

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 101/102 (1933)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Untersuchungen über die durch Kavitation hervorgerufenen Korrosionen  
**Autor:** Haller, P. de  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-83002>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.04.2026

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

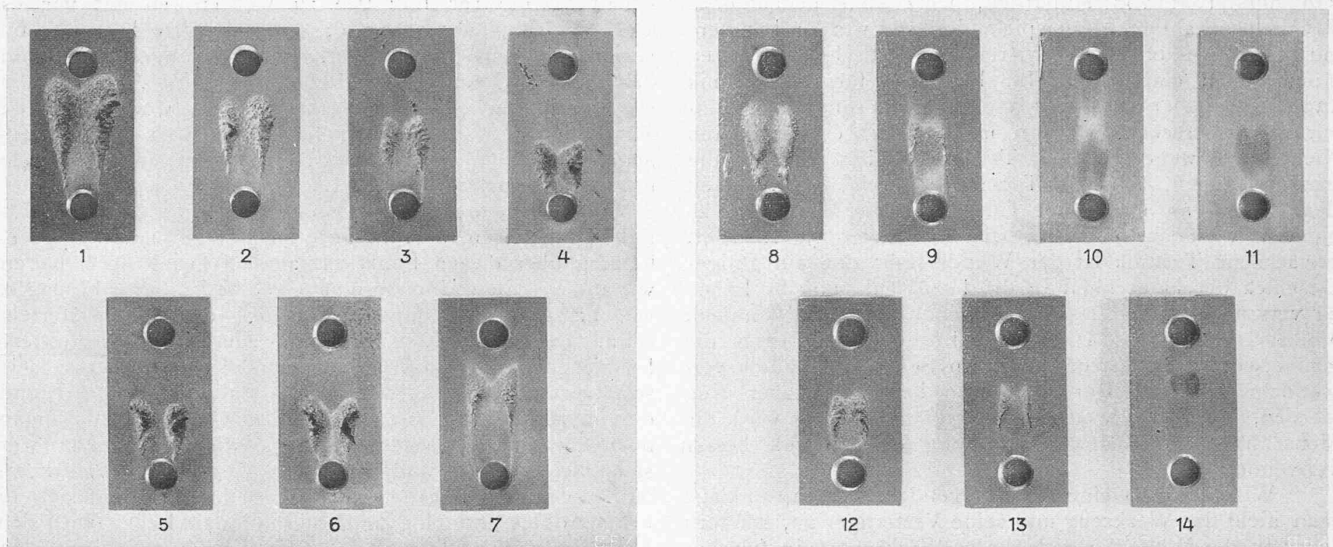


Abb. 11 u. 12. Kavitations-Korrosionen verschiedener Metalle nach 100 h. 1 Roßguss, 2 Zinnbronze, 3 Sondermessing, 4 Aluminiumbronze, 5 Stahlguss  $\sigma_b = 45 \text{ kg/mm}^2$ , 6 Stahlguss  $\sigma_b = 50 \text{ kg/mm}^2$ , 7 Molybdän-Stahlguss, 8 Rostfreier Stahlguss I, 9 Rostfreier Stahlguss II, 10 Rostfreier Stahlguss (vergütet), 11 Sinoxidguss, 12 S.M.-Stahl (weich), 13 S.M.-Stahl (mittelhart), 14 2% Nickelstahl.

und wir müssen uns dafür einsetzen, dass dieses Kriterium allgemeine Anerkennung findet.

Einem etwa möglichen Missverständnis möchte ich aber nicht unterlassen vorzubeugen. Eine Abwehrstellung bedeutet keinen Angriff auf die anderen Stände. Die Abwehr ist auch nicht in dem Sinne gemeint, als ob ein anderer Stand uns böswillig angegriffen hätte. Es handelt sich vielmehr um die Abwehr der Gefahren, die uns aus der Weltwirtschaft im allgemeinen und aus der Not eines grossen Teiles der schweizerischen Industrie im besonderen erwachsen. Vergessen wir auch nicht, dass aus der ungewissen Lage vielerorts Neues entsteht, begabt mit der frischen Unbekümmertheit der Jugend, und dass daher die kommende Zeit einen wachen Sinn erfordert, um die Symptome zu erfassen und wenn möglich richtig zu deuten.

Es liegt nicht im Charakter des wahren Ingenieurs, vor schwierigen Aufgaben zu resignieren. Er ist gewohnt, das widerspenstige Material seinem Willen gefügig zu machen. Eine schwierige Lage — und die scheint mir heute vor allem für die *jüngere Technikerschaft* zu bestehen — wird bei ihm auch Kräfte auslösen zu ihrer Ueberwindung. Dazu müssen wir aber *alle* helfen, und müssen insbesondere helfen wollen. Wir wissen, dass die uns hierzu zur Verfügung stehenden Kräfte beschränkt sind; es wäre töricht, sie zu überschätzen. *Was aber von der Seite unseres Verbandes aus getan werden kann, muss geschehen.* Konkrete Möglichkeiten hierzu sollten gefunden werden können, mindestens aber müssen sie ernsthaft gesucht und diskutiert werden. Ob z. B. ein „*numerus clausus*“, wie er von anderen Ständen propagiert wird, eine Milderung bringen kann, oder eine schärfere Auslese beim Studium, oder auch der stets ungeborene Titelschutz, bleibe heute dahingestellt. Auch eine Untersuchung der Einkommensverhältnisse unserer jungen Ingenieure, etwa auf anonym-statistischer Grundlage, wäre sehr zweckmässig und würde vermutlich überraschende Aufschlüsse geben. Es gibt aber andere noch kühnere Ideen, z. B. *die*, die jungen Ingenieure auch für die öffentliche Arena zu schulen, was keineswegs auf einseitiger Parteigrundlage zu geschehen braucht. Vielleicht liesse sich dadurch im Laufe der Zeit unsere praktische Einfluss-Sphäre vergrössern. Wenn dafür die an den Lehranstalten immer mehr um sich greifende technische Spezialisierung etwas zurückgedrängt würde, könnte ich dies nicht als Mangel ansehen. Der spätere Beruf erzwingt die intensive Beschäftigung mit den Einzelproblemen ganz von selbst. — Wichtiger als einseitiges Brotstudium ist die Erziehung zum ganzen Menschen, über dem Intellekt steht der Charakter.

## Untersuchungen über die durch Kavitation hervorgerufenen Korrosionen.

Von Dipl. Ing. P. DE HALLER, Zürich.

(Schluss von Seite 246.)

### KORROSION DURCH KAVITATION.

Obwohl in der Kavitationszone das Material vermutlich ganz ähnlichen Beanspruchungen ausgesetzt ist, wie in der oben beschriebenen Versuchseinrichtung, ist es nicht sicher, dass die mit dieser erhaltenen Ergebnisse direkt auf die Korrosion durch Kavitation anwendbar sind. Die Intensität der Schläge ist nur ungenügend bekannt und die Frequenz sicher sehr verschiedenartig, was einen merklichen Einfluss haben kann. Der in Abb. 10 dargestellte Apparat soll einen Vergleich erlauben dadurch, dass Probestücke aus dem gleichen Material, das bei den Tropfenschlag-Versuchen geprüft wurde, auch der Kavitationsbeanspruchung ausgesetzt werden. Er besteht aus einer Düse von rechteckigem Querschnitt, deren Divergenz mit Hilfe einer verstellbaren Zunge verändert werden kann. Das zu untersuchende Materialstück wird in Form eines Plättchens von  $30 \times 60 \times 6 \text{ mm}$  Grösse in die Rohrwandung eingesetzt. Die Kavitation wird durch eine der Befestigungsschrauben hervorgerufen, die in den Kanal vorspringt. Mit Hilfe der Zunge kann der Gegendruck eingestellt und somit die Kondensationszone der Dampfbläschen verschoben werden. Zwei seitliche Fenster erlauben die Beobachtung der Kavitation. Dank des Entgegenkommens der Kraftwerke Oberhasli A.-G. konnte dieser Apparat in der Zentrale Handeck bei 500 m Druck, entsprechend einer Austrittsgeschwindigkeit von 100 m/s, installiert werden. Abb. 11 bis 13 zeigt die erhaltenen Korrosionen bei Verwendung verschiedener Materialien.

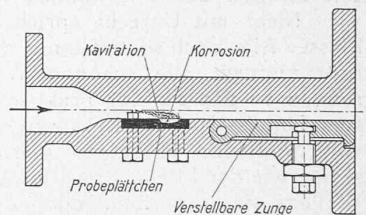


Abb. 10. Versuchseinrichtung zur Erzeugung von Korrosion durch Kavitation.

Es gibt eine deutliche Uebereinstimmung zwischen dem Verhalten der verschiedenen Materialien bei den Versuchen mit direktem Tropfenschlag bzw. mit Kavitation, wenigstens innerhalb einer Klasse von Materialien. Die verschiedenen Bronzen bzw. Stähle verhalten sich untereinander bei beiden Beanspruchungsarten gleich. Zwischen zwei Materialgattungen zeigen sich indessen erhebliche Unterschiede, die Bronzen z. B. widerstehen den direkten Schlägen viel weniger gut als der Stahlguss, entsprechend

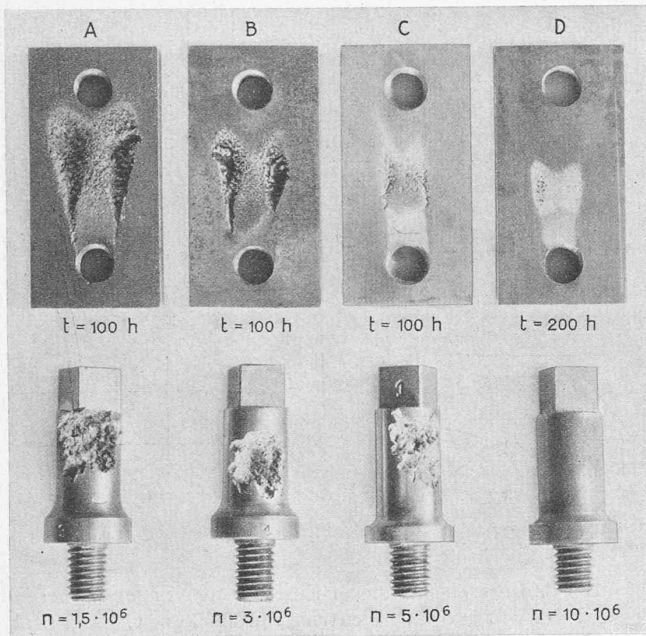


Abb. 14. Vergleich zwischen Kavitations-Korrosionen und Tropfenschlag-Erosionen  
A. Rotguss, B. Stahlguss, C. Rostfreier Stahlguss, D. Nickelstahl (Einsatz gehärtet).

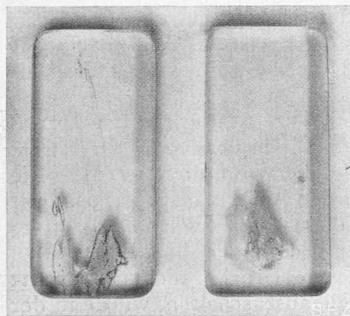


Abb. 13. Kavitations-Korrosionen an Glas.

seiner grösseren Härte; für die Kavitationsbeanspruchung sind sie dagegen dem letzteren wenigstens ebenbürtig, in gewissen Fällen sogar überlegen. Das Aussehen der Korrosionen ist in beiden Fällen beinahe gleich. Die Oberfläche ist schwammig, ähnlich wie sich auflösender Zucker, die Struktur ist indessen bei den der Kavitation ausgesetzten Proben feiner.

Abb. 14 zeigt die Unterschiede im Verhalten von vier verschiedenen Materialien für beide Untersuchungsmethoden.

Wie schon gesagt, entstehen die Korrosionen ausschliesslich in der Kondensationszone der Dampfblasen. Die Ablösungszone bleibt immer unbeschädigt, es wurde nur hie und da eine schwache Oxydation beobachtet. Die Schraube zum Hervorrufen der Kavitation wurde während der ganzen Dauer der Versuche benutzt, ohne Schaden zu nehmen, obwohl sie sich gerade in der Zone kleinsten Druckes befand, wo die chemische Wirkung der freigesetzten Gase sich am stärksten auswirken müsste.

Der überwiegende Einfluss der mechanischen Eigenschaften des Materials war deutlich zu erkennen, jedoch mit einigen Ausnahmen, und zwar den gleichen wie bei den Versuchen mit direktem Tropfenschlag; die Erhöhung der Oberflächenhärte hat ebenfalls zu interessanten Ergebnissen geführt. Allgemein gilt, dass ein Metall, das bei der Tropfenschlagprobe gute Resultate ergeben hat, auch der Korrosion sicher gut widerstehen wird.

Die Länge der Kavitationszone scheint von bedeutendem Einfluss zu sein. Bei grossem Gegendruck vollzieht sich die Kondensation der Dampfblasen unmittelbar hinter der die Kavitation bewirkenden Schraube, und es treten in diesem Fall überhaupt keine oder nur leichte Korrosionen auf. Der Angriff erfolgt umso rascher, je weiter entfernt von der Stelle des tiefsten Druckes die Kondensation der Dampfblasen einsetzt, wenn sie überhaupt noch innerhalb des Probestückes stattfindet. Es lässt sich dies durch die Tatsache erklären, dass die Dampfblasen bei ihrer Entwicklung eine gewisse Zeit brauchen, um eine

genügende Grösse zu erreichen. Wenn eine Blase, so lange sie noch klein ist, in eine Ueberdruckzone kommt, ist die durch ihre Kondensation erzeugte Schlagwirkung nur gering.

Vielleicht kann der Einfluss der absoluten Grösse der Strömung, in der die Kavitation auftritt, in ähnlicher Weise gedeutet werden. In Handeck war trotz der hohen Geschwindigkeit von 100 m/s eine Zeit von 100 h notwendig, um merkliche Korrosionen zu erzeugen, während im praktischen Turbinenbetrieb in besonders ungünstigen Fällen nach der gleichen Zeit schon bei Geschwindigkeiten von nicht mehr als 35 m/s deutliche Angriffe sichtbar sind. Die Strömung umfasst aber dort Abschnitte, die wenigstens 50 bis 100 mal grösser sind als der Querschnitt der für die Versuche verwandten Düsen von nur  $50 \times 20$  mm. Schröter in Göttingen<sup>7)</sup> hat einen Kanal von 15 mm Seitenlänge benutzt und nur bei sehr wenig widerstandsfähigen Materialien Korrosionen erhalten, z. B. bei Bakelit, Zink oder Grauguss bei Geschwindigkeiten von 44 m/s, während Föttinger mit einer Düse von  $30 \times 100$  mm Querschnitt bei einer Geschwindigkeit von 40 bis 50 m/s in kurzer Zeit die härtesten Materialien zerstört hat. Diese Tatsache kann vielleicht mit dem Einfluss der Aufschlagfläche beim Erosionsversuch verglichen werden. Es ist dies ein Punkt, der noch näher studiert werden muss. Die Messungen mit der Piezo-Quarz-Zelle haben ähnliche Ergebnisse gezeigt; die Vorversuche, die in Zürich mit einem Rohr von  $100 \times 100$  mm Querschnitt ausgeführt wurden, haben erheblich grössere Druckanstiege ergeben, als die spätern Messungen in Handeck bei dem gleichen Gefälle.

Aus den bisherigen Erfahrungen geht mit genügender Deutlichkeit hervor, dass der Ursprung der Kavitationskorrosion hauptsächlich mechanischer Natur ist. Im übrigen weiss man noch sehr wenig über die Art und Grösse der Beanspruchungen. Um tiefer in das Wesen des Problems einzudringen, ist es erforderlich, die in der Kavitationszone auftretenden Drücke zu ermitteln. Für solche Messungen versagen die gebräuchlichen Manometer wegen ihrer zu grossen Trägheit, dagegen können mit Erfolg die piezo-elektrischen Eigenschaften des Quarzes Verwendung finden. Es ist bekannt, dass ein in geeigneter Weise geschliffener Quarzkristall durch Einwirkung einer äusseren Kraft elektrisch aufgeladen wird. Diese Ladung ist direkt proportional der Kraft und folgt ihren Veränderungen trägheitslos. Die Einrichtung muss also im Prinzip einen Kolben enthalten, der die Kraft auf den Quarzkristall überträgt. Die Ladungsschwankungen werden nach Verstärkung durch ein Röhren-Voltmeter von einem Öszillographen aufgezeichnet.

Die Konstruktion einer piezo-elektrischen Zelle für die vorliegenden Verhältnisse ist keine einfache Sache. Der Kolben muss so klein wie möglich sein, damit der Messwert wirklich den örtlichen Druck und nicht einen mittleren Druck angibt. Die auf den Quarzkristall einwirkende Kraft und die elektrische Ladung werden also klein sein. Die Verbindung der Zelle mit dem Voltmeter darf daher nur eine ganz kleine Kapazität haben. Wegen der grossen Empfindlichkeit des Voltmeters ist es notwendig, die ganze Einrichtung zum Schutze gegen Streufelder abzuschirmen. Die einwandfreie Isolation ist im Hinblick auf die Kleinheit

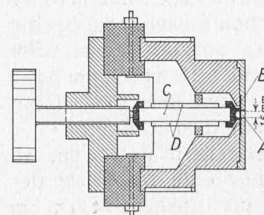


Abb. 15. Schnitt der Piezoquarz-Zelle. Masstab 2 : 3.

der Ladungen ebenfalls sehr schwierig; vor allem muss jede Spur von Feuchtigkeit trotz der Nähe des unter Hochdruck stehenden Wassers von der Zelle ferngehalten werden. Abb. 15 veranschaulicht einen Schnitt durch die ausgeführte Zelle. Der Kolben A, dessen Durchmesser zwischen 0,8 und 2 mm liegt, ist auswechselbar, er ist durch eine winzige Kupfermembran B gehalten, die eine vollkommene Abdichtung der Zelle sichert. Der Quarzkristall C selbst ist stäbchenförmig im Format  $3 \times 3 \times 20$  mm geschliffen.

<sup>7)</sup> Literatur-Verzeichnis Nr. 27.

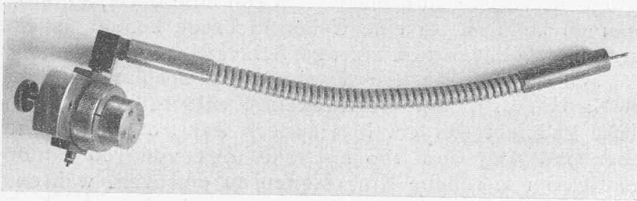


Abb. 16. Piëzoquarz-Zelle mit Anschlusskabel.

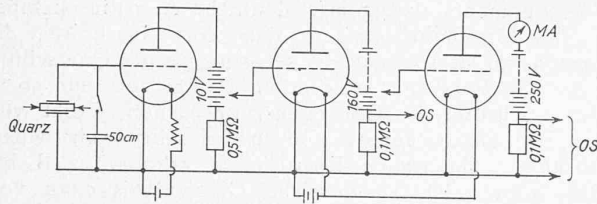


Abb. 17. Schema des Verstärkers zur Piëzoquarz-Zelle.

Er ist durch zwei Messingplättchen gehalten, gegen deren eines der Kolben anliegt. Die elektrische Ladung wurde nicht, wie es sonst allgemein üblich ist, bei den gedrückten Oberflächen abgenommen, sondern man benützte den piëzo-elektrischen Effekt normal zur Krafrichtung, um eine grössere wirksame Oberfläche zu erhalten, ohne den spezifischen Druck zu vermindern. Die Elektroden D sind infolgedessen an zwei Seitenflächen des Kristalls mittels eines Hartgummiringes angelegt. Hartgummi wurde als Isoliermittel gewählt, weil er gegenüber dem Bernstein den Vorteil der grösseren Haltbarkeit besitzt, was sehr wichtig ist bei einer Zelle, die erheblichen mechanischen Beanspruchungen unterworfen ist. Hartgummi ist aber leider sehr empfindlich gegen auch nur geringfügige Niederschläge auf seiner Oberfläche, die absolut rein sein muss, wenn die Isolation genügend sein soll. Um die letzten Spuren von Feuchtigkeit zu entfernen, empfiehlt es sich, ein kleines Gefäss mit Phosphorpentoxid in der Zelle unterzubringen.

Die Zelle ist mit dem Verstärker durch ein abgeschirmtes Kabel (siehe Abb. 16) verbunden, das möglichst kurz ist, um die Kapazität niedrig zu halten. Das Voltmeter enthält eine erste Lampe von besonderer Bauart, an die sich ein oder zwei gewöhnliche 3-Elektroden-Röhren mit Widerstandkopplung anschliessen (Abb. 17). Dadurch ist je nach Bedarf eine 16 bis 160 fache Verstärkung erreichbar.

Die Eintrittsröhre ist eine Philips-Elektromerröhre Nr. 4060, die nur einen sehr schwachen Gitterstrom besitzt und deren Isolation eine besonders sorgfältige ist. Sie muss vollständig abgeschirmt sein und sich in einem ganz trockenen und vollkommen finstern Raum befinden, damit ihre Vorzüge wirklich zur Geltung kommen können.

Sind die nötigen Vorsichtsmassregeln getroffen, so ergeben sich sehr kleine Verluste. Für eine Kapazität der Zelle, des Kabels und des Gitters von insgesamt 15 cm vermindert sich eine anfängliche Ladung von 15 bis 20 elektrostatischen Einheiten in etwa zwei Minuten auf die Hälfte, was reichlich genügt, um Drucke zu messen, deren Dauer nur Bruchteile einer Sekunde beträgt. Man kann nötigenfalls die Zeitkonstante durch Erhöhung der Kapazität erheblich vergrössern, jedoch auf Kosten der Empfindlichkeit des Systems.

Die Eichung des Apparates geschieht durch Auflegen von Gewichten bekannter Grösse auf den Kolben der Zelle und durch unmittelbare Messung des Ausschlages des Lichtpunktes am Oszillographen. Abb. 18 zeigt beispielsweise eine Eichkurve; sie verläuft im wesentlichen linear bis zu dem Punkt der Sättigung des Röhrenvoltmeters.

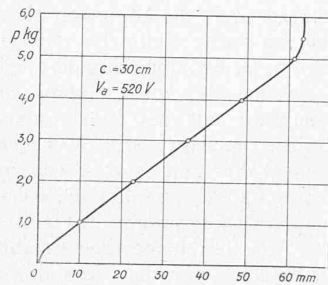


Abb. 18. Eichkurve der Zelle.

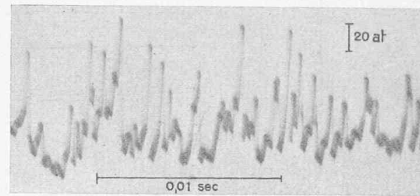


Abb. 19. Oszillogramm der Drucke eines streuenden Wasserstrahles.

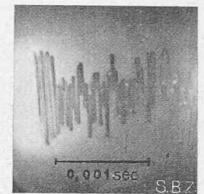


Abb. 20. Druck in der Kavitationszone.

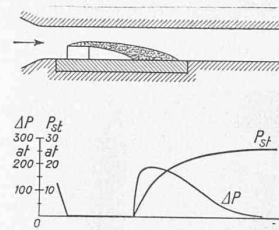


Abb. 21. Verteilung der Drucke im Kavitationsgebiet.

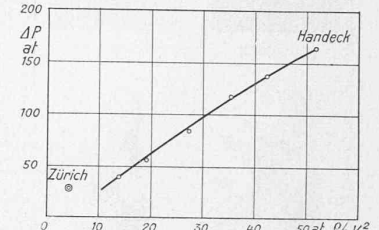


Abb. 22. Mittlerer Stossdruck in Funktion des Staudruckes.

Bei den ersten mit dieser Einrichtung vorgenommenen Messungen wurde ein elektromagnetischer Oszillograph benutzt. Als Ergebnis der Versuche wurden in der Kondensationszone der Dampfblasen starke Druckschwankungen festgestellt, die so rasch vor sich gingen, dass die Trägheit des Oszillographen zu gross war, um ihnen folgen zu können. Die Eigenfrequenz der Schleife betrug 3000 Hertz und die der Zelle 50 000 bis 60 000 Hertz. Ausserhalb der Kondensationszone ist der Druck sowohl vor Anfang als auch nach Ende derselben konstant.

Das Oszillogramm Abb. 19 zeigt die starken Druckschwankungen, die durch einen streuenden Wasserstrahl beim Aufschlagen auf die Zelle hervorgerufen werden. Die äussersten Punkte erreichen einen Ausschlag von 110 kg/cm<sup>2</sup> bei einem Strahldruck von 11 kg/cm<sup>2</sup>. Es ist indessen zu vermuten, dass wegen der zu grossen Trägheit des Oszillographen die wirklich erreichten Drucke nicht registriert wurden. Um diese Unsicherheit auszuschalten, wurde in der Folge ein Kathodenstrahl-Oszillograph der Firma A. Cossor, London, benutzt, der freundlicherweise von Prof. Ackeret von der Eidgen. Technischen Hochschule zur Verfügung gestellt wurde.

Die Zelle wurde anstelle eines Probeplättchens in der Düse von Abb. 10 eingebaut und erlaubte interessante Beobachtungen über die an den Plättchen auftretenden Druckschwankungen. An der Stelle des kleinsten

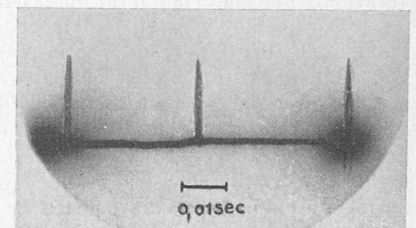


Abb. 24. Oszillogramm des Drucks bei Tropfenschlag.

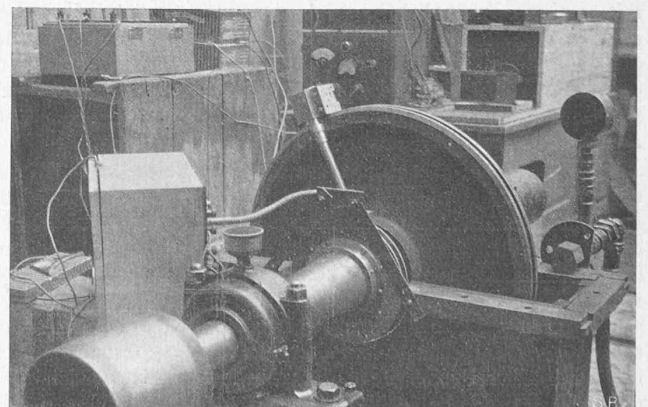


Abb. 23. Die Piëzoquarz-Zelle an der Scheibe für Tropfenschlagversuche.

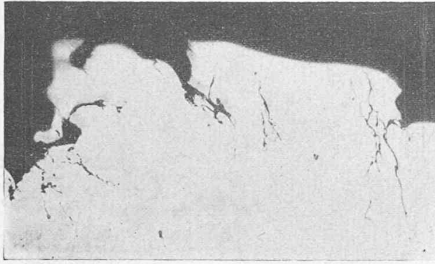


Abb. 25. Mikrophotographie eines korrodierten S. M.-Stahles. 100 fach.



Abb. 26. Mikrophotographie eines korrodierten Messings mit interkristallinen Rissen. 50 fach.

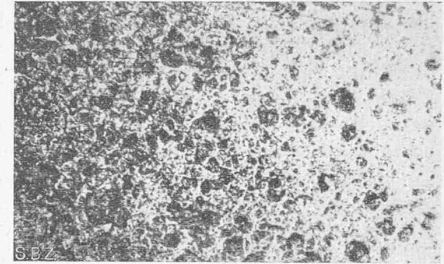


Abb. 27. Beginn der Korrosion bei Gusseisen. 25 fach.

Druckes und in der Ablösungszone ist der Ausschlag des Lichtpunktes gering, er beträgt nur 2 bis 3 mm und ist hauptsächlich durch die Vibrationen der Rohrleitung hervorgerufen, die sich auf den Quarzkristall übertragen. Der in diesen Gegenden herrschende Druck ist also konstant. An der Stelle des Beginns der Kondensationszone ist die Amplitude der Druckschwankungen  $\Delta P$  erheblich. Es entsteht dort ein regelrechtes Hämmern von hoher Frequenz, ungefähr 20000 bis 25000 Hertz, wie man aus dem Oszillogramm Abb. 20 ersieht. Die Dauer des einzelnen Schläges ist ausserordentlich kurz, denn das mit einem Metallmanometer festgestellte Druckmittel übersteigt  $15 \text{ kg/cm}^2$  nicht, während die piezo-elektrische Zelle Druckspitzen von  $160 \text{ kg/cm}^2$  registrierte, und zwar bei einer Ausflussgeschwindigkeit von 100 m/s, entsprechend 500 m Gefälle.

Die stärksten Drücke treten ungefähr in der Mitte der Kondensationszone auf. Fortschreitend mit der Flussrichtung geht die Amplitude zurück, behält aber noch einen beachtenswerten Betrag selbst ausserhalb dieser Zone. Dies erklärt sich durch Stosswellen, die sich in der Flüssigkeit weit über die Ursprungsstelle hinaus ausbreiten. Immerhin flauen sie genügend rasch ab und in einer gewissen Entfernung wird der Druck wieder beinahe konstant. Abb. 21 zeigt den gewöhnlichen Verlauf der Erscheinung. Sie gibt die mittlere Amplitude  $\Delta P$  der an verschiedenen Punkten der Kondensationszone gemessenen Druckstösse und den statischen Druck  $P_{st}$ . Bei diesen Messungen wurde nicht die Lage der Zelle, sondern durch Veränderung des Gegendruckes die Kavitationszone verschoben. Die eingetragenen Ergebnisse sind rein qualitativ zu werten.

Die Intensität des Hämmerns hängt mit der Grösse der Ausflussgeschwindigkeiten zusammen, wie die Kurve von Abb. 22 zeigt. Man sieht, dass selbst bei grössten Geschwindigkeiten die Momentandrücke  $\Delta P$  den Betrag  $180 \text{ kg/cm}^2$  nicht überschreiten, d. h. ungefähr  $3,5 \rho v^2/2$  betragen. Von Zeit zu Zeit, jedoch nicht öfter als ein oder zweimal in der Sekunde, wurde ein stärkerer Schlag beobachtet, dessen Amplitude nicht genau bestimmt werden konnte, da die Sättigungsgrenze des Voltmeters bereits überschritten war, der jedoch sicher 250 bis  $300 \text{ kg/cm}^2$  nicht übersteigt, und zwar unter Versuchsbedingungen, bei denen der nichtrostende Stahl bereits stark angegriffen wird. Immerhin ist es möglich, dass die wirklichen Drücke noch höher sind, wenn ihr Wirkungsbereich kleiner ist als die Oberfläche des bei den Versuchen benutzten Kolbens von  $1,5 \text{ mm } \varnothing$ .

Um das richtige Arbeiten der Zelle zu kontrollieren, muss man sie in einem Fall anwenden, der die rechnerische Bestimmung des Druckes mit genügender Annäherung erlaubt. Dies ist der Fall bei einem Versuch durch Tropfenschlag, wie oben beschrieben. Zu diesem Zweck wurde die Zelle auf der rotierenden Scheibe anstatt eines Probestabes befestigt (Abb. 23). Die Schwierigkeiten dieses Versuches waren erheblich, da die elektrischen Ladungen der umlaufenden Zelle auf den feststehenden Verstärker mit Hilfe von Schleifringen und Bürsten übertragen werden mussten und zudem lange Kabel erforderlich waren. Es ist indessen dank besonderer Vorkehrungen möglich gewesen, die gesamte Kapazität auf 30 cm zu beschränken. Abgesehen von den Schwierigkeiten, die sich

der guten Isolierung des in einer mit Wasserdampf gesättigten Atmosphäre mit hoher Geschwindigkeit umlaufenden Apparates entgegenstellten, hat die Einrichtung zufriedenstellend gearbeitet. Die aufgenommenen Oszillogramme waren zu schwach belichtet, um ohne Retusche reproduziert werden zu können, ihr Charakter ist jedoch in Abb. 24 richtig wiedergegeben. Der Höchstwert der Druckspitzen betrug  $310 \text{ kg/cm}^2$  bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 35 m/s, der ein theoretischer Druck von  $485 \text{ kg/cm}^2$  entsprechen würde. Es ist klar, dass die wirklichen Drücke unterhalb dieses Wertes liegen müssen, die Messung liefert daher wenn auch kein exaktes, so doch ein wahrscheinliches Resultat. Man darf also annehmen, dass im Fall der Kavitation die piezo-elektrische Methode der Druckmessung zu Ergebnissen führt, die mit genügender Annäherung der Wirklichkeit entsprechen, der Fehler wird vielleicht 10 bis 15 % betragen.

Diese Versuche haben eine Verwandtschaft zwischen zwei bis dahin für vollkommen verschieden angesehenen Abnutzungsformen offenbart. Die Erosion der Dampfturbinenschaufeln und die Korrosion in den Pelton- oder Francis-Turbinen sind sämtlich durch das Hämmern der Wassertropfen bzw. der bewegten Wassermassen auf der Strömungsfläche verursacht und, obwohl der Mechanismus dieser Schläge ganz verschiedenartig ist, sind die Beanspruchungen von der selben Grösßenordnung. Die Messungen mit der Piezo-Quarzzelle haben bewiesen, dass wiederholte Druckstösse im Betrag von nicht mehr als 200 bis  $300 \text{ kg/cm}^2$  genügen, um die Zerstörung der widerstandsfähigsten Metalle zu bewirken; die Versuche mit unmittelbarem Tropfenschlag haben dieses Resultat bestätigt und gleichzeitig gezeigt, dass der Effekt unabhängig ist von der Schwingungszahl. Im Fall der Kavitation liegt dieser Wert bei 20000 Hertz, bei dem Versuch mit Tropfenschlag betrug er dagegen nur 44 Hertz. Es ist auch bekannt, dass die Schwingungszahl kaum einen Einfluss auf die Ermüdungsfestigkeit hat, vorausgesetzt dass Zug- und Druckbeanspruchung abwechseln (Memmler und Laute).<sup>8)</sup> Es handelt sich hier um eine neue noch nicht geklärte Erscheinung. Es ist wohl zu verstehen, dass, sobald die Oberfläche einmal angegriffen ist, verhältnismässig kleine Drucke zur Fortsetzung der Erosion genügen. Die Mikrophotographie von Abb. 25 gibt den Querschnitt durch einen Siemens-Martin-Stahl wieder und zeigt die Risse und konischen Aushöhlungen, die dem Angriff vorangehen; das Wasser dringt in diese Risse ein und arbeitet dort wie ein Keil.<sup>9) 10)</sup> Im übrigen ist es aus der Elastizitätslehre bekannt, dass die spezifischen Spannungen in der Tiefe eines Risses bzw. an einer scharf abgelenkten Stelle ein Mehrfaches der Spannungen in der Umgebung erreichen können. Die Entstehung der ersten Risse und der Anfang der Erosion lässt sich aber durch die Wirkung von Drücken der obengenannten Grösßenordnung nur schwer erklären, besonders dann, wenn die Oberfläche vollkommen glatt ist. Vielleicht handelt es sich um eine ähnliche, wie die von Mac Adam<sup>11)</sup> festgestellte Erscheinung,

<sup>8)</sup> siehe Literatur-Verzeichnis Nr. 22.

<sup>9)</sup> siehe Literatur-Verzeichnis Nr. 30.

<sup>10)</sup> siehe Literatur-Verzeichnis Nr. 23.

<sup>11)</sup> siehe Literatur-Verzeichnis Nr. 17 bis 21.

dass nämlich eine Verminderung der Ermüdungsfestigkeit des Materials durch das Meerwasser oder allgemein korrosive Flüssigkeiten hervorgerufen wird („American Institute of Mining and Metallurgical Engineers“, Februar 1928, und „Stahl und Eisen“, 1928, S. 701 und 1480). Es ist auch möglich, dass ausser ordentlich feine, selbst im Mikroskop unsichtbare Risse die Veranlassung zur Erosion bilden.

Die Art der Zerstörung des Materials ist noch völlig unangeklärt. Bei der Mikrophotographie der Abb. 26, die eine Messinglegierung von 52% Kupfer und 48% Zink mit ziemlich grober Struktur betrifft, scheint es, dass der Bruch interkristallin erfolgt, d. h. die Risse entstehen zwischen zwei benachbarten Kristallen. In andern Fällen dagegen scheint der Bruch intrakristallin zu erfolgen. Abb. 27 zeigt den Beginn der Korrosion bei Grauguss in fünfundzwanzigfacher Vergrößerung. Auf der rechten Seite ist die Oberfläche noch nicht angegriffen.

Wie dem auch sein mag, das durch die Kavitationskorrosion gestellte Problem verschiebt sich auf ein anderes Gebiet. Wenn auch die Entstehung von Drucken von 200 oder 300 kg/cm<sup>2</sup> sich vom hydrodynamischen Standpunkt aus verhältnismässig leicht erklären lässt, so ist die zerstörende Wirkung auf das Metall nicht ohne weiteres verständlich, da hierzu Drücke von 2000 bis 3000 kg/cm<sup>2</sup> erforderlich scheinen sollten. Es wird notwendig sein, die bisherigen Theorien der Widerstandsfähigkeit der Metalle gegen Ermüdung so zu ergänzen, dass unter der Einwirkung wiederholter Schläge in Gegenwart einer Flüssigkeit die Ermüdungsgrenze sich wesentlich nach unten verschiebt.

Zum Schluss sei es mir gestattet, Herrn Prof. Dr. Ackeret für seine ständige Unterstützung, Herrn Prof. Tank für seine wertvolle Hilfe bei der Herstellung der piezoelektrischen Zelle, sowie Herrn Stauffer und Herrn v. Wurstemberger für die Anfertigung der Mikrophotographien und ihren Rat in metallographischen Fragen meinen besten Dank auszusprechen.

#### Literatur-Verzeichnis.

1. J. Ackeret: Experimentelle und theoretische Untersuchungen über Hohlraumbildung im Wasser. „Techn. Mechanik und Thermodynamik“ 1930. Nr. 1 und 2, S. 1 und 63.
2. J. Ackeret: Kavitation und Korrosion. — „Hydromechanische Probleme des Schiffsantriebs“, Hamburg 1932.
3. J. Ackeret: „Hydraulische Probleme“, S. 101, Berlin 1926.
4. J. Ackeret: „Handbuch der Experimental-Physik“, V und IV, I. Teil, S. 463.
5. E. Braun: „Hydraulische Probleme“, S. 91, Berlin 1926.
6. J. Dalemont: L'usure anorm. des turbines hydrauliques, Paris 1908.
7. M. Dutoit et M. Monnier: Sur l'usure des turbines hydrauliques. „Bulletin S. E. V.“ 1932, Nr. 21, S. 537.
8. E. Englesson: Ueber Anfrassungen bei Wasserturbinen. — „Wasserkraft-Jahrbuch“ 1928/29, S. 366.
9. H. Föttinger: Untersuchungen über Kavitation und Korrosion. „Hydraulische Probleme“, S. 14, Berlin 1926.
10. H. Föttinger: Versuche über einige typische Kavitationserscheinungen. „Hydr. Probl. des Schiffsantriebs“, S. 241, Hamburg 1932.
11. E. Honegger: Ueber Erosionsversuche. „B. B. C. - Mitteilungen“ 1927, Nr. 4, S. 95.
12. H. Hengstenberg: Accelerated tests reveal corrosion-resisting metals. Power, Sept. 1932, S. 110.
13. W. Hahn: Schnelllaufende Turbomaschinen für Flüssigkeiten. „V. D. I.-Zeitschrift“, S. 1293, Oktober 1931.
14. R. Hocart: „Journal de physique et radium“, S. 96, 1928.
15. Kluge & Linckh: Piezo-elektrische Messungen. „V. D. I.-Zeitschrift“ 1929, Band 73, Nr. 37, S. 1311.
16. Kluge & Linckh: Piezo-elektrische Messungen. „Forschung“ Band 2, Nr. 5, S. 153, 1931.
17. D. C. Mac Adam: Communications to: American Society for Steel Treating. März 1927. Am. Soc. for Testing Materials. Juni 1927.
18. Am. Inst. of Mining & Metallur. Eng., Juni 1928.
19. „Stahl und Eisen“ 1928, S. 701 und 1680.
20. „Schweiz. Techn. Zeitschrift“ 1928, S. 493.
21. K. Memmler: Dauerversuche an der Hochfrequenz-Zug-Druck-Maschine. „V. D. I. Forschungsheft“ 329/1930.
22. C. A. Parsons & S. S. Cook: Investigations into the cause of corrosion or erosion of propellers. „Engineering“ 1919, S. 515.

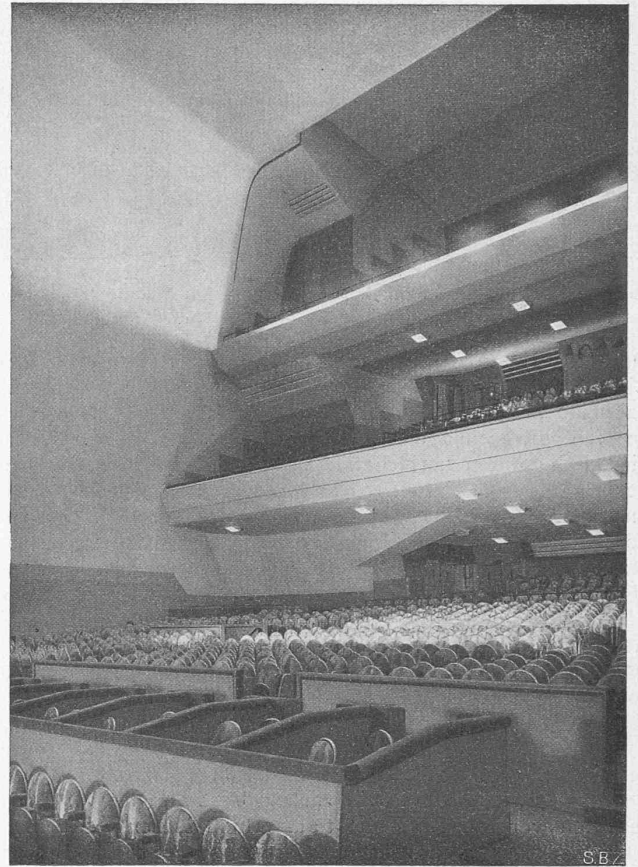


Abb. 3. Konzertsaal Pleyel in Paris (vergl. Beschreibung Band 95, Seite 47\*), im frühern Zustand, also noch ohne die heutigen Dämpfungs-Behänge, durch die auch die scharfen Kanten wesentlich gemildert wurden.

24. W. Ramsay: The erosion of bronze propellers blades, „Engineering“ 1912, S. 687.
25. Rayleigh: „Scientific papers“, Band 6, S. 504.
26. W. Spannhake: Cavitation and Corrosion. „National El. Light Association Pub.“ Nr. 222.
27. Schröter: Korrosion durch Kavitation in einem Diffusor. „V. D. I.-Zeitschrift“ 1932, Nr. 21, S. 511 und Hydromechanische Probleme des Schiffsantriebs, S. 322, Hamburg 1932.
28. D. Silberrad: The erosion of high speed screw propellers „Engineering“ 1912, S. 34.
29. Speller, Mc., Corkle & Mumma: Communication to the Am. Soc. for Testing Materials. Juni 1928.
30. D. Thoma: Die Kavitation bei Wasserturbinen. „Wasserkraft-Jahrbuch“ 1924, S. 409.
31. Desgl. in „Hydraulische Probleme“, S. 65, Berlin 1926.
32. S. S. Cook: Erosion by water hammer. „Proc. Royal Society“, Band A 119, S. 481, 1928.

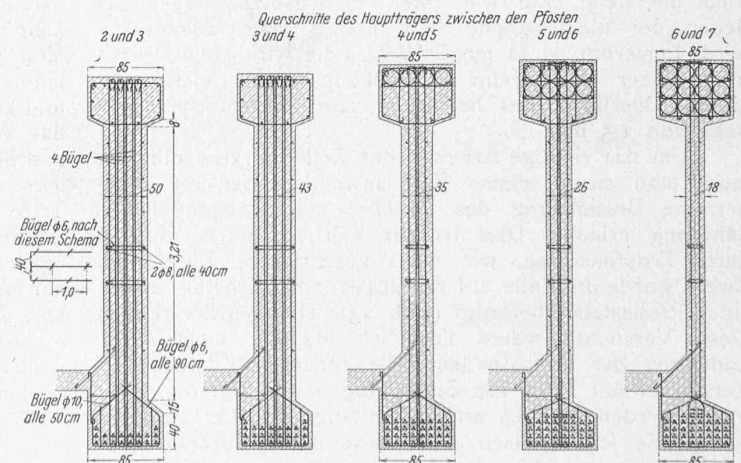


Abb. 4. Bou-Roumi-Brücke, Querschnitte und Armierung des Hauptträgers 1 : 80.