Über Anwendungen des seismischen Verfahrens im Erdölbergbau und ihre wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Auswirkungen.

Von Dr.L.Mintrop,
ord.Professor an der Technischen Hochschule und der Universität Breslau.

Nachdem das seismische Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten seinen Einzug in alle Länder der Welt gehalten und auch in Grossdeutschland zur Entdeckung von Erdölfeldern geführt hat,gebe ich auf Wunsch der Schriftleitung im folgenden einen Überblick über die Entwicklung des Verfahrens und seiner wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Auswirkungen.

Das Verfahren beruht auf meiner im August 1919 gemachten Entdeckung von Wellen[1)] im Seismogramm (Abb. 1)einer künstlich,z.B.durch eine Sprengung (Abb.2 links) erzeugten Bodenerschütterung,die einen Teil ihres Weges zum Seismographen (Abb.3 und 2 rechts) durch die unter loserem Deckgebirgsschichten anstehenden festeren Gebirgsschichten genommen haben.(Abb.4).In dem Seismogramm der Abb.1,das in einer Entfernung von 1000 m vom Sprengpunkt aufgenommen worden ist, treten 2,570 s und 2,330 s vor dem Luftschall L zwei Bodenwellen B_1 und B_2 auf,während in dem an einem anderen Orte in der gleichen Sprengentfernung aufgezeichneten Seismogramm der Abb.5 nur eine Bodenwelle B vorhanden ist.Die Geschwindigkeit des Luftschalles ist im Falle der Abb. 1 zu 340,6 m/s ermittelt worden,sodass die Laufzeit der Luftwelle von der Sprengstelle zum Seismographen 1000 m : 340,6 m/s = 2,936 s und die Laufzeit der B_1-Welle 2,936 s - 2,570 s = 0,366 s ,die der B_2-Welle 2,936 s - 2,330 s (= 0,606 s) beträgt. Die B_1-Welle hat sich demnach mit einer durchschnitllichen Geschwindigkeit von 1000 m: 0,366s = 2732 m/s ,die B_2-Welle mit einer durchnittlichen Geschwindigkeit von 1000 m : 0,60 6 s = 1650 m/s fortgepflanzt. Nach dem Seismogramm der Abb. 5 ergibt sich die Laufzeit der B-Welle zu 3,068 -2,460 s = 0,608 s,was einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 1000 m: 0,608 s = 1645 m/s entspricht. Die Geschwindigkeiten der B_2-Welle in der Abb. 1 und der B -Welle in der Abb.5 stimmen demnach bis auf 5 m /s oder 0,3% überein,während die durchschnittliche Geschwindigkeit der B_1-Welle in der Abb. 1 um 1088m/s oder 66% höher liegt als die durchschnittliche Geschwindigkeit der B_2-Welle.

Die gute Übereinstimmung der Geschwindigkeiten der B_2-und der B- Wellen erklärt sich daraus,dass beide Seismogramme,Abb. 1 und

und Abb. 5 auf gleichen geologischen Schichten (diluvialen und jungtertiären Sanden und Tonen) aufgenommen worden sind. Wie erklärt sich aber das Auftreten der B_1-Welle in der Abb. 1?

Bei vergleichenden Studien an den von mir seit dem Jahre 1908 an verschiedenen Orten Deutschlands aufgenommenen Seismogrammen künstlich durch Sprengungen oder fallende Gewichte, erzeugter "Erdbeben", wobei ich in jedem einzelnen Falle die geologischen Aufschlüsse an der Beobachtungsstelle heranzog, kam mir der Gedanke, dass die B_1-Welle eine Tiefenwelle sein könnte. Eine an der Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Gebirgsschichten reflektierte Welle, deren mutmassliches Auftreten in Seismogrammen künstlicher Erdbeben ich im Jahre 1912 in einem Vortrage auf der Deutschen Naturforscher-Versammlung ausgesprochen hatte,[2] konnte die B_1-Welle nicht sein, da sie dann wegen des längeren Weges, den sie von der Sprengstelle zum Seismographen gegenüber der direkten Welle zurückzulegen hat (s. Abb. 4), nicht früher, sondern später als die B_2-Welle eintreffen müsste. Die Aufstellung von Laufzeitkurven auf Grund von in verschiedenen Sprengentfernungen aufgenommenen Seismogrammen brachte die Erkenntnis, dass die B_1-Welle dennoch aus der Tiefe kommt und einen Teil ihres Weges vom Sprengpunkt zum Seismographen durch eine unter dem lockeren Deckgebirge anstehende feste Gebirgsschicht genommen hat.

In der Abb. 6 sind die Laufzeitkurven der B_1-und der B_2-Wellen nach Messungen in den Sprengentfernungen 200, 400, 600, 800 und 1000 m über dem geologischen Profil dargestellt worden. Während die Laufzeitkurve der B_2-Welle im Nullpunkt der Sprengentfernung beginnt, schneidet die rückwärtige Verlängerung der B_1-Kurve die Zeitachse bei 0,07 s. Der Grund dafür liegt in dem in der Abb. 6 durch Pfeile bezeichneten Umwege, den die B_1-Welle (refraktierte oder indirekte Welle) gegenüber der B_2-Welle (direkte Welle) zu machen hat, um von der Sprengstelle zum Seismographen zu gelangen. Erst in der Sprengentfernung von 210 m kommen beide Wel-

len gleichzeitig am Beobachtungspunkte an und von dieser Entfernung (Knickentfernung in der Laufzeitkurve) an eilt die B_1-Welle der B_2-Welle immer mehr voraus, sodass sie in 1000 m Sprengentfernung bereits einen Vorsprung von 0,606 s - 0,366 s = 0,240 s hat. Aus den Laufzeitkurven ergeben sich die Geschwindigkeiten der B_1-und B_2-Wellen zu v_1= 3400 m/s bzw. v_2= 1650 m/s.

Die Tiefe der Grenzfläche zwischen dem Deckgebirge und der darunter anstehenden Schicht folgt aus der FORMEL von A.v.Schmidt im Jahre 1913 zur Berechnung der Herdtiefe von Erdbeben benutzten Formel:

$$T=0,5\ K\sqrt{\frac{v_2-v_1}{v_2+v_1}}$$

, worin K die Entfernung des Schnittpunktes der beiden Laufzeitkurven (Knickentfernung) ist, zu 62 m. In dieser Tiefe stehen unter diliuvialen und jungtertiären Sanden und Tonen unterdevonische Schiefer an, während das geologische Profil zu dem Seismogramm der Abb.5 und der Laufzeitkurve der Abb.7 bis mehrere Hundert Meter Tiefe nur Diluvium und Jungtertiär aufweist.

Bei der Berechnung der Tiefe ist angenommen worden, dass die Grenzfläche zwischen Deckgebirge und Tiefenschicht parallel zu der im vorliegenden Falle horizontalen Erdoberfläche verläuft. Im allgemeinen ist der Verlauf der Grenzfläche nicht bekannt, lässt sich jedoch durch geeignete Versuchsanordnungen, z.B. durch Vertauschen von Spreng- und Beobachtungspunkten (Schiessen und Gegenschiessen) ermitteln, wobei sich ausser den Wellengeschwindigkeiten und Tiefen auch die Neigung der Grenzfläche gegen die Erdoberfläche ergibt (s.Abb.22). Nach den aus den Laufzeitkurven ermittelten Wellengeschwindigkeiten kann bis zu einem gewissen Grade auf die Art der unter dem Deckgebirge anstehenden Gebirgsschichten geschlossen werden, insbesondere durch Vergleich mit den Ergebnissen gleichartiger Messungen über einem bereits bekannten geologischen Profil.

Die erste praktische Anwendung des Verfahrens im Erdölbergbau fand im ~~Herbst~~ September 1920 im norddeutschen Flachlande zwecks Aufsuchung einer erdölhöffigen Struktur statt, die bereits durch eine Anzahl Tiefbohrungen vergeblich gesucht worden war. Lage und Profile dieser Bohrungen sind mir indessen seinerzeit nicht bekannt gegeben worden, auch nicht die Tatsache ihres negativen Ergebnisses. Die Abb.8 zeigt die seismische Versuchsanordnung, wobei Spreng-und Beobachtungspunkte teils auf graden Linien (Linienschiessen), teils fächerförmig angeordnet sind (Fächer-oder Streuschiessen). Auf Grund von sogenannten Sammellaufzeitkurven, d.h. von kombinierten Laufzeitkurven vom Linien- und Fächerschiessen, habe ich am 11. September 1920 einen wenigstens 400 m tiefen Salzdom angegeben, dessen Achse beim Punkte h der Abb. 8 liegt und nach Nord-

Das Verfahren ermöglicht demnach von der Erdoberfläche aus einen weitgehenden Einblick in die stratigraphischen und tektonischen Verhältnisse des Untergrundes, zumal auch mehrere untereinander folgende Schichten festgestellt werden können.

westen hin verläuft. Die Abb.9 ~~zeigt~~ gibt eine solche Laufzeitkurve wieder, wie sie sich später als charakteristisch für tiefe Dome erwiesen hat (Abb. ~~30~~ 28 u. ~~35~~ 33). Der damalige Direktor des Geophysikalischen Instituts, ~~Geheimrat Professor~~ d. Universität Göttingen Dr. E. Wiechert, dem die Erdbebenforschung grundlegende Arbeiten über die Ausbreitung der Erdbebenwellen durch das Erdinnere verdankt[4/5], hat die Bitte des Auftraggebers um Überarbeitung meines Beobachtungsmaterials und um Stellungnahme zu meinen "ganz überraschend positiven Ergebnissen" mit Schreiben vom 16.10. 1920 beantwortet: " Die guten Unterlagen und die Umsicht meiner Arbeiten liessen ihn hoffen, dass die erste Probe günstige Ergebnisse bringen werde, indessen sei bei der Neuheit des Verfahrens einige Vorsicht am Platze." Später ist der Salzdom im Zuge der geophysikalischen Reichsaufnahme von der Seismos ~~mit meinem~~ Verfahren und unter Verwendung meines in der Abb. 3 dargestellten Seismographen Felds bestätigt worden. Nach Vornahme von seismischen Reflexionsmessungen der Seismos ~~mit~~ einer auf meine Veranlassung und mit meiner Förderung durch den Geophysiker Dr. Fr. Trappe ~~bei der Seismos~~ gebauten, für die Aufzeichnung von reflektierten Wellen besonders geeigneten Apparatur, ist über dem Salzdom mit der ersten Bohrung ein Erdölfeld erschlossen worden.

~~Nach~~ Untersuchungen an einem sehr bekannten ~~und gut aufgeschlossenen~~ flachen norddeutschen Salzhorst ~~habe~~ selbst und ich im Herbst 1920 noch die Ermittlung ~~die~~ der Lage eines durch zahlreiche Bohrungen verfolgten Salzhorstes, ebenfalls in Norddeutschland, ~~ermittelt~~ an. Die Abb. 10 gibt eine dabei gewonnene, für flache Dome charakteristische Laufzeitkurve wieder.

Bei den zuerst genannten Untersuchungen, die zu der Angabe eines tiefen Salzhorstes führten, habe ich auch an Tiefenschichten reflektierte Wellen benutzt. In dem Seismogramm der Abb. 1 ist der Weg der reflektierten Welle bei der geringen Tiefe der Grenzfläche zwischen dem Deckgebirge und der darunter anstehenden Gebirgsschicht von nur 62 m gegenüber einer Sprengentfernung von 1000 m nur 5m länger als der Weg der direkten, ~~an der Erdoberfläche entlang~~ im Deckgebirge gelaufenen Welle. Bei einer Wellengeschwindigkeit von 1650 m/s kommt die reflektierte Welle demnach nur 0,003 s später an als die direkte Welle, sodass die beiden Welleneinsätze im Seismogramm ~~um~~ nur 0,1 mm auseinander liegen und deshalb nicht von einander zu trennen sind. In den drei Seismogrammen der Abb. 11 treten die direkte Welle d und die reflektierte Welle R aber deutlich von einander getrennt auf. Ein Kriterium dafür, dass es sich bei R um reflektierte Wellen handelt, besteht in der Abnahme des Zeitunterschiedes zwischen dem Ein-

treffen dieser Welle und der direktem Welle mit zunehmender Sprengentfernung ,wie es die Laufzeitkurven der Abb.12 zeigen. Dagegen nimmt der Zeitunterschied zwischen der indirekten und der direkten Welle (B_1 und B_2 in der Abb. 1) mit wachsender Sprengentfernung zu, wie aus der Abb.6 ersichtlich ist.

Die Tiefe T der reflektierenden Schicht ergibt sich nach der Formel: $T = 0{,}5\, v \sqrt{t_R^2 - t_d^2}$,worin v die Geschwindigkeit der Deckgebirgswelle, t_R und t_d die Laufzeiten der reflektierten und der direkten Welle bedeuten. Während t_d und t_R dem Seismogramm entnommen werden können, liefert in günstigen Fällen die Laufzeitkurve der reflektierten Welle die Geschwindigkeit der letzteren nach der Formel:

$$v = \sqrt{\frac{e_2^2 - e_1^2}{t_{R_2}^2 - t_{R_1}^2}}$$

,worin e_1 und e_2 zwei Sprengentfernungen und t_{R_1} und t_{R_2} die Laufzeiten der reflektierten Wellen für diese Entfernungen bedeuten. Im allgemeinen muss indessen die Geschwindigkeit der reflektierten Welle aus Refraktionsmessungen oder durch Laufzeitmessungen in bereits niedergebrachten Bohrungen ermittelt werden. Die zu den in der Abb. 11 wiedergegebenen und weiteren Seismogrammen gehörigen Tiefen der reflektierenden Schicht sind mit der aus der unteren Laufzeitkurve der Abb. 12 entnommenen Geschwindigkeit v= 1650 m/s berechnet und in dem Reflexionsprofil der Abb.13 durch kleine wagerechte Striche bezeichnet worden. Die Tiefen ~~liegen zwischen~~ nehmen von Nord nach Süden hin von 200 ~~und~~ auf 235 m ~~mit einer geringen Zunahme nach nach Südwesten hin~~. Ausser diesen Reflexionen habe ich seinerzeit noch Reflexionen aus rd 400 m und 800 m Tiefe beobachtet und in dem Profil der Abb.14 zusammen mit den Reflexionen im 200 m-Horizont zur Darstellung gebracht. Die Abb. 15 ~~XXXXXX~~ gibt drei Seismogramme zu einem Fächer-Reflexionsschiessen wieder, dessen Anordnung aus der Abb.16 zu ersehen ist. Wesentlich bei der getroffenen Anordnung von Seismograph und Sprengungen ist die ungefähre Gleichheit der Länge der einzelnen Fächerstrahlen, weil dann, wenigstens bei der vorliegenden geringen Neigung der reflektierenden Grenzfläche gegen die Erdoberfläche, der Einfluss einer Geschwindigkeitszunahme mit der Tiefe für alle Strahlen ~~XXXXX

Während der ersten Anwendungen des Verfahrens bin ich durch meine damaligen Bochumer Mitarbeiter Ludwig Grube (†), Chefmechaniker der geophysikalischen Warten und Fr. Gries, Büroversteher der Kartenabteilung der Westfälischen Berggewerkschaftskasse tatkräftig unterstützt worden. Mit der am 4. April 1921 auf Anregung rheinisch-westfälischer Montankonzerne in Gemeinschaft mit mir erfolgten Gründung der Seismos, G.m.b.H in Hannover ging die Ausübung des Verfahrens auf zahlreiche Mitarbeiter: Bergingenieure, Markscheider, Geologen, Geophysiker, Seismologen und Feinmechaniker über die von mir in das Verfahren eingeführt wurden. Bis zum Jahre 1930 einschliesslich hat die Seismos unter meiner Leitung Untersuchungen in erdölführenden und erdölhöffigen Gebieten von Deutschland, Ägypten, Irak, Iran, Mexiko, Spanien und den Vereinigten Staaten von Nordamerika ausgeführt. Dabei ist mit rd 102 000 Seismogrammen eine Fläche von rd 200 000 qkm bei einer gesamten Profillänge von rd 240 000 km, d.i. das sechsfache des Erdumfanges, auf das Vorhandensein erdölhöffiger Strukturen abgetastet worden. In Deutschland hat die seismische Suche nach Salzdomen und anderen Strukturen seit der ersten Anwendung des Verfahrens im Jahre 1920 zu keiner Zeit geruht, wenngleich es Jahre gab, in denen das Interesse für geophysikalische Untersuchungen gering war. Bis zur Machtübernahme bildete den Höhepunkt der erzielten Erfolge die Entdeckung von zehn, z.T. sehr tiefen Salzdomen für die Aller-Schürfgesellschaft, einer Gründung der Gesellschafter der Seismos. Nachdem der im Jahre 1926 von dem Professor der Geologie an der Technischen Hochschule Berlin, Dr. Axel Born (†) aufgestellte Plan einer "Physikalischen Landes-Untergrundaufnahme" für Preussen im Jahre 1934 in der besonders von Professor Dr. O. Barsch bei der Preussischen Geologischen Landesanstalt, jetzt Reichsamt für Bodenforschung, betriebenen Form der "Geophysikalischen Reichsaufnahme" Wirklichkeit geworden war, eröffnete sich auch für das seismische Verfahren ein grosses Feld der Tätigkeit. Über die erzielten Ergebnisse ist in dieser Zeitschrift mehrfach berichtet worden, insbesondere von Professor Dr. A. Bentz und Dr. H. Closs in dem Barsch Heft.

Im folgenden wird die wirtschaftliche Auswirkung des Verfahrens im Erdölbergbau auf Grund seiner Anwendung in den Vereinigten Staaten von Nordamerika geschildert, wo sie am umfangreichsten war und wo die einzelnen Funde durch Mitteilungen in der amerikanischen Fachliteratur bekannt geworden sind. Die ersten Untersuchungen ~~fanden in der zweiten Hälfte des Jahres 1923~~ begannen im 2. Halbj. 1923 auf Anregung des bekannten holländischen Geologen Dr. W. A. J. Van Waterschoot Van der Gracht durch einen aus dem Obersteiger O. Weitersgen, dem Feinmechaniker G. Schwiening und mir be-

stehenden mit einem Feldseismographen (Abb.3)mit elektrischer Übertragung des Sprengmomentes ausgerüsteten Trupp der Seismos bei Ponca City in Oklahoma ~~sowie in Nordost-Texas statt~~ (s.Übersichtskarte der Abb. 17). ~~Der Trupp wurde im Laufe~~ Im Verlaufe der seismo-stratigraphischen Arbeiten wurde der Trupp Anfang November 1923 durch die Geologen Professor Dr.H,Salfeld als mein Vertreter, Dr.Georg Beck (†), den Seismologen Dr.K.Roepke und den Feinmechaniker Fr.Ermisch verstärkt und mit drei Feldseismographen versehen. Die Abb. 18 gibt zwei Seismogramme wieder, während die Abb. 19 und 20 Laufzeitkurven über mehreren, z.T. geneigten Grenzflächen zwischen verschiedenen Gebirgsschichten darstellen, die in Nordtexas aufgenommen wurden.

~~Im Frühjahr 1924 begann~~ Die Untersuchungen in dem grossen Salzdomgebiet von Texas und Louisiana. Die Abb.21 zeigt einige auf und an den bekannten 24 km südwestlich von Houston (s.Abb.17) in einer Teufe von kaum 50 m anstehenden Salzdom Blue Ridge gewonnene Laufzeitkurven über dem geologischen Profil. Die Abb.22 gibt zwei auf dem Punkte A aufgenommene Seismogramme dazu wieder, von denen das obere in 600 m Entfernung von dem südwärts von A ausserhalb des Domes, das untere in der gleichen Entfernung von der nordwärts von A auf dem Salzdom vorgenommenen Sprengung herrührt. Der Unterschied der Laufzeiten der ersten Bodenwellen ergibt zu 0,15 s und die Geschwindigkeit der Wellen im jungtertiären Deckgebirge zu 1800m/s, im Salzhorst zu 5000 m/s. Zur genaueren Ermittlung der Wellengeschwindigkeit in dem Gypshut bzw. cap rock sind gelegentlich der Abgrenzung des Blue-Ridge benachbarten Boling-Salzdomes die in der Abb.23 dargestellten Laufzeitkurven durch Schiessen und Gegenschiessen aufgestellt worden.

Nach diesem "Einschiessen" des aus dem Seismologen Dr.O.Geussenhainer, dem Chefmechaniker P.Liebrecht und dem technischen Assistenten Fr.Röltgen bestehenden, mit einem Feldseismographen (Abb.3) ausgerüsteten Trupp erfolgte bald die Entdeckung des ersten unbekannten Salzdomes. Die Abb. 24 enthält den Lageplan der bei Orchard, 60 km südwestlich von Houston gelegenen Moore Ranch (Brazos River Ranch) mit dem Schusslinienplan und dem neu entdeckten Salzdom. Laufzeitmessungen auf dem Punkte A ergaben in den Linien 1,2 und 3, von denen die erste zwei alte, dem Trupp nicht bekannt gegebene, im Tertiär steckengebliebene Tiefbohrungen enthält, eine schwach nach Nordosten hin ansteigende Grenzfläche in durchschnittlich 400 m Tiefe mit ~~beobachteten~~ Geschwindigkeiten von 2300-2600m/s (Abb.25) Dagegen wies die in der südwestlichen Ecke des Konzessionsgebietes vom Punkte B aus nach Südsüdost abgesprengte Linie 4 eine der am Salzdom von Blue Ridge vom Punkte B aus nach Süden hin gewonnenen Laufzeitkurve (Abb.23) ähnliche Kurve auf, die in der Abb.26 wiedergegeben ist. Da noch mehrere andere abgesprengte Linien gleichartige Laufzeitkurven ergaben, sprach

der Trupp den auf diese Weise gefundenen verdeckten Gesteinskörper als Salzdom an. Am 20.9.1924 haben Dr.Geussenhainer und ich den in dem Lageplan der Abb.26 mit K bezeichneten Bohrpunkt angegeben, nachdem wir vorher zur Sicherung gegen Überraschungen noch die kurzen Profillinien 12 und 13 untersucht und in ihnen den Salzdom ebenfalls festgestellt hatten. Am 19.11.1924 traf die bis 375 ' = 114m Teufe niedergebrachte Bohrung J.Moore No 1 den cap rock (Gypshut) in der von Geussenhainer und mir vorausgesagten Tiefe von 350 ' = 103 m an.[9/10] Zwei Jahre später ist an der Ostflanke des Domes in 3759 ' = 1150 m Teufe durch eine Bohrung mit einer Tagesproduktion von 2800 barrels = 400 Tonnen ein Erdölfeld erschlossen worden.[10] Soweit die Geschichte der ersten seismischen Entdeckung einer erdölführenden Struktur in U.S.A.

Es würde zu weit führen, alle nachfolgenden Entdeckungen zu schildern. Ein kurzer Überblick über die weitere Entwicklung in diesem Erdölgebiet erscheint indessen angebracht. Im gleichen Jahre 1924 ist durch einen andern Trupp der Seismos unter Leitung der Geologen Dr.C.Schmidt und Dr.E.Cloos noch der ebenfalls flache Salzdom Long Point, 56 km südwestlich von Houston, seismisch festgestellt worden an einer Stelle, die von der deutschen Gesellschaft Exploration auf Grund von Drehwaagemessungen als domverdächtig bezeichnet worden war.

Das Jahr 1925 brachte die seismische Entdeckung der flachen Salzdome Fanette, 100km östlich und Hawkinsville, 100 km südsüdwestlich von Houston durch den Seismologen Dr.O.Geussenhainer, den Geologen Dr.W. Heise und den Markscheider Dr.W.Kolb der Seismos, sowie Starks, 40 km westlich von Lakes Charles in Louisiana durch Heise und Kolb. Sämtliche Funde sind durch Bohrungen bestätigt worden.[11]

Einen grossen Auftrieb erhielten die Untersuchungen als es der Seismos im folgenden Jahre gelang, neben der Entdeckung einer Anzahl flacher Salzdome auch die ersten bis mehrere Tausend Meter tiefen Dome zu finden. Ein mitteltiefer Salzdom, White Castle (cap rock bei 1810 ' = 550m) im östlichen Louisiana, ist von dem Geophysiker Dr.Fr.Trappe und dem Markscheider R.Hanning gefunden worden. Im März 1926 berichteten Markscheider Dr.O.Rellensmann und Seismologe Dr.K.Roepke die Entdeckung des 18 km östlich von Lakes Charles anstehenden sehr tiefen Iowa-Dom, über dem fünf Jahre später in rd 2100 m Tiefe ein Erdölfeld erschlossen worden ist.[12] Rellensmann und der Seismologe Dr.W.Meyer fanden am 22.9.1926 am Westufer des Calcasieu Sees, 25 km südsüdwestlich von Lake Charles den rd 1000 m tiefen Salzdom East Hackberry, auch Kelso Bayou genannt.[13] Mit Rücksicht darauf, dass zur Feststellung und Abgrenzung dieses Domes neben den Refraktions- auch Reflexionsmessungen ausgeführt sind ~~wertung~~

wertung der Refraktionen das sogenannte Wellenfrontenverfahren [15)] zur Anwendung gelangt ist, sei auf diese Entdeckung etwas näher eingegangen. Die Abb. 29 enthält einen Teil des in dem betreffenden Gebiete durchgeführten Schusslinienplanes sowie die Fundbohrung Caldwell No 1. Aus der Sammellaufzeitkurve der Abb. 28 ist der Einfluss des Domes auf der Vorreilung der indirekten Welle zu erkennen, am deutlichsten beim Punkte B_{10}. Vor der Angabe des Bohrpunktes ist das Beobachtungsmaterial auch von dem Geophysiker Professor Dr. E. A. Ansel an Ort und Stelle durchgearbeitet worden. Ansel hatte bereits meine Reflexionsmessungen in Deutschland aus dem Jahre 1920 ausgewertet und am 17.3.1922 einen schriftlichen Bericht darüber an die Seismos erstattet. In der Abb. 29 ist ein an dem East Hackberry-Dom aufgenommenes Reflexionsseismogramm wiedergegeben, in dem zur Erleichterung der Identifizierung der Einsätze der verschiedenen Wellen die Schwingungen von drei nebeneinander aufgestellten Seismometern verzeichnet sind. Die Übertragung des Schussmomentes erfolgte durch drahtlose Wellen. In der Abb. 30 ist das Wellenfrontenverfahren dargestellt, nach dem sich Tiefe und Form des verdeckten Gebirgskörpers ermitteln lassen. Die gute Übereinstimmung der seismisch festgestellten Lage und Tiefe des Domes ist aus den Abb. 31 und 32 zu ersehen, die ein Querprofil durch die Südflanke des Salzdomes und einen Lageplan von dem südlichen Teile des an und über dem Dom erschlossenen Erdölfeldes nach A. J. Bauernschmidt [15)16)] wiedergeben. Die erste im Mai 1927 auf Grund der seismischen Feststellungen angesetzte Bohrung, Caldwell No 1, erbrachte am 18.8.1927 einen heftigen mit Kraterbildung verbundenen Gasausbruch aus 4016 ' = 1220 m Tiefe. In der zweiten Bohrung, Caldwell No 2, wurde am 7.11.1927 in 3973 ' = 1205 m Teufe eine Tagesproduktion von 800 barrels = 114 Tonnen Erdöl erzielt. [15)]

Soweit die Geschichte der Entdeckung und Erschliessung des ersten tiefen Salzdomes in U.S.A.

In der einschlägigen Literatur wird irrtümlicherweise der 34 km südwestlich von Houston in der Nähe des bereits erwähnten flachen Salzdomes Blue Ridge anstehende Sugarland-Dom als der erste geophysikalisch entdeckte bzw. überhaupt bekannt gewordene tiefe Salzdom bezeichnet. Seine Auffindung erfolgte im Jahre 1927 durch Drehwaagemessungen der deutschen Gesellschaft Exploration. Im gleichen Jahre stellte von Markscheider Dr. W. Kolb geführter Trupp der Seismos den Dom durch Refraktionsmessungen fest. [16)17)] Die Abb. 33 enthält die von Kolb aufgestellte Sammellaufzeitkurve, die Abb. 34 ein von W. B. Carter und P. H. O. Bannon [18)] entworfenes Querprofil nach der in dem darunter dargestellten Grundriss angegebenen Linie A-B. Die erste Bohrung, Sugarland Industries No 1, ist am 27.3.1928, sieben bzw. fünf Monate nach der Erschliessung des East Hackberry-

Salzdomes, in 3561 ` = 1087 m Teufe mit ebenfalls 800 barrels = 114 Tonnen Erdöl fündig geworden. Bald darauf wurde auch das Salz bzw. cap rock in dem von Kolb vorausgesagten Tiefenbereich von 3000 - 3500 ` = 915-1070 m ~~900-1100~~ m angebohrt.[18]

Insgesamt sind von der Seismos bis Mitte 1930 an der Golfküste 22 Salzdome und zahlreiche Aufwölbungen in den Deckgebirgschichten gefunden worden. Nach einer Mitteilung an mich vom 23.10.1924 vermutete Dr. Van Waterschoot Van der Gracht schon damals unter diesen seismischen Hochgebieten sehr tiefe Salzdome. Die deutschen Geologen, Professor Dr. J. Weigelt und Professor Dr. W. Klüpfel fanden als damalige Truppführer der Seismos in den Jahren 1924 und 1925 mehrere solche Aufwölbungen, unter denen sie ebenfalls tiefe Salzdome annahmen. Die überwiegende Zahl der von der Seismos gefundenen Hochgebiete hat sich bei den späteren Aufschlussbohrungen, denen eingehende Reflexionsmessungen der Amerikaner vorausgegangen sind, als erdölführend erwiesen. In mehreren Fällen ist auch das Salz durch Bohrungen erreicht worden.

Zur Ermittlung seismischer Hochgebiete haben die Truppführer der Seismos, die Seismologen Dr. Fr. Gerecke, Dr. A. Ramspeck und Dr. W. Meyer unter gleichzeitiger Verwendung von fünf Feldseismographen der Abb. 3 im inneren Salzdom-Gebiet von Nordost-Texas sowie in den Erdgasgebieten von Südwest-Texas Pläne mit Linien gleicher Laufzeit (Isochronen) der indirekten Welle für zwei konstant gehaltener Entfernungen, sogenannte Laufzeitpläne, aufgestellt. Bei diesen Arbeiten, die unter der Gruppenleitung von Dr. Fr. Trappe vor sich gingen, sind auch einige Salzdome gefunden worden. Als Abschluss der Arbeiten der Seismos hat Trappe im Jahre 1930 für weite Gebiete der Golfküste solche Isochronen entworfen. Über Wesen und geologische Bedeutung von Laufzeitplänen sowie ihre Verwendung bei der Deutung refraktionsseismischer Messungen im Zuge der geophysikalischen Reichsaufnahme hat Professor Dr. H. Reich in dieser Zeitschrift berichtet.[19] ~~20~~ 18/19

Während das seismische Verfahren in den ersten Jahren ausschliesslich in deutschen Händen lag, traten vom Jahre 1926 an in steigendem Umfange die Amerikaner auf den Plan. Ihr erster Erfolg war die Entdeckung des (65 km östlich von Houston anstehenden) flachen (650 ` = 198 m) tiefen Salzdomes Moss Bluff,[18] dem bald zahlreiche andere folgten. Vom Jahre 1927 ab erzielten die Amerikaner in Oklahoma unter günstigen geologischen Verhältnissen die ersten brauchbaren Ergebnisse mit Reflexionsmessungen, die schnell auf einen hohen technischen Stand gebracht wurden und vom Jahre 1931 ab auch an der Golfküste von steigendem Erfolge begleitet waren.[20] ~~21~~ ~~22~~ Die dabei ~~verwendete Versuchsanordnung~~ benutzte Seismographen ist aus dem schematischen Profil der Abb. 3 zu ersehen, in dem entlang einer geraden Linie an der Erdoberfläche in gleichen

Abständen von einander eine Anzahl elektrischer Seismometer (Geophone) und an den Enden der Linie zwei Schussbohrlöcher angebracht sind. Die Sprengungen erfolgen auf der Sohle dieser Löcher zwecks besserer Ausnutzung der Sprengenergie und zur tunlichen Vermeidung der Überlagerung der reflektierten Wellen durch die bei einer Sprengung an der Erdoberfläche auftretenden starken Schwingungen in der losen Deckschicht. Die Aufnahme der Seismogramme geschieht an einer Zentralstelle auf elektro-photographischem Wege. Die Abb. 36 gibt neben Zeitmarken im Abstande von je 0,01 s Aufzeichnungen der Schwingungen von sechs in gleichen Abständen von je 135 `= 40m zwischen 40 und 240 m Entfernung von einem 53 `= 16 m tiefen Schussbohrloch aufgestellten Geophonen wieder. Die Sprengladung betrug 3/4 lbs = 350 Gramm. Während in der ersten halben Sekunde die direkten Wellen das Bild vollständig beherrschen, treten nach ihrem Abklingen sehr deutlich reflektierte Wellen hervor, deren Laufzeiten von 0,545 s in der Entfernung 133` auf 0,555 s in 800 `Entfernung anwächst. Die Verbindungslinie der einzelnen Einsätze stellt die Laufzeitkurve der reflektierten Welle dar, während die Verbindungslinie der Einsätze der direkten Welle, die ~~bei~~ 0,023 s bis 0,095 s ~~liegen, die Laufzeitkurve dieser Welle ergibt~~ mit den Schlußmarken abfällt. Aus der Neigung der Laufzeitkurve der direkten Welle gegen die Abszissenschse (in dem Seismogramm senkrecht zur Zeitachse ~~vertikal~~) ergibt sich die Geschwindigkeit dieser Welle, während die Neigung der Laufzeitkurve der reflektierten Welle gegen die Abszissenachse in Beziehung zur Neigung der reflektierenden Schicht gegen die Erdoberfläche steht.

In dem gleichfalls sechsfachen Reflexionsseismogramm der Abb. 37 treten nacheinander 12 Reflexionen aus Tiefen von 10 235 `bis 15 450 = 3100 -4700 m auf. Davon sind fünf als gut, drei als ziemlich gut und vier als schwach zu bezeichnen. Im Laufe der Zeit ist die Anzahl der auf einem Papierstreifen registrierten Seismogramme noch vervielfältigt worden. Die Abb. 38 gewährt einen Blick in einen Registrierwagen und die Abb. 39 zeigt den Wagenpark eines amerikanischen seismischen Trupps. Über die Entwicklung und den Stand der Technik der Reflexionsseismik in Deutschland haben Dr. Fr. Trappe[23)25)26)] und Dr. H. Lückerath[27)] in dieser Zeitschrift u.a.a.O. berichtet.

Der grosse Umfang der Anwendung des seismischen Verfahrens in U.S.A. geht aus der Übersichtskarte der Abb. 17 hervor.[30)29)] Bis Mitte 1940 sind die in der Karte schraffierten Gebiete von 1,7 Millionen qkm abgesprengt worden, zum Teil nach Massgabe der technischen Vervollkommnung von ~~Verfahren und Geräten~~, der Erweiterung der Erkenntnisse über die Erdölhöffigkeit in grösseren Tiefen und nicht zuletzt der wachsenden Tiefenreichweite der Bohreinrichtungen in mehrfacher Wiederholung, sodass die Gesamtzahl der untersuchten Quadratkilometer für die Leistungsfähigkeit des Reflexionsschiessens liefert das Profil der Abb. 42 ein Beispiel.[28)]

drei Millionen beträgt. B.B.Weatherby[30] beziffert die für die seismischen Arbeiten aufgewendeten Kosten auf 175-200 Millionen Dollars und schätzt die in den dabei gefundenen verdeckten geologischen Strukturen anstehenden Erdölmengen auf 700 Millionen Tonnen.

Der grundsätzliche Wandel in der Suche nach Erdölfeldern, der sich seit der Einführung der Geophysik, insbesondere auch der Seismik vollzogen hat, ist am deutlichsten aus der die Golfküste von Texas und Louisiana betreffenden graphischen Darstellung der Abb. 41 zu ersehen, die vom Jahre 1924 ab ein Heraufschnellen der entdeckten erdölhöffigen Strukturen zeigt. Die Entdeckung des ersten Salzdom-Erdölfeldes in U.S.A., Spindletop in Südost-Texas im Jahre 1901 erfolgte durch den aus Deutschland stammenden Geologen Dr. A.F.Lucas, der die geologische Untersuchung der Golfküste sehr stark förderte.*) Mit der Erschöpfung der geologischen Möglichkeiten über dem durch mächtige Deckgebirgsschichten abgeblendeten Untergrunde trat ein fast 20-jähriger Stillstand in der Auffindung weiterer Salzdome ein.[31] Nach W.F.Henniger[32] sind von 1917-1924 mit einem Kostenaufwand von 20 Millionen Dollars 675 Suchbohrungen nach unbekannten Salzdomen ausgeführt worden, wobei indessen nur ein Dom gefunden worden ist. Diesem einen Salzdom in 7 Jahren stehen nach einer in dieser Zeitschrift erschienenen Aufstellung von Dr.St.v.Thyssen-Bornemisza[33], die im wesentlichen auf Mitteilungen von World Petroleum[34] beruht, 159 in den 15 Jahren von 1924-1939 allein an der Golfküste geophysikalisch entdeckte Dome gegenüber, was einem Verhältnis von 70 : 1 entspricht. Bis zum Jahre 1939 waren an 120 dieser geologischen Strukturen Erdölfelder mit einer Produktion von 65 Millionen Tonnen erschlossen worden. 71 Dome sind allein durch das seismische Verfahren festgestellt worden, an der Ermittlung weiterer 55 Strukturen ist das Verfahren beteiligt gewesen.

Die Auffindung der an den geophysikalisch entdeckten Domen vorhandenen Erdöllagerstätten ist durch das seismische Verfahren dadurch sehr gefördert worden, dass vor dem Beginn der Aufschlussbohrungen an flachen Domen die Flanken festgelegt und auf ihre Beschaffenheit untersucht, bei tiefen Domen die zur Konstruktion von Tiefenkurven auf seismischen Leithorizonten im Deckgebirge erforderlichen Teufen ermittelt worden sind. Ein Beispiel dafür bringen die Abb.43 und 44, von denen erstere ein Reflexionsprofil über dem im Jahre 1926 von der Seismos durch Refraktionsmessungen entdeckten Iowa-Dom und letztere die auf Grund mehrerer Profilaufnahmen vor der Inangriffnahme der Aufschlussbohrungen konstruierten Tiefenkurven sowie die niedergebrachten Bohrungen enthält.[35] Von den 60 Bohrungen sind 54 produktiv, von den 6 nicht produktiven Bohrungen stehen 4 am

Fussnote: *) (Oel u.Kohle, 37.Jahrg.1941, S.742.).

äusseren Rande der seismisch ermittelten Aufwölbung der Deckgebirgsschichten. In zahlreichen Fällen ist an solchen "bohrreif" gemachten Domen die erste abgeteufte Bohrung erdölfündig geworden, erstmalig im Jahre 1927 am East Hackberry-(Kelso-/Bayou-)Dom in Louisiana.[13)15)]

Eine umfangreiche technisch-wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens findet in der seismischen Baugrunduntersuchung statt, die im Jahre 1908 von mir am geophysikalischen Institut in Göttingen mit der photographischen Aufzeichnung und der harmonischen Analyse von periodischen durch den Erdboden fortgespflanzten Maschinenschwingungen sowie die Ermittlung der Abnahme der Amplitude der Schwingungen mit zunehmender Entfernung von der Maschine in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des geologischen Untergrundes begonnen[37)] und in Bochum fortgesetzt worden ist[36)]. Später ist die Göttinger Tradition auf ~~diesem Gebiete~~ von G. Angenheister wieder aufgenommen und in Gemeinschaft mit der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik von Geheimrat Professor Dr. Hartwig geleitet an der Technischen Hochschule Berlin als eine der Grundlagen einer grosszügigen dynamischen Baugrunduntersuchung ~~benutzt~~ verwendet worden[36)], ~~nachdem meine Entdeckung der auch bei periodischen Schwingungen auftretenden Grenzwelle (Abb. 4 u. 6) die Untersuchung mehrrer untereinander liegender Bodenschichten von der Erdoberfläche aus ermöglicht hatte.~~[42)] R. Köhler und A. Ramspeck[40)] haben die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, Phasengeschwindigkeit, der periodischen Wellen an Hand von über verschiedenem geologischen Untergrund aufgenommenen Laufzeitkurven ermittelt,[37)] die sich ~~wie die bei der ebenfalls benutzten sprengseismischen Wellen~~ als ein brauchbares Mass für die Geschwindigkeit Tragfähigkeit der Bodenschichten erwiesen hat.[41)] Die zuerst von der Seismos betriebene technisch-wirtschaftliche Anwendung der seismischen Baugrunduntersuchung ist im Jahre 1937 auf die Baugrund-G.m.b.H. in Berlin-Dahlem übergegangen, die sie in grossem Umfange zur Anwendung bringt.

Zu der wirtschaftlichen Auswirkung des seismischen Verfahrens gehört auch die von Erfolg begleitete Verwertung der Patente auf Verfahren[42)] und Geräte[43)], die mir in allen 30 Ländern, in denen ich sie angemeldet habe, erteilt worden sind-mit Ausnahme des Verfahrenpatentes in England.[44)]

Zu der wirtschaftlichen Auswirkung des seismischen Verfahrens gehört auch die namentlich in U.S.A. erfolgreiche Verwertung der von deutschen Wissenschaftlern zehn Jahre lang, letzten Endes vergeblich, bekämpften Patente[52)], die mir in allen 30 Ländern, in denen ich sie seinerzeit angemeldet habe, auch erteilt worden sind -mit Ausnahme in England.[49)]

äusseren Rande der seismisch ermittelten Aufwölbung der Deckgebirgsschichten. In zahlreichen Fällen ist an solchen "bohrreif" gemachten Domen die erste abgeteufte Bohrung erdölfündig geworden, erstmalig im Jahre 1927 am East-Hackberry-(Kelso Bayou-)Dom in Louisiana.[14)16) 13) 15)]

Ein umfangreiche technisch-wirtschaftliche Anwendung des Verfahrens findet in der seismischen Baugrunduntersuchung statt, die im Jahre 1908 am geophysikalischen Institut in Göttingen von mir mit der photographischen Aufzeichnung und der harmonischen Analyse von periodischen durch den Erdboden fortgepflanzten Maschinenschwingungen sowie der Ermittlung der Abnahme der Amplitude der Schwingungen mit zunahmender Entfernung von der Maschine und in Abhängigkeit von dem geologischen Untergrund begonnen worden ist.[35)39)] Später hat R. Köhler und A. Ramspeck die Ausbreitungsgeschwindigkeit periodischer Schwingungen ~~der gleichen Maschinenschwingungen~~ ermittelt,[36) 37) 40)] die sich nach R. Köhler als ein brauchbares Mass für die Tragfähigkeit der obersten Bodenschichten erwiesen hat.[33) 41)] Die zuerst von der Seismos unter Verwendung ~~der Sprengseismik nach~~ auch für geistliche meinem Laufzeitkurven-Verfahren sowie der Schwingmaschinen der Firma Losenhausen in Düsseldorf für die Erregung periodischer Schwingungen entwickelten seismischen Baugrunduntersuchungen sind von der Baugrund G.m.b.H. in Berlin -Dahlem übernommen worden, die sie in grossem Umfange betreibt.

Zu der wirtschaftlichen Auswirkung des seismischen Verfahrens gehört auch die von Erfolg begleitete Verwertung der Patente auf Verfahren[38)] und Geräte,[39)] die mir in allen dreissig Ländern, in denen ich sie angemeldet habe, erteilt worden sind -mit Ausnahme des Verfahrenpatentes in England.[38) 40)]

Die wissenschaftliche Auswirkung der Entdeckung der Grenzwelle (Tiefe welle B_1 in der Abb. 1) sowie der reflektierten Welle (Abb.11) und ihrer Nutzbarmachung für die Erforschung des geologischen Untergrundes bis zu den durch Bohrungen erreichbaren Tiefen sei an einigen Beispielen erläutert. E. Wiechert[4)] und seine Schule waren in den Jahren 1907-1919 auf Grund ihrer Studien über die Ausbreitung der ~~vom Herde natürlicher~~ Erdbeben herkommenden elastischen Wellen zu dem Ergebnis gelangt, dass die Erde aus konzentrischen Kugelschalen aufgebaut sei. Die Tiefen der Grenzflächen zwischen den einzelnen Schalen werden zu etwa 1200, 1700 und 2900 km angegeben. Nachdem es A. Mohorovicic[42) 45) 47)] im Jahre 1909 gelungen war, an Laufzeitkurven zu Erdbebenregistrierungen in Entfernungen von 39-2547 km eine seismische Grenzfläche in rd 50 km Tiefe festzustellen, an der die Geschwindigkeit der longitudinalen Tiefenwelle von 5,6km/sauf 7,8 km /s springt ergab sich im wesentlichen das in der Abb. 4 dargestellte Bild von dem

kugelschalenförmigen Aufbau des Erdinnern.

Meine und der Seismos Erfolge mit künstlichen Erdbeben veranlassten E. Wiechert im Jahre 1922 zur Wiederaufnahme seiner alten Idee, die Tiefenlage des Magmas seismisch zu ermitteln, wobei Sprengentfernungen von 10 bis 1000 km vorgesehen wurden. Nach einer in Begleitung des Göttinger Geologen Professor Dr. H. Stille vorgenommenen Besichtigung meiner seismischen Felda Arbeiten suchte Wiechert mich am 21.10.1921 in Hannover auf, entwickelte seinen Plan und erbat die Unterstützung seiner Arbeiten. Die Seismos und ich haben den Plan durch Mitteilung von Erfahrungen, Bereitstellung von Feldseismographen (Abb.3) sowie durch Zuwendung von Geldmitteln gefördert. Nach einem Schreiben von Wiechert's Mitarbeiter Professor Dr. G. Angenheister an mich vom 15.9.1926 ist durch die Beihilfe der Seismos für den Bau des neuen Erdbebenhauses die wichtigste Vorbedingung für die Weiterentwicklung der sprengseismischen Arbeiten ~~in Göttingen geschaffen worden. Wiechert erbat im Jahre 1924 zur Unterstützung seiner Anträge um Bewilligung von Staatsmitteln für das Göttinger Geophysikalische Institut von der Seismos Belege~~ über tatsächliche Erfolge für die deutsche Wirtschaft.

Über die Ergebnisse der Göttinger sprengseismischen Untersuchungen hat E. Wiechert selbst mehrfach berichtet, nach seinem Tode ~~zusammen~~fassend sein Mitarbeiter Dr. B. Brockamp, der folgendes Bild von der Gliederung der äussersten Erdrinde entwirft: " Bis zu einer Tiefe von 2-3 km beteiligt sich Deckgebirge (P_1-Schicht) mit örtlich variierender Wellengeschwindigkeit (1,7-5,6 km/s) und Mächtigkeit am Aufbau. Unter dem Deckgebirge beginnt die P_2-Schicht mit einer mitteleren Geschwindigkeit von 5,9 km/s. Ihre Mächtigkeit beträgt zwischen 5 und 7 km. Unterlagert ist die P_2-Schicht von der P_3-Schicht, deren Geschwindigkeit 6,7 km/ s beträgt. Die P_2-Schicht wird als varistisches Grundgebirge gedeutet, ihre untere Grenze fällt von Göttingen aus nach Süden bis auf 12 km Tiefe ab und steigt nach SW und SO auf 7,5 km an."

Die Abb. 46 bringt den ersten Teil der von Wiechert's Nachfolger, G. Angenheister bis zu einer Sprengentfernung von 230 km aufgestellten Laufzeitkurven. Ich habe das Profil darunter gezeichnet und dabei von der ~~geringfügigen~~ im allgemeinen Neigung der Grenzflächen gegen die Erdoberfläche abgesehen. ~~Auch~~ Die Erdkrümmung tritt bei dem kleinen Maasstab der Zeichnung nicht in die Erscheinung. Ein Vergleich der Abb. 46 mit den Abb. 6, 21 und 22 zeigt, dass die Schichtung der äussersten Erdrinde, wie sie in der Nähe der Erdoberfläche beobachtet wird, im grossen und ganzen auch nach der Tiefe zu anhält. Wenn das von Wiechert in seinem Schreiben an mich vom 20.10.1924 bezeichnete Hauptziel, die sprengseismische Erforschung der Erdrinde bis zu 150 km Tiefe, auch bei weitem nicht erreicht worden ist, so sind doch schon wertvolle Anhaltspunkte für die Beurteilung der Art und Lagerung der für Bohrungen nicht

mehr zugänglichen Tiefenschichten gewonnen worden. Auch die bei den Fernsprengungen gleichzeitig mit der seismischen Aufnahme der Bodenwellen erfolgte Registrierung des Luftschalles hat zu bemerkenswerten Ergebnissen der Schallausbreitung bis zu Höhen von etwa 40 km geführt. Hierüber berichtet u.a. G.Angenheister.

Ein weiteres Beispiel für die Auswirkung des seismischen Verfahrens auf Aufgaben der reinen Wissenschaft bieten die vom Göttinger geophysikalischen Institut ausgegangenen seismischen Messungen der Dicke von Alpengletschern sowie der Mächtigkeit des Grönlandeises. Die ersten seismischen Messungen auf Eis fanden im Winter 1922/23 auf zugefrorenen Seen im Erzgebiet von Boliden in Nordschweden durch einen aus dem Seismologen Dr.K.Roepke, dem Obersteiger O.Weitershagen und mir bestehenden Trupp der Seismos statt. Die Abb.46 und 47 bringen ein Seismogramm und Laufzeitkurven dazu. In dem Seismogramm bedeuten L die longitudinale (Schall-)Welle, T die transversale (Scheerungs-)Welle im Eis und W die longitudinale (Schall-)Welle im Wasser, während die Luftwelle auf dem Seismogramm nicht mehr erscheint. Die Wellengeschwindigkeiten ergeben sich aus dem Seismogramm bzw. den Laufzeitkurven zu 3400 m/s, 1800 m/s und 1500 m/ s. Diese Messungen, deren Ergebnisse ich Wiechert seinerzeit zur Verfügung gestellt habe, waren der Ausgangspunkt für die ersten von Dr.A.Mothes im Jahre 1926 auf dem Hintereisferner mittels Reflexionen erfolgten Eisdickenmessungen, die von der Seismos durch Bereitstellung von Apparaten gefördert worden sind. Die Abb. 48 gibt von Mothes aufgestellte Laufzeitkurven direkter und reflektierter Wellen wieder wie sie erstmalig im Jahre 1922 durch den damaligen Mitarbeiter der Seismos, Professor Dr.G.Angenheister und mich auf Grund meiner weiter oben besprochenen seismischen Untersuchungen aus dem Jahre 1920 in einem erdölhöffigen Gebiete Norddeutschlands aufgestellt worden sind (s.Abb. 12). Die Dicke des Gletschereises ergibt sich nach den Laufzeitkurven der Abb. 49 zu rd 200 m, ein Betrag, der zufällig in grosser Annäherung gleich der Tiefe des reflektierenden Horizontes in der Abb. 13 ist.

Über die Ergebnisse der seismischen Eisdickenmessungen auf Grönland, denen mehrfache Messungen auf verschiedenen Alpengletschern vorausgegangen sind, haben B.Brockamp, E.Sorge und K.Wölcken ausführlich berichtet. Aus den Aufzeichnungen reflektierter Wellen sind Eisdickenmessungen bis 1870 m ermittelt worden.

Lehrbuch Mechanik Physik, Geschichte, Teil 1, S. 653, § 15.

Professor Dr.O.v.Schmidt, Direktor des Instituts für technische Physik an der Luftkriegsakademie in Berlin-Gatow ,der auch über eingene, im In-und Auslande ~~gesam~~ erworbenen Erfahrungen auf dem Gebiete der seismischen ~~Erdö~~ Lagerstättenforschung verfügt,[51] hat meine bei der Sprengseismik entdeckte Grenzwelle (indirekte Welle) zum Ausgangspunkt seiner Überlegungen und Versuche zur Erklärung des Umlaufes der Radio-Kurzwellen um die Erde gemacht.[52] Die Abb.49,die den Weg der drahtlosen Wellen nach v.Schmidt darstellt,ist eine Umkehr der Abb.4 bzw.6,da die schneller leitende Schicht über statt unter der Erdoberfläche liegt. Angeregt durch die schönen Schlierenaufnahmen von O.v.Schmidt bei Untersuchungen über die Knallausbreitung in Flüssigkeiten und festen Körpern[53] führt H.Ott, Professor der theoretischen Physik an der Universität Würzburg in einer vor kurzem erschienen Abhandlung[54] einen mathematischen Beweis für das Auftreten einer "der Beobachtung bisher offenbar entgangenen Nebenwelle," Flankenwelle genannt,bei der Reflexion und Brechung von Kugelwellen. O.v.Schmidt schreibt darüber52): " Es ist ganz interessant,sich daran zu erinnern,dass die seinerzeitige Erfindung der Sprengseismik von Mintrop,[38] auf der alle obigen Experimente und Erfahrungen beruhen,damals jahrelang als mit den Gesetzen der Brechung unvereinbar und daher als unmöglich erachtet wurde.Dann aber,als hunderte von Untersuchungen der Wirtschaft enorme praktische Gewinne gebracht hatten,wurde das Verfahren als eine "Selbstverständlichkeit" hingestellt. In ~~einem~~ den Entscheidungsgründen des Reichsgerichtes zu der Abweisung einer Nichtigkeitsklage gegen mein Verfahrenpatent wird ausgeführt[38],dass nach Mitteilung von Professor Dr.Angenheister auch E.Wiechert glaubte ,das Auftreten der Grenzwelle (indirekten Welle)zunächst stark anzweifeln zu müssen und sich erst durch meine Versuchsergebnisse habe überzeugen lassen.

Rückblickend kann ich feststellen, dass sich meine am Schluss meines ersten öffentlichen Vortrages über das seismische Verfahren auf der Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft am 15. August 1920 in Hannover gestellte Prognose als richtig erwiesen hat: "Ich bin mir bewusst, dass das Verfahren nicht alles leisten kann. Die Grenzen seiner Anwendungsmöglichkeiten müssen in der Praxis gefunden werden. Aber eines lässt sich nach den bisherigen Erfahrungen sagen: Geologisch-bergmännisch-geophysikalisch vernünftig angesetzt, sachverständig durchgeführt und ausgewertet, wird das seismische Verfahren ein willkommenes Hilfsmittel für die Erkundung und Untersuchung nutzbarer Lagerstätten sein. Auch die Wissenschaft wird ihre Schlüsse zu ziehen wissen."

Bei diesem Rückblick erinnere ich mich dankbar meiner früheren Mitarbeiter, besonders aus der Pionierzeit des Verfahrens.

Benutztes Schrifttum.

1) W.Salm: Über die Energie der Mintrop-Welle.Beitr.z.angew. Geophysik Bd 4 ,Heft 3 ,1934 S.364-374.

2) L.Mintrop: Über seismographische Aufzeichnungen von Bodenerschütterungen durch Verkehrseinrichtungen,Maschinen,Sprengungen und dergleichen künstliche Erdbeben. Verh.Ges.Deutscher Naturforscher u.Ärzte.Versammlung 84,1912,Teil 2,1 S.201-204

~~X) Hort Lehrbuch der Technischen Schwingungslehre. Berlin 1922, Auflage 8 1937~~

3) A.v.Schmidt: Zur Herdtiefe des süddeutschen Erdbebens vom 16.November 1911.Gerlands Beitr.z.Geophysik,Bd 12,1913 ,S.1-12.

4) E.Wiechert u. K.Zoeppritz: Über Erdbebenwellen.Nachr.d.Ges.d.Wiss. mathem.-phys.Klasse, Göttingen 1907.

5) A.Born : Physikalische Landes-Untergrundaufnahme.Zeitschr.f.prakt. Geologie,Bd 34,1926,S.187-190.

6) O.Barsch: Die planmässige geophysikalische Erforschung Deutschlands als Grundlage weiterer erdölgeologischer Aufschlussarbeiten Zeitschr.Oel u. Kohle, 1935.

7) " " : Die geophysikalische Reichsaufnahme .Zeitschr.Oel u. Kohle 1936.

8) A.Bentz u. H.Closs: Erdöl und geophysikalische Reichsaufnahme in Grossdeutschland. Zeitschr.Oel u.Kohle,35.Jahrg.1939,S.731-740.

9) Gr.Triplett : Seismograph proves successful on Coast.The Oil Weekly,1924,p.36.

10) S.A.Judson u.R.A.Stamey: Overhanging Salt Domes of Texas and Louisiana.Gulf Coast Oil Fields,Symposium .London 1936,p.166.

11) L.H.Freeman: Development in the Gulf Coastal Area during 1925. Transactions Am. Inst. Mining, Metallurgical & Petroleum Engrs. Gulf Coast Petroleum production paper XXIV.

12) O.P.Teas: Cameron Meadows and Jowa,two Coastal Louisiana Fields. Bulletin Am.Ass.of Petroleum Geologists.Vol.16,1932.

13) J.Logan: Kelso Bayou-(East Hackberry-)dome is outstanding seismograph discovery.The Oil Weekly,Vol.48,1928,p.43-45.

14) E.A.Ansel: Das Impulsfeld der praktischen Seismik in graphischer Behandlung.Gerlands Beitr.z.Geophysik,Erg.H.Angewandte Geophysik,Bd 1,1931,S.117-136.

15) A.J.Bauernschmidt jr: East Hackberry salt dome ,Cameron Parish, Louisiana.Bull.Am.Ass.of Petroleum Geologists.Vol.15,1931, p.247-256.

16) J.B.Eby u.R.P.Clark: Relation of geophysics to salt-dome sructures Gulf Coast Oil Fields,Symposium.London 1936,p.170-191.

17) W.B.McCarter u.P.H.O`Bannon: Sugarland Oil Fields,Fortbend County, Texas.Gulf Coast Oil Fields,Symposium.London 1936,p.709-73

28) Fr.Trappe u.L.Rupprecht: Die Anwendung der seismischen Reflexionsmethode zur Untersuchung von Salzstöcken im Harzvorland. Zeitschr.f.Geophysik 15.Jahrg.1939,S.37-40.

18) H.Reich: Über die geologische Deutung von seismischen Refraktionsmessungen .Zeitschr.Oel u. Kohle,33.Jahrg.1937, S.53-59.

19) " " : Laufzeitpläne und Geologie in Ostpommern und im Alpenvorland.Zeitschr.Oel u.Kohle,Jahrg.35,1939,S.740-743.

20) E.E.Rosaire: Exploration by the reflection seismograph.The Oil Weekly ,Vol.86,1937,p.70-82.

21) S.J.Pirson: Dipshooting calculatikns.The Oil Weekly,Vol.85,1937, p.22-34.

22) " " " The correlation method of seismographing for oil.The Oil Weekly ,Vol.87,1937,p.22-44.

23) G.H.Westby: The discovery by reflection seismograph of a small producing structure in Omulgee County ,Oklahoma.Journal of The Ass.of Petroleum Geophysicists.Vol.VI,1935, p.44-49.

24) Fr.Trappe : Neuere Anwendungen des seismischen Verfahrens der Lagerstättenforschung.Zeitschr.Oel u.Kohle.32.Jahrg.1936 S.384-387.

25) " " Beiträge zur Anwendung der Reflexionsmethode in Deutschland.Zeitschr.Oel u. Kohle.33.Jahrg.1937,S.757-758.

26) " " : Die Anwendung des seismischen Reflexionsverfahrens im Kohlenbergbau.Zeischr.Glückauf,71.Jahrg.1935,S.577-582

27) H.Lückerath: Fortschritte der Reflexionsseismik.Zeitschr.Oel u. Kohle.37.Jahrg,1941,S.73-77.

29) J.B.Macelwane: Fifteen years of geophysics.A chapterin the Exploration of the United States ans Canada.1924-1939. Journal Geophysics.Vol.V.part one,July 1940,p.250-258.

30) B.B.Weatherby: The history and development of seismic prospecting.Journal Geophysics.Vol.V.part one,July 1940.p.215-230

31) L.Mintrop: Zur wirtschaftlichen Bedeutung der geophysikalischen Verfahren zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten.Mitt.a.d.Markscheidewesen,48. Jahrg.,Heft 2,S.109-132. 1902

32) W.F.Henniger: Occurence of sulphur waters in the Gulf Coast of Texas and Louisiana and their signification in locating new domes.Geoloy of Salt Dome Oil Fields.1926 , p.774-776.

~~World Petroleum 9,1938,Nr.13.Journal London.~~

33) St.v.Thyssen-Bornemisza: Die Bedeutung der Geophysik beim Auffinden von Erdöllagerstätten in den Vereinigten Staaten von Nordamerika.Zeitschr.Oel u.Kohle,35.Jahrg.1939,S. 113-117.~~(World Petroleum 9,1938,Nr.13).~~

34) E.E.Rosaire: Exploration by reflexion seismograph.The Oil Weekly,Vol.86,1937,p.70-82.

38) L.Mintrop: Verfahren zur Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten. D.R.P.371963 vom 7.12.1919 u.Nr. 410010 vom 2.11.1920. Reichsgerichtsentscheidung vom 28.6.1930 ,I.281/27. Entscheidung des Landgerichtes Kassel vom 19.8.1935,3a.o.66/31.

39) " " :Feldseismograph.D.R.G.Nr.670330 vom 6.8.1917.Erschütterungsmesser D.R.P. Nr.303344 vom 25.5.1917 u. Nr.303345 vom 5.8.1917.

40) " " : Zur Geschichte des seismischen Verfahrens zur Erforschung von Gebirgsschichten und nutzbaren Lagerstätten. Mitt. d.Seismos,G.m.b.H.Hannover,II,S.1-113,1930.

35) L.Mintrop: Über die Ausbreitung der von den Massendrucken einer Grossgasmaschine erzeugten Bodenschwingungen.Dissertation Göttingen 1911.

36) A.Ramspeck:Die Ausbreitungsgeschwindigkeit sinusförmiger elastischer Wellen im Boden.Zeitschr.f.Geophysik,10.Jahrg.1934,S.387-

37) R.Köhler: Der Stand der Forschung auf dem Gebiete der Bodenschallausbreitung.Zeitschr.Die Schalltechnik,1936,Nr.3/4.

41) A.Mohorovičič : Das Beben vom 8.10.1909 .Jahrb.d.Meteorologischen Obs. Zagreb (Agram) 1909,Jahrg.IX,Teil IV,Abschnitt 1,S.1-63.

42) E.Wiechert : Untersuchungen der Erdrinde mit dem Seismometer unter Benutzung künstlicher Erdbeben.Nachr.d.Ges.d.Wiss.mathem. - phys.Klasse,1923,S.1-14.

43) " " : Seismische Untersuchungen .Zeitschr.f.Geophysik,1.Jahrg. 1924/25,S.14-20.

44) " " Untersuchungen der Erdrinde mit Hilfe von Sprengungen. Geologische Rundschau,Bd.XVII,1926,Heft 5,S.339-346.

45) B.Brockamp: Seismische Beobachtungen bei Szeinbruchsprengungen.Dissertation Göttingen.Zeitschr.f.Geophysik,7.Jahrg.1931,S.295-31

46) G.Angenheister :Bodenschwingungen.Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften.Bd.XV,S.310-364,Berlin 1936.

47) " " : Die Laufzeit des Schalles für grosse Entfernungen.Zeitschr f.Geophysik,1.Jahrg.1924/25,S.314-327.

48) H.Mothes: Seismische Eisdickenmessungen von Gletschereis.Zeitschr.f. Geophysik,3.Jahrg.1927,S.121-134.

49) " " Neue Ergebnisse der Sprengseismik. Z.f. Geophysik, 5. Jhg. 1929, S. 120-144.

50) B.Brockamp,E.Sorge,K.Wölcken: Wissenschaftliche Ergebnisse der Deutschen Grönland -Expedition Alfred Wegener,1929 u.1930/31.Bd II,Seismik,Leipzig 1933.

50) K.Keilhack: Die Hauptversammlung der Deutschen Geologischen Gesellschaft in Hannover. Zeitschr.Glückauf,55.Jahrg.1920.

51) L.Mintrop: Die Ermittlung des Aufbaues von Gebirgsschichten aus seismischen Beobachtungen. Zeitschr.d.Deutschen Geologischen Ges.,73.Jahrg.1920.Monatsberichte S.369-372.

52) O.v.Schmidt: Neue Erklärung des Kurzwellenumlaufes um die Erde.Zeitschr für Technische Physik, 17.Jahrg.Nr.11,1936.S.443-446.

53) O.v. Schmidt: Angenäherte Formeln. Z.f. Geophysik, 4. Jhg. 1928, S. 138-

54) R.Köhler u.A.Ramspeck: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen im Boden.Veröffentlichungen des Instituts der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) an der Technischen Hochschule Berlin,Heft 4,1936. S.9-16.

55) H.Ott: Reflexion und Brechung von Kugelwellen.Effekte 2.Ordnung. Annalen der Physik.5.Folge,Bd.41,1942,S.443-466.

Beschriftung der Abbildungen.

1) Seismogramm (Vertikalkomponente) einer Sprengung von 2kg Donarit in 1000 m Entfernung.
2) Sprengung und seismisches Beobachtungszelt im Gelände.
3) Feldseismograph.(Blick in das Beobachtungszelt mit den Apparaten.
4) Erregung,Ausbreitung und seismographische Aufzeichnung von elastischen Wellen.
5) Seismogramm (Vertikalkomponente) von 8 kg Pikrin in 1000 m Entfernung.
6) Laufzeitkurve über zwei verschiedenen Gebirgsschichten mit parallel zur Erdoberfläche verlaufenden Grenzfläche.
7) Laufzeitkurve über einer Gebirgsschicht (Deckgebirge).
8) Lageplan zum Linien -und Fächerschiessen.
9) Sammellaufzeitkurve zum Linien-und Fächer-Refraktionsschiessen über einem tiefen Salzdom.
10) Laufzeitkurve über dem Profil eines flachen Salzdomes.
11) Seismogramme zum Linien -Reflexionsschiessen.
12) Laufzeitkurven der direkten und reflektierten Wellen.
13) Reflexionsprofil zu einem reflektierenden Horizont.
14) Reflexionshorizonte in drei verschiedenen Tiefen.
15) ~~Laufzeitkurve der direkten Welle und von drei Reflexionen in verschiedenen Tiefen.~~
16) ~~Seismogramme zum Linien-Reflexionsschiessen.~~
17) Seismogramme zum Fächer-Reflexionsschiessen.
16) Lageplan zum Fächer-Reflexionsschiessen.
17) Übersichtskarte über die Vereinigten Staaten von Nordamerika mit den seismisch untersuchten Flächen (schraffiert). Nach J.B.Macelwane
18) Seismogramme zu den ersten seismischen Untersuchungen in U.S.A.
19) Laufzeitkurven über vier verschiedenen Gebirgsschichten mit parallel zur Erdoberfläche verlaufenden Grenzflächen.
20) Laufzeitkurven über drei verschiedenen Gebirgsschichten mit z.T. gegen die Erdoberfläche geneigten Grenzflächen.
21) Laufzeitkurven auf und an dem Salzdom Blue Ridge in Texas.
22) Seismogramme zum Linien-Refraktionsschiessen auf und an dem Salzdom Blue Ridge in Texas.
23) Laufzeitkurven zum Refraktions-Linienschiessen -und Gegenschiessen am Koling-Salzdom.
24) Lageplan zum Linien -Refraktionsschiessen bei Orchard in Texas.
25) Laufzeitkurven zum Linien-Refraktionsschiessen ausserhalb des Orchard-Salzdomes.
26) Laufzeitkurve zum Linien-Refraktionsschiessen über dem Orchard-Salzdom.

27) Auszug aus dem Lageplan zum Refraktions-und Reflexions-Schiessen am Salzdom East Hackberry (Kelso Bayou) in Louisiana.

28) Sammellaufzeitkurve zum Refraktions-und Reflexions-Schiessen am Salzdom East Hackberry (Kelso-Bayou).

29) Dreifaches Seismogramm (Vertikalkomponenten) zum Reflexionsschiessen am Salzdom East Hackberry (Kelso Bayou).

30) Wellenfrontenverfahren zur Ermittlung der Tiefe und Form eines verdeckten Gebirgskörpers.

31) Geologisches Profil durch die Südflanke des East Hackberry-(Kelso Bayou-)Salzdomes.

32) Lageplan vom südlichen Teile des Erdölfeldes East Hackberry (Kelso Bayou).

33) Sammellaufzeitkurve zum Refraktionsschiessen am Sugarland Salzdom in Texas.

34) Geologisches Profil und Grundriss zum Sugarland Salzdom und-Erdölfeld.

35) Anordnung der Sprengungen und der Seismometer (Geophone) beim Linien-Reflexionsschiessen .

36) Sechsfaches Seismogramm (Vertikalkomponenten) zum Linien -Reflexionsschiessen mit einer Reflexion.

37) Sechsfaches Seismogramm (Vertikalkomponenten) zum Linien-Reflexionsschiessen mit zwölf Reflexionen.

38) Blick in einen amerikanischen seismischen Registrierwagen.

39) Ansicht des Wagenparkes eines amerikanischen seismischen Trupps.

40) Reflexionsprofil an der Flanke eines norddeutschen Salzhorstes.

41) Graphische Darstellung der Salzdomfunde an der Golfküste von Texas und Louisiana seit der Jahrhundertwende.

42) Reflexionsprofil über dem tiefen Salzdom Iowa in Louisiana.

43) Reflexionsseismisch ermittelter Tiefenlinienplan über dem Iowa-Salzdom .

44) Vertikalschnitt durch die Erde mit den bis zum Jahre 1919 seismisch ermittelten Grenzflächen zwischen Schichten verschiedener Wellengeschwindigkeiten.

45) Laufzeitkurven und Profil von der äusseren Erdrinde nach der Göttinger Sprengseismik.

46) Seismogramm (Vertikalkomponente) einer Sprengung auf dem Eise eines Sees in Nordschweden.

47) Laufzeitkurven zu den seismischen Messungen auf zugefrorenen Seen in Nordschweden.

48) Laufzeitkurven direkter und reflektierten Wellen nach seismischen Messungen auf einem Alpengletscher.

49) Darstellung des Umlaufes der Radio-Kurzwellen um die Erde. Nach O. v. Schmidt.