

## Werk

**Jahr:** 1934

**Kollektion:** fid.geo

**Signatur:** 8 GEOGR PHYS 203:10

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

**Werk Id:** PPN101433392X\_0010

**PURL:** [http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X\\_0010](http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0010)

**LOG Id:** LOG\_0086

**LOG Titel:** Über den Energietransport bei der Sprengseismik

**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)

## Über den Energietransport bei der Sprengseismik

(Vortrag mit erläuterndem Film auf der Pyrmonter Tagung 1934)

Von Oswald v. Schmidt, Charlottenburg — (Mit 4 Abbildungen)

Um die Erscheinungen der Sprengseismik zu erklären, wird eine Hypothese eingeführt, „Die Energie der ins zweite Medium unter Einfallswinkeln  $\cong i$  einfallenden Strahlen sei nicht gleich Null; die Strahlen laufen an der Grenzschicht entlang.“ Diese Hypothese steht nicht im Widerspruch zur Optik, sondern erklärt im Gegenteil Widersprüche bei der Totalreflexion und bei den Fresnelschen Formeln. — Alle Erscheinungen der Sprengseismik lassen sich aus dieser einen Hypothese als logische Folgerungen ableiten.

Die Ergebnisse der Sprengseismik sind vor allem deswegen von allgemeinerem Interesse, weil sie bisher noch ungeklärte Widersprüche mit den klassischen Brechungsgesetzen zeigen. Bevor wir auf diese Widersprüche näher eingehen, wollen wir uns an Hand eines Trickfilms die Ihnen allen bekannten Erscheinungen der Sprengseismik nochmals in ihrem gesamten Bewegungsverlauf ansehen (Fig. 1 stellt einen Einzelmoment des Films dar).

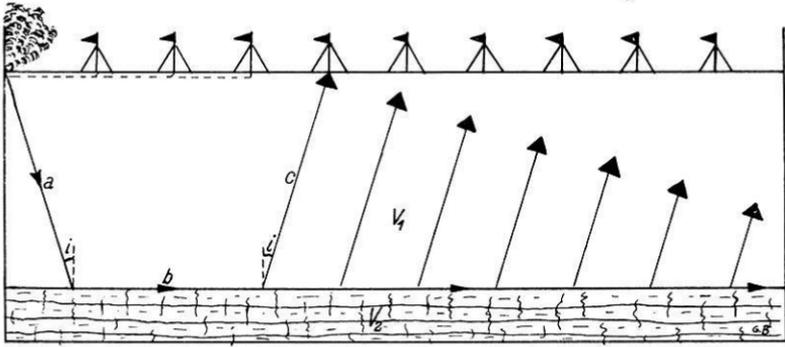


Fig. 1

Moment aus dem Erläuterungsfilm; die einzelnen Strahlen bilden eine Wellenfront, die unter dem Grenzwinkel  $i$  aufsteigt

Der Strahl bewegt sich von der Sprengstelle aus mit der Geschwindigkeit  $v_1$  nach abwärts und fällt unter dem Winkel  $i$  (unter  $i$  verstehen wir stets den Grenzwinkel der Totalreflexion) in die zweite härtere Schicht ein. Dann läuft er an der Grenze der Schicht II mit der Geschwindigkeit  $v_2$  ( $v_2 > v_1$ ) und strahlt kontinuierlich einen Teil seiner Energie wieder in die Schicht I zurück, welcher Vorgang durch die sieben aufsteigenden Strahlen im Trickfilm angedeutet ist. Besonders bemerkenswert ist, daß die Spitzen der aufsteigenden Strahlen eine gerade Front bilden, der Film zeigt also viel klarer als es mit Worten zu schildern ist, daß aus

der einzelnen Grenzwellen eine Planwelle geworden ist, die wieder unter dem Winkel  $i$  aufsteigt.

Da es in der Praxis möglich ist, diese Grenzwellen trotz der kontinuierlichen Energieausstrahlung noch bis zu 10 km Entfernung vom Sprengort nachzuweisen, so muß die Energie dieser einzelnen Grenzwellen sehr groß sein.

Andererseits soll nach den Fresnelschen Formeln (von denen die seismischen Formeln abgeleitet sind) die Energie des durchgehenden (gebrochenen) Strahles beim Grenzwinkel  $i$  gleich Null sein. Wir sehen also, daß es sich bei den Erscheinungen der Sprengseismik um einen krassen Widerspruch mit den bisherigen Brechungsgesetzen handelt.

**Einführung einer Hypothese.** Um diesen Widerspruch zu lösen, wollen wir — gestützt durch den hundertfach erwiesenen Energiefluß im Grenzstrahl — folgende Hypothese einführen: „Die Energie der ins zweite Medium unter Einfallswinkeln  $\leq i$  eindringenden Strahlen sei nicht gleich Null; die Strahlen laufen an der Grenzschicht des Medium II entlang.“

Ob diese Hypothese mit den Erscheinungen der Optik vereinbar ist, soll vorerst nicht untersucht werden, das wollen wir zum Schluß dieser Darlegungen tun\*). Es handelt sich also vorerst um die Frage, ob durch die eingeführte Hypothese alle Erscheinungen der Sprengseismik widerspruchlos erklärt werden können, erst wenn das restlos der Fall ist, haben weitere Überlegungen einen Sinn.

**Die Summation der Grenzwellen.** Wenden wir uns als erstes der Klärung des in der Sprengseismik beobachteten großen Energieflusses in der Grenzschicht zu. Wir wollen dazu ein Gedankenexperiment vornehmen und den Verlauf desselben an Hand des zweiten Trickfilms betrachten (s. Fig. 2).

Es sei  $E A B F$  ein Bergrücken aus Sand, mit der Schallgeschwindigkeit  $v_1$  ( $v_2 > v_1$ ),  $E F$  sei die Felsenunterlage mit der Geschwindigkeit  $v_2$  ( $V_2 > V_1$ ). Wir suchen uns nun ein Stück auf dem Bergrücken aus, wo der Anstiegswinkel gerade  $i$  sei ( $A B$ ) und bringen dort zwei Dynamitpatronen durch elektrische Zündung genau gleichzeitig zur Explosion, wobei ein Seismograph in  $E$  die Ankunftszeiten der beiden Strahlen registrieren soll. Der Film zeigt uns, daß die beiden Strahlen  $A C$  und  $B D C$  genau gleichzeitig, also *in Phase bei C ankommen, sich daher verstärken und summiert an der Grenzfläche weiterlaufen müssen*: „*Summation im Grenzstrahl*“.

Rechnerisch erklärt sich der Vorgang überaus einfach beim Vergleich der beiden Zeiten  $t_b$  und  $t_a$

$$\left. \begin{aligned} t_b &= \frac{b}{v_1} = \frac{a \sin i}{v_1} \\ t_a &= \frac{a}{v_2} = \frac{a \sin i}{v_1} \end{aligned} \right\} \text{somit } t_b = t_a.$$

\*) Näheres hierüber siehe v. Schmidt: „Über die Totalreflexion in der Akustik und Optik“. Ann. d. Phys. 19, 891 (1934). Dort ausführliche Literatur.

Wir können die Fläche  $AB$  nicht nur mit zwei, sondern mit beliebig vielen Sprengungen belegen, ihre Bebenstrahlen würden alle in Phase bei  $C$  ankommen, sich daher summieren. Es würde sich also um einen sehr bedeutenden Energie-transport handeln, trotzdem nur eine einzelne Welle an der Grenzschicht des Mediums II weiterläuft.

Es erhebt sich nun die Frage, wodurch diese Grenzwellen auf das Medium I wieder zurückwirkt, wie wir das bei der Sprengseismik stets beobachten. Daß diese Rückwirkung unbedingt vor sich gehen muß, ist eine logische Konsequenz unserer zu Anfang gemachten Hypothese von der Existenz des Grenzstrahles; das allgemein anerkannte Prinzip von der Umkehrbarkeit des Strahlenganges besagt ja bekanntlich, daß ein Strahl in der einen Richtung genau dieselbe Zeit braucht, wie in der umgekehrten, daß würde in unserem Falle bedeuten, daß ein Strahl von  $E$  ausgehend, gleichzeitig in  $A$  und  $B$  ankommen müßte. Der

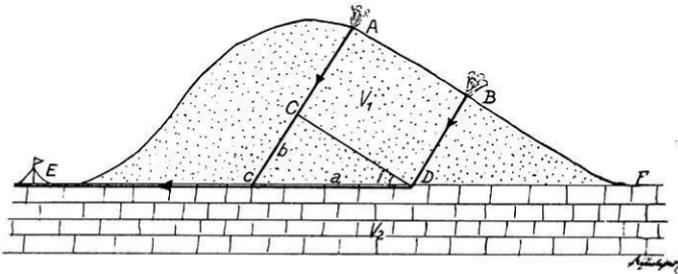


Fig. 2. Die „Summation im Grenzstrahl“. Die Strahlen  $AC$  und  $BDC$  treffen gleichzeitig in  $C$  ein und summieren sich daher. Die Intensität der Grenzwellen im Medium II ist mithin sehr bedeutend

dritte Trickfilm zeigt diesen Vorgang anschaulich, es ist alles wie in Fig. 2 geblieben, nur daß die Sprengung in  $E$  vor sich geht, und die Punkte  $A$  und  $B$  mit Seismographen belegt sind. Wenn wir den vorigen Film rückwärts drehen würden, erhielten wir übrigens dasselbe Resultat: die Grenzwellen strahlen kontinuierlich ins erste Medium herauf, es bildet sich eine Wellenfront unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion  $i$ .

Wie diese Grenzwellen im einzelnen beschaffen sind, bleibt vorläufig noch unklar, es wäre sicher verfrüht, darüber eben irgendwelche Aussagen zu machen oder rechnerische Ansätze zu versuchen, bevor nicht nähere experimentelle Ergebnisse vorliegen. Daß sich der soeben beschriebene Vorgang nicht aus den bisherigen Differentialgleichungen ergibt, liegt wohl daran, daß die Energie der Grenzwellen überhaupt nicht in Rechnung gestellt ist, und daß bei der Ableitung der Differentialgleichungen eventuell auftretende Biegungsschwingungen in der Grenzschicht nicht berücksichtigt wurden (z. B. bei Drude). Eine Verbiegung der Grenzschicht erscheint aber sehr naheliegend, wenn man in Betracht zieht, daß eine Welle mit der Geschwindigkeit  $v_2$  im unteren Medium läuft, während

sich dicht darüber ein Medium befindet, dessen Geschwindigkeit  $v_1$  bedeutend kleiner ist.

Den gesamten Vorgang (nämlich das Einfallen in die tiefere Schicht, die Summation in der Grenzwellen und das Wiederaufstrahlen) wollen wir der Kürze halber „*wandernde Reflexion*“ nennen; dieselbe muß nicht nur bei einem einmaligen Impuls einer Planwelle, sondern auch bei kontinuierlichen Planwellen auftreten, zumindest als primärer Vorgang, ob dann später Interferenzen eintreten, soll hier nicht behandelt werden.

**Die Kugelwelle bei Explosionen ist eine reine Longitudinalwelle.** Wir haben bisher nur den Fall betrachtet, daß zwei oder mehr parallele Strahlen — also eine Planwelle — in die zweite Schicht einfällt, wenden wir uns nun der im Experiment streng genommen allein gültigen Kugelwelle zu.

Bevor wir das Einfallen in die Schicht II näher betrachten, kurz einige Worte über die Fortpflanzung von Störungen in einem homogenen, isotropen, elastischen Medium.

Die grundlegenden Differentialgleichungen lauten:

$$\varrho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial x} + \mu \Delta u,$$

$$\varrho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial y} + \mu \Delta v,$$

$$\varrho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = (\lambda + \mu) \frac{\partial \Theta}{\partial z} + \mu \Delta w.$$

Diese Gleichungen sagen uns nur aus, daß eine Kompressionswelle (Longitudinalwelle) mit  $V = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\varrho}}$  auftreten *kann*, und daß eine Scherungswelle (Trans-

versalwelle) mit der Geschwindigkeit  $\mathfrak{B} = \sqrt{\frac{\mu}{\varrho}}$  auftreten *kann*, keineswegs lautet

die Folgerung aus den Gleichungen aber (wie gelegentlich in der Literatur zu finden), daß sich im Falle einer Störung des Gleichgewichts eine Longitudinal- und eine Transversalwelle allseitig ausbreiten muß. Wann im Einzelfall beide Wellenarten, oder nur eine von beiden auftritt, muß jedesmal genau geprüft werden.

Ohne auf Einzelfragen einzugehen, sei hier hervorgehoben, daß bei Sprengungen in einem homogenen isotropen elastischen Medium sich nur kugelförmige Longitudinalwellen ausbreiten können; dieses ergibt sich direkt anschauungsgemäß aus Symmetriegründen, die Querdilatationen bzw. Querkontraktionen heben sich gegenseitig auf.

Erst nachdem die longitudinale Kugelwelle eine Grenzschicht erreicht hat, kann eine Transversalwelle bzw. eine Grenzwellen auftreten.

**Die Summation bei Zylinderwellen.** Wir wenden uns nun dem Problem zu, ob auch bei Zylinderwellen (als Schnitte durch Kugelwellen) eine Summation eintreten kann. Betrachten wir hierzu Fig. 3. Der unter dem Grenzwinkel  $i$  einfallende Strahl  $r_0$  ist der Weg der kürzesten Zeit nach  $c$ . Die Frage lautet: um welchen Betrag  $\Delta t$  trifft der Impuls über den beliebigen Strahl  $r$  später in  $c$  ein?

Eine einfache Ableitung zeigt uns (siehe v. Schmidt, Ann. d. Phys.), daß bei gegebener Mächtigkeit (Tiefe)  $h$  und der Wellenlänge  $\lambda$  folgende Beziehung gilt:

$$\frac{\Delta t}{T} = \frac{h}{\lambda} \left[ \frac{1 - \cos \varphi}{\cos(i + \varphi)} \right]$$

oder

$$\frac{0.5 \lambda}{h} = \frac{1 - \cos \varphi}{\cos(i + \varphi)},$$

wobei  $i$  wie stets den Grenzwinkel bedeutet,  $T$  die Periode und  $\varphi$  den Winkel zwischen  $r_0$  und  $r$ , innerhalb dessen die Strahlen mit einer Verzögerung von  $\lambda/2$  eintreffen, innerhalb dessen also Summation erfolgt.

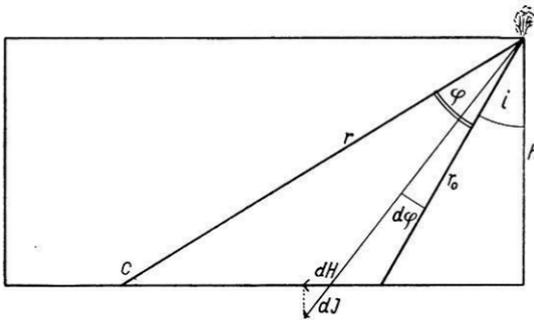


Fig. 3

Von  $r_0 - r$  treffen alle Strahlen innerhalb  $\lambda/2$  ein, summieren sich daher

Um sich ein Bild über die Größenordnung vom Summationswinkel  $\varphi$  zu machen, sind einige Werte berechnet für die Spezialfälle, daß  $i = 40^\circ$ ,  $i = 20^\circ$ ,  $i = 10^\circ$  sei:

Tabelle 1

Abhängigkeit des Summationswinkels  $\varphi$  von  $\lambda$ ,  $h$  und  $\varphi$

	$i = 40^\circ$	$i = 20^\circ$	$i = 10^\circ$	$\varphi$
$\frac{0.5 \lambda}{h} = 0.023$		0.017	0.016	$10^\circ$
„ = 0.120		0.077	0.069	$20^\circ$
„ = 0.392		0.208	0.175	$30^\circ$
„ = 1.345		0.468	0.364	$40^\circ$
		1.04	0.715	$50^\circ$
		2.88	1.46	$60^\circ$
			4.75	$70^\circ$

Z. B. wenn  $i = 10^\circ$ ,  $0.5 \lambda = 40$  m,  $h = 27$  m, so ist  $\frac{0.5 \lambda}{h} = 1.46$ , also der Summationswinkel  $\varphi = 60^\circ$ .

Wir können aus obiger Formel also entnehmen, innerhalb welchen Winkels  $\varphi$  die Strahlen nach dem Einfallen in die Schicht II sich summieren.

Eine analoge Summation wie beim Einfallen in die Schicht II tritt nun auch beim Aufsteigen ein, auch hier summieren sich alle Strahlen innerhalb des

Winkels  $\varphi$ . Zu einer Auslöschung durch die Strahlen außerhalb  $\varphi$  kann es nicht kommen, da es sich ja hierbei um die *erste eintreffende Halbwelle* handelt.

Es ist eine überraschende Erfahrung, daß Schichten, deren Geschwindigkeitsunterschied nur ganz gering ist, sich trotzdem sehr scharf seismisch nachweisen lassen. Anscheinend ist die Horizontalkomponente  $H$  des Gesamtimpulses  $J$  in der Grenzschicht der wirksame Energieüberträger. Betrachten wir ein schmales Strahlenbündel  $d\varphi$  in Fig. 3, das unter dem Grenzwinkel  $i$  in Schicht II einfällt. Dann ergibt sich die Horizontalkomponente

$$\begin{aligned} dH &= c \sin \varphi \, d\varphi, \\ H &= c \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin \varphi \, d\varphi, \\ H &= c [\cos i - \cos (i + \varphi)]. \end{aligned}$$

Die folgende kleine Tabelle zeigt, daß die Summationswirkung um so mehr in Erscheinung tritt, je weniger sich die Geschwindigkeiten der Schichten voneinander unterscheiden.

$v_1/v_2$	$i$	$H (\varphi = 20^\circ)$	$H (\varphi = 30^\circ)$
1 : 5.8	10 <sup>0</sup>	0.119	0.219
1 : 2	30	0.223	0.366
1 : 1.3	50	0.301	0.469.

Es verbleibt die Frage, welchen Weg die Strahlen nehmen, die unter einem Winkel  $< i$  auf die Grenzschicht einfallen?

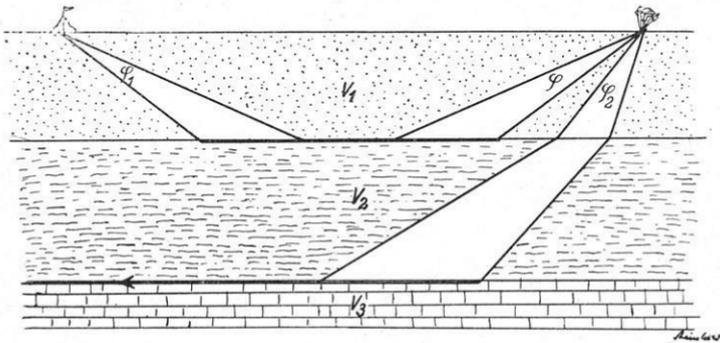


Fig. 4  
 Der Summationswinkel  $\varphi_1$  für die Grenzschicht I, II.  
 " " "  $\varphi_2$  " " " II, III

Da sich unsere Hypothese nicht auf die Strahlen  $< i$  bezog, so verlaufen diese Strahlen nach dem gewöhnlichen Brechungsgesetz, d. h. sie dringen nach der Brechung in die Schicht II ein; falls nun noch eine dritte Schicht vorhanden, wie in der angewandten Seismik sehr häufig beobachtet, so fällt der durch die

erste Grenzschicht gebrochene Strahl in die zweite Grenzschicht unter dem Grenzwinkel  $i_2$  ein, wobei analog zum vorherigen,  $v_2/v_3 = \sin i_2$ .

Einen Überblick über den Verlauf der Strahlen für zwei und für drei Schichten zeigt Fig. 4.

Wir haben somit die Gesamtheit der Erscheinungen der Sprengseismik durch die Summation im Grenzstrahl und die wandernde Reflexion erklärt. Diese beiden Vorstellungen bilden aber ihrerseits nur Folgen der Hypothese, daß ein Strahl unter dem Einfallswinkel  $\leq i$  in der Grenzschicht weiterläuft.

Für die Seismik — auch die Erdbebenseismik — ist es von Bedeutung, daß *die Strahlen unter dem Winkel  $i$  hiernach nicht nur den Weg der kürzesten Zeit, sondern auch den Weg des hauptsächlichsten Energietransports darstellen.*

Es ist ein allgemein anerkanntes Kriterium für den Wert einer Hypothese, wenn durch dieselben Erscheinungen erklärt oder vorausgesagt werden, an die ursprünglich gar nicht gedacht worden ist. Nachstehend eine kurze Übersicht über die Folgerungen aus der Summationshypothese:

**1. Für das Reflexionsschießen.** Die direkt reflektierte Energie dürfte keineswegs beim Grenzwinkel der Totalreflexion ihr Maximum haben, wie die bisherige Theorie ergab; eine „Totale Reflexion“ für einen bestimmten Punkt gibt es im Sinne dieser Arbeit überhaupt gar nicht.

Der Empfangsapparat muß jedenfalls so aufgestellt werden, daß eine summierte Grenzwellen der Verwitterungsschicht vermieden wird.

**2. Für Gebäudeerschütterungen.** Es muß stets in Betracht gezogen werden, ob es sich im gegebenen Falle nicht etwa um ein Zweischichtproblem handelt. So ist beispielsweise ein Graben um ein Gebäude als Erschütterungsschutz vollkommen illusorisch, wenn alle Bebenwellen summiert durch die darunterliegende zweite Schicht übertragen werden.

**3. Für die Erdbebenseismik.** Falls ein Herd über einer Unstetigkeitsfläche liegt, so müßte nicht nur ein Strahl längst der Brachistochrone durch das zweite Medium nach der Registrierstation gelangen, sondern es müßte eine summierte Grenzwellen an der Unstetigkeitsfläche entlang laufen und kontinuierlich an die Erdoberfläche heraufstrahlen.

Eine zweite Folgerung dieser Arbeit müßte das Fehlen von Transversalwellen bei allen von einem Explosionsbeben direkt eintreffenden Strahlen sein.

**4. Für den Einfluß von Brüchen.** Falls durch einen tektonischen Bruch Verhältnisse entstehen, die denen einer Zweischichtenlagerung analog sind (jedoch beim Horizontalschnitt), so muß es auch zur Summation und zur wandernden Reflexion kommen; in solchen Fällen müßte auf der anderen Seite vom Herd ein Bebenshatten auftreten, auf derselben Seite jedoch eine verstärkte Wirkung des Bebens. Auf derartige Erscheinungen hat Sieberg aufmerksam gemacht (vgl. Gutenberg, Geophys. 4, „Die Erdbeben“ von Sieberg).

Es verbleibt uns zum Schluß noch die Prüfung, ob die zu Anfang eingeführte Hypothese — die ja eine Änderung der Fresnelschen Formeln darstellt — nicht eventuell zu unüberbrückbaren Gegensätzen in der Optik führt, in diesem Falle wäre die Hypothese hinfällig. Eine genauere Untersuchung dieser Frage (vgl. v. Schmidt, Ann. d. Phys.) zeigt uns folgenden Sachverhalt:

1. Die Fresnelschen Formeln ergeben beim Grenzwinkel der Totalreflexion für die Amplitude des Grenzstrahles nicht wie bisher angenommen 0, sondern 21, also eine größere Amplitude als der einfallende Strahl. Dieses steht im Widerspruch zum Begriff der „Totalreflexion“ und ist ein Hinweis auf unsere Summation im Grenzstrahl, oder zum mindesten ein Hinweis, daß die Fresnelschen Formeln beim Grenzwinkel ihre Gültigkeit verlieren. Beide Ansichten geben uns jedenfalls das Recht zur Einführung unserer Hypothese.

2. Untersuchungen über die Energieverteilung bei der Totalreflexion auf Grund der Maxwell'schen Gleichungen ergeben einen merkwürdigen Widerspruch: einerseits totale Reflexion, andererseits einen Energiefluß entlang der Grenzschicht im zweiten Medium. Dieser Energiefluß im zweiten Medium ist auch experimentell mehrfach nachgewiesen worden und bildet *ein überraschendes optisches Analogon zu der seismischen Grenzwellen im zweiten Medium.*

Wir sind also auf Grund dieses Sachverhalts in der Optik durchaus berechtigt, unsere anfängliche Hypothese einzuführen, ja es scheint sogar, als ob die — sich aus der Seismik ergebende — Summation im Grenzstrahl und die wandernde Reflexion die bisher vorstellungsgemäß unklaren Erscheinungen der Optik zu erklären vermögen. Natürlich dürfen die Ergebnisse der Seismik nur auf den ersten Impuls bei der Optik übertragen werden; daß sich beim späteren stationären Zustand der kontinuierlichen Schwingung Interferenzen einstellen werden, ist ja selbstverständlich; daß bei den seismischen Erscheinungen eine gewisse Dämpfung vorhanden ist, dürfte dagegen für die angeführte Analogie keine wesentliche Rolle spielen.

Die vielen Folgerungen aus der Summation und wandernden Reflexion, unter anderem auch auf die Schallausbreitung in der Atmosphäre und die drahtlose Telegraphie, lassen es als berechtigt erscheinen, die Hypothese einer experimentellen Prüfung zu unterziehen. Die ersten Ergebnisse einer dahinzielenden Prüfung der Hypothese sollen in nachfolgendem Vortrag geschildert werden.