

Werk

Jahr: 1924

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:1

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0001

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0001

LOG Id: LOG_0064

LOG Titel: Die äußere Hörbarkeitszone

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

Die äußere Hörbarkeitszone.

Von Alfred Wegener, Graz. — (Mit einer Abbildung.)

Es werden die Beobachtungsergebnisse, geordnet nach Kanonendonner, Explosionskatastrophen, vulkanischen Detonationen, Meteorknallen und Sprengungen dargestellt, hieraus sieben allgemeine Gesetzmäßigkeiten abgeleitet und auf dieser Grundlage eine Kritik der bisherigen Erklärungsversuche gegeben. Zum Schluß wird eine neue Erklärung durch Riemannsche Stoßwellen vorgeschlagen.

1. Einleitung. Die Kenntnis einer äußeren Hörbarkeitszone bei der Schallausbreitung in der Atmosphäre datiert im wesentlichen seit der Dynamitexplosion zu Förde am 14. Dezember 1903 bzw. seit der 1904 veröffentlichten Untersuchung derselben durch von dem Borne¹⁾. Seitdem ist eine bedeutende Zahl von Untersuchungen über die Schallausbreitung beim Kanonendonner, bei Explosionskatastrophen und vulkanischen Detonationen veröffentlicht worden, zu denen neuerdings noch Sprengungen zu vorher festgesetzter Zeit kommen. In allen diesen Untersuchungen spielt die äußere Hörbarkeitszone die Rolle des Grundproblems der atmosphärischen Akustik. Andererseits ist auch eine große Zahl theoretischer Untersuchungen veröffentlicht worden, die sich mit der Entstehung dieser auf den ersten Blick rätselhaften Erscheinung befassen. Im folgenden soll über die ziemlich zerstreute Literatur dieses Gebietes berichtet, die bis jetzt erkennbaren Gesetzmäßigkeiten zusammengestellt und die Erklärungsversuche und -möglichkeiten kritisch besprochen werden. Wir beginnen mit der Darstellung der Beobachtungen.

2. Schallausbreitung beim Kanonendonner. Schon bei der Kanonade von Spit-head am 1. Februar 1901 wurde nach Davison²⁾ eine Außenzone bemerkt, deren Innenrand bei etwa 90 km Entfernung von der Schallquelle lag. Besonders zahlreich sind aber die Beobachtungen aus dem letzten Kriege. Van Everdingen³⁾ und Meinardus⁴⁾ untersuchten die Schallausbreitung bei der Belagerung von Antwerpen vom 7. bis 9. Oktober 1914. In diesem Falle begann die Außenzone erst in etwa 160 km Zentralabstand und reichte in Holland bis 230, in Deutschland bis 215 km. Am Innenrande war die Intensität noch so bedeutend, daß Fensterscheiben klirrten. Morf⁵⁾ benutzte die Aufzeichnungen über Hörbarkeit des Kanonendonners, welche die meteorologischen Beobachter an den drei täglichen Ableseterminen an 41 Tagen des Winters 1917 bis 1918 in der Schweiz gemäß besonderer Instruktion einlieferten; er fand die Erscheinung stets mehr oder weniger deutlich ausgesprochen; der Innenrand der Außenzone lag bei 100 bis 125 km. Brand⁶⁾ sammelte u. a. die Beobachtungen bei der Kanonade vor Verdun und fand positive Schallmeldungen in

200 bis 250 km	Entfernung	. . . . .	4	Fälle
250 "	300 "	"	. . . . .	12 "
300 "	350 "	"	. . . . .	9 "
350 "	400 "	"	. . . . .	7 "
> 400 "	"	"	. . . . .	0 "

Hillers⁷⁾ glaubte jedoch in diesem Falle die Hörbarkeit noch in 570 km Entfernung in der Lüneburger Heide nachweisen zu können, was deswegen interessant ist, weil dies der doppelte Zentralabstand des von Brand gefundenen Intensitätsmaximums ist. Hierdurch ist die Existenz einer zweiten Hörbarkeitszone im doppelten Abstände der ersten angedeutet.

Wenngleich das äußere Hörbarkeitsgebiet nie fehlt, so kann doch mitunter die „Zone des Schweigens“ fehlen. So beschreibt de Quervain⁸⁾ einen Fall (Kanonade im Elsaß am 25. Dezember 1915), bei dem das innere Gebiet so ausgedehnt ist, daß es mit dem Außengebiet zusammenfließt.

Verschiedene Untersuchungen betreffen die Jahresperiode der Hörbarkeit in der Region der Außenzone. Brand⁹⁾ machte zuerst auf das Nachlassen der Hörbarkeit in den Sommermonaten und Verstärkung in den Wintermonaten aufmerksam und sammelte hierfür zahlreiche Beispiele⁶⁾ ebenso wie Ludewig¹⁰⁾. Zu zahlenmäßigen Ergebnissen gelangte de Quervain⁸⁾, indem er die Anzahl der Meldungen über die Hörbarkeit des Kanonendonners in der Ostschweiz und dem Mittellande aus den Jahren 1915 und 1916 zu folgender Reihe zusammenstellte:

	Jan.	Febr.	Marz	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.
Zahl der Meldungen	21	22	17	3	1	1	0	1	1	3	3	22

Als Ursache dieser ausgesprochenen Jahresschwankung betrachtete man auf deutscher Seite die geringere vertikale Temperaturabnahme und größere Häufigkeit der Inversionen im Winter, durch welche die Ausbreitung des Schalls begünstigt wird. Aber die nach Kriegsschluß bekanntgewordenen Veröffentlichungen von französischer und englischer Seite zeigen, daß diese Erklärung falsch ist, und daß ein größeres Problem hinter dieser Gesetzmäßigkeit steckt. Denn auf französischer Seite wurde nach Schaffers¹¹⁾ und Collignon¹²⁾ der Kanonendonner auf große Entfernungen gerade nur im Sommer gehört, und zwar, wie hinzugefügt wird, weniger gut bei Ostwind, der doch seine Hörbarkeit begünstigen sollte. Wir werden dies gegensätzliche Verhalten in Abschnitt 6 auf eine allgemeine Gesetzmäßigkeit der äußeren Hörbarkeitszone zurückführen.

3. Schallausbreitung bei Explosionskatastrophen. Günstiger als Kanonendonner sind für unsere Zwecke Explosionskatastrophen, weil die Schallquelle hier scharfer lokalisiert und die Intensität größer ist. Eine solche Dynamitexplosion [14. Dezember 1903 zu Forde in Westfalen¹⁾], war es, bei deren Untersuchung von dem Borne zum ersten Male die Existenz einer äußeren Hörbarkeitszone einwandfrei feststellen konnte; sie lag östlich der Schallquelle, begann bei 120 und endete bei 180 km Zentralabstand und füllte einen Sektor von 100°, gemessen an der Schallquelle. Ein zweiter, sehr ähnlicher Fall war der von Witten-Annen¹³⁾. Durch das Studium dieser beiden Erscheinungen wurde von dem Borne zu seiner später zu besprechenden Erklärung der äußeren Hörbarkeitszone durch Schallreflexion an der Sphäre der leichten Gase geführt. Dann folgte die von de Quervain beschriebene Explosion der Jungfraubahn, am 15. Nov. 1908¹⁴⁾, bei der das äußere Hörbarkeitsgebiet im Nordosten lag, von 140 bis etwa 200 km reichte und einen Sektor von 90° bildete. In der Zone des Schweigens wurde der Schall auf mehreren Höhenstationen gehört, woraus hervorgeht, daß es sich hier um einen Schallschatten handelt.

Weitere Ergebnisse brachte Dörrens Untersuchung über die Explosion von Wiener Neustadt am 7. Juni 1912¹⁵⁾. Hier lag das Außengebiet im Westen, beginnend bei 180 und endend bei 300 km Zentralabstand, und einen Sektor von 160° bildend. Eine Auszählung der positiven Schallmeldungen für die verschiedenen Entfernungen ergab:

Abstand	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170
Anzahl		2	15	20	27	36	19	12	12	11	11	5	3	1	2	1	4	2

Abstand	. 170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300	310	320 km
Anzahl	. . 8	24	40	45	44	47	38	27	12	5	8	3	8	0	0	

Berücksichtigt man den zunehmenden Flächeninhalt der Abstandsgruppen und bildet dementsprechend Relativzahlen der Häufigkeit, so liegt das Maximum im Intervall 200 bis 210 km, also auch dann noch etwa 20 bis 30 km jenseits des Beginns der Außenzonen. Da der Innenrand geometrisch eine Brennpunktlinie sein muß, muß es sich hier um eine Halbschattenzone durch Beugung handeln. Wie in früheren Fällen zeigte sich auch hier eine Vervielfältigung des Knalles mit Zwischenzeiten von einigen Sekunden. Diese Schallvervielfältigung, die keineswegs auf die äußere Hörbarkeitszone beschränkt ist, sondern auch schon in geringer Entfernung von der Schallquelle auftreten kann, soll indessen in dieser Abhandlung außerhalb der Erörterung bleiben.

Beachtenswert sind die beträchtlichen, auch von Dorr hervorgehobenen Schwankungen des Zentralabstandes der Außenzonen. Bei späteren Fällen tritt dies noch mehr hervor. So wird bei der Explosion in East London am 19. Januar 1917 für den Innenrand der Außenzonen 104 km angegeben¹⁶⁾. Hier konnte übrigens festgestellt werden, daß die unhörbaren langen Wellen in der Außenzonen früher eintrafen als die hörbaren kurzen (im inneren Hörbarkeitsgebiet war es umgekehrt). Bei der Explosion von Oppau am 21. Sept. 1921 dagegen lag der Innenrand der Außenzonen bei 200 km. Letztere umfaßte einen Sektor von 150°, dessen Achse nach Ost-südost wies¹⁷⁾. Noch größer, nämlich 220°, war der Sektor bei der von de Quervain beschriebenen Explosion von Vergiate am Südfuß der Alpen¹⁸⁾, wo der Innenrand der Außenzonen im Mittel 165 km von der Schallquelle entfernt war. Außer der schon im Titel von de Quervain betonten diametralen Ausbildung der Außenzonen ist beachtenswert, daß diese gerade auch im Norden, jenseits des Alpenkammes, gut ausgebildet war, wodurch bewiesen wird, daß die Schallfortpflanzung jedenfalls in Schichten oberhalb 3000 m vor sich geht. De Quervain versuchte auch die Laufzeit des Schalls für die Außenzonen zu bestimmen und fand, daß sie einer zu kleinen Schallgeschwindigkeit entspricht, wenn nur die horizontale Entfernung in Betracht gezogen wird. Quantitativ kann sein Ergebnis (247 m/sec) allerdings nicht mit den weiter unten zu nennenden exakt bestimmten Werten verglichen werden. Bei der Explosion von Rothenstein bei Königsberg am 10. April 1920 war die Lage so ungünstig, daß der größte Teil der Außenzonen auf das Meer oder jenseits der deutschen Grenze fiel, so daß Errulats Untersuchung¹⁹⁾ kaum einen wesentlichen Beitrag zu unserer Frage liefern konnte. Endlich hat Witkiewicz²⁰⁾ die Explosion von Moskau am 9. Mai 1920 be-

geschrieben, bei welcher die Außenzone ringförmig geschlossen auftrat (Fig. 1) wenn auch die Mehrzahl der Schallmeldungen auf die Kreishälfte NNW–W–S–SSE konzentriert war. Der Hinweis des Verfassers, daß bei den Meldungen aus NE möglicherweise Gewitter Anlaß zu Täuschungen gegeben haben, erscheint mir wenig von Bedeutung angesichts der allgemeinen Erfahrung, daß Explosionsknalle nie mit Donner verwechselt werden, und des Umstandes, daß die Meldungen genau in den Hörbarkeitsring fallen. Es wäre dies also der erste Fall einer ringförmig geschlossenen Außenzone der Hörbarkeit. Der Innenrand lag bei 150 km.

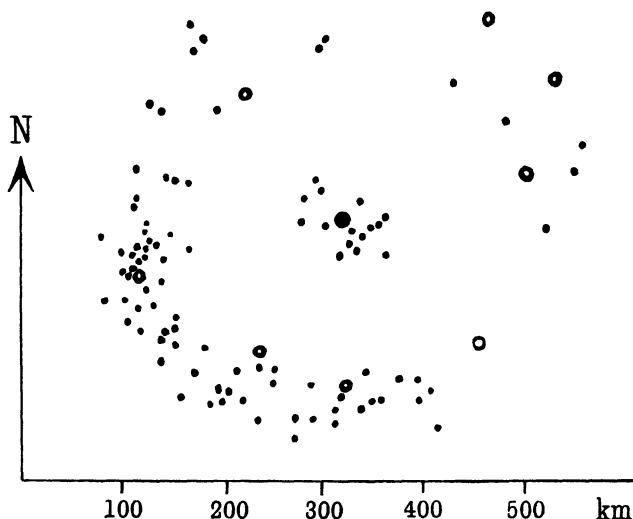


Fig. 1. Hörbarkeit der Explosion von Moskau am 9. Mai 1920 nach Witkiewicz.

● Schallquelle (Moskau), • pos. Schallmeldung, ○ desgl. aus größeren Städten

4. Schallausbreitung bei vulkanischen Detonationen und Meteorcn. Die Detonationen bei vulkanischen Eruptionen sind bisweilen noch erheblich stärker als die im vorangehenden besprochenen Explosionen. Auf diese Weise sind die ältesten Wahrnehmungen über die äußere Hörbarkeitszone erhalten worden, zu einer Zeit, als man die Allgemeinheit dieser Erscheinung noch nicht erkannte. So beschrieb Wolf²¹⁾ den Ausbruch des Cotopaxi im Jahre 1744, bei dem die Außenzone sehr deutlich, und zwar in diametraler Ausbildung, auftrat. In der Zone des Schweigens lagen die Orte Latacunga (40 km SSW) und Quito (55 km NzW); dagegen wurde der Schall gut gehört in Guayaquil (240 km SW) und Piura (575 km SSW) und andererseits auch in Pasto (245 km NEzN) und Popayan (412 km NEzN). Diese Entfernungen sind weit größer als die bei Explosionen beobachteten. Ähnlich, nur ohne Nachrichten aus dem Norden, war die Schallausbreitung bei dem von Wolf eingehender beschriebenen Ausbruch vom 26. Juni 1877. Auch bei dem Ausbruch des Krakatau in der Sundastraße im Mai 1883, der dem Hauptausbruch im August voranging, wurde eine Zone des Schweigens und eine Außenzone festgestellt, indem

die Detonationen in Batavia (150 km E) und Buitenzorg (155 km ESE) vernommen wurden, aber nicht in den näher gelegenen Orten Serang (78 km E) und Anjer [50 km E]²²⁾. Diese Fälle zeigen, daß die äußere Hörbarkeitszone nicht nur in unseren Breiten, sondern auch in den Tropen eine regelmäßige Erscheinung ist. Bei dem Hauptausbruch am 27. bis 28. August 1883 (die Hauptluftwelle entstand am 27. August 9^h 58^m vorm. mittl. Krakatauzeit) war jedoch die Intensität der Detonationen so groß, daß eine Zone des Schweigens und damit überhaupt eine zonale Gliederung des Schallgebietes nicht bemerkt werden konnte. Andererseits wurden die Detonationen nach allen Seiten bis in Entfernungen von 3000 bis 4000 km direkt mit dem Ohr gehört, bisher der einzige Fall so ungeheurer Reichweiten. So wurde z. B. der Schall gehört an folgenden Orten:

	Entfernung
Manila	2902 km
Dorey (Neu-Guinea)	3240 "
Alice Springs (Zentralaustralien)	3593 "
Perth (Westaustralien)	3060 "
Daly Waters (Nordaustralien)	3256 "
Diego Garcia (Tschagosinseln)	3648 "
Rodriguez	4775 "
Dutch Bay (Ceylon)	3312 "
Tovoy (Birma)	2378 "

Trägt man die Gesamtheit der Schallmeldungen auf die Karte ein, so findet man, daß das ganze Gebiet bis zu dieser Grenze gleichmäßig von ihnen bedeckt ist (soweit es nicht vom Meere eingenommen wird, von wo nur sehr spärliche Meldungen vorliegen). Eine zonale Einteilung ist nicht erkennbar. Die stärkste Luftwelle wurde an Bord der „Berbice“ in der Sundastraße auf dem Barographen registriert und verursachte einen Ausschlag von 50 mm. Im Hafen von Batavia wurden 12 mm gemessen. Hier sprangen Scheiben von Ladefenstern. Die Druckregistrierung der Gasfabrik registrierte auch die Luftwellen; so konnte festgestellt werden, daß die Hauptwelle hier um 10^h 45^m eintraf und eine Wellenlänge von 300 m besaß. Diese Hauptwelle konnte aber mit Hilfe von Barographen über die ganze Erde verfolgt werden, nämlich an 29 Stellen in Europa, wo die Druckschwankung etwa 1¹/₄ mm betrug und die Welle nach dem Aussehen der Kurven eine Länge von mindestens 500 km gehabt haben muß²³⁾, ferner in Amerika in Toronto, New York, Washington, Mexiko, Havana; in Afrika in Loanda und Mauritius; in Südamerika nur in Süd-Georgien, wo gerade eine deutsche Polarstation arbeitete; in Australien in Melbourne, Sidney, Dunedin, Wellington N.Z.; in Asien in Bombay, Calcutta, Zi-ka-wei, Tokio. An vielen dieser Stationen wurde die Welle siebenmal registriert, nämlich viermal direkt und dreimal rückkehrend vom Gegenpunkt. Als mittlere horizontale Fortpflanzungsgeschwindigkeit ergab sich 314.2 m/sec. Die Ausbreitung nach Osten und Westen und ebenso auch die im tropischen Ostwindgebiet und im gemäßigten Westwindgebiet zeigt systematische Unterschiede, die man in die Angabe zusammenfassen kann:

Gegen den Wind	309.3 m/sec
Mit dem Wind	320 6 "

Außerdem zeigt sich noch eine fortschreitende Abnahme der Geschwindigkeit in folgenden Zahlen [nur aus europäischen Registrierungen]²⁴⁾:

Ursprung und I	I u. III	III u. V	V u. VII
315.9	305.9	305.1	302.3
Ursprung und II	II u. IV	IV u. VI	
322.5	320.1	317.5	

In neuerer Zeit sind besonders in Japan bei den zahlreichen Ausbrüchen des Vulkans Asama die Schallerscheinungen untersucht worden^{25) 26)}. Letztere hielten sich dabei stets in demselben Rahmen wie bei Explosionen. In einem Falle, am 7. Dez. 1909, läßt sich keine Zone des Schweigens feststellen, weil das innere Gebiet mit dem äußeren zusammenfließt. Das äußere Gebiet ist aber stets vorhanden, allerdings in wechselndem Zentralabstand und in wechselndem Azimut. Im übrigen bieten diese Fälle kaum etwas Erwähnenswertes. Das zonale Verteilungsbild ist durchgängig unregelmäßiger als in den meisten anderen Fällen, offenbar hauptsächlich aus dem Grunde, weil ein großer Teil der Außenzone auf dem Meere lag, von wo keine oder nur sehr spärliche Beobachtungen zu erhalten waren.

Auch bei detonierenden Meteoriten ist bereits die Entstehung einer äußeren Hörbarkeitszone außerhalb des meist etwa 60 km Radius haltenden inneren Hörbarkeitsgebiets beobachtet worden, nämlich bei dem Meteoritenfall von Treysa²⁷⁾, bei dem der Meteorit, ein 63 kg schweres Nickeleisen, auf Grund der Licht- und Schalluntersuchung nachträglich aufgefunden wurde. Das Ende der Lichterscheinung (der sogenannte Hemmungspunkt) lag hier in 16 km Höhe. (Die größte Endhöhe detonierender Meteore ist etwa 50 bis 60 km.) Die äußere Zone ist in unserem Falle durch zwei Beobachtungen in 95 und 120 km Entfernung vom Fallort nachgewiesen. Diese Zahlen zeigen, daß bei so großer Höhe der Schallquelle der Zentralabstand der Außenzone merklich verkleinert wird. Aber auch unter den älteren Beobachtungen befinden sich manche Berichte über außerordentlich große Hörweite der Meteor detonation, die auf die Existenz eines äußeren Hörbarkeitsgebiets schließen lassen. So wurde nach v. Nießl das Meteor vom 19. Februar 1899 noch in 120 km Entfernung gehört. Auch bei dem von de Quervain untersuchten „Meteorbeben“ vom 28. Juli 1915²⁸⁾ kommen Entfernungen von 150 km vor. Nach Muncke²⁹⁾ wurde der Meteoritenfall bei l'Aigle gleichfalls bis 150 km gehört. v. Nießl gibt daher allgemein als äußerste Hörgrenze 120 bis 150 km an³⁰⁾. Es scheint, als ob die Ausbildung dieser Außenzone an relativ niedrig gelegene Hemmungspunkte gebunden ist. Bei dem von v. Nießl sehr sorgfältig untersuchten Meteor vom 17. Januar 1890³¹⁾, bei dem der Hemmungspunkt in 40 km Höhe lag, bildete sich nur ein kreisförmiges Hörbarkeitsgebiet von 70 km Radius, aber keine Außenzone.

5. Schallausbreitung bei Sprengungen. Bei vorher angesagten Sprengungen hat man die Möglichkeit zur instrumentellen Beobachtung und zur exakten Messung der Laufzeit. Die erste derartige Sprengung war die von Oldebroek in Holland am 28. Oktober 1922. Nach van Everdingen³²⁾ hatte der Innenrand der Außenzone einen Zentralabstand von im Mittel 162 km (in

Belgien 176, in Deutschland 147 km); das Intensitätsmaximum, durch Anhaufung der Beobachtungen erkennbar, dürfte in etwa 200 km Zentralabstand gelegen sein.

Am 24. Juli 1924 fanden in Jüterbog drei Sprengungen statt, die in Göttingen, in 215 km Entfernung, instrumentell und auch mit dem Ohr beobachtet werden konnten, worüber Wiechert³³⁾ und Angenheister³⁴⁾ berichtet haben. Die Beobachtung geschah teils mit einem zweimillionenfach vergrößernden Vertikal-seismographen, teils durch Sichtbarmachung der Durchbiegungen einer Zinkplatte, die an Stelle einer Glasscheibe in ein Fenster eingelassen war, und drittens durch die Bewegung eines Kolbens in einem Rohre, das einem größeren Luftbehälter aufgesetzt war. Das Eintreffen des Schalles wurde 730 bis 734 Sekunden nach der Explosion beobachtet, was im Mittel einer horizontalen Geschwindigkeit von 293 m/sec entspricht. Die Registrierung zeigte für die einzelne Sprengung zwei in etwa $\frac{1}{2}$ Sekunde aufeinanderfolgende Einsätze, der schon erwähnten Schallverdoppelung entsprechend. Durch die Instrumente wurden hauptsächlich unhörbare lange Wellen angezeigt, und diese trafen etwa $1\frac{1}{2}$ Sekunden früher ein als die hörbaren (was bereits bei der Explosion von East London beobachtet war). Bei der Sprengung in Jüterbog am 3. Mai 1923 wurde ein sehr umfangreiches Material von Seiten des Aeronautischen Observatoriums Lindenberg gesammelt, doch ist bisher nur ein kurzer vorläufiger Bericht von Hergesell³⁵⁾ darüber erschienen, in dem die Laufzeiten nicht angegeben sind. Aus dem von ihm mitgeteilten Kärtchen geht hervor, daß die äußere Zone im Zentralabstand von im Mittel 150 km (100 bis 180 km) begann und einen Sektor von 290° umfaßte. Da der fehlende Sektor über Böhmen lag, von wo überhaupt keine Meldungen erhalten wurden, ist es keineswegs ausgeschlossen, daß auch in diesem Falle das Außengebiet in Wirklichkeit ringförmig geschlossen war. Über die Laufzeiten kann ich jedoch eine Angabe machen, da ich selbst gemeinsam mit J. Georgi in Hamburg die Beobachtung mit Hilfe eines Kolbenapparates ausgeführt habe, und die Zeit der Sprengung inzwischen von Ritter³⁶⁾ mitgeteilt worden ist. Die Schallwelle brauchte für den etwa 275 km langen Weg von Jüterbog bis Hamburg 936 Sekunden, was einer horizontalen Geschwindigkeit von 294 m/sec, also praktisch ebenso wie in Göttingen, entspricht. Eine zweite Welle traf in Hamburg 15 Sekunden später ein (was 289 m/sec entsprechen würde). Von den zahlreichen weiteren deutschen Sprengungen von 1924 und 1925 sind Resultate irgendwelcher Art noch nicht veröffentlicht.

Dagegen sind bereits Berichte betreffend die drei Sprengungen in La Cour-tine (Frankreich) vom 15., 23. und 25. Mai 1924 erschienen. So gibt Gazeaud³⁷⁾ an, daß Beobachtungen in Montpellier (270 km SSE) und in l'Etoile, 10 km nördlich Marseille (360 km SE), erhalten wurden, wobei die Laufzeiten einem Umweg von 90 bzw. 135 km entsprechen würden, weshalb Gazeaud, in Ver-kennung des allgemeinen Charakters dieser Erscheinung, ein Echo an einem cu-ni annehmen zu sollen glaubt. Villard³⁸⁾ gibt an, daß die Sprengungs-welle auch in Meudon (Paris) (350 km N) und in Fontainebleau (300 km NzE) wahrgenommen wurde. Dufour³⁹⁾ diskutierte die bei der Explosion in Er-scheinung getretenen Wellenarten, die, wie auch in den anderen Fällen, teilweise

von großer Wellenlänge und also unhörbar sind. Einer brieflichen Mitteilung von Georgi⁴⁰) entnehme ich, daß die Luftwelle auch noch in Hamburg (1040 km NNE) zu beobachten war, und Ritter³⁶) gibt an, sie noch in 1100 km Abstand nachgewiesen zu haben. Aber auch von dieser Sprengung ist noch keine Veröffentlichung des gesamten Beobachtungsmaterials erfolgt.

Das allgemeine Ergebnis der bisherigen Sprengungen formuliert Hergesell⁴¹) in folgender Weise: „In der ersten Zone ist die Schallgeschwindigkeit so gut wie normal. In der Zone des Schweigens ist bisher mit Sicherheit weder eine Druck- noch eine akustische Welle konstatiert worden. Dieselbe tritt erst wieder in größerer Entfernung auf, wo sich dann stets eine scheinbar kleinere Fortpflanzungsgeschwindigkeit zwischen 280 und 310 m in der Sekunde ergibt.“

6. Allgemeine Gesetzmäßigkeiten der äußeren Hörbarkeitszone. Im folgenden sollen die bisher erkennbaren Gesetzmäßigkeiten kurz zusammengestellt werden.

a) Die äußere Hörbarkeitszone tritt bei genügender Intensität des Schalles stets in Erscheinung. Gegenteilige Fälle sind nicht bekannt. Die Zone des Schweigens kann dagegen fehlen, wenn das innere Hörbarkeitsgebiet durch Windeinfluß im Azimut des Außengebietes so ausgedehnt wird, daß es mit letzterem zusammenfließt (Elsaß 25. Dez. 1915, Japan 7. Dez. 1900). Ebenso fehlte die Zone des Schweigens beim Hauptausbruch des Krakatau, wo die Schallintensität sehr viel größer war als in allen anderen bekannten Fällen. Von einem Fehlen auch der äußeren Hörbarkeitszone kann man aber in diesen Fällen nicht sprechen.

b) Das Auftreten des Außengebietes ist nachgewiesen für Europa, Japan und den Äquator (Cotopaxi, Krakatau), also für etwa 50, 35 und 0° Breite. Es darf daher angenommen werden, daß die Erscheinung überall auf der Erde anzutreffen ist.

c) Der Zentralabstand der Außenzone variiert (in Europa und Japan) mit der Jahreszeit. Wie A. Wegener⁴²) gezeigt hat, liegt ihr Innenrand im Januar und Februar bei etwa 110 km, im August bei etwa 190 km. Die Zone größter Intensität (größter Zahl positiver Meldungen) variiert entsprechend zwischen etwa 125 km im Januar und Februar und etwa 230 km im Juli und August. Nimmt man Rücksicht auf den zunehmenden Flächeninhalt der Zonen bei wachsendem Zentralabstand und bildet so das relative Intensitätsmaximum, so verringern sich diese letzteren Zahlen ein wenig. Da bei rein geometrischer Schallausbreitung der Innenrand der Außenzone eine Brennlinie sein sollte, so muß dieser 15 bis 30 km breite Halbschattenstreifen zwischen Innenrand und Intensitätsmaximum auf Beugung beruhen.

d) Der Zentriwinkel des Außengebietes kann beliebige Werte zwischen etwa 90 und 360° haben. Beispiele für große Zentriwinkel sind insbesondere: Witten-Annen 150°, Oppau 150°, Wiener Neustadt 160°, Cotopaxi (1744) > 180°, Vergiate 220°, Jüterbog (3. Mai 1923) mindestens 270°, vielleicht 360°, Hauptausbruch des Krakatau wahrscheinlich 360°, Moskau 360°. Mit Ausnahme von Jüterbog gelten alle Zahlen für die hörbaren kurzen Wellen.

Es ist möglich, daß für die unhörbaren langen Wellen der Ring stets geschlossen ist. Bemerkenswert ist ferner, daß der Innenrand der Außenzone, auch wenn ihr Zentriwinkel klein ist, stets einem Kreis um die Schallquelle am besten entspricht.

e) Das Außengebiet liegt im Winter vorzugsweise im Osten, im Sommer vorzugsweise im Westen der Schallquelle. Diese Gesetzmäßigkeit ist meines Wissens bisher nirgends hervorgehoben und bedarf daher der Begründung.

Ordnen wir die verfügbaren Fälle nach Sommer- und Winterhalbjahr, getrennt für Europa und Japan, so erhalten wir:

I. Europa.

Sommer:	Azimet des Außengebietes
Elsaß, 25. April 1915	SE
Moskau, 9. Mai 1920	WSW
Wiener Neustadt, 7. Juni 1912	W
Oppau, 21. Sept. 1921	ESE
Winter.	
Antwerpen, 7. bis 9. Okt. 1914	NE
St Helena bei Savona, 25. Okt. 1921	ENF
Lyon, 15. Okt. 1918	NE
Witten-Annen, 28. Nov. 1906	E
Jungfraubahn, 15. Nov. 1908	NE
Vergiate, 26. Nov. 1920	NE (N u. SE)
Förde, 14. Dez. 1903	E
Elsaß, 25. Dez. 1915	E
Mülhausen, 31. Dez. 1915	E
Sundgau, 24. Dez. 1914	E
East London, 19. Jan. 1917	N
Elsaß, 16. u. 24. Febr. 1918	SE
Elsaß, 3., 4., 5., 6. März 1918	ESE

II. Japan (Vulkan Asama).

Sommer:	Azimet des Außengebietes	Winter:	Azimet des Außengebietes
4. April 1911	W	26. Okt. 1913	NNE
17. Juni 1913	WSW	14. Dez. 1912	ESE
26. Juni 1913	WSW	14. Dez. 1903	E
19. Juli 1913	SW	7. Dez. 1909	E
12. Aug. 1913	WSW	25. Dez. 1910	W

Durch die Tabellen I und II dürfte der oben angegebene Satz vom Azimet des äußeren Hörbarkeitsgebietes hinreichend bewiesen sein. Er gilt in gleicher Weise für Europa wie für Japan. In Europa dauert die Winterlage länger als die Sommerlage, indem für April und September noch die Winterlage gefunden wird.

Durch diesen jahreszeitlichen Wechsel des Azimuts des Außengebietes findet die oben angeführte, bisher rätselhafte Beobachtung ihre Erklärung, daß der Kanonendonner der Westfront im letzten Kriege auf deutscher Seite nur

im Winter, auf französischer nur im Sommer noch in Abständen zu hören war, die der äußeren Hörbarkeitszone entsprechen. Umgekehrt kann man auch sagen, daß das hier gefundene Ergebnis auch durch die zahlreichen Kriegsbeobachtungen bestätigt wird.

f) Die Scheitelpunkte der Strahlen, die in der Außenzone den Boden erreichen, müssen in bedeutenden Höhen liegen. Die Explosion von Vergiate am Südfuß der Alpen zeigt, daß der Alpenkamm keinen Einfluß auf die Ausbildung der jenseits gelegenen Außenzone hatte. Die Scheitelpunkte müssen hiernach wesentlich oberhalb 3000 m liegen. Der Meteoritenfall von Treysa bezeugt weiter, daß die Scheitelpunkte sogar noch wesentlich oberhalb 16 km liegen müssen. Dagegen braucht der Scheitelpunkt nach den Meteorochallerscheinungen nicht wesentlich höher als 40 km über dem Boden angenommen zu werden. Die Laufzeitmessungen im Außengebiet geben scheinbare horizontale Schallgeschwindigkeiten von 280 bis 310 m/sec, was einer Temperatur von -77° bzw. -33° entsprechen würde. Zwei sichere Beispiele ergaben 294 m/sec, -57° C entsprechend. Berücksichtigt man, daß die Schallgeschwindigkeit am Erdboden etwa 340 m/sec und also im Scheitelpunkt mindestens ebensoviel beträgt, so sieht man, daß selbst die Stratosphärentemperatur nicht imstande ist, die mittlere Geschwindigkeit bis auf die beobachteten Werte herabzusetzen; es gehört vielmehr ein bedeutender Umweg dazu, welcher die berechnete Geschwindigkeit zu einer scheinbaren macht. Die Schallstrahlen müssen also jedenfalls Höhen von etwa 50 km erreichen.

g) Jenseits der Außenzone, im doppelten Zentralabstande, scheint eine zweite, allerdings weit schwächere Hörbarkeitszone zu liegen. Diese Erscheinung wurde schon bei den Beobachtungen des Kanonendonners von Verdun besprochen. Ferner hat Verfasser⁴²⁾ darauf aufmerksam gemacht, daß sie sich bei Witten-Annen, Vergiate und Lyon zeigt. Im letzteren Falle lag das Intensitätsmaximum der Außenzone zwischen 190 und 200 km. Bei 280 km hören die positiven Schallmeldungen auf, eine Meldung aber kam noch aus 380 bis 390 km Abstand, also etwa dem doppelten Abstand des Intensitätsmaximums der Außenzone. Bei Witten-Annen lag der größte Teil positiver Meldungen etwa zwischen 120 und 160 km; von 220 ab hören die Meldungen auf, dann folgen noch zwei Meldungen aus 250 bis 270 km. Am deutlichsten ist die Erscheinung bei Vergiate: Das Intensitätsmaximum lag hier im Intervall 180 bis 190 km; von 280 ab hören die Meldungen auf, dann kommen aber wieder vier Meldungen zwischen 350 und 380 km.

Trotz der geringen Zahl der Belege möchte ich die Erscheinung für reell halten. Sie erklärt sich durch Reflexion des Schalls am Erdboden und Wiederholung des Weges durch die hohen Luftschichten.

7. Die Erklärung der äußeren Hörbarkeitszone. a) Durch Temperatur. Wurschmidt⁴⁸⁾ ist der Ansicht, daß zur Entstehung der äußeren Hörbarkeitszone bereits Temperaturinversionen innerhalb der Troposphäre oder an der Grenze der Stratosphäre ausreichen. Dies Urteil ist deswegen seltsam, weil seine eigenen zahlreichen Beispiele Annahmen über den thermischen Auf-

bau der Atmosphäre zugrunde legen müssen, deren vollige Unmöglichkeit durch die Aerologie längst nachgewiesen ist. Dies geht schon daraus hervor, daß im Scheitelpunkt der Strahlen stets eine Temperatur mindestens gleich der am Boden herrschen müßte, während bekanntlich die Troposphäre einen Temperaturabfall von 60° aufweist, und die Stratosphärentemperatur etwa -55°C beträgt. Eine solche Wiedererreichung der Bodentemperatur kann nur bei sehr niedrigen Inversionen vorkommen, die aber wiederum nur Außenzonen sehr viel kleinerer Dimension erzeugen können, so daß sich derartige Störungen stets im Bereich des inneren Hörbarkeitsgebietes abspielen werden. Kommerell⁴⁴⁾ hat daher mit Recht die Temperatur als Erklärung für die äußere Hörbarkeitszone abgelehnt. Auch der Versuch Nölkes⁴⁵⁾, durch Benutzung abgelenkter Schallstrahlen die Notwendigkeit zu umgehen, im Scheitelpunkt mindestens die Bodentemperatur anzunehmen, liefert keine brauchbare Lösung. Die Beugung spielt zwar bei der Schallausbreitung eine große Rolle; sowohl die große Ausdehnung des inneren Hörbarkeitsgebietes wie die Halbschattenzone des äußeren (zwischen dem Innenrand und dem Intensitätsmaximum) muß auf Beugung beruhen. Aber gerade die Beugung mußte bei niedriger Scheitelhöhe der geometrischen Strahlen eine vollige Verwischung der Erscheinung bewirken. Vor allem aber verbieten die oben angeführten Beobachtungstatsachen überhaupt die Annahme, daß der Scheitelpunkt der in Frage kommenden Schallstrahlen innerhalb der Troposphäre liegt.

Neuerdings haben Lindemann und Dobson⁴⁶⁾ aus Meteorerscheinungen den Schluß gezogen, daß die Temperatur der Atmosphäre oberhalb 50 km Höhe wieder zunimmt und etwa den Betrag von $+27^{\circ}\text{C}$ erreicht, und Whipple⁴⁷⁾ macht darauf aufmerksam, daß hierdurch die Entstehung der äußeren Hörbarkeitszone erklärt werden könnte. Allein die Schlüsse von Lindemann und Dobson ruhen auf sehr unsicherer Grundlage. Sie haben nämlich gefunden, daß die Endhöhen der Meteore und Sternschnuppen in 50 bis 60 km Höhe ein Häufigkeitsminimum aufweisen, und erklären dies dadurch, daß die Meteore hier aus einer Atmosphäre von $+27^{\circ}\text{C}$ in eine solche von -51°C eintreten, wodurch die Verdampfung zeitweise gehemmt wird. Ist schon diese Deutung keineswegs zwingend, so erscheint nach meiner Ansicht auch die Realität des gefundenen Häufigkeitsminimums nicht genügend verbürgt, da die größeren Endhöhen (die den gewöhnlichen Sternschnuppen entsprechen) im allgemeinen nach einer anderen Beobachtungsmethode, nämlich durch systematische Beobachtung des Himmels, gefunden werden, während die niedrigeren Endhöhen den großen Meteoren entsprechen und durch Sammlung zufälliger Beobachtungen bestimmt werden. Dadurch kann ein doppeltes Häufigkeitsmaximum vorgetäuscht werden. Die Existenz der leuchtenden Nachtwolken oder Hochzirren scheint vielmehr zu zeigen, daß die Temperatur in diesen Höhen wieder abnimmt, da sonst der Wasserdampf nicht zur Kondensation kommen könnte*). Solange die Schluß-

*) Ganz zu schweigen von dem mir allerdings nicht sehr wahrscheinlichen Ergebnis von Vegard, daß das Polarlicht auf Phosphoreszenz festen Stickstoffstaubes beruhen soll, wonach in 100 km Höhe bereits eine Temperatur von -238°C herrschen müßte.

folgerungen von Lindemann und Dobson nicht besser begründet sind, erscheint es mir unmöglich, sie zur Erklärung der äußeren Hörbarkeitszone heranzuziehen.

b) Durch Wind. Nachdem bereits Mohn⁴⁸⁾ und Jäger⁴⁹⁾ den bedeutenden Einfluß, den der Wind auf die Schallausbreitung hat, klargelegt hatten, haben sich namentlich Emden⁵⁰⁾ und Morf⁵⁾ bemüht, zu zeigen, daß die äußere Hörbarkeitszone durch Windschichtung in Verbindung mit der allerdings weit weniger wirksamen Temperaturschichtung erklärt werden könne, und haben für eine größere Anzahl spezieller Annahmen die geometrischen Schallstrahlen im Hörbarkeitsgebiete berechnet. In allen diesen Beispielen verlaufen die Schallstrahlen sehr flach, was den oben angeführten Beobachtungstatsachen widerspricht und auch zu dem Bedenken Anlaß gibt, daß die berechneten Ergebnisse durch die Beugung verwischt werden müßten. Vor allem aber ist der Windeinfluß stets polarisiert, d. h. im wesentlichen auf das Azimut der Windänderung in der Vertikalen beschränkt, und Außenzonen von großem Zenitwinkel oder gar solche von geschlossener ringförmiger Anordnung, wie sie beobachtet sind, lassen sich auf diesem Wege natürlich nicht erklären. Als Ergebnis dieser theoretischen Untersuchungen kann angenommen werden, daß die jahreszeitlich wechselnde Bevorzugung der östlichen und westlichen Hälfte der Außenzone sehr wahrscheinlich auf Windeinfluß zurückzuführen ist, aber die Entstehung der Außenzone überhaupt muß eine andere Ursache haben.

c) Durch die Zunahme der Schallgeschwindigkeit infolge Änderung des Molekulargewichts der Luft in großen Höhen. Im Anschluß an die von Hann, Humphreys und dem Verfasser entwickelten Vorstellungen von einer etwa bei 70 km Höhe beginnenden Sphäre leichter Gase hat von dem Borne⁵¹⁾ die äußere Hörbarkeitszone durch die Annahme erklärt, daß der Scheitelpunkt der Schallstrahlen im Übergangsbereich zu den leichten Gasen liegt, wo die Schallgeschwindigkeit infolge Verringerung des (mittleren) Molekulargewichts der Luft schnell die am Boden herrschenden Werte erreicht und überschreitet. Indem er für die Änderung des Molekulargewichts mit der Höhe die Beziehung

$$\mu = 2 \frac{e^{0.15 h} + 53000}{e^{0.15 h} + 3000}$$

annahm und die Rechnung für sechs Strahlen ausführte, die von der Schallquelle mit von 10 zu 10° wachsenden Zenitdistanz ausgehen, erhielt er folgende Scheitelhöhen und Rückkehrpunkte zur Erdoberfläche (Z_0 Zenitdistanz an der Schallquelle, H Höhe des Scheitelpunktes, Δ Entfernung des Schnittpunktes mit der Erdoberfläche):

Z_0 . .	17° 20'	20	30	40	50	60	70	80°
H . .	∞	89	75	69	65	62	58	56 km
Δ . .	∞	126	116	120	126	142	210	290 „

Das Außengebiet ist ringförmig und hat am Innenrande, bei 116 km Entfernung, eine Brennnlinie mit maximaler Intensität. Den Verlauf der Schallstrahlen selbst hat de Quervain⁵²⁾ dargestellt.

Van Everdingen²⁵⁾ fand bei Nachrechnung unter den Annahmen von dem Bornes als Innenrand der Außenzone nur 103 km. Er variierte dann die Rechnung für verschiedene Annahmen über den Gehalt der Luft an leichten Gasen und kam zu folgenden Werten für den Abstand Δ des Innenrandes der Außenzone:

Wasserstoffgehalt am Boden (Vol.-Proz.)	Helium	Geokoronium	Δ
0.01	0.005	ja	102
0.01	0.005	nein	117
0.0033	0.005	ja	114
0.0033	0.005	nein	126
0.000 55	0.000 15	nein	136
0.0001	0.000 15	nein	160

Er schloß hieraus, daß der Gehalt der Luft an leichten Gasen wesentlich geringer sein müsse, als nach den bisherigen, in der ersten Zeile der Tabelle zugrunde gelegten Annahmen. Dies wird übrigens auch durch die neuen Luftanalysen von Krogh⁵³⁾ bestätigt, der zu dem Ergebnis kam, daß der prozentuale Anteil brennbarer Gase, mögen sie in Wasserstoff oder anderen Gasen bestehen, sicher kleiner als 0.0005 Proz. und wahrscheinlich kleiner als 0.0002 Proz. ist.

Wiechert³³⁾ ist auffallenderweise zu dem entgegengesetzten Ergebnis gelangt, nämlich, daß der Wasserstoffgehalt größer sein mußte, als von dem Borne voraussetzt. Er schließt dies aus der Laufzeit des Schalles von Jüterbog nach Göttingen. Da die Entfernung 215 km beträgt, benutzte er denjenigen von dem Borneschen Strahl, der mit einer Zenitdistanz von 70° die Schallquelle verläßt und in 210 km Entfernung wieder den Boden erreicht. Die Rechnung ergibt für ihn eine theoretische Laufzeit von 770 Sekunden, während nur 734 beobachtet wurden, was einen größeren Wasserstoffgehalt nahelegt. Ich möchte indessen darauf aufmerksam machen, daß diese Abweichung eine andere Ursache haben kann. Die Beobachtung fand im Juli statt, in welchem Monat der Innenrand der Außenzone nicht bei 116 km, wie bei von dem Borne, sondern bei etwa 190 km liegt; möglicherweise müssen wir statt dessen sogar den Wert für das Intensitätsmaximum (230 km) benutzen. Infolgedessen darf nicht der von dem Bornesche Strahl der Rechnung zugrunde gelegt werden. Aus diesem Grunde möchte ich dem Ergebnis von Wiechert gegenüber dem von van Everdingen keine Beweiskraft beimessen.

Gegen die Theorie von dem Bornes sind verschiedene Bedenken geäußert worden. Die Existenz von Wasserstoff in den hohen Schichten wurde bezweifelt, weil dessen Moleküle durch die Erdanziehung nur unvollkommen gefesselt werden und sich daher längst im Raume zerstreut haben müßten. Auch scheinen im Spektrogramm des Polarlichts die Wasserstofflinien zu fehlen. Demgegenüber betont Wiechert³³⁾, daß durch die Sonnenstrahlung Wasserstoff in der Atmosphäre neu gebildet wird, wodurch der Verlust ersetzt werden kann. Auch zeigen bekanntlich die Luftproben aus dem oberen Teil der Tropo- und dem unteren Teil der Stratosphäre bei spektroskopischer Untersuchung tatsächlich eine Anreicherung der leichten Gase. Die sehr großen Höhen der Polarlichter und Meteore scheinen zudem die Hypothese leichter Gase, durch welche die Druck-

abnahme gestreckt wird, unentbehrlich zu machen. Beim Polarlichtspektrum kann es sein, daß der Wasserstoff trotz reichlichen Vorhandenseins nicht „anspricht“.

Einen Einwand anderer Art hat W. Schmidt gemacht⁵⁴⁾; er nimmt an, daß die Amplitude der Schallwellen beim Übergang von den dichteren unteren Schichten zu den dünneren oberen jedenfalls nicht größer werden kann. Dann muß aber die Intensität in den hohen Schichten bis auf unmerklich kleine Restbeträge sinken, die bis zum Abstieg zur Erde noch weiter verringert werden. A. Wegener⁵⁵⁾ hat dagegen geltend gemacht, daß dies eine Verletzung des Prinzips von der Erhaltung der Energie bedeuten würde, und daß die von Schmidt vorausgesetzte Gesetzmäßigkeit deshalb hier nicht gelten könne. Schrödinger⁵⁶⁾ hat dies durch eine eingehende mathematische Darstellung bestätigt und die für den vorliegenden Fall gültigen Formeln abgeleitet, wodurch Schmidts Einwand endgültig abgewiesen ist.

Aber Schrödinger selbst kommt zu Bedenken gegen von dem Bornes Theorie, indem er die durch Wärmeleitung und innere Reibung erzeugte Dämpfung der Wellen berechnet. Sowohl die Temperaturleitfähigkeit als auch das Verhältnis der Reibung zur Dichte zeigen eine angenähert exponentielle Zunahme mit der Höhe. Hierdurch wird die Dämpfung, wenigstens der kurzen hörbaren Wellen, die ihr mehr unterliegen als die langen unhörbaren, so groß, daß sie nicht viel über 80 km Höhe vordringen können. A. Wegener⁴²⁾ hat dagegen eingewendet, daß bei der Ableitung dieser Ergebnisse die gewöhnliche barometrische Höhenformel zugrunde gelegt ist, in welcher keine Rücksicht auf die leichten Gase genommen ist, durch welche der Luftdruck und daher auch die Dämpfung in diesen großen Höhen stark beeinflußt werden. Die wirkliche Dämpfung muß daher wesentlich kleiner sein als die von Schrödinger berechnete.

Weitere Einwände von Bedeutung sind nicht bekannt. Die Erklärung von dem Bornes ist also zwar hypothetisch, aber unwiderlegt, im Gegensatz zur Erklärung aus Temperatur und Wind.

d) Durch Zunahme der Schallgeschwindigkeit infolge der Luftdruckabnahme in großen Höhen. Ich möchte hier noch über eine andere Erklärungsmöglichkeit berichten, die, soweit mir bekannt, bisher noch nicht in Betracht gezogen ist. Es handelt sich darum, daß das bekannte Gesetz der Unabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Luftdruck in unserem Falle ungültig wird, und zwar wegen des außerordentlich großen Betrages der Luftdruckabnahme, die die Schallwellen durchlaufen müssen.

Die Laplacesche Formel für die Schallgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{\frac{p}{d} \frac{c_p}{c_v}} = \sqrt{p \frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{RT}{p}},$$

worin der Druck p sich heraushebt, ist abgeleitet unter der Voraussetzung, daß die Druckschwankung klein ist gegen den Luftdruck selbst. Dies ist bei gewöhnlichen Schallwellen durchaus der Fall. Bei Explosionen haben wir in der Nähe der Schallquelle so große Druckschwankungen, daß die Voraussetzung hier nicht mehr zutrifft; die Folge ist, daß die Geschwindigkeit weit über 400, ja

über 1000 m pro Sekunde anwächst. Die Region der Überschallgeschwindigkeit hat allerdings einen Radius von nur wenigen hundert Metern, und darüber hinaus sind auch bei heftigen Explosionen die Vorbedingungen für die Formel erfüllt, und beobachten wir keine Abweichungen von ihr.

Wie aber, wenn die Schallwelle nach oben fortschreitet? Nehmen wir der Einfachheit halber eine ebene Schallwelle an, so muß nach Schrödinger die Energie in jeder Flächeneinheit der Wellenfläche — bis auf unbedeutende Verluste — konstant bleiben, während die Welle in immer niedrigeren Luftdruck fortschreitet. Das kann offenbar nur dann geschehen, wenn auch die Druckschwankung ihrem absoluten Betrage nach annähernd konstant bleibt; folglich muß das Verhältnis

$$\frac{\text{Druckschwankung}}{\text{Luftdruck}} = \frac{\Delta p}{p}$$

immer größer werden, je größere Höhen die Welle erreicht. Beträgt die Druckschwankung z. B. 0.76 mm, so daß am Boden $\frac{\Delta p}{p} = 0.001$, mithin die Voraussetzung der Laplaceschen Formel hinreichend erfüllt ist, so wird dies Verhältnis in 20 km Höhe (Luftdruck etwa 42 mm) gleich 0.02, in 40 km Höhe (Luftdruck etwa 1.9 mm) bereits gleich 0.4 und in 60 km Höhe (Luftdruck etwa 0.1 mm) sogar gleich 7.6. Mit anderen Worten: schon lange bevor wir in die Zone der leichten Gase kommen, sind wir aus dem Geltungsbereich der Laplaceschen Formel für die Schallgeschwindigkeit heraus. In Wirklichkeit haben wir allerdings Kugelwellen statt ebener Wellen, und in solchen kann die Energie pro Flächeneinheit der Wellenfläche nicht konstant bleiben, sondern muß mit zunehmendem Abstände von der Schallquelle abnehmen (proportional $1/r^2$); aber es ist klar, daß hierdurch die exponentielle Abnahme des Druckes mit der Höhe nicht kompensiert werden kann.

Das allgemeine Problem der Fortpflanzung von Luftwellen endlicher Schwingungsweite ist bekanntlich von Riemann⁵⁷⁾ für die vereinfachende Annahme ebener Wellenflächen behandelt worden. Hiernach ist anzunehmen, daß nach oben fortschreitende Schallwellen in der Atmosphäre sich in „Stoßwellen“ umwandeln, bei denen die Druckerhöhung sprunghaft einsetzt, während der Teil der Welle, der einer Verdünnung entspricht, sich weit ausdehnt. Die Geschwindigkeit dieser Wellen ist wesentlich größer als die Laplacesche Schallgeschwindigkeit und darf wohl verglichen werden mit den anfänglichen Geschwindigkeiten von Explosionswellen, die ja gleichfalls als Riemannsche Stoßwellen aufgefaßt werden.

Für eine Erklärung der äußeren Hörbarkeitszone leistet natürlich die Geschwindigkeitszunahme durch Umformung in Stoßwellen dasselbe wie diejenige durch Änderung des Molekulargewichts der Luft.

Eine endgültige Stellungnahme zu diesem neuen Erklärungsversuch wird natürlich erst dann möglich sein, wenn das Problem einer exakteren mathematischen Behandlung unterworfen ist. Es ist der Hauptzweck dieser Zeilen, diejenigen Theoretiker, die hierzu imstande sind, zu einer Prüfung dieser Frage anzuregen.

Mir selbst scheinen in den Beobachtungen Andeutungen, wenn auch unsicherer Art, vorhanden zu sein, daß diese Erklärung den Vorzug vor der von dem Borneschen verdient. Denn einerseits scheinen mir die Verhältnisse beim Meteorschall, die von Schrödinger berechnete Dämpfung und auch die Laufzeiten dahin zu deuten, daß die Scheitelpunkte der Schallstrahlen doch vielleicht etwas tiefer liegen als nach den Rechnungen von dem Bornes und van Everdingens, und andererseits würde die neue Auffassung auch die starke jährliche Abstandsschwankung vermutlich leichter erklären lassen, nämlich durch die starke jährliche Druckschwankung in großen Höhen, die dadurch zustande kommt, daß bei praktisch gleichem Bodendruck die Druckabnahme nach oben im Sommer wegen der höheren Temperaturen langsamer erfolgt als im Winter. Noch in der Stratosphäre haben wir ja eine jährliche Temperaturschwankung um mindestens 8°. Die Höhe, in welcher die Laplacesche Formel ihre Gültigkeit verliert und die Schallgeschwindigkeit wieder zunimmt, wird daher im Sommer größer sein als im Winter, und demgemäß muß auch der Zentralabstand der äußeren Hörbarkeitszone im Sommer größer sein als im Winter.

Literatur.

- 1) G. von dem Borne: Über die Verbreitung der durch die Dynamitexplosion zu Förde in Westfalen verursachten Schallphänomene. Die Erdbebenwarte **4**, 1 (1904—1905).
- 2) Ch. Davison: Sound areas of great explosions. Nature **98**, 438 (1917).
- 3) E van Everdingen: De hoorbaarheid in Nederland van het Kanongebulder by Antwerpen op 7—9 October 1914. Hemel en Dampkring 1914.
- 4) W. Meinardus. Die Hörweite des Kanonendonners bei der Belagerung von Antwerpen. Meteorol. Zeitschr. 1915, S. 199.
- 5) H. Morf: Über den Einfluß der meteorologischen Zustände der Troposphäre auf die Ausbildung der anormalen Schallzone (davon III. Teil. Hörbarkeit des Kanonendonners im Winter 1917—1918 in der Schweiz und in Süddeutschland). Jahresber. d. Schweiz. Erdbebedienstes 1918, Anh., Zürich 1919.
- 6) W. Brand. Jährliche Hörbarkeitsperiode des Geschützdonners und seine größten bisherigen Reichweiten. Meteorol. Zeitschr. 1917, S. 58.
- 7) W. Hillers. Über eine vermutete Beobachtung außerordentlich weiter Hörbarkeit des Geschützdonners. Ebenda 1916, S. 548.
- 8) A. de Quervain: Weitere Beiträge zur Frage der atmosphärischen Schallausbreitung. Jahresber. d. Schweiz. Erdbebedienstes 1915, Anh. 2, Zürich 1917.
- 9) W. Brand. Reichweite des Geschützdonners nach Kriegsbeobachtungen. Sitzungsber. d. Ges. z. Beförd. d. gesamt. Naturw. zu Marburg, Nr. 3, 14. Juli 1915.
- 10) P. Ludewig: Einige Beobachtungen über die Hörbarkeit des Kanonendonners. Meteorol. Zeitschr. 1916, S. 35. Siehe auch Ann. d. Hydr. usw. **44**, 381 (1916).
- 11) V. Schaffers: The Sound of Distant Gun-fire. Nature **107**, 44 (1921).
- 12) M. Collignon. Sur la propagation du son canon à grande distance. Periodicité annuelle. Compt. rend. **172**, 213 (1921) [siehe auch ebenda **167**, 333 (1918)].
- 13) G. von dem Borne: Über die Fernwirkung der Roburitaufflammung in Witten-Annen. Die Erdbebenwarte **6**, 110 (1906—1907).
- 14) A. de Quervain: Die Erdbeben der Schweiz i J. 1908 und die Schallverbreitung der Dynamitexplosion an der Jungfraubahn am 15. November. Ann. d. Schweiz. Meteorol. Zentralanst. 1908, Zürich 1909.
- 15) J. N. Dörr. Über die Fernwirkung der Explosion auf dem Steinfeld bei Wiener Neustadt (7. Juni 1912). Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. Wien, Oktober 1913.
- 16) Ch. Davison: The Sound-Waves and other Air-Waves of the East London Explosion of January 19, 1917. Proc. Edinburgh **38**, 115 (1918) [siehe auch 2].

17) A. de Quervain und A. de Weck Mitteilungen über weitere Fälle von ungewöhnlicher Schallausbreitung bei Explosionen a) Explosion von Oppau am 21. September 1921; b) Explosion des Forts von St. Helena am 25. Oktober 1921. Jahresber. d. Schweiz. Erdbebendienstes 1920, Anh. 1, Zürich 1922.

18) A. de Quervain: Ein erster Fall diametraler Ausbildung des anormalen Schallgebietes (Explosion von Vergiate vom 26. November 1920). Ebenda 1919, Anh 2, Zürich 1920.

19) F. Errulat: Die Fernwirkungen der Explosion von Rothenstein bei Königsberg i. Pr. am 10. April 1920 mit besonderer Berücksichtigung der Bodenerschütterungen. Schrift d. Physik.-ökonom. Gesellschaft Königsberg, Jahrg. LXIII, 1922.

20) W. J. Witkiewicz. Der Schallstrahl als Methode der Untersuchung der Atmosphäre (in russ. Sprache). Études scientifiques de l'atmosphère. Edition de l'Observatoire Aerologique de Moscou, Fasc. II, Moscou 1925, S. 14—42 (russ.)

21) Th. Wolf: Geognostische Mitteilungen aus Ecuador N. J. f. Min. usw. 1878, S. 113 (besonders S. 129).

22) R. D. M. Verbeek: Krakatau, Batavia 1886 (in franz. Sprache, mit Atlas).

23) R. H. Scott. Die „Krakatoa“-Luftwelle. Zeitschr. d. Österr. Ges. f. Met. 1884—1885, S. 97 (mit Reproduktion von 14 europäischen Luftdruckregistrierungen und derjenigen von Toronto).

24) J. M. Pernter: Der Krakatau-Ausbruch und seine Folgeerscheinungen. Meteorol. Zeitschr. 1889, S. 329.

25) E. van Everdingen: The propagation of sound in the atmosphere. Kon. Ak. van Wetenschappen te Amsterdam. Proc. Vol. XVIII, Nr. 6, S. 933 (1915) [teilweise nach S. Fujiwhara in Bulletin Central Meteorological Observatory Japan 2, 1 (1912)].

26) S. Fujiwhara: On the abnormal propagation of sound waves in the atmosphere (Abstr.). Monthly Weather Review 1916, S. 436 (nach der gleichnamigen Arbeit in Bull. Centr. Met. Obs. Tokyo, Japan, 1916). Siehe auch Monthly Weather Review 1914, S. 258.

27) A. Wegener: Das detonierende Meteor vom 3. April 1916, 3 $\frac{1}{2}$ Uhr nachmittags in Kurhessen. Schrift d. Ges. z. Beförd. d. gesamt. Naturw. zu Marburg 14, Heft 1, Marburg 1917.

28) A. de Quervain: Das Meteorbeben vom 28. Juli 1915. Jahresber. d. Schweiz. Erdbebendienstes 1916, Anh., Zürich 1917.

29) Muncke: Artikel „Meteorstein“ in Gehlers Phys. Wörterbuch 6, Leipzig 1837.

30) G. v. Nießl: Über die Rolle der Atmosphäre im Meteorphänomen. Astronom. Kalender. Wien 1901.

31) Derselbe. Bahnbestimmung des großen Meteors vom 17. Jänner 1890. Sitzungsber. Akad. d. Wiss. Wien 99, Dez. 1890.

32) Briefliche Mitteilungen von E. van Everdingen an den Verfasser über die Sprengung von Oldebroek. Die ausführliche Arbeit van Everdingens soll demnächst erscheinen.

33) E. Wiechert: Seismische Untersuchungen, 1. Mitteilung. Beobachtungen von Lufterschütterungen in Göttingen bei Sprengungen in Jüterbog. Zeitschr. f. Geophysik 1, 14, Heft 1/2 (1924/25),

34) G. Angenheister. Anhang zu vorigem. Ebenda S. 20.

35) H. Hergesell: Kurzer Bericht über das Ergebnis der Ohrbeobachtungen und der Varioskopablesungen bei dem Schallversuch am 3. Mai 1923. Mitt. d. Aeronaut. Obs. Lindenberg 1924.

36) F. Ritter: Sprengungen für Forschungszwecke. Erste Mitteilung über die Schallwelle der Sprengung in Jüterbog am 3. Mai 1923 Beitr. z. Physik d. freien Atm. 12, Heft 1 (1925), S. 1.

37) L. Gazeaud: Sur les zones de silence, Compt. rend. 179, 284—285 (1924).

38) P. Villard: Sur les expériences de La Courtine. Compt. rend. 179, 617—620 (1924).

39) Dufour: Sur la longueur d'onde du maximum d'énergie du spectre sonore d'une explosion. Compt. rend. 179, 759—761 (1924.). Ferner ebenda S. 1741.

40) Briefliche Mitteilung von J. Georgi an den Verfasser vom 18. Juni 1925.

- 41) Briefliche Mitteilung von H. Hergesell an den Verfasser vom 14. Mai 1925
- 42) A. Wegener: Die äußere Hörbarkeitszone und ihre periodische Verlagerung im Jahreslauf. *Meteorol. Zeitschr.* 1925, S. 261.
- 43) J. Würschmidt. Über die „Zone des Schweigens“. *Sitzungsber. d. phys.-med. Soz. in Erlangen* 50—51 (1918/19).
- 44) V. Kommerell: Die Bahn der Schallstrahlen in der Luft unter dem Einfluß der Temperatur. *Phys. Zeitschr.* 1916, S. 172.
- 45) F. Nölke: Zur Erklärung der beim Geschützdonner, bei großen Explosionen usw. beobachteten Fortpflanzungseigentümlichkeiten des Schalles. *Phys. Zeitschr.* 17, 31 (1916). — Ergänzung dazu ebenda S. 283. — Über die bei heftigen Explosionen und beim Geschützdonner beobachteten Anomalien der Schallausbreitung. *Ebenda* 18, 501 (1917).
- 46) F. A. Lindemann und G. M. B. Dobson: A Theory of Meteors, and the Density and Temperature of the Outer Atmosphere to which it leads. *Proc. Roy. Soc. London (A)* 102, 411—437 (1923) Nr. 717. — Note on the Temperature of the Air at Great Heights. *Ebenda* 103, 339—342 (1923), Nr. 721.
- 47) F. J. W. Whipple The High Temperature of the Upper Atmosphere as an Explanation of Zones of Audibility. *Nature* 111, 187 (1923).
- 48) H. Mohn: Studien über Nebelsignale. *Ann. d. Hydr. usw.* 20, 85 u. 117 (1892).
- 49) G. Jäger Über die Fortpflanzung des Schalles in bewegter Luft. *Sitzungsber. d. Akad. d. Wiss. Wien* 105, Dez. 1896.
- 50) R. Emden Beiträge zur Thermodynamik der Atmosphäre. *Meteorol. Zeitschr.* 1918, S. 13, 74. 114.
- 51) G. von dem Borne: Über die Schallverbreitung bei Explosionskatastrophen. *Phys. Zeitschr.* 11, 483 (1910)
- 52) A. de Quervain Die Ausbreitung des Kanonendonners aus dem Sundgau an Weihnachten 1914. *Jahresber. d. Schweiz. Erdbebendienstes 1914, Anh. 2, Zürich* 1916.
- 53) A. Krogh: The composition of the Atmosphere. *Det kgl. Danske Videnskabernes Selskab Math.-fys. Medd. I, 12, København* 1919.
- 54) W. Schmidt. Zur Erklärung abnormer Hörbarkeit. *Meteorol. Zeitschr.* 1915, S. 366.
- 55) A. Wegener: Äußere Hörbarkeitszone und Wasserstoffsphäre. *Ebenda* 1916 S. 523.
- 56) E. Schrödinger. Zur Akustik der Atmosphäre. *Phys. Zeitschr.* 1917, S. 445.
- 57) B. Riemann. Über die Fortpflanzung ebener Luftwellen von endlicher Schwingungsweite. *Ges. Math. Werke, herausgeg. v. H. Weber, Leipzig* 1876, S. 145.

Die Laufzeit des Schalls für große Entfernungen.

Von G. Angenheister. — (Mit zwei Abbildungen.)

Es werden Laufzeitkurven der „normalen“ Schallausbreitung zwischen $d = 0$ und 344 km und der „anormalen“ zwischen $d = 157$ und 310 km aufgestellt. Die „normalen“ Laufzeiten entsprechen nahezu der Schallgeschwindigkeit bei der herrschenden Lufttemperatur am Boden. Die „anormalen“ Laufzeiten sind 70 bis 130 sec länger. Der „anormale“ Laufstrahl für $d = 240$ km erreicht eine Scheitelhöhe von etwa 37 km und eine Scheitelgeschwindigkeit von etwa 350 m/sec. In verschiedenen Azimuten vom Schallherd zeigen die „anormalen“ Laufzeiten für gleiche Herddistanz Unterschiede bis zu 60 sec; desgleichen in gleichem Azimut und gleicher Herddistanz für verschiedene Wetterlagen.

Die Beobachtung der Schallfortpflanzung hat gezeigt, daß die Zone normaler Hörbarkeit umgeben ist von einer Zone des Schweigens, auf die weiterfort eine Zone anormaler Hörbarkeit folgt. Die Schallbahn verläuft in der Nähe der