

Veröffentlichungen
der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena
Herausgegeben vom Direktor **Oscar Hecker**
Heft 5

**Über die Laufzeiten der Vorläufer-
und Wechselwellen bei Erdbeben in
ihrer Beziehung zur Schichtung der
Erdrinde**

Von

G. Krumbach



Jena
Verlag von **Gustav Fischer**
1926

Veröffentlichungen
der Reichsanstalt für Erdbebenforschung in Jena
Herausgegeben vom Direktor **Oscar Hecker**
Heft 5

**Über die Laufzeiten der Vorläufer-
und Wechselwellen bei Erdbeben in
ihrer Beziehung zur Schichtung der
Erdrinde**

Von

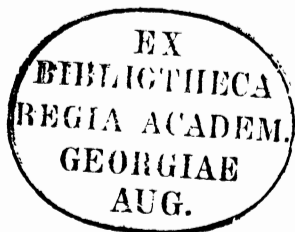
G. Krumbach



Jena
Verlag von **Gustav Fischer**
1926

Inhaltsverzeichnis.

	Seite
I. Weg und Geschwindigkeiten der Vorläuferwellen bei Nahebeben	3
Einleitung. Die Untersuchungsmethoden	3
a) Die Laufzeitkurven des Oppaubebens	5
b) Die Beobachtungsergebnisse bei Nahbeben	7
c) Die Laufzeiten von Erdbebenwellen, welche an Innen- schichten reflektiert werden	8
II. Die Vorläuferwellen bei Fernbeben	13
a) Untersuchungen über Laufzeiten des 1. Vorläufers unter Berücksichtigung von Unstetigkeitsflächen und Herdtiefe .	13
b) Bestimmung einer Referenzfunktion für die S-Welle . .	16
c) Die Wechselwellen	17
Zusammenfassung der Ergebnisse	18



I. Weg und Geschwindigkeiten der Vorläuferwellen bei Nahebeben.

Einleitung. Zur Bestimmung des Weges und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erdbebenwellen im Erdinnern lassen sich zwei Methoden anwenden. Entweder wird unter Zugrundelegung von Annahmen über Wellengeschwindigkeiten innerhalb einzelner Erdschichten versucht, gegebene Laufzeitkurven zu approximieren, oder man schließt aus den Laufzeitkurven direkt auf den Weg der Erdbebenwellen im Erdinnern.

Gerade die zweite direkte Methode zur Strahlberechnung, die Herglotz-Wiechertsche Methode¹⁾, die sich auf die Theorie der Abelschen Integralgleichung stützt, hat außerordentlich viel Verwendung gefunden. Jedoch ergaben die neuesten Erfahrungen²⁾, daß in manchen Fällen das zuerst von E. Wiechert angegebene Näherungsverfahren³⁾ vorzuziehen ist.

Diese Methode, die bei den folgenden Untersuchungen auch wieder ihre Verwendung finden soll, sei hier kurz auseinandergesetzt.

Verfolgen wir einen Erdbebenstrahl auf seinem Weg durch das Erdinnere, so gilt für seinen ganzen Verlauf die Strahlgleichung:

$$\frac{r \cdot \sin i}{v} = c \quad 1)$$

Es ist r der Radius vector vom Erdmittelpunkt nach einem Punkte des Strahles, v die Raumgeschwindigkeit an dieser Stelle, i der Einfallswinkel des Strahles im Sinne der Optik und c eine dem Strahl eigentümliche Konstante (siehe Fig. 1).

Ferner wird die Annahme gemacht, daß es genügt, die Bahnen der Strahlen innerhalb einzelner Schichten als kreisförmig anzusehen.

1) Wiechert-Geiger, Phys. Zeitschr., 1910, S. 294.

2) Vortrag Naturforscherversammlung Leipzig 1922.

3) E. Wiechert, Über Erdbebenwellen I. Nachr. d. Kgl. Ges. d. Wiss. Göttingen 1907.

Die Zulässigkeit dieser Annahmen wird durch die gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen erwiesen.

Es müssen dann für jede Schicht folgende Beziehungen gelten:

$$v = \frac{1}{2} f (R^2 - r^2), \quad (2)$$

wobei v die Raumgeschwindigkeit, $\frac{1}{2} f$ und R^2 allgemeine Konstante sind.

$$\cotg \Delta_{1/2} \cdot \cotg i = C \text{ (Kotangentenprodukt)} \quad (3)$$

Δ ist die an der Oberfläche gemessene Entfernung für einen Strahl. Die Laufzeit für diesen Strahl wird dann nach folgenden Formeln errechnet:

$$T = p \cdot y; \quad p = \frac{2r}{v \sqrt{C^2 - 1}} \quad (4)$$

$$\text{Sin } y = \sqrt{C^2 - 1} \sin \Delta_{1/2}$$

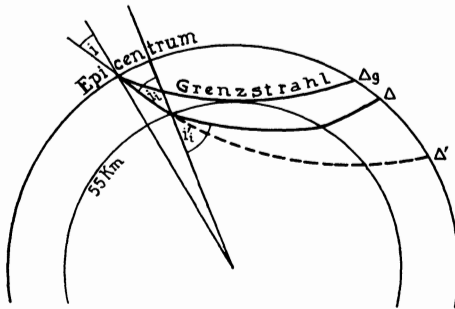


Fig. 1.

Unter Benutzung dieser Formeln gelangt man zu einer außerordentlich günstigen „Referenzfunktion“ bei folgenden Annahmen¹⁾:

1. Oberflächen- und Raumgeschwindigkeit am Herde: $v = 7,390$.
2. $\sqrt{C^2 - 1} = 4,3$ (Bestimmung der Geschwindigkeitszunahme).
3. Konstante Geschwindigkeit im Erdinnern für Oberflächenentfernungen $\Delta > 53^\circ$.
4. $\Delta > 102^\circ$: Geradliniger Verlauf der Laufzeitkurve. (Beugung der Wellen am Kern.)

Die Berechnungsmethoden, die auch in den Veröffentlichungen „Über Erdbebenwellen I—VII“²⁾ zur Verwendung gelangten, sollen hier im einzelnen nicht wiederholt werden. Die durchgeführte

1) E. Wiechert, Naturforscherversammlung Leipzig 1922.

2) Nachr. d. Kgl. Ges. d. Wiss., Göttingen.

Rechnung ergibt folgende Zusammenhänge mit der Mohorovičić-Laufzeitkurve¹⁾, wenn $\delta = T_{Wie} - T_{Moh}$.

Δ	2°	7°	10°	20°	30°	40°	50°
δ	-3,2	+0,1	+1,2	-0,2	-2,5	+2,3	-0,8
Δ	60°	70°	80°	90°	100°		
δ	-1,6	-0,8	+0,4	+0,9	-0,1		

Aus dieser Gegenüberstellung sieht man sofort, daß sich die verwendete Näherungsmethode außerordentlich gut bewährt. Die Referenzkurve paßt sich in ihrem allgemeinen Verlauf bis auf die Beobachtungsgenauigkeit den wirklichen Ergebnissen an. Andererseits läßt sich wieder aus dieser guten Übereinstimmung auf sehr einfachen Bau der Erde schließen, da die Annahmen zur Aufstellung der Referenzfunktion denkbar einfach sind.

Die größeren Abweichungen im Anfangsbereich sind darauf zurückzuführen, daß zur Aufstellung der Referenzfunktion für die oberen Schichten keinerlei besondere Annahmen gemacht worden sind, sondern die Anfangsgeschwindigkeit durch Extrapolation gewonnen ist.

Eine Verbesserung der Referenzfunktion wird unter Berücksichtigung der Oberflächenverhältnisse gewonnen werden. Man wird bei den verhältnismäßig geringen Abweichungen die Annahmen über den Hauptverlauf der Strahlen, wie er sich oben ergeben hat, unverändert lassen und zur Berücksichtigung der Rindenschicht eine kleine Korrektur anbringen.

Aus dieser Erwägung heraus erhebt sich jetzt die Frage nach dem Aufbau der Erdkruste. Welche von den Ergebnissen sind für Untersuchungen des Verlaufes der Erdbebenwellen bei Fernbeben zu berücksichtigen?

a) Die Laufzeitkurven des Oppaubebens.

Einen ungemein wichtigen Beitrag zur Erforschung der Ausbreitung von Erdbebenwellen in den obersten Erdschichten liefert die unheilvolle Explosionskatastrophe von Oppau am 21. Sept. 1921. Hier haben wir einen oberflächlichen Herd, dessen Koordinaten genau festliegen.

Aus den instrumentellen Beobachtungen, die bis zu einer Entfernung von 360 km vorliegen, ergibt sich nach O. Hecker²⁾

1) A. Mohorovičić, Agram 1921.

2) O. Hecker, Veröffentlichung der Hauptstation für Erdbebenforschung Jena, 1922.

eine mittlere Fortpflanzungsgeschwindigkeit der ersten Welle von $5,73 \pm 0,04$ km/sec. Schon im September 1922 veröffentlichte C. Zeissig¹⁾ eine neue Bearbeitung des Materiales mit dem Wert $v_0 = 5,6$ km/sec. Im Anschluß an die Arbeiten von Zeissig und unter Verwertung des Materiales der mitteleuropäischen Beben vom 16. November 1911 und 20. Juli 1913 gelangt Gutenberg²⁾ zu dem gleichen Ergebnis $v_0 = 5,6$ km/sec.

De Quervain³⁾ erhält bei einer Neubearbeitung der Aufzeichnungen eine Explosionszeit 7 Uhr 32 Min. 12,5 Sek. Wir erhalten dann eine starke Zunahme der Oberflächengeschwindigkeit mit wachsender Herdentfernung von 4,8 km/sec bei 26 km auf 5,5 km/sec. bei ca. 300 km Herdentfernung. Die nicht unerheblichen Abweichungen bei den einzelnen Autoren in bezug auf Herdentfernungen und Oberflächengeschwindigkeiten veranlaßten mich zu einer Neubestimmung der Daten.

Ich fand, zum Teil etwas abweichend von O. Hecker, folgende Werte:

Station	Herd- entfernung	Laufzeit	Mittlere Oberflächen- geschwindigkeit
Heidelberg	26 km	6 sec	4,33 km/sec.
Feldberg	78 "	14 "	5,57 "
Hohenheim	106 "	18 "	5,88 "
Straßburg	114 "	19 "	6,00 "
Nördlingen	167 "	30 "	5,56 "
Ravensberg	212 "	39 "	5,43 "
Zürich	239 "	41 "	5,82 "
Göttingen	250 "	$\left\{ \begin{array}{l} P_n \\ \bar{P} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 5,95 \\ 5,43 \end{array} \right.$ "

Die Werte der Entfernungen sind in fast völliger Übereinstimmung mit den Werten von de Quervain. Legt man jetzt durch die Beobachtungen eine Gerade, so erhält man als Herdzeit 7 Uhr 32 Min. 16 Sek. und eine mittlere Oberflächengeschwindigkeit $v_0 = 5,66$ km/sec. Auf Grund dieser Herdzeit finden wir die in obiger Tabelle enthaltenen Laufzeiten und Ausbreitungsgeschwindigkeiten.

Die Abweichungen von einer mittleren Laufzeitkurve sind bei den herdnahen Stationen besonders groß. Diese Erscheinung ist durchaus erklärlich, da sich bei diesen nahen Entfernungen die

1) C. Zeissig, Naturforscherversammlung Leipzig 1922.

2) B. Gutenberg, Zeitschr. f. angew. Geophysik, 1923.

3) De Quervain, Jahresberichte d. Schweizer Erdbebendienstes, 1922.

Wellen in ganz oberflächlichen Schichten ausbreiten, so daß örtliche geologische Einflüsse eine nicht unbedeutende Rolle spielen können. Es scheint aber auch ganz allgemein zu gelten, daß die Wellen sich in den obersten Schichten auch ohne Einfluß besonderer geologischer Verhältnisse sehr viel langsamer ausbreiten als in den wenig tiefer gelegenen Schichten.

b) Die Beobachtungsergebnisse aus Nahbeben.

Mit Hilfe der bisher gewonnenen Ergebnisse soll jetzt die Tiefenzunahme der Geschwindigkeiten im Erdinnern bestimmt, weiter sollen Rückschlüsse auf den Aufbau der Erdrinde gewonnen werden.

Aus der Erscheinung der zwei Einsätze des ersten Vorläufers bei Nahbeben (normale und individuelle Primae) schließt Mohorovičić¹⁾ auf eine in 50—60 km Tiefe liegende Unstetigkeitsfläche, an der ein Geschwindigkeitssprung von 5,8 auf 7,9 km/sec stattfinden soll.

Durch neuere Untersuchungen von Gutenberg²⁾ wird dieses Resultat bestätigt, die Tiefe dieser Fläche zu 55 km, der Sprung von 5,9 zu 7,9 km/sec bestimmt.

Wenden wir jetzt das oben entwickelte Verfahren zur Annäherung der Laufzeitkurve an unter Berücksichtigung der vorliegenden Ergebnisse $v_0 = 5,66$ km/sec und $v_{55} = 5,9$ km/sec (entsprechend Gutenberg und Mohorovičić), so erhalten wir folgende Laufzeitkurve:

Δ	$\frac{1}{2}^\circ$	1°	$1,5^\circ$	2°	$2,5^\circ$	3°	$3,5^\circ$
T	9,82	19,63	29,44	39,23	48,98	58,71	68,40
Δ	4°	$4,5^\circ$	5°	$5,5^\circ$	6°	$6^\circ 16' 40''$	
T	78,04	87,63	97,17	106,65	116,06	121,08	

Diese Kurve paßt sich durchaus den Beobachtungen der Oppaukatastrophe an.

Die Entfernung $6^\circ 16' 40''$ entspricht dem Grenzstrahl, dem Strahl, der die Unstetigkeitsfläche in 55 km Tiefe streift.

Nach dieser Rechnung erhalten wir also bei oberflächlichem Herd als Grenze der individuellen Primae, der Wellen, die innerhalb der obersten Schicht laufen, eine Entfernung von 700 km. Bei Beben mit tiefer gelegenen Herden muß die Grenzentfernung kleiner sein, so z. B. bei 55 km Herdtiefe nur 350 km. Auffällig ist daher, daß die Lauf-

1) Mohorovičić, Gerlands Beiträge, Bd. 13.

2) B. Gutenberg, Zeitschr. f. Geophysik. loc. cit.

zeitkurven der \bar{P} -Welle bei den mitteleuropäischen Beben¹⁾ und auch beim Beben vom 8. 10. 1908²⁾ noch bis 700 und mehr km verfolgt werden können.

c) Laufzeiten von Erdbebenwellen, welche an Innenschichten reflektiert werden.

Bei Sprengversuchen des Geophysikalischen Institutes Göttingen wurden Einsätze im Diagramm beobachtet, welche auf eine tiefer gelegene Unstetigkeitsfläche schließen ließen. Diese müßte dann nach E. Wiechert³⁾ in ca. 140 km Tiefe liegen; sie entspräche der von Mohorovičić⁴⁾ aus den Laufzeitkurven gewonnenen Diskontinuitätsfläche und wäre dann in guter Übereinstimmung mit der isostatischen Ausgleichsfläche.

Die Untersuchungen über diese anscheinend vorhandene Fläche sollen auf Grund der gefundenen Ergebnisse über den Aufbau der Rinde weiter durchgeführt werden.

Der in Göttingen beobachtete Einsatz wurde bei 16 km Herdentfernung nach 42 Sekunden aufgezeichnet. Will man diesen Einsatz als Reflektion im Erdinnern deuten, so kann man bei der geringen Herdentfernung die Annahme machen, daß einfallender und reflektierter Strahl zusammenfallen. Die Laufzeit für ein derartiges Strahlenpaar ist, wenn die Reflektion in der Tiefe $h = r_0 - r_1$ erfolgt:

$$2t = \frac{2}{Rf} \left[\lg \frac{R+r}{R-r} \right] r_0 r_1$$

unter Verwendung der oben erwähnten Formeln.

So ergibt sich für einen Strahl, der von der Oberfläche ausgeht und in 55 km Tiefe reflektiert wird, die Laufzeit $2t = 19,01$ Sek.

Für die Untersuchung des Strahlverlaufes in größerer Tiefe werden die Geschwindigkeitsverteilungen aus Nahe- und Fernbebenbeobachtungen aufgetragen. Wird der von Mohorovičić und Gutenberg gefundene Geschwindigkeitssprung von 5,9 auf 7,9 km/sec in 55 km Tiefe als gültig angenommen, so zeigt das Diagramm der

1) B. Gutenberg, Die mitteleuropäischen Beben von 1911 und 1913. Zentralbüro, Straßburg 1910.

2) A. Mohorovičić, Jahrb. d. Meteorol. Obs., Zagreb 1909.

3) E. Wiechert, Nachr. d. Kgl. Ges. d. Wiss. Göttingen, 1924.

4) S. Mohorovičić, Gerlands Beiträge, Bd. 14, S. 188.

Geschwindigkeitsverteilung (Fig. 2), daß man in größeren Tiefen als 55 km zunächst ohne wesentlichen Fehler mit konstanter Geschwindigkeit rechnen kann.

Die gesuchte Schichtdicke wäre dann:

$$2h = (42 - 19) \cdot 7,9 \text{ km}$$

$$h = 90,85 \text{ km}$$

und die Gesamttiefe:

$$H = 146 \text{ km.}$$

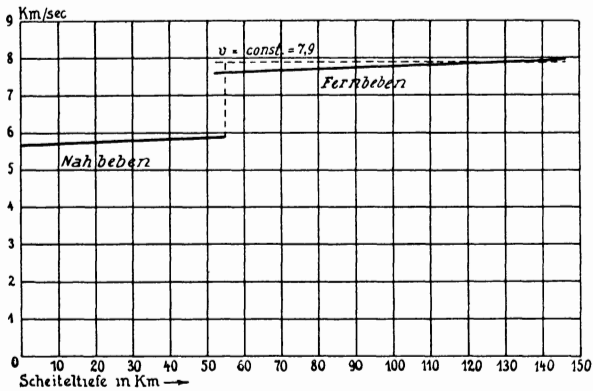


Fig. 2.

Dieses Ergebnis führt zu einem ähnlichen Wert, wie bei der Annahme von E. Wiechert. Auffallend bleibt jedoch der kleine Geschwindigkeitssprung von 7,9 auf 8,0 km/sec in 146 km Tiefe.

Es ist jetzt möglich, auch für eine beliebige Herdentfernung die Laufzeit der in 146 km Tiefe reflektierten Wellen zu berechnen.

Die Daten für die Verhältnisse innerhalb der Rinde seien noch einmal kurz zusammengefaßt. Es ist:

1. Die Oberflächengeschwindigkeit $v_0 = \text{const.} = 5,66 \text{ km/sec}$ bis 250 km Herdentfernung.

2. Die Tiefe der ersten Unstetigkeitsfläche $h = 55 \text{ km}$ Geschwindigkeitssprung von 5,9 auf 7,9 km/sec.

3. Die Tiefe der vielleicht vorhandenen zweiten Unstetigkeitsfläche $H = 146 \text{ km}$.

4. $v_{55} \text{ km} = v_{146} \text{ km} = 7,9 \text{ km/sec}$.

Unter diesen Bedingungen ergeben sich die Konstanten für die Näherungsformel:

Oberfläche: $r_0 = 6371 \text{ km}$; $v_0 = 5,66 \text{ km/sec}$
 $\frac{1}{2} f = 4,439 \cdot 10^{-7}$; $R^2 = 5704,8 \cdot 10^4$
 $p = 385,0$; $\sqrt{C^2-1} = 5,85$.

Der Gang der Rechnungen für die einzelnen Strahlen ist der übliche, wie er in der Veröffentlichungsfolge „Über Erdbebenwellen“ des öfteren durchgeführt ist.

Es ergibt sich, daß Strahlen, deren Verlauf scheinbaren Oberflächenentfernungen Δ' von $18^\circ 58' 40''$ bis $19^\circ 31'$ entspricht, innerhalb der 55—146 km-Zone ihren Weg nehmen. Strahlen mit rechnerisch größeren scheinbaren Entfernungen dringen tiefer als 146 km ein, bzw. werden reflektiert (Fig. 1).

Die Durchführung der Rechnungen führt dann zu folgender Tabelle:

Δ Herdentfernung in km	\bar{P}	P_R	S_R	$P_R - \bar{P}$	$S_R - \bar{P}$
0	0	42	75,1	42	75,1
20	3,5	42,3	75,6	38,8	72,1
40	7,1	42,7	76,3	35,6	69,2
60	10,6	43,2	77,2	42,6	66,6
80	14,1	43,7	78,1	49,9	64,0
100	17,7	44,5	79,6	26,8	61,9
20	21,2	45,5	81,4	24,3	60,2
40	24,7	46,5	83,1	21,8	58,4
60	28,3	47,5	84,9	19,2	56,6
80	31,8	49	87,6	17,2	55,8
200	35,3	50,5	90,3	15,2	55
20	38,9	52,0	93	13,1	54,1
40	42,4	54	96,6	11,6	54,2
60	45,9	56	100,1	10,1	54,2
80	49,4	58	103,7	8,6	54,3
300	52,6	60	107,3	7,4	54,7
400	.	69,1	123,5	.	.

Laufzeiten der im Innern reflektierten Wellen.

Es sind bis 300 km Herdentfernung die Laufzeit des 1. Vorläufers \bar{P} und die der in 146 km Tiefe reflektierten P-Welle (P_R) und S-Welle (S_R) zusammengestellt worden.

Die Werte für die Reflektion des 2. Vorläufers sind aus der Bedingung $T_S : T_P = 1,789$ gewonnen. Die Ausdehnung der Untersuchung auf die Laufzeiten des 2. Vorläufers geschah auf eine Anregung von G. Angenheister im Geophysikalischen Colloquium, Göttingen, als dort E. Wiechert auf das Auftreten von Wellen hinwies, die eine Reflektion des 1. Vorläufers in der Tiefe anzuzeigen scheinen. Aus der obigen Laufzeitabelle ergeben sich fol-

gende Einsatzzeiten für die reflektierten Wellen bei dem Oppau-
diagramm :

Station	Ent- fer- nung	Herdzeit	T _{Pr}	T _{Sr}	Einsatzzeit	
					P _R	S _R
Heidelberg	26	7 ^h 32 ^m 16 ^s	42,4	75,8	7 ^h 32 ^m 58,4 ^s	7 ^h 33 ^m 31,8 ^s
Feldberg	78		43,6	78,0	59,6 ^s	34 ^s
Hohenheim	106		44,8	80,1	33 ^m 00,8 ^s	36,1 ^s
Straßburg	114		45,2	80,8	01,2 ^s	36,8 ^s
Nördlingen	167		48	85,8	04,0 ^s	41,8 ^s
Ravensberg	212		51,4	91,9	07,4 ^s	47,9 ^s
Zürich	239		53,9	96,4	09,9 ^s	52,4 ^s
Göttingen	250		55	98,4	11,0 ^s	54,4 ^s
München	282		58	103,7	14,0 ^s	34 ^m 00 ^s

Beide Wellen treten im Göttinger Diagramm auf. Dies war die Grundlage zur Fortführung der Untersuchungen. Weitere Einsätze werden bei Hohenheim (S_R), Straßburg (S_R), Nördlingen (S_R), Zürich (S_R), München (S_R) beobachtet (vgl. Kurven in der Veröffentlichung von Hecker)¹⁾.

Die Übereinstimmung mit den Einsätzen ist recht gut, obwohl gerade der Ansatz $T_S : T_P = 1,789$ für oberflächliche Schichten sehr unsicher ist.

Es liegt jetzt nahe, die für Oberflächenherde durchgeführte Betrachtung zu verallgemeinern. Wir untersuchen daher die Verhältnisse für eine mittlere Herdtiefe von 55 km, wie sie von verschiedenen Autoren angenommen wird.

Als Beobachtungsmaterial werden die Ergebnisse über die beiden mitteleuropäischen Beben²⁾ verwendet, die außerordentlich umfangreiche und sorgfältige Beobachtungen, besonders für die nahen Herdentfernungen, enthalten. Als Herdzeit wird in Übereinstimmung mit Gutenberg 21^h 25^m 49^s angenommen und es werden die in der Gutenbergschen Zusammenstellung angegebenen Beobachtungen in das Schema eingetragen.

Nach den Auswertungen von Gutenberg liegen zwischen P_n und \bar{P} eine Reihe Einsätze (i), die sich nach der Gutenbergschen Bearbeitung einer Kurve (a) anpassen, die sich zum Teil als erste Reflektion des 1. Vorläufers deuten läßt. Es werden jetzt aus den obigen Daten die Laufzeitkurven für \bar{P} ; P_R; S_R aufgestellt. Wir erhalten folgendes Laufzeitschema.

1) O. Hecker, loc. cit.

2) B. Gutenberg, loc. cit.

Δ km	\bar{P}	P_R	S_R	Δ km	\bar{P}	P_R	S_R
0	09 sec	33 sec	59 sec	300	53 sec	52 sec	92 sec
20	11 "	33 "	59 "	50	61 "	57 "	101 "
40	12 "	34 "	60 "	400	69 "	62 "	112 "
60	14 "	34 "	61 "	50	.	68 "	123 "
80	17 "	35 "	62 "	500	.	74 "	134 "
100	20 "	36 "	63 "	600	.	86 "	.
50	28 "	38 "	69 "	700	.	98 "	.
200	36 "	42 "	76 "	800	.	110 "	.
50	45 "	47 "	84 "	900	.	122 "	.

Die so gewonnenen Kurven werden in das Beobachtungsschema eingetragen. Da fast gleiche Annahmen wie bei Gutenberg zugrunde gelegt werden, so stimmt die \bar{P} -Kurve sehr gut mit der Gutenbergschen Kurve für Nahbeben überein.

Die S_R -Kurve liegt im Bereich der Hauptphase und ist daher sehr schwer zu identifizieren.

Dann aber gewinnt es den Anschein, als ob die zwischen P_n und \bar{P} gelegenen Beobachtungen sich um die früher erhaltene a -Kurve und um die neu aufgestellte P_R -Kurve gruppierten. Bei sehr vielen Stationen liegen zwischen den Einsätzen für P_n und P die beiden Kurven entsprechenden Einsätze. Die Wiedergabe der Kurven in der Gutenbergschen Arbeit läßt eine in diesem Sinne vorgenommene weitere Untersuchung nicht zu (Fig. 3).

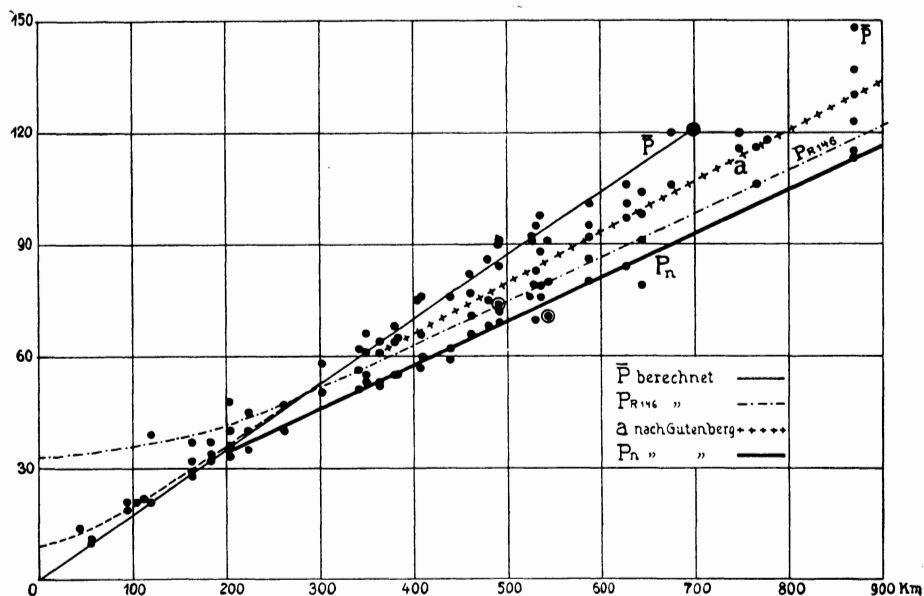


Fig. 3.

II. Die Vorläuferwellen bei Fernbeben.

a) Untersuchungen über Laufzeiten des 1. Vorläufers unter Berücksichtigung von Unstetigkeitsflächen und Herdtiefe.

Die in dem vorigen Abschnitt durchgeführten Betrachtungen für den 1. Vorläufer führten zu dem Ergebnis, daß in der Rinde zwei Unstetigkeitsschichten zu vermuten sind mit folgenden Geschwindigkeitssprüngen:

$$\begin{aligned} h = 55 \text{ km } v_o &= 5,9 \quad v_u = 7,9 \text{ km/sec} \\ h = 146 \text{ km } v_o &= 7,9 \quad v_u = 8,0 \quad ,, \end{aligned}$$

Für die Untersuchung von Fernbebenwellen ergibt sich schon aus dem oben aufgestellten Geschwindigkeitsdiagramm für die obersten Schichten, daß der vielleicht vorhandene Geschwindigkeitssprung bei 146 km Tiefe so gering ist, daß er bei Bestimmung des Gesamtverlaufes der Strahlen unberücksichtigt bleiben kann.

Es werden daher jetzt, wie anfangs erwähnt, die Verhältnisse für die Strahlen nach der Referenzfunktion Wiechert 1922 unterhalb 55 km Tiefe unverändert gelassen. Oberhalb dieser Grenze gelten dann die im 1. Abschnitt hergeleiteten Gesetzmäßigkeiten für die Rindenschicht. Hierbei ist jedoch zu bedenken, daß zunächst der Geschwindigkeitssprung bei 55 km Tiefe nicht 5,9 : 7,9 zu setzen ist, sondern dem Wert der Referenzfunktion W. 1922 entsprechen muß. Wir werden daher mit einer Abweichung im Ergebnis zu rechnen haben, die dann ausgeglichen werden muß.

Die Konstanten für die Grenzschicht werden nach dem anfangs ausgeführten Näherungsverfahren ermittelt. Es ergibt sich: $c_i = 4,2602$; $v_i = 7,608$. An der Sprungstelle (siehe Fig. 1) gilt dann die Bedingung nach dem Brechungsgesetz:

$$\begin{aligned} \sin i_i' &= \frac{7,608}{5,9} \sin i_i = 1,289 \sin i_i \\ \text{oder } \sin i_i &= 0,77580 \sin i_i' \end{aligned}$$

Für den Grenzwinkel der Totalreflektion ist $\sin i_i' = 1$, d. h. Strahlen mit kleinerem Einfallswinkel als $50^\circ 42' 40''$ dringen in die untere Schicht ein. Bei der Rechnung werden die Anteile der Strahlen unterhalb der 55 km-Schicht berechnet. Die Reflektionsbedingung ergibt die $\sin i_i'$ -Werte für die Rindenschicht, aus denen dann die Rindenwerte für den Strahl ermittelt werden. Aus den Rechnungen ergibt sich folgender Zusammenhang.

Berechnung der Rindenwerte als Funktion der Einfallswinkel.

i_i	Δ_R	T_R	i_i	Δ_R	T_R
48° 18' 27"	1° 03' 34"	27,87	47° 38' 54"	1° 02' 12"	27,56
15' 38"	03' 12"	27,78	35' 53"	02' 04"	27,53
12' 48"	03' 26"	27,79	32' 12"	01' 58"	27,45
09' 18"	03' 24"	27,9	28' 55"	01' 52"	27,45
05' 54"	03' 14"	27,8	23' 50"	01' 36"	27,75
02' 27"	02' 48"	27,72	46° 36' 20"	1°	26,99
00' 03"	02' 28"	27,69	39° 31' 45"	0° 46' 54"	24,26
47° 55' 39"	02' 42"	27,61	34° 08' 20"	44' 10"	23,71
51' 54"	02' 22"	27,57	29° 43' 17"	32' 54"	21,71
49' 27"	02' 48"	27,54	26° 14' 28"	29' 54"	21,32
45' 30"	02' 24"	27,52	23° 21' 02"	24' 52"	20,63
42' 18"	02' 20"	27,52	20° 56' 44"	22' 08"	20,37
			18° 54' 04"	19' 48"	20,05

Zusammensetzung der Kurven.

Δ_i	i_i'	Δ_R	Δ	T	T_R	T	$\frac{\Delta}{100}$ km	T_{Moh}	δ
30°	50° 52' 40"	1° 07'	1° 37'	7,24	28,4	35,6	1,8	.	.
1°	50° 49' 43	1° 06' 45	2° 06' 45	14,49	28,3	42,8	2,33	34,8	8,0
2°	50° 41'	1° 06' 30"	3° 06' 35"	28,95	28,2	57,2	3,45	49,0	8,2
3°	50° 26' 40	1° 06'	4° 06'	43,39	28,1	71,5	4,55	62,9	8,6
4°	50° 07'	1° 05' 30"	5° 05' 30"	57,74	28,0	85,7	5,65	76,9	8,8
5°	49° 42' 16	1° 05'	6° 05'	72,07	28,0	100,1	6,75	90,8	9,3
6°	49° 12' 48	1° 04'	7° 04'	86,26	27,8	114,1	7,84	104,7	9,4
7°	48° 39' 12	1° 03'	8° 03'	100,33	27,5	127,8	8,93	118,6	9,1
8°	48° 01' 54	1° 02'	9° 02'	114,29	27,4	141,7	10,03	132,2	9,5
9°	47° 21' 14	1° 01'	10° 01'	128,08	27,2	155,3	11,13	146,0	9,3
10°	46° 37' 51"	1°	11°	141,75	27,0	168,8	12,22	159,7	9,1
15°	42° 31'	0° 53'	15° 53'	207,36	25,7	233,1	17,65	225,2	7,9
20°	38° 20' 11	46' 10"	20° 41' 10"	267,99	24,0	292,0	23,08	286,6	5,4
25°	34° 20'	40'	25° 21'	323,25	23,5	346,8	28,52	342,6	4,2
30°	30° 44' 40"	34'	30° 34'	373,41	22,5	395,9	33,98	392,1	3,8
35°	27° 35' 55"	30'	35° 30'	418,92	21,7	440,6	39,46	434,2	6,4
40°	24° 21' 46"	26'	40° 26'	460,11	21,0	481,1	44,93	473,4	7,7
45°	22° 29' 16"	23' 30"	45° 23' 30"	497,6	20,7	517,3	50,43	510,8	6,5
50°	20° 24' 20"	21' 00"	50° 21'	531,73	20,3	552,0	55,94	545,9	6,1

Vergleicht man die aus den Rechnungen gewonnene Laufzeitkurve mit der Mohorovičić-Tabelle, so beträgt die Abweichung fast immer 9 Sek., was der Laufzeit von 55 km Tiefe bis zur Oberfläche entspricht. Im Bereich von 25—30° ist die Abweichung geringer. Diese Unregelmäßigkeit zeigt sich auch schon in der Arbeit über das Erdinnere (Wiechert 1922)¹⁾. Die Unstimmigkeit deutet auf eine Unregelmäßigkeit in der Laufzeitkurve. Mohorovičić²⁾ selbst hat sie erkannt und in seiner ersten Arbeit über die normalen P-Wellen darauf hingewiesen.

1) E. Wiechert, Naturforscherversammlung Leipzig.

2) A. Mohorovičić, Bull. des travaux de la classe des sciences mathématiques, Zagreb 1914.

Schon bei der Eingangsbetrachtung für die neue Referenzfunktion wurde erwähnt, daß eine kleine Korrektur erforderlich wurde wegen Verwendung eines Geschwindigkeitssprunges 5,9 : 7,6 anstelle von 5,9 : 7,9, wie die Nahebebenbeobachtungen verlangen.

In einer Entfernung von ca. 40°, der kritischen Entfernung für die Unstetigkeitsfläche von 1250 km Tiefe beträgt der Laufzeitunterschied zwischen den betrachteten Kurven 7,7 sec. Um auch hier die Anpassung an die Mohorovičić-Kurve in der oben erwähnten Form zu erzielen, ist eine Geschwindigkeitsänderung um weniger als ein 1 Proz. erforderlich. Der Einfluß dieser Korrektur wird wegen des kleinen Betrages für den allgemeinen Verlauf recht unbedeutend sein.

Die Berücksichtigung dieser Korrektur ergibt folgende neue Konstanten für die Innenschicht:

$$p = 402,56; v_1 = 7,571.$$

Die Veränderung ist also ganz geringfügig. Mit diesen neuen Werten werden die Rechnungen jetzt wiederholt. Es ergeben sich folgende Zusammenhänge:

Δi	$\sin i_i'$	$\sin i_i$	i_i	ΔR	Δ	T_i	T_R	T	$\Delta/_{100}\text{km}$	T_M	δ
30'	0,999827	0,779285	51° 11' 43"	1° 08' 00"	1° 38' 00"	7,27 28,8	36,1				
1°	0,99931	0,77888	51° 09' 30"	1° 07'	2° 07'	14,55 28,4	43,6	2,35	35,0	8,0	
2°	0,99724	0,77727	51° 01' 40"	1° 06' 45"	3° 06' 45"	29,06 28,3	57,4	3,45	49,0	8,4	
3°	0,99381	0,77460	50° 46' 06"	1° 06' 30"	4° 06' 30"	43,56 28,2	71,9	4,56	63,1	8,8	
4°	0,98911	0,77093	50° 26' 15"	1° 06'	5° 06'	57,97 28,1	86,1	5,66	77,0	9,1	
5°	0,98314	0,76628	50° 01' 10"	1° 05'	6° 05'	72,30 28,0	100,3	6,76	91,0	9,2	
6°	0,97597	0,76069	49° 31' 30"	1° 04' 40"	7° 04' 40"	86,59 28,0	114,6	7,85	104,8	9,8	
7°	0,96769	0,75424	48° 57' 30"	1° 03' 50"	8° 03' 50"	100,72 27,8	128,5	8,95	111,7	9,8	
8°	0,95838	0,74698	48° 19' 45"	1° 03'	9° 03'	114,73 27,5	142,2	10,06	132,6	9,6	
9°	0,94813	0,73899	47° 38' 44"	1° 01' 30"	10° 01' 30"	128,58 27,0	155,8	11,14	146,1	9,7	
10°	0,93702	0,73033	46° 54' 21"	1°	11°	142,30 27,0	169,3	12,22	159,7	9,6	
15°	0,87218	0,67979	42° 49' 38"	54'	15° 54'	208,16 26,0	234,2	17,67	225,4	8,8	
20°	0,79954	0,62318	38° 32' 54"	46'	20° 46'	269,03 24,5	293,5	23,11	287,0	6,5	
25°	0,72701	0,56665	34° 31' 30"	42'	25° 42'	324,50 23,5	348,0	28,55	342,8	6,2	
30°	0,65894	0,51359	54° 12' 30"	36'	30° 36'	374,86 22,5	397,4	34,00	392,3	5,1	
35°	0,59716	0,46544	27° 44' 19"	32'	35° 32'	420,55 21,5	442,1	39,48	434,3	7,8	
40°	0,53172	0,41443	24° 29'	27'	40° 27'	461,90 21,0	482,9	44,94	473,6	9,3	

Das Ziel der vorigen Betrachtung ist nahezu erreicht, es liegt liegt eine Referenzkurve für die P-Wellen vor mit einer Abweichung von 9 ± 1 sec von der Mohorovičić-Kurve. Die beiden Kurven unterscheiden sich also in ihrem ganzen Verlauf um die Laufzeit des Weges von 55 km Tiefe bis zur Oberfläche. Eine Ausnahme bilden wie früher die Werte bei 30° Herdentfernung.

Zum Schluß sei auch die Referenzkurve bei Annahme einer mittleren Herdtiefe von 55 km aufgestellt. Wir erhalten dann die Zusammenhänge:

Δ_i	$\Delta_{R/2}$	Δ	T_i	$T_{R/2}$	T	$D/_{100}$	T_{moh}	δ
30'	34' 00"	1° 04' 00"	7,27	14,40	21,7	.	.	.
1°	31'	1° 33'	14,55	14,2	28,7	.	.	.
2°	33' 22"	2° 33' 22"	29,06	14,51	43,2	2,84	41,3	+ 1,9
3°	33' 15"	3° 33' 15"	43,56	14,05	57,7	3,95	55,4	+ 2,3
4°	33'	4° 33'	57,97	14,0	72,0	5,06	69,5	+ 2,5
5°	32' 30"	5° 32' 30"	72,3	14,0	86,3	6,16	83,4	+ 2,9
6°	32' 20"	6° 32' 20"	86,59	13,9	100,6	7,27	97,5	+ 3,1
7°	31' 55"	7° 31' 55"	100,72	13,75	114,6	8,37	111,3	+ 3,3
8°	31' 30"	8° 31' 30"	114,73	13,6	128,5	9,47	125,3	+ 3,2
9°	30' 45"	9° 30' 45"	128,58	13,5	142,2	10,57	139,0	+ 3,2
10°	30'	10° 30'	142,30	13,0	155,8	11,68	152,9	+ 2,9
15°	27'	15° 27'	208,16	12,25	221,2	17,17	219,8	+ 1,7
20°	23'	20° 23'	269,03	11,75	281,3	22,6	282,0	- 0,7
25°	21'	25° 21'	324,50	11,25	336,3	28,17	339,2	- 0,9
30°	18'	30° 18'	374,86	10,75	386,1	33,67	389,6	- 3,5
35°	16'	35° 16'	420,55	10,5	431,3	39,20	432,2	- 0,9
40°	13' 30"	40° 13,5'	461,90	14,1	472,4	44,70	471,9	+ 0,5

Die aus obiger Tabelle gewonnene Kurve liegt weit unter der früheren Kurve. Die empirisch gefundene Kurve ist fast erreicht.

b) Bestimmung einer Referenzfunktion für die S-Welle.

Nach der Aufstellung der Referenzfunktion für die \bar{P} -Wellen dürften nach der Theorie für die Aufstellung einer S-Kurve keine nennenswerten Schwierigkeiten zu erwarten sein. Wie wir früher schon gesehen hatten, ergab sich aus theoretischen Erwägungen heraus, daß das Verhältnis der Geschwindigkeiten der beiden Wellengruppen innerhalb großer Bereiche als konstant anzusehen ist.

Das Verhältnis der Laufzeiten ist aber nach den Beobachtungen keineswegs konstant. Innerhalb der ersten 4000 km Herdentfernung finden wir Unterschiede des Quotienten $T_S : T_P$ um ca. 4 Proz. Nach Mohorovičić¹⁾ treten folgende Werte auf:

Δ : 1500 km	2000 km	2500 km	3000 km	3500 km	4000 km
$T_S : T_P$ 1,80	1,79	1,77	1,76	1,76	1,77

Eine Abweichung von 2 Proz. im Bereich von 40° Herdentfernung bedeutet aber bereits einen Unterschied in der Laufzeit von ca. 10 Sec.

Wir sehen hier also eine Schwierigkeit für die Entwicklung einer einwandfreien Referenzfunktion für die S-Welle aus den Daten der P-Welle, da zu bedenken ist, daß selbst geringe Abweichungen der P-Kurve schon erhebliche Abweichungen bei der S-Kurve bedingen

1) A. Mohorovičić, Zagreb 1921.

Für Betrachtungen über den Verlauf der S-Welle müssen daher die ganzen Verhältnisse in gleicher Weise untersucht werden wie für die P-Welle.

c) Die Wechselwellen.

Bei der Untersuchung von Erdbebendiagrammen treten in größeren Entfernungen, etwa zwischen 30° und 40° im Bereiche des 2. Vorläufers zwei scharfe Einsätze hervor. Der zweite dieser Einsätze soll sich nicht als eine der Reflektionen deuten lassen, bei dem nach der Ablenkung der Strahl denselben Charakter besitzt wie vor der Reflektion. Nach Geiger¹⁾ gehören diese Wellen zur Gruppe der „Wechselwellen“, einer Wellenart, die bei den Reflektionen an der Erdoberfläche oder an einer im Innern gelegenen Unstetigkeitsfläche ihren Charakter ändert, d. h. einen Teil ihres Weges longitudinal und nach der Reflektion den anderen Teil des Weges transversal zurücklegt. Die Deutung der im Bereich des 2. Vorläufers gelegenen Phase als „Wechselwelle“ schien bisher sichergestellt. Zu einer anderen Auffassung gelangt man bei der Benutzung der Klotzschens²⁾ Seismologischen Tabellen.

Bei der graphischen Darstellung der Laufzeitfunktionen fällt sofort ins Auge, daß eine vor dem 2. Vorläufer gelegene Phase als PS-Kurve, als Wechselwelle, angesprochen wird. Eine den Göttinger Auffassungen entsprechende Kurve ist nicht angegeben.

Bei den Entfernungen $\Delta = 18,5^\circ$ beträgt die Zeitdifferenz $T_S - T_{SP}$ ungefähr 42 Sek. und bei $\Delta = 110^\circ$ ungefähr 9 Sek. Einen genauen Überblick ergeben die in beifolgender Zeichnung angegebenen Kurven der S- und PS-Phase. Zur Klärung der prinzipiellen Frage über die Laufzeit der Wechselwelle genügt es, mit einer Referenzkurve ähnlich der Wiechertschen Kurve 1922 und einer daraus entwickelten S-Funktion zu arbeiten. Es werden die günstigsten Resultate für die S-Funktion erzielt unter Annahme eines Mittelwertes für das Geschwindigkeitsverhältnis $v_P : v_S = 1,775$. Dieser stellt den geeignetsten Ausgleich der Mohorovičić-Werte dar. Wir haben dann die Oberflächengeschwindigkeiten $v_P = 7,390$; $v_S = 4,164$ km/sec. Hieraus folgt die Reflektionsbedingung an der Oberfläche:

$$\sin i_P : \sin i_S = 1,775.$$

Im Grenzfall haben wir daher $\sin i_S = 1/1,775$. Der Anteil der Transversalwelle beträgt dann ca. 35° für die Gesamtherdentfernung,

1) Über Erdbebenwellen I. Göttingen 1907.

2) O. Klotz, Ottawa 1916.

d. h. die Wechselwelle kann erst bei 35° Herdentfernung beginnen. Wir sehen schon hier das starke Überwiegen der Transversalwelle, das durch das Reflektionsgesetz bedingt ist.

Die Klotzsche Annahme über das Auftreten der Wechselwellen bei der Herdentfernung von 20° steht daher nicht im Einklang mit den aus theoretischen Betrachtungen gewonnenen Ergebnissen.

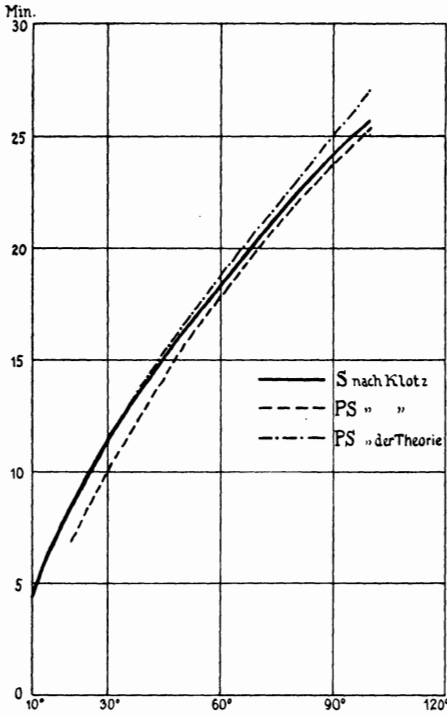


Fig. 4.

Berechnet man unter obigen Annahmen eine Laufzeitfunktion für die Wechselwellen, so zeigt sich, daß diese im Gegensatz zur Auffassung von Klotz hinter derjenigen für die S-Welle liegt. Da die verwendete sehr roh entwickelte Referenzkurve für die S-Welle zunächst nur als Hilfskurve zur prinzipiellen Lösung der Frage zur Verwendung kam, soll von einer tabellarischen Veröffentlichung der berechneten Daten abgesehen werden. Die Abweichungen von der empirischen Kurve sind trotz der Verwendung vereinfachter Referenzkurven sehr gering.

Zusammenfassung.

1. In den Bearbeitungen des Materials der Oppaukatastrophe treten bei O. Hecker und De Quervain nicht unerhebliche Abweichungen auf. Es wird daher eine neue Berechnung der Stationsentfernungen durchgeführt und die Laufzeitkurve neu bestimmt ($v_0 = 5,66$ km/sec).

2. Eine Fortführung der Untersuchungen über eine in ca. 140 km Tiefe scheinbar vorhandene Unstetigkeitsfläche ergibt in 146 km Tiefe den auffallend geringen Geschwindigkeitssprung von 7,9 auf

8 km/sec bei Annahme einer konstanten Geschwindigkeit von 7,9 km/sec im Bereich von 55—146 km Tiefe.

3. Es wird die Berechnung einer Laufzeitkurve vorgenommen unter Abtrennung einer Rindenschicht von 55 km Dicke und unter Berücksichtigung der Herdtiefe.

4. Im Gegensatz zu der Klotzschens Auffassung (Ottawa 1916), nach der der Beginn der Wechselwellen auf ca. 20° Herdentfernung und deren Laufzeitkurve vor die der Transversalwelle gelegt wird, wird der Beginn der Wechselwellen aus theoretischen Erwägungen bei ca. 35° Herdentfernung bestimmt. Die einzelnen Einsätze liegen hinter den entsprechenden Einsätzen der S-Welle. Die Göttinger Anschauung (1907) ist durchaus bestätigt, sowie eine sehr gute Übereinstimmung der Theorie mit den neuesten Beobachtungsergebnissen gefunden worden.

Frommannsche Buchdruckerei (Hermann Pohle) in Jena
