

## 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\_0039

**LOG Titel:** Seismische Untersuchungen des Geophysikalischen Instituts in Göttingen

**LOG Typ:** section

## 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)

# Seismische Untersuchungen des Geophysikalischen Instituts in Göttingen

## XV. Schallausbreitung in der Atmosphäre

Von **Herbert Regula** — (Mit 12 Abbildungen)

Der erste Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit den Ergebnissen der Auswertung von 775 Schallregistrierungen des Geophysikalischen Instituts Göttingen aus den Jahren 1923 bis 1929, insbesondere hinsichtlich der Abhängigkeit der Schallausbreitung von Azimut und Jahreszeit und der Möglichkeit von Höhenwindmessungen durch Schallsprengungen. Im zweiten Teil werden die verschiedenen Theorien über das Zustandekommen des anomalen Schalles vom physikalischen Standpunkt aus diskutiert. Der dritte Teil beschäftigt sich mit einer ersten Auswertung der Registrierungen von der Oldebroek-Sprengung am 15. Dezember 1932. Es wird erstmalig eine Krümmung der Laufzeitkurve des anomalen Schalles im Ostprofil (konvex zur  $A$ -Achse) und der Beginn dieser Laufzeitkurve mit Sicherheit festgestellt. Das Ende bleibt unsicher. Die genauere Untersuchung läßt eine seitliche Drehung der Wellenfront um etwa  $5^\circ$  vermuten. Ob Reflexion an einer hoch gelegenen Schichtgrenze oder stetige Umbiegung der Strahlbahnen vorliegt, läßt sich nicht entscheiden.

### I. Ergebnisse von Schallsprengungen in den Jahren 1923 bis 1929

In den Jahren 1923 bis 1929 wurden mit Unterstützung der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft zahlreiche Sprengversuche unternommen, um die Ausbreitung der Schallwellen in der Atmosphäre und den Grund für das Auftreten einer anomalen Hörbarkeitszone zu erforschen. Im Rahmen dieses Programms sind durch das Göttinger Geophysikalische Institut in jener Zeit 775 Schallregistrierungen ausgeführt worden. Einzelergebnisse wurden bereits in mehreren Arbeiten von Wiechert und von Angenheister veröffentlicht. Eine zusammenfassende Darstellung des Materials nach geophysikalischen und meteorologischen Gesichtspunkten bringt die vorliegende Arbeit.

Zur Ergänzung wurden gelegentlich die Aufzeichnungen der geophysikalischen bzw. meteorologischen Institute in Jena, Lindenberg und Potsdam herangezogen.

#### 1. Die Möglichkeit einer Höhenwindmessung durch Schallbeobachtungen.

In der Höhe von 35 bis 45 km über dem Erdboden liegt vermutlich eine starke Inversion, welche vom Boden kommende Schallwellen zurückwirft und dadurch Anlaß zur Entstehung einer anomalen Schallzone gibt\*). Bei windstiller Atmosphäre hat diese Außenzone die Gestalt eines Kreisringes, und in gleichen Ent-

\*) Als Einführung in die Probleme der Luftseismik siehe: Meisser: Handb. d. Experimentalphysik 25, 3. (Abschnitt „Luftseismik“) oder Duckert: Ergebn. d. kosm. Phys. 1. — Beide Darstellungen enthalten ausführliche Literaturverzeichnisse.

fernungen werden gleiche Laufzeiten gemessen. Abweichungen sind auf den Einfluß des Windes zurückzuführen. Es muß deshalb möglich sein, aus diesen Abweichungen, nämlich der besonderen Gestalt der Außenzone, und aus Laufzeitvergleichen in verschiedenen Azimuten Schlüsse auf die Windverteilung in dieser Höhe zu ziehen.

A. Wegener\*) hat aus Ohrbeobachtungen die Lage der Außenzone zu ermitteln gesucht und dabei festgestellt, daß der Schall im Sommer vorzugsweise im Westen, im Winter dagegen im Osten wahrgenommen wird. Abweichend hiervon fanden Hergesell und Duckert\*\*) in den von ihnen untersuchten Fällen eine mehr oder weniger ringförmige Gestalt der Außenzone.

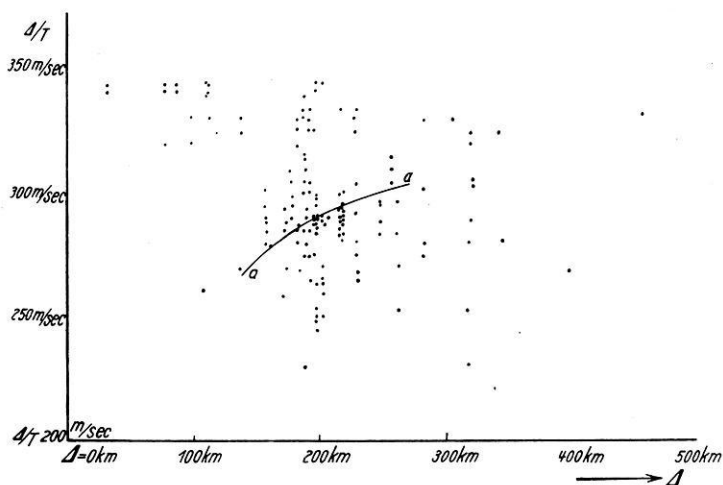


Fig. 1. Überführungsgeschwindigkeiten als Funktion der Entfernung

Kurve a berechnet: am Boden  $+10^{\circ}$  C, von 10—35 km Isothermie  $-50^{\circ}$  C, darüber Inversion. Windstille in allen Schichten

Heute steht neben den Ohrbeobachtungen ein umfangreiches Registriermaterial zur Verfügung, das den Vorteil größerer Zuverlässigkeit und größerer Anwendungsmöglichkeit besitzt. Die folgenden Untersuchungen beziehen sich daher nur auf photographische Registrierungen der Institute in Göttingen, Jena, Lindenberg und Potsdam.

Zur Ermittlung der Gestalt der Außenzone und der daraus möglichen Ableitung der Windverhältnisse in 20 bis 45 km Höhe kann man naturgemäß nur solche Schallstrahlen heranziehen, die diese Schichten durchlaufen haben. Eine vollständige Berechnung des Weges der Schallwellen ist — wie später eingehender

\*) Zeitschr. f. Geophys. 1, „Die äußere Hörbarkeitszone“.

\*\*) Hergesell: Die Arbeiten der Kommission zur Erforschung der Schallausbreitung in der Atmosphäre. Lindenberg 1927.

besprochen werden wird — gegenwärtig nicht möglich. Man ist daher auf Schätzungen über die erreichte Höhe angewiesen. Einen Anhaltspunkt hierfür bietet die Überführungsgeschwindigkeit  $\Delta/T$  ( $\Delta$  = Herdentfernung,  $T$  = Laufzeit). Je größer der Umweg eines Strahles ist, desto kleiner wird im allgemeinen seine Überführungsgeschwindigkeit sein. Fig. 1 enthält die beobachteten  $\Delta/T$ -Werte als Funktion der Entfernung. Das Intervall von 180 bis 200 km zeigt, daß dort je nach der Wetterlage alle Überführungsgeschwindigkeiten zwischen 240 und 340 m/sec vorkommen. Demnach können auch alle Scheitelhöhen zwischen 0

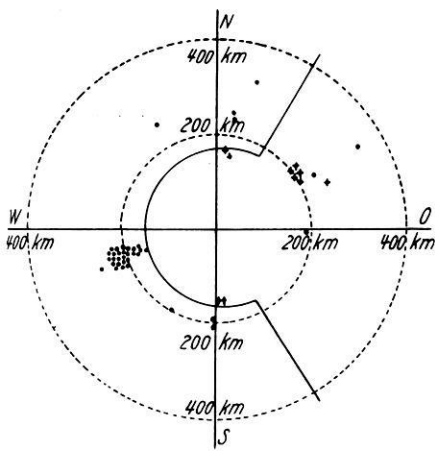


Fig. 2

Anomale Schallzone Mai—August

● Anomale Wellen registriert, + keine anomalen Wellen registriert

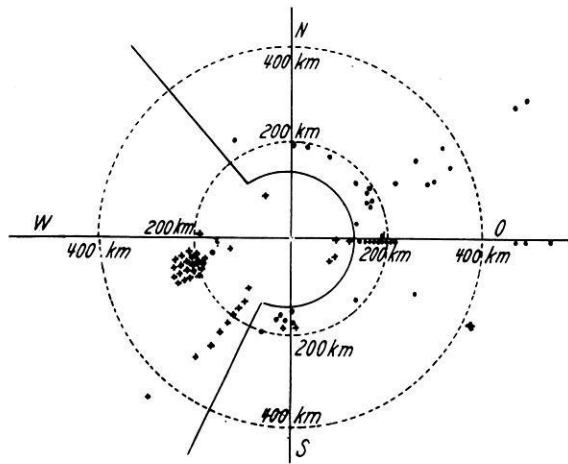


Fig. 3

Anomale Schallzone September—April

● Anomale Wellen registriert, + keine anomalen Wellen registriert

und 40 km — und noch darüber — auftreten. Man darf daher nicht sämtliche beobachteten Schalleinsätze zur Bestimmung der Höhenwinde verwenden. Als Kriterium diene die Kurve *a* in Fig. 1. Sie stellt die Überführungsgeschwindigkeiten für den Fall dar, daß die Strahlen durch eine windstille Atmosphäre laufen und die Umbiegung in 35 km Höhe beginnt. Nur Punkte, die unterhalb der Kurve *a* liegen (kleine Überführungsgeschwindigkeit: großer Umweg) wurden in die folgenden Zusammenstellungen als anomale Wellen aufgenommen. Natürlich können vereinzelt Punkte oberhalb dieser Kurve liegen, deren zugehöriger Laufstrahl wegen Rückenwind in der zur Verfügung stehenden Zeit Höhen über 35 km erreicht hat.

Die Anordnung der Beobachtungen des anomalen Schalles nach Entfernung, Azimut und Jahreszeit in den Fig. 2 und 3 ergab eine Abhängigkeit der Schallausbreitung sowohl vom Azimut als auch von der Jahreszeit.

Nördlich und südlich vom Sprengherd wurden zu jeder Jahreszeit anomale Wellen registriert. Im Osten waren die Ergebnisse im Winter stets positiv, im Sommer überwiegend negativ. Der Westen hatte im Sommer regelmäßigen Schallempfang, im Winter blieben dagegen die Wellen aus.

Dieses Resultat läßt sich bei Aufrechterhaltung des Brechungsgesetzes durch zwei Annahmen erklären:

1. In der Umbiegehöhe herrschen im Sommer Ostwinde, im Winter Westwinde.
2. Der Zustand der Atmosphäre in 40 km Höhe ist derart, daß auch bei Windstille die Schallwellen zurückgebogen würden.

Denn nach dem Brechungsgesetz gilt für die Schallgeschwindigkeit  $v_S$  in einem Scheitel die Beziehung:

$$v_S = \sqrt{\frac{\kappa \cdot R \cdot T}{\mu}} + w \geq v_B \dots \dots \dots (1)$$

- $v_B$  = Schallgeschwindigkeit am Boden;
- $w$  = Windgeschwindigkeit;
- $\kappa$  =  $c_p/c_v$ ;
- $R$  = Gaskonstante für Luft;
- $T$  = absolute Temperatur;
- $\mu$  = mittleres Molekulargewicht der Luft.

Keine Rückbiegung der Schallwellen, d. h.  $v_S < v_B$ , wird am ehesten in der Gegenwindrichtung eintreten. Deshalb folgt aus der Schallfreiheit nur des Westsektors im Winter, daß zu jener Zeit in der Umbiegehöhe Westwinde herrschen. Für den Sommer gelangt man dementsprechend zur Annahme von Ostwinden.

Bei jenen Strahlen, die den Sprengherd in nördlicher und südlicher Richtung verlassen, findet keine merkliche Beeinflussung der Schallgeschwindigkeit, weder durch Ost- noch durch Westwinde statt. Ihre Rückkehr zum Erdboden zeigt an, daß bereits die Beziehung (1) erfüllt ist. Die Umbiegung der Wellen müßte auch in einer windstillen Atmosphäre erfolgen. Der hierzu erforderliche Anstieg der Schallgeschwindigkeit von etwa 300 m/sec in der Stratosphäre auf mindestens 340 m/sec in 40 km Höhe wird vermutlich durch ein entsprechendes Anwachsen der Temperatur bewirkt.

Eine zweite Möglichkeit zur Abschätzung des Windeinflusses bietet der Vergleich von Laufzeiten, die bei derselben Sprengung in verschiedenen Azimuten gemessen wurden. Es ist zu erwarten — wenn auch keineswegs notwendig —, daß in Richtung des oberen Windes die Laufzeiten ein Minimum aufweisen. Tabelle 1 zeigt, daß dies in allen verfügbaren Fällen zutrifft.

Der Laufzeitenvergleich zwischen den Ringstationen bei der Oldebroek-Sprengung vom 15. Dezember 1932 wird an späterer Stelle behandelt.

Für die Beobachtungen am 27. Mai 1927 sind genauere Angaben über die Windverteilung möglich. Nach einem Lindenberger Registrierballonaufstieg herrschten vom Boden bis in 19 km Höhe Westwinde. Ein Strahl im Göttinger

Azimet mußte in jener Schicht gegenüber einem Strahl im Greifswalder Azimet eine Verspätung erleiden. Um die in Wirklichkeit beobachtete Gleichheit der reduzierten Laufzeiten erklären zu können, ist für die Schichten oberhalb 19 km die Annahme von Ostwinden (Geschwindigkeit 12 m/sec) erforderlich. An der Gipfelhöhe des Lindenberger Aufstiegs bei 20.6 km ist die Windrichtung bereits SEzS.

Tabelle 1. Vergleich der Laufzeiten in verschiedenen Azimuten

Datum	Station westlich vom Sprengherd	Gegenstation östlich	Differenz der Azimute	Laufzeiten in sec auf 200 km reduziert			Oberer Wind
				W	O	O—W	
3. V. 23	Clausthal	Grünberg	169 <sup>0</sup>	653	673	19	O
26. VI. 26	Göttingen	Neuteich	165	680	693	13	O
17. VII. 28	Göttingen	Schlochau	158	692	813	121	O
20. XI. 26	St. Andreasberg	Landsberg	162	755	655	— 100	W
27. V. 27	Göttingen	Greifswald	110	704	701	— 3	(O)
18. VI. 27	Göttingen	Greifswald	110	687	739	52	O
18. VIII. 27	Göttingen	Greifswald	110	711	729	18	O

Der jahreszeitliche Gang der oberen Luftströmung läßt sich am besten an Hand der 96 Registrierungen erkennen, die in Göttingen von Sprengungen in Jüterbog gemacht wurden. Die Beobachtungen erstrecken sich über 6 Jahre.

Tabelle 2. Registrierungen in Göttingen bei Sprengungen in Jüterbog ( $\Delta = 216$  km westlich.)

	Jan.	Febr.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Gesamtzahl . . . . .	5	—	4	—	5	9	10	4	4	41	4	10
Anomale Wellen beobachtet . .	—	—	—	—	4	9	9	4	—	—	—	—
Anomale Wellen fraglich . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2	—	—
Keine anomalen Wellen beobachtet	5	—	4	—	1	—	1	—	4	39	4	10

Von Mitte Mai bis in den August hinein sind es Ostwinde, welche die regelmäßige Hörbarkeit im Westsektor bewirken. Die einmalige negative Julibeobachtung erklärt sich daraus, daß mit einem seismischen Apparat, dem Zweimillionenpendel, registriert wurde. Im Winter, d. h. hier vom September bis April einschließlich, scheint niemals Schall von Jüterbog nach Göttingen gekommen zu sein.

Eine gewisse Unsicherheit entsteht dadurch, daß gerade in den Wintermonaten viele Aufzeichnungen durch starken Wind gestört sind, wodurch leicht ein schwacher Schalleinsatz verdeckt sein könnte. Alle bei Windstille registrierten Kurven sind indes im Winter zweifellos schallfrei.

Die beiden Zeitpunkte, in denen die obere Luftströmung ihre Richtung wechselt, lassen sich noch nicht genau angeben, weil zu den in Frage kommenden Zeiten die Beobachtungen relativ spärlich sind. Die zweite Maihälfte sowie die

erste Hälfte des August gehören noch zu der Zeit, wo ein Schallempfang im Westen möglich ist. Dagegen sind Oktober und März offensichtlich schallfrei. Wegener spricht in der bereits erwähnten Arbeit von einer ganz ähnlichen jahreszeitlichen Verteilung.

**2. Die Sprengungen am 27. Mai 1927.** Bei diesen Sprengungen waren längs der Verbindungslinie Jüterbog—Göttingen vier Stationen aufgebaut. Ihre Entfernungen betragen: Jüterbog—Gieboldehausen 195.9 km, Gieboldehausen—Wollbrandshausen 5.78 km, Wollbrandshausen—Waake 7.50 km, Waake—Göttingen 6.85 km.

Die Zeitmarkierung wurde vom Göttinger Geophysikalischen Institut drahtlos auf die einzelnen Stationen übertragen, so daß überall die gleichen

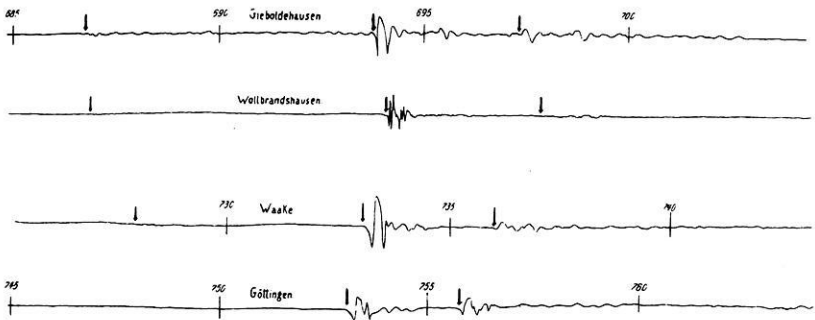


Fig. 4. Registrierungen im Westprofil am 27. Mai 1927\*)

Sekundenmarken vorhanden sind. Bei einer Registriergeschwindigkeit von 3 cm/sec sind die Einsatzzeiten zuweilen doch nicht genauer als auf  $\frac{1}{10}$  sec bestimmbar, weil der Einsatz nicht immer scharf erfolgt.

Das Ausbleiben normaler Wellen. Trotzdem die Kurvenbilder so gut wie störungsfrei sind, lassen sich auf keiner Registrierung Anzeichen normaler Wellen erkennen. Bei 96 Sprengungen in Jüterbog konnte normaler Schall in Göttingen nur einmal aufgezeichnet werden. Im allgemeinen scheint der Harz, über dessen östlichen Teil die Verbindungslinie Jüterbog—Göttingen führt, die in den bodennahen Schichten laufenden normalen Wellen aufgehalten zu haben.

Die Laufzeitkurven der anomalen Wellen. Anomale Schalleinsätze treten am 27. Mai 1927 an den vier Profilstationen regelmäßig und mit großen Amplituden auf. Jede Registrierung zeigt mehrere Einsätze im Abstand von einigen Sekunden (s. Fig. 4). Für jeden dieser Einsätze, der sich auf den anderen Stationen wiederfinden ließ, wurde eine Laufzeitkurve gezeichnet (Fig. 5).

\*) Bei „Wollbrandshausen“ hat die drahtlose Zeitmarkierung versagt. Auf Grund der bekannten Registriergeschwindigkeit kann man aber den zeitlichen Abstand der einzelnen Einsätze feststellen.

Hier ist zum ersten Male das Fortschreiten bestimmter Wellenfronten an der Ähnlichkeit der Schwingungsbilder längs einer Strecke von 20 km verfolgt worden.

Die Laufzeitkurven, welche zu den einzelnen Einsatzgruppen gehören, sind mit guter Näherung gerade Linien. Sichere Angaben über eine etwaige Krümmung der Laufzeitkurven sind nicht möglich, da die Laufzeiten zwischen zwei Nachbarstationen sich von einer Sprengung bis zur nächsten in 7 Minuten Abstand um einige Zehntel Sekunden geändert haben. Bei der Sprengung um 18<sup>h</sup> 30<sup>m</sup> ist infolgedessen die Laufzeitkurve ein wenig konkav zur  $\Delta$ -Achse gekrümmt, bei der folgenden Sprengung findet man exakt eine Gerade. Die Ursache der Laufzeit-schwankungen liegt vermutlich in den wechselnden Windverhältnissen in der

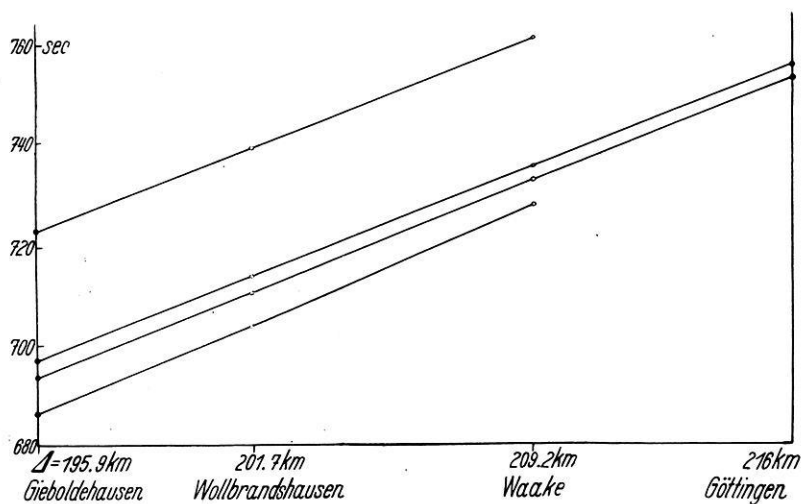


Fig. 5. Laufzeitkurven im Westprofil am 27. Mai 1927

Troposphäre. Daher läßt sich nicht entscheiden, auf welcher dieser Laufzeitkurven weitere Untersuchungen aufzubauen sind.

Berechnung von Strahlbahnen. Durch die Bestimmung des Weges, den die Schallwellen durch die Atmosphäre genommen haben, soll die Schallgeschwindigkeit in den Schichten von 25 bis 45 km Höhe ermittelt werden. Das Resultat solcher Berechnungen wird um so mehr an Wert gewinnen, je weiter hinauf die momentane Verteilung der Schallgeschwindigkeit aus Aufstiegen bekannt ist.

Tabelle 3. Emergenzwinkel

	1. Sprengung	2. Sprengung	3. Sprengung	4. Sprengung
2. Einsatz . . . . .	13°	13.5°	9.5°	14°
3. „ . . . . .	16	16.5	11.5	
4. „ . . . . .	17.5		14	
5. „ . . . . .				17.5



Zur Bestimmung der Strahlbahnen müssen die Emergenzwinkel am Erdboden gemessen sein. Diese Winkel liegen am 27. Mai 1927 zwischen  $10$  und  $18^\circ$ . Zu den späteren Einsätzen gehören stets die größeren Emergenzwinkel (s. Tabelle 3).

Aus den Daten eines Lindenberger Registrierballonaufstiegs und den Schallbeobachtungen im Westprofil kann man die Strahlbahnen bis zu der Höhe von  $20.6$  km festlegen. Für die oberen Schichten muß eine Verteilung der Schallgeschwindigkeit gefunden werden, die einerseits zu den beobachteten Laufzeit-

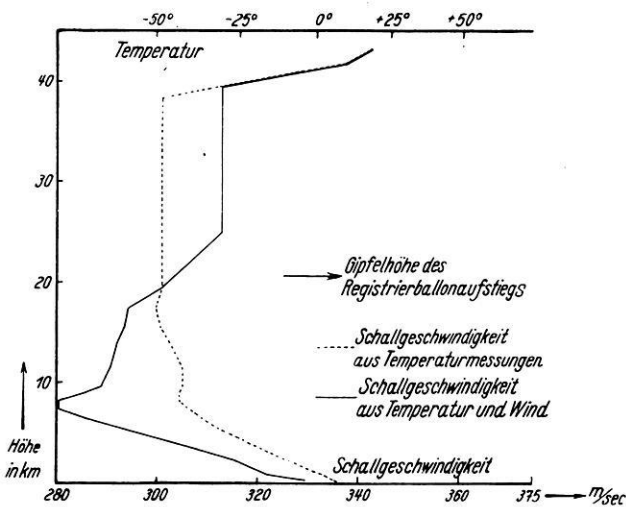


Fig. 6. Schallgeschwindigkeit als Funktion der Höhe am 27. Mai 1927 im Westprofil

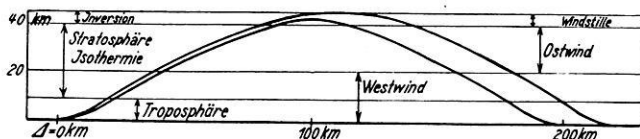


Fig. 7. Strahlbahnen (berechnet) am 27. Mai 1927

werten führt, andererseits mit den vereinzelt gelungenen direkten meteorologischen Messungen [Hamburger Hoचाufstiege\*)] noch im Einklang steht. Fig. 6 zeigt die bei den Rechnungen angenommene Geschwindigkeitsverteilung.

Wesentlich ist die Einbeziehung von Ostwinden in die Rechnung gemäß den Ergebnissen des vorigen Kapitels.

Für die Bestimmung der Strahlbahnen wurde das Gebiet vom Erdboden bis zu  $20.6$  km Höhe in 16 Schichten zerlegt. In diesen wurden die Strahlen als gebrochene Linienzüge unter Verwendung des Emdenschen Brechungsgesetzes für

\*) Frankenberger: Annalen der Hydrographie und maritimen Meteorologie **59**, Jahrg. 1931. „Hochfahrten von Registrierballonen“.

eine windbewegte Atmosphäre berechnet. Von 25 bis 39.8 km Höhe wurde die Schallgeschwindigkeit als konstant angenommen und über 39.8 km so, daß die Strahlen stetig in Form einer Zykloide umgebogen werden\*).

In Fig. 7 ist die Gestalt der Strahlbahnen dargestellt, die auf diese Weise aus den Beobachtungen der ersten Sprengung abgeleitet wurden. Der in Gieboldehausen registrierte Strahl kulminiert in 42.2 km Höhe bei einer Temperatur von  $+9^{\circ}\text{C}$ , der Göttinger Strahl in 43.4 km Höhe bei  $+18^{\circ}\text{C}$ .

Die Späteinsätze. Die oberste Linie in Fig. 5 entspricht einem Einsatz, welcher auf den Kurvenbildern (Fig. 4) nicht mehr enthalten ist, weil er erst etwa  $30^{\circ}$  nach dem Haupteinsatz auftritt.

Fig. 8 zeigt die Registrierung der Station Gieboldehausen um  $19^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ . Nach einer besonders starken Amplitude im Haupteinsatz (zweite Zeile links) erfolgt

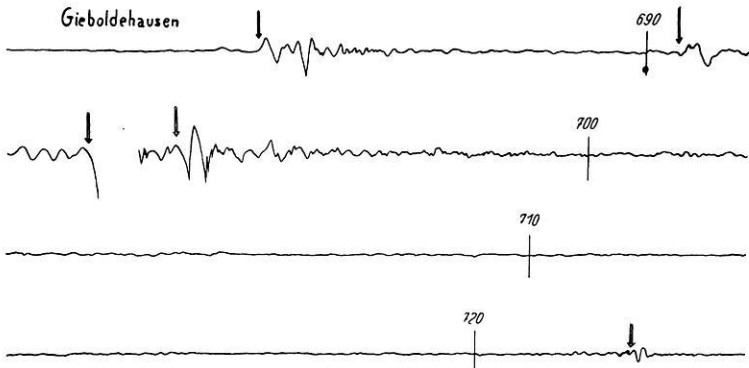


Fig. 8. Registrierung in Gieboldehausen am 27. Mai 1927,  $19^{\text{h}} 30^{\text{m}}$ .

eine allmähliche Abnahme der Schwingungen bis zu kaum merklicher Unruhe, welche nach etwa  $30^{\circ}$  (unten rechts) durch einen echoartigen, mehrfach schwächeren Einsatz unterbrochen wird. Ähnliches läßt sich auf acht Filmen desselben Tages nachweisen. Der gleiche Späteinsatz tritt am 26. Juni 1926 in St. Andreasberg — ebenfalls nach einer außergewöhnlich großen Amplitude des Haupteinsatzes — auf. Es kann sich hier also nicht um eine fremdartige Störung handeln.

Der Weg eines solchen Spätstrahles durch die Atmosphäre ist nicht genau festzustellen, weil die Ermittlung des Emergenzwinkels unsicher ist. Wahrscheinlich ist er größer als der Emergenzwinkel des Hauptstrahles. In diesem Falle ließe sich das Zustandekommen der Späteinsätze am einfachsten durch die Annahme zweier Sprungschichten erklären. Die untere reflektiert den Hauptanteil der vom Sprengherd ankommenden Energie, der durchgehende Wellenzug wird an der oberen Sprungfläche teilweise reflektiert. Diese Deutung steht jedoch nicht in Einklang mit der in Fig. 7 dargestellten stetigen Umbiegung der Hauptstrahlen.

\*) Formeln siehe Duckert: Ergebnisse der kosmischen Physik 1.

## II. Vorstellungen über den Aufbau der Atmosphäre

Die Erscheinungen der Zone des Schweigens und der Zone der anomalen Hörbarkeit zwingen zu der Ansicht, daß die Schallwellen von Explosionen zunächst vom Herd aus in die Atmosphäre eindringen und später in größeren Entfernungen zum Erdboden zurückkehren. Bei Gültigkeit des Brechungsgesetzes erhält man als Bedingung für die Umkehr der Schallwellen das Vorhandensein einer Schicht, in der die Schallgeschwindigkeit größer ist als am Erdboden ( $v = 338$  m/sec am Erdboden, entsprechend einer mittleren Temperatur von  $+10^{\circ}$  C und Windstille).

Nach der Formel (1) (S. 170) können die erforderlichen Geschwindigkeitswerte erreicht werden

1. durch ein Anwachsen der Temperatur von etwa  $-50^{\circ}$  in der Stratosphäre auf mindestens  $+10^{\circ}$  C in 40 km Höhe;
2. durch eine Abnahme des Molekulargewichts vom Bodenwert 28.9 auf den Wert 22.8 und weniger.
3. durch Windeinfluß (Geschwindigkeit mindestens 40 m/sec);
4. durch das Auftreten von Überschallgeschwindigkeit.

Die erste Annahme scheint die geeignetste Arbeitshypothese für Schalluntersuchungen zu sein. Sie wird an späterer Stelle noch ausführlich behandelt. Die unter 2. bis 4. angeführten Erklärungsmöglichkeiten sind bereits in früheren Arbeiten unter Angabe verschiedener Gründe abgelehnt worden.

Gegen die Annahme, daß Wind die alleinige Entstehungsursache der anomalen Schallzone ist, spricht die Beobachtung anomaler Wellen bei einigen Sprengungen in nahezu entgegengesetzten Azimuten. Ferner ergab die Untersuchung der Gestalt der Außenzone, daß sowohl nördlich als auch südlich vom Sprengherd fast immer anomale Wellen registriert wurden (Fig. 2 und 3).

Der von A. Wegener\*) vertretenen Ansicht, daß Überschallgeschwindigkeit bei der Rückkehr der Wellen wirksam sei, widerspricht die Unabhängigkeit der Laufzeiten von der Sprengmenge. Dieses von Meisser\*\*) angeführte Argument hat sich auch mit Hilfe der Schallregistrierungen des Göttinger Instituts bestätigen lassen. Dabei wurden nur Laufzeitbeobachtungen von Sprengungen verglichen, deren zeitlicher Abstand nicht mehr als  $10^m$  betrug.

Die Abweichungen betragen durchschnittlich  $1^0/_{00}$  und zeigen unregelmäßig wechselndes Vorzeichen. Die Laufzeiten hängen also nicht von der Sprengmenge ab.

Die bisher angeführten vier Erklärungsmöglichkeiten für die Außenzone: Zunahme der Temperatur, Abnahme des Molekulargewichts, Windeinfluß und Überschallgeschwindigkeit setzen die unbeschränkte Gültigkeit des Brechungs-

---

\*) Wegener: Zeitschr. f. Geophys. 1 (1925). Die äußere Hörbarkeitszone.

\*\*) Meisser: Handbuch der Experimentalphysik 25, 3.

gesetzes voraus. Dagegen vertreten Kölzer\*) und Sandmann\*\*) die Ansicht, daß das Brechungsgesetz zur Erklärung des anomalen Schalles nicht immer herangezogen werden darf. Nach Kölzers Beobachtungen trat in 5 bis 10 km Herdentfernung eine Zone des Schweigens und eine Zone anomaler Hörbarkeit auch dann auf, wenn die Schallgeschwindigkeit mit wachsender Höhe über dem

Tabelle 4. Laufzeitenvergleich

Beobachtungsstationen	Zeitdifferenz in Minuten	2. Sprengmenge 1. Sprengmenge	2. Laufzeit — 1. Laufzeit in sec
Jüterbog, 17. Juni 1927. Sprengungen 18 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> und 18 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup>			
Sachsa . . . . .	7	2	+ 0.1
Kreuzbusch			
Göttingen . . . . .	7	2	+ 0.7
Jüterbog, 17. Juni 1927. Sprengungen 19 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> und 19 <sup>h</sup> 37 <sup>m</sup>			
Sachsa . . . . .	7	2	— 0.6
Kreuzbusch . . . . .	7	2	+ 0.8
Göttingen . . . . .	7	2	+ 0.2
Jüterbog, 18. Juni 1927. Sprengungen 1 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup> und 1 <sup>h</sup> 22 <sup>m</sup>			
Kreuzbusch . . . . .	7	0.5	— 1.3
Sachsa . . . . .	7	0.5	+ 1.4
Ebergötzen . . . . .	7	0.5	— 2.5
Göttingen . . . . .	7	0.5	— 0.1
Jüterbog, 21. Juli 1927. Sprengungen 19 <sup>h</sup> 30 <sup>m</sup> und 19 <sup>h</sup> 35 <sup>m</sup>			
Wollershausen . . . . .	5	2	0.0
Wurzbach I . . . . .	5	2	— 0.3
„ II . . . . .	5	2	— 0.3
„ III . . . . .	5	2	— 0.3
Jüterbog, 22. Juli 1927. Sprengungen 1 <sup>h</sup> 10 <sup>m</sup> und 1 <sup>h</sup> 15 <sup>m</sup>			
Wollershausen . . . . .	5	0.5	+ 0.1
Göttingen . . . . .	5	0.5	— 0.2
Wurzbach I . . . . .	5	0.5	— 0.7
„ II . . . . .	5	0.5	— 0.6
„ III . . . . .	5	0.5	— 0.6

Erdboden zunächst abnahm und dann konstant blieb. Dies ist mit dem Brechungsgesetz unvereinbar und deutet vielleicht auf beugungsartige Vorgänge. Weil im Falle Troposphäre—Stratosphäre eine ganz ähnliche Geschwindigkeitsverteilung vorliegt, kann die Erscheinung der anomalen Hörbarkeitszone nach

\*) Kölzer: Beobachtungsergebnisse über Schallausbreitung auf nahe Entfernungen. Veröffentlichungen des Preußischen Meteorologischen Instituts, Berlin 1932.  
 \*\*) Sandmann: Beiträge zur Schallfortpflanzung, im besonderen zur Schallbeugung und anomalen Schallfortpflanzung. Gerlands Beiträge z. Geophys. 28, 1930.

Kölzers Ansicht ebenfalls durch ähnliche Vorgänge erklärt werden. Eine physikalische Deutung für diese Ausbreitung der Schallwellen ist aber noch nicht gegeben worden.

Bei den Oldebroek-Sprengungen am 15. Dezember 1932 bestand die Möglichkeit, einen Fortschritt in der Frage nach der Umkehrursache zu erzielen. Wenn die Ozonschicht sich durch die Absorption des ultravioletten Sonnenlichts stark erwärmt und infolgedessen die Schallwellen zum Erdboden reflektiert, so muß bei genügend langer nächtlicher Ausstrahlung die Rückkehr der Schallwellen unterbleiben. Um die in unseren Breiten größtmögliche Abkühlungszeit für die Ozonschicht auszunutzen, wurden die Oldebroek-Sprengungen auf 7<sup>h</sup> 00<sup>m</sup>, 7<sup>h</sup> 06<sup>m</sup>, 8<sup>h</sup> 00<sup>m</sup> und 8<sup>h</sup> 06<sup>m</sup> MEZ angesetzt. Die Sonne ging am 15. Dezember um 8<sup>h</sup> 01<sup>m</sup> MEZ in 45 km Höhe über Oldebroek auf.

Ein Ausbleiben anomaler Schalleinsätze auf allen Registrierstationen wäre ein starkes Argument für die Richtigkeit der Temperaturhypothese gewesen. Andererseits widerspricht die tatsächlich erfolgte Feststellung anomaler Wellen noch nicht der Annahme einer Inversion in 40 km Höhe. Die zur Erwärmung der Ozonschicht nötige Energie braucht nicht allein aus der ultravioletten Sonnenstrahlung zu stammen\*). Außerdem sind möglicherweise die Tagestemperaturen der Ozonschicht derart hoch, daß auch in der längsten Nacht unserer Breiten keine Abkühlung bis unter den Wert der Temperaturen am Erdboden erfolgt.

Eine Berechnung der Temperaturen der Ozonschicht mit Hilfe der Theorie des Strahlungsgleichgewichts ist noch nicht möglich, weil der Anteil des Wasserdampfs in größeren Höhen und die Ozonabsorption im Ultraroten zu wenig bekannt sind.

Der Vergleich von Schallbeobachtungen bei Tag- und Nachtsprengungen deutet darauf hin, daß — wenigstens am unteren Rand der Ozonschicht — ziemlich stationäre Verhältnisse herrschen. Weder an den Amplituden noch an den Laufzeiten hat sich ein Unterschied zwischen Tag- und Nachtsprengungen feststellen lassen.

Die Schallbeobachtungen zeigen weiter an, daß der mutmaßliche Temperaturanstieg nach oben hin rasch erfolgt. Duckert\*\*) berechnete einen Gradienten von 1.2<sup>0</sup>/100 m, ebenso Gutenberg\*\*). Meine Rechnungen führten für die Sprengungen am 27. Mai 1927 zu dem Wert von 1.75<sup>0</sup>/100 m und für die Oldebroek-Sprengungen zu 2.5<sup>0</sup>/100 m. Mit den Laufzeitmessungen der Profilstationen am 27. Mai 1927 und am 15. Dezember 1932 ist sogar die Annahme von Sprungflächen in etwa 40 km Höhe vereinbar. Die am 26. Juni 1926 und am 27. Mai 1927 beobachteten Späteinsätze führen zu denselben Vorstellungen.

Damit eine Sprungfläche der Temperatur auftreten kann, müßte die Ozonschicht nach unten scharf begrenzt sein. Eine ähnliche scharfe untere Grenze zeigen die Polarlichter, welche durch Korpuskularstrahlen erzeugt werden. Bei den Polarlichterscheinungen wird die kinetische Energie der ankommenden

---

\*) Z. B. Götz: Ergebnisse der kosmischen Physik 1.

\*\*) Zusammenstellung bei Duckert: „Ergebnisse der kosmischen Physik 1.

Teilchen zur Anregung der Atome und Aussendung sichtbaren Lichtes verwandt, in der Ozonschicht wäre dagegen eine Umwandlung in thermische Energie denkbar (geringere freie Weglänge, größere Stoßzahl).

Die Entscheidung, ob die Schallwellen an einer Grenzfläche reflektiert, ob sie stetig umgebogen werden, oder ob die Scheitelpunkte der Strahlen entgegen den Forderungen des Brechungsgesetzes schon in der Troposphäre bzw. im unteren Teil der Stratosphäre liegen (Kölzers Auffassung), ist von Wichtigkeit für unsere Vorstellungen über den Aufbau der Atmosphäre. Vielleicht sind die Schallsprengungen in Nowaja-Semlja geeignet, Klarheit in die Frage nach der Umkehrursache zu bringen.

### III. Ergebnisse der Sprengungen in Oldebroek

In den beiden vorhergehenden Kapiteln wurde gezeigt, daß mit Hilfe von Schallsondierungen das meteorologische Problem der Höhenwindmessung und das geophysikalische Problem des Atmosphärenaufbaues behandelt werden können. Da die Gestalt der Laufzeitkurve einige Kennzeichen enthält, die für beide Fragestellungen eine Bedeutung haben, wurde bei der Beobachtung der Oldebroek-Sprengungen das Hauptgewicht auf die Gewinnung einer zuverlässigen Laufzeitkurve gelegt.

Strenggenommen sind hierbei in der Luftseismik zwei Bedingungen zu erfüllen:

1. Die Beobachtungen einer Sprengung müssen auf mindestens drei Stationen in dem gleichen Azimut ausgeführt werden. Anderenfalls würden die Laufzeiten durch die einseitige Wirksamkeit des Windes verschieden beeinflußt werden, und eine Aussage etwa über eine Krümmung der Laufzeitkurve würde ihren Sinn verlieren.

2. Weil erfahrungsgemäß die einzelnen Stationen von mehreren Wellenfronten nacheinander passiert werden, müssen die zugehörigen Einsätze in den Registrierungen identifiziert werden können.

Die beiden genannten Bedingungen sind nur für die Oldebroek-Sprengungen und die bereits früher behandelten Sprengungen vom 27. Mai 1927 verwirklicht.

Die Laufzeitkurve am 15. Dezember 1932. Die Beobachtungsstationen für die Sprengungen in Oldebroek wurden durch die Institute in Jena, Lindenberg, Potsdam und Göttingen und durch die Abteilung „Heereswaffenamt, Prüfwesen“ (Reichswehrministerium) in Kummersdorf eingerichtet. Das Ostazimut wurde von den genannten Instituten mit 14 Stationen besetzt, weil auf Grund früherer Beobachtungen im Winter im Ostsektor am ehesten mit dem Empfang anomaler Wellen zu rechnen war. Neun Stationen lagen zwischen 147 und 225 km Herdentfernung und hatten einen gegenseitigen Abstand von durchschnittlich 10 km. Das Göttinger Geophysikalische Institut besetzte die Stationen:

Petershagen a. d. Weser,  $\Delta = 202$  km, Beobachter: Gerecke.

Niedernwöhren (nordwestlich von Stadthagen),  $\Delta = 214$  km, Beobachter: Riehn, Regula.

Ottensen (nordöstlich von Stadthagen),  $\Delta = 225$  km, Beobachter: Müller.

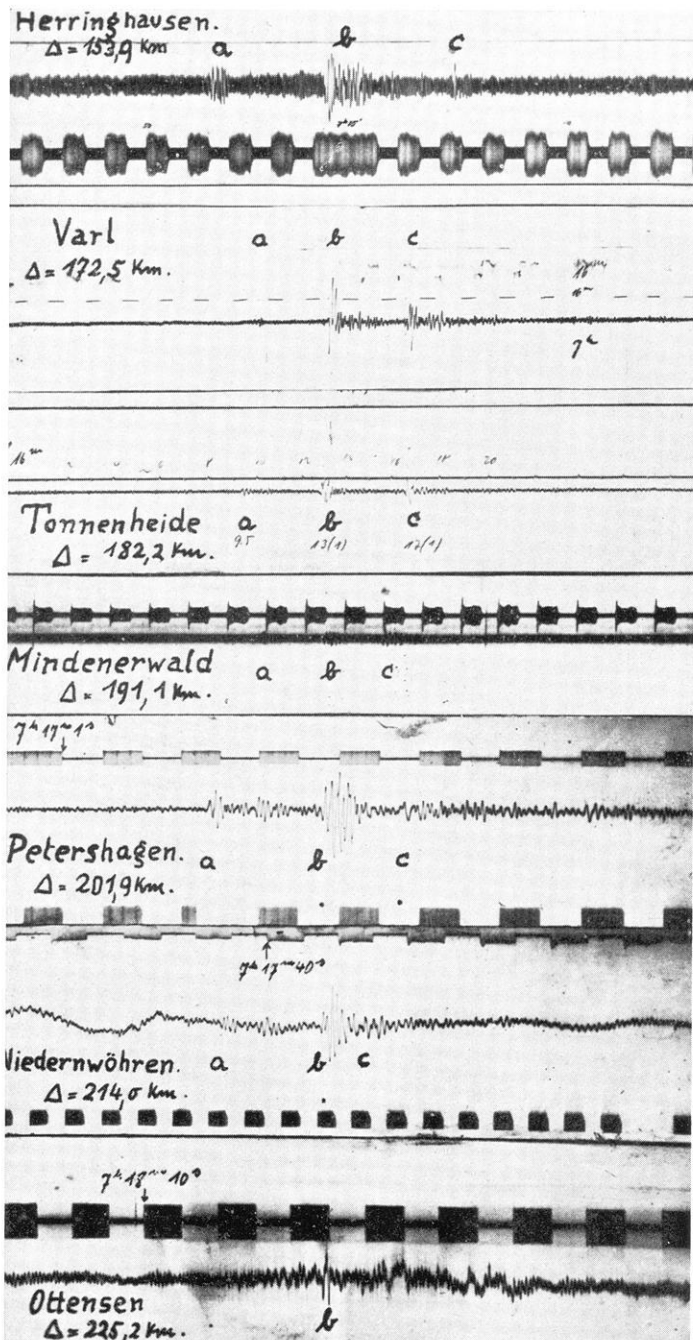


Fig. 9. Registrierungen vom 15. Dezember 1932 im Ostprofil

Für die Bearbeitung der Profilbeobachtungen standen dank dem Entgegenkommen der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena auch die Kopien aller von dort aus eingerichteten Stationen zur Verfügung.

Die Identifizierung der verschiedenen Wellenfronten des anomalen Schalles in den Registrierungen der einzelnen Profilstationen ließ sich am besten bei der ersten und zweiten Sprengung (7<sup>h</sup> 00<sup>m</sup> und 7<sup>h</sup> 06<sup>m</sup> MEZ) durchführen. Jede Station wird nacheinander von den drei Fronten *a*, *b* und *c* passiert (s. Fig. 9).

Die Abstände der Fronten liegen zwischen 1 und 6<sup>s</sup>. In Tabelle 5 sind die Laufzeiten zusammengestellt, die die einzelnen Wellenfronten benötigt haben, um von einer Station bis zur nächsten zu gelangen.

Tabelle 5. Laufzeitdifferenzen der drei Wellenfronten

	Sprengung 7 <sup>h</sup> 00 <sup>m</sup>			Sprengung 7 <sup>h</sup> 06 <sup>m</sup>		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
Niewedde—Herringhausen. . . . .	16.8 <sup>s</sup>	16.7 <sup>s</sup>	15.5 <sup>s</sup>		16.9 <sup>s</sup>	15.0 <sup>s</sup>
Herringhausen—Varl. . . . .	49.4	48.2	46.4	49.6 <sup>s</sup>	47.9	46.1
Varl—Tonnenheide. . . . .	27.2	26.3	25.9	26.8	26.4	26.0
Tonnenheide—Mindenerwald . . . .	24.3	24.1	23.7	24.4	24.1	23.4
Mindenerwald—Petershagen . . . .	30.3	30.4	29.1	30.6	30.4	29.5
Petershagen—Niedernwöhren . . . .	34.8	34.7	33.7	34.8	34.7	33.8
Niedernwöhren—Ottensen . . . . .					33.2	
Niewedde—Niedernwöhren . . . . .	182.8	180.4	174.3		180.4	173.8

Die Tabelle zeigt, daß fast stets die zuerst eintreffende Wellenfront (*a*) größere Laufzeitdifferenzen hat als die zweite (*b*) und diese wieder größere als die dritte (*c*). Die dadurch entstehende Konvergenz der Laufzeitkurven drückt sich besonders deutlich in den Gesamtlaufzeiten Niewedde—Niedernwöhren aus. Zu den späteren Fronten gehören die kleineren Laufzeitdifferenzen, also die größeren Emergenzwinkel.

Ein Vergleich entsprechender Fronten der ersten und zweiten Sprengung zeigt, daß die einzelnen Teillaufzeiten sich in den 6<sup>m</sup>, die zwischen den Sprengungen lagen, um Beträge bis zu 0.5 sec geändert haben. Dagegen zeigen die Gesamtlaufzeiten Niewedde—Niedernwöhren eine bemerkenswerte Konstanz.

Die auf kleineren Strecken festgestellten Unregelmäßigkeiten dürften ihren Ursprung in dem inhomogenen und nicht stationären Zustand der Atmosphäre haben. Auf größere Strecken findet ein Ausgleich statt.

Bei Aufstellung einer Laufzeitkurve sind als Stationsabstände jene Strecken zu verwenden, die die als eben angenommene Wellenfront in Richtung ihrer Normalen zwischen zwei Nachbarstationen durchlaufen hat. Liegen also die Beobachtungsstationen nicht auf einer durch den Sprengherd gehenden Geraden, so ist in der Laufzeitkurve nicht mehr die Entfernung zweier Punkte im gewöhnlichen Sinne verwendbar.

In Fig. 10 ist die Lage der Profilstationen wiedergegeben.



Jeder Beobachtungsstation entspricht eine gedachte Station auf der Profilgeraden, die den Schall gleichzeitig registriert haben würde. Die Lage dieser

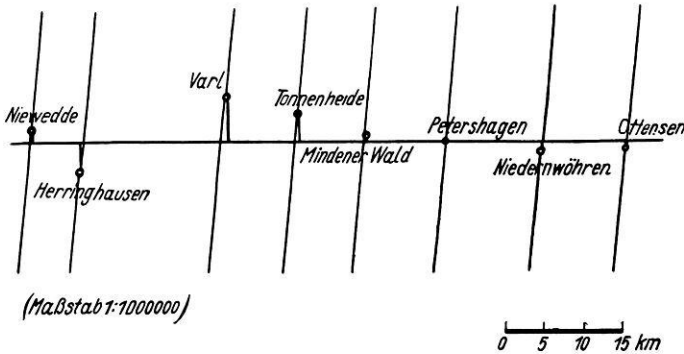


Fig. 10. Fortschreiten der Wellenfronten bei einem seitlichen Einfallswinkel von  $5^\circ$

Stationen hängt von dem zunächst unbekanntem seitlichen Einfallswinkel  $\alpha$  ab. Daher gehört zu jedem Wert von  $\alpha$  eine besondere Laufzeitkurve. Von diesen

Kurven können nur diejenigen der Wirklichkeit entsprechen, welche keine Wendepunkte enthalten. Wendepunktfreie Laufzeitkurven erhält man bei seitlichen Einfallswinkeln zwischen  $10^\circ$  nördlicher und  $5^\circ$  südlicher Abweichung von der Profilgeraden. In diesem Winkelbereich sind die Laufzeitkurven der drei Fronten stets konvex zur  $\Delta$ -Achse, d. h. mit wachsender Entfernung fallen die Strahlen immer flacher am Erdboden ein. Fordert man noch, daß die Abnahme des Emergenzwinkels möglichst gleichmäßig erfolgen soll, so erhält man als wahrscheinlichsten Wert für den Winkel  $\alpha$  eine Abweichung von  $5^\circ$  nach Norden. In Fig. 11 ist die auf die angegebene Weise ermittelte Laufzeitkurve des anomalen Schalles dargestellt. Hierbei ist nicht berücksichtigt, daß eigentlich für die  $\Delta$ -Skala nicht die gedachten Stationen auf der Profilgeraden

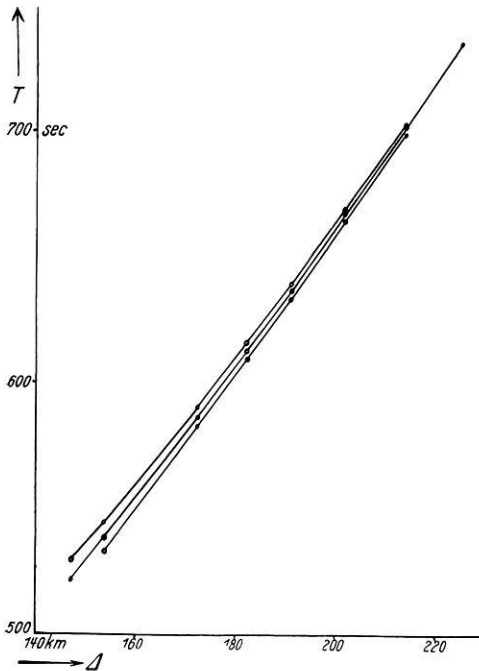


Fig. 11. Laufzeitkurve des anomalen Schalles am 15. Dezember 1932 zwischen Niewedde und Ottensen

zu verwenden sind, sondern die normalen Abstände der durch diese Stationen gezogenen Fronten. Da hierdurch sämtliche Entfernungsdifferenzen nur einen wenig von 1 verschiedenen konstanten Faktor erhalten ( $\cos 5^\circ = 0.996$ ), wurde von dieser Korrektur abgesehen.

Zur Veranschaulichung der gleichsinnigen Krümmung dieser Laufzeitkurven wurden aus den Laufzeiten der *b*-Front die Oberflächengeschwindigkeit längs der Profilinie und die Emergenzwinkel nach der Formel

$$\cos e = \frac{v_0}{\frac{d \Delta}{dT} \cdot \cos \alpha}$$

abgeleitet ( $v_0$  = Schallgeschwindigkeit am Erdboden,  $\alpha$  = seitlicher Einfallswinkel).

Tabelle 6. Oberflächengeschwindigkeiten und Emergenzwinkel  
Nach Mittelwerten aus den Laufzeiten der 1. und 2. Sprengung

	Laufzeit- differenzen sec	Ent- fernungen km	Oberflächen- geschwindigkeit m/sec	Emergenz- winkel
Niewedde—Herringhausen . . .	16.8	6.67	397	32° 15'
Herringhausen—Varl . . . . .	48.1	18.61	379	27 40
Varl—Tonnenheide . . . . .	26.3	9.73	370	24 50
Tonnenheide—Mindenerwald . .	24.1	8.86	368	24 0
Mindenerwald—Petershagen . .	30.4	10.75	354	18 15
Petershagen—Niedernwöhren . .	34.7	12.18	351	17 0
Niedernwöhren—Ottensen . . .	33.2	11.19	337	4 50

Deutung der Laufzeitkurve. Als Charakteristika der Laufzeitkurve des anomalen Schalles seien hervorgehoben:

1. Die Krümmung.
2. Abstand der Laufzeitkurve des normalen von der des anomalen Schalles (d. i. die Verspätung des anomalen Schalles gegenüber dem normalen).
3. Das Ende der Laufzeitkurve. Dem entspricht die maximale Herdentfernung in der noch direkte anomale Schalleinsätze registriert wurden.

I. Im Falle der Reflexion muß die Laufzeitkurve konvex zur  $\Delta$ -Achse sein. Bei stetiger Umbiegung sollte außer einem konvexen auch noch ein konkaver Ast auftreten, und beide Äste berühren sich in einem Brennpunkt, der den Innenrand der Außenzonen bildet.

Die Beobachtung der Oldebroek-Sprengungen hat zum ersten Male den Nachweis einer Krümmung gebracht. Die Krümmung ist konvex zur  $\Delta$ -Achse. Ein konkaver Ast ist nicht festgestellt worden.

Hierdurch ist jedoch noch nicht entschieden, daß es sich um Reflexion handelt. Im Falle stetiger Umbiegung können nur solche Strahlen zum Erdboden zurückkommen, für deren Umbiegung die höchste in der Ozonschicht vorhandene Tem-

peratur noch gerade ausreicht. Es muß also, wenn die Temperatur im oberen Teil der Ozonschicht konstant bleibt oder nach oben wieder abnimmt, einen Grenzstrahl geben derart, daß alle steileren Strahlen nicht mehr umgebogen werden. Gehört dieser Grenzstrahl noch dem konvexen Ast der Laufzeitkurve an, so kann ein konkaver Ast nicht auftreten.

II. Die Verspätung des anomalen Schalles gegenüber dem normalen ermöglicht, die Scheitelhöhen der Strahlen abzuschätzen. Sowohl die Auswertung früherer Schallbeobachtungen wie auch speziell die der Oldebroek-Sprengungen haben zu Scheitelhöhen um 40 km geführt.

Im Winter scheint die Verspätung der anomalen Einsätze geringer zu sein. Am 15. Dezember 1932 betrug die Laufzeit für  $\Delta = 214$  km  $700^s$ , am 27. Mai 1927 für  $\Delta = 216$  km  $753^s$ . Es steht noch nicht fest, ob diese Änderungen der Laufzeiten durch eine tiefere Lage der umbiegenden Schicht im Winter hervorgerufen werden [Gutenbergs Ansicht\*], oder durch stärkere Höhenwinde, welche die Schallgeschwindigkeit vergrößern. Eine Prüfung könnte durch Stationen erfolgen, die senkrecht zur oberen Windrichtung liegen.

III. Bei dem Versuch, aus den Schallbeobachtungen die Gestalt der Schallbahnen in der Atmosphäre zu ermitteln, werden gewöhnlich als Grundlage der Rechnung Windstille und die aus aerologischen Aufstiegen bekannte Temperaturverteilung angenommen (Schallgeschwindigkeit 300 m/sec oberhalb 10 km). Es hat sich aber gezeigt, daß bei diesen Voraussetzungen der äußere Durchmesser der anomalen Schallzone in vielen Fällen kleiner wird, als den Beobachtungen entspricht. Eine von den verschiedenen Möglichkeiten, diese Schwierigkeit zu überwinden, besteht in der Annahme einer Schallgeschwindigkeit von mehr als 300 m/sec in der Stratosphäre. Die Steigerung über den Betrag von 300 m/sec hinaus ist dann auf den Einfluß von Winden zurückzuführen. In Richtung des Windvektors wird dann der äußere Durchmesser der anomalen Schallzone am größten sein.

Aus der Darstellung der Ohrbeobachtungen vom 15. Dezember 1932\*\*) muß man nach dem oben Gesagten einen Westwind mit geringer Nordkomponente und einen schwächeren Südwestwind ablesen. In der Tat war zur Zeit der Beobachtungen ein Ziehen von acu-Wolken nach Nordosten zu beobachten, und der bei der Konstruktion der Laufzeitkurve gefundene seitliche Einfallswinkel von  $W 5^0 N$  deutet zusammen mit den Laufzeitmessungen der außerhalb des Profils gelegenen Stationen auf Westwinde mit einer Nordkomponente in größeren Höhen.

Die größte Entfernung, in der bei den Oldebroek-Sprengungen direkte anomale Wellen registriert wurden, betrug 289 km (Station Göttingen). Außerdem sind dort Einsätze von reflektierten anomalen Wellen vorhanden. Die Laufzeit-

---

\*) Gutenberg: Schallgeschwindigkeit und Temperatur in der Stratosphäre. Gerlands Beitr. z. Geophys. 27 (1930).

\*\*) Duckert: Ergebnisse der Hörbeobachtungen des Sprengversuchs in Oldebroek am 15. Dezember 1932. Zeitschr. f. Geophys. 10, 119 ff. (1934).

kurve im Ostazimut erstreckt sich also mindestens über das Intervall von 145 bis 289 km.

Zur Erklärung dieser Lage der anomalen Schallzone muß man die Annahme von Westwinden in der Stratosphäre heranziehen. Fig. 12 zeigt eine Verteilung der Schallgeschwindigkeit, mit deren Hilfe die Laufzeiten längs der Profillinie Niewedde—Ottensen und an der etwas seitlich gelegenen Station Göttingen bis auf  $\frac{1}{2}\%$  genau erklärt werden können (Fig. 12).

Die Schallgeschwindigkeit in der Stratosphäre ist infolge Windwirkung 318 m/sec (statt 300 m/sec bei etwa  $-50^{\circ}\text{C}$  und Windstille). Für die Rückbiegung der steilsten beobachteten Strahlen wird eine Geschwindigkeit von 386 m/sec benötigt. Bringt man die Wirkung des Windes in Anrechnung, so bleiben noch 368 m/sec. Das entspricht einer Temperatur von  $+63^{\circ}\text{C}$ . Die Zunahme der Geschwindigkeit, d. h. der Temperaturanstieg, beginnt bei 35.8 km und beträgt  $2.5^{\circ}/100\text{ m}$ .

In der Gegenwindrichtung steigt die Geschwindigkeit auf 356 m/sec. Dort müssen alle Strahlen mit Emergenzwinkeln zwischen  $0$  und  $20^{\circ}$  zurückgebogen werden. Die Rechnung zeigt, daß dann im Westen zwischen 133 und 174 km eine anomale Schallzone bestanden haben müßte. Sie lag im Gebiet der Nordsee und muß deshalb, falls sie vorhanden war, der Beobachtung entgangen sein.

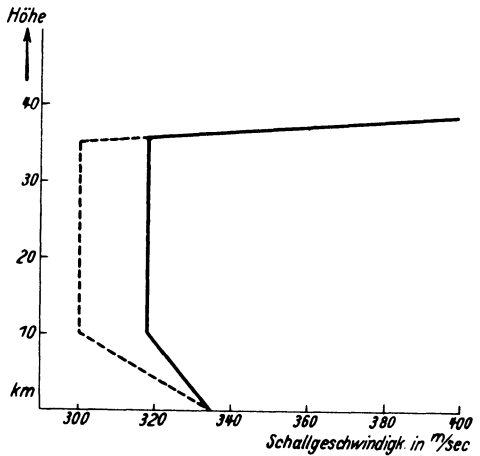


Fig. 12  
Schallgeschwindigkeit als Funktion der Höhe  
--- Schallgeschwindigkeit bei ruhender Luft,  
— Schallgeschwindigkeit bei Einrechnung des Windes

Eine befriedigende Übereinstimmung zwischen beobachteter und berechneter Laufzeitkurve hat sich auch für jenen Fall erreichen lassen, daß in der Stratosphäre eine Schallgeschwindigkeit von 321 m/sec vorhanden war und die Wellen an einer Sprungfläche in 37 km Höhe reflektiert wurden.

Die Entscheidung zwischen Reflexion und stetiger Umbiegung läßt sich demnach mit Hilfe der Oldebroek-Sprengungen noch nicht erreichen. Vermutlich wird aber die Beobachtung einer Sprengung in zwei entgegengesetzten Profilen zum Ziele führen.

Die vorliegende Arbeit wurde unter Anleitung von Herrn Prof. Dr. Angenheister ausgeführt. Ihm und Herrn Dr. H. Jung bin ich für vielseitige Anregungen zu großem Dank verpflichtet.

Göttingen, Geophysikalisches Institut, Mai 1933.