

Berichte
des
Deutschen Wetterdienstes

Nr. 25
(Band 4)

DK 551.596.1

**Untersuchungen über die Schallausbreitung
auf nahe Entfernungen**

von

Georg Scheid

(mit 13 Abbildungen und 5 Tabellen im Text)

Bad Kissingen 1956

Anschrift des Verfassers:

Dr. G. Scheid, München 25, Jägerwirtstr. 15A

Zusammenfassung

Vorliegende Veröffentlichung stellt einen Auszug aus einer Dissertation*) zum Problem der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung dar. Der Auszug gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil stellt einen Bericht über die wichtigsten bisher zu dem Problem erschienenen Arbeiten dar. Im zweiten Teil werden die charakteristischen Schallgeschwindigkeitskurven von J. K ö l z e r bis auf Höhen von 1500 m erweitert. Es wird nachgewiesen, daß das Wiederanstiegen der Schallgeschwindigkeit bis über den Bodenwert kennzeichnend ist für das Auftreten anomalen Schalles. Die teilweise und vollständige Rückleitung des in die Höhe maximaler Schallgeschwindigkeit einfallenden Schalles wird zur Erklärung der Zone anomaler Hörbarkeit in guter Übereinstimmung mit den Registrierungen herangezogen. Die am inneren Rand der Zone zweiter Hörbarkeit beobachtete Amplitudenzunahme wird erklärt.

I. Teil

1. Im Unterschied zu früheren Beobachtungen anomaler Schallausbreitung auf nahe Entfernung untersuchten R. L a d e n b u r g und F. v. A n g e r e r (1), (2) diese Erscheinung systematisch mit einem größeren Instrumentarium. Sie hatten nicht nur im Beobachtungsraum ein Netz von Mikrophonstellen und Registrierapparaten aufgebaut, sondern betrieben auch Höhenmessungen. Sie beschränkten sich dabei allerdings auf Messungen von Windstärke und Windrichtung in 200—300 m Höhe und auf Registrierungen der meteorologischen Elemente in ca. 1000 m Höhe. Die Dichte der Messungen in der Höhe bis zu ca. 1500 m, die für die Schallausbreitung auf nahe Entfernung hauptsächlich in Betracht kommen, war also sehr gering. Temperaturmessungen fehlten in diesem Höhenabschnitt vollständig. R. L a d e n b u r g und F. v. A n g e r e r beobachteten hinter einer Zone des Schweigens auf nahe Entfernung von der Schallquelle erneut Schallwellen. Diese waren durch erhebliche Verzögerungen und zunächst mit der Entfernung zunehmender Amplituden gekennzeichnet.

Wohl aus dem Grunde, weil diese besondere Art der Schallausbreitung nicht speziell Gegenstand der Untersuchungen war, fehlen in den Veröffentlichungen (1) und (2) Einzelangaben über die Lage der Stationen, bei denen sekundäre Schallstrahlen auftraten, über die genauen Verzögerungszeiten und über die dazugehörigen meteorologischen Daten.

Die Verfasser vermuten, daß diese anomalen Einsätze durch „zweite, sekundäre Schallstrahlen“ auftreten; konnten jedoch wegen der lückenhaften Messungen vor allem in den mittleren Höhen ihre Vermutung nicht belegen.

2. In einem in der Meteorologischen Gesellschaft, Zweigverein Berlin, 1923 gehaltenen Vortrag (3), schlug J. K ö l z e r vor, die meteorologischen Einflüsse bei der Schallausbreitung auf nahe Entfernung durch ein gut gelegtes Netz von Registriergeräten sowohl am Boden als insbesondere in den mittleren Höhen zu untersuchen. Er verwies dabei auf die Bedeutung der Registrierungen der meteorologischen Elemente in diesen Höhen, ohne welche die Schallausbreitung auf nahe Entfernung im allgemeinen und die anomale Schall-

ausbreitung im besonderen nicht erfolgversprechend angegangen werden könne.

In den Jahren 1925 und 1927 führte J. K ö l z e r mit Unterstützung der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft Sprengungen kleiner Ladungen (600 g) durch, die den Zweck hatten, über die Schallausbreitung in Abhängigkeit von den meteorologischen Einflüssen eingehender und umfassender als es bis dahin geschehen war Aufschluß zu erhalten. Die Ergebnisse und Auswertungen wurden 1932 von J. K ö l z e r veröffentlicht (4).

Gegenüber der Beobachtungsdichte bei den Sprengungen von R. L a d e n b u r g und F. v. A n g e r e r bedeutete die Anlage der von J. K ö l z e r Registrierungen einen wesentlichen Fortschritt. Vor allem war mit der Verdichtung der Messungen bis zu 600 m die Gewähr gegeben, daß bis zu dieser Höhe die Wirkung von Wind und Temperatur auf die Schallausbreitung lückenlos untersucht werden konnte.

Messungen über 600 m wurden zwar, wenn auch nicht mit der Dichte wie bis zu 600 m, ausgeführt, erschienen jedoch nicht in der Veröffentlichung (4), da sie für das Gesamtproblem der Schallausbreitung auf nahe Entfernung zunächst ohne Bedeutung waren; zumal für den direkten Schall auf nahe Entfernung allgemein die Ausbreitungshöhe nicht über 200—300 m hinausgeht. Spätere Nachfragen haben dann ergeben, daß die Meßprotokolle den Kriegseinwirkungen zum Opfer gefallen sind.

In (4) teilt J. K ö l z e r die Ausbreitungserscheinungen auf nahe Entfernung in fünf Gruppen ein, die

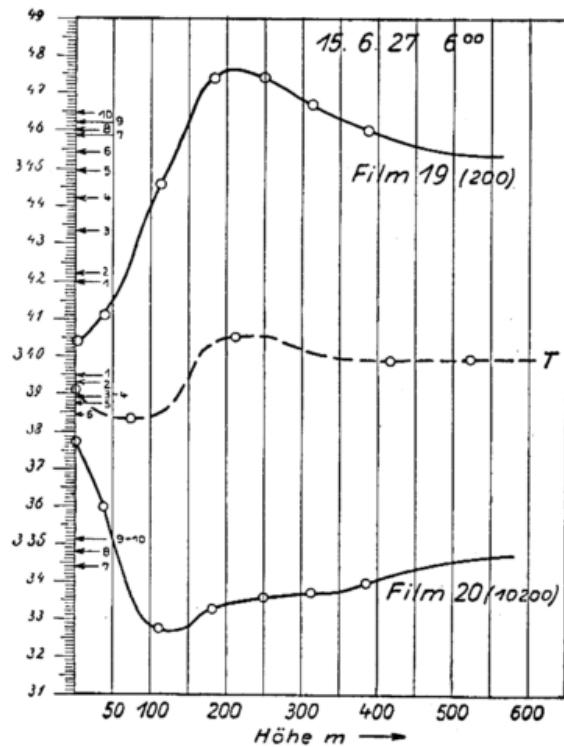


Abb. 1

Schallgeschwindigkeitskurven zur Sprengung vom 15. 6. 27, 6.00 Uhr. Die obere Kurve ist für die Mitwind-, die untere für die Gegenwindrichtung gezeichnet. Kurve T stellt den Verlauf der Schallgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur dar. Die Pfeile an der Ordinate geben die Schallgeschwindigkeit als Wert des Quotienten (Horizontalweg / beobachtete Laufzeit) an; die dabeistehende Zahl benennt die Entfernung (km) der betreffenden Station vom Sprengort.

*) Die Arbeit selbst liegt z. B. in der Bayerischen Staatsbibliothek auf und hat den Titel: „Untersuchungen über die Schallausbreitung auf nahe Entfernung, insbesondere über die anomale Schallausbreitung unter Würdigung der bisher zu diesem Problem erschienenen Veröffentlichungen.“

durch die Schallgeschwindigkeitskurve individuell charakterisiert und voneinander getrennt werden. Die Schallgeschwindigkeitskurve ist für die Auswertung von grundlegender Bedeutung. Sie wurde 1928 von J. K ö l z e r in die Literatur eingeführt (5) und erfaßt die Elemente, welche die Schallausbreitung hauptsächlich bestimmen. Damit wurden die bis dahin angewandten, lückenhaften und für die Praxis zu komplizierten Verfahren durch eine übersichtliche, komplexe Darstellung abgelöst.

Für das hier zu behandelnde Problem ist Gruppe 5 von besonderer Bedeutung. Auf diese Gruppe soll daher im folgenden näher eingegangen werden. Die untere der beiden in Abbildung 1 dargestellten Schallgeschwindigkeitskurven gibt eine für diese Gruppe charakteristische Kurve wieder.

Die dazugehörige Temperaturkurve, bezogen auf die Schallgeschwindigkeitswerte, ist in Abbildung 1 gestrichelt eingetragen. Der Verlauf der Schallgeschwindigkeit wurde für die Ausbreitungsrichtung von NWzN nach SEzS gezeichnet, die ziemlich genau der Windrichtung entgegengesetzt ist, wie aus Tabelle 1 ersichtlich. Auf der Ordinate ist die Schallgeschwindigkeit (m/sec), auf der Abszisse die Höhe über Grund (m) abgetragen.

Die zu den beiden Schallgeschwindigkeitskurven gehörigen Registrierwerte reichen bis 500 m Höhe und sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Windrichtung ist hier und im folgenden nach der 32teiligen Rose festgelegt.

Tab. 1. Meteorologische Daten zur Sprengung vom 15. 6. 1926, 6.00 Uhr. Die letzte Spalte gibt die Windzahlen nach der 32teiligen Rose an.

Höhe m	Temperatur °C	Feuchte %	Windgeschw. m/sec	Windricht.
0	13,1	98	1,0	10
30	—	—	2,0	11
100	11,5	—	4,5	11
200	15,2	—	6,5	11
300	14,5	—	7,1	10
400	13,8	—	6,5	10
500	13,8	—	6,2	10

Die Schalleinsätze an den Mikrophonstellen, beobachtet in Gegenwindrichtung, macht Abbildung 2 deutlich. Die Unterteilung der Zeitskala beträgt 0,1 sec, am linken Rand ist die Entfernung der jeweiligen Stationen vom Sprengort angegeben.

Von insgesamt rund 100 Versuchssprengungen, die J. K ö l z e r mit der konstanten Ladung von 600 g durchführte, ergeben ca. 30 Sprengungen Einsatzbilder, die bezüglich der verspäteten Einsätze ähnlich den in Abbildung 2 dargestellten Registrierungen waren und bei meteorologischen Verhältnissen durchgeführt wurden, wie sie der Schallgeschwindigkeitskurve in Abbildung 1 (unten) entsprechen.

Tritt dieser Typ der Schallgeschwindigkeitskurve auf, so erfolgt die Schallausbreitung in einer bestimmten Weise: Mit zunehmender Entfernung von der Schallquelle werden die direkten Einsätze immer schwächer und hören in einem Abstand von 5—6 km ganz auf. Entfernt man sich noch weiter vom Sprengort, so werden neue Einsätze beobachtet, deren Intensität mit zunehmender Entfernung zunächst zunimmt. Zwischen diesen neuen Einsätzen und dem Abklingen der ersten Einsätze zeigen die Registrierungen keine Ausschläge, die auf eintreffende Schallwellen schließen ließen. Es liegt also die typische Erscheinung der Zone des Schweigens vor. Diese Zone kann zwar, wie noch

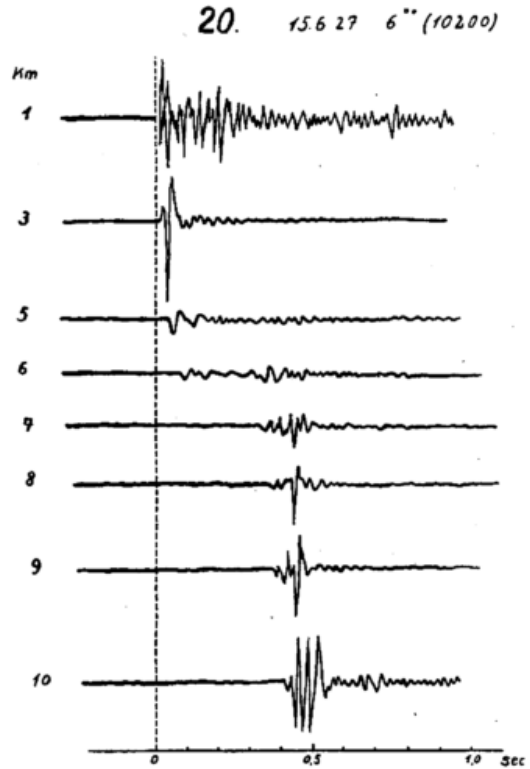


Abb. 2

Registrierungen der Einsätze zur Sprengung vom 15. 6. 27, 6.00 Uhr (in Gegenwindrichtung). Die Kurven sind seitlich so gegeneinander verschoben, daß die Einsätze, die der Schallgeschwindigkeit in Bodennähe entsprechen, untereinander zu liegen kommen. Es treten zwei Einsatzgruppen auf.

gezeigt wird, mehr oder weniger ausgeprägt sein, ist jedoch stets durch eine erhebliche Verzögerung der Ankunftszeiten der zweiten Einsätze feststellbar.

Die vor dieser stillen Zone registrierten Einsätze lassen sich, entsprechend dem abfallenden Ast der Schallgeschwindigkeitskurve, der ihnen zu Grunde liegt, sofort in Gruppe 3 (4) einordnen und durch das Brechungsgesetz erklären.

Mit den nach der Zone des Schweigens eintreffenden Schallstrahlen beschäftigt sich J. K ö l z e r noch eingehender. Er versucht den Schallweg, der zu diesen Einsätzen führt, durch die üblichen Brechungs- und Reflexionsgesetze zu bestimmen. Die Auswertung der Registrierungen ergibt jedoch, daß diese Art der Schallausbreitung damit nicht erklärt werden kann. J. K ö l z e r bezeichnet daher die von den bisher angewendeten Gesetzen abweichende Schallausbreitung auf nahe Entfernung als anomale Schallausbreitung. Diese Anomalität unterscheidet Gruppe 5 wesentlich von allen anderen Gruppen.

Durch die Versuchssprengungen von J. K ö l z e r sind die im Auszug eingangs erwähnten Beobachtungen über eine schallose Zone in geringer Entfernung von der Schallquelle sichergestellt. Darüber hinaus wurden diese Ausbreitungserscheinungen zum ersten Male auf die Basis exakter Beobachtungen und systematischer Messungen gestellt.

Untersuchungen über den Einfluß der meteorologischen Elemente auf die anomale Schallausbreitung sind in der Originalarbeit nachzulesen.

Zusammengefaßt ergibt sich dort, daß bei den herrschenden Versuchsbedingungen von allen meteorologischen Faktoren der Windgeschwindigkeitsgradient der Schallausbreitung im allgemeinen und der anomalen

Schallausbreitung im besonderen am meisten das Gepräge gibt.

3.) Das Problem der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung griff R. Sandmann in drei Veröffentlichungen auf (6), (7), (8). Sein Grundgedanke dabei ist folgender: Von der Sprengstelle bis zur akustischen Umkehrschicht gehorcht die Schallausbreitung dem Brechungsgesetz. Dabei definiert R. Sandmann als akustische Umkehrhöhe die Höhe über Grund, in der die Schallgeschwindigkeitskurve nach anfänglichem Fallen einen horizontalen bzw. steigenden Verlauf annimmt. In der Umkehrschicht unterliegt der Schallstrahl einer „stetigen Beugung“ zum Schallschatten hin. Dieser Beugungseffekt wird durch den Windeffekt je nach Stärke und Richtung beeinflusst. Bei den vorliegenden Windverhältnissen wird der Schallstrahl nach abwärts gebogen bis an die untere Grenze der Umkehrschicht; von dort aus gehorcht er auf seinem Weg zum Beobachter wieder dem Brechungsgesetz. Der Verfasser sieht also in der „stetigen Beugung“ in der Umkehrschicht die Ursache für den nach der Zone des Schweigens einbrechenden Schall.

Durch diese Erklärung kann er z. B. die Abhängigkeit der horizontalen Ausdehnung der schallosen Zonen vom Windgradienten in der Umkehrschicht deuten (7). Die Energiefrage bei den anomalen Einsätzen stellt jedoch für die Sandmannsche Auffassung ein kaum zu lösendes Problem dar.

Lord Rayleigh (9) kommt nämlich zu dem Ergebnis, daß die Intensität eines gebeugten Schalles vom Beugungswinkel abhängt. Und zwar gibt er an, daß bei zunehmendem Beugungswinkel die Intensität des gebeugten Schalles abnimmt.

Die an die jeweiligen Mikrofonstellen im zweiten Hörbarkeitsbereich ankommende große Schallenergie läßt also nach Rayleigh nur kleine Beugungswinkel zu. Andererseits ergibt die weiter unten durchgeführte Rechnung unter Zugrundelegung der Annahmen von R. Sandmann, daß stets mehr als $\frac{3}{4}$ des gesamten Schallweges (in Horizontalprojekten) in der Umkehrhöhe verläuft. Diese im Verhältnis zum gesamten Schallweg große Strecke läßt sich nicht in Einklang bringen mit den nach Rayleigh zu fordernden kleinen Beugungswinkeln.

Allgemein können sich die Annahmen R. Sandmanns, wie der Verfasser selbst erwähnt (6), weder auf mathematische Entwicklungen noch auf physikalische Versuche stützen.

4.) Von einer Verallgemeinerung des Wellenansatzes ausgehend kommt K. Uller zur Behandlung des Einfallens einer Welle gegen eine U-Fläche (10), (11), (12). Im Verlaufe der mathematischen Entwicklung stößt er auf eine Singularität, die er als „Sonderanlauf einer Welle gegen eine U-Fläche“ interpretiert. Tritt dieser Fall ein, dann ist die übliche Annahme einer einfallenden, einer reflektierten und einer gebrochenen Welle hinfällig. Bei diesem Sonderanlauf tritt eine neue Wellenart auf, die sich längs der U-Fläche ausbreitet und von K. Uller als geführte oder gebundene Welle bezeichnet wird. Die Erzeugung solcher geführten Wellen nennt K. Uller allgemein Welleninduktion.

Er unterscheidet dabei zwischen direkter und indirekter Welleninduktion. Die direkte Welleninduktion liegt vor, wenn die Störungsquelle in der U-Fläche liegt; die indirekte, wenn sich die Quelle außerhalb der U-Fläche befindet.

Als ein Kennzeichen der indirekten Welleninduktion bezeichnet K. Uller, daß eine geführte Welle von der Führungsfläche nicht mehr loskommt; sie erschöpft sich längs der U-Fläche durch seitliche Ausbreitung sowie durch Gabelung an den Verzweigungsstellen der

Fläche. Ferner kann eine geführte Welle nie zu einer anlaufenden mit entgegengesetztem Laufsinn werden.

Aus (13) ergibt sich, daß die Flanken einer geführten Welle ihrerseits gegen eine neue U-Fläche einfallen können. Faßt man die Erdoberfläche als U-Fläche in diesem Sinne auf, so kann die untere Flanke der in der Umkehrhöhe gebundenen Welle gegen die Erdoberfläche einfallen. Das bedeutet, daß die Verdichtungs-Verdünnungswelle nach K. Uller als „nicht — einfache“ Welle längs der kritischen Höhe in loser Kopplung weiterläuft und ihre eine Flanke nach einiger Zeit auf die Erdoberfläche trifft. Damit sind das Abgehobensein der Schallwelle über der Zone des Schweigens und die Rückleitung zur Erde allgemein erklärt.

Wenn auch durch die Abschwächung der Unstetigkeit die in der kritischen Höhe minimaler Schallgeschwindigkeit sich ausbreitende Energie nicht in dem Grade geführt wird, wie es die Ullersche Theorie annimmt, so ist doch die Reichweite der sich auf diese Weise fortpflanzenden Energie größer als die der Energie des direkten Schalles. Daraus ergibt sich, daß genügend weit vom Sprengort entfernte Mikrophone nur noch die Energie, welche über die Umkehrhöhe transportiert wurde, registrieren.

Bei den Ullerschen Annahmen fehlen weitgehend Konkretisierungen der Theorie auf spezielle Fälle. Dies kritisiert auch J. Fuhrich (14), der die Möglichkeit vermißt, die Ullersche Theorie durch physikalische Versuche zu prüfen.

Die Zueignung zweier Geschwindigkeitswerte für eine Welle, wie sie Uller vornimmt, läßt keinen Schluß zu über die beobachtbare Geschwindigkeit einer geführten Welle. Eine Aussage darüber wäre aber für eine Prüfung der Welleninduktion von großer Bedeutung. Auch von G. Schweickert (15) wird in anderem Zusammenhang auf die Problematik der Ullerschen Geschwindigkeitsverteilung in einer geführten Welle hingewiesen.

Ebenso ist der Begriff des Sonderanlaufes in seiner Anwendung auf die Schallwelle von K. Uller im einzelnen nicht ausgeführt. Die Frage des Anlaufwinkels der Welle beim Sonderanlauf ist nach K. Uller für eine Schallwelle ebensowenig zu beantworten wie die Frage nach der quantitativen Energieverteilung in den Wellenflanken der geführten Welle.

Zwar hatte K. Uller, wohl in Erkenntnis der Notwendigkeit einer Konkretisierung seiner Theorie, eine Anwendung auf Probleme der Akustik in der freien Atmosphäre angekündigt, jedoch ist eine diesbezügliche Veröffentlichung ausgeblieben.

Die mangelnde Überprüfbarkeit der Wellentheorie an meteorologischen und akustischen, quantitativ erfaßten Erscheinungen ist wohl ein Hauptgrund, daß die Ullersche Theorie so wenig Beachtung gefunden hat.

5.) O. v. Schmidt ist bei seinen seismischen Versuchen auf Ausbreitungserscheinungen gestoßen, die, was die Verteilung der Hörbarkeitszonen anbetrifft, in gewisser Weise ein seismisches Analogon zur anomalen Schallausbreitung darstellen. In einer Aussprache, die er nach seiner letzten Veröffentlichung auf diesem Gebiet (16) mit J. Kölzer hatte, hält er es für möglich, daß sich seine Deutung spezieller Wellen auf die von J. Kölzer beobachtete anomale Schallausbreitung übertragen läßt.

Auf Grund zahlreicher, systematischer Versuche nimmt O. v. Schmidt außer dem direkten und dem an der unteren Schicht reflektierten Strahl einen Strahl an, der unter dem Grenzwinkel der Totalreflexion einfällt und sich im Medium II längs der Grenzfläche mit der Geschwindigkeit v_2 fortpflanzt. Dabei erfolgt kon-

tinuierliche Abstrahlung unter dem Winkel i_0 in das obere Medium und die Bildung einer Wellenfront. Diese bildet mit der Grenzfläche wieder den Winkel i_0 , wobei

$$\sin i_0 = v_1/v_2$$

ist.

Diesen Gesamtvorgang nennt O. v. Schmidt „wandernde Reflexion“. Eine Voraussetzung, daß die Grenzwellen in das Medium I zurückgestrahlt wird, ist, daß die Ungleichung $v_1 < v_2$ erfüllt ist.

Die besondere Wellenausbreitung an der Grenzschicht erklärt O. v. Schmidt durch die Huygensschen Elementarwellen (17).

Diese Ergebnisse über eine neuartige Wellenausbreitung in der Seismik fußen auf zahlreichen Versuchen. Die Fortpflanzung einer Welle großer Energie längs der Trennschicht zweier Medien wurde von H. M. Haalck, H. Rutherford und H. Gerecke (18), (19), (20) anerkannt.

J. Picht (21) hält zwar auch ein Eindringen der unter dem Winkel \geq dem Winkel der Totalreflexion ankommenden Energie in das Medium II, eine Ausbreitung mit der Geschwindigkeit v_2 längs der Grenzfläche und ein Zurückfluten der Energie für gegeben, nimmt jedoch gegen die Art, wie O. v. Schmidt dieses Ausbreitungsproblem mathematisch behandelt, Stellung. Vor allem wendet er sich gegen die sehr elementar gedachte „Summation der Grenzwellen“.

Durch Schlierenaufnahmen ist der experimentelle Nachweis erbracht, daß die in der Seismik beobachtete Erscheinung der „wandernden Reflexion“ auch in Gasen auftritt. Der durch ein Geschöß hervorgerufene akustische Impuls hat in der heißen Zone Überschallgeschwindigkeit gegenüber der Umgebung und strahlt unter dem Winkel der Totalreflexion in das Medium mit geringerer Schallgeschwindigkeit ab. Dieser Impuls verhält sich also wie eine Grenzwellen, die sich im akustisch dichteren Medium bewegt und deren Energie in das akustisch dünnere Medium zurückflutet.

Modellversuche zeigen außerdem, daß die Entstehung einer Kopfwelle nicht an eine scharfe Trennfläche gebunden ist, sondern auch bei kontinuierlichem Übergang der Schallgeschwindigkeit auftritt.

Vergleicht man die v. Schmidtsche Bedingung für die Ausbildung einer Kopfwelle mit der Schallgeschwindigkeitsverteilung der Gruppe 5, so zeigt sich folgendes: In einer bestimmten Höhe könnte sich zwar die Kopfwelle nach v. Schmidt ausbilden, diese würde aber nie die Registrierstellen auf der Erdoberfläche erreichen. Sie würde vielmehr nach aufwärts strahlen und mit zunehmender Entfernung verebben. Dies widerspricht den Filmregistrierungen, wie sie J. Kölzner gewonnen hat.

6.) T. Sakai hat sich in zwei Veröffentlichungen (21), (22) allgemein mit dem Problem der Schallausbreitung auf nahe Entfernung beschäftigt. In beiden legt er dar, daß das Charakteristikum für die Ausbreitungsvorgänge auf nahe Entfernung darin liegt, daß die Wellenlänge nicht als klein gegenüber dem Abstand des Wellenzentrums von der akustischen Umkehrschicht angesehen werden könne, wie es bei den Schallstrahlungsgesetzen der Fall ist.

Der Verfasser behandelt den Gesamtkomplex der Schallausbreitung auf nahe Entfernung auf theoretischer Grundlage. Wie es den Verhältnissen auf nahe Entfernungen entspricht, geht er von der allgemeinen Wellengleichung aus. Als Lösung erhält er zunächst eine Welle, die sich direkt vom Sprengpunkt zum Beobachter ausbreitet, dann eine Welle die sich „indirekt“ von der Schallquelle zum Beobachter fortpflanzt. Von

dieser Welle nimmt T. Sakai an, daß sie der anomalen Welle von J. Kölzner entspricht.

T. Sakai legt seiner Theorie eine Atmosphäre zu Grunde, die aus zwei homogenen Medien besteht. Das untere Medium ist durch eine Fläche, die in einer bestimmten Höhe parallel zur Erdoberfläche verläuft, vom oberen getrennt. Letzteres wird nach aufwärts als unendlich ausgedehnt angenommen. Die Einwirkungen der Luftfeuchte und des Luftdrucks auf die Schallausbreitung werden vernachlässigt. Das Ausbreitungsproblem selbst wird als zweidimensionales behandelt unter der Voraussetzung wirbelfreier Luftbewegung.

Außer der üblichen reflektierten und gebrochenen Welle erhält T. Sakai eine besondere Welle. Sie hat ihren Ursprung in der Trennfläche und gehorcht dem Schallstrahlungsgesetz nicht mehr. Sie breitet sich vielmehr längs der Trennfläche im unteren Medium aus mit einer Geschwindigkeit, die dem oberen Medium zugeordnet ist. Bei einem Abstand von der Schallquelle $2h \cdot \tan \theta_0$, wobei θ_0 durch

$$\sin \theta_0 = 1 - \frac{\Delta T}{2 T_2} - \frac{U}{c_1}$$

bestimmt ist, ist ihre Intensität so groß, daß sie dann auf der Erde beobachtbar ist. Da sich diese Welle nicht mit der ihrem Medium zukommenden Geschwindigkeit ausbreitet, erscheint sie getrennt von der direkten Welle, die sich im unteren Medium ausbreitet. Die Energie dieser direkten Welle nimmt, wie auch die Registrierungen zeigen, mit zunehmender Entfernung vom Sprengort rasch ab. Im Gegensatz dazu unterliegt die Welle, die sich längs der Unstetigkeitsfläche ausbreitet, den absorbierenden Einflüssen der direkten Welle nicht, so daß sie in einer Entfernung wahrnehmbar ist, in der die direkte Welle bereits abgeebbt ist. Zwischen dieser Stelle und den letzten wahrnehmbaren Einsätzen der direkten Welle kann sich eine Zone des Schweigens ausbilden.

Die Umkehrtendenz der Schallgeschwindigkeit in ca. 150 m Höhe wird als auslösende Ursache der anomalen Welle angesehen. Der Schallweg selbst wird in die Zone minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit gelegt. Durch die Wahl der Koordinatensysteme liegt die Trennfläche in der durch die Schallgeschwindigkeitskurve gegebenen kritischen Höhe minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die beiden durch die Unstetigkeitsfläche getrennten Medien muß T. Sakai, wie erwähnt, als homogen annehmen. Mit dieser Annahme kann er Ablauf und Veränderung der meteorologischen Elemente unterhalb und oberhalb der Umkehrhöhe, wie sie sich aus der Schallgeschwindigkeitskurve ergeben, nicht berücksichtigen.

Eine weitere sehr idealisierende Annahme liegt in dem Ansatz einer diskontinuierlichen Trennfläche, längs der sich die indirekte Welle fortpflanzt. In Wirklichkeit vollzieht sich die Ausbreitung einer Welle infolge der kontinuierlichen Verhältnisse in der freien Atmosphäre mehr in einer Schicht, die nach Sakai in der kritischen Höhe liegt, als längs einer Fläche.

Grundsätzlich läßt sich feststellen, daß T. Sakai auf Grund der Registrierungen von Kölzner bis zu 500 m Höhe durch seine Theorie zu einer Wellenausbreitung gelangt, die, obgleich sie längs einer Zone minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit verläuft, auf die Erdoberfläche zurückgeleitet wird. Auf den Verlauf der Schallgeschwindigkeit im einzelnen kann die mathematische Entwicklung auf Grund der notwendigen Vereinfachungen nicht eingehen. Diese und die erwähnten Idealisierungen erklären zahlenmäßige Abweichungen der theoretisch gefundenen Werte von den praktisch ermittelten. Vor allem bedeutet die Bestim-

mung des kritischen Winkels durch die erforderliche Bildung der Mittelwerte von Temperatur- und Windgeschwindigkeit eine je nach dem Verlauf der Schallgeschwindigkeitskurve mehr oder weniger ausreichende Annäherung.

Für T. Saka i bleibt die Frage offen, wie die anomale Schallausbreitung auf nahe Entfernung erklärt werden kann, wenn keine Trennfläche, also kein Schnitt zwischen fallender und steigender Schallgeschwindigkeit zu erkennen ist. Dies ist bei dem Sprengversuch vom 25. 11. 1925 der Fall (Abb. 5). Die Abnahme der Schallgeschwindigkeit verringert sich zwar ab ca. 150 m, ist aber bis zur Endhöhe der Registrierungen von Kölz er vorhanden. Nach T. Saka i ist das Auftreten einer schallosen Zone hier nicht denkbar, denn die Umkehrtendenz als Voraussetzung für die Ausbildung einer eindeutigen Trennfläche fehlt. Andererseits zeigen die Registrierungen eine gut ausgeprägte Zone des Schweigens.

7.) Die u. a. auch von R. S a n d m a n n vertretene Ansicht, daß sich bei anomaler Ausbreitung der Schall in der Höhe minimaler Schallgeschwindigkeit ausbreitet, gab Veranlassung zu nachfolgender kurzer Untersuchung.

Es wird angenommen, daß sich die meteorologischen Elemente innerhalb der jeweils betrachteten horizontalen Schicht nicht verändern. Diese Annahme ist bei der geringen Schichtdicke, wie sie bei der Berechnung gewählt wurde, durchaus vertretbar. Sie läßt sich auch durch die zu Grunde liegende Meßanordnung belegen, welche in der Hauptsache horizontale Meßquerschnitte liefert.

Der Zweck der zu entwickelnden Methode legt nahe, auf die einfache Form des Schallstrahlengesetzes zurückzugreifen.

Je nach der Höhe der Umkehrschicht über dem Erdboden wird eine Schichthöhe von jeweils 30—40 m gewählt. In jeder dieser Schichten werden mittlere Windverhältnisse und eine mittlere Temperatur angenommen. Dabei ergeben sich die Schallgeschwindigkeitswerte für die einzelnen Schichten (v_v) aus der Formel

$$v = v' \sqrt{1 + \frac{at}{m\nu}} \quad F' + w \cos \varphi_v$$

$$v_v = \frac{v'}{v_v} \sqrt{1 + \frac{at}{m\nu}} \quad F' + w \cos \varphi_v$$

$$\nu = 0, 1, 2, \dots$$

wobei F eine temperaturabhängige Konstante ist, deren jeweiliger Wert aus den Tabellen von F. Linke zu entnehmen ist und $t_{m\nu}$ und $w_{m\nu} \cos \varphi_v$ die mittleren Temperatur- und Windgeschwindigkeitswerte — letztere projiziert auf die Beobachtungsrichtung — in der Schicht ν bezeichnen.

Die Verzögerungszeiten der anomalen Einsätze gegenüber den direkten lassen sich unmittelbar aus den Registrierungen ablesen. Sie charakterisieren die anomale Schallausbreitung und sind durch die Berechnung der Gesamtlaufzeit des Schalles t_{ges} bestimmt. Es erscheint daher zweckmäßig, die Gesamtlaufzeit des anomalen Schalles in der Rechnung als abhängige Größe zu entwickeln, um durch ihre Wertbestimmung sofort eine Vergleichsmöglichkeit mit den Registrierungen zu gewinnen. Die Laufzeit t_{ges} hängt vom Abgangswinkel i_0 des Schalles vom Sprengort und den herrschenden Schallgeschwindigkeitsverhältnissen ab. Während die Schallgeschwindigkeitswerte direkt aus der Schallgeschwindigkeitskurve entnommen bzw. rechnerisch bestimmt werden können, ist i_0 aus den Registrierungen nicht erfassbar.

Bei der Festlegung des Abgangswinkel i_0 fehlt somit die Eindeutigkeit der experimentellen Grundlage, mit welcher die Schallgeschwindigkeit bestimmt werden kann.

Die Berechnung der Gesamtlaufzeit t_{ges} kann nur dann befriedigen, wenn t_{ges} in eine Abhängigkeit von denjenigen Größen gebracht werden kann, die nach Anlage und Durchführung der Sprengungen sehr genau zu bestimmen waren.

Nach einer im Original nachzulesenden Ableitung ergibt sich die gesamte Laufzeit zu

$$t_{ges} = \frac{1}{v_n} \left(L + 2h \frac{v_n - \sin i_v}{\cos i_r} \right) \text{ sec} \quad [1]$$

(L : Abstand vom Sprengort)

$$r = 0, 1, 2, \dots$$

bzw.

$$t_{ges} = 2 \sum_{v=0}^n t_v + t_n \text{ sec} \quad [2]$$

(t_n : Laufzeit in der Schicht $\nu = n$)

Die Sinus- und Cosinuswerte ergeben sich aus

$$\sin i_{v+1} = \frac{v_{v+1} \sin i_v}{v_v}$$

Gleichung [1] läßt sich für den Fall, daß die Schichtdicke innerhalb einer Versuchsreihe verändert werden muß, noch verallgemeinern zu

$$t_{ges} = \frac{1}{v_n} \left(L + 2 \sum_{v=0}^n h_v \frac{(v_n - \sin i_v)}{\cos i_v} \right) \text{ sec}$$

Wie dargelegt, bedeuten die Pfeile an der Ordinate der Schallgeschwindigkeitskurven, was die anomalen Einsätze anbetrifft, die scheinbare Schallgeschwindigkeit (v_{sch}) über Grund. Sie ist nach J. Kölz er (4) ermittelt als der Wert des Quotienten aus der Entfernung der Registrierstelle von der Schallquelle (L) und der beobachteten Laufzeit (t_b). Als beobachtete Laufzeit ergibt sich also

$$t_{be} = \frac{L}{v_{sch}} \text{ sec}$$

Mit dieser Gleichung ist die registrierte Laufzeit des anomalen Schalles, mit Gleichung [1] die berechnete erfaßt, so daß sich hier ein erster Vergleich zwischen Rechnung und Registrierung anstellen läßt.

Eine weitere Möglichkeit der Überprüfung ist gegeben, wenn man die Verzögerungszeit Δt des anomalen Einsatzes gegenüber der Normalzeit t_N , die der Schall bräuchte, wenn er in Bodennähe bis zur Lm entfernten Station gelangte, heranzieht. Sie ist gegeben durch

$$t_N = \frac{L}{v_N} \text{ sec}$$

wobei v_N die tatsächliche Geschwindigkeit in Bodennähe ist. Sie läßt sich durch die Pfeile für die ersten Kilometer am linken Rand der Schallgeschwindigkeitskurve ablesen. t_N kann somit für jede Registrierstelle berechnet werden. Die Verzögerung, die der anomale Schall gegenüber dieser Normalzeit erleidet, läßt sich aus den Filmregistrierungen unmittelbar ablesen (Δt_v). Andererseits läßt sich die Verzögerungszeit aus

$$\Delta t = t_{ges} - t_N \text{ sec}$$

berechnen.

$$\text{Aus } 2 \sum_{v=0}^n l_v = 2h \sum_{v=0}^n \text{tg } i_v \text{ m}$$

ergibt sich der bis zur Umkehrhöhe zurückgelegte Weg des anomalen Schalles in Horizontalprojektion und damit der Schallweg L_n in der Höhe minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit zu

$$L_n = L - 2 h \sum_{v=0}^n \operatorname{tgi}_v \text{ m}$$

womit sich die Laufzeit t_n in dieser Höhe darstellt durch

$$t_n = \frac{L - 2 h \sum_{v=0}^n \operatorname{tgi}_v}{v_n} \text{ sec}$$

bzw.

$$t_n = \frac{L - 2 \sum_{v=0}^n h_v \operatorname{tgi}_v}{v_n} \text{ sec}$$

8.) Nach diesen allgemeinen Erörterungen seien nun zwei Sprengungen herausgegriffen.

Die Schallgeschwindigkeitskurve der Sprengung vom 15. 6. 1927 (Abb. 1) zeigt eine schmale Senke in der geringen Höhe von 120—150 m. Um Einzelheiten im Verlauf und besonders in dieser Senke der Schallgeschwindigkeitskurve deutlich in der Rechnung erfassen zu können, wird die Einteilung in 30-m-Schichten vorgenommen.

Auf diese Sprengung angewendet ergeben die Formeln für die verschiedenen Entfernungen L des Beobachters vom Sprengort und bei der aus der Schallgeschwindigkeitskurve abzulesenden Ausbreitungshöhe von 120—150 m die in Tabelle 2 zusammengestellten Werte.

Je nach der Entfernung des Mikrophons von der Schallquelle liegen, wie Tabelle 2 zeigt, 76—86% des Gesamtschallweges (in Horizontalprojektion) in der Höhe minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Tab. 2 Auswertung zur Sprengung vom 16. 6. 1927 6.00 Uhr unter der Annahme der Schallausbreitung in der Zone minimaler Geschwindigkeit.

L : Abstand zwischen Registrierstelle und Schallquelle, i_0 : Abgangswinkel, t_{ges} : Gesamte Laufzeit, t_{be} : Beobachtete Laufzeit, t_N : Normalzeit, Δt_r : Berechnete Verzögerung, Δt_f : Registrierte Verzögerung, L_n : Laufweg in der Höhe minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit, t_n : Laufzeit in der Höhe minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit.

L	10000	9000	8000	7000
i_0	86°	82°	78°	74°
t_{ges}	29,91	26,96	24,00	21,08
t_{be}	29,85	26,88	23,90	20,93
t_N	29,46	26,52	23,55	20,63
Δt	0,45	0,45	0,44	0,45
Δt_r	0,45	0,45	0,45	0,45
L_n	7649	7491	6732	6052
t_n	22,85	22,40	20,13	18,12

Am 16. 6. 1927 führte J. Kölzer eine Sprengung durch, die in typischer Weise die Anomalität der Schallausbreitung auf nahe Entfernung erkennen läßt. Abbildung 3 gibt die zu Grunde liegende Schallgeschwindigkeitskurve mit der gestrichelt gezeichneten Temperaturkurve, Abbildung 4 die Filmregistrierungen wieder. Die Sprengdaten sind in Tabelle 3 festgehalten. Die Schallgeschwindigkeitskurve wurde in Richtung NWzN nach SEzS aufgenommen, die ziemlich genau der Windrichtung entgegengesetzt ist. Die Senke der Schallgeschwindigkeitskurve liegt hier in größerer Entfernung vom Erdboden als im vorigen Versuch. Da

zudem das Minimum sehr verbreitet ist, wird für die Rechnung die gegenüber dem vorigen Versuch etwas größere Schichtdicke von 40 m gewählt. Die Schallgeschwindigkeit in der Umkehrhöhe stellt den Tiefstwert dar und beträgt 329,4 m/sec. Entsprechend diesem, für die angegebene Höhe sehr geringen Wert, erreichen die Verzögerungszeiten der anomalen Einsätze die für diese nahe Entfernung beträchtlichen Werte von fast 1 sec.

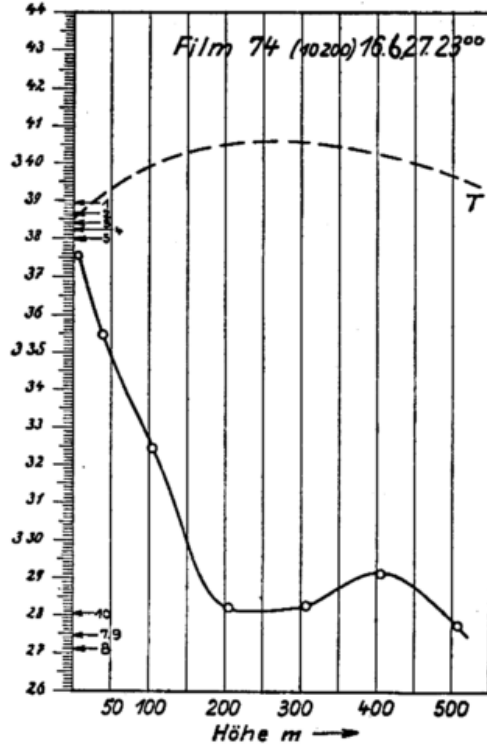


Abb. 3 Schallgeschwindigkeitskurve zur Sprengung vom 16. 6. 27, 23.00 Uhr. Die gestrichelte Kurve ist die Temperaturkurve.

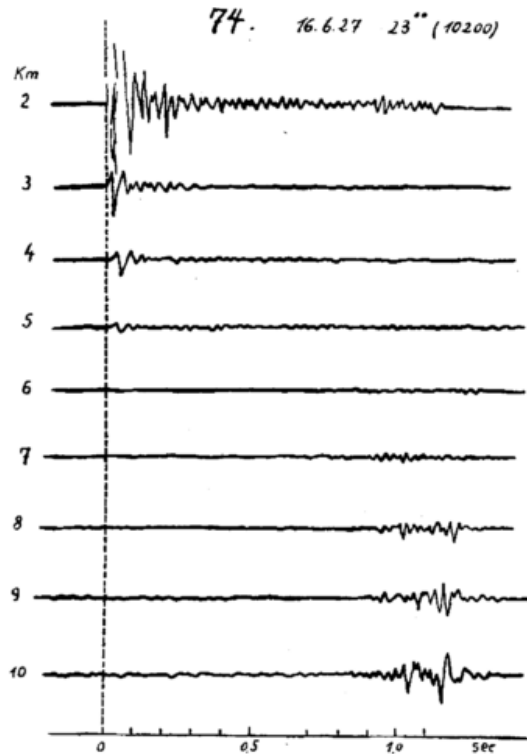


Abb. 4 Registrierungen der Einsätze zur Sprengung vom 16. 6. 27, 23.00 Uhr. Die Einteilung auf der Zeitskala beträgt 0,1 sec.

Tab. 3 Meteorologische Daten zur Sprengung vom 16. 6. 1927 23.00 Uhr. Die letzte Spalte gibt die Windrichtungszahlen nach der 32teiligen Rose an.

Höhe m	Temperatur °C	Feuchte %	Windgeschw. m/sec	Windricht.
0	12,5	60	1,2	10
30	—	—	4,5	10
100	15,0	—	8,0	11
200	—	—	12,5	12
300	15,5	—	12,5	13
400	15,0	—	11,0	13
500	14,9	—	12,2	14

Wie die Filmregistrierungen zeigen, liegt eine ausgeprägte Zone des Schweigens vor, die von ca. 5000 bis 8000 m reicht.

Eine der Tabelle 2 analoge Aufstellung ergibt, daß 80—84% der Gesamtstrecke in Horizontalprojektion in der Höhe minimaler Ausbreitungsgeschwindigkeit verlaufen.

Damit ist der weiter oben aufgezeigte Widerspruch in den Annahmen R. Sandmanns durch die Rechnung belegt.

Weitere Angaben über diese Sprengungen von J. Kölzer finden sich in der Originalarbeit.

Zusammenfassend läßt sich feststellen: Allen Veröffentlichungen, die bisher zur anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung erschienen sind, ist im wesentlichen die Annahme gemeinsam, daß sich der anomale Schall in der Zone minimaler Schallgeschwindigkeit ausbreitet. Mit dieser Annahme ist es jedoch keiner dieser Theorien gelungen, das Problem voll und in allen wesentlichen Einzelheiten zu lösen.

II. Teil

Da somit die Registrierungen bis zu 500 m, auf denen alle bisherigen Annahmen beruhten, nicht ausreichen, werden im folgenden die charakteristischen Schallgeschwindigkeitskurven bis zu 1500 m Höhe erweitert.

Als obere Grenze wird 1500 m gewählt, da wegen der verhältnismäßig nahe am Sprengort liegenden Zone des Schweigens eine größere Höhe für die Wellenausbreitung, die zu den anomalen Einsätzen führt, sicherlich nicht in Frage kommt.

1.) Veranlaßt wird diese Erweiterung der Schallgeschwindigkeitskurven durch eine Arbeit G. A. Schulzes (24), in der u. a. Sprengung von Kölzer vom 25. 11. 1925 behandelt wird. In dieser erhält der Verfasser durch Berechnung aus benachbarten Höhenaufstiegen eine Schallgeschwindigkeitskurve, die in ca. 1000 m Höhe den Schallgeschwindigkeitswert am Boden wieder erreicht. Unter der Annahme einer Reflexion der Schallwellen erhält G. A. Schulze durch eine überschlägige Rechnung eine Umkehrhöhe von 960 m. Er leitet daraus ab, daß es sich bei der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung im Prinzip um die gleichen Vorgänge wie bei der auf weite Entfernung handle, wobei jeweils nur die Größenordnungen verschieden seien.

Das grundlegend Neue ist, daß die in Abbildung 5 wiedergegebene Schallgeschwindigkeitskurve nach G.

A. Schulze ab ungefähr 500 m Höhe ansteigt und im weiteren Verlauf Werte erreicht, die höher sind als die Bodenwerte.

Es erhebt sich damit die Frage, ob dieser Anstieg der Schallgeschwindigkeit reell und bei allen für die anomale Schallausbreitung auf nahe Entfernung charakteristischen Kurven festzustellen ist.

Diese Frage kann aus der Arbeit G. A. Schulzes nicht beantwortet werden. Es fehlen ihr nämlich die benutzten Daten der Höhenaufstiege ebenso wie jeder andere meteorologische Wert. Die Arbeit behandelt das Problem der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung als Teilproblem und geht dabei nicht über einige Überschlagsrechnungen hinaus. Auch die Darstellung beider Schallgeschwindigkeitskurven in Abbildung 19 dieser Veröffentlichung ist in Einzelheiten noch ergänzungsfähig, so z. B. durch die Erweiterung der Kölzer'schen Kurve auf 500 m Höhe, wie es in diesem Abschnitt geschieht. Zusammenfassend ist zu dieser Arbeit festzustellen, daß sie als Hinweis für eine Lösung des vorliegenden Problems dienen kann.

Die Untersuchungen über die Vergleichbarkeit von Höhenwindmessungen, die in der Originalarbeit nachzulesen sind, bestätigen zusammengefaßt, daß die Vergleichsverhältnisse zwischen zwei benachbarten Stationen im Einzelfall durchaus verschieden sein können, insbesondere auch zwischen den einzelnen Höhenstichten des gleichen Termins. Eine bessere Übereinstimmung von den Höhen ab, in denen die Bodenreibung nicht mehr wirksam ist, ist festzustellen.

Sprengung vom 25. 3. 1925, 23.30 Uhr

2.) Die Untersuchung der Sprengungen hinsichtlich einer Ausweitung der Schallgeschwindigkeitskurve bis 1500 m beginnt bei der frühesten Sprengung vom 25. 11. 1925, 23.30 Uhr.

Die bis ca. 300 m aufgezeichnete Schallgeschwindigkeitskurve ist in Abbildung 5, der Film in Abbildung 6 wiedergegeben. Die Schallgeschwindigkeitskurve wurde von NWzN nach SEzS aufgenommen, also praktisch gegen die Windrichtung.

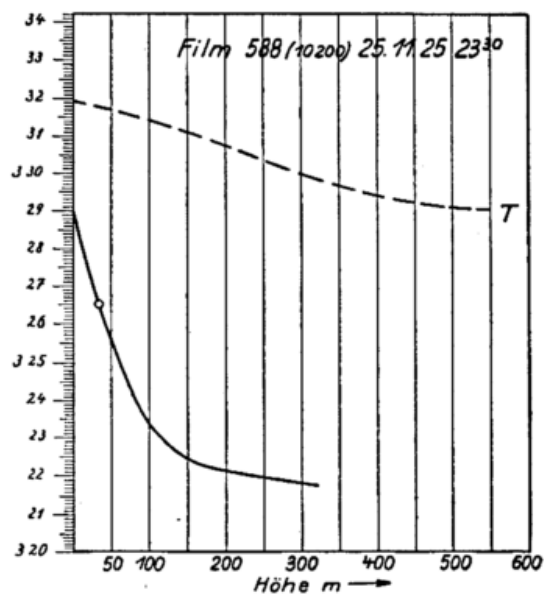


Abb. 5 Schallgeschwindigkeitskurve zur Sprengung vom 25. 11. 25, 23.30 Uhr. Die gestrichelte Kurve ist die Temperaturkurve.

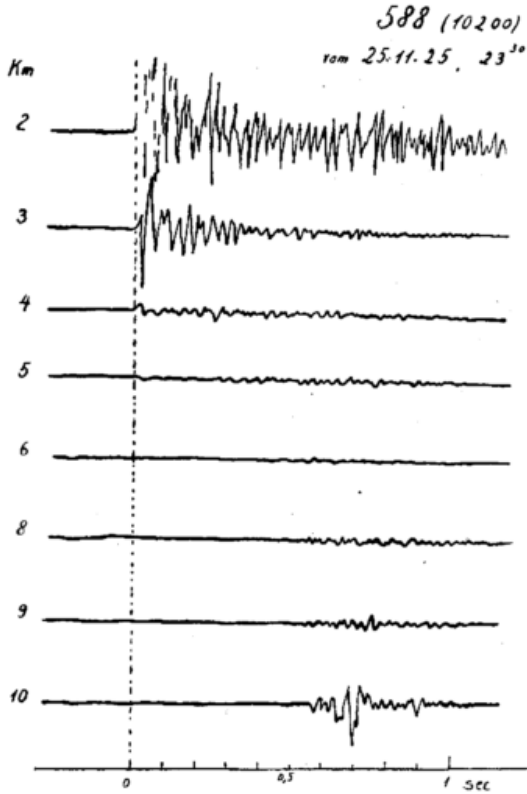


Abb. 6
Registrierungen der Einsätze zur Sprengung vom 25. 11. 25,
23.00 Uhr.

Wie aus Tabelle 4 ersichtlich, tritt ab 200 m eine Drehung der Windrichtung auf, die zu dem in Abbildung 5 sichtbaren mehr horizontalen Verlauf der Kurve führt. Tabelle 4 läßt außerdem erkennen, daß eine Bestimmung der Schallgeschwindigkeitskurve bis zu 600 m allein aus den Kölzlerschen Werten möglich ist.

Tab. 4 Meteorologische Daten zur Sprengung vom
25. 11. 1925, 23.30 Uhr

Höhe m	Temperatur °C	Windgeschw. m/sec	Windricht.
0	+1,8	4,0	14
200	+0,1	9,3	15
400	-1,4	11,0	17
600	-2,3	12,0	19
800	-2,5	—	—

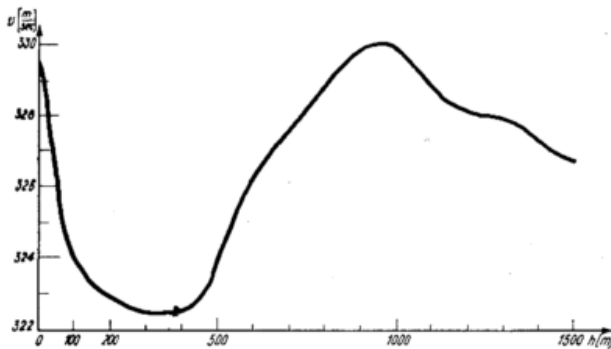


Abb. 7
Verlauf der Schallgeschwindigkeit bis zu 1500 m Höhe
bei der Sprengung vom 25. 11. 25, 23.30 Uhr.

Die in der Originalarbeit einzusehenden Untersuchungen über die Wetterlage und Aufstiege an benachbarten Stationen — die Sprengungen selbst erfolgten in Kummersdorf — liefern die in Abbildung 7 wiedergegebene Schallgeschwindigkeitskurve.

Die Schallgeschwindigkeitskurve geht bis 1500 m Höhe und läßt erkennen, daß das Maximum über dem Anfangswert der Kurve liegt. Dieses wird in der Hauptsache durch die Drehung des Windes hervorgerufen. Diese Drehung des Windes wird grundsätzlich auch von R. Scherhag angenommen, der sich in einem Schreiben zu diesem Problem geäußert hat.

Es wird die Aussage G. A. Schulzes, daß die Kurve ihren Anfangswert übersteigt, bestätigt.

Sprengung vom 15. 6. 1927, 6 Uhr

Die Registrierungen zu dieser Sprengung sind in den Abbildungen 1 und 2, die Meßdaten in Tabelle 1 wiedergegeben. Einzelheiten der Durchführung dieser Sprengung wurden bereits erwähnt. Ein Vergleich der Tabelle 1 mit Abbildung 1 zeigt, daß dort die Registrierungen bereits vollständig graphisch dargestellt sind.

Die Diskussion der Wetterlage und der Registrierungen benachbarter Stationen (siehe Originalarbeit) führt zum Verlauf der Schallgeschwindigkeit bis zu 1500 m Höhe, wie sie Abbildung 8 wiedergibt.

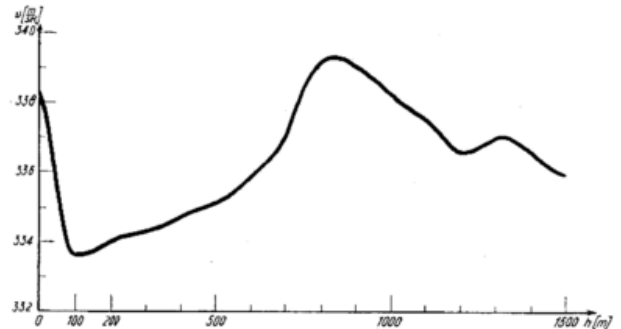


Abb. 8
Verlauf der Schallgeschwindigkeit bis zu 1500 m Höhe
bei der Sprengung vom 15. 6. 27, 6.00 Uhr.

Sprengung vom 16. 6. 1927, 23.00 Uhr

Als letztes der drei Beispiele zur anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung berichtet J. Kölzer in (5) über die Sprengung vom 16. 6. 1927, 23.00 Uhr. Die Schallgeschwindigkeitskurve ist in Abb. 3 wiedergegeben. Die ersten Einsätze an den Mikrophonstellen stellt Abb. 4, die Meßwerte Tab. 3 dar. Auch bei dieser Sprengung sind die dortigen Registrierungen bereits voll ausgewertet.

Die gegenüber der vorigen Sprengung vom 15. 6. 1927 eingetretene Änderung in der Wetterlage wird in der Originalarbeit hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Schallausbreitung untersucht und zusammen mit den Aufstiegen benachbarter Stationen — vor allem Lindenbergl — zur Grundlage für den Schallgeschwindigkeitsverlauf bis zu 1500 m gemacht. Abbildung 9 zeigt die dazugehörige Schallgeschwindigkeitskurve. Von ca. 1100 m bis zu 1400 m sind die Schallgeschwindigkeitswerte größer als der Bodenwert.

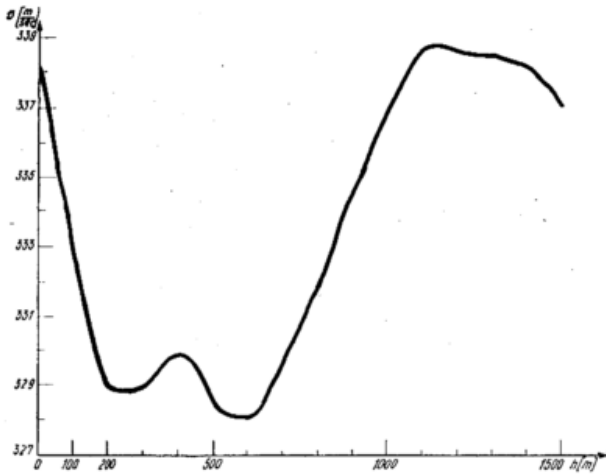


Abb. 9

Verlauf der Schallgeschwindigkeit bis zu 1500 m Höhe bei der Sprengung vom 16. 6. 27, 23.00 Uhr.

Vergleicht man die neugewonnenen drei Kurven miteinander, so zeigen sie alle nach ihrem Minimum ein Anwachsen der Schallgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe. Insbesondere überschreiten die Schallgeschwindigkeiten ausnahmslos ihren jeweiligen Bodenwert.

3.) Mit diesen Ergebnissen erscheint die anomale Schallausbreitung auf nahe Entfernung im neuen Licht.

Es liegt die Annahme nahe, daß das Ansteigen der Schallgeschwindigkeit bzw. Überschreiten des Anfangswertes v_0 in Gegenwindrichtung die anomale Schallausbreitung auf nahe Entfernung verursacht.

Würde dieser Sachverhalt zutreffen, so müßte bei Registrierungen die keine anomalen Einsätze aufweisen, die steigende Tendenz der Schallgeschwindigkeit von einer bestimmten Höhe ab und das Überschreiten des v_0 - Wertes fehlen.

Ein Beispiel dieser Art von Registrierungen gibt Abb. 11 wieder. Sie zeigt, daß ab 6 km kein Schall an den Mikrophonstellen eintrifft. In (5) teilt J. Kölzer dazu mit, daß bei diesem Versuch auch bis zu 10 km kein Schall mehr registriert wurde. Es handelt sich um die Sprengung vom 15. 6. 1927, 21.00 Uhr, zu der Abb. 10 die Schallgeschwindigkeitskurve darstellt. Sie wurde für die Ausbreitungsrichtung des Schalles von SEzS nach NWzN gezeichnet. Da weitere Einzelheiten der Registrierungen für die vorliegende Frage ohne Belang sind, bleiben sie hier unerwähnt. Infolge des Temperaturgefälles mit der Höhe und des mit zunehmender Höhe sich verstärkenden Gegenwindes (Tab. 5) weist die Kurve eine stetig fallende Tendenz auf. Sie unterscheidet sich somit bis zu 500 m nicht wesentlich von den für die anomale Schallausbreitung charakteristischen Kurven. Auf Grund obiger Überlegung muß aber, wenn die Kurve über 500 m fortgesetzt wird, ein grundsätzlicher Unterschied zu den Kurven anomaler Schallausbreitung sichtbar werden.

Tab. 5 Meteorologische Daten zur Sprengung vom 15. 6. 27, 21.00 Uhr

Höhe m	Temperatur °C	Feuchte %	Windgeschw. m/sec	Windricht.
0	12,0	78	2,0	32
100	11,5	—	5,0	31
200	10,5	—	5,6	30
300	9,5	—	6,5	30
400	8,7	—	7,0	31
500	—	—	6,5	30
600	—	—	6,5	30

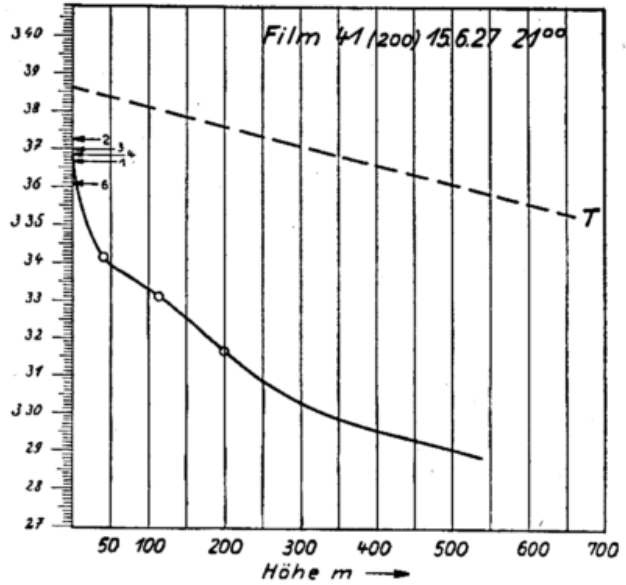


Abb. 10

Schallgeschwindigkeitskurve zur Sprengung vom 15. 6. 27, 21.00 Uhr. Die gestrichelte Kurve ist wieder die Temperaturkurve.

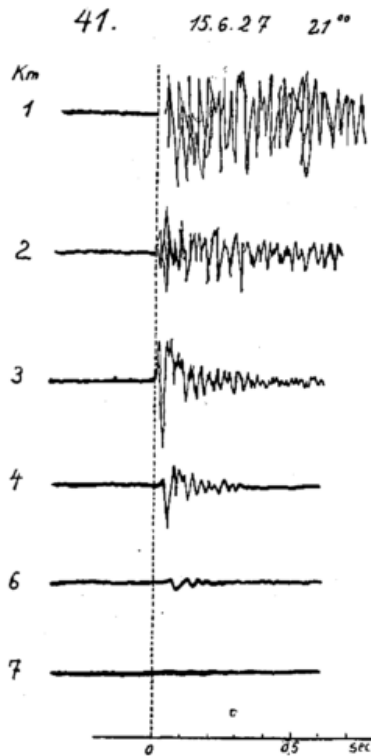


Abb. 11

Registrierungen der Schalleinsätze zur Sprengung vom 15. 6. 27, 21.00 Uhr.

Die Aufgabe, die Kurve Abb. 10 bis zu 1500 m zu erweitern, trifft hier auf besonders günstige Voraussetzungen, da eine nahezu gleichzeitige Registrierung von Lindenbergs existiert.

Einzelheiten über die Wetterlage und die Lindenberger Werte sind wieder dem Original zu entnehmen. Als Ergebnis liefert Abb. 12 die Schallgeschwindigkeitskurve bis zu 1500 m Höhe.

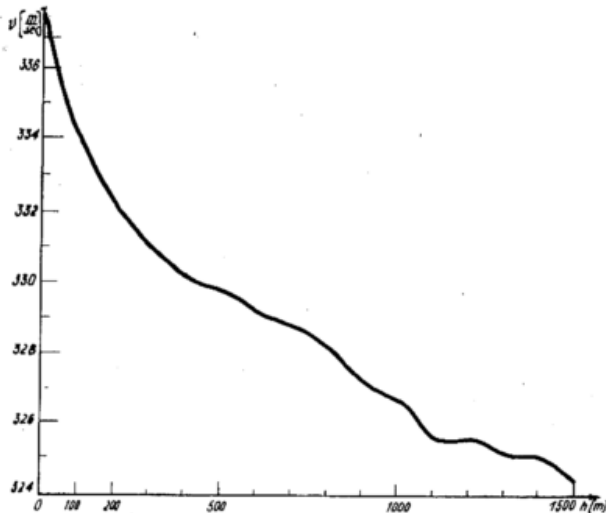


Abb. 12
Verlauf der Schallgeschwindigkeit bis zu 1500 m Höhe bei der Sprengung vom 15. 6. 27, 21.00 Uhr.

Die Kurve ergibt, daß auch ab 600 m bis 1500 m keine Zunahme der Schallgeschwindigkeit auftritt. Damit ist gezeigt, daß die steigende Tendenz der Schallgeschwindigkeitskurve von einer relativ geringen Höhe ab kennzeichnend für das Auftreten sekundären Schalles ist.

4.) Die Erweiterung der Schallgeschwindigkeitskurven hat ergeben, daß der anomale Einsatz von Schallwellen nur auftritt, wenn die Schallgeschwindigkeitswerte über einem Minimum in geringer Höhe zunehmen und den Bodenwert überschreiten. Ist von der Höschicht n ab diese letztere Bedingung erfüllt, dann gilt, wenn dort die Schallgeschwindigkeit v_n ist, die Ungleichung $v_n \geq v_0$. Damit ist grundsätzlich die Möglichkeit gegeben, daß die von der Schallquelle ausgehende Energie wieder auf die Erde zurückkommt. Fällt die Energie unter einem Winkel, der größer oder gleich einem Grenzwinkel ist, in diese Höhe ein, dann wird die gesamte Energie zurückgeleitet. Es liegt nahe zu untersuchen, ob die Annahme einer Rückleitung in der Höhe maximaler Schallgeschwindigkeit geeignet ist, das vorliegende Problem zu lösen.

Bei der Beziehung [2] wird $t_n = 0$. Damit ergibt sich die Laufzeit zu

$$t_{\text{ges}} = t = 2 \sum_{v=0}^n t_v = 2 \sum_{v=0}^n \frac{h_v}{v \cos i_v}$$

wobei t_v die Laufzeit in der Schicht v angibt.

Die Rückleitung der Schallenergie in der Schicht n wird ausgedrückt durch

$$\sin i_{n-1} = \frac{v_{n-1}}{v_n} \quad [3]$$

Fällt der Schall unter einem Winkel \geq dem durch [3] gegebenen Winkel in die Schicht maximaler Schallgeschwindigkeit ein, so wird die gesamte dort ankommende Energie zurückgeleitet. Der durch [3] bestimmte Winkel wird im weiteren als Grenzwinkel bezeichnet.

Der Gesamtweg l bzw. der in der Schicht v zurückgelegte Weg l_v (in Horizontalprojektion) ergibt sich zu

$$l = 2 \sum_{v=0}^n l_v = 2 \sum_{v=0}^n h_v \operatorname{tg} i_v \quad \text{m}$$

Der Rechnungsgang für die Bestimmung der Laufzeit beim Grenzwinkel ist bei allen drei Sprengungen der gleiche. Er wird daher im folgenden generell dargestellt. Die Entfernung vom Erdboden zur Höhe maxi-

maler Ausbreitungsgeschwindigkeit wird in Schichten von jeweils 100 m Dicke eingeteilt — eine relativ feine Einteilung, wenn man bedenkt, daß die Höhe maximaler Ausbreitungsgeschwindigkeit bei allen Sprengungen bei ca. 1000 m liegt. Es wird angenommen, daß diese Schichten parallel zur Erdoberfläche verlaufen und daß sich in ihnen die jeweils betrachteten meteorologischen Werte nicht ändern. Aus den errechneten und tabellierten Schallgeschwindigkeitswerten werden dann durch Mittelbildung die v_v -Werte in den einzelnen Schichten gewonnen.

Die Durchführung der Berechnung zeigt — und dies ist besonders hervorzuheben —, daß alle Werte, auch die Winkelwerte, den Registrierungen direkt oder indirekt entnommen werden können. Es ist keinerlei Annahme von Größen erforderlich, da bei jedem Versuch ein bestimmter Grenzwinkel auftritt, der in eindeutiger Weise Schallverlauf und Laufzeit festlegt.

Nach I, 7.) ist die Normalzeit t_N die Zeit, die der Schall benötigt, wenn er sich mit bodennaher Geschwindigkeit fortpflanzt. Diese Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist für die nächstliegenden Einsätze (1 km) gegeben und kann als v_1 am linken Rand abgelesen werden (in den Abb. 1 und 3 durch Pfeile gekennzeichnet). Da sich bei allen Registrierungen die Einsätze an den Mikrofonstellen auf t_N als Normalzeit beziehen, also die der Schallgeschwindigkeit in Bodennähe entsprechenden Einsätze untereinander liegen, geben die verschiedenen Δt die Differenz zwischen tatsächlicher Laufzeit t und der Normalzeit t_N an. Δt läßt sich daher direkt aus den Filmen ablesen. Andererseits ist, da t_N bestimmt ist, die Verspätung zu errechnen als

$$\Delta t = t - t_N \text{ sec}$$

Der Vergleich der berechneten Verzögerung Δt mit der registrierten Δt_v liefert also ein Kriterium für die Richtigkeit der Berechnung der Laufzeit unter der Annahme einer Rückleitung der gesamten Energie.

Die in I, 7.) erwähnte zweite Vergleichsmöglichkeit läßt sich hier nicht allgemein anwenden, da v_{Sch} die scheinbare Schallgeschwindigkeit, als Wert des Quotienten (Horizontalentfernung : beobachtete Schallzeit) nur bis zu 10 km angegeben ist und auch das nur bei den beiden Schallgeschwindigkeitskurven des Jahres 1927. Die anomalen Einsätze gehen aber, wie schon eine bloße Betrachtung der drei Filmregistrierungen zeigt und die Rechnung bestätigt, ausnahmslos über 10 km hinaus.

5.) Im folgenden wird nun an den drei Versuchssprengungen die Richtigkeit der Annahme der Rückleitung der Energie an der Schicht maximaler Ausbreitungsgeschwindigkeit durch Vergleich der jeweiligen Verzögerungszeiten geprüft.

Sprengung vom 25. 11. 25, 23.30 Uhr

Einzelheiten und Tabellen der ermittelten Werte sind der Originalarbeit zu entnehmen.

Aus der Schallgeschwindigkeitskurve (Abb. 5) ist zu entnehmen, daß in der Schicht $v = n = 9$ die Bedingung für eine Rückleitung der Schallenergie erfüllt ist. Die Gesamtlaufzeit beträgt 41,76 sec, der gesamte horizontale Weg 13 552 m. Dadurch, daß der Grenzwinkel aus den Registrierungen bestimmt ist, liegt auch der Winkel, unter dem der Schall der Sprengstelle verläßt, eindeutig fest. Er beträgt $i_0 = 82^\circ 1$.

Bei den Schallgeschwindigkeitskurven der 1925 durchgeführten Sprengungen wurden die Pfeile zur Kennzeichnung von v_{sch} noch nicht verwendet. Damit fehlt auch der Pfeil I, d. h. der Wert, der die Ausbreitungs-

geschwindigkeit bis zu der 1 km vom Sprungort entfernten Station angibt ($v_1 = v_N$). Da sich aus v_N t_N berechnen läßt, muß die mittlere normale Schallgeschwindigkeit aus der Kurve Abb. 5 gewonnen werden. Der Vergleich mit den beiden anderen Kurven, deren Ordinate mit Pfeilen versehen ist (Abb. 1 und 3), ergibt völlige Deckung der drei Schallgeschwindigkeitskurven von 0—100 m Höhe, d. h. Übereinstimmung im Schallgeschwindigkeitsverlauf in der für die direkte Schallausbreitung in Frage kommenden Höhe. Unter Berücksichtigung der durch die Pfeile 1 in den Abb. 1 und 3 angegebenen Werte ergibt sich für diese Sprengung v_N zu 329,3 m/sec.

Die Normalzeit ist dann

$$t_N = 41,16 \text{ sec.}$$

Die errechnete Verzögerung beträgt also

$$\Delta t = 0,60 \text{ sec.}$$

Aus den Registrierungen Abb. 6 läßt sich diese Verzögerungszeit nicht unmittelbar entnehmen, da hier die Gesamtentfernung größer als die maximal vermessene Strecke von 10 km ist. Jedoch ist hier und bei den anderen beiden Sprengungen auf Grund der jeweils genau untereinanderliegenden ersten anomalen Einsätze anzunehmen, daß für Entfernungen > 10 km die gleichen konstanten Verzögerungszeiten gelten wie bei den Entfernungen bis zu 10 km.

Darnach ist die registrierte Verzögerungszeit zu

$$\Delta t_r \approx 0,58 \text{ sec}$$

anzunehmen.

Bedingt allein durch die meteorologischen Verhältnisse in der freien Atmosphäre kommt die Schallenergie in einer Entfernung von 13,552 km in Gegenwindrichtung wieder auf die Erdoberfläche zurück. Die Registrierungen (Abb. 6) zeigen sofort, daß diese Entfernung reell ist, denn bei den letzten Kilometern der Meßstrecke beginnt erst allmählich der anomale Schalleinsatz.

Sprengung vom 15. 6. 27, 6.00 Uhr

Hier erfüllt die Höschicht $\nu = n = 8$ bezüglich ihrer Schallgeschwindigkeit die Bedingung für eine Rückleitung zur Erdoberfläche.

Trifft der Schall unter dem Grenzwinkel auf diese Schicht, dann kommt er wie aus den Tabellen der Originalarbeit zu ersehen ist, nach 35,06 sec in 11 744 m Entfernung vom Sprengort beim Beobachter an.

Als Abgangs- bzw. Einfallswinkel ergibt sich $i_0 = 82^\circ 15'$. Die Normalzeit beträgt

$$t_N = 34,59 \text{ sec,}$$

somit ist

$$\Delta t = 0,47 \text{ sec.}$$

In Übereinstimmung mit den ersten anomalen Einsätzen bis zu 10 km wird hier eine Verzögerung von

$$\Delta t_r \approx 0,45 \text{ sec}$$

angenommen. Auch in dieser Sprengung zeigt ein Blick auf den Film (Abb. 2), daß in 11,744 km noch Schallwellen ankommen müssen.

Sprengung vom 16. 6. 27, 23.00 Uhr

Die Schallgeschwindigkeitskurve für diese Sprengung (Abb. 10) verläuft von rund 1100 m — 1400 m Höhe über dem Anfangswert der Schallgeschwindigkeit v_0 . Die Höschicht $\nu = n = 11$ führt hier zu dem dem Sprengort nächstliegenden anomalen Einsatz und erfüllt die Bedingung der Rückleitung zum Erdboden.

Aus den Originaltabellen ergibt sich die Gesamtlaufzeit zu 38,68 sec, der Gesamtweg — in Horizontalprojektion — zu 12776 m. Der Schall verläßt unter einem Winkel von $i_0 = 82^\circ 22'$ den Sprengort.

Die Normalzeit beträgt

$$t_N = 37,70 \text{ sec,}$$

also ist die berechnete Verzögerung

$$\Delta t = 0,98 \text{ sec.}$$

Nach Abbildung 4 beträgt die registrierte Verzögerung

$$\Delta t_r \approx 0,95 \text{ sec.}$$

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß bei allen drei Versuchen die Übereinstimmung zwischen den berechneten und registrierten Werten gut ist. Dies erscheint um so bemerkenswerter, als die meteorologischen Verhältnisse in der freien Atmosphäre und hier vor allem die Windverhältnisse dauernden zeitlichen und örtlichen Schwankungen unterworfen sind, so daß eine gewisse Streuung der Werte grundsätzlich in Kauf genommen werden muß.

6.) Es ist also möglich, aus den in der freien Atmosphäre herrschenden Wetterbedingungen unter Annahme einer Rückleitung der Gesamtenergie in der Schicht maximaler Schallgeschwindigkeit eindeutig und mit den Registrierungen voll übereinstimmend den Schallverlauf zu ermitteln.

Der Festlegung des Grenzwinkels entsprechend gelangen auch alle die Schallstrahlen, die unter einem größeren Winkel in die Schicht maximaler Schallgeschwindigkeit einfallen, zum Erdboden zurück. Daraus ergibt sich, daß die zweite Hörbarkeitszone noch über die beiden einzelnen Sprengungen in diesem Abschnitt ermittelten Entfernungen hinausreicht. Die Entfernung vom Sprengort, in welcher der Schall auf den Erdboden zurückgelangt, wenn er in der Höschicht n unter dem gegebenen Grenzwinkel einfällt, wird im folgenden mit E bezeichnet. Eine qualitative Aussage über die Ausdehnung der Zone zweiter Hörbarkeit wird bei der Erörterung der Amplituden der anomalen Einsätze gemacht werden. Für quantitative Ermittlungen fehlen die Registrierungen.

Von größerem Interesse ist, da hierfür Registrierungen vorliegen, die Erklärung der Einsätze vom inneren Rand der Zone anomaler Hörbarkeit bis zu den Entfernungen E . Nach der Definition des Grenzwinkels stellt E die innere Begrenzung für dasjenige Schallfeld dar, das die volle zurückgeleitete Energie erhält. Die Registrierungen aller Sprengungen zeigen aber auch für Abstände von der Schallquelle, die kleiner als E sind, anomale Einsätze. Es muß also außer dieser Rückleitung noch ein anderer Vorgang wirksam sein, der zu diesen Schalleinsätzen führt.

Ein Hinweis für die Lösung dieser Frage gibt eine Veröffentlichung von H. Bl u t (25). Nach dieser Arbeit, die allerdings seismische Ausbreitungsvorgänge behandelt, kann auch bei Winkeln, deren Werte kleiner, aber dem Grenzwinkel nahegelegen sind, Schallenergie zur Erde zurückgelangen.

Die so zur Erde zurückgehende Energie, wird auf Beobachter treffen, deren Abstand vom Sprengort kleiner als E ist. Während die Energie dieser Einsätze später zu erörtern sein wird, soll im folgenden untersucht werden, ob diese Annahme einer partiellen Rückleitung in der Schicht maximaler Schallgeschwindigkeit den registrierten Werten standhält.

Zunächst ist allgemein festzustellen, daß im anomalen Schallbereich die scheinbaren Schallgeschwindigkeiten mit zunehmender Entfernung in ihren Werten abnehmen. Das bedeutet, daß der Anteil der Wegstrecken höherer Schallgeschwindigkeiten geringer wird

je näher am Sprengort — im zweiten Hörbarkeitsbereich — diese Schallwellen eintreffen. Dies stimmt allgemein mit der hier zu untersuchenden Annahme überein, denn bei der teilweisen Rückleitung der Schallenergie wird der Anteil der Wegstrecken in den Schichten hoher Schallgeschwindigkeit kleiner sein als bei der weiter oben behandelten vollständigen Rückleitung des Schalles.

Für die Berechnung werden wieder die obigen Formeln herangezogen. Die den Grenzwinkel kennzeichnende Gleichung ist jetzt nicht mehr zuständig.

Es besteht hier die Möglichkeit, die Ergebnisse zu überprüfen, indem ein berechneter Laufzeitwert und in eindeutiger Zuordnung die horizontale Schallstrecke einem registrierten Laufzeitwert mit dem zugeordneten Wegwert entsprechen soll. Das Kriterium ist dann wieder der Vergleich der jeweiligen Verzögerungszeiten.

Der übersichtlicheren Rechnung halber wurden aus den in der Nähe des Grenzwinkels liegenden Winkelwerten im allgemeinen solche mit ganzzahligen Graden gewählt. Zu Beginn dieser Rechnungen sei noch bemerkt — was auch für die übrigen Rechnungen gilt —, daß die Minutengenauigkeit bei den Winkeln bzw. die Metergenauigkeit bei den Strecken eine reine Rechengenauigkeit bedeutet.

Die für die einzelnen Sprengungen geltenden Werte sind aus der Originalarbeit ersichtlich. Hier seien in Zusammenfassung zwei Sprengungen herausgegriffen.

Sprengung vom 25. 11. 25, 23.30 Uhr

$$\begin{array}{l}
 i_0 = 80^\circ, \quad t_{\text{ges}} = 30,32 \text{ sec}, \quad l = 9748 \text{ m} \\
 \quad \quad \quad t_N = 29,60 \text{ sec} \quad \Delta t = 0,62 \text{ sec} \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \Delta t_r \approx 0,60 \text{ sec} \\
 \\
 i_0 = 79^\circ, \quad t_{\text{ges}} = 27,40 \text{ sec} \quad l = 8822 \text{ m} \\
 \quad \quad \quad t_N = 26,79 \text{ sec} \quad \Delta t = 0,61 \text{ sec} \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \Delta t_r \approx 0,60 \text{ sec}
 \end{array}$$

Sprengung vom 15. 6. 27, 6.00 Uhr

$$\begin{array}{l}
 i_0 = 80^\circ \quad t_{\text{ges}} = 27,14 \text{ sec} \quad l = 9058 \text{ m} \\
 \quad \quad \quad t_N = 26,68 \text{ sec} \quad \Delta t = 0,46 \text{ sec} \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \Delta t_r \approx 0,45 \text{ sec} \\
 \\
 i_0 = 78^\circ 30' \quad t_{\text{ges}} = 23,48 \text{ sec} \quad l = 7816 \text{ m} \\
 \quad \quad \quad t_N = 23,02 \quad \Delta t = 0,46 \text{ sec} \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \Delta t_r \approx 0,45 \text{ sec} \\
 \\
 i_0 = 77^\circ \quad t_{\text{ges}} = 20,70 \text{ sec} \quad l = 6858 \text{ m} \\
 \quad \quad \quad t_N = 20,20 \text{ sec} \quad \Delta t = 0,50 \text{ sec} \\
 \quad \quad \quad \quad \quad \quad \Delta t_r \approx 0,45 \text{ sec}
 \end{array}$$

Es ergibt sich:

Zieht man Winkelwerte heran, die in der Nähe des jeweiligen Grenzwinkels liegen, dann ergibt sich ein Schallverlauf, der hinsichtlich Laufzeit und Schallweg (in Horizontalprojektion) im ganzen eine gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Registrierung liefert. Die zu Grunde liegende Annahme, daß ein Teil der Schallenergie in der Höhe maximaler Schallgeschwindigkeit zurückgeleitet wird, erklärt somit die anomalen Einsätze von der inneren Begrenzung der Zone zweiter Hörbarkeit an bis zur Station in der Entfernung E vom Sprengort.

7.) Zu einer im Rahmen der vorgegebenen Registrierungen vollständigen Untersuchung der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung gehört die Erörterung der Amplituden der anomalen Einsätze. Hier fällt an

allen drei Filmen auf (Abb. 2, Abb. 4, Abb. 6), daß die Amplituden im Gebiet zweiter Hörbarkeit, soweit es die Registrierungen erfassen, mit zunehmender Entfernung zunehmen. Diese überraschende Tatsache konnte bisher von keinem Autor, der sich mit dem Problem der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung befaßte, befriedigend erklärt werden. Bei R. Sandmann ist die Erklärung, wie gezeigt, widerspruchsvoll. K. Uller gibt ebenso wie O. v. Schmidt nur an, daß eine verhältnismäßig große Energie auf indirektem Weg transportiert wird. Nach T. Sakai müßte die Energie im zweiten Hörbarkeitsbereich sich laufend verringern. Die übrigen Verfasser haben sich zu diesem Problem nicht geäußert.

Von B. Gutenberg liegt ein Beitrag zur Frage der Amplitudenvergrößerung allerdings im Rahmen einer Arbeit über die anomale Schallausbreitung auf weite Entfernung vor (26). Er erklärt dabei die Intensitätszunahme durch eine Art „Brennlinienwirkung“ der Schallstrahlen am Erdboden. Eine nähere Erläuterung dazu sowie Anwendungen auf Sprengungen fehlen. Die Wirksamkeit der Brennlinie beruht offenbar nach B. Gutenberg darin, daß die an der Erdoberfläche reflektierten und die direkt beim Beobachter eintreffenden Wellen sich in ihrer Wirkung verstärken und damit eine Amplitudenvergrößerung hervorrufen. Eine nähere Betrachtung dieses Vorgangs führt bei dem vorliegenden Versuchsaufbau sofort zu Schwierigkeiten. Sieht man von einer möglichen Interferenzwirkung ab, die bekanntlich je nach Phasenverschiebung auch Schwächung bzw. Auslöschung zur Folge haben kann, so verbleiben die Schwierigkeiten, bedingt durch die Aufstellung der Mikrophone. Diese befanden sich nämlich nur wenige Dezimeter über dem Erdboden. Bei dieser Aufstellungshöhe ist aber an eine wirkungsvolle Verstärkung unter Zugrundelegung der Annahme von B. Gutenberg nicht zu denken.

Da die Energieverstärkung bei allen Versuchen in prinzipiell gleicher Weise, unabhängig von den sich unterscheidenden Versuchsdaten auftritt, liegt es nahe, auch die für alle anomalen Einsätze kennzeichnende Energierückleitung zur Erklärung heranzuziehen. Damit erhält man unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Arbeit von H. Blut folgende Lösung: Die unter relativ kleinem Winkel (bei den Versuchen zwischen 77° und 79°) abgehende Energie erfährt in der Höhe maximaler Schallgeschwindigkeit durch Abstrahlung nach oben eine verhältnismäßig starke Schwächung, so daß die davon herrührenden anomalen Einsätze noch recht kleine Amplituden aufweisen. Je mehr der Einfallswinkel in der Höhe sich dem Grenzwinkel nähert, um so größer wird der Energieanteil der zum Erdboden gelangenden Welle. Und zwar muß diese Amplitudenzunahme mit zunehmender Entfernung vom Sprengort ziemlich rasch erfolgen; die Filmregistrierungen (Abb. 2, Abb. 4, Abb. 6) bestätigen dieses. Ist vollends der Einfallswinkel in der Höhe gleich dem Grenzwinkel, dann kommt die gesamte Energie zur Erde zurück. Die Amplituden an den Registrierstellen nehmen nun ihren maximalen Wert an, denn mit zunehmender Entfernung wird zwar immer noch die gesamte Energie zurückgeleitet, jedoch macht sich der Energieverlust auf Grund zunehmender Distanz vom Sprengort bemerkbar. Die größten Ausschläge werden also in der Entfernung E vom Sprengort aufgezeichnet. Über die Lage dieser Stationen im Gebiet zweiter Hörbarkeit läßt sich soviel aussagen, daß sich diese näher der inneren als der äußeren Begrenzung der Zone anomaler Hörbarkeit befinden müssen.

8.) Betrachtet man die einzelnen Sprengversuche jeweils im Zusammenhang, so ergibt sich eine Gesamtdarstellung der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung, wie sie Abb. 13 schematisch wiedergibt.

Die Ordinate gibt dabei die Höhe über dem Erdboden, die Abszisse die Entfernung vom Sprengort O an.

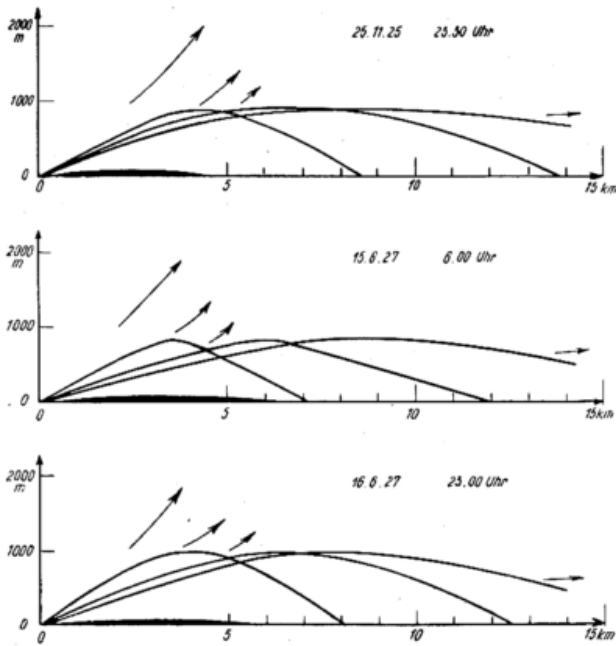


Abb. 13

Gesamtdarstellung der anomalen Schallausbreitung auf nahe Entfernung. Die sich verkürzenden Pfeile sollen die abnehmende Energieabstrahlung nach oben andeuten.

Die von einem Sprengpunkt von der Erdoberfläche ausgehenden Schallstrahlen werden in ihrer Ausbreitung in Gegenwindrichtung verfolgt. Der größte Teil der Energie geht durch Abstrahlung nach aufwärts in die freie Atmosphäre weg. Bei zunehmendem Abgangswinkel i_0 vergrößert sich derjenige Energieanteil, der bei seinem Einfall in der Höhe maximaler Ausbreitungsgeschwindigkeit zur Erde gelangt: Er wird dort registrierbar und bildet die innere Begrenzung der Zone anomaler Hörbarkeit. Bei weiter abnehmendem Abgangswinkel vergrößert sich dieser zur Erde zurückgeleitete Energieanteil sehr stark und erreicht sein Maximum, wenn die Schallwellen unter dem allein von der Geschwindigkeitsverteilung in dieser Höhe abhängigen Grenzwinkel einfallen. Betrachtet man weiter wachsende Abgangswinkel, so werden die Schallwellen, wie beim Grenzeinfall, in der Höhe maximaler Schallgeschwindigkeit vollständig zurückgeleitet, und bilden den äußeren Bereich der Zone zweiter Hörbarkeit, bis sie durch Energieschwächung infolge zunehmender Entfernung vom Sprengort verebben. Die Schallwellen, deren Abgangswinkel nahe bei 90° liegen, breiten sich, soweit sie nicht durch Bodenhindernisse verschluckt werden, längs der Erdoberfläche aus, werden dabei stark gedämpft und verebben so in nächster Entfernung vom Sprengort.

Zwischen den verschwindenden direkten und den einsetzenden anomalen Schallwellen liegt die Zone des Schweigens. Wie die Versuche zeigen, ist sie mehr oder weniger ausgeprägt, stets aber durch die Verzögerungszeit der anomalen gegenüber den direkten Einsätzen erkennbar.

Die Ausbildung der stillen Zone hängt vom Schallgeschwindigkeitsgradienten in den unteren Höhen ab. Vergleicht man die Schallgeschwindigkeitskurven mit der Schallgeschwindigkeitskurve Abb. 12 einerseits und die dazugehörigen Filme mit dem Film Abb. 11 andererseits, so erkennt man sofort, daß größere Zunahme der Schallgeschwindigkeit in den unteren 100 m

(steileres Gefälle der Kurve) eine Verkürzung der direkten Hörbarkeit zur Folge hat.

Daß die Ausbildung der Zone des Schweigens bei gleichen Wetterbedingungen von der Größe der Sprengladung abhängt, bedarf keiner weiteren Erwähnung. Es soll nur festgestellt werden, daß bei genügend großen Ladungen die stille Zone nicht beobachtet werden kann, da hier die direkten Einsätze, ausgeprägter wie in Abb. 2, bis in die Zone anomaler Hörbarkeit reichen.

Zum Teil zur Bestätigung der hier durchgeführten Berechnungen, zum Teil zur Klärung noch offener Fragen wären weitere Sprengungen kleiner Ladungen notwendig.

Literatur

- (1) Ladenburg, R., u. Angerer, F. v.: Über die Schallausbreitung in der freien Atmosphäre. Berlin 1918.
- (2) Ladenburg, R., u. Angerer, F. v.: Exp. Beiträge zur Ausbreitung des Schalles in der freien Atmosphäre. Ann. Phys. **66**, 239 (1921)
- (3) Kölzer, J.: Einfluß von Temperatur und Wind auf die Schallausbreitung in der freien Atmosphäre. Heerestechnik H. 8/11 (1923)
- (4) Kölzer, J.: Beobachtungsergebnisse über Schallausbreitung auf nahe Entfernungen. Abh. Preuß. Meteor. Inst. **10**, Nr. 1 (1932)
- (5) Kölzer, J.: Beitrag zur Schallausbreitung in der Atmosphäre. Z. Geophys. **4**, 5 (1928)
- (6) Sandmann, R.: Beiträge zur Schallfortpflanzung, insbes. zur Schallbeugung und anomalen Schallfortpflanzung. Gerlands Beitr. Geophys. **28**, 241 (1930)
- (7) Sandmann, R.: Beobachtungsergebnisse über den Einfluß der akustischen Umkehrschicht auf die Schallausbreitung. Z. Geophys. **10**, 200 (1934)
- (8) Sandmann, R.: Die Bedeutung der Unstetigkeiten im Verlauf der Schallgeschwindigkeit. Z. Geophys. **10**, 269 (1934)
- (9) Lord Rayleigh: Theorie of Sound... 1926.
- (10) Uller, K.: Die Entwicklung des Wellenbegriffes I. Gerlands Beitr. Geophys. **18**, 398 (1927)
- (11) Uller, K.: Die Entwicklung des Wellenbegriffes II. Gerlands Beitr. Geophys. **24**, 276 (1929)
- (12) Uller, K.: Die elektromagnetische Welleninduktion. Z. Phys. **8**, 89 (1921) u. **9**, 193 (1922)
- (13) Uller, K.: Die geführte elastische Zweimittelwelle. Z. Geophys. **4**, 259 (1928)
- (14) Fuhrich, J.: Kritik an K. Ullers 'Die Entdeckung des Wellenbegriffes'. Gerlands Beitr. Geophys. **52**, 229 (1938)
- (15) Schweikert, G.: Bemerkungen zu der Arbeit des Herrn K. Uller 'Tonerzeugung und empirischer Nachweis gebundener Deformationswellen'. Z. Physik **7**, 144 (1921)
- (16) Schmidt, O. v.: Ein neuer Weg der Schallstrahlen in der Atmosphäre. Luftwissensch. **7**, 382 (1940)
- (17) Schmidt, O. v.: Die wandernde Reflexion der Seismik als Analogon zur Kopfwellen der Ballistik. Z. Geophys. **12**, 199 (1936)
- (18) Haalck, H. M.: Lehrbuch der angewandten Geophysik. Berlin 1934.
- (19) Rutherford, H.: Reflexion Methods of Seismik Prospecting Techn. Publ. No. 486.

- (20) Gerecke, F.: Seism. Untersuchungen des Geophys. Inst. in Göttingen XI (1933)
- (21) Picht, J.: Die Energieströmung bei der Totalreflexion. Phys. Z. 30, 905 (1929)
- (22) Sakai, T. and Syono, S.: On the Propagation of sound waves in the atmosphere. Geophys. Mag. 8, 205 (1935)
- (23) Sakai, T.: A new theorie of the anomalous propagation of sound waves at a short distance. Proc. Phys.-Math. Soc. Japan 17, 240 (1935)
- (24) Schulze, G. A.: S.-A. aus Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939—46, Bd. 18 Geophys. Teil II.
- (25) Blut, H.: Ein Beitrag zur Theorie der Reflexion und Brechung elastischer Wellen an Unstetigkeitsflächen. Z. Geophys. 8, 306 (1932)
- (26) Gutenberg, B.: Über die Ausbreitung des Schalles in der freien Atmosphäre. Naturwiss. 14, 338 (1926)