

# Schwingungsbeanspruchung und Rissbildung insbesondere von Konstruktionsstählen

Autor(en): **Föppl, O.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **81/82 (1923)**

Heft 8

PDF erstellt am: **12.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-38868>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

INHALT: Schwingungsbeanspruchung und Rissbildung insbesondere von Konstruktionsstählen. — Die Transportanlagen zum Bau der Staumauer für das Barberine-Kraftwerk der S. B. B. — Wettbewerb für ein städtisches Gymnasium auf dem Kirchenfeld in Bern. — Die synthetische Ammoniakgewinnung nach dem Verfahren von Claude. — Das Griffin-Rad. — Miscellanea: Sitter-Stausee an der Lank. Vermehrung des Umformer-Lokomotiv-Parks des „Norfolk & Western Railway“. Klappbrücke über den

River Rouge in Detroit. Das lautsprechende Telephon im Stadtbahnbetrieb. Schweizerischer Chemiker-Verband. Schweizerische Ausstellungskommission. Prof. Dr. C. F. Geiser. Schweizer Mustermesse. — Konkurrenzen: Gebäude für das Internationale Arbeitsamt in Genf. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein. St. Gallischer Ingenieur- und Architekten-Verein. Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. S. T. S.

Band 81. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 8.

## Schwingungsbeanspruchung und Rissbildung insbesondere von Konstruktionsstählen.

Von Prof. O. Föppl, Braunschweig.<sup>1)</sup>

Wenn an einem Teil einer umlaufenden Maschine ein Riss eintritt, so ist er gewöhnlich nicht eine Folge einer einmaligen, sondern einer sich oft wiederholenden Beanspruchung. Der Spannungszustand schwankt dabei entweder zwischen Null und einem oft wiederkehrenden Maximum oder zwischen einem positiven und negativen Maximum. Wenn im letzteren Falle die Beanspruchung durch Schwingungen hervorgerufen wird, sind die positiven und negativen Maxima der Beanspruchung von absolut gleicher Grösse. Man spricht deshalb allgemein von „Schwingungsbeanspruchung“ wenn die Belastung zwischen  $+\sigma_{\max}$  und  $-\sigma_{\max}$  schwankt und nennt den Grenzwert der Beanspruchung dieser Art, den das Material bei beliebig häufigem Belastungswechsel eben noch auszuhalten vermag, ohne dass es Schaden leidet, seine Schwingungsfestigkeit.

Die Schwingungsfestigkeit eines Materials ist für den Praktiker eine sehr wichtige Grösse, die ihm angibt, bis zu welcher Grenze er einen Maschinenteil, der wechselnder Beanspruchung ausgesetzt ist, unter Beachtung der nötigen Sicherheiten belasten darf. Trotz ihrer Wichtigkeit ist aber die Schwingungsfestigkeit für die meisten Materialien nicht bekannt — und dort, wo sie bekannt ist, gehen die Angaben der verschiedenen Versuche weit auseinander —, sodass der Konstrukteur die für die Haltbarkeit seiner Konstruktion massgebende Grösse nicht verwenden kann. Er hilft sich so, dass er statt der Schwingungsfestigkeit die Bruchfestigkeit den Berechnungen zu Grunde legt. Das ist ein arger Notbehelf. Denn tatsächlich hängt die Haltbarkeit eines wechselnder Beanspruchung ausgesetzten Maschinenteils nicht von der Bruchfestigkeit, sondern von der wesentlich niedrigeren Schwingungsfestigkeit ab: der Maschinenteil geht nicht entzwei, solange die Schwingungsfestigkeit an keiner Stelle überschritten wird. Man berücksichtigt allerdings diesen Umstand in der Praxis, indem

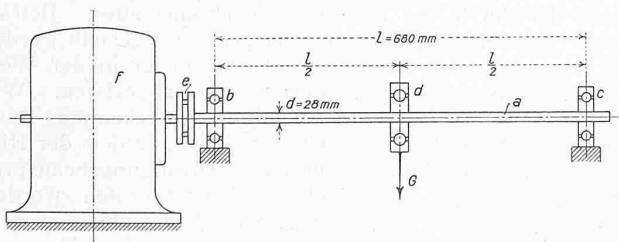


Abb. 1.

man beim Rückschliessen von der Bruchsicherheit auf die zulässige Beanspruchung eine entsprechend hohe Sicherheitszahl zu Grunde legt. Das Verfahren ist aber nicht einwandfrei, weil Bruchfestigkeit  $\sigma_{Br}$  und Schwingungsfestigkeit  $\sigma_s$  nicht in einem bestimmten, sondern für die verschiedenen Baustoffe verschiedenen Verhältnisse zu einander stehen. Wir werden an den Versuchsergebnissen sehen, dass das Verhältnis  $\sigma_s : \sigma_{Br}$  z. B. für Edelstahl ein ganz anderes ist als für gewöhnlichen Stahl oder gar für Bronze.

<sup>1)</sup> Ausführlicher mitgeteilt in dem nächstens im Verlag Teubner in Leipzig erscheinenden Buch „Grundzüge der Festigkeitslehre“ von A. & O. Föppl. Ein ausführlicher Versuchsbericht soll in der Dissertation von Dipl.-Ing. Dohms veröffentlicht werden.

Die vorstehenden Ueberlegungen zeigen, wie wichtig die Feststellung der Schwingungsfestigkeit ist, sodass die nachfolgenden Untersuchungen aus diesem Gebiet einiges Interesse beanspruchen dürfen. Bevor wir auf die Versuchsergebnisse selbst eingehen, wollen wir uns erst mit der Versuchseinrichtung des Verfassers und mit den damit gewonnenen Erfahrungen befassen.

### Die Versuchsanordnung.

Versuche zur Bestimmung der Schwingungsfestigkeit eines Materials sind schon oft angestellt worden. Bei der bekanntesten Einrichtung dieser Art, die schon von Wöhler in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts benützt worden ist, wird ein umlaufender Stab durch eine angehängte Last auf Biegung beansprucht. Beim Umlaufen ist eine Faser des Stabes, wenn sie unten liegt, auf Zug, in der oberen Lage auf Druck von gleicher Grösse beansprucht. Eine Anordnung dieser Art hat auch den Versuchen des Verfassers zu Grunde gelegen; wir wollen uns an Hand der Abbildung 1 etwas näher mit ihr befassen.

Ein Stab a ist an seinen Enden in Kugellagern b und c drehbar gehalten. In seiner Mitte trägt er ein weiteres Kugellager d (Abb. 2), an dem ein Gewicht G hängt. Durch G wird der Stab auf Biegung beansprucht; das grösste Moment tritt in der Mitte auf und es wird, wenn dafür gesorgt ist, dass der Stab durch die Kugellager b und c nicht eingespannt ist,  $M_{\max} = \frac{G}{2} \cdot \frac{l}{2}$ .

Vom linken Ende aus wird der Stab unter Zwischenschaltung einer elastischen Kupplung e durch einen Motor f angetrieben. Jede Faser des Stabes bei d ist durch das Moment  $M_{\max}$ , wenn sie unten liegt, auf Zug und, wenn sie nach einer halben Umdrehung oben liegt, auf Druck beansprucht.

Der Durchmesser der Versuchstäbe betrug 28 mm, die Länge l zwischen den Stützlagern b und c 680 mm.

Der Stab wurde mit steigender Last G solange beansprucht, bis er einriss. Sobald ein Riss an der Oberfläche festgestellt werden konnte, wurde er, um die Einrissstelle möglichst unversehrt zu erhalten, in der Zerreissmaschine vollständig abgerissen. Es entstand dabei das in den Abbildungen 3, 4, 5 und 9 auf den folgenden Seiten gegebene Bild, in dem deutlich zu erkennen ist, wie tief ins Material der Schwingungsbruch fortgeschritten war und welche Materialteile erst in der Zerreissmaschine getrennt worden sind.

Als ich im Oktober 1920 die in Abb. 1 dargestellte Versuchseinrichtung von Herrn Geheimrat Schöttler, der auf Anregung von Prof. A. Hofmann schon während des Krieges Schwingungsversuche ausgeführt hatte, übernahm, glaubte ich mit der Untersuchung der einzelnen Materialsorten direkt anfangen zu können, um brauchbare Versuchswerte für die Schwingungsfestigkeit zu erhalten. Ich musste bald feststellen, dass ich mich in einem Irrtum befand.

Die ersten Versuche lieferten Zahlen für die Schwingungsfestigkeit von Edelstählen zwischen 18 und 20 kg/mm<sup>2</sup>, d. h. wenn die Belastung über 20 kg/mm<sup>2</sup> lag, brachen die Stäbe, wenn auch erst nach viel millionenfacher Beanspruchung entzwei, und nur wenn die Belastung unter 18 kg/mm<sup>2</sup> lag, konnte beliebiger langer Betrieb (hundert

Millionen Umdrehungen und beliebig mehr) aufrecht erhalten werden. Der so gewonnene Wert für die Schwingungsfestigkeit von 18 bis 20 kg/mm<sup>2</sup> war aber viel zu niedrig. Wie sich später herausstellte, waren die Versuchsergebnisse durch störende Nebenumstände beeinflusst, nach deren Beseitigung die Schwingungsfestigkeit für die gleichen Edeltstahlsorten auf 36 bis 44 kg/mm<sup>2</sup> stieg. Da diese störenden Nebenumstände auch für die Praxis wesentliche Bedeutung haben, wollen wir uns eingehender mit ihnen befassen.

Im wesentlichen waren es drei Umstände, durch deren Berücksichtigung die Beanspruchung des Stabes in der vorhin angegebenen Weise erhöht werden konnte:

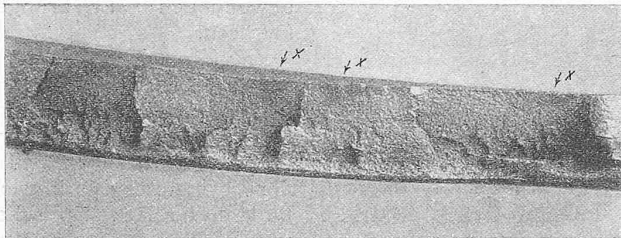


Abb. 5. Natürliche Grösse.

1. Ursprünglich lag der innere Laufring k des mittleren Kugellagers d hart auf dem Stab auf (Abbildung 2). Bei der Berechnung wurde gleichmässige Verteilung des Auflagedruckes über die Auflagefläche vorausgesetzt und unter dieser Annahme die Spannung infolge der Auflagerung so gering gefunden, dass sie gegenüber der durch die Biegung hervorgerufenen Beanspruchung vernachlässigt werden konnte. Tatsächlich konnte aber die Auflagefläche gar nicht so genau bearbeitet werden, dass alle Teile gleichmässig trugen, sondern der Auflagedruck wurde durch wenige eng begrenzte Flächen übertragen, in denen die durch die Auflagerung hervorgerufenen Spannungen von gleicher Grössenordnung wie die Biegungsspannungen wurden.

Die bei den ersten Versuchen aus der reinen Biegungsbeanspruchung errechnete Grösstspannung von 18 bis 20 kg/mm<sup>2</sup> wurde also durch in ihrer Grösse unbekannt zusätzliche Auflagerungsspannungen so stark erhöht, dass der schliesslich eingetretene Bruch mehr eine Folge der letzteren als der ersteren war.

Um die örtlichen Spannungserhöhungen zu beseitigen, wurde zwischen Stab a und Auflagerung k eine etwa 1 mm starke Papierbeilage g (Abb. 2) gebracht, durch die ein Ausgleich in der Spannungsverteilung erzielt wurde. Die Folge dieser Massnahme war, dass die Risse, die ursprünglich stets innerhalb des Druckrings ansetzten, jetzt mitunter ausserhalb auftraten und dass die Last G (Abb. 1) etwa auf das 1,5fache gesteigert werden konnte.

Diese Ueberanstrengung des Materials an einer eng umschränkten Stelle tritt nur bei oftmaligem Belastungswechsel störend in die Erscheinung. Bei einmaliger Beanspruchung tritt an den überanstrengten Stellen eine bleibende Formänderung auf, die einen Spannungsausgleich herbeiführt und die die Bruchfestigkeit kaum beeinträchtigt. Bei wechselnder Beanspruchung wird aber die immer wieder überanstrengte Stelle zerstört.

Für die Praxis ist das vorstehende Ergebnis wichtig, da auch die einzelnen Teile an ausgeführten Maschinen in vielen Fällen hart auf hart auf einander wirken. Dabei ist in der Regel die Spannungsverteilung durchaus nicht so gleichmässig, wie das bei der Rechnung angenommen wird. Es wird im Gegenteil eine Stelle, die etwa ein wenig vorsteht, besonders hohe Spannungen auszuhalten haben. Bei einmaliger Beanspruchung wird dadurch das Ergebnis kaum beeinflusst: das am höchsten beanspruchte Materialgebiet wird über die Elastizitätsgrenze hinaus gereckt, gibt infolgedessen nach und sorgt so selbstständig für den Spannungsausgleich. Bei Schwingungsbeanspruchung wird aber das über die Elastizitätsgrenze gestreckte Material in-

folge der oftmaligen Wiederholung der Beanspruchung nicht bleibend gereckt, sondern zerstört. Diese ungleichmässige Spannungsverteilung, die bei der Berechnung nicht berücksichtigt wird, tritt z. B. bei Schraubenverbindungen in hohem Masse auf. Deshalb gehen Schraubenverbindungen (etwa die Befestigung des Deckels einer Dampfmaschine) nicht bei der ersten Ueberanstrengung (also beim Anziehen der Schrauben) sondern erst nach vielmaligem Belastungswechsel entzwei, wenn sie überlastet waren.

2. Um einwandfreie Ergebnisse zu erhalten, mussten Stösse möglichst vermieden werden. Zu diesem Zweck wurde der Stab mit einem Ruthardt'schen Schlagmesser täglich neu ausgerüstet und dafür gesorgt, dass der Schlag möglichst nicht über 0,1 mm betrug. Die Kraftübertragung wurde durch eine zweibackige Kupplung mit Gummipuffern so gleichmässig wie möglich gemacht. Da sich der Stab unter der Last durchbog, wurde der Motor ein wenig nach dem Stabende zu geneigt, so, dass die Motorachse mit der Tangente an das Stabende in eine Richtung fiel.

3. Bei den zuerst durchgebrochenen Stäben wurde die Ausgangsstelle für den Schwingungsbruch untersucht. Es konnte immer festgestellt werden, dass eine leichte Oberflächenbeschädigung vorhanden war, von der der Schwingungsbruch seinen Ausgang nahm; selbst größere Polierschrammen drückten die zulässige Beanspruchung herunter. Es musste deshalb dafür gesorgt werden, dass die Stäbe möglichst glatt geschliffen waren und dass sie beim Einbauen in die Maschine keine harten Stösse (auch keine scheinbar geringfügigen) erlitten. Durch die Massnahmen zu 2 und 3 wurde die Schwingungsfestigkeit für Edelsonstruktionsstähle auf 36 bis 44 kg/mm je nach Sorte gebracht.

Die unter 2 und 3 genannten Massnahmen haben ebenfalls grosse praktische Bedeutung. Stösse und Erschütterungen im Betrieb oder leichte Oberflächenbeschädigungen sind in der Praxis oft Ursachen für Schwingungsbrüche, die durch die überschlägigen Betrachtungen über Spannungsverteilung nach den Lehren der Festigkeitslehre nicht erklärt werden können.

#### Ausbildung der Schwingungsbrüche.

Es wurde versucht, Schwingungsbrüche möglichst im Entstehen festzustellen und über die Fortschritts-Geschwindigkeit Aufschluss zu erhalten. Zu diesem Zweck wurde mit der Versuchseinrichtung eine elektrische Ausschaltvorrichtung verbunden, die die Stromzuführung zum antreibenden Motor unterbrach, sobald die Durchbiegung des Stabes, die unter der normalen Last etwa 5 mm betrug, um 0,1 mm grösser wurde. Wenn dann an einem Stab, der durch die Ausschaltvorrichtung ausser Betrieb gesetzt worden war, der feinste Haarriss festgestellt werden

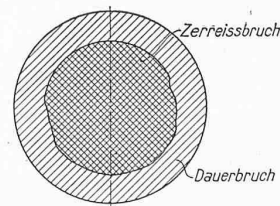


Abb. 6. Natürliche Grösse.

konnte, wurde er in der Werdermaschine abgerissen. Wie Abbildung 3 erkennen lässt, ist das Gebiet, in dem der Riss durch Schwingungsbeanspruchung hervorgerufen worden war, von dem Gebiet, in dem die Trennung des Materials erst in der Zerreiissmaschine — also mit einmaliger Belastung — erfolgt ist, leicht zu unterscheiden: der Schwingungsbruch zeigt ein sammtartiges, feinkörniges Gefüge, während der Zerreiissbruch grobe Flächen aufweist. Es wurde das Ergebnis erhalten, dass Schwingungseinrisse, die sich auf weniger als ein Viertel bis ein Drittel der Querschnittsfläche erstreckten, mit dem blossen Auge trotz sorgfältiger Untersuchung nicht festgestellt werden konnten. Der Stab, Abb. 3, war z. B. bis zur Linie a-a in der Maschine (Abb. 1) eingebrochen. Die elektrische Ausschaltvorrichtung schaltete den Motor ab. Der Stab wurde ausgebaut und seine Oberfläche sorgfältig nach Rissen untersucht. Da nichts gefunden werden konnte, wurde der Stab wieder eingebaut und die Maschine in Betrieb genommen. Aber schon nach kurzer Zeit wurde



der Motor wieder selbsttätig abgeschaltet. Der Schwingungsbruch, der sich jetzt auch an der Oberfläche deutlich erkennen liess, war, wie nach dem Abreissen des Stabes in der Werdermaschine festgestellt werden konnte, bis zur Mitte des Stabes (Linie b-b) vorgedrungen. Nachträglich konnte auch die Linie a-a, die sich durch die Unterbrechung des Betriebes abgezeichnet hatte, festgestellt werden.

Mitunter traten Schwingungsbrüche gleichzeitig an verschiedenen Stellen eines Stabes auf. Einer dieser mehreren Schwingungseinrisse bildete sich dann soweit aus, dass er äusserlich bemerkbar wurde und das Ausbauen des Stabes zur Folge hatte. Beim Abreissen des Stabes in der

(Abb. 6). Diese Art des Einreissens kommt durch Stösse zu Stande, die an dem Maschinenteil bei besonders ungünstigen Belastungsverhältnissen plötzlich auftreten und bei denen jeweils die Stelle einreiss, die im Augenblick des Stosses gerade die grösste Belastung auszuhalten hat. Die vielen sich wiederholenden Stösse, die schliesslich den Bruch herbeiführen, werden je nach der augenblicklichen Zapfenstellung bald die, bald jene Stelle überanstrengen. Die Folge davon ist, dass der Riss den ganzen Umfang des Zapfens überzieht. Brüche, ähnlich dem in Abbildung 6 dargestellten, werden z. B. mit dem Krupp'schen Dauererschlagwerk erhalten, bei dem der Probestab durch Stösse

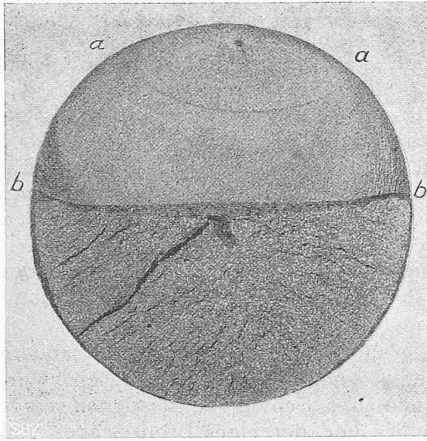


Abb. 3. Zweifache Vergrößerung.

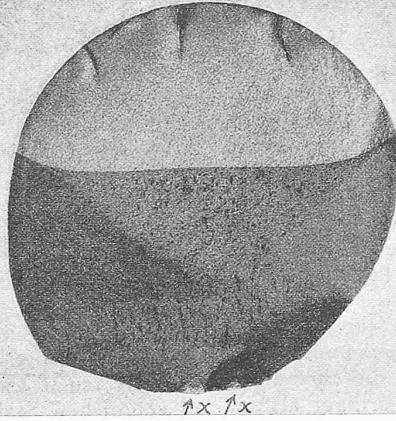


Abb. 4. Zweifache Vergrößerung.

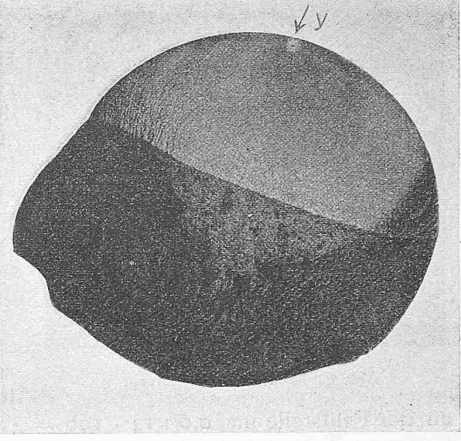


Abb. 7. Zweifache Vergrößerung.

Werdermaschine wurden dann neben dem Hauptschwingungsbruch auch die kleinen Einrisse mit freigelegt. So zeigt Abbildung 4 ein Bild mit einem grossen Schwingungsbruch oben und mit mehreren kleinen Schwingungsbrüchen unten (Stellen x). Die kleinen Schwingungsbrüche lassen erkennen, auf welche Weise ein Schwingungsbruch ins Innere des Materials vordringt: Er hat zuerst die Form eines Halbkreises mit der schadhafte Stelle als Mittelpunkt. Mit grösserem Anwachsen verflacht sich die Begrenzungskurve; sie geht schliesslich etwa in eine gerade Linie über, wenn der Schwingungsbruch die Hälfte der Querschnittfläche erreicht hat.

Wir wollen auch hier wieder die Nutzenanwendung für die Praxis suchen: Wenn ein Maschinenteil durch wechselnde Belastung entzwei geht, werden wir ebenfalls einen von der Oberfläche ausgehenden halbkreisförmigen Bruch zu erwarten haben. Als Beispiel sei auf Abbildung 5 verwiesen, die den Bruch eines Kesselbleches zeigt. Das Kesselblech, das zu einer Dampfspeicher-Lokomotive gehörte, ist beim jedesmaligen Aufladen der Lokomotive belastet und beim Entladen entlastet worden. Der Kessel wurde jeden Tag mehrmals geladen und leergefahren. Nach mehrjährigem Betrieb ist er auseinandergefliegen, wobei die Bruchstücke die halbkreisförmigen Schwingungsbrüche der Abb. 5 (Stellen x) erkennen liessen. Die Zerstörung ist also auch hier durch wechselnde Beanspruchung erfolgt und von einer schadhafte Stelle der Oberfläche ausgegangen. Der Schwingungsbruch hat sich nach dem Innern zu halbkreisförmig ausgebreitet, bis das Material so geschwächt war, dass die Bruchfestigkeit überschritten wurde. Dann ist das Blech plötzlich im ganzen aufgerissen.

Schwingungsbrüche bilden sich aber nur dann halbkreisförmig von einer Stelle nach dem Innern zu aus, wenn die Ueberanstrengung des Materials ähnlich ist, wie beim vorliegenden Versuch, d. h. wenn das Material auf ein grösseres Gebiet in einer sich oftmals wiederholenden Weise überlastet wird. Wenn dagegen ein Bruch an einer Spindel, Welle usw. nach mehrjährigem Betrieb auftritt, so sieht der Dauerbruch auch oft wesentlich anders aus als die Abb. 3 und 4 erkennen lassen: es hat sich oft ein ringförmiger Einriss gebildet, der rings um den Zapfen herumläuft

immer wieder an anderen Stellen des gefährdeten Querschnitts überanstrengt wird.

#### *Fortschrittsgeschwindigkeit des Schwingungsbruches.*

Solange der Einriss noch klein ist, schreitet der Bruch langsam voran. Mit grösser werdendem Einriss wächst dann auch die Fortschrittsgeschwindigkeit. Im vorausgehenden ist erwähnt, dass mitunter die Ausbildung eines Bruches für einige Stunden unterbrochen worden ist und dass sich dabei eine scharf abgezeichnete Linie wie a-a in Abbildung 3 gebildet hat. Da der Drehzählerstand zur Zeit der Unterbrechung und der zur Zeit der Beendigung des Versuches aufgeschrieben werden konnte, war leicht festzustellen, wieviele Umdrehungen, (d. h. wieviele Belastungswechsel) nötig waren, um den Schwingungsbruch von der Linie a-a bis zur Linie b-b (Abb. 3) vorzutreiben. In Abbildung 3 waren z. B. 10,8 Mill. Umdrehungen mit ungeänderter Belastung verstrichen, bis der Schwingungsbruch die Linie a-a erreicht hatte. Nach weiteren 5400 Umdrehungen war der Bruch schon bis an die Linie b-b fortgeschritten. Aeusserlich macht sich die Fortschrittsgeschwindigkeit dadurch bemerkbar, dass die Korngrösse umso feiner ist und das Bruchbild einen umso sammtartigen Eindruck macht, je langsamer der Bruch voranschreitet. So hatte z. B. ein Bruch, der erst nach 14 Millionen Umdrehungen mit gleicher Last sichtbar wurde, namentlich an den Ausgangsstellen ein äusserst feinkörniges Gefüge. Die Zahlen zeigen im übrigen, dass die in der Literatur oft vertretene Ansicht, als ob Haltbarkeit bei 1 Million Belastungswechsel gleichbedeutend sei mit dauernder Haltbarkeit, nicht zutrifft.

#### *Materialfehler.*

Es ist bekannt, dass Ungleichheiten in der äussern Form, wie zum Beispiel scharfe Uebergänge, Anbohrungen, Oberflächenbeschädigungen, auf die Festigkeit eines Maschinenteils, der wechselnder Beanspruchung ausgesetzt ist, einen ungünstigen Einfluss ausüben. In welchem Masse aber die Haltbarkeit durch innere Ungleichheiten — also Materialfehler — beeinträchtigt wird, darüber sind noch keine Versuche angestellt worden. Von vornherein ist ja klar, dass grobe Fehlstellen, z. B. Gussblasen, durch die der Querschnitt wesentlich verringert wird, die Festigkeit

des Stückes stark erniedrigen werden. Dass aber auch kleine Fehlstellen, die auf den Querschnitt so gut wie keinen Einfluss haben, und die deshalb die Festigkeit des Stückes bei *einmaligem* Abreissen nicht beeinträchtigen, die Schwingungsfestigkeit wesentlich erniedrigen können, ist bei den Versuchen festgestellt worden. Es handelt sich um zwei Stäbe, bei denen der Schwingungsbruch nicht von der Oberfläche, sondern beide Male von einer kleinen Fehlstelle im Innern des Materials ausgegangen ist.

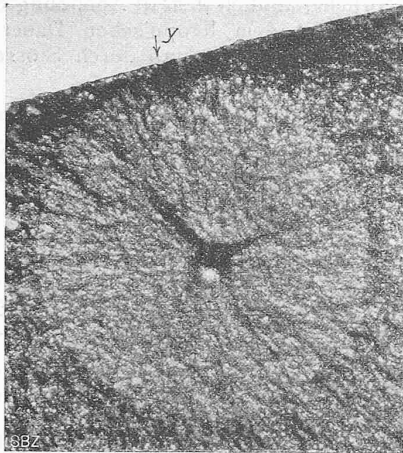


Abb. 8. 50-fache Vergrößerung.

Der erste Bruch mit der Fehlstelle ist in Abbildung 7 (Stelle y) und in 50facher Vergrößerung in Abbildung 8 dargestellt. Die Fehlstelle hatte einen Durchmesser von etwa 0,1 mm und war 0,6 mm von der zylindrischen Oberfläche entfernt. Da der Halbmesser des Stabes 14 mm betrug, war bei linearer Spannungsverteilung die Spannung an der Fehlstelle um  $0,6 : 14 \cdot 100 = 4\%$  geringer als am Umfang. Trotzdem ist der Riss nicht vom Umfang sondern von der Fehlstelle, die vollständig von gesundem Material umschlossen war, ausgegangen. Er ist dann sehr langsam, wie die feinkörnige Struktur erkennen lässt, etwa auf einer Kreisfläche mit der Fehlstelle als Mittelpunkt fortgeschritten, bis seine äusseren Ausläufer den Stabumfang erreicht hatten. Dann ist die Randpartie eingebrochen und der Riss ist rascher vorgedrungen. Das Gebiet mit der geringen Rissfortschrittsgeschwindigkeit in der Umgebung der Fehlstelle ist in Abb. 8 durch die hellere Kreisfläche mit etwa 50 mm Durchmesser hervorgehoben. Es scheint eine Eigentümlichkeit der Schwingungsbrüche, die von innern Fehlstellen ausgehen, zu sein, dass sie langsam fortschreiten.

Der zweite Bruch, der von einer Fehlstelle ausgegangen ist, ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Fehlstelle hatte hier etwa 0,4 mm Durchmesser und sie lag 1,4 mm von der Oberfläche entfernt. Die Spannung in der Umgebung der Fehlstelle war also bei linearer Spannungsverteilung schon um 10% geringer als am Umfang. Da der Riss von der Fehlstelle, nicht von einer um 10% höher beanspruchten Stelle des Umfangs, ausgegangen ist, ist die Erniedrigung der Festigkeit des Materials infolge der 0,4 mm ausgedehnten Fehlstelle mehr als 10%.

#### Die Schwingungsfestigkeit verschiedener Materialsorten.<sup>1)</sup>

Die Schwingungsfestigkeit ist massgebend für die Haltbarkeit vieler Maschinenteile. Es wäre vor allem wichtig, eine Beziehung zwischen Schwingungsfestigkeit und den beim gewöhnlichen Zerreißversuch feststellbaren Grössen (Proportionalitätsgrenze, Elastizitätsgrenze, Bruchfestigkeit) aufzustellen. Eine feststehende Beziehung konnte nicht ermittelt werden. Nur soviel war sicher, dass die Schwingungsfestigkeit unterhalb der Elastizitätsgrenze und der Proportionalitätsgrenze, die im übrigen für die meisten Materialien nicht streng festgestellt werden können, gelegen war. Auf alle Fälle erwies sich die in der Praxis vielfach verbreitete Ansicht, die Schwingungsfestigkeit stehe in einem bestimmten Verhältnis  $\nu$  zur Bruchfestigkeit — gewöhnlich wird  $\nu = 1/3$  angegeben — als nicht stichhaltig. Die Schwingungsfestigkeit scheint im Gegenteil mehr von der Elastizitätsgrenze als von der Bruchfestigkeit abzuhängen.

<sup>1)</sup> Im Festigkeitslaboratorium der Techn. Hochschule Braunschweig wird die Schwingungsfestigkeit eines Baustoffs auf Antrag gegen Erstattung der Versuchskosten festgestellt.

Die Versuche wurden vor allem an Stäben aus Edelstahl verschiedener Legierung — reine Kohlenstoffstähle, Siliziumstähle, Nickelstähle, Chrom-Nickelstähle — vorgenommen. Die Versuchsergebnisse im einzelnen werden in der genannten Dissertation von Herrn Dohms gebracht werden. Zusammenfassend können für die Konstruktionsstähle etwa folgende Zahlenwerte genannt werden: Bruchfestigkeit 70–85 kg/mm<sup>2</sup>, Bruchdehnung 11–16%, Elastizitätsgrenze 55–72 kg/mm<sup>2</sup> und zugehörige Schwingungsfestigkeit 36 bis 44 kg/mm<sup>2</sup>. Das beste Ergebnis wurde bisher mit dem Konstruktionsstahl E 724 der Bergischen Stahlindustrie in Remscheid erhalten, der nach einer bestimmten Wärmebehandlung folgende Schwingungsbeanspruchungen ausgehalten hat: mit  $\sigma = 39$  kg/mm<sup>2</sup> 17,1 Mill., mit  $\sigma = 40$  kg/mm<sup>2</sup> 17,6 Mill., mit  $\sigma = 41$  kg/mm<sup>2</sup> 17,0 Mill., mit  $\sigma = 42$  kg/mm<sup>2</sup> 22,2 Mill., mit  $\sigma = 43$  kg/mm<sup>2</sup> 20,4 Mill., mit  $\sigma = 44$  kg/mm<sup>2</sup> 20,4 Mill. Umdrehungen. Nach der Erhöhung der Belastung auf  $\sigma = 45$  kg/mm<sup>2</sup> ist der Stab nach 17,8 Mill. Umdrehungen zu Bruch gegangen. Die Schwingungsfestigkeit für das Material liegt also nur wenig unter 45 kg/mm<sup>2</sup>, da die lange Zeit, die der Stab bis zum Einbrechen mit der Belastung von  $\sigma = 45$  kg/mm<sup>2</sup> gelaufen ist, darauf schliessen lässt, dass die Schwingungsfestigkeit nur wenig überschritten war. Für die gute Bewertung des Materials ist aber ausser dieser Zahl noch die Bruchdehnung massgebend.

Ausser den Edelstählen sind auch noch andere Materialien untersucht worden. Vor allem ist ein Vergleichsversuch zwischen der Schwingungsfestigkeit eines gewöhnlichen Stahlstabes und der eines Bronzestabes von etwa gleicher Festigkeit und Dehnung angestellt worden.

	Zerreißfestigkeit kg/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul kg/mm <sup>2</sup>	Bruchdehnung in %	Schwingungsfestigkeit kg/mm <sup>2</sup>	$\nu$
Edelstahlstab . . .	70–85	55–72	11–16	36–44,5	1 : 1,9
Stahlstab . . . . .	51	—	30	20	1 : 2,5
Bronzestab . . . . .	51	—	30	13	1 : 4

Die Tabelle zeigt, wie irrig es ist, aus den Ermittlungen, die mit dem Zerreißversuch gewonnen werden, auf die Festigkeit des Materials bei wechselnder Beanspruchung schliessen zu wollen. Denn Bruch-Festigkeit und -Dehnung sind für den Stahlstab und den Bronzestab etwa gleich gross. Bei Schwingungs-Beanspruchung

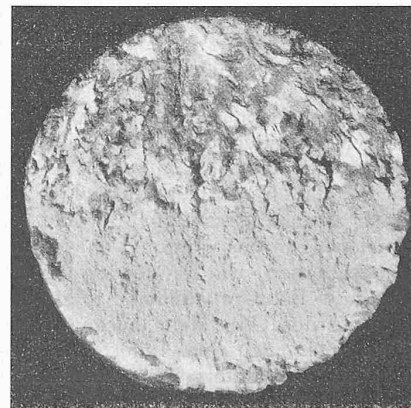


Abb. 9. Zweifache Vergrößerung.

hält dagegen der Bronzestab nur das 0,65fache dessen aus, was der Stahlstab vertragen kann. Besonders gross wird der Unterschied im Verhältnis  $\nu$  zwischen Schwingungsfestigkeit und Bruchfestigkeit, wenn man die Bronze mit Edelstahl vergleicht: Für jene ist dieses Verhältnis etwa 1:4, für Edelstahl dagegen bloss etwa 1:1,9. Das Aussehen des Schwingungsbruches gibt auch Aufschluss, warum die Bronze eine im Vergleich zur Bruchfestigkeit so niedrige Schwingungsfestigkeit hat. Die Bronze war, wie auch schon die Festigkeitszahlen erkennen lassen, von ganz vorzüglicher Qualität; sie war hergestellt von den Harburger Eisen- und Bronzewerken. Der Zerreißbruch (siehe Abb. 9 unten) zeigte ein vollkommen gleichmässiges und sehr feinkörniges Gefüge. Der Schwingungsbruch (Abb. 9 oben) lässt erkennen, dass im Material wirt



durcheinanderlaufende grobe Kristallflächen vorhanden sind. Der Zerreißbruch verläuft nicht längs dieser Flächen; beim Zerreißen werden die Kristalle zerstört. Für den Schwingungsbruch dagegen sind die Kristalle als Flächen kleinsten Widerstandes massgebend, längs denen der Bruch langsam fortschreiten kann. Um ein Material widerstandsfähig gegen Schwingungsbeanspruchung zu machen, ist es also wichtig, das Gefüge möglichst feinkörnig zu gestalten. Die im Verhältnis zur Bruchfestigkeit hohe Schwingungsfestigkeit bei Edelstahl wird vor allem dadurch hervorgerufen, dass bei der Herstellung des Edelstahl auf die Ausbildung eines möglichst feinkörnigen Gefüges besondere Sorgfalt verwendet wird.

### Die Transportanlagen zum Bau der Staumauer für das Barberine-Kraftwerk der S. B. B.

Von Ing. A. Oehler, Aarau.

(Schluss von Seite 80.)

#### III. Die Kranen.

Zum Ausheben des Mauerfundamentes wurden nach Erstellung der Aufzugsbahn E-H und der Montage-Luftseilbahn H-F über dem Staumauergebiet (Abb. 18 in letzter Nr.) ein Kabelkran und zwei Derrickkrane aufgestellt. Ihre Aufgabe besteht in der Hauptsache darin, das ausgebrochene, felsige Material zu heben und abseits zu deponieren, um es später beim Aufbetonieren der Mauer wieder in den flüssigen Beton zu versenken. Nebenbei werden die Krane auch für andere Transporte verwendet; so leistet beispielsweise der Kabelkran beim Auf- und Umstellen der nachstehend beschriebenen Gussbeton-Verteilanlage sehr gute Dienste. Die bestrichenen Flächen sind in Abbildung 19 durch strichpunktierte Linien gekennzeichnet.

Der Kabelkran (Abbildung 20) stammt von der Firma A. Bleichert & Cie. in Leipzig. Das Hubseil läuft über eine Laufkatze, die durch ein endloses Zugseil auf einem Tragseil hin und her gezogen werden kann. Das Tragseil hängt seinerseits an zwei Stützen, an einer festen Stütze mit

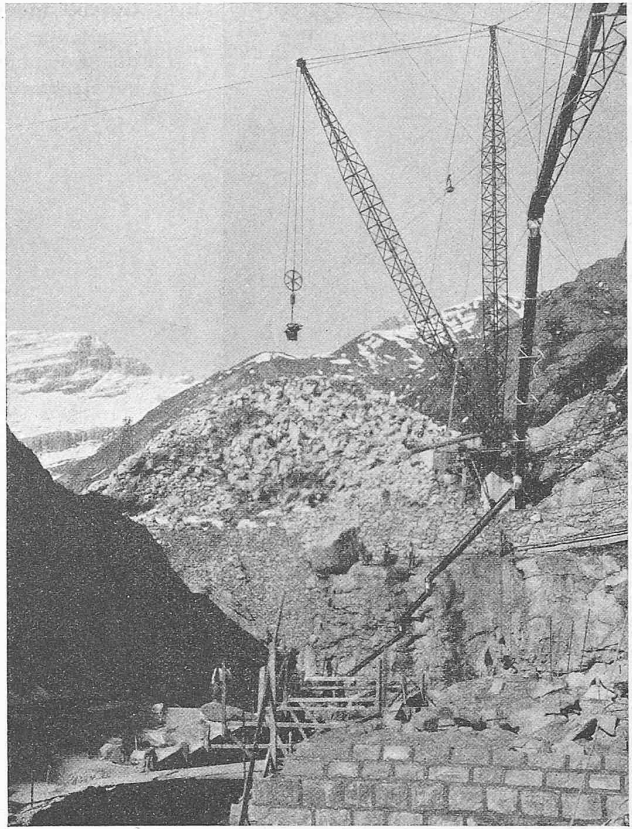


Abb. 21. Derrick-Kran an der Staumauer-Baustelle.

drehbarem Turmknopf und einer auf einem Kreissegment verschiebbaren Stütze. Ausser dem Verschiebemechanismus birgt die fahrbare Stütze auch die Winden für das Hub- und Fahrseil in sich, sodass der ganze Apparat von einem

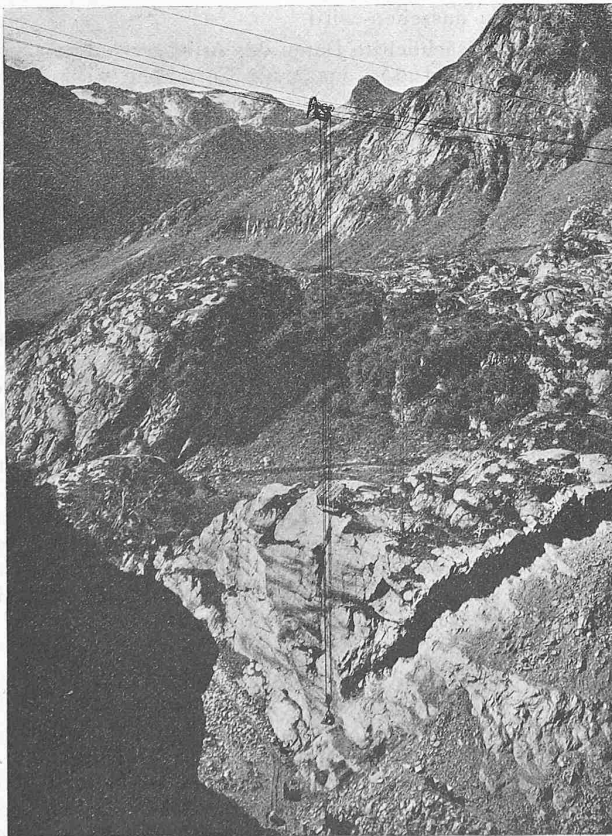


Abb. 20. Kabelkran über die Staumauer-Baustelle.

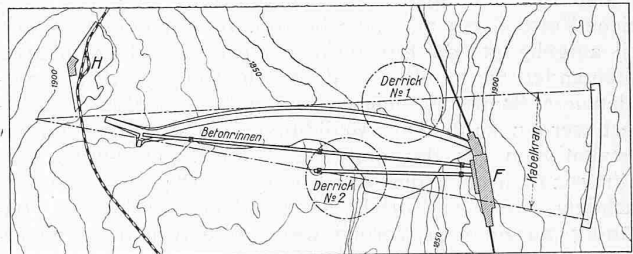


Abb. 19. Situationsplan der Staumauer-Baustelle mit Angabe der vom Kabelkran und den Derrick-Kranen bestrichenen Flächen. — 1:5000.

Punkte aus bedient werden kann. Die Daten dieses Krans sind: Spannweite 410 m, Hubhöhe 55 m im Mittel und 120 m im Maximum, Tragkraft 5,5 t, Hubgeschwindigkeit 0,75 m/sek, Fahrgeschwindigkeit der Laufkatze 3,0 m/sek, Verschiebegeschwindigkeit der beweglichen Stütze 0,05 m/sek.

Die Derrick-Krane (Abbildung 21), erstellt von der Firma A. Buss & Cie. A.-G. in Basel, sind Drehkrane mit einer senkrechten Stütze in Eisenkonstruktion, die mit Drahtseilen abgespannt ist, und einem wippbaren Ausleger, ebenfalls in Eisenkonstruktion. Ihre maximale Ausladung beträgt 28 m, ihre Tragkraft 3 t bei 1,0 m/sek Hubgeschwindigkeit.

#### IV. Die Gussbeton-Verteilanlage.

Die Staumauer wird in Gussbeton erstellt. Für die Betonverteilung wählte der Unternehmer das amerikanische System Lakewood, das in einem früheren Aufsatz der „Schweizerischen Bauzeitung“ bereits beschrieben wurde (Band 68, Heft 27, Seite 328 vom 31. Dezember 1921). Die an der Barberine getroffene Disposition ist aus den Abbildungen 21 bis 25 ersichtlich. Die Anlage, deren Erstellung der „Allied Machinery Company of America“, Zweignieder-