

## Werk

**Jahr:** 1939

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 GEOGR PHYS 203:15

**Digitalisiert:** Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

**Werk Id:** PPN101433392X\_0015

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0015](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0015)

**LOG Id:** LOG\_0014

**LOG Titel:** Grundsätzliche Betrachtungen über piezoelektrische Beschleunigungsmesser

**LOG Typ:** article

## Übergeordnetes Werk

**Werk Id:** PPN101433392X

**PURL:** <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

**OPAC:** <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

## Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

## Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen  
Georg-August-Universität Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen  
Germany  
Email: [gdz@sub.uni-goettingen.de](mailto:gdz@sub.uni-goettingen.de)

## Grundsätzliche Betrachtungen über piezoelektrische Beschleunigungsmesser

Von A. Herrmann, Jena. — (Mit 2 Abbildungen)

Es werden Einzelstäbe und Kristallbieger in verschiedenen Schnittrichtungen aus Quarz und Seignettesalz sowie Quarzhohlzylinder auf ihre Eignung zum Bau von piezoelektrischen Beschleunigungsmessern, die für seismische Aufschlußverfahren verwendbar sind und *ohne* Verstärker arbeiten, untersucht. Es zeigt sich, daß Quarzstäbe bei Beanspruchung parallel zur neutralen Achse und Seignettesalzstäbe senkrecht zur *b*-Achse, sowie Seignettesalzbieger, die aus Stäben senkrecht zur *b*-Achse zusammengesetzt sind, die erforderliche hohe Beschleunigungsempfindlichkeit liefern.

Die bisher bei seismischen Aufschlußverfahren verwendeten elektrischen Beschleunigungsmesser arbeiten in Verbindung mit einem Verstärker, um die notwendige hohe Beschleunigungsempfindlichkeit, die in der Größenordnung von  $10^{-2}$  gal pro mm ( $10^{-5}$  Erdbeschleunigung) liegt, zu erreichen. Durch das Zusatzgerät „Verstärker“ wird aber naturgemäß die Störanfälligkeit der Meßapparatur und der Aufwand bei Vielfachinstrumenten erhöht. Ein Gleichstromverstärker kommt aus diesem Grunde für Geländemessungen kaum in Betracht. Bei Verwendung eines Wechselstromverstärkers besteht ein weiterer Nachteil darin, daß niedrige Frequenzen (unter 20 Hertz) nur stark gefälscht oder überhaupt nicht wiedergegeben werden.

Es ist daher erwünscht, einen Beschleunigungsmesser zu besitzen, der *ohne* Verstärker arbeitet und bei ausreichend hoher Empfindlichkeit eine quantitative Erfassung des Beschleunigungsvorganges d. h. unverfälschte Aufzeichnung bis herunter zu Frequenzen von etwa 1 Hertz ermöglicht.

Diese Forderungen erfüllt, wie gezeigt werden soll, ein piezoelektrischer Beschleunigungsmesser, wenn die Schaltanordnung, das piezoelektrische Material, die Schnittrichtung und Formgebung des piezoelektrischen Kristallelements passend gewählt werden. Als Registrierinstrument dient dabei ein Tauchspulgalvanometer nach O. Meißer\*), ein Lichtzeigerinstrument, das bei einer Gleichstromempfindlichkeit von etwa  $10^{-6}$  Amp./mm, einer Eigenfrequenz zwischen 30 und 100 Hertz und fast aperiodischer Dämpfung eine nahezu horizontale Frequenzcharakteristik aufweist.

Die Schaltanordnung des Beschleunigungsmessers ist folgende: Beim Auftreten von Erschütterungen werden infolge der Trägheitswirkung der Masse *M* auf den Elektroden des Kristallelements beschleunigungsproportionale Ladungsschwankungen erzeugt, die mit Hilfe einer Elektrometerröhre in Anodenstrom-

---

\*) O. Meißer, Ein kurzperiodisches Galvanometer für langsame elektrische Schwingungen. Veröffentl. d. Reichsanst. f. Erdbebenforschung in Jena, Heft 34, S. 73 (1938).

schwankungen umgewandelt werden. Die Röhre dient also nur als Umformerröhre. Die verwendete Elektrometerröhre T 113 (AEG, Fabrikat Osram) zeichnet sich durch besonders hohe Isolation des Steuergitters aus. Auch der Widerstand, über den durch eine Gitterbatterie der Arbeitspunkt auf die Mitte der Röhrencharakteristik eingestellt wird, ist so gewählt (Größenordnung  $10^{10} - 10^{11}$  Ohm), daß bei gleichzeitiger Verwendung eines Trockenmittels die Zeitkonstante der Anordnung auch die einwandfreie Wiedergabe von Frequenzen bis etwa 1 Hertz gewährleistet. Zum Kleinhalten der Kapazität werden die Röhre und der Hochohmwiderrstand mit im Meßkörper untergebracht. Der Anodenruhestrom wird durch eine Kompensationsschaltung vom Registriergalvanometer ferngehalten.

Als piezoelektrische Kristalle kommen Quarz und Seignettesalz in Betracht. Turmalin scheidet wegen seines hohen Preises aus.

Man kann die träge Masse zur Erzeugung der beschleunigungsproportionalen Ladungsschwankungen auf verschiedenartige Kristallelemente wirken lassen:

1. auf einzelne Kristallstäbe oder -platten,
2. auf einen Kristallbieger,
3. auf einen auf Torsion zu beanspruchenden Quarzhohlzylinder, dessen Achse in Richtung der optischen Achse verläuft\*).

Außerdem sind bei den beiden ersten Typen verschiedene Orientierungen der Einzelstäbe gegen die Kristallachsen möglich.

Quarz weist besonders gute elektrische und mechanische Eigenschaften auf.

Eine Quarzplatte, die in der üblichen Weise ausgeschnitten ist und in Richtung der *elektrischen* Achse beansprucht wird, ergibt bei der vorliegenden Schaltanordnung nur mit großer träger Masse eine genügend hohe Beschleunigungsempfindlichkeit. Bei 10 aufeinandergesetzten und elektrisch parallel geschalteten Quarzwürfeln von der Kantenlänge 1 cm benötigt man eine Masse von 10 kg, um eine relative Beschleunigungsempfindlichkeit von  $2 \cdot 10^{-5}$  zu erhalten. Die Eigenfrequenz des Systems Masse-Kristallsäule liegt dabei bei 450 Hertz.

Die Verhältnisse liegen bei Beanspruchung eines Quarzstabes in Richtung der *neutralen Achse* wesentlich günstiger. Sind  $\delta$  der piezoelektrische Modul,  $l$ ,  $b$ ,  $d$  die Kantenlängen des Stabes in Richtung der neutralen bzw. optischen bzw. elektrischen Achse, so wird durch den Druck  $P$  in Richtung der neutralen Achse auf den Flächen  $l \cdot b$  bekanntlich die elektrische Ladungsmenge

$$q = \delta \cdot \frac{l}{d} \cdot P \dots \dots \dots (1)$$

erzeugt.

Unter der Voraussetzung, daß das verwendete Registriergalvanometer im Frequenzbereich von 1 bis 100 Hertz eine gleichbleibende Stromempfindlichkeit

---

\*) E. R. Gibbs und Tsien Ling Chao, The production of electricity by torsion. Philos. Mag. 22, 311 (1936).

(horizontale Frequenzcharakteristik) besitzt, läßt sich die relative Beschleunigungsempfindlichkeit  $\Delta g/g$  auf die Form bringen

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{c_1 \cdot b + c_2 \cdot d/l}{M} \dots \dots \dots (2)$$

Dabei sind  $M$  die träge Masse des Beschleunigungsmessers und  $c_1, c_2$  Konstante, die durch den Piezomodul, die wirksame Dielektrizitätskonstante des Kristalls, die Steilheit der Elektrometerröhre, die Empfindlichkeit des Registriergalvanometers und die Summe der Kapazitäten des Röhrengitters und der Zuleitung

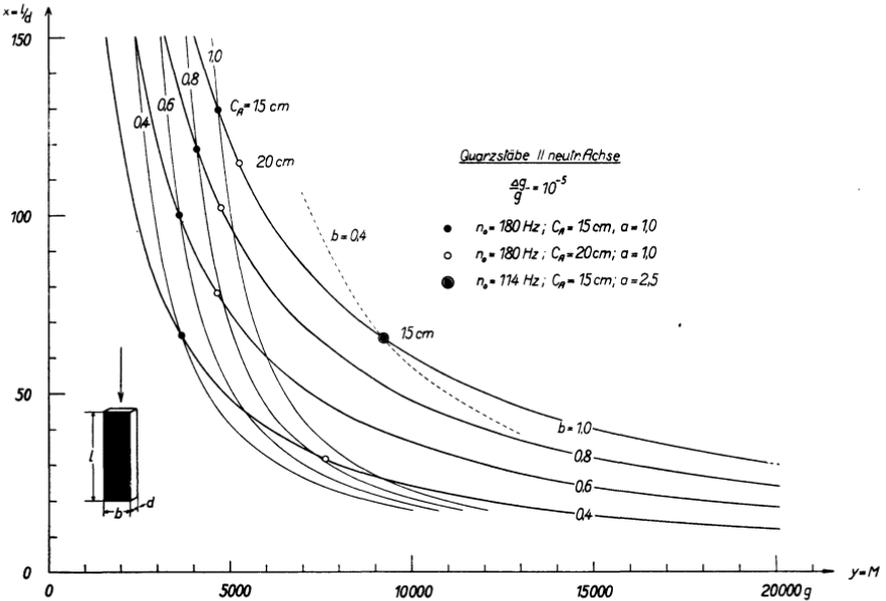


Fig. 1. Quarzstab parallel zur neutralen Achse

(etwa 15 cm) bestimmt werden. Die steiler verlaufenden Kurven in Fig. 1 stellen  $M$  als Funktion von  $l/d$  dar, wenn in Gleichung (2)  $\frac{\Delta g}{g} = 10^{-5}$  gesetzt und die Stabbreite  $b$  als Parameter (0.4 bis 1.0 cm) angenommen wird. Bei dem Bestreben, die Masse  $M$  möglichst klein zu wählen, ist aber zu beachten, daß bei der dadurch notwendigen Erhöhung der Schlankheit des Stabes die Eigenfrequenz des Systems Masse-Kristallstab sinkt. Bei einem Beschleunigungsmesser (von den Maximalbeschleunigungsmessern und den mit automatischer Differentiation der Geschwindigkeit arbeitenden Geräten wird hier abgesehen) muß jedoch die Eigen-

frequenz höher liegen als die höchste zu messende Frequenz. Die Formel für den mit der Masse  $M$  belasteten Stab lautet

$$n_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot b \cdot d}{M \cdot l}} \dots \dots \dots (3)$$

wobei  $E$  der wirksame Elastizitätsmodul des Quarzes bedeutet. Setzt man die Eigenfrequenz  $n_0$  zu 180 Hertz fest, so ergibt  $M$  als Funktion von  $l/d$  die zweite flachere Kurvenschar in Fig. 1;  $b$  ist Parameter. Die Schnittpunkte entsprechender Kurven beider Scharen liefern die Dimensionen des Stabes, bei dem mit kleinstmöglicher Masse  $M$  die relative Beschleunigungsempfindlichkeit von  $10^{-5}$  erreicht wird und die Eigenfrequenz 180 Hertz beträgt. Demnach ist bei einem Quarzstab von der Breite  $b = 0.4$  cm und einem  $l/d$ -Verhältnis von 66 eine Masse von  $M = 3700$  g notwendig\*).

Auch beim *Seignettesalz*, das zu niedrigem Preis erhältlich ist, sind zwei verschiedene Schnittrichtungen auf Eignung zum Bau eines hochempfindlichen Beschleunigungsmessers *ohne* Verstärker zu prüfen. Als Nachteil gegenüber Quarz sind zu nennen die Sprödigkeit, die große Feuchtigkeitsempfindlichkeit und der niedrige Schmelzpunkt des Kristalls.

Bei den *Seignettesalzstäben*, die *senkrecht* zur kristallographischen *a*-Achse ausgeschnitten sind, tritt dazu noch die Inkonstanz in elektrischer Beziehung, so daß so orientierte Stäbe für quantitative Messungen ungeeignet erscheinen. Da bei der benutzten Schaltung die Kapazität des Kristallelements möglichst klein sein muß, ist die Schnittrichtung senkrecht zur *a*-Achse trotz des um einige Zehnerpotenzen höher als bei Quarz liegenden Piezomoduls ungünstig, da die wirksame Dielektrizitätskonstante ebenfalls einen außergewöhnlich hohen Wert hat.

Bei *Seignettesalzstäben* *senkrecht* zur *b*-Achse treten jedoch bekanntlich diese elektrischen Anomalien nicht oder nur in ganz geringem Maße auf. Der Piezomodul, aber auch die Dielektrizitätskonstante sind wesentlich kleiner als in der anderen Richtung. Die den oben durchgeführten Überlegungen für Quarzstäbe parallel zur neutralen Achse analogen Betrachtungen zeigen, daß bei einer Stabbreite von 1.5 cm und einem  $l/d$ -Wert von 15 bereits mit einer Masse von etwa 2000 g bei Verwendung eines  $10^{-6}$  Registriergalvanometers eine relative Beschleunigungsempfindlichkeit von  $10^{-5}$  zu erreichen ist.

*Kristallbieger* bestehen bekanntlich aus zwei parallelen, längs ihrer Berührungsfläche, der neutralen Faser des Biegers, zusammengekitteten Kristallstäben oder -platten. Bei dem gebräuchlichsten Biegetyp haben die Kristallachsen (elektrische

---

\*) Bei dem in der Reichsanstalt für Erdbebenforschung entwickelten Beschleunigungsmesser wird ein Stab von  $b = 0.4$  cm,  $l = 6$  cm,  $d = 0.1$  cm mit einer 10-kg-Masse belastet. Die Empfindlichkeit wurde in Übereinstimmung mit der Theorie (vgl. Fig. 1) bei Verwendung eines Registrierinstruments der Stromempfindlichkeit  $2.5 \cdot 10^{-6}$  zu  $10^{-5}$  gefunden. Die Eigenfrequenz liegt jedoch nicht bei dem theoretischen Wert von 114 Hertz sondern bei 150 Hertz, da der von einer Bernsteinfassung gestützte Stab seitlich anliegt.

Achse bei Quarz, *a*- bzw. *b*-Achse bei Seignettesalz), senkrecht zu denen die Einzelstäbe ausgeschnitten sind, gleiche Richtung. Die beiden metallbelegten Außenflächen sind miteinander verbunden und bilden die eine Elektrode. Die gemeinsame, die neutrale Faser darstellende Fläche ist ebenfalls mit einer Belegung versehen und bildet die andere Elektrode.

Klemmt man den Bieger an einem Ende fest ein, so erzeugt der auf das freie Ende ausgeübte Druck *P* eine elektrostatische Ladung von\*)

$$q = \frac{3}{4} \cdot \delta \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^2 \cdot P \dots \dots \dots (4)$$

Dabei sind  $\delta$  der piezoelektrische Modul in elst. Einh./dyn, *l* die Länge,  $2d$  die Dicke des Biegers in cm, *P* die auf das Biegerende wirkende Kraft in Dyn.

Die relative Beschleunigungsempfindlichkeit hat danach die Form

$$\frac{\Delta g}{g} = \frac{c_3 \cdot (b \cdot l/d + c_4)}{\left(\frac{l}{d}\right)^2 \cdot M} \dots \dots \dots (5)$$

Die Konstanten  $c_3$  und  $c_4$  enthalten die gleichen Größen wie  $c_1$  und  $c_2$  in Gleichung (2).

Die Eigenfrequenz der einseitig eingespannten Doppelplatte mit der Eigenmasse *m* und der am anderen Ende wirkenden Punktmasse *M* ist gegeben durch die Beziehung\*\*)

$$n_0^2 = \frac{1}{16 \cdot \pi^2} \cdot \left(\frac{2d}{l}\right)^3 \cdot \left(\frac{b \cdot E}{\frac{m}{4.1} + M}\right) \dots \dots \dots (6)$$

Dabei ist *E* der Elastizitätsmodul in CGS-Einheiten.

Analog wie oben durchgeführte Berechnungen führen zu folgenden Ergebnissen:

a) *Quarzbieger*. Während man für eine relative Beschleunigungsempfindlichkeit von  $10^{-4}$  mit einer Masse *M* von 60 bis 80 g auskommt (Eigenfrequenz 180 Hertz),

erfordert  $\frac{\Delta g}{g} = 10^{-5}$  eine Masse von mindestens 6000 g.

b) *Seignettesalzbieger*. Sind die Einzelstäbe des Biegers senkrecht zur *a*-Achse ausgeschnitten, so läßt sich aus dem gleichen Grunde wie beim Einzelstab senkrecht *a* ( $\epsilon_a \sim 10^3$ ) keine hohe Empfindlichkeit ohne Verstärker erreichen.

Beim Seignettesalzbieger, dessen Einzelstäbe senkrecht zur *b*-Achse ausgeschnitten sind (die Längsrichtung der Stäbe halbiert den Winkel zwischen *a*-

\*) A. de Gramont und D. Beretzki, Sur la génération d'ondes acoustiques au moyen de quartz piézoélectrique. C. R. Paris **202**, 1229 (1936).

\*\*\*) Bei Berücksichtigung der endlichen Ausdehnung und damit des Trägheitsmoments der Masse *M* ergeben sich zwei Eigenfrequenzen des Biegers\*\*\*), der gewissermaßen einen piezoelektrischen Blattfederseismographen darstellt.

\*\*\*\*) M. Rössiger, Beitrag zur Theorie des Blattfederseismographen. Zeitschr. f. Geophys. **8**, 470 (1932).

und  $c$ -Achse) liefert eine träge Masse  $M = 100$  g eine relative Empfindlichkeit von etwa  $3 \cdot 10^{-5}$  ( $l/d = 12$ ,  $b = 1$  cm).

Durch Torsion eines *Quarzhohlzylinders* kann unter den hier gemachten Voraussetzungen keine hohe Beschleunigungsempfindlichkeit erreicht werden.

Die für seismische Aufschlußarbeiten notwendige Beschleunigungsempfindlichkeit von der Größenordnung  $10^{-5}$  wird also erzielt mit einem in Richtung der neutralen Achse beanspruchten Quarzstab oder mit einem Seignettesalzstab senkrecht zur  $b$ -Achse. Ein Seignettesalzbieger senkrecht zur  $b$ -Achse liefert zwar eine etwas niedrigere Beschleunigungsempfindlichkeit, bietet aber den Vorteil, daß der Meßkörper wesentlich einfacher aufgebaut und wegen der erforderlichen geringen Masse  $M$  bedeutend kleiner und leichter ist.

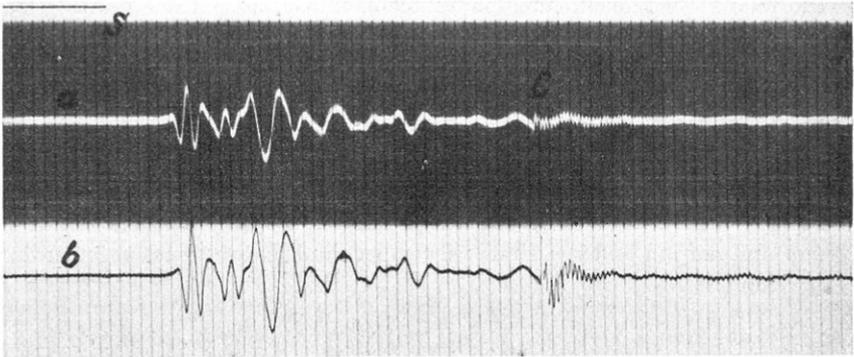


Fig. 2. Gleichzeitige Registrierung eines 285 m entfernten Schusses mit einem Quarzstab- (b) und einem Biegerbeschleunigungsmesser (a). S Schußmoment, L Luftschalleinsatz, Zeitmarkenabstand  $1/50$  sec

Fig. 2 zeigt die gleichzeitige Registrierung eines Sprengschusses auf Kalkboden aus 285 m Entfernung mit einem Quarzstab- und einem Biegerbeschleunigungsmesser. Trotzdem die Registrierung mit zwei verschiedenen Galvanometern (Zeissches Schleifengalvanometer bzw. Tauchspulgalvanometer nach O. Meißer) erfolgte, ist die genaue Übereinstimmung beider Kurven unverkennbar und damit einwandfreies Arbeiten auch des auf dem Biegerprinzip beruhenden Apparates erwiesen.

Nähere Einzelheiten insbesondere auch über die auf Grund dieser Untersuchungen entwickelten Beschleunigungsmesser sind einer anderen Veröffentlichung des Verfassers zu entnehmen\*).

Jena, Reichsanstalt für Erdbebenforschung.

\*) A. Herrmann, Piezoelektrische Beschleunigungsmesser hoher Empfindlichkeit ohne Verstärker. Veröff. d. Reichsanst. f. Erdbebenforschung in Jena, Heft 34, S. 25 (1938).