

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	66 (1948)
Heft:	16
Artikel:	Ueber die physikalischen Grundlagen des Ultraschalles und seine Anwendung im Materialprüfwenen
Autor:	Baud, R.V.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-56706

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: 13.01.2026

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

Ueber die physikalischen Grundlagen des Ultraschalles und seine Anwendung im Materialprüfungs wesen

DK 620.179.16

(Schluss von Seite 190)

Von Dr. R. V. BAUD, Abteilungschef, Vorsteher des Laboratoriums für zerstörungsfreie Werkstoffprüfung II an der EMPA, Zürich

VII. Ultraschallsender und -Empfänger

Zur Erzeugung von Ultraschallwellen kommen heute für Frequenzen bis maximal etwa 150 000 Hz das magnetostruktive und für Frequenzen bis etwa 100 000 000 Hz das piezoelektrische Verfahren in Frage. Das erste beruht auf der Tatsache, dass ein ferromagnetischer Stab, wenn er in ein periodisch veränderliches, magnetisches Wechselfeld gebracht wird, sich mit der selben Frequenz ausdehnt und zusammenzieht. Ähnlich verhält es sich mit Quarzscheiben¹⁰⁾ von der Dicke d , die sich periodisch um den Betrag Δd ausdehnen und um den gleichen Betrag zusammenziehen, sofern man sie in ein elektrisches Wechselfeld von der Frequenz f_E bringt. Die Dickenänderung Δd der Quarzscheiben ist besonders dann verhältnismässig gross, wenn f_E mit der Eigenfrequenz der Scheibe:

$$(26) \quad f_Q = \frac{285\,000}{d} \quad (f_Q \text{ in Hz}, d \text{ in cm})$$

oder einer höheren, ungeraden Harmonischen ($3f_Q, 5f_Q, 7f_Q$ usw.) der Grundfrequenz übereinstimmt. Wird umgekehrt die Scheibe in Richtung ihrer Dicke zum mechanischen Schwingen — vorteilhafterweise mit einer der genannten Frequenzen — gebracht, so entsteht auf den in der Regel metallisierten Oberflächen O_1, O_2 , Bild 6b, eine Wechselspannung gleicher Frequenz f , welche Spannung — verstärkt und eventuell gleichgerichtet — zur Anzeige gebracht werden kann. Auf diese Weise können also Quarzscheiben sowohl als Sender, wie auch als Empfänger dienen¹¹⁾.

In zeitlicher Beziehung ist zu unterscheiden, ob die vom Sendequarz emittierte Schallstrahlung ununterbrochen, oder in Form kurzer Impulse erfolgt. Im ersten Fall spricht man von kontinuierlicher Schallstrahlung, zu deren Empfang und Anzeige offenbar irgend ein elektrisches Anzeigegerät (Voltmeter) genügt; im zweiten Fall hat man es mit Impuls-Schallstrahlung zu tun, zu deren Empfang und Anzeige besondere Hilfsapparate u. U. zweckmässig sind. Diesbezüglich ist vor allem der Elektronenstrahlzosillograph zu erwähnen, der im wesentlichen aus einer Braun'schen Röhre (Bild 9) besteht, die sich der vernachlässigbar geringen Trägheit der die Anzeige bewirkenden Elektronen wegen besonders gut zur Aufzeichnung raschster Vorgänge eignet. Im Ruhezustand bringt

¹⁰⁾ Quarz (Bergkristall) gehört zu einer Untergruppe (Tetartoedrie) des hexagonalen Systems. In elektrischer Beziehung weist er drei elektrische Achsen auf, welche die optische Hauptsymmetriechse senkrecht schneidend, durch zwei gegenüberliegende Kanten des Kristalles gehen. Quarzscheiben für elektro-akustische Zwecke sind senkrecht zu einer der drei elektrischen Achsen aus Bergkristall herausgeschnitten.

¹¹⁾ Die beiden erwähnten, für Ultraschallerzeugung so ausserordentlich wichtigen Phänomene wurden schon verhältnismässig früh entdeckt, so die Magnetostriktion durch Joule im Jahre 1847 und die Piezoelektrizität durch die Brüder Curie im Jahre 1880. Die beim Quarzempfänger auftretende Erscheinung (Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische) wird als direkter Piezoeffekt, der beim Quarzsender auftretende Vorgang (Umwandlung von elektrischer Energie in mechanische) dagegen als inverser oder reziproker Piezoeffekt bezeichnet.

der Elektronenstrahl den Mittelpunkt des Leuchtschirmes zum Aufleuchten. Mittels einer an das horizontale Ablenkplattenpaar HH angelegten elektrischen Spannung, der sogen. Kippspannung, wird erreicht, dass der Lichtpunkt P mit grosser Geschwindigkeit (V_P) von links nach rechts, d. h. in Richtung A → E, wandert, rechts in E angekommen nach links auf den Punkt A zurückspringt, wieder nach rechts wandert usw., wobei sich der Vorgang so schnell wiederholt, dass das Auge das stehende Bild der horizontalen Geraden AE wahrnimmt, die bei den zu untersuchenden Vorgängen somit als Zeittaxe benutzt werden kann. Mit einem vertikalen Ablenkplattenpaar VV wird eine vertikale Ablenkung dadurch erzielt, dass man an VV die zu untersuchende, z. B. im Empfangsquarz erzeugte Spannung anlegt. Auf diese Weise gelingt es, rasch variierte, elektrische Vorgänge als Funktion der Zeit darzustellen.

Bei dem in den Bildern 14 und 15 dargestellten Ultraschallgerät ist sowohl der zur Erzeugung des Wechselfeldes benötigte Hochfrequenzgenerator, als auch der Empfängerquarz über ein und den selben Verstärker mit dem vertikalen Ablenkplattenpaar VV (Bild 9) verbunden. Die erste dieser beiden Verbindungen dient dazu, die in Intervallen von $1/50$ s erfolgende Spannungsimpulsabgabe des Hochfrequenzgenerators an den Sendequarz in Form einer ein wenig rechts vom Punkt A beginnenden, vertikalen Zacke zu registrieren (Anfangssignal A_S , vgl. Bild 11 und 17a, b). Mit der zweiten Verbindung wird die Ankunft des Impulses im Empfängerquarz nach Durchreihen der Strecke S (Länge des Schallweges) durch eine weitere Vertikalzacke im Punkt X angezeigt. Durch diese Anordnung wird also nicht nur die Schallfortpflanzung mit der Wanderung des Lichtpunktes P auf dem Schirm des Elektronenstrahlzosillographen synchronisiert, sondern Impulsabgabe und -Empfang werden außerdem als vertikale Zacken auf dem Schirm registriert. Die Geschwindigkeit im Schalleiter beträgt hierbei $V_{US} = S/T$ (T = Laufzeit des Schallimpulses) und diejenige für den Lichtpunkt $V_P = L/T$ (L = Weg des Punktes P auf dem Leuchtschirm, T = dazugehörige Laufzeit); demnach:

$$(27) \quad \frac{L}{S} = \frac{V_P}{V_{US}}$$

Soll beispielsweise die Ankunft eines Impulses auf dem Leuchtschirm im Abstand $L = 10$ cm vom Anfangssignal erfolgen und beträgt der im Schalleiter zurückgelegte Weg S ebenfalls 10 cm, so muss die Geschwindigkeit V_P des Lichtpunktes P gerade gleich der Schallgeschwindigkeit V_{US} des Schalleiters sein, d. h. bei Stahl etwa 5800 m/s. Ist S dagegen grösser als 10 cm, so muss V_P entsprechend kleiner, nämlich gemäss Formel (27) gewählt werden, damit wiederum die zweite Zacke im Abstand $L = 10$ cm erscheint; dies geschieht durch Umschalten des Elektronenstrahlzosillographen auf einen andern, jeweils passenden Geschwindigkeitsbereich. Hierdurch lässt sich immer eine optimale Anpassung des Lichtweges L an die Schallweglänge S erzielen.

VIII. Strukturprüfung¹²⁾

Die Prüfung eines Stahlstückes z. B. auf Risse (Makrostrukturprüfung) beruht auf der logischen Anwendung der oben beschriebenen Grundgesetze. An Hand von prinzipiellen Gegenüberstellungen (ohne Riss — mit Riss, lange Wellen — kurze Wellen, Durchlässigkeitsverfahren — Echoverfahren), Bildern 10 und 11, soll einerseits nochmals die Notwendigkeit der Anwendung von Ultraschallwellen, anderseits die Unterschiede der beiden Verfahren illustriert werden.

a) Durchlässigkeitsverfahren, Bilder 10, 12 und 13. Bei dem von der EMPA für gewisse Sonderzwecke bevorzugten Durchlässigkeitsverfahren (kontinuierliche oder Impulsstrahlung) liegen sich Sendequarz S und Empfängerquarz E am Prüf-

¹²⁾ Siehe auch R. V. Baud «Ultraschall im Materialprüfungs wesen», Beilage Technik der Neuen Zürcher Zeitung Nr. 1286 (27), 2. Juli 1947. Dieser Artikel enthält einen historischen Überblick über die Entwicklung der zerstörungsfreien Materialprüfung mittels Ultraschall in der Schweiz.

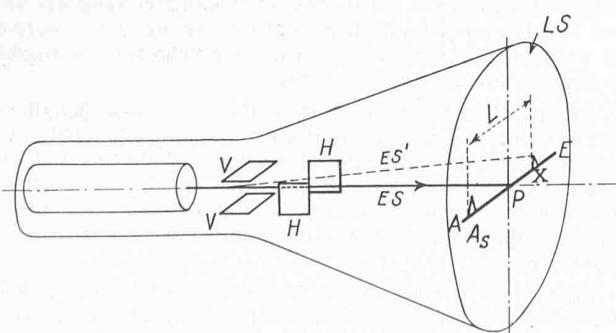


Bild 9. Schema der Braun'schen Röhre. LS Mit fluoreszierender Masse belegter Leuchtschirm, ES Elektronenstrahl in Ruhelage, ES' id. in abgelenkter Lage, HH Horizontales Ablenkplattenpaar, VV Vertikales Ablenkplattenpaar. — AE Quasi-stationäres Lichtbild des wandernden Lichtpunktes P, AS Anfangssignal, X Empfangssignal, L dem Schallweg S entsprechender Lichtweg

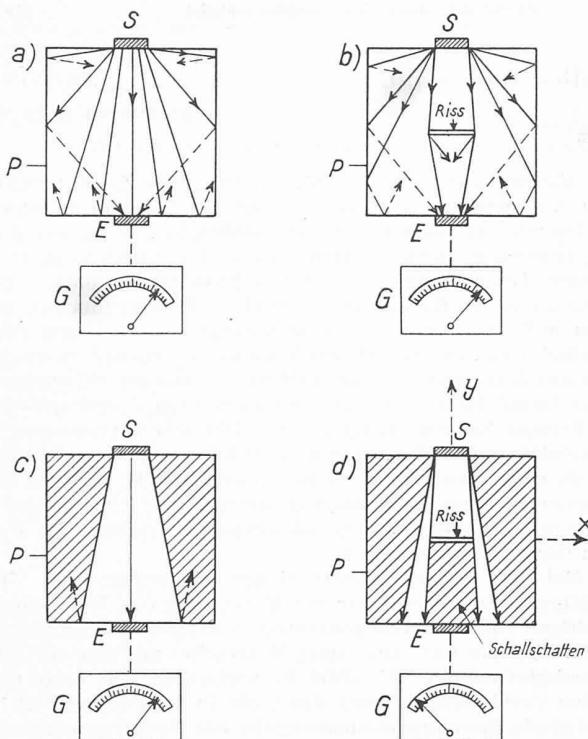


Bild 10. Rissprüfung nach dem Durchlässigkeitsverfahren.
P Prüfling, S Sender, E Empfänger, G Galvanometer oder Voltmeter.
Bild 10a u. b: f klein, λ_L gross. Bild 10c u. d: f gross, λ_L klein

ling P einander gegenüber. Lange Wellen (z. B. $f = 435$ Hz, $\lambda_{Stahl} \approx 11,5$ m) würden allein schon wegen den auftretenden Reflexionen an den Seitenwänden auf den Empfänger E auftreffen und so am Anzeigegerät G einen Ausschlag ergeben, vgl. Bilder 10a und 10b, gleichgültig also, ob ein Riss vorhanden ist oder nicht; außerdem würden lange Wellen um den Riss gebeugt und so doch den Empfänger E erreichen (kein Schallschatten!). Lange Wellen sind somit für die Rissprüfung gänzlich unbrauchbar. Anders liegen die Verhältnisse bei der Benützung von Ultraschallwellen (z. B. $f = 2,5 \cdot 10^6$ Hz, $\lambda_{Stahl} \approx 2,3$ mm). Reflexionen an den Seitenwänden kommen nun wegen der gerichteten Abstrahlung nicht mehr, oder seltener, bzw. nur sekundär, vor. Ohne Riss erhält man somit nur noch deswegen einen Ausschlag, weil der Empfänger im Abstrahlungskegel des Senders liegt, vgl. Bild 10c, mit Riss dagegen kommt es zu keinem Ausschlag mehr, weil in diesem Fall der Empfänger im «Schallschatten» des Risses liegt*). Durch gleichzeitiges Verschieben von Sender und Empfänger ist eine Fehlerlokalisierung in der Richtung senkrecht zur Strahlenrichtung möglich (x -Richtung), leider aber nicht in der Strahlenrichtung selbst (y -Richtung, Bild 10d).

Das Durchlässigkeitsverfahren ist keineswegs auf Makrostrukturprüfungen beschränkt. Es zeigt sich nämlich, dass die beschriebene Anordnung nichts anderes als eine Methode zur Bestimmung der Absorption darstellt, die ihrerseits weitgehend von der Mikrostruktur abhängt. Die Tatsache, dass das Durchlässigkeitsverfahren einen quantitativen Befund ermöglicht, ist bei vielen Anwendungen der Strukturprüfung besonders hoch einzuschätzen.

b) Echoverfahren, Bilder 11, 14 bis 17. Beim normalen Echoverfahren, das Impulsstrahlung erfordert, sind Senderquarz S und Empfängerquarz E nebeneinander auf der gleichen Fläche angeordnet. Bei langen Wellen (z. B. $f = 435$ Hz, $\lambda_{Stahl} \approx 11,5$ m) erreichen aus den unter a) dieses Abschnittes geschilderten Gründen sehr viele Strahlen den Empfängerquarz E, gleichgültig ob ein Riss vorhanden ist oder nicht, vgl. Bilder 11a und 11b. Im Elektronenstrahlzosillogramm würden sich deshalb derart viele Vertikalzacken ungeordnet unmittelbar aneinanderreihen, dass eine Rissdiagnose ganz unmöglich wäre. Anders liegen die Verhältnisse wiederum bei Benützung von Ultraschallwellen (z. B. $f = 2,5 \cdot 10^6$ Hz, $\lambda_{Stahl} \approx 2,3$ mm): Ohne Riss ergibt sich im Ultraschalldia-

* Siehe Nachsatz, Seite 219

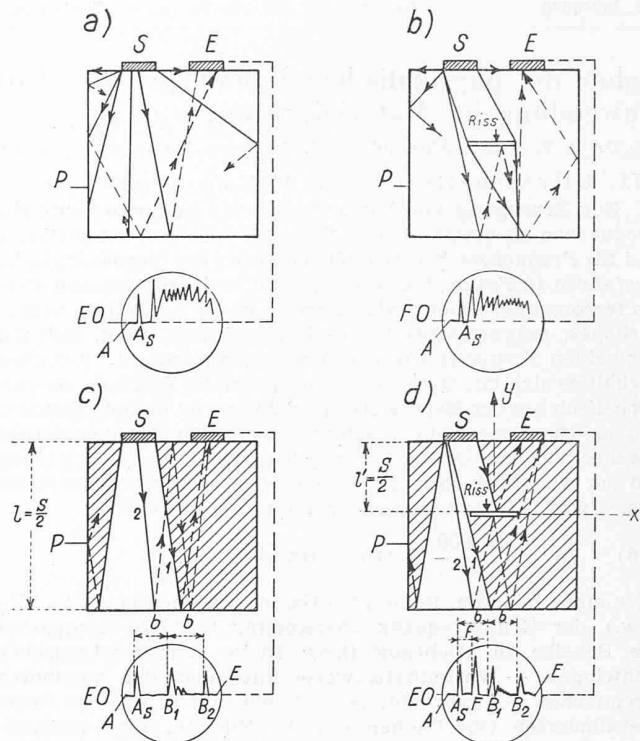


Bild 11. Rissprüfung nach dem Echoverfahren.
P Prüfling, S Sender, E Empfänger, EO Elektronenstrahlzosillograph, A_S Anfangssignal, B_1, B_2 Bodenecho, F Fehlerecho.
Bild 11a u. b: f klein, λ_L gross. Bild 11c u. d: f gross, λ_L klein

gramm, sofern der Lichtweg L seiner besonderen Bedeutung wegen jetzt eine besondere Bezeichnung b erhält und in Anbetracht, dass der Schallweg S jetzt gleich $2l$ (vgl. Bild 11) ist, im Abstand:

$$(27a) \quad b = S \frac{V_P}{V_{US}} = 2l \frac{V_P}{V_{US}}$$

eine Zacke, die als erstes Bodenecho B_1 bezeichnet wird, vgl. Bild 11c; ihr folgen je nach Wahl von V_P eventuell noch andere Zacken, so im Abstand $2b$ die weitere Zacke B_2 (zweites Bodenecho). Mit Riss ergibt sich eine Zacke*) bereits zwischen A_S und B_1 im Abstand $f < b$, vgl. Bild 11d, die als Fehlerecho F bezeichnet wird, wobei:

$$(27b) \quad f = 2l \frac{V_P}{V_{US}}$$

Auf diese Weise ist es möglich, einen Fehler nicht nur in x -, sondern auch in y -Richtung zu lokalisieren. Dagegen dürfen aus der Zackenhöhe des Fehlerechos leider nur mit allergrösster Vorsicht quantitative Schlüsse gezogen werden.

Auch das Echoverfahren bleibt keineswegs auf Anwendungen im Sinne der Makrostrukturprüfung beschränkt. So wird beispielsweise aus den USA über Korngrößen-, d. h. Mikrostrukturuntersuchungen bei Messing berichtet. Als interessante Einzelheit sei in diesem Zusammenhang erwähnt, dass bei den amerikanischen Geräten nur ein Quarz verwendet wird, der auf Grund ausgeklügelter Schaltungen zugleich als Sender und Empfänger dient.

c) Schallsichtverfahren. Eine Variation des Schallempfanges stellt das von Pohlman entwickelte «Schallsichtverfahren»¹³⁾ dar, das ebenfalls eine einwandfreie Lokalisierung sowohl in x - als auch in y -Richtung ermöglichen soll und das besonders auch bei der Ultraschallprüfung ganz kleiner Stücke, kleiner und beliebig orientierter Fehler Vorteile zu bieten scheint.

Nach den bisherigen Darlegungen verfügt die heutige Ultraschall-Materialprüfungstechnik bereits über drei grundsätzliche Prüfverfahren, so dass weitgehende Anpassungsmöglichkeiten an den jeweiligen Fall bestehen.

¹³⁾ Näheres hierüber ist der auf S. 208 der letzten Nr. erschienenen Berichterstattung des Verfassers über den am 24. Januar 1948 vor dem SVMT gehaltenen Vortrag «Ultraschallverfahren und seine Anwendungen im Materialprüfungswesen und in der Medizin», Referent Dr. Pohlman, zu entnehmen.

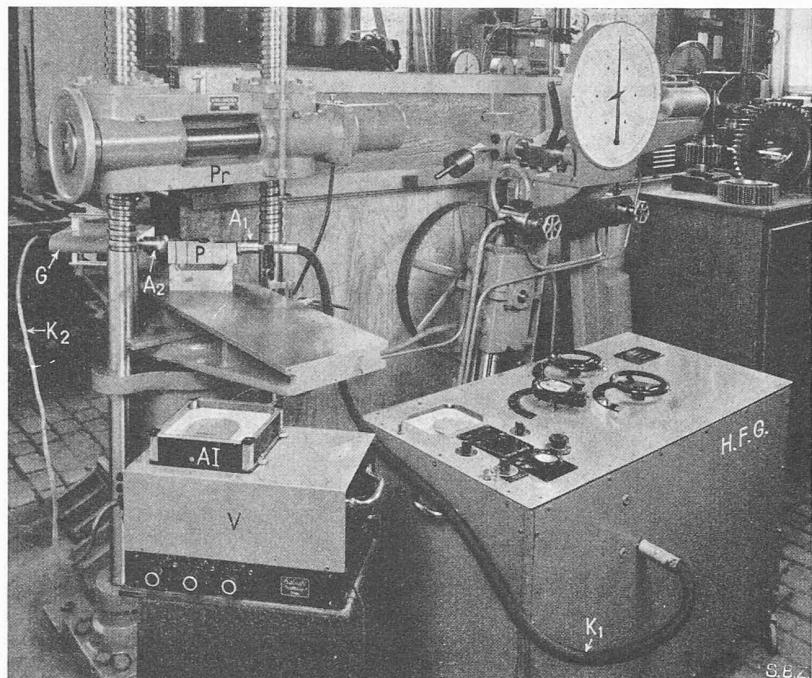


Bild 12. Das an der Eidg. Materialprüfungs- und Versuchsanstalt in Zürich in Zusammenarbeit mit der Firma Habicht (Schaffhausen) entwickelte Ultraschallgerät (zur Zeit nur mit kontinuierlicher Schallstrahlung), bei der Prüfung eines in einer Presse (Pr) befindlichen Prüflings (P). Im Vordergrund rechts befindet sich der fahrbare Hochfrequenzgenerator (H.F.G.) von etwa 100 Watt Hochfrequenzleistung und einem Frequenzbereich von 20 000 bis 10 000 000 Hz, mit Frequenzmodulation. Von ihm führt das dickere der beiden abgeschirmten Kabel (K₁) zu dem vorn im Ankopplungskopf (A₁) befindlichen Sendequarz. Links des Prüflings (P) befindet sich ein zweiter Ankopplungskopf (A₂) mit dem Empfängerquarz. Dieser Kopf ist direkt an einem Gehäuse (G) angebracht, in welchem sich ein Vorverstärker und ein Doppelgleichrichter befinden. Das Gehäuse (G) ist mit dem dünneren der beiden Kabel (K₂) mit dem Hauptverstärker (V) verbunden, auf dem sich das Anzeigegerät (AI) befindet.

IX. Bemerkungen hinsichtlich a) der Ankopplung, b) des eingebetteten Mediums und c) des eventuellen vorhandenen Spannungszustandes

a) Bisher wurde einfachheitshalber nichts näheres über die Ankopplung der Quarze ausgeführt. Brächte man die Quarze in «direkten» Kontakt mit dem Prüfling, so hätte dies einige sehr wesentliche Nachteile zur Folge (Beschädigung der Quarze bzw. deren Metallbeläge, ungenügende In-

X. Aufbau und Anwendungen der an der EMPA vorhandenen Prüfgeräte

a) Der Aufbau der beiden z. Zt. an der EMPA vorhandenen Prüfgeräte ist im Text zu den Bildern 12 bis 15 beschrieben.

b) Um die in Abschnitt IX unter b) und c) aufgeworfenen Fragen abzuklären, wurde mit dem Durchlässigkeit-Ultraschallgerät im grossen Maschinensaal der EMPA ein Laboratoriumsversuch ausgeführt, siehe Bilder 12 und 13. Ueber die Ergebnisse dieser Prüfung gibt Tabelle 3 Auskunft¹⁴⁾. Darnach lässt — wie vorausgesessen — ein mit Oel gefüllter Riss mehr Ultraschall durch, als ein mit Luft gefüllter. Zunehmende Zugbeanspruchung übt keinen Einfluss auf die Schall-durchlässigkeit aus, dagegen nimmt diese mit steigendem Druck beträchtlich zu. Dies führt auf den Gedanken, ganz allgemein bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung die Fehlererkennbarkeit dadurch zu erhöhen, dass man — selbstverständlich in zulässigen Grenzen — Prüflinge in mechanisch beanspruchtem Zustand untersucht. Bei Fahrzeugachsen ist diese Möglichkeit direkt durch das Eigengewicht des Fahrzeugs gegeben. Es wurde dementsprechend auf Grund der erwähnten Versuche bei der Untersuchung von Lokomotivachsen, vgl. Absatz d) dieses Abschnittes, angeordnet, die Achsen immer in mehreren Stellungen zu prüfen, damit eventuell vorhandene Ermüdungsrisse wenigstens bei einer Stellung sicher in die Zugzone zu liegen kommen. Bei Fahrzeugen geschieht dies in einfacher Weise durch Verschieben um eine entsprechende Strecke.

c) Als Beispiel der Anwendung des Echoverfahrens sei die Untersuchung am Erreger- und am Kupplungsteil des Rotors eines Turbogenerators erwähnt, Bild 14. Vom Auftraggeber wurde ein generelles Urteil über die strukturelle Qualität dieser Teile gewünscht, die wegen vermuteter Fehler (besonders im Kerngebiet) bisher nicht weiterverarbeitet wurden. Auf Grund der Versuche in der Werkstätte

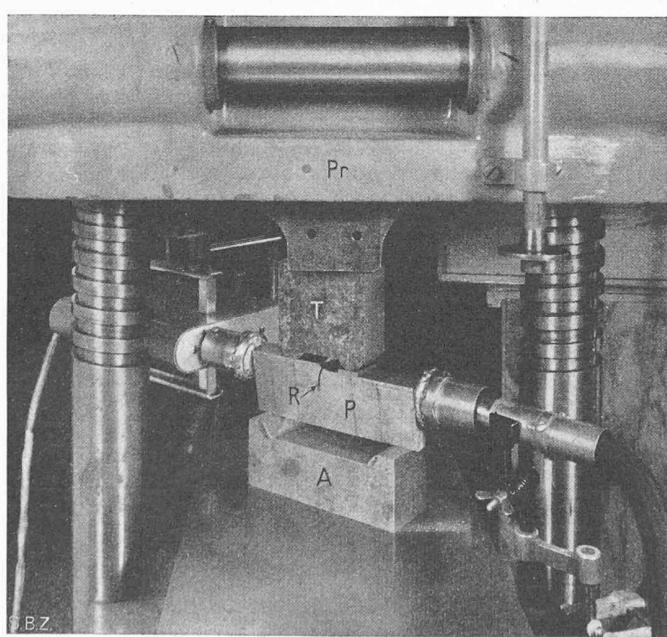


Bild 13. Detail zu Bild 12. Von der Presse (Pr) ist nur noch der mittlere Teil sichtbar. Mittels Auflage (A) und Pressteil (T) wird der Prüfling (P) auf Biegung beansprucht. Der Riss (R) befindet sich hierbei in der Druckzone.

¹⁴⁾ Eine Wiederholung dieses Versuches ist vorgesehen, und zwar einerseits, um den letzten Wert dieser Tabelle (150) noch endgültig festzustellen, anderseits, um die andern Werte auf Grund weiterhin verbesselter Versuchsbedingungen zu verifizieren.

tensität der Einstrahlung in den Prüfling wegen der stellenweise dazwischen befindlichen Luft, schlechte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse, sofern solche überhaupt auf diese Weise erhältlich wären). Ganz unvergleichlich günstiger sind die Verhältnisse, wenn ein die Luft verdrängendes, die beiderseitigen Kontaktflächen vollständig bedeckendes, bzw. benetzendes Zwischenmedium bestimmter Dicke d (vgl. die in Abschnitt III angegebenen Formeln) vorgesehen wird. Es sind, wohlverstanden, bessere Ankopplungswischenmedien als Oel denkbar, so z. B. Quecksilber, doch hat sich Oel der Einfachheit wegen ziemlich allgemein eingebürgert und verhältnismässig gut bewährt.

b) Bei Rissprüfungen liegen die Verhältnisse gerade umgekehrt; wie nämlich aus Bild 4 hervorgeht, ist der Reflexionskoeffizient R ganz allgemein niedriger, wenn Oel statt Luft in Rissen eingebettet ist. Da niedrigere Reflexionskoeffizienten ungünstiger sind, ist es also entsprechend schwerer, mit Oel statt mit Luft gefüllte Risse zu finden. Mit dieser Erschwerung ist in allen jenen Fällen zu rechnen, wo es sich darum handelt, Ermüdungsrisse in Lagerpartien von Achsen und Wellen festzustellen, dies nicht zuletzt deshalb, weil die in der Regel stark erhöhte Temperatur des Lageröles dessen Ein dringen in eventuell vorhandene Risse begünstigt

c) Den Spannungsverhältnissen im Rissgebiet wurde, der Literatur nach zu beurteilen, bisher noch keine Beachtung geschenkt. Für die Prüfung dürfte es jedoch nicht gleichgültig sein, ob festzustellende Risse sich in Zug- oder Druckzonen befinden. In derartigen Fällen ist es ratsam, sich nicht allein auf Formeln — wie die in Abschnitt III gegebenen — zu stützen, sondern das Experiment sprechen zu lassen, vgl. den nachfolgenden Abschnitt.

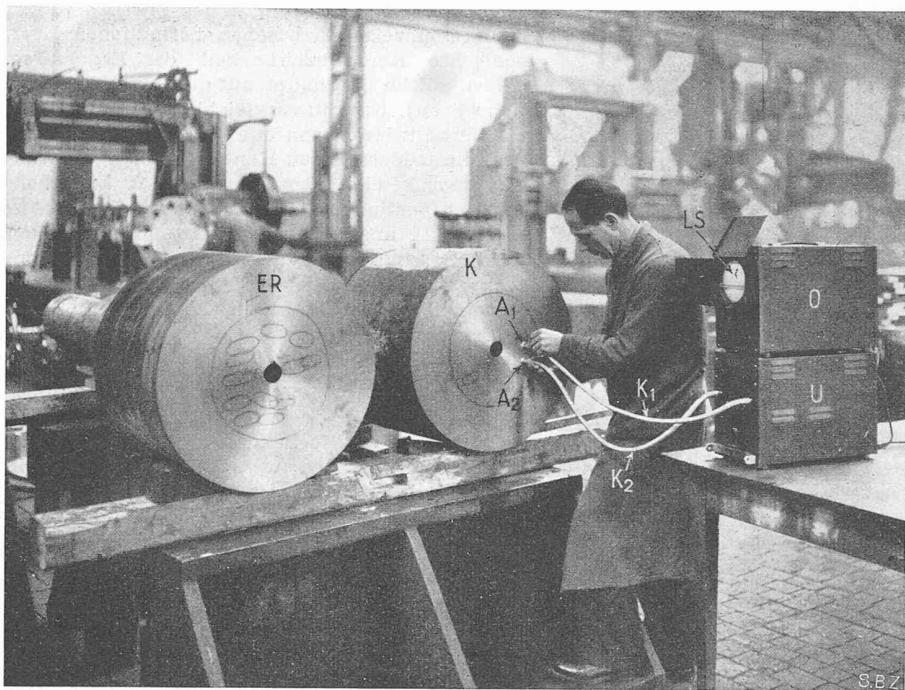


Bild 14. Das von der Firma Hughes (London) entwickelte Ultraschallgerät mit Impulsschallstrahlung bei der Prüfung des Erregerteiles (ER) und des Kupplungssteiles (K) eines Turbo-rotors. Im unteren Kasten (U) befindet sich der Hochfrequenz-Impulsgenerator, der die elektrische Spannungsstöße erzeugt. Mittels dem Kabel (K₁) werden diese dem Sendequarz, der sich im Ankopplungskopf (A₁) aus Aluminium befindet, mitgeteilt. Im zweiten solchen Kopf (A₂) befindet sich der Empfängerquarz, der die ankommenden Schallimpulse in elektrische Spannungsstöße zurückverwandelt, die mittels Kabel (K₂) zunächst einem im Kasten (U) befindlichen Verstärker zugeführt werden. Von diesem führt ein im Bilde nicht sichtbares Verbindungsleitung die verstärkten Spannungsstöße in den oberen Kasten (O), in dem sich der Elektronenstrahlzosillograph befindet, dessen Leuchtschirm (LS) deutlich im Bild erkennbar ist. Ausführung der Untersuchung: EMMA; Bildaufnahme: MFO

wurde von jedem Teil eine rd. 8 cm dicke Scheibe abgeschnitten, welche Scheiben als sicher mangelhaft taxiert wurden¹⁵⁾.

d) Als weiteres Beispiel der Anwendung des Ultraschallverfahrens sei die Achsprüfung an in Wagen und Lokomotiven eingebauten Radsätzen erwähnt. Während die andern

¹⁵⁾ Dieser Entscheid hat sich auf Grund einer nachträglich an den Scheiben durchgeführten γ -Durchstrahlung als richtig erwiesen; es ist nunmehr vorgesehen, die Scheiben außerdem noch nach dem Ultraschall-Durchlässigkeitstestverfahren laboratoriumsmässig zu untersuchen, dies ebenfalls zum Zweck der Überprüfung des seinerzeitigen Ultraschall-Echobefundes.

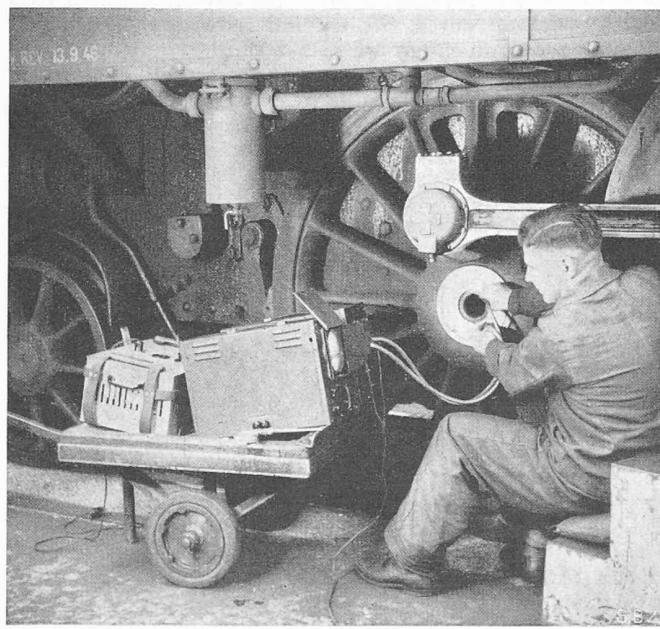


Bild 15. Untersuchung von Triebachsen elektrischer Lokomotiven. Nach Einölen der Stirnfläche werden die beiden Ankopplungsköpfe auf diese angedrückt und der Leuchtschirm beobachtet.

zerstörungsfreien Verfahren eine vollständige Prüfung nur an ganz ausgebauten und von den Rädern entblößten Achsen zulassen, ist es im Prinzip möglich, vollständig eingebaute Achsen ganz, im besondern auch den Nabensitz, mittels Ultraschall von den Stirnseiten her zu untersuchen. In den Jahren 1945/46 wurden im Auftrage der Rhätischen Bahn gegen 700 Wagenachsen nach dem Durchlässigkeitstestverfahren geprüft. Die Vorversuche im Laboratorium waren vielversprechend, die Versuche in den Werkstätten gut, während die Prüfungen an den in die Wagen eingebauten Radsätzen im Freien in einigen Fällen unbefriedigend ausfielen. Im Jahre 1947 wurden sodann im Auftrage der SBB rd. 180 Triebachsen eines gewissen Lokomotivtyps geprüft, dieses Mal nach dem Echoverfahren. Wiederum waren die Vorversuche im Laboratorium an einer einzelnen Achse vielversprechend, während die Prüfung in der Werkstatt gemäss Bild 15 in zwei Fällen zu widersprüchsvollen, noch nicht völlig abgeklärten Ergebnissen führte, dies obschon die in Absatz b) dieses Abschnittes geschilderte Anweisung befolgt wurde. Trotz diesen Einzelfällen darf angenommen werden, dass die Betriebsicherheit durch die erwähnten Ultraschallprüfungen — gesamthaft betrachtet — gesteigert worden ist. Es bedarf aber weiterer Entwicklungsarbeiten, um die so ausserordentlich wichtige Achsprüfung mittels Ultraschall zu dem zu machen, was man im Interesse optimaler Betriebsicherheit von ihr erhofft.

e) Es erweist sich bei zerstörungsfreien Strukturprüfungen oft als zweckmäßig, vorgängig den eigentlichen Versuchen Vorversuche an Probestücken mit «künstlichen» Fehlern (Bohrungen, Sägeschnitten usw., leer und mit gleichem Material ausgefüllt) durchzuführen; Bild 16 zeigt ein Beispiel hierfür. Bei der Prüfstellung I befinden sich Sender und Empfänger über der «fehlerfreien» Längshälfte des untersuchten Blockes; das Elektronenstrahlzosillogramm, Bild 17a, zeigt demzufolge ausser dem Anfangssignal A_S nur noch, im Abstand b , das Bodenecho B_1 . Bei der Prüfstellung II sind Sender und Empfänger direkt über der Bohrung Bg ; das Elektronenstrahlzosillogramm, Bild 17b, weist demzufolge ausser dem Bodenecho B_1 noch das Fehlerecho F_1 auf und zwar im Abstand $f = b/2$, weil $l' = l/2$. Aus dem gleichen Grund trifft gleichzeitig mit dem Bodenecho B_1 das zweite Echo F_2 des «Fehlers» ein. Im gleichen Abstand f sollte jetzt das dritte Fehlerecho F_3 nachfolgen. In Wirklichkeit aber schliessen sich, wie Bild 17b zeigt, bereits unmittelbar an die Zacke B_1 , F_2 weitere Zacken an, deren Ursachen nicht ohne weiteres

Tabelle 3. Prüfung eines auf Biegung beanspruchten Stahlstückes mit Riss auf Ultraschalldurchlässigkeit

Einfluss des Zwischenmediums, der Risslage (ob in Zug- oder Druckzone) und der Belastung auf die Grösse der durchgelassenen Schallintensität I_d

Versuch Nr.	Riss		Belastung	I_d Ausschlag am Instrument in Skalenteilen
	Zwischen- medium	Lage		
1	mit	Luft	—	— 1
2	mit	Oel	—	— 3
3	mit	Oel	Zugzone	von Null zunehmend 3
4	mit	Oel	Druck- zone	von Null zunehmend von 3 bis 86
5	ohne	—	—	> 150 ¹⁾

¹⁾ Wegen schaltungstechnischen Gegebenheiten konnte dieser Wert bisher noch nicht in der richtigen Höhe festgestellt werden.

zu deuten sind. Im vorliegenden Fall braucht man diesen zusätzlichen Zacken keine weitere Beachtung zu schenken, da der «Fehler» ja bereits durch das erste Echo F_1 einwandfrei festgestellt und lokalisiert werden konnte; sie sind aber von theoretischem und in gewissem Sinne auch von praktischem Interesse, weil sich bei komplizierteren Untersuchungen, als den hier besprochenen, Oszillogramme ergeben können, die gelegentlich sehr schwer zu interpretieren sind. Ganz analog können sich auch beim Durchlässigkeitsverfahren im Anzeigegerät AI, Bild 12, Ausschläge ergeben, deren Größe gelegentlich nicht ohne weiteres erklärt werden kann. Diese Tatsachen geben Veranlassung zu der nachfolgenden Schlussbemerkung. Ueberlegt man sich, z. B. im Fall des Durchlässigkeitsverfahrens, noch einmal den Weg vom Schallzeuger über den Schalleiter zum Schallempfänger (Bild 1), d. h. im Fall der Strukturprüfung mittels Ultraschall, die einzelnen komplizierten Etappen: Erzeugung des frequenz-modulierten, hochperiodigen Wechselfeldes*, Ueberführung

dieselben in mechanische Schwingungen, Ankopplung, Schwingungsverhältnisse im Prüfling usw. unter Berücksichtigung der einschlägigen physikalischen Grundgesetze, die im Rahmen dieser Arbeit nur in einfachster Darstellung geboten werden konnten, so erkennt man leicht, dass man sich gelegentlich, wie erwähnt, vor Ergebnisse gestellt sieht, die zunächst unerklärlich scheinen. Wenn auch Störungen und zeitliche Veränderungen gewisser Einzelteile der Apparatur nicht ausgeschlossen sind, so dürften doch die häufigsten Ursachen für gelegentliche Anomalien schwingungsmechanischer Natur sein (Reflexionen an den Seitenwänden, Transversalwellen usw.), wozu noch gewisse Schwierigkeiten, verursacht durch konstruktive und strukturelle Eigenheiten des Prüflings hinzukommen können. Bei diesen Anomalien schwingungsmechanischer Natur ist es besonders die Frage der einwandfreien Ankopplung, mit der nach heutiger Auffassung die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse steht oder fällt. Diese unabdingbare Forderung an jede Messmethode scheint heute beim Ultraschallverfahren noch nicht restlos erfüllt zu sein. Es darf jedoch bestimmt angenommen werden, dass die laufenden Entwicklungsarbeiten in allernächster Zeit zu diesem absolut notwendigen Ziele führen.

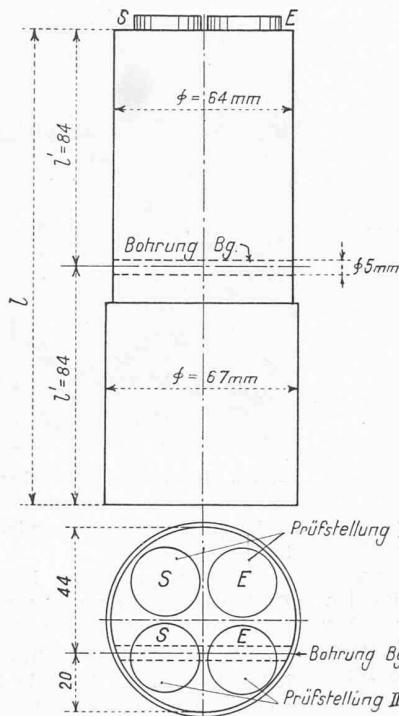


Bild 16. Ultraschallprüfung eines Stahlzylinders mit exzentrisch angeordneter Querbohrung Bg als «künstlichem» Fehler

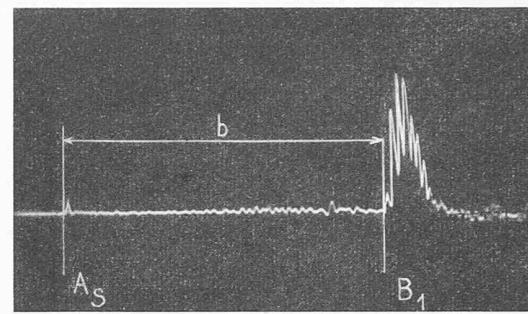


Bild 17a. Ultraschalloszillogramm für Prüfung I, Bild 16

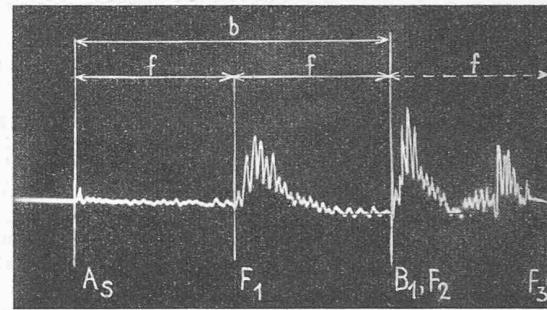


Bild 17b. Ultraschalloszillogramm für Prüfung II, Bild 16

*) Nachsatz. Die Möglichkeit, dass der Riss gerade die «Rayleigh-Breite» d_{kr} hat, vgl. Abschnitt IIIb, derzu folge der Schall durch den Riss hindurchgeht, statt von ihm reflektiert zu werden, wurde hier unberücksichtigt gelassen, um die Darstellung nicht über Gebühr zu erschweren und weil der Fall $d = d_{kr}$ über einen wesentlichen Teil der Rissausdehnung sehr selten vorkommen dürfte. Ueberdies kann die Möglichkeit, dass doch zufällig ein Mal $d = d_{kr}$ ist, mit Leichtigkeit dadurch überwunden werden, dass man die Frequenz f und damit λ_2 periodisch variiert, eine Vorsichtsmaßnahme, die in der Fachsprache als «wobbeln» bezeichnet wird.

Diese Frequenzvariation hat indessen beim Durchlässigkeitsverfahren noch eine andere, grosse Bedeutung, nämlich die Verhinderung stehender Wellen im Prüfling, die stets dann auftreten, wenn die Schallweglänge S im Prüfling nicht genau $n \lambda_2/2$ ist. Am günstigsten für die Schalldurchlässigkeit wäre bei gegebenem S und f der Fall $n = S \lambda_2/2$, der jedoch praktisch nie von selbst zutrifft; erst durch Modulation von S und damit von λ_2 wird dieser Fall periodisch realisiert.

Bei den bekannten Dreigurträgern¹⁾ bildet der Gesamtautquerquerschnitt ein Dreieck. Die Verwendung dieses Dreigurträgers alter Art für die Mittelträgerbrücke hat den Nachteil, dass der neutrale Streifen zwischen den beiden Fahrbahnen verhältnismässig breit sein muss. Beim Querprofil der Autobahnen ist ein solcher Mittelstreifen in genügender Breite vorhanden (3–5 m), beim normalen Straßenprofil jedoch nicht. Der Wunsch, das Mittelträgerbrückensystem auch bei normalen Straßenbrücken zu verwenden, führte nun zu einer Querschnittsausbildung nach Bild 1. Erstmalig vorgeschlagen wurde der neue Träger (DRP 732022 und 749558) im Jahre 1947 bei einem Ideen-Wettbewerb für den Neubau der Straßenbrücke über den Rhein bei Koblenz. Das neue Tragsystem unterscheidet sich von den bisherigen Dreigurträgern dadurch, dass nur der untere Teil aus einer im Querschnitt dreieckförmigen Konstruktion besteht, während der obere Teil eine ebene Tragwand bildet. Es sind zwei Untergurte vorhanden und ein Obergurt, aber kein Gurt in der Mitte. In der Ansicht und für Belastung durch symmetrische vertikale Kräfte entspricht das Tragsystem einem normalen Rautenfachwerk. Der obere Teil des Tragwerks sowie die Fahrbahn- und Gehweglängsträger sind genau so ausgebildet wie bei einer normalen Brücke. Der Querträger besteht aus einem fachwerkartigen Träger, der in der Mitte

Ein neuer Dreigurträger, System Haupt

Von Dipl. Ing. WALTER TEUFEL, Saarbrücken

DK 624.023.934

Bekanntlich bildet jede Brücke einen Bestandteil des Verkehrsweges, in dessen Zuge sie liegt und sollte daher den Anforderungen genügen, die verkehrstechnisch an die freie Strecke dieses Verkehrsweges gestellt werden. Während sich nun die Straßen selbst in der Form der Autobahnen diesen Anforderungen angepasst haben, ist die Form der Brücken in der Entwicklung zurückgeblieben. Mit Rücksicht auf die freie Sicht nach aussen bevorzugte man zwar Brücken mit obenliegender Fahrbahn, doch fehlt diesen der Blendschutz zwischen beiden Fahrbahnen und außerdem haben sie infolge der meistens sehr niedrigen Bauhöhe den Nachteil, dass sie einen grossen Material- und Kostenaufwand erfordern.

Zur Beseitigung dieser Nachteile entwickelte Dipl.-Ing. W. Haupt von der Dortmunder Union Brückenbau AG. in der Mittelträgerbrücke, d. h. einer Brücke, bei der das Haupttragwerk nur in dem Zwischenraum zwischen den beiden Fahrbahnen über diese hinausragt, eine Brückenform, die allen Anforderungen des neuzeitlichen Schnellverkehrs entspricht. Als Haupttragwerk dieser Mittelträgerbrücke in Balkenform eignet sich insbesondere der Dreigurträger.

¹⁾ Siehe A. Bühl in SBZ, Bd. 98, S. 214* (24. Okt. 1931).