

## Werk

**Jahr:** 1936

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 GEOGR PHYS 203:12

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

**Werk Id:** PPN101433392X\_0012

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0012](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0012)

**LOG Id:** LOG\_0039

**LOG Titel:** Zur Theorie der Erdbebenwellen

**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)

## Zur Theorie der Erdbebenwellen

Die „wandernde Reflexion“ der Seismik als Analogon zur „Kopfwelle“ der Ballistik

Von O. v. Schmidt — (Mit 4 Abbildungen)

Die Theorie der „wandernden Reflexion“ des Verfassers hatte bisher den Mangel, daß analoge Vorgänge in der Physik zu fehlen schienen. Es wird gezeigt, daß die „Kopfwelle“ der Ballistik nicht nur qualitativ, sondern auch formelmäßig ein Analogon darstellt; genau wie in der Ballistik tritt auch in der Seismik eine „Kopfwelle“ nur dann auf, wenn Überschallgeschwindigkeit vorliegt, dann ist  $\sin \alpha_0 = V_1/V_2$ . Weiterhin wird die „wandernde Reflexion“ auf die Ausbreitungsvorgänge bei Kurzwellen und auf die Totalreflexion der Optik verallgemeinert.

In keinem der vielen Gebiete der Physik, die sich mit Wellenvorgängen beschäftigen, ist der Begriff des „Strahles“ ein so wohl definierter, wie in der Sprengseismik. Es liegt dieses an der Meßmethode: der Moment der Sprengung ist genau definiert, der Moment der Ankunft des ersten Impulses ist ebenso genau meßbar; es ergibt sich also mit Leichtigkeit die Zeit, die ein Wellenvorgang gebraucht, bis der erste Impuls beim Seismographen eintrifft. Der erste Impuls muß stets auf dem Wege der kürzesten Zeit eingetroffen sein — und diesen Weg nennt man in der Seismik eben den Strahl.

Da es sich hierbei um Einzelimpulse handelt, so fallen alle Komplikationen fort, die durch die Summierung und Auslöschung bei eingeschwungenen Vorgängen entstehen; der Verlauf der Wellenausbreitung ist viel einfacher zu übersehen als in der Optik und Akustik — und dadurch erklärt sich die Beobachtung neuer Phänomene in der Sprengseismik: es sind ausgesprochene „Kopffphänomene“, die bei den eingeschwungenen Vorgängen sehr viel schwerer beobachtet werden können.

Die überraschendste Erscheinung bei der Sprengseismik ist das Vorhandensein einer Grenzwellen; es sollen im folgenden kurz das Zustandekommen und das Verhalten der Grenzwellen rekapituliert werden. Näheres siehe v. Schmidt<sup>1)2)3)4)5)</sup>.

Die Fig. 1 stelle einen Schnitt senkrecht zur Erdoberfläche dar: die obere Schicht sei Sand mit der Schallgeschwindigkeit  $V_1$ , die untere Schicht sei Kalk mit der Schallgeschwindigkeit  $V_2$  ( $V_2 > V_1$ ). Die Gerade  $F - G$  stelle den Schnitt durch die ebene Trennfläche zwischen den beiden Schichten dar, wobei besonders darauf hingewiesen sei, daß derartige überraschend ebene Grenzflächen als ehemalige Meeresböden in der Natur recht häufig angetroffen werden.

Wird nun in  $A$  eine Sprengung ausgeführt, so verläuft (auf Grund tausender Versuche) der Vorgang folgendermaßen: Der von der Sprengstelle ausgehende Strahl gelangt nach den einzelnen Beobachtungsstellen  $B, C, D, E$  stets auf dem Wege der kürzesten Zeit, er fällt also unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion  $\alpha_0$  in den Kalk ein und läuft an der Oberfläche desselben mit der Geschwindigkeit des Kalkes  $V_2$  entlang. Diese Grenzwellenfront wirkt nun auf den Sand zurück, so daß zu den einzelnen Registrierstellen  $B, C, D, E$  Strahlen unter dem Grenzwinkel  $\alpha_0$  aufsteigen.

Mit anderen Worten, die Welle  $K$  ruft im Sande eine Wellenfront  $KB$  hervor, die mit der Grenzfläche den Winkel  $\alpha_0$  bildet, wobei  $\sin \alpha_0 = V_1/V_2$  ist; der gesamte Erscheinungskomplex sei der Kürze halber „wandernde Reflexion“ genannt.

In der ersten Zeit wurde das Einfallen unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion angezweifelt, da nach einer allgemein verbreiteten und zum Teil heute

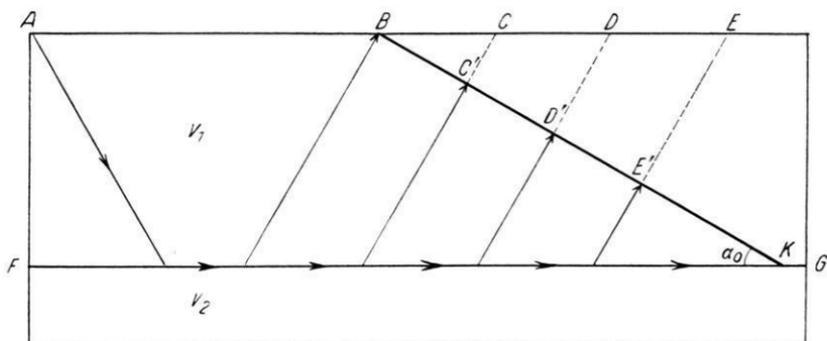


Fig. 1. Die „wandernde Reflexion“. Von  $A$  (der Sprengstelle) fällt der „Strahl“ unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion  $\alpha_0$  in die Schicht 2 ein und läuft an der Grenze entlang; er sendet dort kontinuierlich „Strahlen“ herauf;  $B, C', D', E'$   $K$  ist die Wellenfront, die mit der Grenzschicht den Winkel  $\alpha_0$  bildet

noch gültigen Anschauung beim Grenzwinkel der Totalreflexion die Energie des ins zweite Medium eindringenden Strahles (also des Grenzstrahles) gleich Null sein müßte. In einer speziell dieser Frage gewidmeten Arbeit konnte nachgewiesen werden [v. Schmidt<sup>6)</sup>], daß dieser Irrtum auf einer nicht genügend genauen Diskussion der Fresnelschen Gleichungen beruht: Die Fresnelschen Gleichungen ergeben für die *Intensität* des Grenzstrahles Null, weil seinerzeit im Ansatz für die Intensitätsverteilung an das eventuelle Vorhandensein einer Grenzwellenfront überhaupt nicht gedacht wurde. Ganz anders liegen die Dinge jedoch betreffs der *Amplituden* des Grenzstrahles, und es ist im höchsten Grade erstaunlich, daß darauf nicht schon längst hingewiesen worden ist; nach Fresnel ist die Amplitude  $A^d$  des durchgehenden Strahles:

$$\text{bei senkrechter Polarisation: } A_{\perp}^d = A_{\perp}^e \cdot 2!$$

$$\text{bei paralleler Polarisation: } A_{\parallel}^d = A_{\parallel}^e \cdot 2/\sin \alpha!$$

Dieses Ergebnis stimmt mit der vom Verfasser in den letzten Arbeiten mehrfach geäußerten Ansicht überein, daß der größte Teil der einfallenden Intensität als eine summierte Welle im Grenzstrahl weiterläuft und dann erst als Sekundärerscheinung in das obere Medium — also den Sand — kontinuierlich zurückstrahlt: Die „Totalreflexion“ bleibt gelten, jedoch nach einem mehr oder weniger langen Umweg über den Grenzstrahl.

Das Einfallen des Beben- oder Schallstrahles unter dem Grenzwinkel  $\alpha_0$ , wie auch das Fortlaufen einer äußerst intensiven Grenzwellen mit der Geschwindigkeit  $V_2$  wurden allmählich anerkannt [vgl. Haalck<sup>7)</sup>, H. M. Rutherford<sup>8)</sup> sowie F. Gerecke<sup>9)</sup>]; das Wiederaufsteigen jedoch der Strahlen in den Sand oder mit anderen Worten einer Wellenfront unter dem Winkel  $\alpha_0$  allein in den Sand, ohne daß eine derartige Erscheinung im Kalk nachgewiesen werden konnte, diese Erscheinungen wurden meistens als sehr unwahrscheinlich oder sogar unmöglich hingestellt, da sie ohne physikalisches Analogon seien.

Nun gibt es aber doch ein physikalisches Analogon zu dem oben dargestellten Erscheinungskomplex, durch welches die Vorgänge der „wandernden Reflexion“ nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ auf schon bekannte physikalische Vorgänge zurückgeführt werden; hiervon soll im folgenden die Rede sein.

#### *Die Kopf- oder Ballistik als Analogon zur „wandernden Reflexion“*

Betrachten wir die Erscheinungen bei der Bewegung eines Geschosses durch die Luft, wie sie erstmalig von Mach<sup>10)11)12)13)</sup> nach der Schlierenmethode photographiert worden sind. Die Fig. 2 zeigt die auftretenden Erscheinungen in einer Originalphotographie nach Cranz, die ich dem freundlichen Entgegenkommen des Instituts für technische Physik der Techn. Hochschule Charlottenburg zu verdanken habe; über die Technik derartiger Schlierenaufnahmen vgl. Cranz<sup>14)</sup>.

Die von der Spitze des Geschosses ausgehende „Kopfwelle“, auch „Geschoßwelle“ genannt, tritt, wie schon Mach gefunden hatte, immer nur dann auf, wenn sich das Geschöß mit Überschallgeschwindigkeit durch die Luft bewegt; in diesem Falle hören wir nach dem Vorbeifliegen des Geschosses ganz deutlich zwei getrennte Knalle, einen „Geschoßknall“, von der Kopfwelle herrührend, und einen „Mündungs-

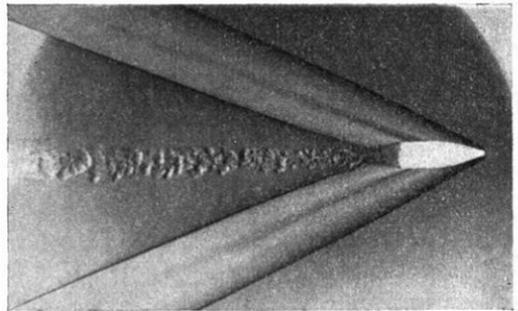


Fig. 2. „Kopf- oder Geschößwelle“ eines mit Überschallgeschwindigkeit fliegenden Geschosses; von der Spitze geht eine Druckwelle aus, vom Ende eine Verdünnungswelle. Originalaufnahme nach Cranz-Schardien

knall“, vom Geschütz herrührend; es ist dabei gleich, ob es sich um ein Infanteriegewehr oder ein Geschütz handelt.

Weiterhin hat schon Mach festgestellt, daß der Winkel  $\alpha$ , unter dem die Kopfwelle die Geschößbahn verläßt, dem Gesetz gehorcht, daß  $\sin \alpha = V_1/V_2$ .

Die Erklärung für die Kopfwelle ist erstmalig von Mach gegeben und dann von allen Fachleuten akzeptiert und bestätigt worden: an der Spitze des Geschosses bildet sich eine Luftverdichtung, die sich nach allen Seiten kugelförmig auszubreiten bestrebt, und zwar mit der Schallgeschwindigkeit  $V_1$ ; gleichzeitig bewegt sich das Geschöß mit der Geschwindigkeit  $V_2$  längs der Geraden  $EA$  vorwärts (siehe Fig. 3), wenn das Geschöß also im Moment der Photographie im

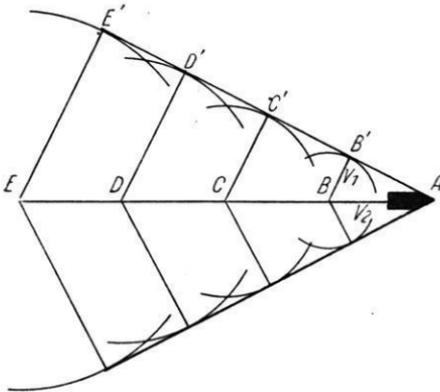


Fig. 3. Erklärung der Fig. 2.  $EE'$  ist proportional der Schallgeschwindigkeit  $V_1$  eingezeichnet,  $EA$  entsprechend der Geschößgeschwindigkeit  $V_2$ ;  $\sin \alpha = V_1/V_2$ ; die Kopfwelle ist die Umhüllende der Elementarwellen und tritt nur bei Überschallgeschwindigkeit auf

den Geschwindigkeiten entsprechen, so ergibt sich:  $\sin \alpha = V_1/V_2$ . Die Form der Knallwelle, die in einem Aufpunkt eintrifft, wenn sich die Schallquelle mit Überschallgeschwindigkeit bewegt, ist von Picht<sup>15)</sup> berechnet worden. In der Arbeit wird kurz darauf hingewiesen, daß die für die Form der Knallwelle geltenden Überlegungen auch auf seismische Fragen angewandt werden können. Wie mir nach Beendigung vorliegender Arbeit Herr Prof. Angenheister mitteilte, sind derartige Überlegungen von ihm und Herrn Prof. Picht seinerzeit gelegentlich erörtert, aber nicht abschließend weiter verfolgt worden.

Cranz (l. c.) hat in sehr eleganten Versuchen bewiesen, daß es wirklich die Elementarwellen sind, die die Kopfwelle hervorrufen, und ebenso hat er zeigen können, daß durch das Geschöß keine Luft transportiert wird, sondern daß es sich um einen Bewegungszustand handelt. Wir können die Ergebnisse der Ballistik in folgender Form verallgemeinert zusammenfassen: *Bewegt sich in einem gas-*

Punkte  $A$  ist, so war es 1 Sekunde vorher in  $B$  (wobei  $BA$  der Geschößgeschwindigkeit entsprechen soll), der Schall hat sich in der Zeit aber nur zu der Elementarwelle mit dem Radius  $BB'$  ausgebreitet. Erweitern wir diese Überlegung auf den Punkt  $C$ , in dem das Geschöß vor 2 Sekunden war, so finden wir, daß der von dort ausgehende Schall im Moment der Photographie bis zu  $C'$  gelaufen ist; zu analogem Schluß kommen wir vom Punkte  $D$  und  $E$  aus. Wir finden also, daß die Kopfwelle  $A - E'$  die Umhüllende der Schar von Elementarwellen ist, die durch die Verdichtung der Luft an der Geschößspitze auftreten. Weiterhin ist aus der Fig. 3 mit Leichtigkeit zu ersehen, daß  $\sin \alpha = EE'/EA$  ist und da die Strecken

förmigen, flüssigen oder festen Medium mit der Schallgeschwindigkeit  $V_1$  ein Verdichtungszustand mit der Überschallgeschwindigkeit  $V_2$ , so tritt eine Kopfwelle auf, wobei  $\sin \alpha = V_1/V_2$ . Bewegt sich der Verdichtungszustand mit der normalen Schallgeschwindigkeit des Mediums oder mit Unterschallgeschwindigkeit, so tritt keine Kopfwelle auf.

Kehren wir nun zu den Vorgängen der Stoßseismik zurück: wir hatten auf Grund experimenteller Ergebnisse gefunden, daß sich an der Grenze des Kalkes eine Welle mit der Geschwindigkeit  $V_2$  vorwärtsbewegt, wobei  $V_2$  größer als  $V_1$  — die Geschwindigkeit des angrenzenden Sandes — war. Es bewegt sich also die Grenzwellen relativ zum Sande mit Überschallgeschwindigkeit, es müßte also eine Kopfwelle auftreten und gleichzeitig müßte  $\sin \alpha_0 = V_1/V_2$  sein; genau dieses

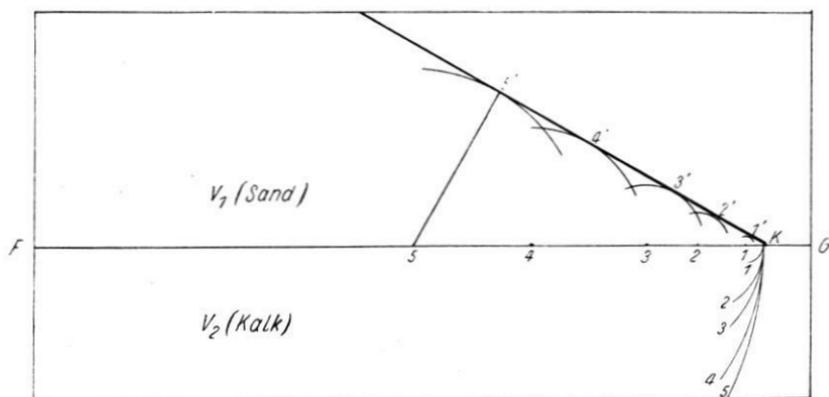


Fig. 4. Die „wandernde Reflexion“ durch Elementarwellen dargestellt: relativ zum Sande läuft  $K$  mit Überschallgeschwindigkeit, daher tritt die Kopfwelle 1', 2', 3', 4', 5' auf. Relativ zum Kalk läuft  $K$  mit normaler Schallgeschwindigkeit, daher tritt im Kalk keine Kopfwelle auf, sondern nur ein einzelner Strahl an der Berührungsstelle der einzelnen Elementarwellen, also eine Grenzwellen

beobachten wir nun auch in der Seismik; von der Spitze der Kalkwelle steigt eine Wellenfront im Sande auf, wobei  $\sin \alpha_0 = V_1/V_2$  ist. Damit ist der erste Teil der Erscheinung erklärt, es verbleibt noch die Frage, warum keine Ausstrahlung nach dem darunterliegenden Kalk auftritt. Auch diese Frage erklärt sich als logische Folgerung unserer Zusammenfassung der ballistischen Ergebnisse: da die Grenzwellen mit der normalen Schallgeschwindigkeit des Kalkes verläuft, so kann es zur Ausbildung einer Kopfwelle im Kalk gar nicht kommen, eine Ausstrahlung tritt also nur nach der Seite mit der geringeren Schallgeschwindigkeit auf.

Wir können den Gesamtvorgang an der Grenzschicht durch Huygenssche Elementarwellen darstellen (siehe Fig. 4): Die im Kalk sich ausbreitenden Elementarwellen 1, 2, 3, 4, 5 berühren sich nur im Punkte  $K$ , es läuft also nur eine praktisch unendlich dünne Wellenfront oder ein einzelner Strahl an der Kalkgrenze ent-

lang; im Sande breiten sich die Elementarwellen  $5'$ ,  $4'$ ,  $3'$ ,  $2'$ ,  $1'$  mit geringerer Geschwindigkeit aus, wir erhalten die aufsteigende Wellenfront unter dem Winkel  $\alpha_0$ .

Somit ist der Vorgang der „wandernden Reflexion“ nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ auf einen längst bekannten Vorgang zurückgeführt und dürfte damit noch besser vorstellbar geworden sein; denn vorstellbar heißt doch nichts anderes als „ähnlich solchen Vorstellungen, an die man gewohnt ist“.

### *Verallgemeinerung der Resultate auf elektromagnetische Grenzwellen*

Das Interessanteste an den obigen Resultaten ist die Möglichkeit, die Gedankengänge auch auf die elektromagnetischen Vorgänge verallgemeinern zu können, trotzdem im ersten Moment ein derartiger Sprung sehr gewagt erscheint. Am naheliegendsten ist die Analogie mit der Kurzwellenausbreitung: Denken wir uns Fig. 1 auf dem Kopfe stehend, die Explosionsstelle werde durch den Sender ersetzt, die Kalkschicht mit der größeren Fortpflanzungsgeschwindigkeit sei die Kennely-Heavisaid-Schicht (K.-H.-Schicht), so kommen wir zu dem Analogieschluß, daß die Kurzwellen an der Grenze der K.-H.-Schicht entlanglaufen und kontinuierlich unter dem Grenzwinkel  $\alpha$  eine Abstrahlung auf die Erde erfolgt („wandernde Reflexion“). Eine derartige Erklärung des Kurzwellenumlaufes bietet vor den bisherigen Theorien einer Beugung innerhalb der K.-H.-Schicht bzw. einer Mehrfachreflexion bedeutende Vorteile; es sei zu dieser Frage auf folgende Arbeiten verwiesen: Forsterling und Lassen<sup>16</sup>), Quack und Mögel<sup>17</sup>), H. Faßbender<sup>18</sup>), H. Rukop<sup>19</sup>). Diese Hypothese [vgl. v. Schmidt<sup>6</sup>)] ist kürzlich in einer Diplomarbeit von Schneeweiss<sup>20</sup>) auf Anregung von Prof. Faßbender einer kritischen Untersuchung unterzogen worden, wobei Schneeweiss zu folgenden hauptsächlichsten Ergebnissen kommt:

Alle bisherigen Erklärungen für den Mehrfachumlauf von Kurzwellensignalen um die Erde stoßen auf erhebliche Widersprüche mit den Beobachtungen.

„Es ist eigentlich erstaunlich, wie gut der größte Teil der bei der Wellenausbreitung auf große Entfernungen erhaltenen Beobachtungsergebnisse von der Schmidtschen Theorie der „wandernden Reflexion“, obwohl diese von ganz einfachen Annahmen ausgeht, wiedergegeben wird, eine gewisse Anwendungsmöglichkeit ist aus diesem Grunde schon gegeben.“

Sowohl nach der Beugungstheorie als auch nach der Theorie der Mehrfachreflexionen kann der scharfe Einsatz der Signale nicht erklärt werden; „der scharfe Einsatz der Zeichen nach einem Erdumlauf ist nach der Schmidtschen Theorie selbstverständlich, da ja im Gegensatz zu der Zickzackreflexionstheorie nur ein einziger Ausbreitungsweg um die Erde vorhanden ist.“

„Bei Annahme der wandernden Reflexion an einer ionisierten Schicht läßt sich die Erdumlaufzeit berechnen . . . der berechnete Wert von 0.1882 sec stimmt mit dem von Quack<sup>17</sup>) beobachteten von 0.1885 sec innerhalb dessen Meßgenauigkeit überein, eine Übereinstimmung, die geradezu erstaunlich gut ist.“

Weitere Einzelheiten über die Anwendung der „wandernden Reflexion“ auf die Kurzwellenausbreitung werden an anderer Stelle erscheinen, die **kurzen Andeutungen** sollten nur zeigen, daß die „wandernde Reflexion“ sich nicht etwa auf die Erscheinung der Sprengseismik beschränkt, sondern daß es sich um eine ganz allgemein gültige neue Erklärung der Totalreflexion handelt.

### Literatur

- 1) v. Schmidt: Angewandte Seismik. Zeitschr. f. Geophys. **4**, 134 (1928).
- 2) Derselbe: Theorie der 3-Schichten-Seismik. Ebenda **7**, 37 (1931).
- 3) Derselbe: Brechungsgesetz oder senkrechter Strahl? Ebenda **8**, 376 (1932).
- 4) Derselbe: Über die Totalreflexion in der Akustik und Optik. Ann. d. Phys. **19**, 891 (1934).
- 5) Derselbe: Über den Energietransport bei der Sprengseismik. Zeitschr. f. Geophys. **10**, 376 (1934).
- 6) Derselbe: Sprengseismische Untersuchungen. Ebenda **11**, 83 (1935).
- 7) H. Haalck: Lehrbuch der angew. Geophysik. Berlin, Bornträger, 1933.
- 8) H. M. Rutherford: Reflection Methods of Seismic Prospecting. Technical Publication Nr. 486.
- 9) F. Gerecke: Wellentypen, Strahlengang und Tiefenberechnung bei seismischen Eisdickenmessungen . . . Seismische Untersuchungen des Geophysikalischen Instituts in Göttingen, XI., 1933.
- 10) Mach: Wien. Berichte **95**, 765 (1887).
- 11) Derselbe: Ebenda **97**, 1045 (1888).
- 12) Derselbe: Ebenda **98**, 1257 (1889).
- 13) Derselbe: Ebenda **101**, 977 (1892).
- 14) Cranz: Lehrbuch der Ballistik.
- 15) J. Picht: Beitrag zur Theorie des Geschoßkalles. Zeitschr. f. Geophys. **3**, 224 (1927).
- 16) Forsterling und Lassen: Zeitschr. f. techn. Phys. **12**, 453, 506 (1931).
- 17) Quäck und Mögel: E. N. T. **6**, 45 (1929).
- 18) H. Fassbender: Hochfrequenztechnik in der Luftfahrt. Berlin, J. Springer, 1932.
- 19) H. Rukop: E. N. T. **10**, 41 (1933).
- 20) W. Schneeweiss: Es ist eingehend zu prüfen, ob die Möglichkeit besteht, die Schmidtsche Theorie der wandernden Reflexion auf die Wellenausbreitung innerhalb der Ionosphäre anzuwenden. Diplomarbeit Techn. Hochsch. Berlin, 1935, Institut für elektrische Schwingungslehre.

Charlottenburg, den 10. Juni 1936.