

Erdbebenkommission.

I. Wellenbewegung und Erdbeben.

Ein Beitrag zur Dynamik der Erdbeben.

Von Dr. A. Schmidt, Professor am Realgymnasium in Stuttgart.

Mit Taf. V. VI.

1. Die Gesetze der Wellenbewegung.

Die grosse Frage nach der Ursache der Erdbeben, mit welcher ich mich hier nicht beschäftigen will, steht im engsten Zusammenhang mit der Frage nach dem örtlichen Ursprung der Beben, und diese letztere Frage bildet ein physikalisch-mathematisches Problem, für welches die Natur und die Beobachter die Rechnungselemente, die Mathematiker die Rechnungsmethode und die Resultate zu stellen haben. Die Methoden von MALLET, SEEBACH, FALB, welche sich die Aufgabe stellen, aus den gemachten Beobachtungen von Richtung oder von Zeit der Erdbebenstösse oder aus beiden zusammen die Tiefe des Erdbebencentrums zu berechnen, sind dadurch nicht veraltet, dass die neueren Forschungen nachgewiesen haben, dass die Voraussetzung eines Zentrums nicht für jedes Erdbeben zutreffe, dass es nicht nur zentrale, sondern auch lineare und auch Flächenbeben gäbe. Denn auch das kompliziertere Problem der Ausbreitung einer Wellenbewegung von einer Fläche aus kann die Mechanik doch nur lösen auf Grund der Gesetze, die sich für die Ausbreitung von einem Punkte aus ergeben.

Dass ein sich fortpflanzendes Erdbeben eine Wellenbewegung ist, dass die allgemeinen Gesetze der Wellenbewegung darauf anwendbar sind, scheint mir eines Beweises nicht zu bedürfen oder erst dann zu bedürfen, wenn sich zeigen sollte, dass man mit dieser Anwendung in Widerspruch mit den Thatsachen käme.

Die in einem irgendwie gestalteten Zentrum entfesselte mechanische Energie pflanzt sich mit messbarer Geschwindigkeit von

Punkt zu Punkt allseitig fort, bis sie, sei es im Innern der Erde, sei es an der Oberfläche, aus der Form mechanischer Energie in eine andere Energieform, nämlich durch Reibung und Stoss in Wärme umgewandelt wird. Jeder Punkt im Innern, durch welchen die Energie sich fortpflanzt, wird eben damit, dass er während einiger Zeit Träger eines Teils der Energie ist, zu einem selbständigen Zentrum, von welchem aus sich sein Energieanteil allseitig ausbreitet; die Gesamtwelle entsteht aus dem Zusammenwirken der unendlich vielen Elementarwellen.

Ogleich nun die Ausbreitung der Energie von einem Punkt im Innern der Erdkruste aus wegen des Wechsels der Mineralien, wegen der Mannigfaltigkeit von Schichtung und Zerklüftung eine höchst mannigfaltige und im einzelnen unregelmässige sein wird, so lässt sich doch erwarten, dass eben durch das Zusammenwirken der Elementarwellen die kleinen Unregelmässigkeiten sich ausgleichen, die im selben Sinn sich wiederholenden zu besonderen Gesetzmässigkeiten sich vereinigen werden, so dass in der Ausbreitung der Gesamtwelle sich eine im einzelnen durch kleine Störungen unterbrochene Regelmässigkeit im grossen muss erkennen lassen, ähnlich wie wenn die Welle in homogenem Material sich ausgebreitet hätte. Das Gesetz im grossen, die Störungen im kleinen ist der Charakter aller Naturerscheinungen, ist die Form, in welcher die menschliche Erkenntnis sich derselben bemächtigt.

Diese Vorstellungsweise, nach welcher jede Welle durch Summierung unendlich vieler Elementarwellen entsteht, jeder bewegte Punkt selbständiger Mittelpunkt von Elementarwellen ist, verdanken wir dem Genie des Niederländers HUYGHENS.

Diese fruchtbare Vorstellungsweise liefert uns die Begründung der wichtigsten physikalischen Gesetze für die Ausbreitung der Wellen, Gesetze, welche in der Theorie der Lichtbewegung so gut wie in der der Schallbewegung die mannigfaltigsten Erscheinungen erklären, Gesetze, welche wir mit demselben Rechte auch auf die Erdbebenwellen übertragen, in die „Abyssodynamik“ einführen dürfen, wie man die noch wenig befestigte Wissenschaft zu nennen beliebt. Nur sprechen wir in der Erdbebenmathematik gewöhnlich nicht wie in der Optik von Wellenflächen, sondern von homoeistischen Flächen und Linien und statt von den auf den Wellenflächen senkrechten Strahlen, welche ein Bild der Richtung geben, in welcher in jedem Punkte die Energie sich fortpflanzt, redet man hier von Stosslinien. Aber abgesehen vom Namen bedeutet in der einen,

wie in der andern Wissenschaft der kleinere oder grössere Weg, um welchen eine Wellenfläche von Minute zu Minute weiterrückt, auch eine kleinere oder grössere Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Energie, es bedeutet ein Auseandertreten der Strahlen ein Zerstreuen, ein Zusammentreten der Strahlen eine Verdichtung der Energie, Vermehrung der Intensität.

Das für unsern Zweck wichtigste der Gesetze, welche die Physik aus dem HUYGHENS'schen Prinzip ableitet, ist das CARTESIUS-SNELLIUS'sche Brechungsgesetz. Denken wir uns eine Reihe verschiedener durchsichtiger Substanzen, etwa Glas, Wasser, Öl, Luft in parallelen Schichten übereinander gelagert, jeder derselben kommt ein besonderer Wert c derjenigen Geschwindigkeit zu, mit welcher sie das Licht fortpflanzt, der ersten Substanz z. B. c_1 , der zweiten c_2 , der dritten c_3 u. s. w. Auf die erste Substanz falle Licht schief von oben, dessen Strahlen mit der senkrechten Richtung (dem Einfallslot) den Winkel α_1 bilden. Beim Eintritt in die erste Schicht erfahren diese Strahlen eine Ablenkung, die neue Richtung macht mit dem Einfallslot einen andern Winkel α_2 . Zwischen den beiden Winkeln besteht nun die gesetzmässige Beziehung $c_1/\sin \alpha_1 = c_2/\sin \alpha_2$. Beim Übergang ins zweite Mittel ändert sich der Winkel α_2 in einen Winkel α_3 und es ist $c_3/\sin \alpha_3 = c_2/\sin \alpha_2 = c_1/\sin \alpha_1$ u. s. f. Und wenn wir eine beliebige Anzahl verschiedener Mittel je mit verschiedenem c übereinander in parallelen Schichten gelagert haben, selbst wenn die Zahl der Schichten eine unendliche sein sollte, so besteht zwischen dem ersten und letzten Winkel α_1 und α_n und der ersten und letzten Geschwindigkeit c_1 und c_n die Gleichung: $c_n/\sin \alpha_n = c_1/\sin \alpha_1$.

Dieses Gesetz ist aber kein spezifisch optisches Gesetz, es gilt für jede Wellenbewegung, auch für die Erdbebenwellen und Stossstrahlen, mit einer jeden Änderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit c ist die durch das Gesetz ausgesprochene Änderung der Strahlrichtung bedingt. Ist die Veränderung von c eine stetige, so ändert sich auch die Strahlrichtung stetig, der Strahl bildet eine krumme Linie.

Wie wird nun eine Erdbebenwelle in mineralisch vollkommen homogenem Gestein von einem erschütterten Punkte aus sich verbreiten? Diese Frage haben, wie ich im folgenden nachweisen will, die Erdbebenmathematiker zu leicht genommen, sie haben die Voraussetzung einer allseitig gleichförmigen Ausbreitung gemacht, sie nehmen die Erdbebenwellen als konzentrische Kugeln, die Strahlen als zu den Kugelflächen senkrechte gerade Linien an, als ob sich das eigentlich bei unveränderter mineralischer Beschaffenheit ganz von

selbst verstünde. Diese Geradlinigkeit der Erdbebenstrahlen ist eine durch nichts gerechtfertigte Hypothese, welche zwar die Rechnung erleichtert, aber zu sehr zweifelhaften Resultaten führt in der Messung der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten und in der Berechnung der Tiefen der Erdbebenzentren, welche ausserdem das Verständnis, die Erklärung einer Reihe von Beobachtungsthatsachen verhindert. Die Geradlinigkeit der Erdbebenstrahlen, der Fortpflanzung der Erdbebenenergie ist deswegen unmöglich, weil mit der Tiefe unter der Erdoberfläche sich die Bedingungen ändern, von welchen die Geschwindigkeit der Fortpflanzung abhängt. Um dies zu begründen, müssen wir ein zweites Gesetz zu Hilfe nehmen, welches die Dynamik aus der Elastizitätslehre ableitet und auf die Formel bringt: $c = \sqrt{e/d}$. Die Geschwindigkeit c , mit welcher die Energie der Wellenbewegung durch eine Substanz hindurch sich fortpflanzt, ist gleich der Quadratwurzel aus dem Quotienten von Elastizität und Dichte der Substanz. Zwar kann man nicht behaupten, dass die Mathematiker mit dieser Formel in der Erdbebenlehre bis jetzt ebenso viel Glück gehabt hätten als z. B. in der Lehre vom Schall, sie finden leider mit denselben Werte von c , welche wenigstens 8mal zu gross sind, aber doch liegt in dieser Formel der Grundsatz anerkannt, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit nicht nur von der mineralischen Beschaffenheit und der Dichte abhängt, sondern auch von der Elastizität. Und wer wollte behaupten, dass ein Gestein in der Tiefe, unter dem Druck vieler hundert Atmosphären, denselben Elastizitätsfaktor habe, wie an der Oberfläche? Der Elastizitätsfaktor muss mit der Tiefe unter der Erdoberfläche wachsen wegen des zunehmenden Drucks von oben, er muss sich ausserdem ändern wegen der mit der Temperatur sich ändernden Kohäsionskräfte. Und wenn eine genauere Untersuchung der die Bewegung der Gesteinsmassen begleitenden Kräfte vielleicht einmal zu dem Resultat führen sollte, dass es weniger die Druckfestigkeit des Gesteins ist, welche wir mit dem Faktor e zu messen haben, als vielmehr die Verbiegungsfestigkeit — ich lasse diese Frage offen — wer wollte dann noch an der Veränderlichkeit der letzteren, je nach dem auflastenden Gebirgsdruck, zweifeln?

Nicht einmal die Strahlen der Wellen des der Schwere entrückten Lichtäthers, welche im freien Weltraum von mathematischer Geradlinigkeit sind, können sich an der Erdoberfläche dem mittelbaren Einfluss der Schwere ganz entziehen, sie krümmen sich in der dichteren Atmosphäre und werden nach unten konkav, wodurch die Erscheinung der astronomischen Strahlenbrechung entsteht. Und die

Schallstrahlen in der Luft, obgleich in dieser Dichte d und Elastizität e einander proportional sind, bleiben nur geradlinig in Luftschichten gleicher Temperatur, sie sind bei nach oben abnehmender Temperatur nach unten konvex. Die starren Mineralien aber folgen bekanntlich dem MARIOTTE'schen Gesetze nicht, für sie fällt jeder Grund der Geradlinigkeit der Strahlen weg. Es lässt sich a priori sonach erwarten, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Bebenwellen sich mit der Tiefe beträchtlich ändern werde in einem Masse, das nicht einmal näherungsweise Vernachlässigung gestattet, es lässt sich erwarten, dass die Wellen exzentrische Flächen, die Strahlen krumme Linien bilden werden.

2. Die Wahrnehmungen in Bergwerksschachten.

LASAULX¹ berichtet, dass bei dem Herzogenrather Erdbeben vom 22. Oktober 1873 die Arbeiter in der Tiefe der Steinkohlenbergwerke in der Nähe von Herzogenrath deutliche Wahrnehmungen des Erdbebens machten. „Am deutlichsten merkten diejenigen den Stoss, welche standen oder sassen, und geben letztere an, förmlich in die Höhe geschleudert worden zu sein. Dagegen haben mehrere Oberbeamte, die als sehr aufmerksame Beobachter gelten können, gar nichts in der Grube bemerkt, vermutlich weil dieselben gerade in Bewegung waren.“ Von der Oberfläche aber in Herzogenrath wird berichtet, dass durch die zwei kurz aufeinanderfolgenden Erdstösse Schornsteine einstürzten, das Pflaster aufgerissen wurde, Häuser bedenkliche Sprünge bekamen. Wenn schon in diesem Berichte eine in der Tiefe verminderte Wahrnehmbarkeit des Bebens ausser Zweifel ist, so bildet er doch insofern eine Ausnahme, als eine Reihe anderer Beobachtungen vorliegen, nach welchen Erdbeben in genügender Tiefe der Schachte überhaupt nicht vernommen werden, auch wenn sie an der Oberfläche sehr heftig auftreten. Zwei solcher Berichte finden sich bei SEEBACH² und der wohl eingehendste bei HÖRNES³ in einem Bericht über das Agramer Erdbeben 1880. Die Arbeiter bis zu 30 m Tiefe hörten noch die Zimmerung krachen, fühlten den Boden wanken und wandten sich zur Flucht, in den tieferen Arbeitsorten aber, 60—120 m, hat niemand auch nur das Geringste bemerkt. Die Ausnahme, welche der erwähnte Bericht von Herzogen-

¹ Lasaulx, Das Erdbeben von Herzogenrath. Bonn 1874. pag. 20.

² Seebach, Das mitteldeutsche Erdbeben vom 6. März 1872. Leipzig 1873. pag. 20 u. 58.

³ Gaea, Bd. XVII von 1881. pag. 8.

rath bietet, erklärt sich, wenn man bedenkt, dass dort der Bergwerksschacht keine halbe Meile vom Oberflächenmittelpunkt des Bebens, dem Epizentrum entfernt, also auch dem Zentrum sehr nahe war. Wie aber erklärt sich die Regel? Darf man daraus mit HÖRNES schliessen, dass vorzugsweise nur die oberen Schichten der Erdkruste die Erschütterung fortpflanzen, die tiefer liegenden unbeteiligt bleiben? Das wäre zu weit gegangen. Denn gerade in der Tiefe, wo durch gegenseitigen Druck die Gesteinsteile in eng geschlossenem Verbande sind, sind die Bedingungen für die Fortpflanzung viel günstigere. Wir können zunächst nur annehmen, dass die Bewegungsart des Gesteins in der Tiefe so beschaffen ist, dass sich die Bewegung auf die an der Sohle und den Schachtwänden lose aufliegenden Körper weniger vernehmlich überträgt, als in der Höhe. Was sich mit dem Erdbeben fortpflanzt, ist Energie, ist Arbeit. Arbeit aber ist Produkt aus Kraft und Weg, je grösser der eine Faktor, um so kleiner ist der andere, je grösser der Druck wird, unter welchem das Gestein steht, um so kleinere Exkursionen machen die schwingenden Punkte, um so weniger können aufliegende Körper mitbewegt werden. Ferner muss der veränderten Schwingungsart in der Tiefe eine veränderte Fortpflanzungsgeschwindigkeit entsprechen, dem grösseren e ein grösseres c , daraus folgt ein zweiter Grund der verminderten Vernehmlichkeit. Wie nämlich das Wasser eines Kanals einen kleineren Querschnitt zeigt, wo es rasch fliesst, einen grösseren, wo es langsam fliesst, so müssen in einem Energiestrom die einzelnen Punkte Träger einer um so grösseren Energiemenge sein, je langsamer sie die Energie fortpflanzen und umgekehrt.

Erst mit diesem zweiten Momente dürfte die allen Beobachtern auffallende Erscheinung der in der Tiefe verminderten Vernehmlichkeit der Beben ihre volle Erklärung finden und so allerdings auch die Annahme ihre teilweise Berechtigung finden, nach welcher mehr die oberen Schichten der Erdkruste Träger der Erdbebenenergie sind. Für uns liegt in der besprochenen Thatsache ein Beweis, mindestens ein starker Wahrscheinlichkeitsbeweis für die Zunahme der Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe unter der Erdoberfläche.

3. Verbesserung des Gesetzes von HOPKINS.

Denken wir uns nun von einem Zentrum in der Tiefe eine Welle allseitig sich ausbreitend, so wird sie von Minute zu Minute grössere Flächen bilden. Eine durch das Zentrum gelegte Vertikalenebene schneidet alle diese aufeinanderfolgenden homoseistischen Flächen und schneidet auch die Erdoberfläche, nehmen wir an, letztere

nach einer horizontalen geraden Linie. Unsere Taf. V, Fig. 1 u. 2 gibt in ihren unteren Teilen je ein Bild der aufeinanderfolgenden Lagen der homoseistischen Flächen von Minute zu Minute. Fig. 1, mit ihren konzentrischen Homoseisten, alle in gleichem Abstand voneinander, mit ihren geradlinigen Stossstrahlen, entspricht der Vorstellung unserer Erdbebenmathematiker. Fig. 2, mit ihren exzentrischen, nach oben näher und näher zusammenrückenden Vertikalhomoseisten, mit ihren gekrümmten, nach unten konvexen Strahlen entspricht unserer neuen Vorstellung. Die horizontale Gerade, welche den unteren Teil der Figur gegen den oberen begrenzt, repräsentiert in beiden Figuren die Erdoberfläche. In Fig. 1 u. 2 verteilen sich die Stossstrahlen vom Zentrum aus zunächst vollkommen gleichmässig im Raume nach allen Richtungen, die in Fig. 1 bleiben gleichmässig verteilt, die in Fig. 2 aber müssen, um zu den Wellenflächen in ihrem ganzen Verlaufe senkrecht zu bleiben, um zu denselben ein System orthogonaler Trajektorien zu bilden, nach unten viel rascher divergieren, als nach oben, indem sie nach unten konvex werden. Notwendig kann die Fig. 2 nur einem bestimmten Gesetz der Zunahme der Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe entsprechen (diese Zunahme ist der Tiefe proportional angenommen), der allgemeine Charakter der Figur aber mit nach unten konvexen Stossstrahlen bleibt erhalten, wenn auch das Gesetz dieser Zunahme ein anderes ist. Wollte man eine Figur für dasselbe Gesetz, aber für einen anderen, etwa kleineren Betrag der Zunahme bei gleicher oder anderer Tiefe erhalten, so dürfte man nur die Erdoberfläche dem Zentrum näher legen und den Massstab des Ganzen entsprechend verändern. Eine Vergleichung der beiden Figuren lässt nun leicht weitere Unterschiede zum Vorteil von Fig. 2 erkennen. Wie nämlich die durch einen Brennspiegel zusammengedrängten Sonnenstrahlen dort, wo sie am dichtesten stehen, die grösste Intensität von Licht und Wärme erzeugen, so entspricht auch der dichtere oder dünnere Stand der Stossstrahlen einer grösseren oder geringeren Erdbebenintensität. Die Gegend um das Epizentrum ist nun in Fig. 2 viel mehr bevorzugt, als in Fig. 1, was den Beobachtungen über die Wirkungen in den Gebieten stärkster Erschütterung besser entspricht. Während ferner in Fig. 1 die Energie nach allen Seiten, auch nach dem Erdinnern, fortschreitet, wendet sich dieselbe in Fig. 2 von der Seite des wachsenden Widerstandes mehr und mehr ab und macht sich Luft nach oben, nach der Seite des kleinsten Widerstandes, um sich schliesslich ganz an der Erdoberfläche zu

entladen, denn nur ein mathematisch vertikaler Strahl wird sich ganz ins Innere der Erde verirren.

Was uns aber bei der Vergleichung am wichtigsten ist, das sind die Stücke der Erdoberfläche, welche zwischen den einzelnen Homoseisten liegen. Diese Stücke geben jedes ein Mass für den Weg, um welchen die Welle an der Erdoberfläche von Minute zu Minute fortzuschreiten scheint. In Wirklichkeit schreitet ja die Welle schief von unten her in der Richtung der Stosslinien fort, der wirkliche Weg, um welchen sie vorwärts rückt, ist kleiner, als der scheinbare. Wir Bewohner der Oberfläche können aber nur die scheinbare Geschwindigkeit der Erdbebenwelle beobachten, wir verzeichnen, eine genügende Zahl guter Beobachtungen vorausgesetzt, nach den Angaben über die Zeit, zu welcher das Erdbeben an diesem und jenem Orte beobachtet wurde, auf der Landkarte die Schnittkurven der homoseistischen Flächen mit der Erdoberfläche, die Horizontalhomoseisten, und bestimmen aus dem Abstände dieser die scheinbare Geschwindigkeit. Diese scheinbare Oberflächengeschwindigkeit ist in beiden Figuren im Epizentrum am grössten, sie nimmt nach aussen hin ab. In Fig. 1 nähert sie sich mehr und mehr, asymptotisch, demjenigen Betrage, der die wahre Geschwindigkeit in der Richtung der Stosslinien ist. Dies ist das Gesetz von HOPKINS, welches dieser im Jahre 1847 aufgestellt hat. In Fig. 2 aber bleibt an der Oberfläche die scheinbare Geschwindigkeit stets grösser als die wahre, sie nimmt, wie man sich durch Anlegen eines Massstabs überzeugen mag, ziemlich schnell ab bis zu demjenigen Betrage, der die wahre Geschwindigkeit in der Tiefe des Zentrums vorstellt, weiterhin jedoch nimmt die scheinbare Geschwindigkeit nach aussen wieder allmählich zu. Man mache die Probe, man verschiebe die Erdoberfläche parallel nach unten, es zeigt sich immer dasselbe Gesetz, die Strecke von Homoseiste zu Homoseiste ist im Epizentrum am grössten, sie nähert sich schnell dem Betrage 5 mm, der als Radius der ersten Homoseiste im Zentrum angenommen ist, um weiterhin diesen Betrag allmählich zu überschreiten. Ob also der Erdbebenherd der Oberfläche näher oder ferner liegt, ob der Unterschied der Wellengeschwindigkeit zwischen oben und unten gross oder klein sein mag, das Gesetz, welches unsere Figur uns zeigt und welches wir unten allgemein beweisen und genauer auf den Begriff bringen werden, bleibt dasselbe:

Die scheinbare Oberflächengeschwindigkeit ist mindestens gleich der Zentrumsgeschwindigkeit und mit dieser veränderlich.

4. Verschiedenheit der Erdbebengeschwindigkeiten.

Nach derjenigen Theorie, welche den Einfluss des Drucks auf die Elastizität unberücksichtigt lässt, sollte jeder Substanz ihr eigener, nur von ihrer inneren Beschaffenheit abhängiger Wert von c zukommen, von derjenigen Geschwindigkeit, mit welcher Elasticitätsschwingungen sich in ihr fortpflanzen, es sollte derselben Felsart und auch derselben Gegend, wenigstens solange die Fortpflanzungsrichtung dieselbe ist, auch zu allen Zeiten dieselbe Geschwindigkeit der Erdbebenwellen eigen sein; der Grenzwert, welchen das HOPKINS'sche Gesetz der scheinbaren Geschwindigkeit der Bebenwellen zuweist, sollte, in derselben Gegend wenigstens, immer derselbe sein. Wie bestätigt sich das in der Erfahrung?

Künstliche Versuche von PFAFF, MALLET und ABOT¹ zeigen, wie allerdings zu erwarten, verschiedene Geschwindigkeiten in verschiedenen Substanzen, MALLET fand 250 m pro Sekunde im Sand, über 500 m im Granit, 330 m im gefalteten Schiefer, über 700 m im Schiefer mit ungestörten Schichtenlagen, im Durchschnitt verschiedener Gesteinsarten etwa denselben Wert, wie die Geschwindigkeit des Schalls in der Luft. Aber diese Versuche zeigten zugleich wesentliche Differenzen je nach der Stärke des ersten Anstosses. Bei dreifacher Pulverladung ergaben sich im Schiefer statt 330 m, 412 m. ABOT erreichte durch eine kräftige Dynamitladung 2864,8 m pro Sekunde. Dass diese Zahlen hinter den theoretisch berechneten meist weit zurückbleiben, haben wir oben erwähnt, da liegt eben der Fehler noch in der Theorie. Dass aber die Stärke der Erschütterung auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einen so grossen Einfluss haben soll, liesse sich nur dann begreifen, wenn bei jeder einzelnen Fortpflanzung einer Stosswelle die Geschwindigkeit im Verhältnis der abnehmenden Intensität vom Zentrum nach der Peripherie abnehmen würde. Eine solche rasche Abnahme der Geschwindigkeit ist aber nirgends beobachtet worden. Noch grössere Differenzen als die künstlichen, zeigen die natürlichen Bebenwellen und hier gerade sind häufig die Beben geringerer Intensität solche, welche sich rascher fortpflanzen, als Beben grosser Intensität in derselben Gegend. LASAULX hat eine Tabelle von Erdbebengeschwindigkeiten veröffentlicht, in welcher als kleinste Zahl 260 m, als grösste 742 m auftreten. Für das Erdbeben von Agram aber vom 9. Nov. 1880 gibt HANTKEN von Prudnik² eine Oberflächengeschwindigkeit von

¹ Vergl. J. Roth: Über die Erdbeben. Berlin 1882. pag. 24.

² Hantken von Prudnik, Das Erdbeben von Agram i. J. 1880. Budapest 1882.

22000 m, denn es hat sich in 12 Sekunden von Agram bis Wien fortgepflanzt, diese Zahl ist fast 30 mal so gross, als die grösste Zahl bei LASAULX. Der Berichterstatter bemerkt dazu: „dieses Resultat weicht von allen ähnlichen Berechnungen derart ab, dass es fast den Anschein gewinnt, als ob bei der Zeitbeobachtung bedeutende Fehler unterlaufen wären.“ Aber bei JULIUS SCHMIDT, Studien über Vulkane und Erdbeben, findet sich eine noch grössere Zahl, er gibt für das Erdbeben vom 24. Juni 1870 im Gebiet des Mittelmeers an, dass seine Geschwindigkeit zwar nicht bestimmbar, aber sehr gross gewesen sei und für das vom 12. Okt. 1856 im Mittelmeergebiet findet er als passendste Annahme 300 Meilen pro Minute oder mehr, d. h. gegen 40000 m pro Sekunde. Diese grosse Zahl ist freilich sehr unsicher, ich finde, dass der 16. Teil der Zahl, etwa 2500 m pro Sekunde, den Beobachtungen auch genügen dürfte, wenn man die mit groben Fehlern behafteten von der Rechnung ausschliesst. Andererseits findet J. SCHMIDT auch wieder sehr kleine Zahlen. So für das Erdbeben von Aigion am 26. Dez. 1861 nur 180 m. Man bedenke, dass eine und dieselbe Gegend, welche 1861 von dem letzterwähnten Erdbeben mit kleiner Geschwindigkeit bei grosser Nähe des Herdes betroffen wurde, auch 1870 an dem grossen Mittelmeerbeben mit jedenfalls 10 mal grösserer Geschwindigkeit und dies bei grosser Entfernung des Erdbebenherdes beteiligt war. Diese Differenzen spotten des HOPKINS'schen Gesetzes, sie erfordern, um nach der alten Vorstellungsweise erklärt zu werden, für die Beben mit grosser Geschwindigkeit ganz ungeheuerliche Herdtiefen, eine erhebliche Annäherung an den Erdmittelpunkt, denn ein dort entspringendes Erdbeben würde allerdings an der Erdoberfläche überall gleichzeitig anlangen. Bei unserer neuen Vorstellungsweise aber sind solche Differenzen notwendig, denn die Oberflächengeschwindigkeit ist eben verschieden je nach der Zentrums geschwindigkeit, sie ist mindestens gleich dieser. Wenn wir eine Zunahme der Geschwindigkeit mit der Tiefe für möglich halten, so können wir vom Erdmittelpunkt auch bei den grössten Werten der Geschwindigkeit in respektvoller Entfernung bleiben.

5. Der Beweis des Gesetzes.

Der Satz, dass die Oberflächengeschwindigkeit mindestens gleich der Zentrums geschwindigkeit ist, enthält für die besondere Annahme gleichförmiger Geschwindigkeit auch das HOPKINS'sche Gesetz in sich. Das deutet schon an, dass diesem Satze eine allgemeine Gültigkeit

zukommen wird, dass er gültig bleibt, welches auch das Gesetz der Änderung der Wellengeschwindigkeit mit der Tiefe sei. Und in der That ist der mathematische allgemein gültige Beweis für diesen Satz eigentlich schon geführt durch die in der Einleitung erfolgte Citierung des Sinusgesetzes der Brechung. Unterscheiden wir nämlich genau die drei Arten und Werte von Geschwindigkeit, um die es sich handelt: 1. Die Wellengeschwindigkeit im Centrum, sie werde mit c_1 bezeichnet; 2. Die wahre Wellengeschwindigkeit an der Oberfläche, d. h. das Stück eines Stossstrahls, um welchen die Welle in der Minute weiterrückt, sie werde mit c bezeichnet, und 3. Die scheinbare Oberflächengeschwindigkeit, d. h. das Stück der Erdoberfläche zwischen den Homoseisten zweier aufeinanderfolgender Minuten, sie heisse v . Wählen wir als Repräsentanten der Grösse v in unserer Figur die horizontale Länge z. B. zwischen der vierten und fünften Homoseiste vom Epizentrum an gezählt, als zugehörigen Repräsentanten von c das zwischen denselben Homoseisten in nächster Nähe der Erdoberfläche liegende Strahlstück und als Repräsentanten von c_1 das Stück desselben Strahls vom Centrum bis zum ersten der dasselbe umschliessenden Kreise. Nun erkennt man leicht, dass an der Erdoberfläche Strahl und Einfallslot des Strahls einen ebenso grossen Winkel α einschliessen, als Homoseiste und Erdoberfläche, oder es lässt sich ein rechtwinkliges Dreieck bilden, in welchem die Beziehung stattfindet $v = c/\sin \alpha$. Derselbe Stossstrahl aber, dem an der Erdoberfläche der Einfallswinkel α zukommt, bildet im Centrum mit der Erdbenenaxe einen Winkel α_1 und dem angeführten Sinusgesetz gemäss ist nun: $v = c/\sin \alpha = c_1/\sin \alpha_1$.

Nun verfolge man die Stossstrahlen der Reihe nach, die vom Centrum ausgehen. Der erste mache mit der Erdbenenaxe den Winkel $\alpha_1 = 0$, er trifft die Erdoberfläche im Epizentrum, dort findet sich $v = c_1/0$, d. h. v unendlich gross. Dann folge ein zweiter, der mit der Axe einen kleinen Winkel, etwa $\alpha_1 = 1^\circ$, einschliesse. Wo dieser die Erdoberfläche erreicht, hat v den Wert $v = c_1/\sin 1^\circ$, da $\sin 1^\circ$ eine sehr kleine Zahl ist, so ist v sehr gross in diesem Punkte. Dann folgt der Strahl mit $\alpha_1 = 2^\circ$, dann mit 3° u. s. f. Der Wert von $\sin \alpha_1$ wächst mehr und mehr, also nimmt v ab. Endlich für $\alpha_1 = 90^\circ$ haben wir denjenigen Strahl, der in horizontaler Richtung vom Centrum ausgeht, da für diesen $\sin \alpha_1 = 1$ ist, so wird an der Stelle, wo dieser ausgezeichnete Strahl die Erdoberfläche trifft, $v = c_1$ sein. Weiterhin werden die Winkel α_1 stumpf, der Wert von $\sin \alpha_1$ nimmt wieder ab, also nimmt v wieder zu,

zwar langsam, weil die Stossstrahlen sehr weit auseinandertreten, aber in unendlicher Ferne müsste v wieder unendlich werden wie im Epizentrum.

Also die mathematische Formel für unser Gesetz lautet: $v = c_1/\sin \alpha_1$ und der Beweis dafür lautet: $c/\sin \alpha = c_1/\sin \alpha_1$. Der Satz ist nur an die eine Voraussetzung geknüpft, dass die wahre Wellengeschwindigkeit in unveränderter Tiefe unverändert bleibe, dagegen darf ihre Änderung mit der Tiefe einem beliebigen Gesetze folgen. Das Gesetz bliebe bestehen, selbst wenn die Geschwindigkeit mit der Tiefe abnehmen würde, nur wären dann die Stossstrahlen gegen unten konkav, nur noch ein kleiner Teil derselben würde die Oberfläche erreichen. Da wir aber Ursache haben, eine Zunahme von c mit der Tiefe anzunehmen, so ergibt sich eine Konvexität der Strahlen nach unten, nicht nur der ursprünglich horizontale, sondern nach und nach alle Strahlen kehren sich nach oben. Das ganze Erschütterungsgebiet an der Erdoberfläche zerfällt in zwei Zonen, einen inneren Kreis, für welchen die scheinbare Geschwindigkeit v vom Epizentrum aus abnimmt, und einen äusseren Ring, für welchen v nach aussen hin wächst ins Unbegrenzte, zugleich freilich die Intensität ins Unmerkliche abnimmt. Der innere Kreis ist das Gebiet der direkten Stossstrahlen, der äussere Hof ist das Gebiet der durch Refraktion aus der Tiefe zurückkehrenden Erdbebenenergie. Die kleinste Geschwindigkeit v , welche an der Grenze zwischen beiden Zonen stattfindet, ist ein Mass für die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen in der dunklen Tiefe des Zentrums. Was den bisher nicht berücksichtigten Einfluss der Krümmung der Erdoberfläche betrifft, so muss derselbe hauptsächlich darin bestehen, die langsame Zunahme der Fortpflanzungsgeschwindigkeit v an der Erdoberfläche im äusseren Hof etwas zu verstärken.

6. Der Erdbebenhodograph.¹

Das Gesetz, nach welchem die scheinbare Oberflächengeschwin-

¹ Der Name „Hodograph“ wurde von Hamilton einer Kurve gegeben, welche zur graphischen Darstellung der veränderlichen Geschwindigkeit eines bewegten Punktes dient. Freilich können wir die Geschwindigkeit einer Bewegung von unveränderter horizontaler Richtung nicht durch den Hamilton'schen Hodographen mittelst Vektoren darstellen, aber ebendeshalb ist bei Anwendung des Namens in unserem Sinn keine Begriffsverwirrung zu fürchten.

digkeit sich ändert, erläutern wir am besten mit den oberen Teilen unserer Fig. 1 u. 2. Es sind dort in den Schnittpunkten der homoseistischen Kreise mit der Erdoberfläche Lote errichtet, auf diesen sind der Reihe nach als Masse der Zeit vom Epizentrum aus die Längen 0, 1, 2, 3 u. s. f. abgetragen und durch die so erhaltenen Endpunkte wurde eine stetige Kurve gezogen, der Hodograph. Diese Kurve lässt aus ihrer im einzelnen Punkte grösseren oder geringeren Steigung unmittelbar die Geschwindigkeit v der Erdbebenwelle im darunter liegenden Punkt der Erdoberfläche erkennen. Je steiler an einer Stelle die Kurve ist, um so kleiner ist die entsprechende Geschwindigkeit und umgekehrt, wo die Kurve horizontal ist, ist die Geschwindigkeit unendlich gross, wo konvex nach unten, nimmt die Geschwindigkeit nach aussen ab, wo konkav, nimmt sie zu. Überträgt man eine solche Kurve auf ein, etwa in Quadratcentimeter geteiltes Netz, dessen horizontale Längen Meilen, dessen vertikale Längen Minuten repräsentiren, so kann man für jeden Punkt unter Anlegung eines Lineals in der Tangentenrichtung sogleich ablesen, wieviele Meilen pro Minute dem betreffenden Punkte entsprechen. Der Hodograph der Fig. 1 ist eine Hyperbel, die SEEBACH-MINNIGERODE'sche Hyperbel, welche mit ihren Asymptoten nach demjenigen Punkt der Erdbebenaxe weist, welcher der Zeit des Anfangs der Erschütterung entspricht. Da wir in unserer Fig. 1 als Mass der Zeiteinheit den der Zeiteinheit entsprechenden Weg gewählt haben (0,5 mm ist der konstante Abstand je zweier Homoseisten), so ist die Hyperbel eine gleichseitige und weist ihre Asymptote nach dem Zentrum selbst. In Fig. 2 ist der Hodograph keine Hyperbel mehr, er ist im Epizentrum ebenfalls horizontal und nach unten konvex, der abnehmenden Geschwindigkeit entsprechend, er nähert sich aber schnell der geradlinigen Richtung mit stärkster Steigung, um in einem Wendepunkt aus der konvexen in die konkave Biegung überzugehen, mit welcher er ins Unendliche verläuft, wobei er sich der horizontalen Richtung immer mehr nähert. Verfolgt man im unteren Teil der Figur denjenigen ausgezeichneten Stossstrahl, der das Zentrum in horizontaler Richtung verlässt, bis zur Erdoberfläche und errichtet man in diesem Punkte im oberen Teil der Figur ein Lot, so führt dieses genau auf den Wendepunkt des Hodographen.

Es ist wichtig, die Formänderung des Hodographen zu verfolgen, wenn man den Erdbebenherd näher und näher zur Erdoberfläche verlegt. Es zeigt sich: die beiderseitigen Wendepunkte nähern sich mehr und mehr dem Epizentrum, der nach unten konvexe Teil

der Kurve wird also kleiner; je geringer die Herdtiefe, um so kleiner ist die innere Zone des Erschütterungsgebietes. Fallen aber gar Zentrum und Epizentrum zusammen, so verschwindet der konvexe Teil der Kurve ganz samt dem inneren Erschütterungsgebiet, der Hodograph besteht nur noch aus zwei symmetrischen, nach unten konkaven Ästen, welche im Zentrum ein Eck bilden. Das gibt einen Fingerzeig zur Erklärung der Resultate bei den Messungen der Geschwindigkeiten künstlicher Erdbeben. Bei einer von einem Punkte der Erdoberfläche ausgehenden Erschütterung muss die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Stosswelle von innen nach aussen wachsen, trotz des HOPKIN'schen Dogmas, zu welchem auch ABOT sich bekennt. Je grössere Pulverladungen, um so grössere Entfernungen stehen der Geschwindigkeitsmessung zu Gebote, um so grössere Mittelwerte kommen heraus. Die Gestalt des Hodographen wird also, je nach der Tiefe des Zentrums, eine mannigfaltige sein und sie muss auch, je nach dem Gesetze, nach welchem die Geschwindigkeit der Wellen mit der Tiefe sich ändert, eine verschiedene sein. Es ist sogar wahrscheinlich, dass unsere Figur mit ihren kugelförmigen Wellen und kreisförmigen Strahlen von dem richtigen Gesetze noch ziemlich abweicht, dass also auch unser Hodograph noch nicht die Gestalt hat, welche dem richtigen Gesetze entspricht. Aber welches auch das unbekanntete Gesetz sei, im Epizentrum muss der Hodograph konvex nach unten sein, dann mit wachsender Steigung in einen Wendepunkt verlaufen und hierauf schwach konkav werden, dies folgt einfach aus dem Sinusgesetz bei Annahme irgendwelcher Zunahme der Geschwindigkeit mit der Tiefe. Ehe wenigstens für Ein zentrales Erdbeben eine genügend grosse Anzahl ganz zuverlässiger Zeitbestimmungen gemacht wird, welche die genaue Feststellung der Horizontalhomoseisten und des Epizentrums auf der Landkarte gestatten, welche gestatten, die Entfernungen der einzelnen Orte vom Epizentrum samt den an diesen Orten beobachteten Zeiten in dem Hodographennetze einzutragen und so ein deutliches Gesamtbild der Beobachtungen zu gewinnen, solange wird es auch nicht möglich sein, aus der Form des Hodographen auf das Gesetz der Geschwindigkeitsänderung mit der Tiefe einen gültigen Schluss zu machen. Das dürfen wir nie erwarten, dass in dem Hodographennetze alle Punkte auf eine stetig verlaufende Kurve fallen, dies wird selbst bei der exaktesten Zeitermittlung nie zu erwarten sein. Aber das darf man erwarten, dass bei einer genügend grossen Anzahl von Beobachtungen die in das Netz eingetragenen Punkte sich gleich-

mässig zu beiden Seiten einer stetig verlaufenden Kurve gruppieren werden. Der Hodograph entsteht ja nicht bloss aus den in einer einzigen durch das Zentrum gelegten Vertikalebene liegenden Beobachtungspunkten, er enthält die Beobachtungspunkte der durch die Erdbebenaxe in allen Richtungen gelegten Ebenen in eine einzige Ebene vereinigt. Wenn die Fortpflanzungsgeschwindigkeit vom Zentrum aus in verschiedenen Richtungen und innerhalb derselben Richtung in verschiedenen Teilen infolge von Störungen verschieden ist, so werden doch im Gesamtbilde die Abweichungen bei genügender Zahl von Beobachtungen sich ausgleichen, auf eine Durchschnittskurve führen, welche einen von Störungen befreiten Verlauf des Erdbebens repräsentiert.

7. Die Erdbeben vom 6. März 1872 und 22. Okt. 1873.

Siehe die beigegebenen Hodographennetze auf Taf. VI.

Wenn auch die Zeit der exakten Feststellung eines Erdbebenhodographen noch nicht gekommen ist, in den bestuntersuchten der bekannten Erdbeben dürfte doch soviel Material nicht bloss gesammelt, sondern vollkommen vorbereitet sein, um wenigstens die Frage zu entscheiden, ob der Hodograph eine Hyperbel oder ob derselbe eine Kurve mit Wendepunkten ist, ob das Gesetz von HOPKINS durch die Beobachtungen bestätigt wird, oder ob im äusseren Hof der Erschütterungsgebiete sich eine Zunahme der Oberflächengeschwindigkeit bemerklich macht.

Das beste Material für diese Untersuchung liefert die Bearbeitung des mitteldeutschen Erdbebens vom 6. März 1872 durch von SEEBACH und MINNIGERODE. Es genügt ein Blick auf die Homoseistenkarte des Buches, um sich zu überzeugen, dass in der Gegend Göttingen-Leipzig, 16 Meilen vom Zentrum, die Horizontalhomoseisten auffallend nahe zusammenrücken. Dementsprechend sehen wir auf dem Hodographennetz, wie schlecht sich die Hyperbel den Beobachtungen anschmiegt. Gleich die für die Bestimmung des Epizentrums deswegen am wertvollsten Punkte, weil sie demselben am nächsten liegen, welche untereinander die schönste Übereinstimmung zeigen, müssen für die Konstruktion des hyperbolischen Hodographen verworfen werden, so dass das Erdbeben auf der Oberfläche der Erde erst beginnen darf, nachdem $1\frac{1}{2}$ Minuten vorher an 5 Orten in 5—6 Meilen Entfernung vom Epizentrum faktisch das Erdbeben verspürt worden ist. Bis in die Entfernung 16 Meilen vom Epizentrum lässt die Hyperbel die besten Beobachtungen alle unter sich, von da an verläuft sie vollkommen geradlinig und lässt nun nahezu alle

Punkte über sich, um in der Entfernung von 57 Meilen einen in Breslau gesteckten Grenzpunkt zu erreichen. Wie steht es aber mit diesem Grenzpunkt? In Breslau hat Prof. GALLE um 4^h 5' 25'' Berliner Zeit einen magnetischen Apparat in Schwingungen begriffen angetroffen, ohne Zweifel durch das Erdbeben erschüttert, GALLE erklärt aber ausdrücklich, dass dieser Moment nicht der Moment der Erschütterung war, dass diese möglicherweise 15 Minuten früher stattgefunden haben könne. Warum ist nun die Hyperbel doch genau durch diesen Grenzpunkt geführt, warum darf es nicht 1 oder 2 oder mehrere Minuten früher sein? Antwort, weil sonst die Linie Breslau-Göttingen in ihrer nach unten konvexen, hyperbolischen Fortsetzung einen noch höher liegenden Scheitel der Hyperbel liefern, den berechneten Moment des Beginns des Erdbebens an der Erdoberfläche mit den wirklichen Beobachtungen in noch grösseren Konflikt bringen würde. Wir können SEEBACH und MINNIGERODE deswegen keinen Mangel an Objektivität vorwerfen, sie geben uns im Texte des Buches alle diese Schwierigkeiten zu erkennen, sie gestehen die ungelösten Bedenken, welche die schlechte Übereinstimmung der Hyperbel mit einer Reihe solcher Punkte ihnen verursacht, die durch die Zuverlässigkeit der Berichterstattung und durch die Harmonie ihrer Angaben bei der Bestimmung des Epizentrums sich als besonders wertvoll erweisen. Wenn die Hyperbel als Form des Hodographen durch die Mathematik vorgeschrieben ist, so bleibt keine andere Wahl, als die Beobachtungen so gut oder schlecht es geht, ihr anzupassen. Man muss schon in der Bewertung der Beobachtungen soweit möglich, die Schraube ansetzen, wo eine Andeutung es zulässt, statt des Moments der gegebenen Minute die ganze folgende Minute als zulässig betrachten. Die Zeitbestimmung von Weimar (5,8 Meilen 57,7 Min.) bekommt die Wertnummer 3 (4 die höchste), obgleich sie die Wahrscheinlichkeit einer Verwechslung an der Stirne trägt. Weimar berichtet nämlich den Zeitpunkt des Erdbebens in Hallenser Zeit und gibt auf die Sekunde denselben Moment an, welchen in dem 9 Meilen weiter vom Zentrum entfernten Halle ein Studiosus sorgfältig für Halle festgestellt hatte. Ebenso bekommt Gera (10,7 — 58) die Nummer 3, weil hier ein Professor die Zeit auf dem Telegraphenamt erfragt hatte, während eine Reihe direkter Berichte der Telegraphenämter weder zur Konstruktion der Homoseisten und des Epizentrums, noch zu der des Hodographen gebraucht werden können. Pössneck (5,5 — 55) dagegen, dessen Berichterstatter selbständig 3^h 55' Berliner Zeit ermittelt hat, würde doch wohl eine volle 3 verdienen; denn

wenn seine Turmuhr zu gleicher Zeit 4 Uhr zeigt, während doch Pössneck nicht 5, sondern 7 Minuten Zeitdifferenz gegen Berlin hat, so darf man hieraus nicht auf einen möglichen Fehler des Berichterstatters von 2 Minuten schliessen. Pössneck liegt nämlich nicht östlich, sondern westlich von Berlin und die berichtete Ortszeit ist somit keine im astronomischen, sondern Ortszeit im bürgerlichen Sinn, aus praktischen Rücksichten der Eisenbahnzeit vorgehend.

Wenn wir den gemachten Ausstellungen entsprechende Änderungen am Hodographennetze vornehmen, so fallen nahezu alle Stützen der Hyperbel vor und hinter Göttingen (16,5 — 58,7) weg.

Wie schön dagegen schmiegt sich den Beobachtungen eine Kurve an, deren Scheitel ein Weniges unter 3^h 55' angenommen wird, die nach unten konvex, zwischen 4 und 8 Meilen Entfernung zwischen den Punkten von 3^h 55' und 3^h 56' hindurchpassiert, in etwa 11 Meilen Entfernung mit einer Steigung von 2,5 Meilen pro Minute ihren Wendepunkt erreicht, alsdann in sanft konkavem Bogen, die einen Punkte links, die andern rechts lassend in 36,7 Meilen Entfernung durch den von stud. med. GEROK gelieferten Tübinger Punkt als letzten sicheren Wegweiser hindurchgeht, um noch mehr als eine Minute vor dem festgesteckten Termin in Breslau anzulangen, zuletzt mit einer Geschwindigkeit von vielleicht 15 Meilen pro Minute! Dies ist alles was man für eine vorläufige Bestätigung erwarten kann. Um die Übereinstimmung dieser Kurve mit dem Hodographen auf Taf. V, Fig. 2 noch vollständiger zu machen, müsste man die Geschwindigkeit im Wendepunkt zum Masse der Zeit machen, also die Zeichnung in die Höhe zwei und ein halbmal vergrössern, oder in die Länge auf $\frac{2}{3}$ verkürzen.

Als zweites Beispiel zur Prüfung möge das durch v. LASAULX und KORTUM bearbeitete Erdbeben von Herzogenrath vom 22. Okt. 1873 dienen. Um ein vollkommen unbefangenes Bild zu erhalten, dürfte es sich hier empfehlen, von dem dem Buche beigegebenen Hodographennetze abzusehen und sich selbst diejenigen Punkte, deren Wertnummern 3, 4 und 5 betragen nach den Angaben pag. 123 und 124 in ein Netz einzutragen, was mit Hilfe des im Handel vorkommenden Millimeterpapiers sehr schnell ausführbar ist. Es entsteht hier ein ganz anderes Bild. Ähnlich dem gekrümmten Schweif eines Kometen deuten die Punkte auf eine durchaus nach unten konkave Mittellinie als Hodographen, stark gekrümmt in der Nähe des Epizentrums, schwächer mit zunehmender Entfernung. Die Steigung vom ersten zum zweiten Punkt, und diese Punkte gehören zu

den zuverlässigsten, von 0,37 bis 1 Meile Entfernung vom Epizentrum, beträgt 42 Sekunden, das gibt nur eine Geschwindigkeit von 0,9 Meilen pro Minute. Wenn der Hodograph einen Wendepunkt hat, so kann derselbe nur entweder innerhalb 0 und 0,37 Meilen liegen oder vielleicht auch noch zwischen 0,37 und 1 Meile Entfernung. Jedenfalls weicht das Bild wenig ab von derjenigen Form des Hodographen, die dem Zentrum auf der Oberfläche entspricht, und die innere Erschütterungszone bildet einen Kreis von nicht über 4 km Radius. Sollte das Erdbeben einen ganz oberflächlichen Herd haben, also der Hodograph in ein Eck auslaufen, so müsste sich im Zentrum eine sehr kleine Geschwindigkeit ergeben, da dieselbe in 3 km Abstand schon unter 0,9 Meilen pro Minute, also unter 111 m pro Sekunde beträgt, eine Zahl die schon weit hinter allen Messungen zurückbleibt. Freilich haben ja alle Messungen nur scheinbare Oberflächengeschwindigkeiten bestimmt, die wahre Oberflächengeschwindigkeit muss unter all' den gefundenen Werten liegen. Soviel zeigt ein Blick auf das Netz, dass eine nach unten konvexe Hyperbel den Beobachtungen schlechter entsprechen wird, als der konkave Hodograph. Wie bei der Hyperbel SEEBACH's, so sind es auch bei der von LASAULX gezeichneten gerade die für die Bestimmung des Epizentrums so wichtigen Punkte in nächster Nähe des Epizentrums, welche vollkommen unmöglich werden. Es sind die drei Punkte, welche jeder mit Nummer 4 bewertet alle drei auf dem Netz in einem einzigen Punkt in 0,37 Meilen Entfernung zusammenfallen. Wegen ihrer übereinstimmenden Zeitangaben lieferten sie das Mittel, um auf der Homoseistenkarte die Lage des Epizentrums mit unerreichter Genauigkeit zu ermitteln, und nun, da sie für die Ermittlung des Scheitels des Hodographen vom allerhöchsten Werte sein sollten, muss man sie unter die Asymptote der Hyperbel verweisen und für die Feststellung der Homoseisten und des Hodographen als unbrauchbar weglassen. Und wiederum wie bei SEEBACH's Hyperbel rächt sich die Konvexität der Krümmung auch im äusseren Verlauf des Hodographen, wie dort für Breslau der höchst unwahrscheinliche Grenzwert gewählt werden musste, so fallen hier von 9 Meilen Zentralabstand an alle Punkte, — und es sind deren neun, welche weiter abliegen —, auf die untere Seite der Hyperbel, keiner auf die obere. Das ist doch höchst unwahrscheinlich, dass diese 9 Zeiten alle zu nieder sein sollen, die beste um über eine halbe Minute, zwei mit 4 bewertete um 2 und $2\frac{1}{2}$ Minuten und das mit 3 bewertete Brüssel gar um 3 volle Minuten. Allen kann man natürlich nicht gerecht

werden, aber doch sollte der Hodograph mitten durch den Schwarm hindurchgehen. Dazu aber muss er konkav werden, er muss entgegen dem HOPKINS'schen Satze eine nach aussen wachsende Geschwindigkeit anzeigen. Soviel also dürfte durch die Prüfung des besten der Erdbebenforschung zu Gebote stehenden Materials erwiesen sein, dass die Beobachtungen der bisherigen Vorstellung von einer konzentrischen Ausbreitung der Erdbebenwellen mit geradlinigen Stossstrahlen und dem daraus abgeleiteten Gesetz HOPKINS' sowie der hyperbolischen Gestalt des Hodographen ungünstiger sind als der Vorstellung einer mit der Tiefe zunehmenden Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen mit nach unten konvex gekrümmten Stosslinien und der daraus sich ergebenden Form des Hodographen mit Wendepunkt. Und diese neue Vorstellung ist, wie wir im bisherigen gesehen haben, im stande, die grosse Verschiedenheit der Oberflächengeschwindigkeit bei verschiedenen Erdbeben, die Verschiedenheit der Versuchsergebnisse je nach der Intensität des Anstosses und die erfahrungsmässig verminderte Vernehmbarkeit der Erdbeben mit der Tiefe in einfacher Weise zu erklären, und zwar ohne über das Gesetz der Geschwindigkeitsänderung mit der Tiefe irgend eine bestimmte Annahme zu machen, während die alte Vorstellung mit der Annahme geradliniger Stossstrahlen eine durch nichts gerechtfertigte Hypothese aufstellt.

8. Die Tiefenbestimmung.

Wenn wir das Mass und das Gesetz der Geschwindigkeitsänderung nach unten kennen würden, dann wäre es ein vielleicht zwar kompliziertes, aber ausführbares Problem der Mathematik, die diesem Gesetze entsprechenden Wellen, Strahlen und Hodographen zu entwerfen, die Tiefe des Erdbebenherdes zur Gestalt des Hodographen in Beziehung zu setzen, so dass man die letztere aus den Beobachtungen, die erstere, die Tiefe, durch Zeichnung oder Rechnung finden könnte. In unserer Fig. 2 auf Taf. V sind für die einfachste Annahme, dass die Geschwindigkeitszunahmen den Tiefenzunahmen proportional seien, die Wellenflächen zu Kugeln, die Strahlen zu Kreisen geworden; die Mittelpunkte aller Strahlen liegen in derjenigen Horizontalebene, in welcher bei fortgesetzter Abnahme der Geschwindigkeit nach oben diese zu Null würde. Die Abstände der oberen und unteren Scheitel der Wellenflächen von dieser Null-Ebene bestimmen sich, wie der Verfasser in einer früheren Arbeit¹ gezeigt

¹ Programm des Stuttgarter Realgymnasiums vom Jahr 1878.

hat, durch die Gleichung $y = ae^{-\gamma t}$, wobei a die Herdtiefe unter der Null-Ebene, e die Grundzahl der natürlichen Logarithmen, γ das Mass der Geschwindigkeitsänderung und t die der einzelnen Wellenfläche entsprechende Minutenzahl vorstellen. Bei der Willkürlichkeit dieses Gesetzes kann also die Figur nur eine bessere Annäherung an die Wahrheit geben, als die durch Fig. 1 gegebene Vorstellung. Sollte z. B. der Elastizitätsmodul e , welcher in der früher aufgestellten Geschwindigkeitsgleichung unter der Wurzel steht, der Tiefenzunahme proportional wachsen, so würde dies für die Änderung der Geschwindigkeit c die Bedeutung haben, dass sie in der Nähe der Erdoberfläche rascher erfolgt, als in der Tiefe, die Strahlen würden daher nicht mehr Kreise bleiben, sondern in der Nähe der Erdoberfläche sich stärker krümmen, in der Tiefe weniger. Dies hätte die Wirkung, dass eine aus dem Gesetz unserer Figur berechnete Herdtiefe zu gross würde. Und die sehr rasche Abnahme der Vernehmbarkeit der Erdbeben mit der Tiefe deutet in der That auf eine verhältnissmässig rasche Änderung von c hin unmittelbar unter der Oberfläche. Auch die starke Krümmung des Hodographen des Herzogenrather Erdbebens in der Nähe des Zentrums würde dafür sprechen, wenn man auf die vorliegenden Zeitbestimmungen so gewagte Schlüsse bauen dürfte; ein Fehler von einer Viertelminute in der Bestimmung des ersten oder zweiten Punktes vom Scheitel ab würde die Geschwindigkeit zwischen dem ersten und zweiten Punkte von 0,9 auf 1,4 Meilen pro Minute erhöhen, oder von 111 m auf 175 m pro Sekunde, und ein solcher Fehler ist bei einer Zeitbestimmung auf ganze Minuten sogar zu erwarten. Dann würde aber die Krümmung des Hodographen in der Nähe des Scheitels sich wesentlich vermindern.

Eine zweite Schwierigkeit für die Bestimmung der Herdtiefe liegt im Mangel unserer Kenntnis der wahren Oberflächengeschwindigkeit (nicht der scheinbaren), diese muss jedenfalls kleiner sein, als die schwächsten Pulverladungen bei den Versuchen PFAFF'S, MALLET'S und ABOT'S ergeben haben, denn, wie schon oben gezeigt, müssen diese um so grössere Resultate ergeben, in je weiterer Entfernung vom Zentrum die Messung vorgenommen wird. Würde uns der Hodograph des Herzogenrather Erdbebens, sagen wir nicht auf 111 m, sondern auf 175 m führen, so ist das noch nicht die Geschwindigkeit im Scheitel einer an der Oberfläche entstandenen Erschütterung, sondern es ist die scheinbare Geschwindigkeit in $\frac{1}{2}$ bis 1 Meile Abstand vom Epizentrum bei unterirdischem Ursprung. Und

zu dem allem kommt die Unsicherheit der genauen Gestalt des Hodographen, insbesondere die nicht genau bestimmbare Lage der Abscisse seines Wendepunkts. Ohne eine genaue Anzahl von auf Dezimalen einer Minute genauen Beobachtungen wird die Feststellung der Abscisse des Wendepunkts bis auf einen Kilometer genau nicht ausführbar sein. Trotz alledem bleibt als Anhaltspunkt für eine, wenn auch nur mehr relative, Bestimmung der Herdtiefe die Regel bestehen, dass diese Tiefe um so grösser sein wird, je grösser der Radius der inneren Erschütterungszone, zweifellos stets kleiner als dieser Radius.

Also, da das Herzogenrather Erdbeben eine Wendepunktsabscisse von nicht über 4 km gehabt haben wird, so dürfen wir seine Herdtiefe nicht grösser als 3 km annehmen, als untere Grenze ist der Wert 0 km anzunehmen. KORTUM gibt in dem Werke von LASAULX pag. 120 nach SEEBACH'scher Methode berechnet eine Tiefe von 0,68 Meilen mit einem wahrscheinlichen Fehler von 1,23 Meilen an, also 0—14 km. Für das von SEEBACH und MINNIGERODE bearbeitete Erdbeben zeigt unsere Hodographenzeichnung 11 Meilen Wendepunktsabscisse, man könnte aber je nach der Wertschätzung der Beobachtungen auch den Wendepunkt in 13 Meilen Entfernung verlegen. Als Geschwindigkeit im Wendepunkt dürfte man ebenfalls zwischen Werten von 2,3 und 3 Meilen im Zweifel sein, also zwischen 280 m und 375 m pro Sekunde. Nehmen wir an, diese Zentrumsgeschwindigkeit sei etwa 3 mal so gross als die wahre Oberflächengeschwindigkeit, so müssen wir unter Voraussetzung kreisförmiger Stossstrahlen die Herdtiefe zu etwas über $\frac{2}{3}$ der Wendepunktsabscisse ansetzen und kommen somit zu einem Werte von unter 10 Meilen im Maximum, während ein Minimum sich mittels der Tangente im Wendepunkt feststellen lässt. Um dies zu zeigen, müssen wir noch einmal Fig. 1 und 2 der Vergleichung unterwerfen. Die Tangente an den Wendepunkt in Fig. 2 macht, wie die Asymptote in Fig. 1, einen Winkel von 45° mit dem Horizont, dies rührt daher, weil in beiden Figuren die Zentrumsgeschwindigkeit als Zeitmass benützt wurde. Während in Fig. 1 die Asymptote durch das Zentrum geht, geht in Fig. 2 die Wendepunktstangente über dem Zentrum vorbei. Denken wir uns nun aber die Fig. 2 einer stetigen Änderung unterworfen in der Weise, dass wir die Herdtiefe festhalten, auch die beiden Geschwindigkeiten c_1 im Herd und c an der Oberfläche belassen, dagegen das Geschwindigkeitsgefäll von unten nach oben nicht mehr gleichmässig verteilen, sondern die Geschwindigkeitsänderung mehr und mehr

gegen die Oberfläche verlegen. Die Folge wird sein, dass die Stossstrahlen vom Zentrum aus zunächst unter schwacher Krümmung verlaufen, erst an der Oberfläche sich stärker krümmen, insbesondere wird der Hauptstrahl, welcher das Zentrum in horizontaler Richtung verlässt, seinen Emersionspunkt an der Erdoberfläche mehr und mehr nach aussen verlegen, infolge davon rückt der Wendepunkt des Hodographen mehr und mehr in die Ferne, die Tangente an diesen Wendepunkt mit ihrer Neigung von 45° bewegt sich nach unten, sich selbst parallel bleibend, und, sobald das ganze Geschwindigkeitsgefäll in die Oberfläche selbst verlegt wird, wird der Hodograph zur SEEBACH'schen Hyperbel, die Wendepunktstangente zur Asymptote und geht durch das Zentrum hindurch.

Hieraus folgt wohl zweifellos, dass die Wendepunktstangente unter allen Umständen ein kleineres Stück von der Erdbebenaxe abschneidet, eine kleinere Zahl von Minuten uns liefert, als man nötig hätte, um in dieser Minutenzahl zugleich die Herdtiefe zu erhalten, wie in Fig. 1. In dem Hodographennetz des mitteldeutschen Erdbebens schneidet nun die Wendepunktstangente mindestens ein Stück von 2 Minuten, vom Hodographenscheitel an gemessen, von der Erdbebenaxe ab, und da die im Wendepunkt zu messende Zentrumsgeschwindigkeit bei dieser Herdtiefe mindestens gleich 2,4 Meilen zu setzen ist, so muss die Herdtiefe grösser sein als $2 \times 2,4$, also als 4,8 Meilen, so dass wir berechtigt sind, als untere Grenze volle 5 Meilen zu setzen. Herr v. SEEBACH hat nach MALLET's Methode, und zwar aus einer einzigen Beobachtung der Stossrichtung, die Tiefe zwischen 1,94 und 2,91 Meilen berechnet. Diese MALLET'sche Methode, welche aus durch das Erdbeben erzeugten Mauerrissen und aus der Wurfrichtung umgeworfener Körper auf die Richtung der Stossstrahlen schliesst, muss, wenn die Stossstrahlen krummlinig sind, notwendig zu vollkommen falschen Resultaten über die Tiefe führen. Unsere Fig. 2 zeigt, dass die Tangente an den Emersionspunkt eines Stossstrahls die Erdbebenaxe in einem viel zu tiefen Punkte schneidet, um so mehr, je weiter der Emersionspunkt vom Zentrum entfernt ist. Dass aber Herr v. SEEBACH einen viel zu kleinen Wert für die Tiefe findet, beweist eben, dass aus einer einzigen Beobachtung mit dieser Methode überhaupt nichts abgeleitet werden kann. In der That denke man sich z. B. einen vertikalen Stoss von unten. Ist es denkbar, dass durch einen solchen horizontale Risse in einer Mauer gebildet werden? Unter hundert wohl nicht einer, und doch würde die Verschiedenheit der entstandenen hundert

Richtungen wohl auf eine horizontale Richtung als mittlere hindeuten, also die Gesamtheit der Beobachtungen die Stossrichtung erkennen lassen. Unter Zugrundelegung eines den gegebenen Beobachtungen möglichst gut angepassten Hodographen findet sich also für die Tiefe des Herdes des mitteldeutschen Erdbebens vom 6. März 1872 ein Betrag von über fünf und von unter zehn geographischen Meilen und für das von Herzogenrath vom 22. Okt. 1873 ein Betrag von nicht mehr als 3 km. Es hat sich glücklich geschickt, dass diese zwei deutschen Erdbeben jedes einen eigenen Typus repräsentieren, das Herzogenrath den Typus I mit sehr wenig tiefem Herde, mit verschwindendem inneren Erdbebengebiete, das mitteldeutsche den Typus II mit ziemlich gleichmässiger Ausprägung beider Zonen bei grösserer Herdtiefe, denkbar ist noch ein Typus III mit grosser Herdtiefe, beziehungsweise kleiner Intensität bei nicht zu kleiner Tiefe, bei welchem der Wendepunkt des Hodographen über die Wahrnehmbarkeitszone hinausfällt, der Hodograph also durchaus konvex bleibt. Unter den bisher beobachteten Erdbeben, deren mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit bekannt ist, dürften wir die mit kleiner mittlerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit, die sich alle auch durch ihre geringe lokale Verbreitung auszeichnen, sicher dem Typus I zuzählen.

Hoffen wir, das zunehmende Interesse der breitesten Bevölkerungsschichten an der Erdbebenfrage werde uns künftig mit reichlichem und gutem Beobachtungsmaterial ausstatten, es werden empfindliche Seismographen in Verbindung mit gut gehenden Uhren uns künftig eine immer genauere Feststellung der Stosszeiten, auch die Stossrichtungen und Stossintensitäten nicht ausgeschlossen, ergeben, um auf Grund solcher Beobachtungen einem gewiss vorhandenen Gesetze der Geschwindigkeitsänderung mit der Tiefe experimentell immer näher zu kommen. Besonders liesse sich für Ergründung dieses Gesetzes sehr viel aus der öfteren Wiederholung künstlicher Versuche gewinnen, denn gerade der Hodograph für ein oberflächliches Zentrum würde über die den einzelnen Tiefenstufen zukommenden Fortpflanzungsgeschwindigkeiten die besten Aufschlüsse gewähren.

Fig 1

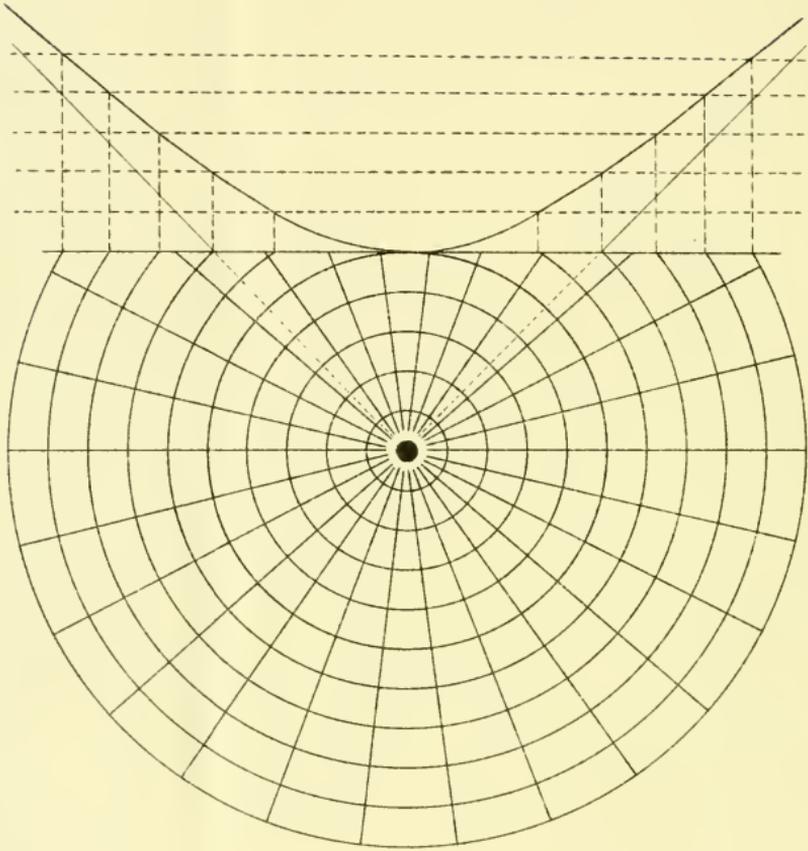
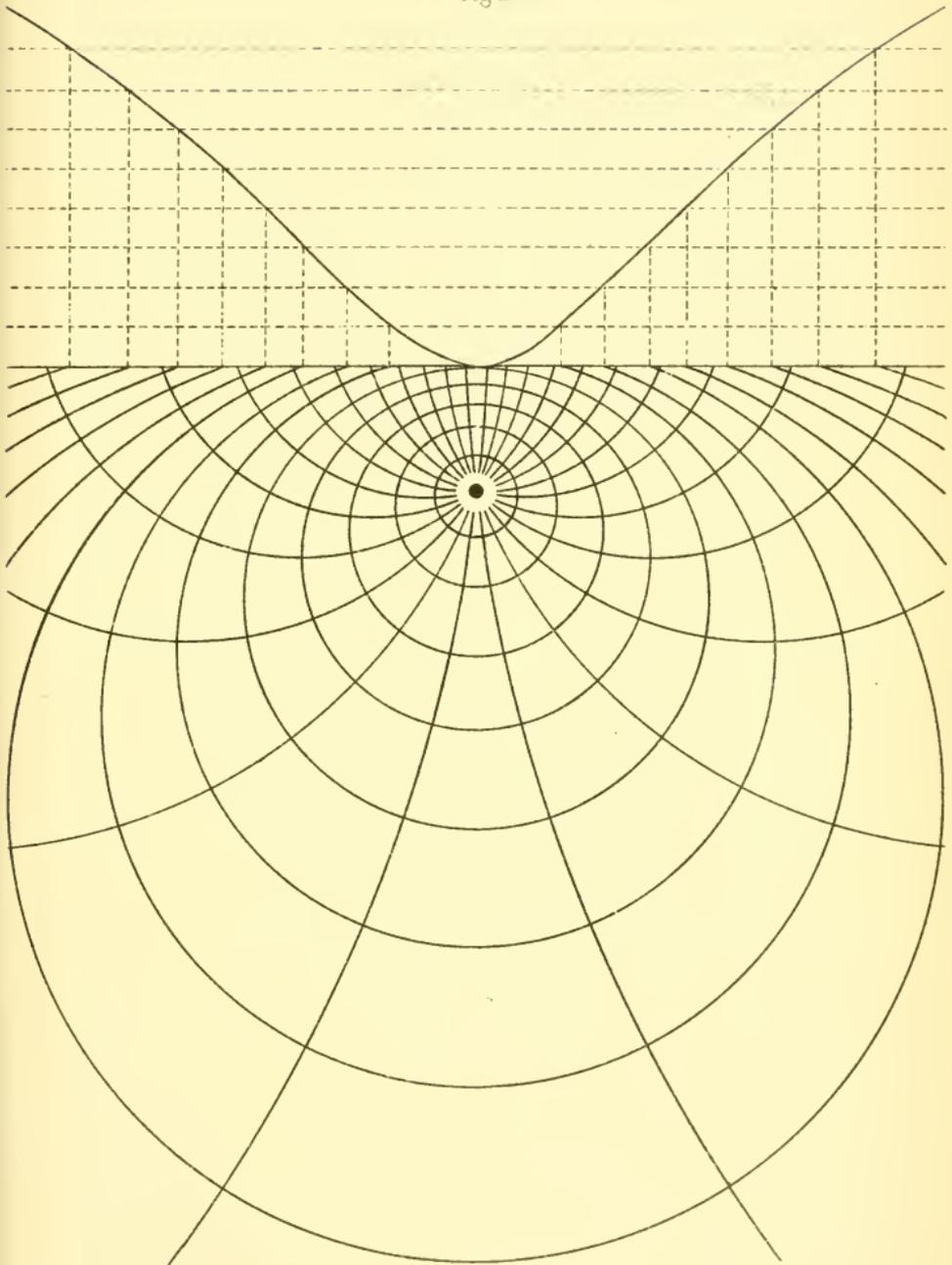
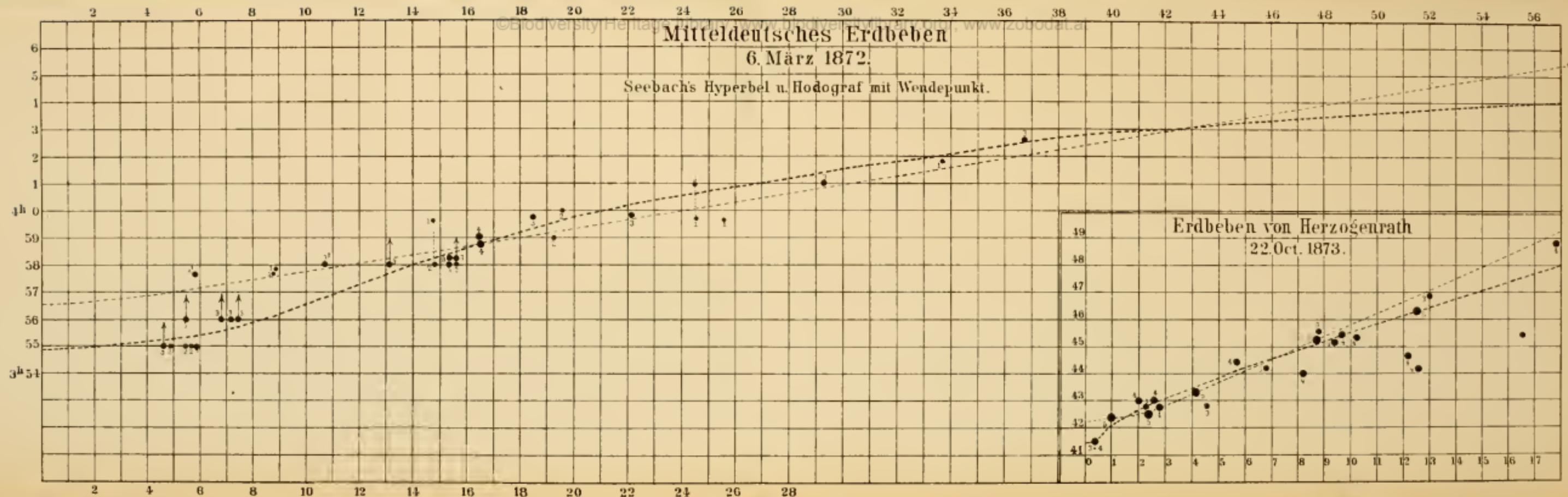


Fig 2





ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Jahreshefte des Vereins für vaterländische Naturkunde in Württemberg](#)

Jahr/Year: 1888

Band/Volume: [44](#)

Autor(en)/Author(s): Schmidt Axel (=A.)

Artikel/Article: [I. Wellenbewegung und Erdbeben. Ein Beitrag zur Dynamik der Erdbeben. 248-270](#)