

## 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\_0044

**LOG Titel:** Beobachtungsergebnisse über den Einfluß der "akustischen Umkehrschicht" auf die Schallausbreitung

**LOG Typ:** article

## Übergeordnetes Werk

**Werk Id:** PPN101433392X

**PURL:** <http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X>

**OPAC:** <http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X>

## Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.

Each copy of any part of this document must contain these Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.

Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

For reproduction requests and permissions, please contact us. If citing materials, please give proper attribution of the source.

## Contact

Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen  
Georg-August-Universität Göttingen  
Platz der Göttinger Sieben 1  
37073 Göttingen  
Germany  
Email: [gdz@sub.uni-goettingen.de](mailto:gdz@sub.uni-goettingen.de)

Höhen über 20 km, und zwar wahrscheinlich weit über 20 km Höhe erreicht. Eine Erklärung durch Beugungseffekte in niedrigeren Schichten ist vollkommen ausgeschlossen. Denn auf die Ergebnisse bei Annahme der Beugung hätte der klar hervortretende Windeinfluß ja jedenfalls den Einfluß, daß mindestens in der Höhe der Beugungsschicht ein Wind von mehr als 32 m/sec geweht haben müßte. Eine so hohe Windstärke müßte sich aber auch durch die in meiner Wetterzusammenstellung gebrachten Ergebnisse belegen lassen. Hinzu kommt, daß die mittlere Oberflächengeschwindigkeit des Schalles in der Ostrichtung in 185 km Entfernung zu etwa 300 m/sec gemessen worden ist, was bei Annahme so starker Windkomponenten weitere Schwierigkeiten auf die Annahme niedrigerer Gipfelhöhe und Schallbeugung bereiten würde.

---

## Beobachtungsergebnisse über den Einfluß der „akustischen Umkehrschicht“ auf die Schallausbreitung

Von **B. Sandmann** — (Mit 6 Abbildungen)

Gegenstand der Untersuchung bildet das Beobachtungsmaterial, welches die von der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft angestellten Sprengungen ergeben haben. Es wird der Nachweis erbracht, daß in denjenigen Fällen, soweit sie auf Grund ausreichender meteorologischer Messungen diskutiert werden können und in denen in Potsdam in einer Entfernung von etwa 37 km anomaler Schall festgestellt wurde, dieser Schall auf den Einfluß einer „akustischen Umkehrschicht“ zurückgeführt werden muß. Zu den betreffenden Beobachtungsergebnissen ist bisher noch von keiner Seite Stellung genommen worden.

**1. Allgemeines.** Die neueren Physikbücher [(1), (2)] enthalten über Brechung, Reflexion und Beugung als akustische Erscheinungen eingehende Untersuchungen. Dagegen wird in der Literatur über die Schallausbreitung in der freien Atmosphäre nur die Brechung als wesentlich hingestellt [(4), (8), (10)]. Auch zur Erklärung der anomalen Schallfortpflanzung wird meist davon ausgegangen, daß das Brechungsgesetz allein maßgebend ist [(3), (6), (13), (14)]. Auf dieser Grundlage ist die Lösung des Problems noch nicht gelungen.

Daß auch die Reflexion des Schalles an der Erdoberfläche für die Schallausbreitung längs der Erdoberfläche von großer Bedeutung ist [(5), (9a), (12)], wurde erst in neuerer Zeit erkannt.

Der Schallbeugung in der freien Atmosphäre wird nur eine ganz untergeordnete Bedeutung zugeschrieben. Es findet sich auch in eingehenden Abhandlungen oft nur die Bemerkung, daß, wenn sich die Schallwelle bei mit der Höhe abnehmender Schallgeschwindigkeit dem Brechungsgesetz entsprechend vom Erdboden abhebt und so über dem Beobachter hinweggeht, kein direkter, sondern höchstens diffus abgebeugter Schall den Beobachter erreicht [(4), S. 75. (10), S. 42 u. (11)].

Auf die obengenannten, die geradlinige Schallausbreitung störenden Vorgänge, insbesondere Brechung und Reflexion, wurden bisher alle Erscheinungen der atmosphärischen Schallfortpflanzung zurückgeführt. Nicht möglich ist dies, wenigstens nicht nach den bisherigen Anschauungen, bei einem besonderen Fall un stetigen Aufbaues der Atmosphäre, wenn nämlich eine Luftschicht vorhanden ist, in welcher die Schallgeschwindigkeit nach vorheriger Abnahme mit der Höhe konstant bleibt oder zunimmt. (Dies kann für alle Himmelsrichtungen oder auch nur für einen Sektor der Fall sein.) Eine solche Luftschicht wollen wir abkürzend „akustische Umkehrschicht“ nennen.

Gegenüber dem meteorologischen Begriff der „Inversion“ bezieht sich der Ausdruck „akustische Umkehrschicht“ abgesehen von der Schallgeschwindigkeitsumkehr auch auf die Tatsache, daß eine derartige Schicht die Umkehr bzw. Rückkehr des Schalles zum Erdboden bewirkt, was bereits durch Beobachtungsmaterial belegt ist [(9 a), S. 24—26 u. (12), S. 263—267]. In der vorliegenden Arbeit werden weitere Beispiele über die Wirksamkeit der akustischen Umkehrschicht gegeben.

Die graphische Darstellung des durch die Temperatur- und Windverhältnisse bestimmten Schallgeschwindigkeitsverlaufes in Abhängigkeit von der Höhe mittels der Schallgeschwindigkeitskurve wurde zuerst von Kölzer vorgeschlagen [(9 b), S. 253 u. (12), S. 244].

Die akustischen Umkehrschichten sind meist an Temperaturinversionen gebunden. Es ist für den Meteorologen eine bekannte Erscheinung, daß die Temperaturinversionen in der Regel mit einem Windsprung oder einer Winddrehung verbunden sind. Die Wirkungen der Temperaturinversion und des Windsprunges überlagern sich in diesem Falle und bewirken so eine besonders ausgeprägte akustische Umkehrschicht bzw. Unstetigkeit im Verlauf der Schallgeschwindigkeitskurve. Letzterer ist infolge des Windes richtungsabhängig. Es sei hier z. B. an die meist mit einem Windsprung behaftete sogenannte obere Inversion erinnert.

Daß diesem für die atmosphärische Schallfortpflanzung äußerst wichtigen Sonderfall im Aufbau der Atmosphäre bisher noch nicht Rechnung getragen wurde, ist um so bemerkenswerter, als bestimmte, hierdurch offenbar hervorgerufene Phänomene der Schallausbreitung gegen den Wind verschiedentlich schon früher aufgefallen sind, ohne daß man hierfür eine Erklärung hatte oder auch nur auf das Wesentliche der Begleitumstände aufmerksam wurde. Eine nähere Charakterisierung der zu der betreffenden Zeit vorhandenen atmosphärischen Verhältnisse in Abhängigkeit von der Höhe wird von den Beobachtern nicht gegeben [Literaturangabe s. (12), S. 267].

Am Schluß der genannten Arbeit (9 a) hat Kölzer betont, daß die Frage nach dem physikalischen Vorgang bei den oben besprochenen, eigenartigen Schallausbreitungsvorgängen noch offen sei. Die Ergebnisse weisen auf einen Zusammenhang mit der anomalen Schallfortpflanzung hin.

Aus dem umfangreichen Beobachtungsmaterial, das die von der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft ausgeführten Sprengungen ergeben haben (7),

sind im folgenden diejenigen Fälle anomalen Schalles herausgesucht worden, für welche der Schallverlauf rechnerisch festgestellt werden kann.

Die meteorologischen Messungen zu den von der Notgemeinschaft ausgeführten Sprengungen reichen nur in wenigen Fällen über die Troposphäre hinaus. Es sind daher im folgenden nur diejenigen Beispiele anomalen Schalles auf relativ kleine Entfernungen für die rechnerische Nachprüfung herausgegriffen, für welche ausreichende meteorologische Daten vorhanden sind und die Kulminationshöhe des Schalles nachweisbar unterhalb 15 km liegt. Bisher wurden zur Erklärung der anomalen Schallausbreitung und insbesondere zur rechnerischen Bestimmung des Schallweges vielfach Höhen angenommen, deren Temperaturverhältnisse noch unbekannt sind. Die Bezeichnung „Schallstrahl“ für den Schallweg als den Weg des Energietransportes wird, da sie allgemein üblich ist, im folgenden beibehalten.

Das obengenannte Beobachtungsmaterial (7) enthält mehrere Fälle, bei denen in Potsdam (Beobachter Prof. Kühl) anomaler, von der Jüterboger Sprengung herrührender Schall durch Registrierung festgestellt wurde. Die Entfernung Jüterbog—Potsdam beträgt nur etwa 37 km, wohingegen die ausgeprägte Zone anomaler Hörbarkeit gewöhnlich in etwa 100 bis 200 km Entfernung (13) von der Schallquelle auftritt. An jedem Versuchstag sind immer mehrere Sprengungen in kurzen Zeitabständen ausgeführt worden; hierdurch wird eine Kontrolle des Meßergebnisses möglich gemacht. Auf Grund der gemessenen Laufzeiten  $t$  und der betreffenden Entfernungen  $E$  ergeben sich folgende anomalen, scheinbaren Schallgeschwindigkeiten  $c$  (s. Tabelle 1).

Tabelle 1

Datum	$c = \frac{E}{t}$ m/sec	Schallgeschwindigkeit auf Grund der Luft- temperatur und Wind- komponente am Erdboden	Lufttemperatur am Erdboden
		m/sec	°C
26. Juni 1926 . . . . .	329.5	341	14.5
17. Juni 1927 . . . . .	297	350	26.0
22. Juli 1927 . . . . .	293	345	16.4
19. August 1927 . . . . .	257	343	15.5
30. September 1927 . . . . .	255	341	14.6
1. Oktober 1927 . . . . .	269	333	8.9

Auffallend ist an diesen Ergebnissen der große Unterschied zwischen den einzelnen, an verschiedenen Tagen gemessenen, scheinbaren Schallgeschwindigkeiten, der offensichtlich auf sehr verschiedene Kulminationshöhen des Schalles hinweist.

Nur für die beiden extremen Fälle, nämlich 329.5 m/sec am 26. Juni 1926 und 255 m/sec am 30. September 1927 liegen meteorologische Messungen bis in größere Höhen vor. Die Messungen sind zumeist den Aerologischen Berichten (15) entnommen, zum anderen Teil sind sie in Jüterbog und Kummersdorf ausgeführt.

**2. Die Sprengung am 26. Juni 1926.** Der Schall war in Potsdam nicht hörbar. Normaler Schall ist hier nicht gemessen worden. Auf Grund der registrierten Laufzeiten  $t$  des ersten anomalen Einsatzes ergibt sich im Mittel eine Schallgeschwindigkeit  $c = E/t$  von 329.5 m/sec (s. Tabelle 2).

Tabelle 2

Sprengort Jüterbog,  $\varphi = 52^{\circ} 3.13'$ ,  $\lambda = 12^{\circ} 59.62'$  (erste Sprengung),  
 $\varphi = 52^{\circ} 3.17'$ ,  $\lambda = 12^{\circ} 59.63'$  (zweite Sprengung),  
 Beobachtungsort Potsdam  $\varphi = 52^{\circ} 23.0'$ ,  $\lambda = 13^{\circ} 3.8'$ ,  $E = 37.05$  km.

		Laufzeiten $t$ in sec	
		normal	anomal
16 <sup>h</sup> 59' 59"	503 kg Sprengstoff . . . . .	—	112.2* (5)** 129.7 (13)
17 6 59	503 „ „ . . . . .	—	112.6 (6) 133
	$c = E/t =$	—	329.5 m/sec —

In der Fig. 1 ist auf Grund der vorliegenden meteorologischen Messungen (s. Tabelle 3) die Schallgeschwindigkeitskurve für die Richtung Jüterbog—Potsdam

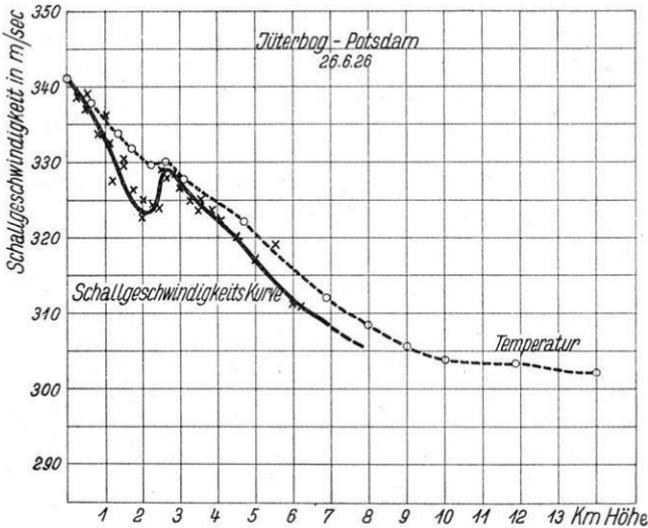


Fig. 1

Schallgeschwindigkeitsverlauf der Richtung Jüterbog—Potsdam am 26. Juni 1926

(annähernd Süd-Nord) dargestellt und zwar bis zur Höhe von 6000 m. Nur bis zu dieser Höhe liegen Temperatur- und Windmessungen vor. Bis 14000 m Höhe

\*) Im Beobachtungsmaterial (7) unter „normal“ aufgeführt.

\*\*\*) Die Zahlen in Klammern geben die Dauer des Einsatzes an.

sind nur Temperaturmessungen vorhanden. Die Schallgeschwindigkeit, die am Erdboden 341 m/sec beträgt, erreicht diesen Wert mit zunehmender Höhe nicht mehr, soweit diese hier in Frage kommt. An der Schallgeschwindigkeitskurve fällt eine ausgeprägte Unstetigkeit, ein Wiederaufstieg der Kurve in etwa

Tabelle 3  
Höhenwindmessungen am 26. Juni 1926

Halle 17 <sup>h</sup>			Leipzig 18 <sup>h</sup>		
Höhe in m	Richtung	Geschwindigkeit	Höhe in m	Richtung	Geschwindigkeit
0	24	1	0	24	2
300	26	2	200	22	2
500	27	3	500	24	3
800	29	4	1000	24	4
1100	30	3	1500	28	5
1200	29	9	2000	30	8
1400	28	7	2500	26	5
1700	28	9	3000	26	7
2000	28	8	3500	26	6
2300	28	9	4000	26	7
2400	29	8	4500	27	6
2600	27	5	5000	29	5
2800	26	4	5500	24	3
3000	25	6	6000	29	6
3300	26	7	6200	30	5
3500	27	7			
3800	26	6			

Höhentemperaturmessungen am 26. Juni 1926

Lindenberg 15 <sup>h</sup>		Lindenberg 18 <sup>h</sup>	
Höhe in m	Temperatur in °C	Höhe in m	Temperatur in °C
0	14.1	0	14.5
600	9.3	2200	— 3.3 Inversion
1000	5.4	2300	— 3.0 „
1300	3.0	2400	— 2.0 „
1700	0.0	2600	— 3.0 „
2000	— 1.8 Inversion	3100	— 6.8 „
2100	— 1.6 „	4200	— 13.5
2300	— 4.0 „	4500	— 15.8
2400	— 1.8 „	4700	— 15.5
		6900	— 31.2
		7500	— 32.5
		8000	— 37.0
		9000	— 40.8
		9800	— 43.3
		10000	— 43.7
		10300	— 44.3
		10600	— 44.0
		11400	— 44.8
		11900	— 44.5
		12600	— 43.0
		13100	— 43.8
		13400	— 45.5
		14000	— 46.5
		14300	— 46.5

2100 m Höhe auf. In 2700 m Höhe erreicht die Schallgeschwindigkeit noch einmal einen Höchstwert von 329 m/sec. Der Vergleich der gemessenen, scheinbaren Schallgeschwindigkeit  $c = E/t = 329.5$  m/sec mit der Schallgeschwindigkeit, welche der Lufttemperatur und Windkomponente am Erdboden entspricht (341 m/sec,) beweist zunächst, daß der Schall sich nicht längs der Erdoberfläche, sondern in der Höhe fortgepflanzt hat. Hieraus muß im Hinblick auf den Verlauf der Schallgeschwindigkeitskurve weiter gefolgert werden, daß als Ursache der Rückkehr des Schalles zum Erdboden nur die akustische Umkehrschicht von 2100 bis 2700 m Höhe in Frage kommt und daß also die Kulminationshöhe des Schallweges im Bereich der Umkehrschicht liegen muß. Zur Nachprüfung dieser Behauptung muß durch Berechnung nachgewiesen werden, daß hinsichtlich der Laufzeit keine Widersprüche bestehen.

Der Verlauf des Schalles läßt sich bei den gegebenen meteorologischen Verhältnissen nicht mit dem Brechungsgesetz berechnen, da hierzu die Schallgeschwindigkeit in der Kulminationshöhe des Schallweges mindestens den Wert am Erdboden erreichen muß. Der wirkliche Schallweg läßt sich dem derzeitigen

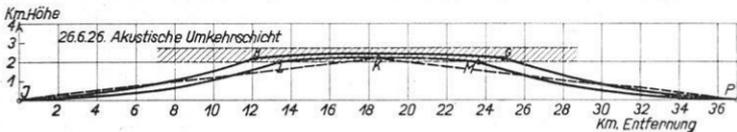


Fig. 2. Schallwege in der Richtung Jüterbog—Potsdam am 26. Juni 1926

Stande unserer Kenntnis des Schallausbreitungsvorganges entsprechend nur annähernd in der Weise bestimmen, daß für einen angenommenen Schallweg die Laufzeit berechnet und mit der gemessenen Laufzeit verglichen wird. Eine genügende Annäherung ist vorhanden, wenn bei Berücksichtigung des Laufzeitunterschiedes der Schallweg im vermuteten Bereich der Umkehrschicht bleibt. Hierbei wird ein symmetrischer Schallweg, d. h. ein Schallweg mit gleichem Abgangs- und Einfallswinkel angenommen.

In erster Annäherung sei zunächst die Laufzeit für einen fiktiven geradlinigen Schallweg J—K—P bestimmt (s. Fig. 2), der im unteren Teil der Umkehrschicht seine Kulminationshöhe erreicht. Es ergibt sich auf Grund einer einfachen Beziehung:

$$\text{Laufzeit } t = \frac{2 \sqrt{H^2 + \left(\frac{E}{2}\right)^2}}{c_m},$$

worin

Kulminationshöhe . . . . .  $H = 2200$  m

Entfernung Jüterbog—Potsdam . . . . .  $E = 37050$  m

Mittlere Schallgeschwindigkeit vom Boden bis zur

Höhe  $H$  . . . . .  $c_m = 332.5$  m/sec

$$\underline{t = 112.21 \text{ sec.}}$$

Diese Laufzeit liegt nur wenig unterhalb der mittleren gemessenen Laufzeit (s. Tabelle 2). Der wirkliche Schallweg scheint also hinsichtlich seiner Kulminationshöhe einen ähnlichen Verlauf zu haben, wobei die Schallstrahlen unterhalb der Umkehrschicht nach aufwärts gekrümmt gedacht werden müssen.

Unter vorliegenden Verhältnissen läßt sich ein Schallstrahl mit angenommenem Abgangswinkel nur unterhalb der akustischen Umkehrschicht, d. h. bis zu seinem Eindringen in dieselbe nach dem Brechungsgesetz verfolgen. Aber auch für diesen Teil des Schallweges ist die Bestimmung der Laufzeit durch Integration mittels Infinitesimalrechnung nicht möglich, da die Schallgeschwindigkeit sich mit der Höhe nicht gesetzmäßig ändert. Man behilft sich hier daher zweckmäßig mit einer schichtweisen Berechnung des Schallweges bzw. der Laufzeit, wobei man homogene Luftschichten mit geradlinigem Verlauf des Schallstrahles annimmt. Die hierdurch verursachten Abweichungen vom wirklichen Schallstrahlenverlauf sind sehr gering und hier insbesondere unwesentlich, da es nur möglich ist, den Verlauf des Schallweges qualitativ zu erfassen und da mit gewissen Ungenauigkeiten hinsichtlich der durch Beobachtung gefundenen Werte (Laufzeit, Windgeschwindigkeit usw.) gerechnet werden muß. Von einer Berücksichtigung der durch die Seitenwindkomponente (4 bis 5 m/sec) hervorgerufenen Laufzeitvergrößerung kann in diesem Falle bei der Berechnung abgesehen werden.

Wenn man einen Schallweg J—H—G—P mit einer Kulminationshöhe von 2400 m und einem Abgangswinkel von  $86^{\circ}$  annimmt (s. Fig. 2), so erhält man eine Laufzeit von 113.22 sec (s. Berechnung, Tabelle 4).

Tabelle 4

Schicht	Schallgeschwindigkeit in Richtung des Schallstrahles $c$	Winkel $i$	Horizontalprojektion des Schallstrahles $e'$	Laufzeit in der Schicht $t'$
0— 200	340.5	$86^{\circ}$	2860	8.420
200— 400	339.0	$83\ 18'$	1702	5.056
400— 600	337.5	$81\ 24$	1324	3.967
600— 800	336.0	$79\ 52$	1118	3.381
800—1000	334.0	$78\ 6$	949	2.904
1000—1200	332.5	$76\ 56$	862	2.662
1200—1400	330.5	$75\ 32$	775	2.421
1400—1600	328.0	$73\ 56$	694	2.203
1600—1800	325.5	$72\ 29$	634	2.041
1800—2000	324.5	$71\ 56$	613	1.987
2000—2200	323.5	$71\ 24$	594	1.937

$$\Sigma e' = 12125\text{ m} \quad \Sigma t' = 36.979\text{ sec}$$

$$\text{Laufzeit } t = 2 \Sigma t' + \frac{E - 2 \Sigma e'}{c_u},$$

worin:

$$E = 37050\text{ m},$$

mittlere Schallgeschwindigkeit in der Umkehrschicht  $c_u = 326\text{ m/sec}$  (gemäß Fig. 1). Es ergibt sich eine Laufzeit

$$\underline{t = 113.22\text{ sec}}$$

Der Berechnung sind homogene Schichten von 200 m Dicke zugrunde gelegt. In der Umkehrschicht muß ein nach oben schwach konvex gekrümmter Schallweg angenommen werden (in der Berechnung oberhalb 2200 m Höhe), der als geradlinig betrachtet wird. Die berechnete Laufzeit ist um nahezu 1 sec zu groß gegenüber der beobachteten Laufzeit. Da es sich bei dem beobachteten Schall um einen Einsatz von mehreren Sekunden Dauer handelt (s. Tabelle 2), wäre ein derartiger Schallweg denkbar.

Eine genügende Annäherung an die gemessene Laufzeit gibt ein Schallweg J—L—M—P (s. Fig. 2) mit einem Abgangswinkel von  $88^\circ$  und einer Kulminationshöhe von 2200 m. Die Laufzeitberechnung ergab hierfür einen Wert  $t = 112.73$  sec. Aus diesem Ergebnis geht hervor, daß hinsichtlich des ersten Schalleinsatzes die Annahme eines gleichen Abgangs- und Einfallswinkels den wirklichen Verhältnissen in diesem Falle offenbar nahekommt.

Den im nächsten Abschnitt folgenden Beobachtungsergebnissen vorgreifend kann hierzu noch gesagt werden, daß ein nicht symmetrischer Schallstrahl ähnlich wie in Fig. 6 im vorliegenden Falle nicht möglich ist, da sämtliche Schallstrahlen die Umkehrschicht bereits in einer Entfernung von weniger als 16 km von der Schallquelle erreichen.

Die zweiten Einsätze der Registrierung am 26. Juni 1926 (s. Tabelle 2) können nicht als gesichert gelten. Der Unterschied in den gemessenen Laufzeiten der beiden Sprengungen ist zu groß und auch die Dauer der Einsätze zu verschieden. Anomale Schalleinsätze sind wegen ihrer geringen Intensität oft von Störungen anderer Art kaum zu unterscheiden. Die Kontrolle durch mehrere kurz hintereinander erfolgende Sprengungen ist deshalb immer durchgeführt worden.

Als Beweis dafür, daß die obigen Ergebnisse einwandfrei sind und nicht auf irgendwelchen Fehlmessungen beruhen, kann angeführt werden, daß die Umkehrschicht am genannten Tage zur gleichen Zeit ihren Einfluß auch in anderer Entfernung und Richtung geltend machte:

An zwei etwa nordöstlich von Jüterbog nahe zusammengelegenen Beobachtungsorten, nämlich Forsthaus Grubenmühle und Storkow ist in einer Entfernung von etwa 69 bzw. 68 km neben normalem Schall ebenfalls anomaler Schall gemessen worden (s. Tabelle 5).

Tabelle 5

Beobachtungsort		Laufzeiten $t$ in sec			
		normal	anomal		
Forsthaus Grubenmühle $E = 69.4$ km	$\lambda = 13^\circ 59.8'$	203.2 (2)	207.8 (3)	228.5 (1)	238.8 (1)
	$\varphi = 52^\circ 10.1'$	203.3 (1)	207.6 (3)	228.5 (2)	238.7 (2)
Storkow $E = 68.1$ km	$\lambda = 13^\circ 56.7'$	202.1 (1)	204.8 (1)	225.6 (1)	236.4 (1)
	$\varphi = 52^\circ 15.0'$	201.2 (1)	204.5 (1)	225.2 (1)	236.8 (1)
	$c = E/t = \text{ca.}$	341 m/sec	334 m/sec	303 m/sec	290 m/sec

Die für beide Orte geltende Schallgeschwindigkeitskurve mit ausgeprägter Umkehrschicht oberhalb 2100 m Höhe zeigt Fig. 3. (Die Windkomponenten sind für die mittlere Richtung gebildet worden.)

Auch in diesen Falle deuten die ersten anomalen Einsätze beider Meßstellen mit 384 m/sec unzweifelhaft auf die Umkehrschicht hin. Bezüglich des Brechungsgesetzes gilt das zum vorigen Beispiel Gesagte.

An den beiden letztgenannten Beobachtungsorten sind noch weitere anomale Einsätze von 308 m/sec und 290 m/sec Schallgeschwindigkeit aufgenommen worden, die als einwandfrei gelten müssen in Anbetracht der mehrmaligen Registrierung mit gleichen Laufzeiten.

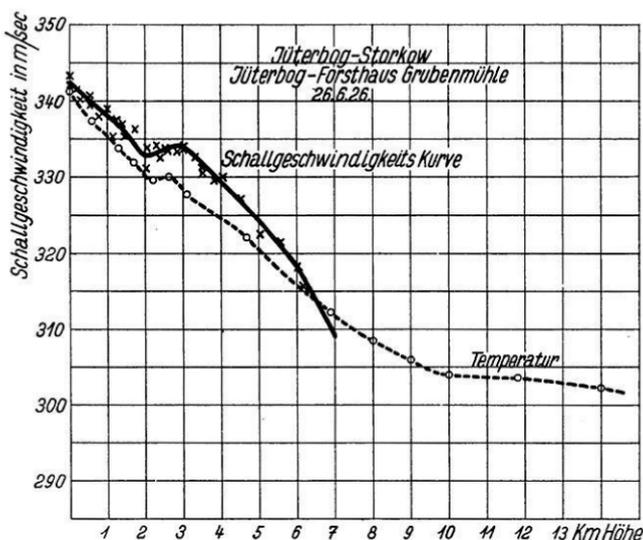


Fig. 3. Schallgeschwindigkeitsverlauf der mittleren Richtung zwischen Jüterbog—Storkow und Jüterbog—Försthaus Grubenmühle am 26. Juni 1926

Da hohe Windmessungen fehlen, können diese Einsätze nicht nachgeprüft werden. Es ist jedoch anzunehmen, daß auch sie durch eine Umkehrschicht hervorgerufen sind, die in 10 bis 15 km Höhe liegen muß, wo die obere Inversion in Verbindung mit einem Windsprung in der Regel eine solche bedingt. In einer früheren Veröffentlichung des Verfassers ist nachgewiesen worden, daß bei normalem thermischen Aufbau der Atmosphäre und ohne den Einfluß einer Windkomponente die Schallgeschwindigkeit  $c = E/t$  für den aufsteigenden Teil eines Schallstrahls etwa 300 m/sec beträgt, wenn der Abgangswinkel  $86^\circ$  und die Kulminationshöhe 14 km ist [s. (12), S. 271.

**3. Die Sprengung am 30. September 1927.** Die auf Grund der meteorologischen Messungen (s. Tabelle 7) gezeichnete Schallgeschwindigkeitskurve für

die Richtung Jüterbog—Potsdam (s. Fig. 4) steigt oberhalb 9 km steil an und erreicht in 12 km Höhe beinahe den Wert am Erdboden; es fehlen nur noch 5 m/sec daran.

Tabelle 6

Sprengort Jüterbog . . . . .  $\varphi = 52^{\circ} 3.2', \lambda = 12^{\circ} 59.6'$   
 Beobachtungsort Potsdam . . . . .  $\varphi = 52^{\circ} 23.0, \lambda = 13^{\circ} 3.8'$   
 $E = 36.95 \text{ km}$

		Laufzeiten $t$ in sec	
		normal	anomal
17 <sup>h</sup> 20' 0.3''	150 kg Sprengstoff . . . . .	107.7 (12)	144.7
30 0.3	300 „ „ . . . . .	107.7 (12)	144.7
18 20 0.0	100 „ „ . . . . .	107.9 (12)	144.6 (3)
30 0.0	50 „ „ . . . . .	107.9 (12)	144.6 (3)
		$c = E/t = 342 \text{ m/sec}$	255 m/sec
1. Oktober:			
01 <sup>h</sup> 10' 0.5''	300 kg Sprengstoff . . . . .	111.2 (8)	137.5
20 0.5	150 „ „ . . . . .	111.2 (8)	137.5
		$c = E/t = 332.2 \text{ m/sec}$	269 m/sec

Windmessungen bis 2000 m Höhe sind zur ersten Sprengung um 17<sup>20</sup> Uhr, bis 6000 m um 15<sup>00</sup> Uhr und bis 14000 m Höhe um 11 Uhr gemacht worden. Höhen-

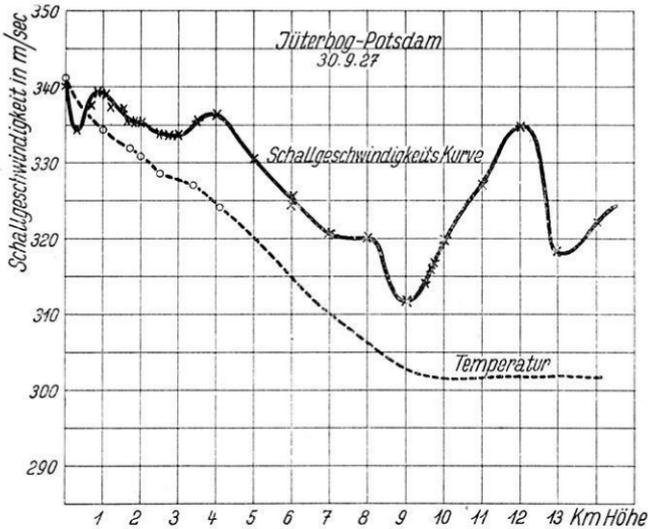


Fig. 4. Schallgeschwindigkeitsverlauf der Richtung Jüterbog—Potsdam am 30. September 1927

temperaturmessungen liegen nur bis 2000 m und vom folgenden Tage bis 4000 m vor, doch kann man hier mit dem normalen Temperaturverlauf rechnen, welcher der Jahreszeit entspricht. Der Wind bestimmt infolge seiner verhältnismäßig

großen Variation in weitaus stärkerem Maße als die Temperatur den Verlauf der Schallgeschwindigkeitskurve. Nur die vier ersten Sprengungen (s. Tabelle 6), welche zeitlich den Windmessungen nahekommen, werden zur rechnerischen Untersuchung herangezogen. Die beiden letzten Sprengungen erfolgten 7 Stunden später. Es wurde zu den vier ersten Sprengungen ein hörbarer normaler Einsatz registriert, welcher der Schallgeschwindigkeit in der Nähe des Erdbodens ent-

Tabelle 7  
Höhenwindmessungen am 30. September 1927

Höhe in m	11 <sup>h</sup> Lindenberg		15 <sup>h</sup> Lindenberg		17 <sup>h</sup> 20' Kummersdorf	
	Richtung	Geschwindigkeit	Richtung	Geschwindigkeit	Richtung	Geschwindigkeit
0	14	5	17	3	26	3.8
300	14	5	14	4	27	7.6
500	15	8	14	4	25	6.6
600	—	—	15	5	23	5.5
700	15	10	—	—	—	—
800	—	—	16	5	21	6.5
1000	16	8	17	5	20	6.8
1200	—	—	18	5	21	6.5
1500	17	9	19	6	20	5.8
1700	18	8	—	—	21	5.2
1800	—	—	20	3	20	4.3
2000	20	6	20	4	19	5.0
2500	18	7	19	6	—	—
3000	17	8	19	7	—	—
3500	18	9	17	9	—	—
4000	19	7	18	12	—	—
5000	18	8	18	10	—	—
6000	18	10	18	10	—	—
7000	20	12	—	—	—	—
8000	19	16	—	—	—	—
9000	21	15	—	—	—	—
10000	20	23	—	—	—	—
11000	20	32	—	—	—	—
12000	19	37	—	—	—	—
13000	21	25	—	—	—	—
14000	19	23	—	—	—	—

Höhentemperaturmessungen

Kummersdorf, am 30. September 1927 um 18 <sup>h</sup> 20'			Lindenberg, am 1. Oktober um 10 <sup>h</sup>		
Höhe in m	Temperatur °C		Höhe in m	Temperatur °C	
0	12.8		0	11.2	
450	8.5		300	8.4	
680	6.6		400	8.4	
980	4.5		1000	3.8	
1880	— 2.2		1700	0.0	
			1900	— 1.5	
			2000	— 1.5	
			2100	— 2.4	
			2500	— 5.0	
			2700	— 5.0	
			3100	— 7.3	
Jüterbog:			3300	— 7.4	
17 <sup>h</sup> 20'	Lufttemperatur am Boden	14.6°	4100	— 12.0	
18 20	„ „ „	13.8			

spricht. Außerdem wurde anomaler Schall beobachtet mit einer sehr niedrigen scheinbaren Schallgeschwindigkeit  $c = E/t = 255$  m/sec. In Fig. 5 sind zwei Diagramme der Registrierungen dargestellt, die dem Verfasser von Prof. Kühl zur Verfügung gestellt wurden. Die anomalen Einsätze sind auf Grund von vier Sprengungen verbürgt.

Folgende Berechnung soll zunächst zeigen, daß die Kulminationshöhe eines fiktiven Schallstrahls unter vorliegenden Verhältnissen maximal höchstens 15 km betragen kann:

Bei gegebener Laufzeit und gegebener mittlerer Schallgeschwindigkeit eines gedachten Schallstrahles ist dessen Kulminationshöhe am größten, wenn Abgangs- und Einfallswinkel am Erdboden gleich sind, wie aus der Definition der Ellipse folgt. Nimmt man zur Vereinfachung zur ersten Annäherung einen geradlinigen Schallweg J—K—P an (s. den punktiert gezeichneten Schallweg in Fig. 6), dann läßt sich für 15 km Kulminationshöhe seine Laufzeit  $t$  wie folgt berechnen:

$$t = \frac{2\sqrt{H^2 + (E/c_m)^2}}{c_m},$$

worin

Kulminationshöhe . . . . .  $H = 15000$  m

Entfernung Jüterbog—Potsdam.  $E = 36950$  m

Mittlere Schallgeschwindigkeit in

Richtung des Schallstrahles. .  $c_m = 325$  m/sec

$$t = 146.45 \text{ sec.}$$

Die beobachtete Laufzeit ist um etwa 2 sec kleiner (s. Tabelle 6). Hieraus geht hervor, daß als maximale Kulminationshöhe eines Schallstrahls höchstens 14 bis 15 km in Frage kommt.

Ein dem Brechungsgesetz entsprechender Verlauf des Schallstrahls ist jedoch im vorliegenden Falle nicht möglich, da die Schallgeschwindigkeit in der Kulminationshöhe mit Rücksicht auf den hier bedingten Abgangswinkel die Schallgeschwindigkeit am Erdboden um mehr als 70 m/sec übertreffen müßte. Die Schallgeschwindigkeit in der betreffenden Höhe ist aber in Wirklichkeit kleiner als am Erdboden (s. Fig. 4).

Auch andere Ursachen für eine derartige Ablenkung der Schallstrahlen und Abwärtskrümmung zum Erdboden sind bei den gegebenen meteorologischen Ver-

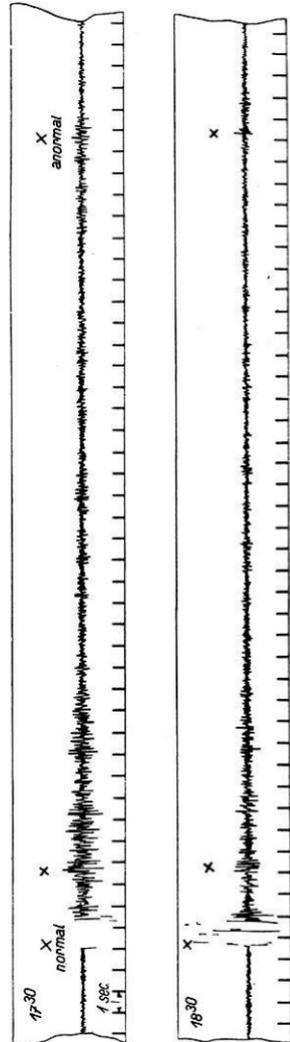


Fig. 5. Registrierung von normalem und anomalem Schall in Potsdam am 30. September 1927

hältnissen in der in Frage kommenden Höhe von etwa 15 km nicht vorhanden.

Die Reflexion des Schalles an einer „Unstetigkeitsfläche“ (surface de discontinuité), wie sie von Esclangon (5) in Erwägung gezogen worden ist, d. h. in diesem Falle also ein Schallweg J—L—P mit einer Kulminationshöhe von 9 bis 10 km läßt sich gemäß vorhergehender Berechnung mit der gemessenen Laufzeit nicht in Einklang bringen. ( $t = 126.7$  sec für  $H = 9.5$  km und  $c_m = 328$  m/sec).

Die obigen Erwägungen haben erwiesen, daß ein Schallweg mit gleichem Abgangs- und Einfallswinkel und einer Kulminationshöhe im Bereiche der akustischen Umkehrschicht hier nicht diskutabel ist. Wohl aber läßt sich der Verlauf des anomalen Schalles in anderer Weise auf den Einfluß der Umkehrschicht zurückführen:

Ein Schallstrahl mit einem Abgangswinkel von  $79^\circ$  wird nach aufwärts gebrochen und erreicht die Umkehrschicht, die im vorliegenden Falle über der

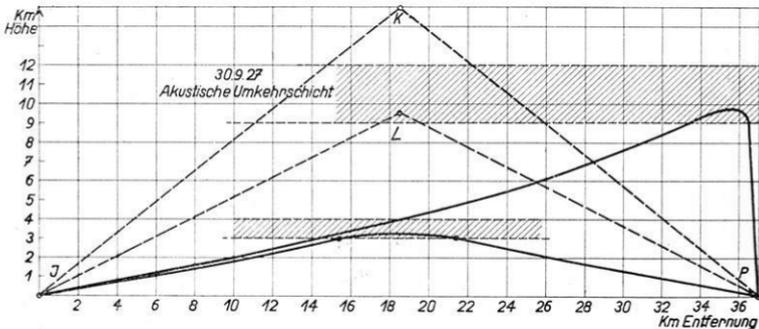


Fig. 6. Schallwege in der Richtung Jüterbog—Potsdam am 30. September 1927

Troposphäre liegt, in etwa 34 km Entfernung von der Schallquelle nahezu senkrecht über dem Beobachtungsort (s. Fig. 6). Zweigt sich von hier in etwa 9.5 km Höhe eine Schallwelle ab, welche die Meßstelle annähernd senkrecht von oben erreicht, so ergibt sich für den betreffenden Schallstrahl eine Laufzeit von 144.012 sec (s. Berechnung, Tabelle 8) und damit eine genügende Annäherung an die gemessene Laufzeit.

Bezüglich der Bestimmung des Schallweges gilt das oben Gesagte. Der Seitenwind beträgt bis 9000 m Höhe im Mittel nur etwa 5 m/sec und kann daher vernachlässigt werden. Der Laufzeitberechnung sind unter Berücksichtigung des Abgangswinkels und des Verlaufes der Schallgeschwindigkeitskurve Schichten von 1000 m Dicke zugrunde gelegt worden. Um die Berechnung zu vereinfachen, wurde der Schallweg in 9500 m Höhe und von dort zum Erdboden geradlinig angenommen. In Anbetracht der nur qualitativ möglichen Bestimmung des Schallweges und der Laufzeit sind diese Vereinfachungen ohne Bedeutung. Eine

Variation des Abgangswinkels ist nur in geringem Maße möglich. Eine Vergrößerung des Abgangswinkels von z. B.  $2^{\circ}$  würde abgesehen von der zu großen Laufzeit einen rückläufigen Schallstrahl bedingen. Gegen eine entsprechende Verkleinerung spricht sowohl die besondere Stellung der Grenzstrahlen [s. (12), S. 257 u. 258] als auch die Wahrscheinlichkeit, daß im vorliegenden Falle die Kulminationshöhe des Schallweges im untersten Teile der Umkehrschicht liegt.

Der Verfasser hat bereits in einer früheren Veröffentlichung auf die Möglichkeit eines derart unsymmetrischen Schallweges mit ungleichen Abgangs- und Einfallswinkel hingewiesen [s. (12), S. 261].

Daß im vorliegenden Falle der Weg des anomalen Schalles ganz von den Windverhältnissen der Troposphäre abhängig gewesen sein muß, ergibt sich aus der Tatsache, daß 7 Stunden später eine wesentlich geringere Laufzeit und damit höhere Schallgeschwindigkeit gemessen wurde, nämlich 269 m/sec.

Tabelle 8

Schicht	Mittlere Schallgeschwindigkeit in Richtung des Schallstrahls <i>c</i>	Winkel <i>i</i>	Horizontalprojektion des Schallstrahls <i>e</i>	Laufzeit in der Schicht <i>t'</i>
0—1000	337.5	79°	5145	15.528
1000—2000	337.0	78 34'	4947	14.977
2000—3000	334.2	76 25'	4139	12.741
3000—4000	335.0	76 60	4331	13.267
4000—5000	334.2	76 25	4139	12.741
5000—6000	327.5	72 17	3129	10.031
6000—7000	322.5	69 43	2706	8.946
7000—8000	320.3	68 41	2563	8.590
8000—9000	316.0	66 48	2333	8.031
9000—9500	312.8	65 28	1096	3.851
9500—9600	315.0	( $\sim 90^{\circ}$ )	1800	$t' = \frac{1800}{315} = 5.714$
9500—0	321.0	( $\sim 0^{\circ}$ )	622	$t' = \frac{9500}{321} = 29.595$
			$E = 36950 \text{ m}$	$t = 144.012 \text{ sec}$

Betrachtet man die Schallgeschwindigkeitskurve in Fig. 4 mit ihren vielen mehr oder weniger ausgeprägten Umkehrschichten im Hinblick auf obige Untersuchungsergebnisse, so erklärt sich, warum zwischen dem normalen Schall (342 m/sec) und dem gesicherten Haupteinsatz des anomalen Schalles (255 m/sec) keine vollkommene Ruhe aufkommt (s. Fig. 5). Die dazwischenliegenden Einsätze sind auch auf Umkehrschichten zurückzuführen: Nehmen wir z. B. einen Schallverlauf an, der in etwa 9200 m Höhe in der dort vorhandenen, gut ausgeprägten Umkehrschicht seine Kulminationshöhe erreicht (s. Fig. 6), so ergibt sich für diesen Schallweg eine Laufzeit von 111.70 sec (s. Berechnung, Tabelle 9) und damit eine Verspätung von 3.9 sec gegenüber dem normalen Schall. Wie aus dem Diagramm der Registrierung in Fig. 5 ersichtlich ist, entspricht dieser Laufzeit in der Tat ein etwa 3.7 bis 3.9 sec nach dem Haupteinsatz des normalen Schalles auftretendes Störungsmaximum.

Führt man den anomalen Schall auf Brechung in den höheren Luftschichten zurück, so läßt sich diese Erklärung auf den oft vorhergehenden, schwachen Schalleinsatz nicht anwenden. Seine geringe Intensität ist aber kein Grund, ihn zu vernachlässigen oder auf irgendwelche unkontrollierbaren Nebenursachen zurückzuführen. Im Gegenteil muß man sich fragen, ob nicht die allgemeinen Umstände, welche die Ursache für sein Auftreten sind, noch stärker ausgeprägt in der Regel den anomalen Schall hervorrufen.

Tabelle 9

Schicht	Mittlere Schallgeschwindigkeit in Richtung des Schallstrahls $c$	Winkel $i$	Horizontalprojektion des Schallstrahls $e'$	Laufzeit in der Schicht $t'$
0—1000	337.5	81°	5671	17.063
1000—2000	337.0	79 32'	5412	16.330
2000—3000	334.2	77 12	4404	13.514
			$\Sigma e' = 15487 \text{ m}$	$\Sigma t' = 46.907 \text{ sec}$

$$\text{Laufzeit } t = 2 \Sigma t' + \frac{E - 2 \Sigma e'}{c_u}$$

worin:

$$E = 36950 \text{ m,}$$

mittlere Schallgeschwindigkeit in der Umkehrschicht  $c_u = 334.0 \text{ m/sec}$  (gemäß Fig. 4).  
Es ergibt sich eine Laufzeit

$$t = 111.70 \text{ sec.}$$

Laufzeitdifferenz gegenüber dem normalen Schall:

$$111.70 - 107.8 = 3.9 \text{ sec.}$$

**Schlußbemerkungen.** Durch die obigen Untersuchungsergebnisse ist der Nachweis gebracht worden, daß das Brechungsgesetz nicht in allen Fällen der Berechnung von Schallwegen in der Atmosphäre zu Grunde gelegt werden kann.

Eine Untersuchung über die allgemeine Bedeutung der akustischen Umkehrschicht und anderer Unstetigkeiten in der Atmosphäre muß in Anbetracht des beschränkten Raumes einer späteren Arbeit vorbehalten bleiben.

#### Literatur

- 1) Lehrbuch der Physik, Müller-Pouillet, Band I, 3, Akustik. 1929.
- 2) Handb. d. Phys., Bd. VIII, Akustik. 1927.
- 3) P. Duckert: Über die Ausbreitung von Explosionswellen in der Erdatmosphäre. Ergebnisse der kosmischen Physik, Bd. I. 1931.
- 4) E. Emden: Beiträge zur Thermodynamik der Atmosphäre. Meteorol. Zeitschr. S. 1918.
- 5) E. Esclangon: L'acoustique des canons et des projectiles. Paris 1925.
- 6) B. Gutenberg: Mit welcher Genauigkeit läßt sich die Schallgeschwindigkeit in der Stratosphäre finden? Gerlands Beitr. z. Geophys. 35, 1932, Heft 1.

7) H. Hergesell u. P. Duckert: Sprengungen zu Forschungszwecken. Ergebnisse der vom 1. April 1923 bis zum 30. September 1926 an verschiedenen Orten Deutschlands ausgeführten Versuche. Sonderdruck aus: Die Arbeiten des Preuß. Aeronaut. Observatoriums bei Lindenberg, 1927. ... Dasselbst 1929. Die Ergebnisse der Sprengungen zu Forschungszwecken in Deutschland vom 1. Oktober 1926 bis zum 31. März 1929.

8) Kammüller: Die rechnerische Berücksichtigung von Wind- und Temperaturveränderungen beim Schallmeßverfahren. Dissertation, Hannover 1921.

9a) J. Kölzer: Beobachtungsergebnisse über Schallausbreitung auf nahe Entfernungen und Schlußfolgerungen zum Problem der anomalen Schallausbreitung. Berlin 1932. Veröffentlichungen des Preuß. Meteorologischen Instituts. Julius Springer.

9b) Beitrag zur Schallausbreitung in der Atmosphäre. Zeitschr. f. Geophys. 1928, Heft 5.

10) R. Ladenburg u. E. von Angerer: Über die Ausbreitung des Schalles in der freien Atmosphäre. Bericht über die Versuche des Kommandos der Artillerie-Prüfungskommission in Flandern. Berlin 1918.

11) Lord Rayleigh: Theory of sound, Bd. II, 1926.

12) B. Sandmann: Beiträge zur Schallfortpflanzung, im besonderen zur Schallbeugung und anomalen Schallfortpflanzung. Gerlands Beitr. z. Geophys. 28, 1930.

13) A. Wegener: Akustik der Atmosphäre, Lehrbuch der Physik, Müller-Pouillet, Bd. V, 1. 1928.

14a) F. J. W. Whipple: The Investigation of Air Waves from Explosions, Quarterly Journal, Nr. 240, July 1931.

14b) F. J. W. Whipple: Researches of the Transmission of Air Waves to great Distances. Gerlands Beitr. z. Geophys. 24, 1929—1930.

15) Aerologische Berichte, Zusammenstellung von Messungen aus der freien Atmosphäre. Herausgegeben im Auftrage des Reichsverkehrsministeriums von der Leitung des Flugwetterdienstes.

---

## Zur Frage der anomalen Schallausbreitung

Von **Joseph Kölzer**, Berlin-Grünwald

Die neueren Erklärungsversuche über die Ursache der anomalen Schallausbreitung werden zusammengestellt. Es wird darauf hingewiesen, daß die Annahme einer hohen Temperatur in der oberen Atmosphäre mangels ausreichender Daten und widerspruchsvoller Registrierergebnisse nicht als Lösung betrachtet werden kann. Die Notwendigkeit, Registrierergebnisse für mittlere Entfernungen mit gleichzeitigen vollständigen meteorologischen Daten zu organisieren, wird als wichtigste Forderung betont und die Vermutung ausgesprochen, daß nach den bisherigen Ergebnissen auf nahe und mittlere Entfernung in bestimmten Fällen die anomale Schallausbreitung auf Beugung zurückgeführt werden muß.

Vorbemerkung. Der vorstehende Aufsatz bezieht sich auf den Stand der Arbeiten, wie er durch Veröffentlichungen in der Fachliteratur bis etwa 15. Januar 1934 bekannt geworden ist.

Die Frage der anomalen Schallausbreitung ist längere Zeit in der Fachliteratur nicht mehr behandelt worden. Dafür sind meines Erachtens mehrere