

Werk

Jahr: 1926

Kollektion: fid.geo

Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:2

Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen

Werk Id: PPN101433392X_0002

PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0002

LOG Id: LOG_0028

LOG Titel: Die anormale Schallausbreitung als Mittel der Erforschung der Stratosphäre

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 anormale Schallausbreitung als Mittel der Erforschung der Stratosphäre.

Von E. Wiechert.

Aus den Beobachtungen ist zu schließen, daß die Schallwellen der sogenannten anormalen Schallausbreitung ihren Weg zur Erde zurück durch die Stratosphäre finden. Die Wirkung des Windes scheint nach den Beobachtungen nicht hinreichend. Auch die Theorie von G. von dem Borne genügt nicht. Es muß gefolgert werden, daß von etwa 30 km Erdhöhe ab die Schallgeschwindigkeit schnell zunimmt. Die Zunahme geht zuweilen über die Schallgeschwindigkeit am Boden hinaus, und zwar wird diese Geschwindigkeit in etwa 40 km Erdhöhe erreicht. Beide Höhenangaben bedeuten bei der Unsicherheit der bisherigen Beobachtungen nur erste Schätzungen, und beziehen sich auf mittlere Zustände der Atmosphäre. Im Sommer sind die Höhen erheblich größer als im Winter. Die Zunahme der Schallgeschwindigkeit in der Stratosphäre nach oben hin zeigt wahrscheinlich ein Anwachsen der Temperatur an, welches bis etwas über die Bodentemperatur hinausgehen kann. Die jeweilige Ausbildung der anormalen Schallausbreitung wird bei dieser Annahme bestimmt durch Temperatur und Wind sowohl in der Stratosphäre wie in den unteren Teilen der Atmosphäre.

§ 1. Vorwort. Es darf heute als sichergestellt gelten, daß die sogenannte anormale Schallausbreitung durch Schallwellen zustande kommt, welche über die Troposphäre hinweg durch die Stratosphäre gegangen sind. Man vergleiche z. B. die soeben erschienenen Darstellungen von A. Wegener¹⁾ und G. Angenheister²⁾. Unserem Standpunkt entspricht vortrefflich die Erfahrung, daß bei Detonationen von Meteoriten in der Höhe die innere Grenze der anormalen Hörbarkeit dem Zentrum näher liegt als bei Detonationen am Erdboden. Der Wind wirkt zwar bei der Ausbildung der anormalen Schallausbreitung oft mit, aber sein Einfluß ist meist nicht grundlegend, sondern nur einer der Umstände, welche die Form gestalten. Im folgenden soll der Windeinfluß möglichst beiseite gelassen werden, damit nur das in der Regel Wesentliche klar hervortritt.

Über die Theorie der Schallausbreitung habe ich eine Arbeit³⁾ veröffentlicht, welche in die „Nachrichten der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, mathematisch-physikalische Klasse“ 1925, S. 49—69, gehört und am 16. Dezember 1925 in Sonderdrucken ausgegeben wurde. Einen ersten Vortrag über die Arbeit hielt ich vor der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen am 20. November 1925, einen zweiten vor der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft am 7. Dezember 1925 bei ihrer Tagung in Göttingen. Im folgenden, wo ich weitere Ausführungen zu geben gedenke, wird es öfters nötig sein, mich auf diese Arbeit zu beziehen.

Die Theorie der anormalen Schallausbreitung von G. von dem Borne versagt, weil sie ja nach der Annahme über Wasserstoffgehalt der Stratosphäre zu große Laufzeiten des Schalles oder zu enge innere Begrenzung der Hörbarkeit ergibt.

§ 2. Mathematisches über die Schallausbreitung. Bei der Erdseismik war es möglich, aus dem Laufe der Wellen über die Erdoberfläche auf ihren Weg im Innern der Erde zu schließen. So stellt sich nun die Aufgabe

ein, aus der Ausbreitung der Schallwellen über die Erdoberfläche den Weg der Wellen durch die Atmosphäre festzustellen. Gegenüber der Erdseismik ergibt sich hierbei eine Komplikation insofern, als die Wellen der anormalen Schallausbreitung nicht schon an der Schallquelle ihren Lauf über die Erdoberfläche beginnen, sondern erst an der äußeren Grenze der „Zone des Schweigens“ auftauchen. So ist nicht ohne weiteres möglich, die in der Erdseismik meist übliche direkte Methode der Verwertung der Beobachtungen über die Laufzeit zu verwenden, welche sich auf den „Abelschen Integralsatz“ stützt und öfter die Herglotz-Wiechertsche Methode genannt wird. Da unter solchen Umständen ein Probieren nicht vermieden werden kann, verzichtete ich vorläufig auf Verwendung des Abelschen Satzes und benutzte einheitlich die Methode, die Annahme über die Beschaffenheit der Atmosphäre so lange zu variieren, bis den Beobachtungen in genügender Weise entsprochen wird. Bei der Unsicherheit der Beobachtungen dürfen hohe Anforderungen nicht gestellt werden. Es muß genügen, die wesentlichen Charakterzüge der Erscheinung darzustellen. Wir denken uns demgemäß die Atmosphäre ersetzt durch ein Gebilde, welches aus Schichten mit idealisierter einfacher Beschaffenheit besteht. Es entspricht das dem mathematischen Annäherungsverfahren der „mechanischen Quadratur“. In der genannten Arbeit ²⁾ verwendete ich folgende Arten von Schichten:

1. Schichten gleichförmiger Beschaffenheit. Die Strahlen sind geradlinig.
2. „Sprungschichten“. Es sind dies dünne Schichten, in welchen die Schallgeschwindigkeit sich schnell ändert. Die Dicke der Schichten wird so gering angenommen, daß es erlaubt ist, sie zu vernachlässigen. Bei dieser Annahme erscheint die Sprungschicht als eine Fläche, an welcher der Schall „gebrochen“ oder „reflektiert“ wird. Es gelten die aus der Optik wohlbekannten Gesetze.
3. Schichten, in welchen die Schallgeschwindigkeit sich linear mit der Höhe ändert. Die Strahlen bilden Kreise.
4. Schichten, in welchen das Quadrat der Schallgeschwindigkeit sich linear mit der Höhe ändert; die Strahlen bilden Zykloiden.

Auf die mathematische Einkleidung dieser Ausnahmen mag in aller Kürze hingewiesen werden.

v sei die Schallgeschwindigkeit an irgend einer Stelle der Strahlbahn, e die Neigung des Strahles gegen die Horizontale, \bar{v} die Wellengeschwindigkeit am Scheitel des Strahles, wo also $e = 0$ ist. Mit dem unteren Index u sollen die Werte gekennzeichnet werden, die der Erdoberfläche angehören (etwa v_u, e_u).

Wie in meiner zitierten Arbeit will ich unter „Laufgeschwindigkeit“ V_u jene Geschwindigkeit verstehen, mit welcher an irgend einer Stelle der Erdoberfläche die Schallwellen dort über die Erdoberfläche dahineilen. Weil wir den Wendeinfluß vernachlässigen, gilt nach einfachen Überlegungen wie in der Erdseismik die Beziehung $V_u = v_u / \cos e_u$.

Die „Strahlgleichung“ ist dieselbe wie in der Erdseismik, doch können wir die Variationen des Abstandes vom Erdmittelpunkt vernachlässigen. Die Gleichung sagt dann aus, daß $v / \cos e$ für den ganzen Verlauf der Strahlen konstant ist, und kann in folgender Form geschrieben werden:

$$v / \cos e = \bar{v} = v_u / \cos e_u = V_u \dots \dots \dots (1)$$

Zwei wichtige Sätze treten uns hier entgegen:

Die Laufgeschwindigkeit der Schallwellen über den Erdboden ist gleich oder größer als die Schallgeschwindigkeit.

Die Laufgeschwindigkeit gibt an jeder Stelle die Scheitelgeschwindigkeit des Strahles an, der dort zur Erde kommt.

Von dem zweiten Satz hat G. Angenheister in einer Arbeit³⁾ Gebrauch gemacht, in welcher er das bisherige Beobachtungsmaterial über die Laufzeiten der Schallausbreitung zusammenstellt. Wir werden hierauf weiterhin Bezug zu nehmen haben. Jetzt mag angemerkt werden, daß G. Angenheister den Satz verwertet, um die Höhe jenes Schallstrahles abzuschätzen, der in 245 km zur Erde herabkommt. Er setzt dabei den Strahl für die Näherungsrechnung aus zwei Kreisbogen in der Troposphäre und einem Kreisbogen in der Stratosphäre zusammen und findet dann als geschätzte Höhe 37 km. Nach unseren weiteren Überlegungen erscheint das als recht gutes Resultat.

Gehen wir nun zu der Anwendung von (1) auf die erwähnten Schichtarten.

Zu 1. Geradlinige Strahlen. Hier ist nichts zuzufügen.

Zu 2. Sprungschichten. Die beiden Seiten 1 und 2 einer Sprungschicht sind verbunden durch die Beziehung $v_2/\cos e_2 = v_1/\cos e_1$. Bei der Reflexion ist $e_2 = -e_1$.

Zu 3. Kreisbahnen. Setzen wir $v = v_1(1 + h/H_1)$, wobei (1) die Horizontalfläche kennzeichnet, von der aus die Höhe h gerechnet wird, und die Konstante H_1 positiv oder negativ sein kann, so ist beim Übergang zu irgend einer anderen Horizontalfläche $v_2/H_2 = v_1/H_1$ und man findet durch einfache Rechnungen:

$$\left. \begin{aligned} l &= H_1 \frac{\sin e_1 - \sin e_2}{\cos e_1} = H_1 \operatorname{tg} e_1 - H_2 \operatorname{tg} e_2, \\ t &= \frac{H_1}{v_1} \left(\lg \operatorname{ctg} \frac{90^\circ - e_1^0}{2} - \lg \operatorname{ctg} \frac{90^\circ - e_2}{2} \right). \end{aligned} \right\} \dots \dots (2)$$

Dabei bedeutet l den horizontal gemessenen Weg des Strahles zwischen den Horizontalflächen (1) und (2), also die Horizontalprojektion des Weges; t ist die zugehörige Laufzeit. Wird (2) mit (1) identisch, handelt es sich also um die Rückkehr des Strahles zur Horizontalfläche (1), so ergeben (2):

$$l = 2 H_1 \operatorname{tg} e_1, \quad t = \frac{2 H_1}{v_1} \lg \operatorname{ctg} \frac{90^\circ - e_1^0}{2} \dots \dots (3)$$

Zu 4. Zykloidenbahnen. Wird $v^2 = v_1^2(1 - h/H_1)$ gesetzt, wobei die Konstante H_1 positiv oder negativ sein kann, so folgt $H_2/\cos^2 e_2 = H_1/\cos^2 e_1$ und:

$$\left. \begin{aligned} l &= \frac{H_1}{\cos^2 e_1} (e_2 - e_1 + \sin e_2 \cos e_2 - \sin e_1 \cos e_1), \\ t &= \frac{\cos e_1}{v_1} \frac{2 H_1}{\cos^2 e_1} (e_2 - e_1). \end{aligned} \right\} \dots \dots (4)$$

§ 3. Beobachtungsmaterial. Man vergleiche hier die in Heft 7, Bd. I dieser Zeitschrift erschienenen Arbeiten von A. Wegener¹⁾ und G. Angen-

heister³⁾, welche auch Literaturnachweise bringen. Überblickt man das veröffentlichte Beobachtungsmaterial, so erscheinen einige Eigentümlichkeiten der anormalen Schallausbreitung sehr auffällig:

a) Die anormale Hörbarkeit ist an einen Ring um den Schallherd gebunden, der ganz, oder in einem Stück, oder in getrennten Stücken vorhanden ist und bei dem die äußere Grenze nur ausnahmsweise den doppelten Abstand vom Herd erreicht als der innere Rand. Die seltenen Ausnahmen, wo der anormale Schall in noch größeren Abständen als dem doppelten Radius der inneren Grenze beobachtet wurde, erklären sich wohl durch die Windwirkung oder durch eine Reflexion der herabkommenden Strahlen am Erdboden, welche sie nochmals in die Ferne führt. Bei der Art, wie das menschliche Ohr sich im allgemeinen betätigt, erscheint die außen so stark beschränkte Hörbarkeit merkwürdig und deutet auf eine Besonderheit in dem Zustandekommen der anormalen Schallausbreitung.

b) Der Bereich der anormalen Hörbarkeit schwankt stark im Laufe des Jahres. Der Herdabstand der inneren Begrenzung variiert nach A. Wegener von 110 km im Winter bis 190 km im Sommer.

c) Die mittlere Laufgeschwindigkeit der anormalen Schallwellen liegt in bemerkenswert engen Grenzen. Unter „mittlerer Laufgeschwindigkeit“ soll der Bruch L_u/T_u verstanden werden, wobei L_u den Herdabstand und T_u die Laufzeit bedeutet. Nach der Übersicht, die G. Angenheister³⁾ gegeben hat, findet sich L_u/T_u meist zwischen 280 m/sec und 300 m/sec. Diese Grenzen werden nur selten und — von ein paar besonders zu behandelnden Ausnahmen abgesehen — nur wenig überschritten. Zu beachten ist noch, daß die Werte der mittleren Laufgeschwindigkeit erheblich unter dem Wert der Schallgeschwindigkeit am Erdboden (von 331 m/sec bei 0° C) liegen.

d) Die Laufgeschwindigkeit V_u muß nach (1) gleich oder größer sein als die Schallgeschwindigkeit am Boden. Hieraus folgt, daß in jedem einzelnen Fall einer anormalen Schallausbreitung die mittlere Laufgeschwindigkeit L_u/T_u mit der Entfernung wachsen muß. Das ist deutlich in den Beobachtungen ausgeprägt. Auf die Frage, um wieviel die Schallgeschwindigkeit am Erdboden von der Laufgeschwindigkeit der anormalen Wellen übertroffen wird, läßt sich leider bei der Unsicherheit der bisher vorliegenden Beobachtungen nur eine sehr unbestimmte Antwort geben. Man erkennt nur, daß der Unterschied der beiden Geschwindigkeiten klein ist. Es folgt, daß der Neigungswinkel e_u der herabkommenden Strahlen ebenfalls klein ist. Zu $e_u = 20^\circ$ würde $V_u = v_u \cdot 1.064$ gehören, also ein Unterschied von 6 Proz. zwischen den Geschwindigkeiten. Dieser mag bei den bisher vorliegenden Beobachtungen erreicht werden.

§ 4. Variation der Schallgeschwindigkeit in der Stratosphäre. Wenden wir uns nun gemäß dem im Anfang von § 2 gegebenen Programm zu den Schlußfolgerungen auf die Variation der Schallgeschwindigkeit mit der Höhe, welche sich an die Beobachtungen knüpfen lassen, so will ich mich hier auf ein kurzes Referat über das in meiner Arbeit²⁾ Gesagte beschränken.

Mittleren Verhältnissen entsprechend setzte ich die Höhe der Troposphäre = 11 km, nahm für die absoluten Temperaturen unten und oben $273 + 9^\circ = 282^\circ$

und $273 - 57^{\circ} = 216^{\circ}$ an, setzte gleichmäßigen Temperaturabfall voraus und vernachlässigte den Wasserdampf. Dann kann das Quadrat der Schallgeschwindigkeit proportional mit der absoluten Temperatur angenommen werden und es ergibt sich der in § 2 unter 4. behandelte Fall der Zykloidenbahnen. Für H_1 wählte ich den Wert 47 km. Das „Probieren“ beschränkte sich nun auf die Stratosphäre. Die Resultate von vier meiner Versuche gebe ich an.

1. Versuch: In der Stratosphäre lineare Zunahme der Schallgeschwindigkeit nach oben hin. Fall 3 des § 2; $H_1 = 75$ km Kreisbahnen. Die Rechnung ergibt:

$e_u =$	0	6	10	15	20	25	30°
$L_u =$	170	155	149	145	147	152	160 km
$T_u =$	551	504	487	477	481	494	517 sec
$L_u/T_u =$	309	307	306	305	305	307	310 km/sec

2. Versuch: In der Stratosphäre geradlinige Bahnen. In 50 km Erdhöhe Reflexion an einer Sprungschicht. Die Rechnung ergibt:

$e_u =$	0	6	10	15	20	25	30°
$L_u =$	228	207	193	174	156	138	122 km
$T_u =$	828	766	724	669	617	569	526 sec
$L_u/T_u =$	276	270	267	260	252	242	231 m/sec

3. Versuch. In der Stratosphäre bis 35 km konstante Schallgeschwindigkeit. Darüber entsprechend Fall 3 des § 2 eine Schicht mit linear wachsender Schallgeschwindigkeit; $H_1 = 75/2 = 37\frac{1}{2}$ km Kreisbahnen. Die Rechnung ergibt:

$e_u =$	0	6	10	15	20	25	30°
$L_u =$	216	197	186	174	164	156	151 km
$T_u =$	752	697	665	630	603	581	658 sec
$L_u/T_u =$	286	283	280	276	272	269	266 m/sec

4. Versuch: In der Stratosphäre zwei Sprungschichten, eine in 30, die andere in 38 km Höhe. Geradlinige, gebrochene, an der oberen Sprungschicht reflektierte Strahlen. Die Rechnung ergibt:

$e_u =$	0	6	10	15	20	25	30°
$L_u =$	247	215	189	160	137	118	101 km
$T_u =$	826	730	654	572	506	453	410 sec
$L_u/T_u =$	299	294	288	280	271	260	247 m/sec

Es braucht wohl kaum erst hervorgehoben zu werden, daß bei jedem der Versuche für die wahlfreien Konstanten Werte aufgesucht worden sind, welche den Beobachtungen möglichst nahekommende Resultate gewährleisten.

Überblickt man die Ergebnisse der Rechnung, so zeigt sich, daß die mittleren Laufgeschwindigkeiten L_u/T_u sich beim ersten Versuch zu groß, beim zweiten zu klein ergeben. Die Annahme einer gleichmäßigen Zunahme der Schallgeschwindigkeit nach oben hin in der Stratosphäre genügt also nicht; und es folgt weiter, daß die entscheidenden Änderungen der Schallgeschwindigkeit unter 50 km Erdhöhe zu suchen sind. Versuch 3 paßt sich einigermaßen den wirklichen Verhältnissen an, genügt aber nicht, denn die mittleren Lauf-

geschwindigkeiten scheinen zu klein und der Bereich der anormalen Hörbarkeit mit einigermaßen zutreffenden mittleren Laufgeschwindigkeiten wird zu enge.

Versuch 4 gibt zwar vortrefflich passende Zahlen für die Laufzeiten, aber — und das ist von überaus großer Bedeutung — gibt keine innere Grenze für die anormale Schallausbreitung! Es ist sofort klar, was dieser Mangel bedeutet. Bei der Rechnung wurde angenommen, die obere Sprungschicht führe zu jeder beliebig hohen Schallgeschwindigkeit, so daß jeder beliebig steil aufsteigende Schallstrahl zur Erde zurückgeführt wird. Das ist offenbar falsch. Wir müssen voraussetzen, daß die von uns angenommenen Unregelmäßigkeiten in der Stratosphäre nur zu einem gewissen Grenzwert der Schallgeschwindigkeit führen; dann aber ergibt sich für Versuch 4, wo der Grenzwert an der oberen Sprungschicht zu liegen kommt, sofort eine innere Grenze der anormalen Hörbarkeit, deren Lage nach Tabelle 4 abzuschätzen ist. Ist \bar{v} der Grenzwert der Schallgeschwindigkeit, so wird der Grenzwinkel e_u für die innere Begrenzung des anormalen Bereichs durch $\bar{v} = v_u / \cos e_u$ bestimmt. Setzen wir z. B. $e_u = 20^\circ$, $\bar{v} = v_u \cdot 1.064$, so würde nach der Tabelle des Versuches 4 die innere Grenze des anormalen Bereichs bei 137 km zu liegen kommen.

Wird Versuch 4 bei so verbesserten Vorstellungen mit dem unter a), c), d) in § 3 Gesagten verglichen, so scheint er den bisher vorliegenden Beobachtungen so genau zu entsprechen, wie es bei den Unregelmäßigkeiten der Beobachtungen überhaupt möglich ist. Es ist selbstverständlich, daß wir nun nicht etwa schließen dürfen, in 30 und 40 km Höhe lägen bei mittleren atmosphärischen Zuständen tatsächlich Sprungschichten der beschriebenen Art. Angesichts des geringen, und unsicheren Beobachtungsmaterials ist zu solchen ins einzelne gehenden Folgerungen die Zeit noch nicht gekommen. Wir dürfen nur folgern, daß bei mittleren atmosphärischen Zuständen in rund 30 km die Schallgeschwindigkeit verhältnismäßig schnell ansteigt, daß die Zunahme etwas über die am Erdboden herrschende Schallgeschwindigkeit hinausführt, und daß diese Schallgeschwindigkeit in etwa 40 km überschritten wird. Die Zahlen für die Höhen sind dabei nur als erste Schätzung anzusehen.

Hier ist noch ein bedeutungsvoller Zusatz zu machen. Bei den Aufzeichnungen der Lufterschütterungen von Sprengungen zeigt sich öfters, daß das „Bebenbild“ 20 und mehr Sekunden umfaßt und daß darin zwei Einsätze in Abständen bis 15 Sekunden sich scharf hervorheben [vgl. die Arbeiten ¹⁾, S. 303, ²⁾, S. 64]. Eine solche Erscheinung ist bei Versuch 4 leicht zu erklären durch die Annahme, daß über der oberen Sprungschicht die Wellengeschwindigkeit noch weiter ansteigt. Ein Teil der Strahlen, welche so steil aufsteigen, daß sie die obere Sprungschicht durchdringen, wird dann in größerer Höhe doch noch zum Erdboden zurückgeführt. In diesem Falle kann sich die innere Grenze der anormalen Hörbarkeit wie bei der Theorie von G. von dem Borne (und bei unserem Versuch 1) als „Brennlinie“ darstellen, oder es tritt der zweite Einsatz in einer gewissen Entfernung vom Herd hinzu. Allgemein sprechend wird man sagen können, daß die doppelten Einsätze bei den Beobachtungen eine Besonderheit in der Schichtung der Stratosphäre anzeigen.

§ 5. Erweiterungen der Theorie. Im vorigen Paragraphen bin ich meiner durch Wort und Druck veröffentlichten Arbeit²⁾ nahe gefolgt. Jetzt sollen Erweiterungen gesucht werden.

a) Windeinfluß. Wir erfuhren, daß die bisherigen Beobachtungen für den anormalen Schall eine verhältnismäßig geringe Neigung e_u der zur Erde herabkommenden Wellen anzeigen. Es wurde daraus geschlossen, daß die entscheidenden, zur Erde herabführenden Schallgeschwindigkeiten v der Höhe nur wenig über die Schallgeschwindigkeit am Boden v_u hinausgehen. Zu dem Wert $e_u = 20^\circ$, der schon hoch erscheint, gehört ein Unterschied der Geschwindigkeiten \bar{v} und v_u um 6 Proz. Es ist von Wichtigkeit, zu beachten, daß die Geringfügigkeit des Unterschieds dem Wind einen großen Einfluß auf die Erscheinung verschafft. Die Windwirkung wandelt die Strahlgleichung (1) um in $v/\cos e + w = v(1 + w \cos e/v) \cos e = \text{const}$, wobei w die Windgeschwindigkeit ist. $1 + w \cos e/v$ hat für $w = 20$ m/sec etwa einen 6 Proz. höheren Wert als 1. Wir erkennen, daß schon ein Wind von 20 m/sec, wie er in den Höhen der Atmosphäre oft vorkommt, einen weit umgestaltenden Einfluß ausüben muß. So sind denn auch die beobachteten vielfachen Besonderheiten in der Ausgestaltung des Ringes der anormalen Schallausbreitung sehr leicht verständlich. Es soll nicht vergessen werden, hier anzumerken, daß umgekehrt die Vielgestaltigkeit der anormalen Hörbarkeit die Annahme nahelegt, die Schallgeschwindigkeit am Erdboden werde oben nur eben erreicht und wenig überschritten. Bei der Dürftigkeit der bisherigen Beobachtungen ist die Stütze für unsere Folgerungen, welche so gefunden wird, sehr wertvoll.

b) Jahreszeitliche Änderungen der anormalen Schallausbreitung. Nach A. Wegener¹⁾ nähert sich die innere Grenze der anormalen Hörbarkeit im Winter der Schallquelle bis auf etwa 110 km und entfernt sich im Sommer bis auf etwa 190 km. Die Ursache der Schwankung könnte man zunächst in der Temperaturänderung suchen. Für eine Überschlagsrechnung wollen wir annehmen, der Zustand der Atmosphäre unterscheide sich im Winter und Sommer um eine Veränderung der absoluten Temperatur im Verhältnis 273:293. Dann sind alle Höhen entsprechender Luftschichten im gleichen Verhältnis verschieden und alle Schallgeschwindigkeiten im Verhältnis $\sqrt{273}:\sqrt{293}$. Die Form der Schallstrahlen bleibt dieselbe, aber ihre Größe ändert sich im Verhältnis 273:293 = 110:118. Also müßte auch der Abstand des inneren Randes der Hörbarkeit vom Herd in diesem Verhältnis variieren. Das ist viel weniger, als die Erfahrung zeigt: Eine allgemeine Temperaturveränderung der Atmosphäre im gleichen Verhältnis genügt also bei weitem nicht, um die jahreszeitliche Änderung der anormalen Hörbarkeit zu erklären.

Ebenso ungenügend erweist sich die Annahme, daß die obere Grenzgeschwindigkeit des Schalles in der Stratosphäre, welche die innere Begrenzung der anormalen Hörbarkeit bestimmt, die jahreszeitliche Änderung der Temperatur nicht mitmache. Das gäbe zwar eine Verschiebung der inneren Grenze im richtigen Sinne, aber diese Verschiebung fiel viel zu klein aus. Nehmen wir

einmal an, die innere Grenze würde im Sommer durch $e_u = 20^\circ$, $\cos e_u = 0.9397$ bestimmt. Da wir \bar{r} jetzt festhalten, würde sich für den Winter

$$\cos e_u = 0.9397 \cdot \sqrt{273/293} = 0.9070$$

und also $e_u = 24.9^\circ$ als Grenze ergeben. Ein Blick auf Tabelle 4 lehrt, daß der Unterschied zwischen $e_u = 20^\circ$ und $e_u = 24.9^\circ$ die Grenze nicht genügend verlagert.

Nach diesen Mißerfolgen der Erklärung nötigt die große jahreszeitliche Änderung der anormalen Schallausbreitung zu der Folgerung, daß die Schichtung der Stratosphäre in den hier wesentlich in Betracht kommenden tieferen Teilen sich im Jahresverlauf sehr erheblich ändert. Wir werden schließen können, daß die entscheidenden hohen Schallgeschwindigkeiten sich im Winter in geringeren Höhen einstellen als im Sommer. Bis neue Beobachtungen gesprochen haben werden, wird man erwarten dürfen, daß das Verhältnis der Höhen im Winter und Sommer zwar weniger sperrig als 110:190, aber doch recht erheblich ist.

§ 6. Folgerungen über die Beschaffenheit der Stratosphäre. Die Erhöhung der Schallgeschwindigkeit in der Stratosphäre nach oben hin, welche durch die anormale Schallausbreitung angezeigt wird, kann zwei verschiedene Ursachen haben: Es kann nach oben hin das mittlere Molekulargewicht geringer oder die Temperatur höher werden. Auf eine dritte Möglichkeit weist A. Wegener ¹⁾ hin: Die großen Druckschwankungen bei Explosionen könnten in der dünnen Luft größerer Höhen zu übernormalen Schallgeschwindigkeiten führen. Aber für die anormale Schallausbreitung kommen nur verhältnismäßig niedrige Höhen in Betracht und hier ist, wie ich das in der Arbeit ²⁾ zeige, zu übernormalen Schallgeschwindigkeiten noch kein Anlaß.

Daß das mittlere Molekulargewicht in den Höhen der Stratosphäre geringer ist als unten, darf aus physikalischen Gründen, wie oftmals dargelegt wurde, recht wohl angenommen werden. Doch entsteht die Frage, ob schon in den niedrigen Schichten der Stratosphäre, die für die Anfangsphase der anormalen Schallausbreitung zur Geltung kommen, eine hinreichende Verminderung des Molekulargewichts wirksam sein kann. Es sei $M_0 = 28.6$ das mittlere Molekulargewicht der uns umgebenden gewöhnlichen Luft, und M das Molekulargewicht jenes leichteren Bestandteiles, dessen Beimischung bei unserem jetzigen Versuch der Erklärung der anormalen Schallausbreitung die angenommene Verminderung des mittleren Molekulargewichts bewirken soll. α sei der Anteil in Druckteilen, also der Bruchteil der Molekelanzahl, in welchem der Bestandteil (M) beigemischt ist. Dann ist das mittlere Molekulargewicht der Mischung $= M_0(1 - \alpha) + M\alpha$. Das Verhältnis dieses Wertes und des Wertes M_0 gibt das Verhältnis der Dichte der Mischung und der Dichte der gewöhnlichen Luft bei gleicher Temperatur und gleichem Druck an. Bezeichnen wir die beiden Dichten mit δ und δ_0 , so wird hiernach, wie leicht zu erkennen,

$$\alpha = 100 (\alpha \text{ Proz.}) = (1 - \delta/\delta_0)/(1 - M/M_0) \dots (5)$$

Unserem jetzt unternommenen Versuch der Erklärung der Unterschiede in der Beschaffenheit der Stratosphäre entspricht es, wenn wir die Temperatur in

der Stratosphäre überall als merklich gleich voraussetzen. Mittlere Verhältnisse voraussetzend, nehmen wir 216° absolut und setzen eine Temperatur von 282° am Erdboden voraus. Um die Rückkehr des Schalles zur Erde zu erklären, muß dann angenommen werden, daß die Dichteänderung $\delta_0 : \delta$ den Einfluß des Temperaturunterschiedes zwischen Erdboden und Stratosphäre mindestens wett macht, daß also $\delta_0 / \delta \lesseqgtr 282 : 216$ ist. Sollte die Beimischung, wie oft vermutet, Wasserstoff sein, so wäre $M = 2.016$ und (5) ergäbe $\alpha \lesseqgtr 25$ Proz. Bei weniger leichten Beimischungen müßte α entsprechend größer sein. Nun ist in 40 km Höhe, die für die anormale Schallausbreitung in Betracht kommt, der Luftdruck noch etwa $1\frac{1}{2}$ mm Quecksilber: da scheint es nach allem, was wir über die Beschaffenheit der Atmosphäre wissen, so gut wie undenkbar, daß hier schon der leichtere Bestandteil zu mehr als $\frac{1}{4}$ des Druckes beigemischt sein könnte. So erweist sich denn die Hypothese der Beimischung eines leichteren Bestandteils der Luft für die Erklärung der Anfangsphase der anormalen Hörbarkeit als unbrauchbar!

Bei dieser Sachlage scheint es geboten, so überraschend es auch ist, sich der zweiten Möglichkeit der Erklärung zuzuwenden und anzunehmen, die Zunahme der Schallgeschwindigkeit in der Stratosphäre nach oben hin werde durch eine Zunahme der Temperatur verursacht. Diese Zunahme muß dann — da bei entsprechender Ausbildung der anormalen Schallausbreitung die Schallgeschwindigkeit am Erdboden übertroffen werden soll — bis über die Temperatur am Erdboden hinausführen können. Zu diesem Schluß wurde ich in der genannten Arbeit ²⁾ geführt. Jetzt kann im Hinblick auf den vorigen Paragraphen hinzugefügt werden, daß die entscheidenden Änderungen der Temperatur innerhalb der Stratosphäre im Winter in erheblich geringeren Höhen zu suchen sind als im Sommer.

Es liegt gewiß nahe, für die merkwürdige Temperaturschichtung in der Stratosphäre meteorologische Ursachen zu vermuten. Darauf deutet auch die Jahresschwankung hin und der Umstand, daß die Temperatur nur wenig über die Temperatur am Erdboden hinausgeht. Damit scheint auch in sehr glücklicher Weise die aus einer Bearbeitung von S. Kahle ⁴⁾ sich ergebende Erfahrung zusammen zu stimmen, daß die Zugrichtung der Meteoritenschweife über Mitteleuropa, auf das sich unsere Überlegungen ja in erster Linie beziehen, ein Vorherrschen östlicher Winde über 30 km Erdhöhe (bis herauf zu 80 km) anzeigen, während darunter Winde aus westlichen Richtungen im Übergewicht sind. Vielleicht findet in den Höhen der Stratosphäre auf der Nord- u d der Südhalbkugel der Erde je ein Kreislauf der Luft statt. Vielleicht spielt die Erwärmung absteigender Luftströmungen eine Rolle. — In großen Höhen der Stratosphäre sind öfters durch Beobachtung der Meteoritenschweife Geschwindigkeiten des Windes festgestellt worden, welche für sich schon genügen würden, den Schall zur Erde zurück zu lenken. So scheint es gewiß, daß auch anormale Schallwellen auftreten müssen, welche aus großen Höhen zur Erde zurückkehren.

Es ist klar, daß durch alle solche Erwägungen die anormale Schallausbreitung an meteorologischem Interesse sehr gewinnt.

Zum Schluß ist einer Untersuchung zu gedenken, die dem Anblick nach mit unseren Überlegungen nicht im Einklang ist. F. A. Lindemann und G. M. B. Dobson⁵⁾ haben aus dem Verhalten der Meteorite gefolgert, daß über den tiefen Temperaturen der unteren Stratosphäre in 50 bis 60 km Höhe höhere Temperaturen, etwa 300° absolut, vorhanden sein müßten. Hier besteht in bezug auf die Höhenlage vorläufig ein Widerspruch mit unseren Folgerungen, der Aufklärung verlangt.

Literatur.

¹⁾ A. Wegener: Die äußere Hörbarkeitszone. Zeitschr. f. Geophys. **1**, 297—314 (1925).

²⁾ E. Wiechert: Bemerkungen über die anormale Schallausbreitung in der Luft. Nachricht. d. Gesellsch. d. Wiss. zu Göttingen, math.-phys. Klasse, 1925, S. 49—69.

³⁾ G. Angenheister: Die Laufzeit des Schalles für große Entfernungen. Zeitschr. f. Geophys. **1**, 314—327 (1925).

⁴⁾ S. Kahlke: Meteorschweife und hochatmosphärische Windströmungen. Ann. d. Hydrographie **49**, 294—299, (1921).

⁵⁾ 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). — Note on the Temperature of the Air at Great Heights. Ebenda S. 339—342, (1923).

Göttingen, 25. Dezember 1925.

Die Schallgeschwindigkeit in den untersten Schichten der Atmosphäre.

Von **B. Gutenberg** in Darmstadt. — (Mit einer Abbildung.)

Es wird eine Methode zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit in der Atmosphäre angegeben, die Schallgeschwindigkeit bis 70 km Höhe berechnet und daraus die Beobachtungen über die Zone anormaler Hörbarkeit gedeutet.

I*).

In Heft 7 dieser Zeitschrift (S. 322) hat G. Angenheister eine Reihe von Beobachtungen über die Laufzeit der Schallwellen zusammengestellt, welche in der Zone anormaler Hörbarkeit beobachtet wurden. Über die übrigen Beobachtungstatsachen hat A. Wegener (ebenda S. 297 ff.) berichtet. Während sich die Schallbahnen nach der Zone normaler Hörbarkeit rechnerisch leicht verfolgen lassen, bereitete das Studium der Wellenbahnen nach den anormalen Zonen größere Schwierigkeiten. Im folgenden soll versucht werden, in kurzen Zügen eine Methode anzugeben, mit der auch diese Schallbahnen ermittelt werden können. Das Folgende bezieht sich nur auf die Zone anormaler Hörbarkeit.

*) Der Teil I gibt den Inhalt eines Vortrages wieder, der am 7. Dezember 1925 auf der Tagung der Deutschen Geophys. Ges. in Göttingen gehalten wurde, Teil II wurde nachträglich zugefügt.