neuen Konstruktionslehre. Es ergibt sich also vorerst, dass bei gleichen statischen und chemischen Eigenschaften, je nach der Formgebung, sich

Einige Formziffern.

Tabelle I.

Nr.	Abmessungen	Beanspruchung	α_k	Ursprung
1	$r = t = 0,07 D$	Zug und Biegung	1,8	Leon
2	$r = t = 0,25 D$		1,5	Coker
3	$r = t = 0,09 D$	Verdrehung	1,65	Thum
4	$r = 0,09 D; t = 0,21 D$		1,9	
5	$d = 0,1 \text{ bis } 1,30$	Zug und Verdrehung	$\sim 3,0$	Leon, Coker
6	$r = 0,1 D$	Biegung	1,4	Leon
7	$r = 0,5 D; t = 0,08 D$	Verdrehung	2,2	Thum
8	$1/2''$ Whitworth-Gew. mit Auslauf	Biegung	2,5 bis 3	Coker, Moore
9	$r \leq 0,2 D$	Verdrehung	3,0	rechnerisch
10	$r = 0,1 t$	Verdrehung	5,4	nach Prandtl
11	$r = 0,2 t$		3,4	
12	$r = 0,5 t$		2,1	

zwei Konstruktionsteile bei wechselnden Beanspruchungen verschieden verhalten können. Daraus ergibt sich weiter, dass neben den beiden erwähnten Prüfungen noch andere Methoden angewendet werden müssen, um den Einfluss der Form zahlenmässig zu erfassen. Mit Hilfe der Dauerprüfmethoden gelang es, die sogenannte *Formziffer* für einen bestimmten Werkstoff festzustellen: In Tabelle I sind einige solcher Formziffern zusammengestellt. Diese sind verschieden gross, nicht nur hinsichtlich der Formgebung, sondern auch der Art der wechselnden Beanspruchung.

stoff hat die Empfindlichkeitszahl 1, ein nicht kerbempfindlicher dagegen 0. Wie aus der Zusammenstellung ersichtlich ist, besteht kein direkter Zusammenhang zwischen den chemischen, den mechanischen Eigenschaften und der Empfindlichkeitszahl. Selbst die sogenannte Kerbzähigkeit steht nicht in direktem Zusammenhang mit der Empfindlichkeitszahl, was z. B. ein Vergleich der Stähle Nr. 1 und Nr. 5 zeigt. Der austenitische Chromnickelstahl Nr. 10 dagegen zeigt bei hoher Kerbzähigkeit eine Empfindlichkeitszahl 0. Aus diesen Vergleichen ergibt sich deutlich, dass sich die verschiedenen

Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften der gebräuchlichsten Stähle. Tabelle II.

Nr.	Bezeichnung	Chemische Zusammensetzung				Streckgrenze σ_s kg/mm ²	Zugfestigkeit σ_B kg/mm ²	$\frac{\sigma_s}{\sigma_B}$	Dehnung ϵ_{10} %	Einschnürung ψ %	Biege-wechsel-festigkeit σ_w kg/mm ²	$\frac{\sigma_w}{\sigma_B}$	Kerb-schlag-zähigkeit α_k mkg/cm ²	Empfindlichkeitszahl η_k
		C %	Si %	Mn %	Sonstiges %									
1	St 37	0,10	0,51	0,13	—	38,1	43,3	0,88	30	72	23,0	0,53	21,5	0,50
2	St 37	0,11	0,01	0,49	—	32,1	44,3	0,73	29	67	22,3	0,50	17,4	0,63
3	St 52	0,15	1,02	0,95	0,41 Cu	43,8	59,3	0,73	26	67	38,4	0,88	18,5	0,85
4	—	0,78	0,35	0,78	—	34,9	61,6	0,56	22	60	30,0	0,48	5,6	0,57
5	—	1,21	0,24	0,50	—	—	61,0	—	21	45	26,2	0,42	1,8	0,42
6	St 60	0,29	0,34	0,91	—	42,3	65,3	0,65	21	72	31,8	0,49	8,1	0,49
7	St 80	0,48	0,26	1,27	—	49,8	81,2	0,62	15	55	35,9	0,44	6,2	0,48
8	VCN 35	0,23	0,16	0,51	0,69 Cr 3,67 Ni	46,3	66,8	0,69	17	57	42,0	0,63	12,1	0,61
9	—	0,36	0,32	1,25	0,63 Cr 3,48 Ni	109,0	115,5	0,94	10	53	58,8	0,51	6,1	0,92
10	—	0,15	0,45	—	19,70 Cr 6,10 Ni	24,3	65,3	0,37	60	77	25,4	0,38	> 24	0,00
11	—	0,21	0,24	0,50	12,90 Cr 1,85 Ni	77,7	81,7	0,95	17	65	40,4	0,49	10,6	0,53

Weitere Untersuchungen an metallischen Werkstoffen ergaben aber im Zusammenhang mit der Ermittlung der Dauerwechselfestigkeiten, dass ein Werkstoff auch mit der Formziffer an und für sich noch nicht genügend gekennzeichnet ist. Es zeigte sich nämlich, dass die technischen Legierungen durchaus verschiedene *Kerbempfindlichkeit* aufweisen, d. h. also mehr oder weniger empfindlich sind gegen Oberflächenverletzungen. In Tabelle II sind die wichtigsten im Maschinenbau gebräuchlichen Stähle mit ihren chemischen Zusammensetzungen und den mechanischen Eigenschaften (sta-

Werkstoffe unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung oder ihren mechanischen Eigenschaften bei wechselnder Dauerbeanspruchung sehr verschieden verhalten können. Der Konstrukteur muss daher, wenn er der Gefahr von Dauerbrüchen entgehen will, mit allen Individualitäten seiner Werkstoffe rechnen und dabei eben die Grundsätze der neuen Konstruktionslehre in erster Linie berücksichtigen. Einige Dauerbrüche, die bei Vernachlässigung der kurz erwähnten Grundsätze auftreten können, sind in Fig. 1 zusammengestellt. Der Dauerbruch hat immer ein charakteristisches Aussehen, nämlich eine feinkörnige bis samtartige Oberfläche neben einem grobkörnigen Anteil, dem sogenannten Restbruch, an dem der endgültige Bruch zustande gekommen ist. Je nach der Art der umlaufenden Wechselbeanspruchung ist die Form des Restbruchs sehr verschieden; so war z. B. beim Bruch oben in Fig. 1 eine gleichmässig umlaufende Biegewechselbeanspruchung vorhanden. Der Bruch wurde eingeleitet von einer umlaufenden, schlecht bearbeiteten Oelspritzrille. Der Dauerbruch kann sich in mehreren Stufen ausbilden, wobei dann eine eigenartige schalenförmige Ausbildung festgestellt wird.

Es würde hier zu weit führen, auch noch etwas über die Dämpfung der Werkstoffe zu sagen, nachdem die Fachleute festgestellt haben und sich darüber im Klaren sind, dass die Dämpfung keine Materialkonstante ist.

Dagegen darf wohl darauf aufmerksam gemacht werden, dass die Ermüdungsfestigkeit wesentlich beeinflusst werden kann durch chemische Einflüsse. Man spricht dann von der sogenannten *Korrosionsermüdung*. Tabelle III enthält das Ergebnis einiger Untersuchungen an gewöhnlichem Fluss- und 3prozentigem Nickelstahl. Die einzelnen Probestäbe wurden in Luft, Oel, in Wasser und in gesättigtem Dampf untersucht, und zwar im blanken, geschliffenen Zustand und verchromt. Es wurde die Biegewechselfestigkeit bestimmt, und zwar bis zu 2×10^8 Lastwechseln, um möglichst einwandfreie Resultate zu erhalten. Aus der Tabelle ergeben sich die Korrosionsermüdungsfestigkeiten bei den verschiedenen Bedingungen. Luft und Oel haben natürlich keinen Einfluss, dagegen Wasser und gesättigter Dampf. Der Chromüberzug wird durch die wechselnde Beanspruchung zum Teil zerstört und

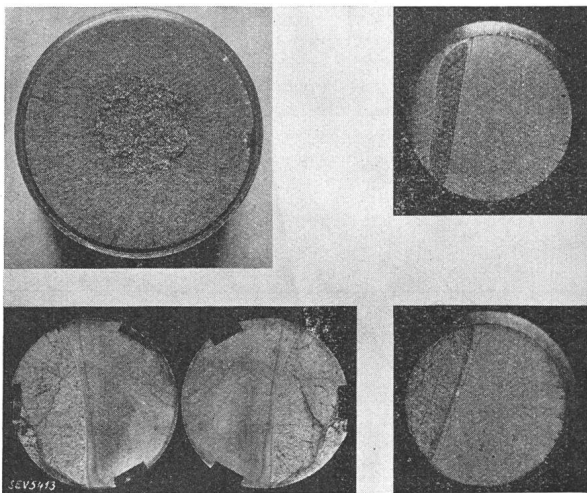
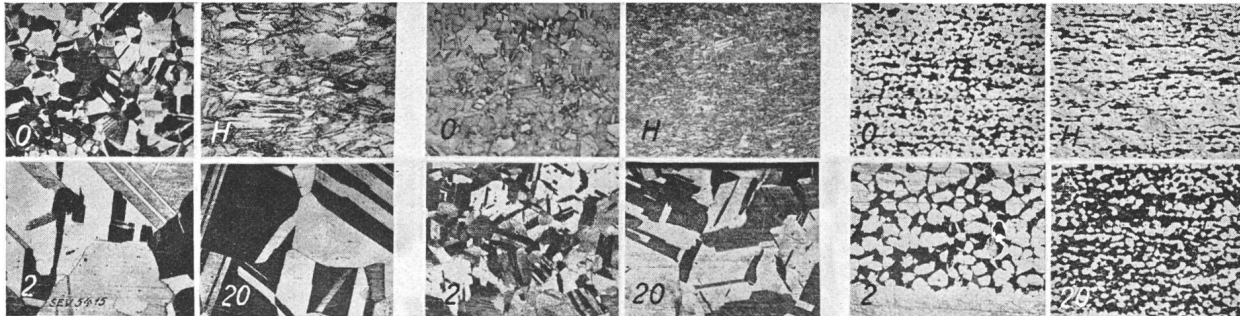


Fig. 1.
Beispiele einiger Dauerbrüche.

tisch und dynamisch) zusammengestellt. In der letzten Kolonne ist die sogenannte Empfindlichkeitszahl angeführt. Diese wird wiederum durch Dauerwechselprüfmethoden ermittelt. Ein maximal empfindlicher wechspröder Werk-

Salzsäure sollte etwa keineswegs einen Fall der Praxis reproduzieren, sondern lediglich Auskunft geben über den Auflösungs-, bzw. Abbauvorgang der verschiedenen Mischkristalle. Dieser wurde einerseits verfolgt durch die Bestimmung der gemischten Bestandteile in der Lösung und andererseits durch die Bestimmung der Zerreissfestigkeit und der dazu gehörigen Bruchdehnung. In Fig. 6 sind die Ergebnisse eini-

vermögen ist bei den Legierungen aus reinem α -Gefüge sehr gering. Die $\alpha+\beta$ -Mischkristalle enthaltende Legierung, bestehend aus 60 % Kupfer und 40 % Zink, wird ebenfalls von der Kochsalzlösung stärker angegriffen und verliert nach kurzer Zeit das Formveränderungsvermögen. Es ist an dieser Stelle nicht möglich, weiter auf Einzelheiten einzugehen. Es sollen im folgenden lediglich die Ergebnisse festgehalten



Gefügeaufnahmen der für die Korrosionsversuche verwendeten Kupfer-Zink-Legierungen.

Fig. 3.

Legierung: 70 Kupfer, 30 Zink (70/30).

Fig. 4.

Legierung: 63 Kupfer, 37 Zink (63/37).

Fig. 5.

Legierung: 60 Kupfer, 40 Zink (60/40).

O = weich gegläht; H = hart gezogen; 2 = 2 % vorgereckt und rekristallisiert; 20 = 20 % vorgereckt und rekristallisiert. (Genaue Angaben siehe Tabelle IV.)

ger Versuchsreihen zusammengestellt. Man sieht das grundsätzlich verschiedene Verhalten der beiden Legierungsgruppen, nämlich derjenigen, die aus reinen α -Mischkristallen bestehen, und der andern, die aus $\alpha+\beta$ -Mischkristallen bestehen. Die Legierungen 70/30 und 63/37, die zur ersten Gruppe gehören, lösen sich im analytischen Verhältnis ihrer Bestandteile auf, und zwar verhältnismässig gleichmässig. Wenn man damit die gemessenen Werte der Bruchfestigkeit und Bruchdehnung vergleicht, dann zeigt sich, dass diejenigen Prüflinge, die noch Reckspannungen haben (hart ge-

werden, die zum Teil im Gegensatz stehen zu den frühern Anschauungen:

Neben den selektiven Korrosionen ist viel gefährlicher die Entzinkung, die nur dann auftreten kann, wenn das Gefüge aus verschiedenen Mischkristallen besteht, wie z. B. bei der Legierung 60/40. Bei gleichartigen Mischkristallen spielen die Kristallitgröße und die Legierung an und für sich keine Rolle. Viel wichtiger ist bei dieser Gruppe von Legierungen, dass sie frei sind von allen Reckspannungen.

In diesem Zusammenhange möchte ich noch zwei andere Beispiele anführen, bei denen Reckspannungen zu unangenehmen Störungen geführt haben. Fig. 7 zeigt die Zündstange eines Gleichrichters. Es handelt sich um einen rund gezogenen Stahl. Derselbe war, wie sich im Betrieb zeigte, mit Reckspannungen versehen, als er eingebaut wurde. In der kritischen Temperaturzone (zu jedem Reckgrad gehört eine entsprechende Rekristallisationstemperatur) begann der Stab infolge der Reckspannungen zu rekristallisieren, und zwar sind die grössten Kristallite in der Gegend der günstigsten Rekristallisationstemperatur. Neben diesen Stellen nimmt dann die Grösse der Kristallite ab. Bei dieser Rekristallisation treten derartige Kräfte auf, dass starke Deformationen vorkommen können. Im vorliegenden Falle wurde der Stab viereckig, woraus hervorgeht, dass der Rundstab aus einem Vierkantprofil herausgezogen worden war.

Wenn ein mit Reck- oder Gußspannungen behaftetes Werkstück mit flüssigen Metallen in Berührung gebracht wird, dann vermag das flüssige Metall oder die Legierung, sofern es oder eine ihrer Komponenten in dem eingetauchten Werkstoff löslich sind, in diesen einzudringen und ihn vollständig zu zerstören. Man spricht dann von *Lotsprödigkeit*.

Aus diesen Fällen ersieht man, dass bei Korrosionen die Zusammensetzung der Legierung bei einheitlichem Mischkristall sowie die Korngröße für die Korrosionsunbeständigkeit von viel geringerer Bedeutung sind als das Vorhandensein von Reckspannungen. Wenn ein mit Reckspannungen behafteter Werkstoff einer entsprechenden Temperatur ausgesetzt wird, beginnt er zu rekristallisieren und kann damit starke Formänderungen ausführen. Wenn Reckspannungen in einem Werkstoff vorhanden sind, der mit flüssigem Metall in Berührung kommt, für welches eine gegenseitige Lösung besteht, dann bricht der Werkstoff infolge von *Lotsprödigkeit* auseinander.

Ich möchte noch an Hand einiger anderer Beispiele auf den neuesten Zweig der Chemie, die sogenannte *Topochemie* zu sprechen kommen. Es ist eine längst bekannte Tatsache,

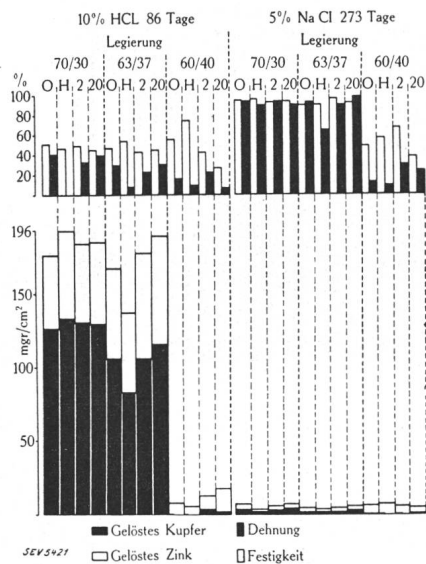


Fig. 6.

Ergebnisse der Korrosionsversuche mit drei verschiedenen Kupfer-Zink-Legierungen.

zogen) am meisten zerstört sind, da ihre Bruchdehnung und damit also das plastische Formänderungsvermögen vollständig erschöpft ist. Die verschiedenen Kristallitgrößen dagegen haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Auflösungsvorgänge. Die Legierung 60/40, die aus $\alpha+\beta$ -Mischkristallen besteht, verhält sich grundsätzlich anders. Es findet dort eine sogenannte *Entzinkung* statt, wobei die β -Mischkristalle zerstört werden und damit das Formänderungsvermögen erledigt wird. Dem Kochsalz gegenüber verhalten sich die Legierungen völlig anders. Es werden verhältnismässig geringe Mengen aufgelöst und auch die Einbuße am Formänderungs-

dass die Reaktionsfähigkeit und die Erscheinungsformen der Stoffe sich mit dem Zerteilungsgrad stark verändern können. Ich möchte nur als Beispiel die sogenannten Katalysatoren erwähnen oder z. B. das blaue Gold usw. Es würde hier jedoch zu weit führen, andere Beispiele auf diesem Gebiet eingehender zu behandeln.

Reaktionsfähigkeit vollständig verschieden ist. Der matte Niederschlag z. B. reagiert mit flüchtigen Fettsäuren absolut nicht, während der glänzende hochdisperse Ueberzug infolge seiner grossen reaktionsfähigen Oberfläche ganz eigenartige Salzbildungen mit flüchtigen Fettsäuren aufweist, wie aus Fig. 9 zu ersehen ist. In Fig. 10 ist ein einzelner Faden

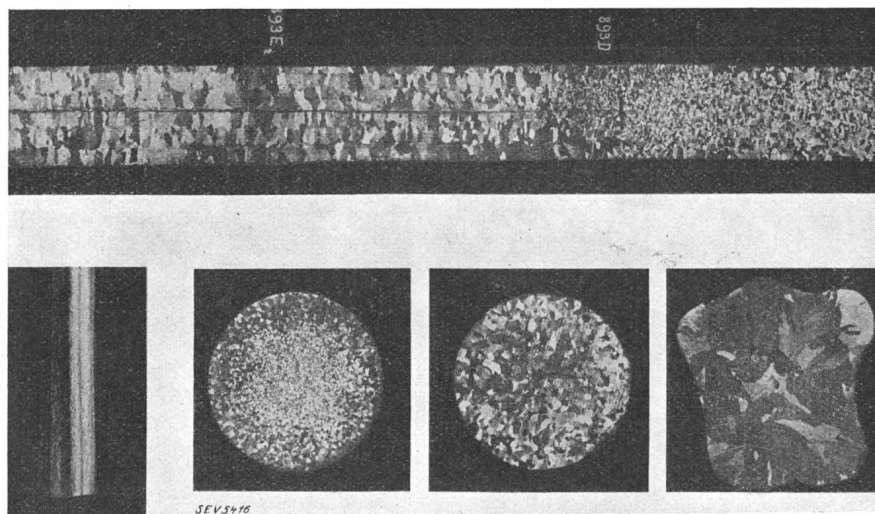


Fig. 7.

Beispiel einer rekristallisierten Zündstange aus dem Betrieb.

Oben: Längsschnitt mit verschiedenen Rekristallisationszonen.

Unten: Querschnitte durch verschiedene Rekristallisationszonen.

Gewöhnlich macht man die Voraussetzung, dass eine chemische Reaktion sich unbehindert im Raume abspielen kann. Die chemischen Gesetze werden denn auch zum grossen Teil auf Grund dieser Voraussetzung aufgestellt. Erst die Topochemie zeigte, dass die ortsgebundenen Reaktionen wesentlich anders verlaufen können. Eine massgebliche Rolle spielt bei ortsgebundenen Reaktionen vor allem der Reaktionsort. Es ist also nicht gleichgültig, wie der Reaktionsort beschaffen ist, sondern er vermag den Ablauf der Reaktion sowie die entstehenden Reaktionsprodukte massgeblich zu beeinflussen. Gerade in der Werkstoffkunde hat man es aber vornehmlich mit ortsgebundenen, d. h. topochemischen Reaktionen zu tun und daher sollen noch einige solche Beispiele angeführt werden.

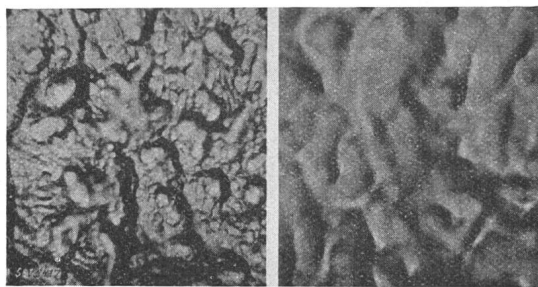
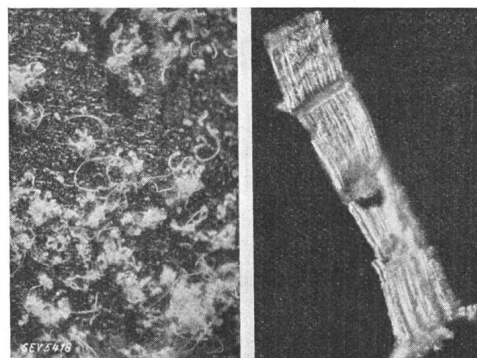


Fig. 8.

Elektrolytische Nickelniederschläge.
Links: hochdispers glänzend.
Rechts: grobdispers matt.

Ein ausgesprochen topochemischer Vorgang ist z. B. die elektrolytische Metallabscheidung, also die Verchromung, Vernickelung usw. Die Art und die Eigenschaften des elektrolytischen Metallüberzuges sind neben den Strom- und Elektrolytverhältnissen in höchstem Masse abhängig von dem Reaktionsort, d. h. in diesem Falle von der Metallunterlage. In Fig. 8 sind zwei Nickelniederschläge zu sehen. Der Niederschlag links ist ein hochdisperser (fein verteilter), glänzender Metallüberzug. Die Vernickelung rechts ist matt und grobdispers (grob verteilt). Diese verschiedenen Ausscheidungsformen eines und desselben elektrolytisch gefällten Metalles sind Folgen der verschiedenen topochemischen Verhältnisse, also der verschiedenen Verhältnisse am Reaktionsort. Wenn man nun die beiden Niederschläge irgendwelchen weiteren chemischen Reaktionen aussetzt, so sieht man, dass die

eines solchen fettsauren Salzes bei starker Vergrösserung abgebildet. Dabei ist ausserordentlich interessant, festzustellen, dass das Bauprinzip dieser künstlich erzeugten Fäden ganz ähnlich ist demjenigen der natürlich entstandenen Fäden (eine Anzahl Längsfibrillen zusammengehalten durch Querverbindungen). Fig. 11 zeigt einen elektrolytisch erzeugten Cadmiumniederschlag. Die Salze, die sich z. B. mit flüchtigen Fettsäuren auf diesem Metall bilden, sind ganz anderer Art als die eben besprochenen Nickelsalze, wie aus Fig. 12 und 13 hervorgeht.



Bildungsformen von Nickelsalzen auf Elektrolytniederschlägen.

Fig. 9.

Gesamtübersicht.

Fig. 10.

Einzelne Salzgruppe bei starker Vergrösserung.

Als weiteres Beispiel eines topochemischen Vorganges möchte ich noch die Zerstörung von Bleiglättegryzerinkitten anführen. Solche Kittverbindungen werden manchmal schon nach kurzer Betriebszeit in eine krümelige Masse übergeführt, die leicht abfällt, während andere Kittverbindungen sich während Jahren durchaus einwandfrei verhalten. Die Ursache der Zerstörung ist eine Bleikarbonatbildung, wobei die Kohlensäure der Luft genügt, um den Vorgang einzuleiten. Mit dieser rein chemischen Feststellung ist aber das verschiedene Verhalten der einzelnen Kittverbindungen noch keineswegs erklärt. Wesentlich ist auch die Verteilung der nicht aufgelösten Bleiglättebestandteile. Prüflinge mit solchen Kittverbindungen, das eine Mal gespachtelt, das andere Mal gegossen, wurden nun längere Zeit der Einwirkung einer Kohlensäureatmosphäre ausgesetzt. Nach verschiedenen Zei-

ten wurden Prüflinge entnommen und die Scherfestigkeit bestimmt. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Fig. 14 zusammengestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die einen Kitt unter dem Einfluss der Kohlensäure Bleikarbonat bilden und

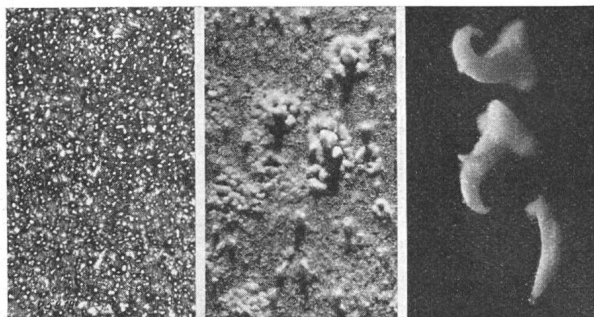


Fig. 11.

Fig. 12.

Fig. 13.

Fig. 11: Elektrolytischer Cadmiumniederschlag.

Fig. 12 und 13: Bildungsformen von Cadmiumsalzen auf Elektrolytniederschlägen.

Fig. 12: Gesamtübersicht.

Fig. 13: Salzgruppen bei starker Vergrößerung.

sich stark verfestigen, die andern dagegen wohl auch Karbonat bilden, dabei aber ihre Festigkeit eher einbüßen und in eine zum Teil krümelige, zum Teil schmierige Masse übergehen. Es zeigt sich also, dass das Bleikarbonat in verschiedenen Formen auftreten kann. Es ist somit nicht der

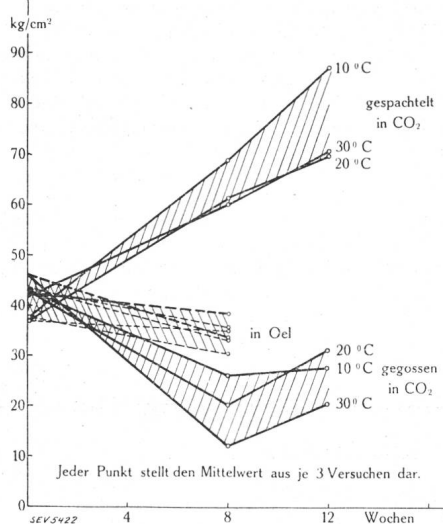


Fig. 14.

Einfluss von Kohlensäure und Mineralöl auf Bleiglätte-Glyzerinkitt.

chemische Vorgang als solcher ausschlaggebend, sondern die Verhältnisse am Reaktionsort. Um diese etwas besser kennenzulernen, wurden Porositätsmessungen gemacht und, wie aus

Porositätsgrad von Bleiglätte-Glyzerinkittungen.

Tabelle V.

Herstellungstemperatur ° C	Gegossen		Gespachtelt	
	Porositätsdurchmesser mm	Porositätsgrad ‰	Porositätsdurchmesser mm	Porositätsgrad ‰
10	0,0556	0,00771	0,0450	0,00506
20	0,0430	0,00462	0,0366	0,00334
30	0,0430	0,00462	0,0254	0,00161

Probekörper: 40 mm Ø, 10 mm Dicke.

Tabelle V hervorgeht, zeigt der eine Kitt eine wesentlich grössere Porosität als der andere und damit also auch einen wesentlich grösseren Reaktionsraum. Auf die weiteren Einzelheiten kann ich hier nicht eingehen. Gezeigt seien in Fig. 15 nur die zwei verschiedenen Arten des Bleikarbonates, links das feinkristalline, verfestigende Bleikarbonat und rechts das gequollene, schmierige.

Diese Beispiele sollen genügen, um zu zeigen, in welcher Art und Weise der Reaktionsort die Erscheinungsformen eines Stoffes beeinflussen kann und damit auch einen Einfluss hat auf die Reaktionsfähigkeit. Mit der chemischen Definition eines Stoffes und mit der rein chemischen Verfolgung eines Vorganges ist also das Gesamtverhalten keineswegs genügend gekennzeichnet.

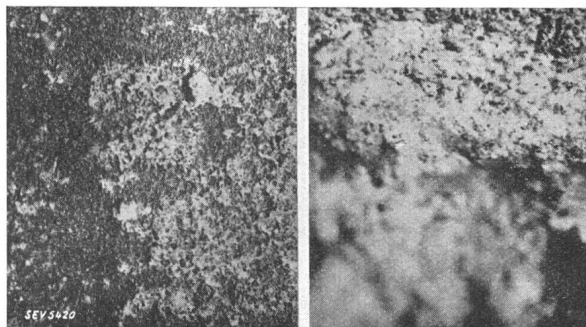


Fig. 15.

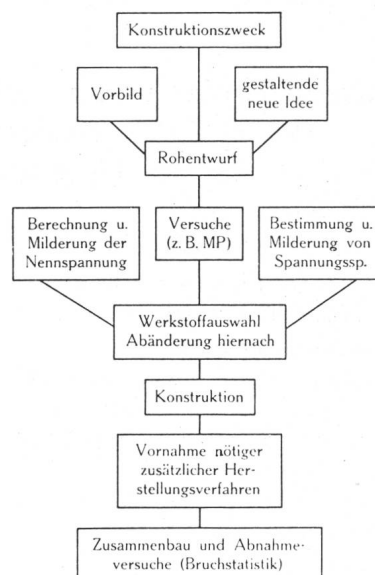
Bildungsformen von Karbonaten in Bleiglätte-Glyzerinkitten.

Aus diesen Ausführungen ergibt sich, dass auf dem Gebiete der Makroerscheinungen die statisch-mechanische Untersuchung keineswegs genügt, um über das Verhalten der Werkstoffe des Maschinenbaues genügende Auskunft zu geben. Die Werkstoffkunde muss ihre Prüfmethode auf einer wesentlich weitem Basis aufbauen, wenn sie dem Konstrukteur einwandfreie Unterlagen geben soll. Bei den Mikroerscheinungen, die sehr oft bei der Zerstörung der Werkstoffe in Frage kommen, genügt es andererseits wiederum nicht, nur den rein chemischen Verlauf einer Zerstörung festzustellen, da man damit allein die Mannigfaltigkeit der Erscheinungsformen nicht erklären kann. Dies ist erst möglich an Hand genauer

Unterlagen über die Bildungsbedingungen, wie Reaktionsort usw.

Wenn auch diese wenigen Beispiele bei weitem nicht ausreichen, um auch nur einen kleinen Ueberblick über die moderne Werkstoffkunde zu geben, so mag daraus doch hervorgehen, dass die Beratung des Konstrukteurs durch den Werkstoff-Fachmann mehr und mehr an Bedeutung gewinnt. Die Spezialgebiete der Werkstoffkunde sind derart weitläufig, dass der Konstrukteur nicht in der Lage ist, alle diese Einzelheiten zu beherrschen. Zum Schlusse erlaube ich mir, noch ein Schema zu zeigen, das

einen Ueberblick über die geeignete Zusammenarbeit geben soll. Der Konstrukteur verfolgt mit einer Neukonstruktion einen bestimmten Konstruktionszweck. Dabei lehnt er sich an ein gegebenes Vorbild an oder er bringt eine gestaltende neue Idee. Daraus entsteht dann der Rohentwurf. Bereits jetzt haben die ersten Versuche und Beratungen des



Werkstoff-Fachmannes einzusetzen. Es müssen Mittel und Wege gesucht werden, um die Nennspannungen festzustellen und die Spannungsspitzen durch konstruktive Massnahmen abzubauen. Auf Grund dieser Feststellungen kann dann zur Werkstoffwahl geschritten werden, bei der auch die chemischen Verhältnisse berücksichtigt werden müssen. Dann erfolgt die eigentliche Konstruktion. Je nach den Verhältnissen müssen während der Herstellung die Verfahren geändert werden oder nicht. Auch in diesem Zusammenhange muss der Werkstoff-Fachmann wieder herbeigezogen werden. Dann erfolgen endlich Zusammenbau und Abnahmeversuche mit der nötigen Bruchstatistik, um eventuelle Fehler bei Neukonstruktionen beheben zu können.

Der A.-G. Brown, Boveri verdanke ich bestens die Ueberlassung der Unterlagen zu meinen Bemerkungen. Die Untersuchungen wurden in den Laboratorien der genannten Gesellschaft ausgeführt.

Herr Dr. W. Boller, Referent: Durch seine interessanten Ausführungen hat Herr Dr. Stäger mein Referat in wertvoller Weise ergänzt, wofür ich ihm bestens danke.

Der Vorsitzende: Ich danke allen Diskussionsrednern bestens für ihre interessanten Beiträge. Infolge der vorgerückten Zeit muss ich leider die Diskussion abbrechen. Das Generalsekretariat nimmt aber nachträglich gerne weitere Äusserungen zum Diskussionsthema entgegen und wird sie im Bericht über die Versammlung veröffentlichen.

Nachträglich ging zum Votum des Herrn Dr. de Senarclens folgende Äusserung ein von

Herrn Dr. H. Stäger, Zürich: Ich möchte noch kurz auf die Diskussionsbemerkungen des Herrn Dr. de Senarclens zurückkommen. Um mich zuerst mit seinen Bemerkungen betreffend die Kunstharze zu befassen, möchte ich darauf hinweisen, dass ich im Jahre 1931 in den *Helvetica Chimica Acta* eine ausführliche Arbeit veröffentlicht habe, die aus den Laboratorien der A.-G. Brown, Boveri & Cie. hervorgegangen ist. An Hand einer grossen Zahl von Messungen der Dielektrizitätskonstanten und der dielektrischen Verluste verschiedener Phenol- und Kresolformaldehydharze konnte gezeigt werden, dass diese beiden Eigenschaften in erster Linie abhängig sind vom Phenolgehalt. Es ist also keineswegs verwunderlich, wenn Herr Dr. de Senarclens gefunden hat, dass trotz vorsichtigster Reinigung der von ihm verwendeten Phenolformaldehydcondensate das dielektrische Verhalten nicht

beeinflusst worden ist. Die dielektrischen Eigenschaften stehen im Zusammenhang mit dem konstitutionellen Aufbau der Phenoplaste. Die reinen Phenolharze zeigen nach unseren Messungen ausgesprochenen Dipolcharakter und sind wohl weniger dazu geeignet, dreidimensionale Makromoleküle zu ergeben, was z. B. bei der Verwendung von Kresol der Fall ist. Bei den Phenolharzen ist der Dipolcharakter derartig ausgeprägt, dass damit zusammenhängend auch die dielektrischen Eigenschaften grundlegend beeinflusst werden. Es hat sich z. B. einwandfrei nachweisen lassen, dass bei einem Phenolgehalt von 30 bis 40 % der Durchgangswiderstand und die Dielektrizitätskonstante sowie die dielektrischen Verluste sprunghaft verändert werden. Es sind also nicht die eventuell noch vorhandenen Verunreinigungen, die die Ursache des dielektrischen Verhaltens sind, sondern es ist der durch den Phenolgehalt bedingte Bau der Moleküle, der ausschlaggebend ist. Bei der Verwendung von Kresol hat es sich weiter gezeigt, dass das dielektrische Verhalten abhängig ist vom Metakresolgehalt des Kresolgemisches. Auf diesem Wege war es denn auch möglich, dielektrisch hochwertige Kunstharze zu erzeugen, die gleichzeitig eine geringe Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Verluste aufweisen. Solche Harze werden z. B. für dielektrisch hochwertige Fabrikate nach einem Spezialverfahren von der Micafil A.-G. in Zürich-Altstetten hergestellt.

Die chemische Analyse ist nicht in der Lage, über diese tiefen Zusammenhänge die nötigen Unterlagen zu vermitteln. Sie kann lediglich zur Ueberprüfung der Gleichmässigkeit der Fabrikate herbeigezogen werden. In dieser Hinsicht ist sie aber nach meiner Auffassung als wertvolle Ergänzung zu bezeichnen.

Die Erfahrung, die Herr Dr. de Senarclens bezüglich der Oellacke zur Imprägnierung gemacht hat, können wohl auch von anderer Seite bestätigt werden. Die richtige Begutachtung solcher Lacke ist vor allem eine Frage der geeigneten Prüfverfahren. Es ist ganz klar, dass die Trocknungs- und Filmbildungsverhältnisse auf einer metallischen Unterlage anders verlaufen können als auf einer saugfähigen Unterlage aus Faserstoffen. Die Resultate, die durch die verschiedenen Prüfmethode erhalten werden, sind unter sich nicht ohne weiteres vergleichbar und sind für die Praxis oft gar nicht geeignet. Um in dieser Beziehung eine brauchbare Vergleichsbasis zu bekommen, hat der Schweizerische Verband für die Materialprüfungen der Technik Richtlinien herausgegeben, die auf Grund ausgedehnter Untersuchungen in verschiedenen Laboratorien ausgearbeitet worden sind.

Elektrotechnische Notizen von einer Studienreise nach dem Osten der Vereinigten Staaten von Nordamerika.

Von H. Wüger, Kilchberg.

621.31(73)

(Fortsetzung von S. 263 und Schluss.)

XII. Elektrizitätswerkbetrieb und Energiewirtschaftliches.

A. Belastungsverlauf.

Die meisten Elektrizitätswerke haben noch eine ganz ausgesprochene Lichtspitze. Man hat sich bis jetzt noch wenig darum bemüht, den Belastungsverlauf im Sinne einer Ausgleichung zu beeinflussen. Wie schon bei den Anwendungen der Elektrizität gesagt wurde, sind z. B. die Heisswasserspeicher noch wenig verbreitet. In New York z. B. macht dafür das Laden der Akkumulatorenbatterien der zahlreichen Lastwagen einen namhaften Betrag aus und wirkt ausgleichend. Aber man fördert diesen Zweig nicht und so werden heute die Akkumulatorwagen mehr und mehr durch Benzinwagen verdrängt. Die elektrische Küche spielt noch eine

untergeordnete Rolle. Da in den meisten Geschäften die englische Arbeitszeit eingeführt ist, so ist das Mittagmahl kurz und weniger wichtig und die elektrische Küche wird den Belastungsverlauf nicht in so günstigem Sinne verändern wie bei uns, da die Zubereitung der Hauptmahlzeit auf den Abend fällt und damit, wenigstens teilweise, die Lichtspitze noch verschärft.

Fig. 60 und 61 zeigen als Beispiel den Belastungsverlauf der New York Edison Co. und des Toronto Hydro-Electric System. Lediglich interessehalber sei in Abb. 62 der Belastungsverlauf eines einzelnen Wolkenkratzers gezeigt. Ein sehr interessantes Beispiel der Beeinflussung des Belastungsverlaufes erzählte man mir in Philadelphia. Die Amerikaner sind bekanntlich sehr sportbegeistert. Es gibt fast