

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 107/108 (1936)
Heft: 10

Artikel: Ueber die Zerstörung von Werkstoffen durch Tropfenschlag und Kavitation
Autor: Ackeret, J. / Haller, P. de
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-48364>

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: 03.02.2026

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

INHALT: Ueber die Zerstörung von Werkstoffen durch Tropfenschlag und Kavitation — Probleme des Artilleristischen Luftschatzes — Medizinische Poliklinik der Stadt Zürich — «Autofähre für Eisenbahn-Alpentunnel — Neuigkeiten vom Panixerpass-Autotunnel — Mitteilungen: Dauerversuche mit Stählen. Ueber elektrochemische Verfestigung von

Tonböden. Ein Durchschnittsgeschwindigkeitsmesser für Automobile. Die Arbeitsbeschaffung durch den «Krisenrapport» in Basel. Die Baugeschichte von Gross- und Fraumünster in Zürich. Schweizer Architektur und Werkkunst 1920 bis 1936.

Ueber die Zerstörung von Werkstoffen durch Tropfenschlag und Kavitation

Von Prof. Dr. J. ACKERET und Ing. Dr. P. DE HALLER, Institut für Aerodynamik an der ETH, Zürich¹⁾

In einem «Z.VDI»-Aufsatz werden von *M. v. Schwarz* und *W. Mantel*²⁾ beachtenswerte Beiträge zu der noch immer von Geheimnis umgebenen Frage gebracht. Da wir uns seit längerer Zeit mit ähnlichen Untersuchungen beschäftigen³⁾, halten wir es für angezeigt, auf neuere Ergebnisse hinzuweisen, die die Schwierigkeit einer befriedigenden Erklärung in sehr charakteristischer Weise beleuchten.

Die genannten Verfasser schliessen aus mikroskopischen Verformungen auf das Wirken gewaltiger Drücke (mehr als 9000 kg pro cm², bzw. sogar 32000 kg/cm²). Da ist nun zu sagen, dass von allem Anfang an die Kavitationsforscher solche Drücke für nötig hielten und eifrig nach hydrodynamischen und thermodynamischen Druckverstärkungs-Mechanismen suchten. Die in Frage kommenden Strömungsgeschwindigkeiten sind nämlich so mässig, dass die primär durch sie bedingten Drücke von der Grössenordnung einiger Atmosphären durchaus ausser Betracht fallen. Während man bei Kavitation den Dampfblasen noch eine Rolle bei dieser Druckverstärkung versuchsweise zuschieben könnte⁴⁾, ist die Beanspruchung durch Tropfenschlag sehr viel durchsichtiger. Ist nämlich der Strahl zusammenhängend, das Probestück eben, so lässt sich der Auftreffdruck recht einfach berechnen.

$$p = \frac{\varrho_w a_w u}{1 + \frac{\varrho_w a_w}{\varrho_m a_m}}$$

worin ϱ_w , ϱ_m : Dichte von Wasser und Versuchs-Material
 a_w , a_m : Schallgeschwindigkeit in Wasser und im Versuchsmaterial.

Für eine relative Geschwindigkeit von Wasser und Metall (Messing) von $u = 72$ m/sec ergibt sich so ein Höchstdruck von 980 kg/cm². Man müsste schon sehr künstliche Annahmen treffen über die Vorgänge an der Stossstelle, um wesentlich höhere Werte zu erhalten, denen wiederum entgegensteht, dass die Anfressungen keineswegs in der daraus folgenden Weise örtlich verteilt sind. Der Eine von uns hat ferner die Stossdrücke beim Tropfenschlag piezoelektrisch gemessen und eine durchaus befriedigende Uebereinstimmung mit der Rechnung gefunden⁵⁾.

¹⁾ Die hier erwähnten Versuche sind im Wesentlichen im Laboratorium der Firma Escher-Wyss, Zürich durch den zweitgenannten Verfasser durchgeführt worden. Wir sind der Firma für freundliche Unterstützung sehr zu Dank verpflichtet.

²⁾ v. Schwarz und Mantel: «Werkstoffzerstörung durch Tropfenschlag», Z.VDI, 11. Juli 1936, S. 863.

³⁾ J. Ackeret: «Experimentelle und theoretische Untersuchungen über Hohlraumbildung (Kavitation) im Wasser. «Techn. Mechanik und Thermodynamik» (Vorläufer der Zeitschrift «Forschung»), 1930, Ed. 1, S. 1 u. f., S. 63 u. f. — J. Ackeret: (a) «Kavitation u. Kavitationskorrosion» in: Hydro-mechanische Probleme des Schiffsantriebes, Hamburg 1932, S. 227 bis 240. — P. de Haller: (b) «Untersuchung über die durch Kavitation hervorgerufenen Korrosionen». «SBZ», Bd. 101, 1933, S. 243/260. — J. Ackeret: «Schnelllaufende Hochdruck-Gegendruck-Wasserturbinen», Vorträge und Aussprachen VDI-Hauptversammlung Friedrichshafen 1933, S. 54/56, VDI-Verlag, Berlin. — J. Ackeret und P. de Haller: «SBZ», Bd. 98, S. 309, und «Forschung», No. 9, Sept. 1931, S. 343.

⁴⁾ Ackeret, l. c. (a), S. 234. ⁵⁾ de Haller, l. c. (b), S. 263.

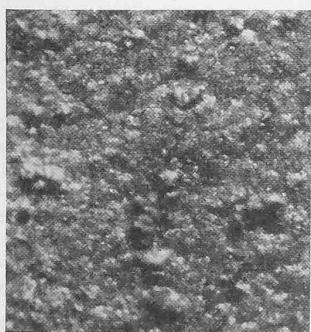
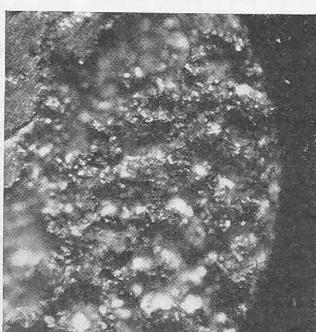


Abb. 3. Anfressung von Kupfer, Vergrösserung rund 30-fach, links durch Kavitation, rechts durch Druckwellen.



Man kann den Einwand erheben, dass nicht feststehe, ob die Quarzzelle so harte Schläge noch richtig anzeigen, und dass damit die gefundene Uebereinstimmung nur vorgetäuscht sei. Insbesondere vertreten die genannten Verfasser die Ansicht, der bei unsrern Versuchen benutzte Messkolben sei viel zu gross und gäbe nur einen stark abgeschwächten Mittelwert an. Obwohl eine Anzahl guter Gründe gegen diese Ansicht sprechen, haben wir es unternommen, durch einen Versuch auf anderer Grundlage eine Stütze für unsere im Laufe der Zeit gewonnene Ansicht zu finden, dass keine Druckerhöhung im Flüssigkeitsraum über den einfachen Stossdruck hinaus stattfinde, und dass die für die Zerstörung primär massgebenden Drücke von bescheidener Grösse sind. Wir haben einen Stosswellenapparat gebaut, mit dem es gelingt, durch im Wasser erzeugte Schall-, besser Stosswellen Metalloberflächen zu korrodieren.

In einem dickwandigen Stahlzylinder A Abb. 1 bewegt sich ein Kolben B, auf den mit einem Drucklufthammer geschlagen wird. Der Durchmesser des Kolbens beträgt 12 mm, der Zylinder ist konisch ausgebildet bis zum Probestück, wo der Durchmesser noch 6 mm beträgt. Das Probestück ist durch die Schraube D gehalten, an seiner Stelle kann die in einem früheren Aufsatz beschriebene Piezoquarzzelle eingeschraubt werden. Eine Druckleitung F ersetzt durch eine sehr feine Blende E (0,3 mm Ø) die Flüssigkeit, die durch kleine Undichtheiten des genau geschliffenen Kolbens verloren geht. Die Versuchskammer steht also ständig unter Druck (7 ata bei den bisherigen Versuchen).

Durch den Hammerschlag werden starke Stosswellen erzeugt, die sich bis zum Probestück fortpflanzen. Durch die kleine Blende kann die Flüssigkeit nicht schnell genug ent-

weichen, um dadurch eine wesentliche Abminderung des Stosses hervorzurufen. Zudem wird durch den Konus die Intensität der Stöße annähernd verdoppelt. Man kann nämlich zeigen⁶⁾, dass in einem konischen Rohr die Intensität einer Druckwelle in erster Näherung im umgekehrten Verhältnis der Durchmesser steigt. Der verwendete Lufthammer hat folgende Abmessungen: Kolben: Ø 20 mm, Hub 40 mm, Druck 6 atü, Kolbengewicht 114 gr, Stossfrequenz ~ 16/sec. Als Flüssigkeit wurde Wasser und Petrol verwendet, ohne Unterschied im Ergebnis.

Diese Versuchsanordnung gestattet somit, stossartige Druckbeanspruchungen zu erzeugen bei völliger Abwesenheit von Gasen, mit chemisch gänzlich inaktiven Flüssigkeiten und ohne örtliche zusammengedrängte Druckspitzen, dies deswegen, weil

Druckunterschiede in einer fortschreitenden Wellenfront durchaus genügend Zeit und Weg zur Verfügung haben, um sich auszugleichen. Uebrigens ist die Erzeugung der Druckwelle durch den Stempel bestimmt schon sehr gleichförmig.

Es ergeben sich beim Betrieb des Apparates schon nach kurzer Zeit (10 ± 12 h) Anfressungen der Probestücke, die

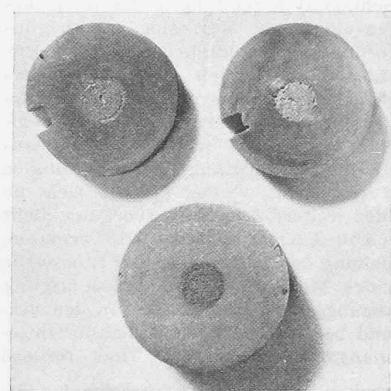
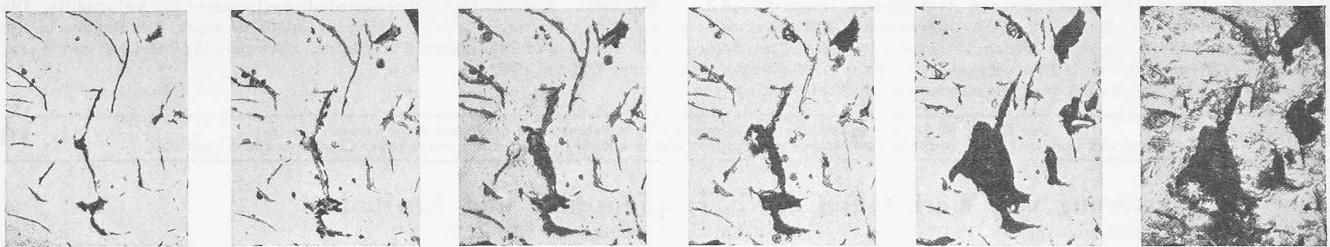


Abb. 2. Angefressene Probestücke, oben Kupfer u. Grauguss, unten SM-Stahl.

⁶⁾ Rayleigh: Theory of Sound, 2nd Edition, 1 Vol, 2 S, 68 § 266.



Schlagzahl: 0

30 000

60 000

90 000

120 000

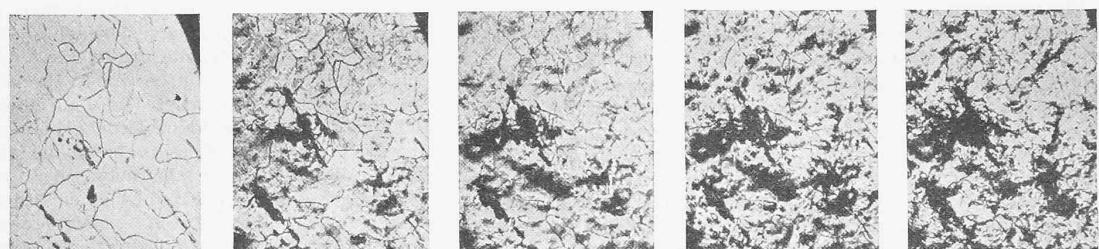
200 000

Abb. 4. Zerstörungen von Grauguss-Oberflächen durch Stosswellen im Versuchapparat gemäss Abb. 1. — Vergrösserung 120 fach.

das gleiche Bild wie die Kavitations- oder die Tropfenschlag-anfressungen zeigen (Abb. 2 u. 3). Nichts deutet auf eine besondere Wirkung der Gasabwesenheit hin. Auch würde somit das Fehlen der hypothetischen Druckspitzen keinen erkennbaren Unterschied bedingen. Die Piezozelle liefert

wiederum sehr niedrige Drücke. Eine Berechnung auf Grund der Abmessungen der Versuchseinrichtung, des angewendeten Luftdruckes usw. gibt nun aber Werte, die wiederum befriedigend mit den Messungen übereinstimmen. Also auch hier müsste man annehmen, dass sowohl Rechnung wie Piezomessung grosse Fehler aufweisen. Spitzenwirkung innerhalb der Druckwellen fallen aus den oben genannten Gründen ausser Betracht; dagegen sprechen übrigens auch die klaren Aufnahmen der Unterwasserstosswellen, die bei anderen Gelegenheiten gemacht wurden⁷⁾. Um aber auch die letzten Zweifel an der Notwendigkeit der Annahme niedriger Drücke zu beseitigen, haben wir ein Versuchsgerät in Bau genommen, das Stossdrücke von genau einstellbarer Grösse liefern soll und gleichzeitig eine Beobachtung der Wellen erlaubt.

Die gegenwärtige Sachlage ist insofern eigenartig, als die Metallforscher ohne die hohen Drücke anscheinend nicht auskommen, die Hydrodynamiker diese aber nicht finden können. Unseres Erachtens sind aber die Bedingungen auf der Materialseite ungleich verwickelt. Wir müssen zweifellos darauf gefasst sein, dass eine mechanische Dauerbeanspruchung durch Vermittlung einer Flüssigkeit etwas gänzlich anderes darstellt als die Beanspruchung durch die Brinellkugel. In der Tat geben mikroskopische Untersuchungen des Beginns der Zerstörung bemerkenswerte Fingerzeige. Abb. 4 zeigt in 120 facher Vergrösserung eine polierte Graugussoberfläche, die in der Stosswellenmaschine steigenden Schlagzahlen ausgesetzt wurde. Man bemerkt im Ursprungszustand die Graphiteinschlüsse mit Dicken von wenigen Tausendstel Millimeter. Nach verhältnismässig wenigen Schlägen ist der Graphit herausgeschlagen. Graphit hat nur eine geringe Festigkeit, sodass die von uns gemessenen geringen Drücke zur Zerstörung sicherlich befähigt sind. Wenn nun aber Spalten und Klüfte im Material vorhanden sind (z. B. nach 90 000 Schlägen), können wiederum geringe Aussendrücke die beobachtete Ausbröckelung (nach 120 000 Schlägen) herbeiführen. Es ist ja bekannt⁸⁾, dass Aushöhlungen die Schlag-Korrosion sehr begünstigen, und dass die Zerstörungsgeschwindigkeit nach der Bildung der ersten kleinen Löcher sehr rasch anwächst. Etwas weniger sichergestellt ist der Zerstörungsverlauf bei anderen Werkstoffen. Aber auch dort kann man verfolgen, wie die feinsten Fehlstellen im Material, die bei den relativ groben Beanspruchungen der normalen Ermüdungsprüfungen ganz belanglos sind, sofort angepackt und ausgepickt werden. Sobald sich die Löcher gebildet haben, ist der weitere Zerstörungsvorgang nicht anders wie beim Grauguss (Abb. 5, Armco-Eisen). Wir vermuten, dass eine genauere Untersuchung des Eindringens der Stosswelle in die obersten Schichten des Materials mit Berücksichtigung der verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den verschiedenen Bestandteilen und bei verschiedener Kristallorientierung grosse lokale Spannungsunterschiede zu Tage fördern



Schlagzahl: 0

105 000

125 000

150 000

190 000

Abb. 5. Oberflächen-Zerstörung von Armco-Eisen durch Stosswellen. — Vergrösserung 120 fach.

könnte, die zur Erklärung der ersten Ausbröckelungen durchaus ausreichen. Wir hoffen, in einiger Zeit darauf genauer eintreten zu können.

*

Zusatz. In einer längeren Abhandlung bringt van Jterson⁹⁾ die Korrosionen bei Kavitation mit Oberflächenspannung in Zusammenhang. Auf Grund der oben angeführten Versuche, bei denen freie Oberflächen und Gasblasen überhaupt nicht auftreten, wird man mindestens schliessen dürfen, dass Blasenbildung und Oberflächenspannung nicht notwendige Bedingungen für Korrosion sind.

Föttinger, der schon frühzeitig auf den mechanischen Charakter der Kavitationszerstörungen hingewiesen, hat auch tangentielle Schubspannungen beim plötzlichen Auftreffen von rasch parallel zur Oberfläche strömendem Wasser als besonders gefährlich vermutet¹⁰⁾. Die Newton'sche Formel

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

würde ja zunächst unendlich hohe Werte liefern. Eine genauere Untersuchung zeigt aber, dass die Schubspannungen tatsächlich auch nur von der Grössenordnung der Druckspannungen bei normalem Auftreffen sind, indem man nämlich berücksichtigen muss, dass der Schub-Stoss sowohl im Wasser wie im Metall sich nur mit endlicher Geschwindigkeit ausbreiten kann. Als solche muss im Wasser die Schallgeschwindigkeit genommen werden. Die maximale Schubspannung ist dann bei einer Wassergeschwindigkeit u vor dem Stoss näherungsweise gegeben durch:

$$\tau_{\max} = \rho_w a_w u$$

Die genauere Betrachtung liefert etwas weniger. Selbst $u = 50$ m/sec gibt nur $\tau = 700$ kg/cm². Zehnfach höhere Werte wie derun sind ganz ausgeschlossen. Nebenbei sei gesagt, dass diese Bemerkung auch Bezug hat auf die in der Grenzschichttheorie ebener, parallel angestromter Platten gefundenen unendlich grossen Spannungswerte unmittelbar an der Vorderkante. Auch hier liefert die Kompressibilität eine Begrenzung, die sich auf gleiche Weise berechnen lässt.

Probleme des Artilleristischen Luftschatzes

Wenn bei klarer, den Bombenabwurf ermöglichernder Witte rung ein herannahendes Flugzeug mit 1 bis 2 t Bombenlast nur noch 6 bis 7 km weit entfernt ist, kann seine Beschiesung durch Abwehrschütze beginnen; ehe eine Minute verstrichen, muss es herunter, sonst ist es (mit 350 bis 450 km/h) da. Beobachtet wird es mit Telemeterfernrohren, nachts mit Hilfe von Scheinwerfern. Um es mit einem erträglichen Aufwand an Geschützen und tempierten Granaten zum Absturz zu bringen, darf der Zielfehler, d. h. der Abstand zwischen dem Flugzeug und dem «Ziel punkt», auf den geschossen wird, nicht allzu gross sein. Vom

⁷⁾ T. K. Th. van Jterson, Koninklijke Akad. van Wetensch. Amsterdam. Proceedings 1936, «Cavitation et Tension superficielle». Mit bemerkenswerten Angaben über die Kavitations-Schwierigkeiten bei den für die Trockenlegung der Zuidersee verwendeten Pumpen.

⁸⁾ H. Föttinger in «Hydromech. Probleme» usw., S. 243.

⁹⁾ A. Behm: «Das Behmloft und seine Entwicklung als akustischer Höhenmesser für Luftfahrzeuge». Jahrbuch der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Luftfahrt (WGL), 1925, S. 56.

¹⁰⁾ de Haller, l. c. (b), S. 244.