SUB | NIEDERSÄCHSISCHE STAATS- UND UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK GÖTTINGEN

Werk

Jahr: 1936
Kollektion: fid.geo
Signatur: 8 GEOGR PHYS 203:12
Digitalisiert: Niedersächsische Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen
Werk Id: PPN101433392X_0012
PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X_0012

LOG Id: LOG_0064
LOG Titel: Die Grundlagen zur Beurteilung von Verkehrserschütterungen
LOG Typ: article

Übergeordnetes Werk

Werk Id: PPN101433392X
PURL: http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN101433392X
OPAC: http://opac.sub.uni-goettingen.de/DB=1/PPN?PPN=101433392X

Terms and Conditions

The Goettingen State and University Library provides access to digitized documents strictly for noncommercial educational, research and private purposes and makes no warranty with regard to their use for other purposes. Some of our collections are protected by copyright. Publication and/or broadcast in any form (including electronic) requires prior written permission from the Goettingen State- and University Library.
Each copy of any part of this document must contain there Terms and Conditions. With the usage of the library's online system to access or download a digitized document you accept the Terms and Conditions.
Reproductions of material on the web site may not be made for or donated to other repositories, nor may be further reproduced without written permission from the Goettingen State- and University Library.

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

Contact

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

Die Grundlagen zur Beurteilung von Verkehrserschütterungen

Von **H. Martin**, Jena — (Mit 8 Abbildungen)

Es werden die Grundlagen erörtert, die für die Beurteilung der Schädlichkeit von Verkehrserschütterungen zu berücksichtigen sind. Nach einem Hinweis auf die Nichtübereinstimmung der Stärkegrade in den dynamischen Erdbebenskalen wird der Verlauf der Fühlbarkeitsgrenze des Menschen gegenüber Erschütterungen im Gebiete von 0.3 bis 100 Hertz, wie er sich aus Messungen mit Hilfe von Schüttelplatten ergeben hat, angegeben. Die dynamische Skala von Galitzin zur Schätzung von makroseismischen Bewegungen wird durch eigene Versuche erweitert. Auf den Einfluß der Eigenschwingungen des Bodens und der Resonanzschwingungen von Gebäuden wird hingewiesen.

§ 1. Die Erdbebenskalen. Als die Meßtechnik mit Hilfe von transportablen Erschütterungsmessern Verkehrserschütterungen sauber aufzunehmen in der Lage war, beurteilte man die Schädlichkeit einer Erschütterung auf Grund der Beschleunigungswerte, wie sie sich in den absoluten Erdbebenskalen vorfanden. Dabei stellte es sich jedoch sehr bald heraus, daß die bei Erschütterungsmessungen ermittelten Beschleunigungswerte eine geringere Schädlichkeit aufwiesen als man nach den Erfahrungen der Erdbebenkunde hätte erwarten müssen. Hierüber habe ich bereits 1930 zusammenfassend berichtet*). Da aber auch heute noch bei der Beurteilung von Verkehrserschütterungen immer wieder auf die Erdbebenskalen zurückgegriffen wird, seien zunächst einige Worte über die Erdbebenskalen ganz allgemein gesagt.

Tabelle 1. Rossi-Forel Skala of Earthquake Intensities

I. *Mikroseismik shock*: recorded by a single seismograph or by seismographs of the same model, but not by several seismographs of different kinds; the shock felt by an experienced observer.
II. *Extremely feeble shock*: recorded by severel seismographs of different kinds; felt by a small number of persons at rest.
III. *Very feeble shock*: felt by several persons at rest; strong enough for the direction or duration to be appreciable.
IV. *Feeble shock*: felt by persons in motion; disturbances of movable objects, doors, windows; creaking of ceilings.
V. *Shock of moderate intensity*: felt generally by everyone; disturbance of furnture, beds, etc., ringing of swinging bells.
VI. *Fairly strong shock*: general awakening of those asleep; general ringing of house bells; oscillation of chandeliers; stopping of pendulum clocks; visible agitation of trees and shrubs; some startled persons leave their dwelling.
VII. *Strong shock*: overthrow of movable objects; fall of plaster; ringing of church bells; general panic, without damage to buildings.
VIII. *Very strong shock*: fall of chimneys, cracks in walls of buildings.
IX. *Extremely strong shock*: partial or total destruction of some buildings.
X. *Shock of extreme intensity*: great disaster, buildings ruined, disturbance of the strata, fissures in the ground, rockfalls from mountains.

*) H. Martin: Technische Seismik in Wien-Harms, Handb. d. Experimentalphysik **25**, Teil III, Leipzig 1930, S. 296—302.

Ch. Davison*) hat in zwei Veröffentlichungen das Material über die Erdbebenskalen zusammengestellt. Seine Tabelle der seismischen Intensitätsskalen,

Tabelle 2

	Verfasser	Jahr	Charakterisierung der Skala	Anzahl der Stärkegrade	Einordnung der Stärkegrade in die Rossi-Forel Skala
1	Pignataro	1783	P	5	2—10
2	Brooks	1811	P	6	1—10
3	Egen	1828	A	6	1— 8
4	Macfarlane	1839	P	10	1— 8
5	Petermann	1856	A	5	2— 9
6	Mallet I	1858	A	3	7—10
7	Mallet II	1862	A	5	1—10
8	Williamson	1870	P	6	.....
9	Saderra Masò	1870	P, A	6	2—10
10	Rossi	1874	A	10	1—10
11	Naumann	1878	P	9	3—10
12	Forel	1881	A	10	1—10
13	Mercalli I	1883	A	6	2—10
14	Rossi-Forel	1884	A	10	1—10
15	Johnston-Lavis	1885	A	3	8—10
16	Rockwood	1886	P, A	6	2—10
17	Powell	1886	A	5	2—10
18	Holden	1888	D	9	1— 9
19	Taramelli-Mercalli	1888	A	10	2—10
20	Davison	1889	A	9	1— 8
21	Barata I	1892	A	7	1—10
22	Masato	1892	A	4	1—10
23	Riccò	1893	A	6	1— 9
24	Suess	1896	A	10	1—10
25	Mercalli II	1897	A	10	1—10
26	Oldham	1899	A	6	2—10
27	Sekiya	1899	A	3	3—10
28	Omori I	1900	D	7	7—10
29	Cancani	1904	D	12	1—10
30	Hall	1907	A	6	3—10
31	Wood	1908	A	5	7—10
32	Cornish	1908	A	11	1—10
33	Baratta II	1910	A	10	1—10
34	Milne	1911	A	3	8—10
35	Sieberg	1912	A	12	1—10
36	McAdie	1915	D	10	1—10
37	Reid-Taber	1919	A	10	1—10
38	Omori II	1920	P	6	3— 8
39	Wood-Neumann	1931	A	12	1—10

*) Ch. Davison: Skales of Seismik Intensity, Bull. of the Seismol. Society of America **11**, 93—129 (1921); **23**, 158—166 (1933). In jüngster Zeit ist noch eine weitere Zusammenstellung von V. Bychovskij erfolgt: The Skales of Seismik Intensity, Acad. des sciences de l'union republ. soviétiques social. Moskau 1936, Nr. 36.

verglichen mit der Rossi-Forel-Skala [R.-F.-Skala*)] ist in Tabelle 2 wiedergegeben.

Die Tabelle 2 ist noch nicht ganz vollständig, da noch zwei Skalen fehlen (siehe unten). In der Tabelle 2 sind neben der Anzahl der Stärkegrade drei Klassen von Skalen unterschieden, und zwar:

Klasse P — persönliche Skalen — die Einteilung erfolgt nach persönlichem Gutdünken des betreffenden Bebenbearbeiters, z. B. sehr leicht, mäßig usw.

Klasse A — willkürliche Skalen, die auf Übereinkunft beruhen —. Es fehlt insofern an Genauigkeit, weil beispielsweise die Bauweise der Häuser in den einzelnen Ländern verschieden ist und sich deshalb die Stärkegrade verschieden auswirken.

Klasse D — absolute oder dynamische Skalen — Benutzung der maximalen Beschleunigungswerte, die auf instrumentellen Aufzeichnungen beruhen.

Zu den 39 Skalen ist ganz allgemein zu sagen, daß einmal einige von ihnen nur zur Bearbeitung eines einzigen Bebens Verwendung gefunden haben, und daß zum anderen dabei nur vier Skalen mit absolutem Charakter enthalten sind. Mit diesen allein wollen wir uns beschäftigen, da wir in diesem Zusammenhang die quantitative Seite der Erdbebenerscheinungen ins Auge fassen wollen. Allerdings müssen wir

Tabelle 3

Holden Skala, 1888

Degree of the Rossi-Forel Scale		Max. Beschleunigung in mm/sec²
I.	mikroseismik shok	bis 20
II.	extremely feeble shock	40
III.	very feeble shock	60
IV.	feeble shock	80
V.	shock of moderate intensity	110
VI.	fairly strong shock	150
VII.	strong shock	300
VIII.	very strong shock	500
IX.	extremely strong shock	1200
X.	shock of extreme intensity	über 1200

Omori, 1900

Stärkegrad	R.-F.		
I.	VII.	arrêt des pendules	bis 300
II.	VIII.	cheminées d'usine sont intactes en général	900
III.		chute d'un quart des cheminées d'usine	1200
IV.	IX.	chute des toutes les cheminées d'usine	2000
V.	X.	destruction totale de 3% de maison en bois	2500
VI.		destruction totale de 50 à 80% de maison en bois	4000
VII.		destruction totale de touts les édifices	über 4000

*) Siehe z. B. Bull. of the Seismol. Soc. of America **11**, 94 (1921).

Cancani, 1904

Stärkegrad		Max. Beschleunigung in mm/sec²
I.	instrumental	0—2.5
II.	very slight	2.5—5.0
III.	slight	5—10
IV.	sensible or moderate	10—25
V.	rather strong	25—50
VI.	strong	50—100
VII.	very strong	100—250
VIII.	ruinous	250—500
IX.	disastrous	500—1000
X.	very disastrous	1000—2500
XI.	catastrophe	2500—5000
XII.	enormous catastrophe	5000—10000

McAdie, 1915

I.	instrumental	1—10
II.	feeble	10—25
III.	slight	25—50
IV.	moderate	50—100
V.	some damage	100—250
VI.	strong	250—500
VII.	much damage	500—1000
VIII.	disastrous	1000—2500
IX.	catastrophic	2500—5000
X.	absolute ruin	5000—10000

McAdie, 1930

I.	earthquake detectible only by instruments	0.01—0.05
II.	very feeble	0.05—0.1
III.	feeble	0.1—0.5
IV.	noticeable but no damage	0.5—1
V.	felt generally	1—5
VI.	slight damage	5—10
VII.	walls cracked	10—100
VIII.	badly built houses destroyed	100—500
IX.	violent; much destruction and loss of live	500—1000
X.	catastrophic	1000—10000

Japanische Skala, 1932

0.	no feeling	R.-F. I.	bis 5
I.	slight	II., III.	5—20
II.	rather weak	IV.	20—80
III.	weak	V., VI.	80—320
IV.	rather strong	VII.	320—1280
V.	strong	VIII.	1280—5120
VI.	violent	IX., X.	über 5120

diese vier absoluten Skalen noch durch zwei weitere*) ergänzen. Auf diese Weise erhalten wir die Zusammenstellung in Tabelle 3. Entsprechend dem Material, welches als Unterlage für die Aufstellung der absoluten Skalen geführt hat, werden einmal schwächere Beben (Holden 1888), zum anderen stärkere Beben (Omori 1900) bevorzugt.

Eine nähere Betrachtung der sechs Skalen in Tabelle 3 zeigt, daß hinsichtlich der Charakterisierung doch recht erhebliche Unterschiede auftreten. Dies ist am deutlichsten zwischen den Skalen von McAdie 1930 und der japanischen Skala von 1932 der Fall. Denn auf den Grad 0 der letzteren kommt bei McAdie eine Unterteilung in 4 bis 5 Stärkegrade. Weiterhin ist in Tabelle 3 wesentlich, daß teilweise dieselbe Charakterisierung in den einzelnen Skalen ganz verschiedenen absoluten Beschleunigungswerten entspricht. Somit geben selbst die absoluten Erdbebenskalen alles andere als ein einheitliches Bild.

§ 2. Vorschlag von Zeller. Zur Beurteilung der Schädlichkeit von Verkehrserschütterungen ist von den dynamischen Erdbebenskalen die von Mercalli-Cancani in der Bearbeitung von A. Sieberg**) oft herangezogen worden. Jedoch zeigte es sich dabei, daß, wie schon erwähnt, den gemessenen Beschleunigungswerten größere Schäden an den Häusern hätten entsprechen müssen, wenn man die den Beschleunigungswerten aus dieser Skala zugeordneten Stärkegrade ins Auge faßte***). Ganz besonders sind hier die von Grunmach †) seinerzeit gemessenen Beschleunigungswerte zu nennen, die sich nicht einordnen ließen und auf die wir später noch zurückkommen werden. Da zeigte Zeller ††) einen Weg, mit genügender Begründung auch die Verwendung der Erdbebenskalen zur Beurteilung von Verkehrserschütterungen nutzbar zu machen. Ausgehend vom Arbeitswerte einer Schwingung führte Zeller den Begriff des Erschütterungsfaktors $\varkappa$ ein, welcher definiert ist durch

$$\varkappa = b_m^2 \cdot T.$$

Darin ist b_m die Maximalbeschleunigung und T die Schwingungsdauer der zu untersuchenden Bodenbewegung. Damit war eine bessere Übereinstimmung der bei Verkehrserschütterungen auftretenden Beschleunigungswerte mit der Mercalli-Cancani-Skala zu erzielen. Allerdings mußte man den Erdbebenschwingungen eine mittlere Schwingungsdauer von etwa 0.3 Sekunden zu Grunde legen. Da-

*) A. Mc Adie: A serviceable Scale for Earthquake Intensity, Eastern Section of the Seismol. Soc. of Am. Proc. of the 1930 Meeting. Washington, S. 54—56. — M. Ishimoto: Echell d'intensité sismique et accélération maxima. Earthqu. Res. Inst. Tokyo, Imp. University **10**, 614—626 (1932).

**) A. Sieberg: Erdbebenkunde, S. 102—104, Jena 1923.

***) H. Martin: s. a. a. O.

†) L. Grunmach: Experimentaluntersuchung zur Messung von Erschütterungen, S. 18, Tabelle S. 98/99, Berlin 1913.

††) W. Zeller: Praktische und theoretische Untersuchung von Schwingungsmessern zur Aufnahme und Beurteilung von Verkehrserschütterungen. Zeitschr. f. Bauwesen **80**, 171—184 (1930).

durch erhielt man aber etwas andere Werte für $\varkappa$ als sie Zeller selbst in seiner Skala angegeben hat, wobei er eine mittlere Schwingungsdauer der Erdbebenwellen von 40 Sekunden verwendete.

§ 3. Die vorläufigen Grundsätze zur Feststellung von Verkehrserschütterungen. Da der Zellersche „Erschütterungsgrad" nicht allgemeine Anerkennung fand und auch andere Beurteilungsmöglichkeiten nicht von der Hand zu weisen waren, wurden 1932 vom Ausschuß „Verkehrserschütterungen" der Studiengesellschaft für Automobilstraßenbau zur einheitlichen Kennzeichnung von Verkehrserschütterungen drei Vorschläge gemacht, die nebeneinander gelten und von denen nach praktischer Erprobung der beste ausgewählt werden sollte. Die drei Vorschläge waren die folgenden:

1. Vorschlag von Prof. Dr.-Ing. Risch: Die Erschütterung K wird berechnet aus der an der Meßstelle je Zeit- und Masseneinheit auftretenden Schwingungsenergie, wobei der Erschütterungsgrad sich nach der Formel

$$K = b_m^2 \cdot T$$

berechnet. Tabelle 4 zeigt die Übersicht der Gradeinteilung.

Tabelle 4

I.	Grad	K			kleiner als	2	cm²/sec³
II.	„	K	von	2	bis	10	„
III.	„	K	„	10	„	50	„
IV.	„	K	„	50	„	250	„
V.	„	K	„	250	„	1000	„
VI.	„	K	„	1000	„	5000	„
VII.	„	K	„	5000	„	20000	„
VIII.	„	K	„	20000	„	100000	„
IX.	„	K	„	100000	„	500000	„
X.	„	K	„	500000	„	2500000	„
XI.	„	K	„	2500000	„	10000000	„
XII.	„	K	„	10000000	an aufwärts		

Da die Tabelle 4 mit der von Zeller (s. § 2) übereinstimmt, gilt auch von ihr das dort Gesagte.

Tabelle 5

I.	Grad	B_m		kleiner als	10	cm/sec²	
II.	„	B_m	von	10	bis	25	„
III.	„	B_m	„	25	„	38	„
IV.	„	B_m	„	38	„	57	„
V.	„	B_m	„	57	„	80	„
VI.	„	B_m	„	80	„	125	„
VII.	„	B_m	„	125	„	200	„
VIII.	„	B_m	„	200	„	380	„
IX.	„	B_m	„	380	„	750	„
X.	„	B_m	„	größer als	750	„	

2. Vorschlag von Prof. Langer und Dr.-Ing. Thomé: Erschütterungsgrad ist der Stoß B in cm/sec², der mit der Häufigkeit 3 während der Vorbeifahrt erreicht oder überschritten wird. Die Erschütterung wird nach 10 Erschütterungsgraden zwischen 10 cm/sec² bis 750 cm/sec² beurteilt, wie Tabelle 5 zeigt:

3. Vorschlag von Baurat Dr.-Ing. Thein: Die Erschütterung E ist die auf die Masseneinheit bezogene kinetische Energie der Bewegung an der Meßstelle mit

Tabelle 6

I.	Grad	E	kleiner	als	$5 \cdot 10^{-5}$	cm²/sec²		
II.	„	E	von		$5 \cdot 10^{-5}$	bis	$10 \cdot 10^{-5}$	cm²/sec²
III.	„	E	„		$10 \cdot 10^{-5}$	„	$50 \cdot 10^{-5}$	„
IV.	„	E	„		$50 \cdot 10^{-5}$	„	$150 \cdot 10^{-5}$	„
V.	„	E	„		$150 \cdot 10^{-5}$	„	$600 \cdot 10^{-5}$	„
VI.	„	E	„		$600 \cdot 10^{-5}$	„	$1200 \cdot 10^{-5}$	„
VII.	„	E	„		$1200 \cdot 10^{-5}$	„	$2500 \cdot 10^{-5}$	„
VIII.	„	E	„		$2500 \cdot 10^{-5}$	„	$7000 \cdot 10^{-5}$	„
IX.	„	E	„		$7000 \cdot 10^{-5}$	„	$35000 \cdot 10^{-5}$	„
X.	„	E	„		$35000 \cdot 10^{-5}$	„	$70000 \cdot 10^{-5}$	„

der Dimension cm²/sec², die mit der Häufigkeit 3 während der Vorbeifahrt des Regelfahrzeuges erreicht oder überschritten wird. Die Gradeinteilung ist wieder die von 10 Graden zwischen $< 5 \cdot 10^{-5}$ bis $\gg 0.35$ cm²/sec² und ist aus Tabelle 6 ersichtlich.

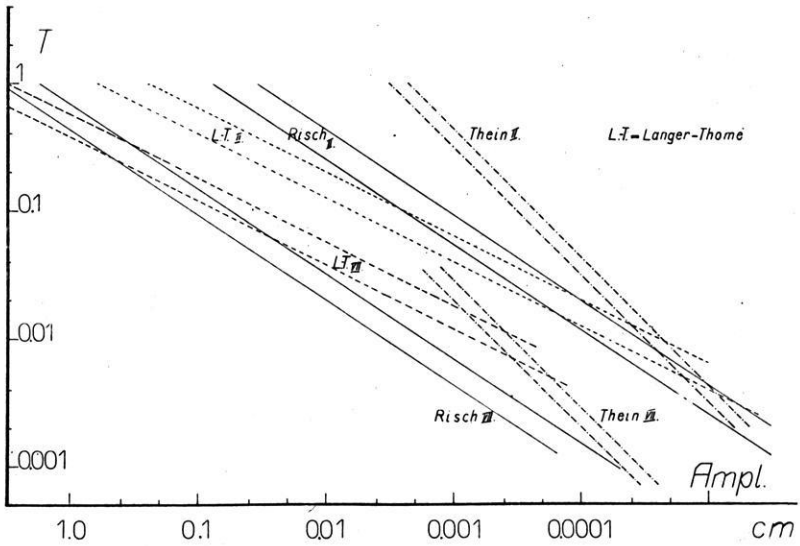

Fig. 1

Diese drei Vorschläge sind in zwei Gruppen zu teilen, weil zwischen dem ersten und den beiden anderen der prinzipielle Unterschied besteht, daß im ersten die

Maximalbeschleunigung herangezogen wird, während in den beiden anderen eine gewisse Integration zum Ausdruck kommt. Hierauf werden wir später noch einmal zurückkommen.

Um einen Vergleich der drei Vorschläge zu ermöglichen, habe ich in logarithmischem Maßstabe für die Amplitude (Abszisse) und die Schwingungsdauer (Ordinate) den zweiten und siebenten Stärkegrad in Fig. 1 gezeichnet. Aus dieser Figur ist ersichtlich, daß eine gemeinsame Gebietsüberschneidung der entsprechenden Stärkegrade nur beim zweiten Stärkegrad in einem ganz kleinen Bereich und beim siebenten überhaupt nicht eintritt.

§ 4. Die Grenzen der Fühlbarkeit von Erschütterungen. Es besteht die Möglichkeit, die im letzten Abschnitt behandelten Vorschläge zu vereinigen bzw. zu zeigen, daß unter bestimmten Einschränkungen jeder von den drei Vorschlägen eine Berechtigung hat. Dabei wären allerdings die angegebenen Zahlenwerte noch einer besonderen Prüfung zu unterziehen. Dazu gehen wir von der menschlichen Fühlbarkeitsgrenze gegenüber Erschütterungen aus, wie sie durch eine Reihe von Untersuchungen festgestellt worden ist. Diese Fühlbarkeitsgrenze spielt ja auch in allen absoluten Erdbebenskalen eine Rolle. Für diese Grenze liegen experimentell ermittelte Werte vor. Jedoch stimmen diese Werte auch nur teilweise mit denen der Erdbebenskalen (Tabelle 3) überein. Auch wurde kürzlich eine Fühlbarkeit von Erschütterungen bei noch kleineren Amplituden, als diese Fig. 2 angibt, vom Verf. festgestellt.

Untersuchungen der genannten Art wurden 1929 von K. Suyehiro*), 1933 von M. Ishimoto zusammen mit M. Ootuka**) und seit 1931 von H. Reiher und F. Meister***) ausgeführt. Bei allen Untersuchungen wurden horizontale Schüttelplatten verwendet. Die Ergebnisse der genannten Autoren sind in Fig. 2 zusammengestellt. Die Fig. 2 ist entsprechend der Fig. 1 gezeichnet. Die der Fig. 2 zugrunde liegenden Untersuchungen sind in verschiedenen Frequenzbereichen vorgenommen worden, so daß die entsprechenden Amplituden für Schwingungsdauern zwischen 0.2 und 3 Sekunden bekannt sind. Allerdings wurden die Versuche nicht in gleicher Weise angestellt. Bei Suyehiro kniete die Versuchsperson, während sie bei Ishimoto und Ootuka auf einem Stuhle saß. Die meisten Versuche stammen von Reiher und Meister, welche stehende und liegende Personen in verschiedenen Richtungen den Erschütterungen aussetzten. Die eine Kurve (—.—.—.—.—) ist von Reiher und Meister als Fühlbarkeitsgrenze für stehende Personen, während die andere Kurve (—..—,,—..—) eine mittlere Kurve

*) K. Suyehiro: Über die untere Grenze der fühlbaren Schwingungen. Proc. of the Imp. Acad. Tokyo **5**, 411—414 (1929).

) M. Ishimoto u. M. Ootuka: Détermination de la limite perceptible des secoueses. Bull. of the Earthqu. Res. Inst. Tokyo **11, 113—121 (1933).

***) H. Reiher u. F. J. Meister: Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. Forschung **2**, 381—386 (1931); Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Stöße. Ebenda **3**, 177—180 (1932).

aus den Werten von Meister*) ist, wie er sie als Grenzwerte bei einer senkrecht und parallel zur Körperachse erfolgten Erregung ermittelt hat. Die ausgezogene Kurve in Fig. 2 ist von mir eingezeichnet worden und soll das Gebiet des fühlbaren Schwingungsbereiches abgrenzen. Die genaue Abgrenzung müßte mit derselben Versuchsperson für den gesamten Schwingungsdauerbereich experimentell ermittelt werden.

Aus Fig. 2 geht hervor, daß man die beste Vereinigung der verschiedenen Untersuchungen dann erreicht, wenn man im Gebiet der großen Amplituden die Empfindlichkeitsgrenze entsprechend den Beschleunigungswerten (A/T^2) annimmt.

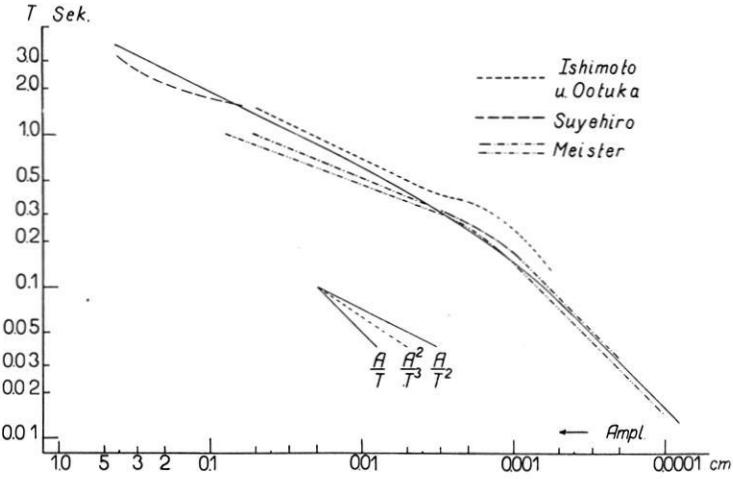

Fig. 2. Grenze der Fühlbarkeit von Erschütterungen für den Menschen, ermittelt unter Verwendung von Schüttelplatten

Mit kürzeren Schwingungsdauern verläuft die Grenzkurve entsprechend den Leistungswerten (A^2/T^3), um sich für ganz hohe Frequenzen dem Geschwindigkeitsverlauf (A/T) anzuschließen.

Damit ist aber auch gezeigt, daß die in § 3 angeführten Vorschläge in einem entsprechenden Bereich ihre Berechtigung haben, wenn die Schädlichkeit einer Erschütterung hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von Amplitude und Schwingungsdauer denselben Verlauf aufweist, wie die Fühlbarkeitskurve von Erschütterungen für den Menschen. Dies ist aber sehr wahrscheinlich, wie die experimentellen Ergebnisse in § 6 vermuten lassen.

Die starke Ausbuchtung der Kurve von Ishimoto und Ootuka ist wahrscheinlich auf einen Resonanzeffekt der menschlichen Empfindung zurückzuführen. Denn die gleiche Ausbuchtung zeigt bei entsprechender Umzeichnung die von W. Bausch**) zur

*) H. J. Meister: Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen. Forschung **6**, 116—120 (1935).

) W. Bausch: Zeitschr. f. techn. Physik **16, 595 (1935), Fig. 1.

Darstellung der Lästigkeitsgrenze des Menschen gegenüber Erschütterungen und zugleich als Zulässigkeitsgrenze für Gebäudeerschütterungen veröffentlichte Kurve, die aus Messungen von Reiher und Meister abgeleitet worden ist.

Die Fühlbarkeit und damit höchstwahrscheinlich auch die Gefährlichkeit einer Erschütterung ist eine von der Schwingungsdauer und Amplitude in kompliziertem Maße abhängige Größe und läßt sich nicht für den *gesamten* Frequenzbereich durch eine einfache Funktion, z. B. die der Beschleunigung ausdrücken. Hierauf hat schon H. J. Meister aufmerksam gemacht. Unter diesen Umständen finden, trotz aller Bedenken die man gegen den Indikator der menschlichen Fühlbarkeitsgrenze vorbringen kann, auch die großen von Grunmach gemessenen Beschleunigungswerte, die wir anfangs erwähnten, hinsichtlich ihrer Unschädlichkeit ihre zwanglose Erklärung. Tragen wir nämlich einige der Werte von Grunmach aus der erwähnten Tabelle zusammen mit der Fühlbarkeitsgrenze (gerade Linie in Fig. 3) in ein Diagramm ein, so sehen wir, daß diese Werte trotz der großen Beschleunigungsbeträge (bis 146 cm/sec²) in der Nähe der Fühlbarkeitsgrenze liegen.

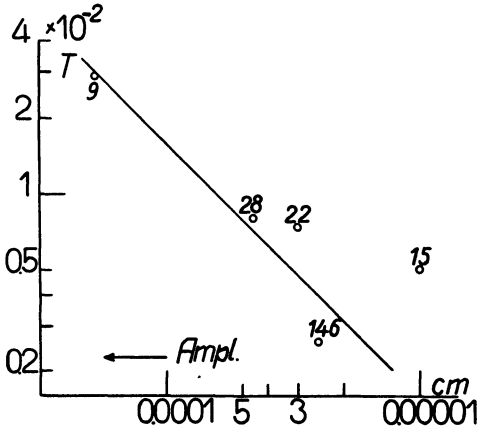

Fig. 3. Fühlbarkeitsgrenze und Grunmachsche Beschleunigungswerte

§ 5. Die dynamische Skala von Galitzin zur Schätzung von makroseismischen Bewegungen. Galitzin*) hat seinerzeit den Vorschlag gemacht, mit Hilfe einer dynamischen Skala die Größe der makroseismischen Bewegung zu schätzen. Diese dynamische Skala beruht auf der Verwendung von einer Reihe von Parallelepipeda, die bei ganz bestimmten Größenverhältnissen durch ihr Umfallen Normen für bestimmte Beschleunigungswerte der Bodenbewegung darstellen. Galitzin hat auch nachgewiesen, daß im Bereiche von 0.2 bis 0.9 Sekunden bei Amplituden zwischen 0.2 bis 0.7 cm die Standfestigkeit innerhalb der Fehlergrenze von der Beschleunigung abhängig ist. Wenn man diese Standfestigkeit als ein Maß für die Erschütterung ansetzt, dann muß sie auch einen ähnlichen Verlauf zeigen wie die Fühlbarkeitsgrenze; denn sonst wäre die am Ende des vorigen Abschnitts gefundene Übereinstimmung durch nichts zu erklären. Daß Galitzin diese Abweichung nicht schon beobachtet hat, liegt an zwei Gründen. Einmal weicht der Verlauf der Fühlbarkeitsgrenze in dem von Galitzin gemessenen Bereiche von dem Beschleunigungsverlaufe noch nicht sehr ab, wie dies aus Fig. 2 zu ersehen ist. Zum

*) B. Galitzin: Über eine dynamische Skala zur Schätzung von makroseismischen Bewegungen. Intern. seismolog. association Manchester 1911. S. 178—196.

anderen ist dafür die Versuchsanordnung von Galitzin verantwortlich zu machen. Denn die Art der Galitzinschen Versuche mußte, wie wir zeigen werden, eine Streuung der Werte ergeben.

Galitzin beschreibt seine Versuche folgendermaßen: Zunächst erhielt der Schütteltisch bei konstanter Amplitude eine konstante Schwingungsdauer. Dann wurde mittels einer besonderen elektrischen Vorrichtung die Bewegung der gehemmten Parallelepipeda freigegeben. Bei konstant gehaltener Amplitude wurde die Frequenz so lange gesteigert, bis der Versuchskörper umstürzte. Über dieses Umstürzen schreibt Galitzin: „Das Umstürzen trat gewöhnlich nicht sofort ein, sondern erst nach Verlauf einiger Sekunden. Dieses ist ein direkter Beweis dafür, daß wir es hier mit einer Summierung mechanischer Kräfte zu tun haben."

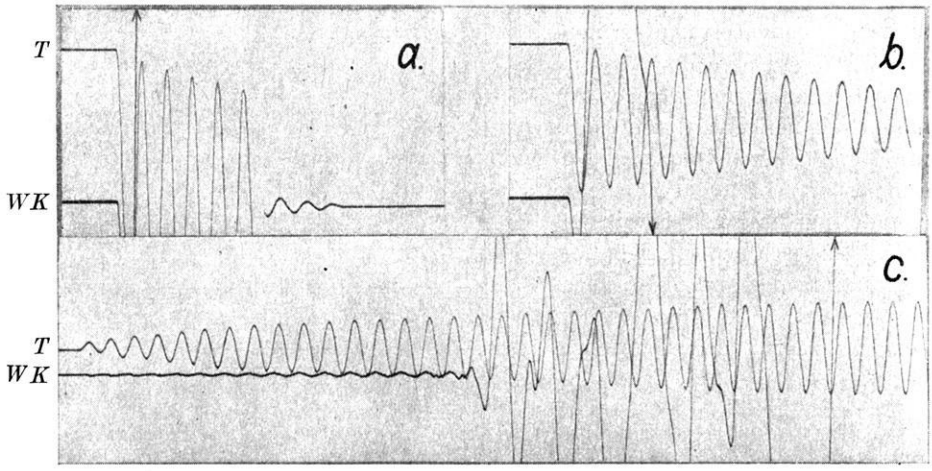

Fig. 4. Aufschaukelvorgang und Umfallen bei Wackelschwingungen. Das Umfallen des Wackelkörpers ist durch den Pfeil angedeutet.

T = Tischbewegung; WK = Schwingungen des Wackelkörpers

§ 6. Eigene Versuche zur Galitzinschen dynamischen Skala. Wie ich schon erwähnt hatte, kam ich auf Grund der Tatsache, daß die Grunmachschen Werte sich mit der Fig. 2 sehr gut in Einklang bringen ließen, zu der Überzeugung, daß auch der Versuch von Galitzin Ergebnisse zeitigen müsse, die mit Fig. 2 in Übereinstimmung zu bringen wären. Mit Hilfe des von mir konstruierten Schütteltisches*) konnte ich die Galitzinschen Ergebnisse nachprüfen. Allerdings wurde dabei im Gegensatz zu Galitzin die Schwingungsdauer konstant gehalten und die Amplitude der sich selbst erregenden Schütteltischschwingung so lange gesteigert,

*) H. Martin: Einschwingvorgänge und ihre Bedeutung bei der Aufzeichnung von stoßähnlichen Erschütterungen. Heft 26 d. Veröff. d. Reichsanst. f. Erdbebenforschung, S. 30, Jena 1935.

bis ein Umfallen des Versuchskörpers erfolgte. Wie dieser Umfall bzw. der plötzliche Aufschaukelvorgang der Wackelschwingungen*) vor sich geht, zeigt Fig. 4c.

Daraus geht hervor, daß wir es bei Wackelschwingungen mit keinem eigentlichen Anschwingvorgang im gewöhnlichen Sinne zu tun haben. Deshalb ging ich bei meinen Versuchen etwas anders vor, als es der Beschreibung von Galitzin hinsichtlich seiner Versuche entsprach. Da aus Fig. 4c eindeutig hervorgeht, daß das Umfallen bei langsamem Anschwellen der Amplitude als ein nicht sehr scharfes Kriterium zu bewerten ist, änderte ich den Versuch ab. Die Auslenkung des Tisches wurde so lange vergrößert, bis bei Freigabe der jetzt frei abklingenden Tischbewegung ein sofortiges Umfallen erfolgte, wie dies Fig. 4a zeigt. Denn es kann

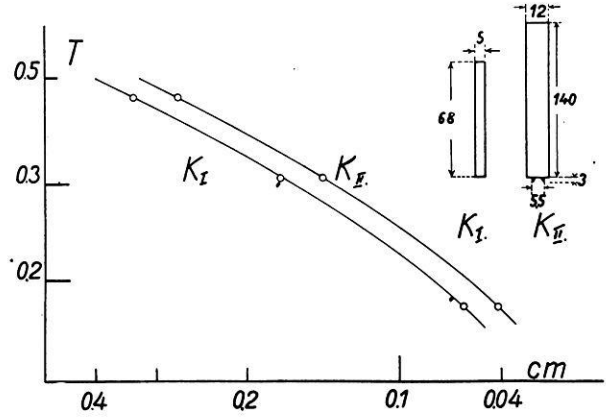

Fig. 5. Abhängigkeit des Umfallens der Wackelkörper bei verschiedenen Schwingungsdauern T und Amplituden (Abszisse)

auch ein Umfallen noch dann erfolgen, wenn schon eine Abnahme der Amplitude erfolgt ist, und nur die günstige Phasenbedingung eintritt. Dies zeigt sehr schön Fig. 4b.

Da ich an anderer Stelle über diese Versuche noch ausführlich berichten werde, gehe ich zum Ergebnis meiner Messungen über. Diese sind in Fig. 5 dargestellt. Außerdem sind in Fig. 5 die Seitenansichten der beiden von mir verwendeten Eisenkörper mit den entsprechenden Maßen eingezeichnet. Das wesentliche Ergebnis, welches wir aus Fig. 5 ableiten können, ist das, daß mit Zunahme der Frequenz des Schütteltisches eine größere Zunahme der Schwingungsamplitude erfolgt, als dies entsprechend einem konstanten Beschleunigungswerte als Maß für das Umfallen nötig wäre.

Somit haben wir auch auf dieser experimentellen Grundlage — wenn auch zunächst in einem kleinen Frequenzbereich — ein Gegenstück zum gleichen Verlauf der Fühlbarkeitsgrenze von Erschütterungen für den Menschen.

*) H. Martin: Wien-Harms, Handb. d. Experimentalphysik **17**, Teil 3, S. 123, Leipzig 1934.

§ 7. Die neue japanische Erdbebenskala. Ehe wir zur Nutzanwendung von dem bisher Gesagten übergehen, müssen wir noch ganz kurz auf die neue japanische Erdbebenskala eingehen, worauf wir S. 326 schon hingewiesen hatten. Wir wollen damit nochmals die Schwierigkeiten charakterisieren, die uns in einer Verbindung einer subjektiven und objektiven Beurteilung zu liegen scheinen, wenn es sich nicht um irgendwelche relative Vergleiche handelt.

Die Japaner veröffentlichen in ihren seismischen Vierteljahresberichten*) die Größe der maximalen Bodenbewegung zusammen mit den entsprechenden Intensitäten, wie sie auf den wichtigsten japanischen Stationen beobachtet worden sind. Durch die siebenteilige Erdbebenskala ist ein verhältnismäßig großer Spielraum in der Beurteilung gelassen. Fühlbare Intensitäten und objektive Beschleunigungswerte haben folgenden Zusammenhang:

Intensitätsgrad		Beschleunigungswerte			
0.	no feeling		bis	0.5	cm/sec²
I.	slight	0.5	„	2.0	„
II.	rather weak	2.0	„	8.0	„
III.	weak	8.0	„	32.0	„
IV.	rather strong	32.0	„	128.0	„
V.	strong	128.0	„	512.0	„
VI.	violent	512.0	und	größer	„

Aus den Berichten von 1931 habe ich diejenigen Beben ausgewählt, deren Intensität den II. Grad gehabt oder diesen Grad überschritten hatte. Außerdem

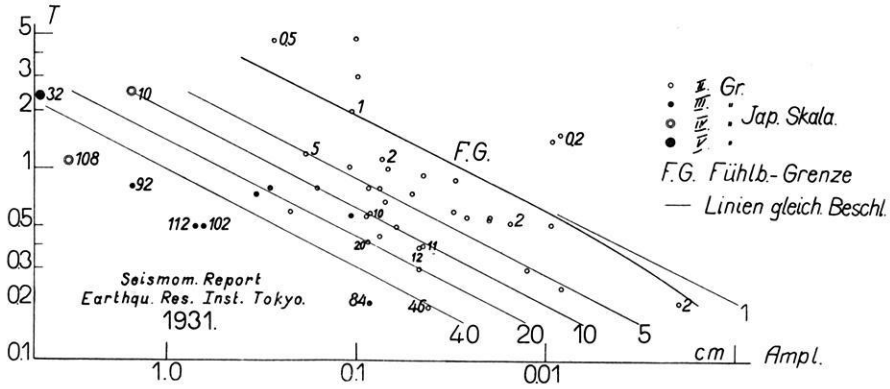

Fig. 6

benutzte ich nur diejenigen Beben, deren angegebene Schwingungsdauern in den beiden Komponenten gleich gewesen sind, weil ich so die resultierende Amplitude aus den beiden Komponenten berechnen konnte. Auf diese Weise entstand Fig. 6, in der außer den durch die Punktform unterschiedenen Stärkegraden eine Reihe von Beschleunigungswerten angegeben sind.

*) Vgl. z. B. Bull. of the Earthqu. Res. Inst. Tokyo **9**, 378 (1931).

Das Ergebnis von Fig. 6 können wir dahin zusammenfassen, daß selbst Beben vom II. Stärkegrade nach der neuen japanischen Skala oder vom V. bis VI. Grade der Mercalli-Cancani-Skala hinsichtlich ihrer zur Beurteilung angeführten gemessenen Werte nicht zu fühlen gewesen sind. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die Angaben von seismischen Stationen stammen, auf denen wir es mit geschulten Kräften zu tun haben.

§ 8. Eigenschwingungen des Bodens. Bei der Frage nach der Beurteilung von Verkehrserschütterungen muß auf einen weiteren Punkt hingewiesen werden, der ohne Zweifel auch eine sehr bedeutende Rolle spielt. Es handelt sich dabei um die durch die Verkehrserschütterungen angeregten oder anregbaren Eigenschwingungen des Bodens.

Diese Eigenschwingungen des Bodens spielen bei den Erdbeben eine viel größere Rolle, als man das im allgemeinen annimmt. In welchem Maße sie auf-

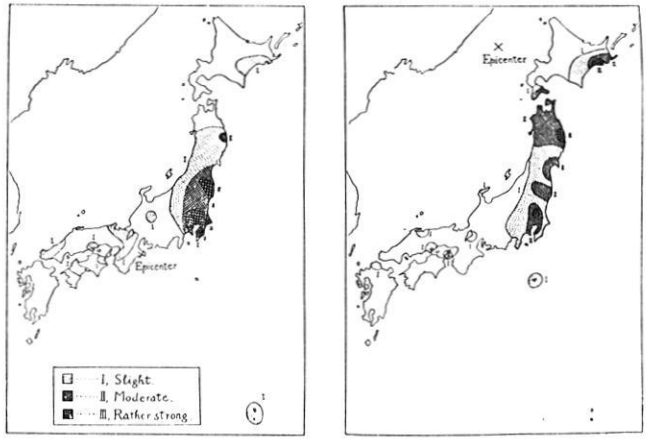

Fig. 7. Schüttergebiete von zwei Tiefbeben

treten, zeigt Fig. 7. Dabei handelt es sich um die Schüttergebiete von zwei Tiefbeben, deren Herde etwa 1100 km auseinanderlagen. Die Herdtiefe betrug 360 bzw. 400 km. Das auffallende an Fig. 7 ist, daß, abgesehen von den Bebenstärken, die angeregten Gebiete im wesentlichen die gleichen sind. Dies ist nur möglich, wenn wir diesen Gebieten eine besonders leichte Anregbarkeit und damit eine erhöhte Erdbebengefährlichkeit zuschreiben.

Die Untersuchung der Eigenschwingungen des Bodens nimmt heute schon einen großen Raum in der seismischen Literatur ein. Denn was sich in Fig. 7 gewissermaßen „in Reinkultur" zeigt, ist immer wieder auch im kleinen beobachtet worden. Es sei in diesem Zusammenhang auf die Arbeiten von Suyehiro*),

*) K. Suyehiro: A seismic Vibration Analyser and the Records obtained therewith. Bull. of the Earthqu. Res. Inst. Tokyo **1**, 59—64 (1926).

Ishimoto*), Köhler**), Ramspeck***) und die in großem Maßstabe ausgeführten Arbeiten der Deutschen Gesellschaft für Bodenmechanik†) verwiesen. Auch der von Hagiwara††) über weitere Arbeiten von Ishimoto gebrachte Hinweis scheint mir sehr bemerkenswert. Es handelt sich dabei um die Feststellung, die an zehn verschiedenen Stellen von Tokyo und Yokohama gemacht wurde, daß nämlich die von einem Erdbeben ausgelöste vorherrschende Periode an ein und demselben Platze immer dieselbe ist, daß aber diese Perioden an verschiedenen Plätzen verschieden sind, selbst wenn der Abstand nur etwa einen Kilometer beträgt.

Andererseits ist in der Seismologie die Tatsache bekannt, daß Gebiete mit Lockerboden von Bebenschäden in viel stärkerem Maße heimgesucht werden als Gegenden mit festem Gestein. Dies ist aber auch cum grano salis zu nehmen, wie folgende von Tsuboi†††) mitgeteilte Beobachtungstatsachen zeigen. Durch das Kwanto-Erdbeben von 1923 wurden in der Unterstadt von Tokyo die Holzhäuser meistens vollkommen zerstört, während die Steinhäuser im allgemeinen das Beben überlebten. Umgekehrt blieb in der Oberstadt kein Steinhaus heil, während die Holzhäuser meistens unberührt blieben. Für Hangô (Oberstadt) fand Ishimoto als vorherrschende Bodeneigenschwingungsdauer 0.3 Sekunden, während diese für Marunouti (Unterstadt) 0.6 bis 0.7 Sekunden betrug.

Damit hängt es auch zusammen, daß die mehrfach erwähnte neue japanische Erdbebenskala als vollgültig allein für Hangô bei der dort vorherrschenden Eigenschwingungsdauer des Bodens von 0.3 Sekunden erklärt wird.

Bei den Eigenschwingungen des Bodens handelt es sich im wesentlichen um zwei verschiedene Schwingungen. Die eine ist eine schnelle Vertikalschwingung, wobei wir es je nach der Zusammensetzung des Bodens mit Frequenzen zwischen 10 und 30 Hertz zu tun haben. Als Dämpfungswerte wurden solche zwischen $k = 1.6$ bis $k = 3.3$ ermittelt, wobei k das Verhältnis zweier Amplituden gleicher Schwingungsrichtung ist.

Die andere vorherrschende Schwingung ist eine horizontale Schwingung mit wesentlich langsamerer Schwingungsdauer, z. B. Leinetal 3 Hertz, $k = 1.2$, Tokyo wie oben erwähnt, 3 bzw. 1.5 Hertz.

---

*) M. Ishimoto: Comparaison accélérométrique des secousses sismiques dans deux parties de la ville Tôkyô. Ebenda **10**, 171—186 (1932).

) R. Köhler: Eigenschwingungen des Untergrundes, ihre Anregung und ihre seismische Bedeutung. Gött. Nachr., N. F. **1, 11—42 (1934), mit umfassenden Literaturverzeichnis.

***) A. Ramspeck: Versuche über Boden- und Gebäudeschwingungen. Zeitschr. f. Geophys. **9**, 44—59 (1933).

†) Veröffentlichungen des Inst. der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik, Heft 1, 1933, Heft 3, 1936.

††) T. Hagiwara: Report on the work of the Earthquake Res. Institute Tokyo. Imp. University during the year 1933—1934. Gerlands Beitr. **48**, 94—108 (1936).

†††) Ch. Tsuboi: Gerlands Beitr. **37**, 423 (1932).

§ 9. Resonanzschwingungen von Gebäuden. Die im letzten Kapitel erörterten Eigenschwingungen des Bodens werden in dem Fall besonders gefährlich, wenn sie die Gebäude zu Resonanzschwingungen anregen, wie das bei dem erwähnten Beispiel der Holz- und Steinhäuser in Tokyo der Fall gewesen ist. Denn durch das Aufschaukeln der Schwingungsamplituden treten Überbeanspruchungen des Baumaterials und damit Schäden auf. Wie weit Resonanzeffekte auftreten können, darüber können wir uns durch die Eigenschwingungszahlen und die Dämpfungswerte der Bauwerkschwingungen aller Art Auskunft verschaffen. Da es sich für mich an dieser Stelle nur um die Erörterung einiger prinzipieller Fragen handelt, muß die Zusammenstellung des vorhandenen Beobachtungsmaterials einer anderen Stelle vorbehalten bleiben. Ich muß mich auch hier mit einigen orientierenden Angaben begnügen.

Über Eigenschwingungs- und Dämpfungswerte von Gebäuden liegt ein umfangreiches Beobachtungsmaterial vor. Danach haben Häuser, je nach Größe und Bauart, Eigenschwingungen zwischen 0.14 bis 2.0 Sekunden Dauer. Die Dämpfungswerte mit Ausnahme der mir für Wolkenkratzer nicht bekannten liegen zwischen $k = 1.2$ bis $k = 3.0$. Die geringsten Dämpfungswerte weisen Schornsteine mit $k = 1.04$ bis $k = 1.3$ auf. Sehr erwünscht wären in diesem Zusammenhang noch die Angaben über Dämpfungswerte von Funkturmschwingungen, die aus einer Holz- oder einer Eisenkonstruktion bestehen.

Über den Zusammenhang von Resonanzschwingungen und Beanspruchbarkeit des Baumaterials geben die Arbeiten von Ramspeck*) und die von Gerecke und Ramspeck**) Anhaltspunkte.

§ 10. Stärke einer Erschütterung. In § 3 hatten wir auf einen prinzipiellen Unterschied hingewiesen, der zwischen den dort erörterten Vorschlägen besteht. Es handelt sich dabei um die Frage, wie weit man einen einzelnen Maximalwert der Amplitude bzw. der Beschleunigung den Vorrang gegenüber dem gesamten Erschütterungsvorgang geben soll. Hierzu möge als Erläuterung Fig. 8 dienen. In Fig. 8 sind einmal zwei Registrierungen verschiedenen Ursprungs von vertikalen Bodenschwingungen an ein und derselben Stelle wiedergegeben. Der Fallhammer befand sich in einer Entfernung von etwa 70 m, während das Lastauto 6 m neben der in einem Hause aufgestellten Apparatur vorüberfuhr. Weiter sind in Fig. 8 die „Erschütterungsflächen" gezeichnet. Dabei ist als Abszisse aufgetragen, wie oft während desselben Zeitabschnittes (in diesem Falle eine Sekunde) eine bestimmte Amplitude (bzw. bei gleicher Schwingungsdauer eine bestimmte Beschleunigung) erreicht oder überschritten wurde.

Die Erschütterung durch den Fallhammer zeichnet sich durch kürzere Dauer aber *eine* größere Amplitude gegenüber der durch das Lastauto hervorgerufenen

*) A. Ramspeck: Gebäudeschwingungen durch Erdbeben und Verkehr. V. D. I. **78**, 669 (1934).

) Fr. Gerecke u. A. Ramspeck: Boden- und Gebäudeschwingungen in Rastatt nach dem Erdbeben vom 8. Febr. 1933. Zeitschr. f. Geophys. **9, 342—350 (1933).

aus. Die Erschütterungsfläche des Autos ist größer (Verhältnis etwa 184 : 57). Wenn man langsame Einwirkungen, die durch eine Erschütterung verursacht werden können (z. B. Bodensetzungen) ins Auge faßt, so ist die durch das Lastauto hervorgerufene Erschütterung als die schädlichere zu betrachten. Ist aber die eine Schwingungsamplitude der Fallhammererschütterung so groß, daß damit eine Überbeanspruchung des Baumaterials verbunden ist, so ist das umgekehrte der Fall.

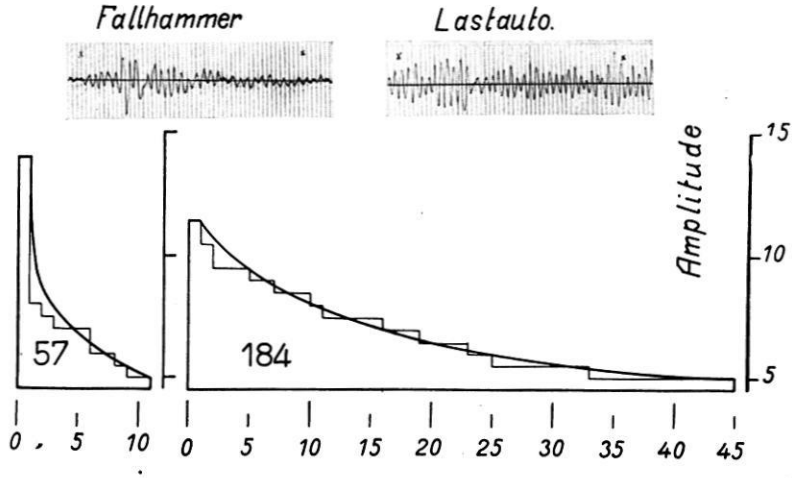

Fig. 8. Erschütterungsflächen.
Abszisse: Zahl der während eines bestimmten Zeitabschnittes erreichten bzw. überschrittenen Amplituden

§ 11. Schlußfolgerung. Es liegt nach meinen Ausführungen im Bereich der Möglichkeit, ein Diagramm zu ermitteln, welches in gleicher Weise für die Beurteilung von Erdbeben- wie Verkehrserschütterungen Anwendung finden kann. Der Verlauf der Kurven, welche die entsprechenden Stärkegrade abgrenzen, wird etwa dem der Fühlbarkeitsgrenze von Erschütterungen entsprechen. Der Abstand der einzelnen Kurven und der damit zusammenhängende Stärkegrad einer Erschütterung muß auf Grund von einwandfreien alten Ergebnissen und entsprechenden neuen Untersuchungen ermittelt werden. Als Anfang wird es genügen, diejenige Grenzkurve zu bestimmen, aus der die Schädlichkeit einer Erschütterung für Gebäudeschwingungen ersichtlich ist. Schon diese Grenzkurve aber wird für verschiedenen Untergrund wie auch für Gebäude unterschiedlicher Bauart verschieden sein.

Im übrigen wird es bei der Beurteilung einer Verkehrserschütterung von Vorteil sein, wenn man den im Anschluß an den vorliegenden Vortrag gemachten Vorschlag von Herrn Professor Dr. Mintrop berücksichtigt und die Schädlichkeit einer Erschütterung vom Standpunkt der Ortsüblichkeit beurteilt.

Jena, Reichsanstalt für Erdbebenforschung, November 1936.