

Forschung

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

2. Jahrgang der Zeitschrift Technische Mechanik und Thermodynamik

Band 2

Berlin, im November 1931

Nr. 11

Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen

Von *H. REIHER* und *F. J. MEISTER*, Stuttgart (Mitteilung aus dem Institut für Schall- und Wärmeforschung der Techn. Hochschule Stuttgart)¹⁾

1. Einleitung — 2. Anordnung und Art der Versuche — 3. Versuchsergebnisse — 4. Auswertung der Versuchsergebnisse — 5. Vergleich mit älteren Ergebnissen — 6. Zusammenfassung

1. Einleitung. Die schädlichen Wirkungen von Straßen- und Maschinerschütterungen auf Menschen und Bauwerke sind bekannt. Nervosität und frühzeitige Ermüdung der Menschen (besonders in Großstädten und Industriebezirken) sind z. T. auf Geräusch- und Erschütterungseinflüsse zurückzuführen; Bauschäden durch andauernde oder kurzzeitige Erschütterungen mehren sich.

Bei Bauwerken hängt die Widerstandsfähigkeit gegen dynamische Einflüsse von der Güte des Untergrundes, der Fundierung, der Baukonstruktion und der einzelnen Bauteile ab. Es sind Bauschäden bei Beschleunigungen der Bauteile von weniger als 10 cm/s^2 aufgetreten; jedoch liegen auch Fälle vor, wo Erschütterungen mit Beschleunigungen bis zu 300 cm/s^2 keine sichtbaren Bauschäden hinterließen²⁾. Die Grenze der für Bauwerke schädlichen Erschütterungsintensität läßt sich somit allgemeingültig nicht festlegen.

Der Versuch, für den Menschen eine solche Grenze zu finden, versprach jedoch Erfolg, da bereits bei den Untersuchungen über die Beeinflussung des Ohres durch Geräusche verschiedener Intensität trotz der Verschiedenheit der Versuchspersonen allgemein gültige Ergebnisse gefunden wurden, z. B. Schwellenwerte der Gehörempfindung, Unterschiedsschwelle usw.³⁾. Ein Bedürfnis nach Grenzwerten der Erschütterungsempfindung lag besonders deshalb vor, weil bisher keine Möglichkeit bestand, z. B. in Streitfällen, ein eindeutiges Urteil über den Grad des Einflusses einer Erschütterung auf die Gesundheit von Menschen zu fällen. Wenn nunmehr für normale, gesunde, in der Stadt lebende Menschen die Zusammenhänge für den hauptsächlich vorkommenden Frequenzbereich geklärt wurden, so darf nicht außer acht gelassen werden, daß für besonders empfindliche oder unempfindliche Personen eine merkliche Verlagerung der Empfindlichkeit eintreten wird.

Nach bisher vorliegenden Versuchsergebnissen dürfte das Organ für das Schwingungsempfinden des Menschen teilweise im Vestibularapparat des Ohres liegen⁴⁾. Daneben reagieren wohl noch die weiche Gehirnmasse, Auge, Muskeln, Gelenke und Haut auf Erschütterungen. Hiernach werden gewisse Empfindungsunterschiede bestehen, je nachdem der Kopf des Menschen die Erschütterungen mittelbar über den Körper oder unmittelbar zugeführt bekommt, oder ob die Richtung der Schwingungen parallel oder senkrecht zur Körperachse verläuft, ferner ob der Mensch steht oder liegt.

2. Anordnung und Art der Versuche. Die Untersuchungen wurden, um zunächst die Zusammenhänge zu klären, mit sinusförmigen Vertikal- und Horizontalschwingungen von längerer Dauer vorgenommen, die den stehenden oder liegenden menschlichen Körper in Richtung der Körperachse oder senkrecht dazu trafen.

¹⁾ Über die hier mitgeteilten Ergebnisse wurde durch *H. Reiher* auf der Tagung des Ausschusses für mechanische Schwingungen beim Verein deutscher Ingenieure am 28. Mai 1931 in München berichtet. Die Durchführung der Untersuchungen wurde durch die dankenswerte Unterstützung des Reichskuratoriums für Wirtschaftlichkeit und der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft ermöglicht.

²⁾ *H. Reiher*, Neuere Beobachtungen über Gebäudeerschütterungen, Verh. d. III. Int. Kongr. f. techn. Mech. 1930, Stockholm 1931.

³⁾ *Müller-Pouillet's* Lehrb. d. Physik, I. Bd. 3. Teil, Braunschweig 1929, S. 157.

⁴⁾ *W. Brünnings* u. *H. Frenzel*, Methoden zur Untersuchung des Vestibularapparates beim Menschen, in *E. Abderhalden*, Handb. d. biol. Arbeitsmeth. Abtlg. V. Teil 7, Berlin 1920, S. 603.

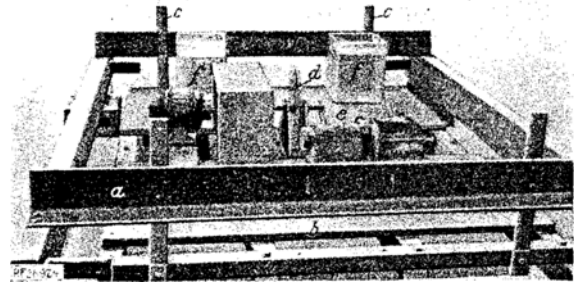
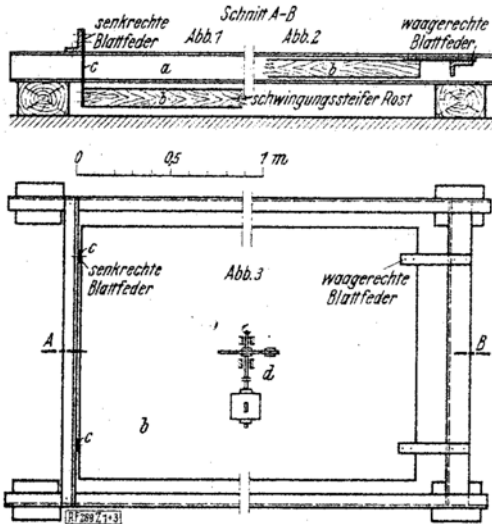


Abb. 4. Ansicht der Versuchsanordnung

Abb. 1. Aufbau für horizontale Schwingungen
 Abb. 2. Aufbau für vertikale Schwingungen
 Abb. 3. Draufsicht

Abb. 1 bis 4. Anordnung zur Bestimmung der Erschütterungsempfindlichkeit des Menschen
 a Rahmen; b schwingungssteifer Rost; c Blattfedern; d Schwingungserreger im Schwerpunkt; e Schwingungsmesser; f Wassergefäß zum Belastungsausgleich

Die Versuchsanordnung mußte möglichst geräuschlos arbeiten, um nicht durch Belastung des Gehöres das Ergebnis zu fälschen. Der untersuchte Frequenzbereich von 3 bis 70 Hertz umfaßte die in Verkehr und Industrie hauptsächlich auftretenden Erschütterungsfrequenzen. Die Amplitude der Schwingung mußte, ebenfalls in den Grenzen der praktisch hauptsächlich auftretenden Erschütterungen, von 0,0001 bis 1 cm veränderbar sein.

Die Versuchsanordnung, Abb. 1 bis 4, erfüllt diese Bedingungen. Ein Rahmen aus kräftigen Formeisen von rd. 100 kg Gewicht dient als Auflager für mehrere Automobilblattfedern, an denen die Schüttel-Plattform hängt. Es können je nach der erforderlichen Steifheit 4 bis 8 Federn benutzt werden. Um die Eigenfrequenzen verändern zu können, läßt sich die wirksame Länge der Federn stufenweise von 10 auf 16 cm erhöhen. Die 1,8 × 1,3 m² große Plattform besteht aus einem möglichst biegeungssteifen Rahmen aus 4 Buchenbohlen mit 6 × 10 cm² Querschnitt, die durch 3 Formeisen und einen 2,5 cm dicken Bretterbelag versteift sind. Als erregende Kraft dienen die Zentrifugalkräfte einer von einem Motor angetriebenen Schwungscheibe mit veränderbaren exzentrischen Schwungmassen. Die Kraft $P = m r \omega^2$ greift im Schwerpunkt der Plattform an. Für Frequenzen oberhalb 30 Hertz wurde ein kleiner, rasch laufender Motor mit auf der Welle exzentrisch befestigten Gewichten benutzt, um sehr kleine Amplituden zu erzielen.

Die Gewichtsverteilung auf dem Schwingrost war durch auflegbare Gewichte so getroffen, daß eine für alle Oberflächenpunkte gleiche Amplitude zustande kam; die Abgleichung wurde vor jedem Versuch nachgeprüft.

Zum Messen der Schwingungsausschläge und zum Überwachen der Sinusform wurden ein Geiger- und ein Maibak-Schwingungsmesser benutzt, ersterer hauptsächlich im Bereich der höheren Frequenzen. Die Frequenz wurde mit einem mit dem Schwingungserreger gekoppelten Drehzahlmesser und mit Hilfe der Zeitmarkierung der Schwingungsmesser festgestellt.

Zu den Beobachtungen standen 10 Personen verschiedenen Berufes und völlig verschiedener Veranlagung im Alter von 20 bis 37 Jahren zur Verfügung; sie wurden stehend und liegend untersucht. Nach einer Erschütterungs-Beeinflussung von etwa 5 min teilte die Versuchsperson mit, ob ihre Empfindung in eines der folgenden Gebiete fiel:

Nicht spürbar	0	} erträglich ohne Gesundheitsstörung gefährlich
schwach spürbar	Ia	
gut spürbar	Ib	
stark spürbar, lästig	Ic	
unangenehm, bei längerer Dauer bedingt schädlich	IIa	
sehr unangenehm, bereits bei kurzer Dauer unbedingt schädlich	IIb	

Die Grenze zwischen den Gebieten 0 und I bedeutet somit die Reizschwelle, zwischen I und II die Gefahrenschwelle der Erschütterungsempfindung des normalen gesunden Menschen.

3. Versuchsergebnisse. In den Schaubildern, Abb. 5 bis 10, sind die Meßergebnisse eingetragen. Nach den bisherigen Anschauungen lag zunächst nahe, die Beschleunigung als Kriterium für die Erschütterungsempfindung abhängig von der Frequenz aufzutragen, wie es für vertikale

Schwingungen beim liegenden Menschen in Abb. 5 geschehen ist. Die besonders gekennzeichneten Meßpunkte jedes Empfindungsgebietes gruppieren sich trotz der Verschiedenheit der beobachteten Personen in gesetzmäßiger Weise, so daß das Einziehen von Grenzlinien zwischen den einzelnen Gebieten möglich war. Die für andere Schwingungsrichtungen und Stellungen der Versuchspersonen gefundenen Zusammenhänge könnten in ähnliche Schaubilder eingetragen werden.

Es zeigt sich jedoch, daß im allgemeinen die Beschleunigung kein Kennzeichen für die Erschütterungsempfindlichkeit des Menschen ist. Denn das Gebiet I der ohne sofortigen Schaden erträglichen Beschleunigungen ist bei tiefen Frequenzen groß; mit zunehmender Frequenz rücken die Grenzen stark zusammen, um zuletzt (in Abb. 5 etwa ab 50 Hertz) nahezu parallel zu verlaufen. Bei allen Beobachtungen nähern sich mit Zunahme der Frequenz die beiden Grenzwerte inmer mehr; das Gebiet der fühlbaren und ertragbaren Schwingungen wird immer enger. Die Masse des menschlichen Körpers wird vermutlich bei sehr hohen Frequenzen nicht mehr in Schwingung versetzt, die Sinnesorgane reagieren somit nur noch wenig auf die Einflüsse; trotzdem können die Gehirnzellen Schaden leiden (Betäubungserscheinungen bei hochfrequenten Schwingungen).

Um die Zusammenhänge besser zu veranschaulichen, wurden in Abb. 6 bis 10 in logarithmischem Maßstabe die Amplituden a in cm abhängig von der Frequenz n in Hertz aufgetragen. Diese Darstellung der Meßpunkte wird erheblich klarer; die Grenzen der einzelnen Gebiete lassen sich im Hauptteil der Meßgebiete durch gerade Linien verschiedener Neigung darstellen. Lediglich bei den nahe dem Schädlichkeitsgebiet liegenden Werten hoher Frequenz ist ein Umbiegen der Grenzen zu erkennen.

Die Schaubilder, Abb. 6 bis 10, unterscheiden sich wenig. Am unempfindlichsten scheint der Mensch auf dem Rücken liegend gegen Vertikalschwingungen zu sein, Abb. 8. Horizontalschwingungen senkrecht zur Körperachse werden beim liegenden Menschen schnell als lästig empfunden, Abb. 10. Dies

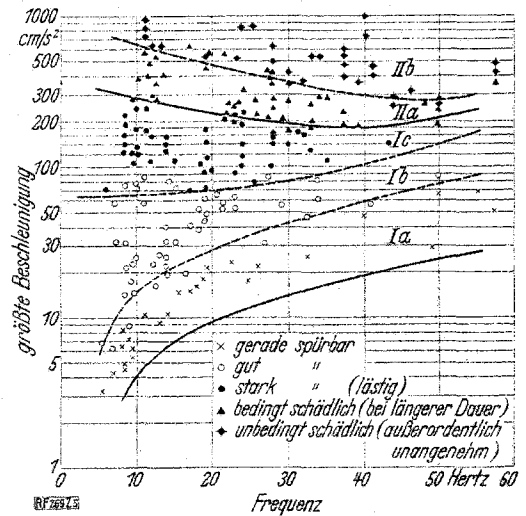


Abb. 5. Gebiete verschiedener Empfindungsstärke für liegende Menschen gegen Vertikal-Erschütterungen abhängig von der Beschleunigung (vergl. Abb. 8) Die Kurven sind die Grenzlinien der mit 0, Ia, Ib usw. bezeichneten, im Abschnitt 2 erläuterten Empfindungsgebiete

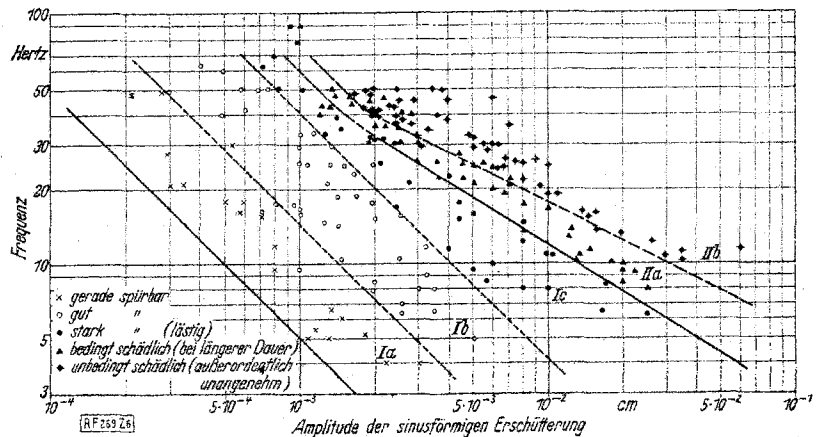


Abb. 6. Gebiete verschiedener Empfindungsstärke stehender Menschen gegen Vertikal-Erschütterungen

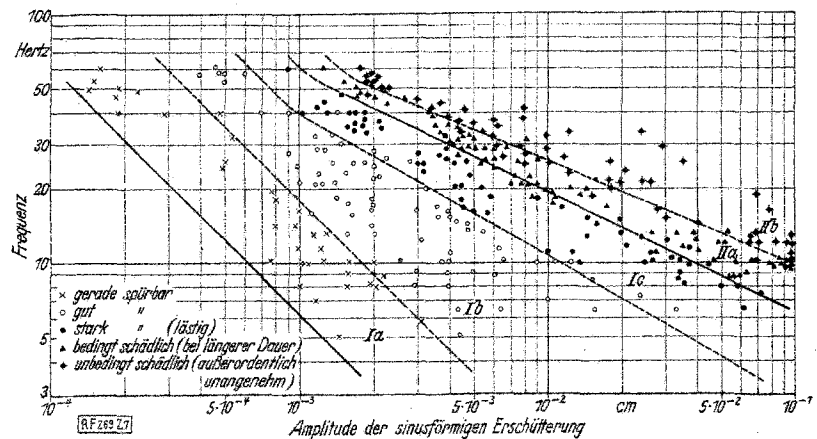


Abb. 7. Gebiete verschiedener Empfindungsstärke stehender Menschen gegen Horizontal-Erschütterungen

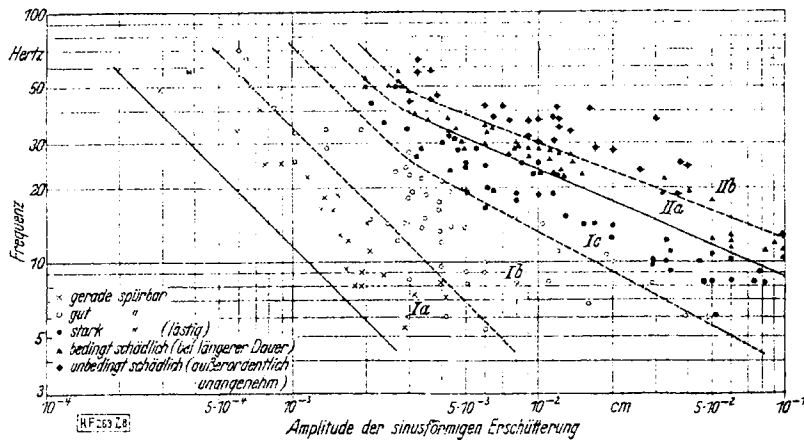


Abb. 8. Gebiete verschiedener Empfindungsstärke liegender Menschen gegen Vertikal-Erschütterungen

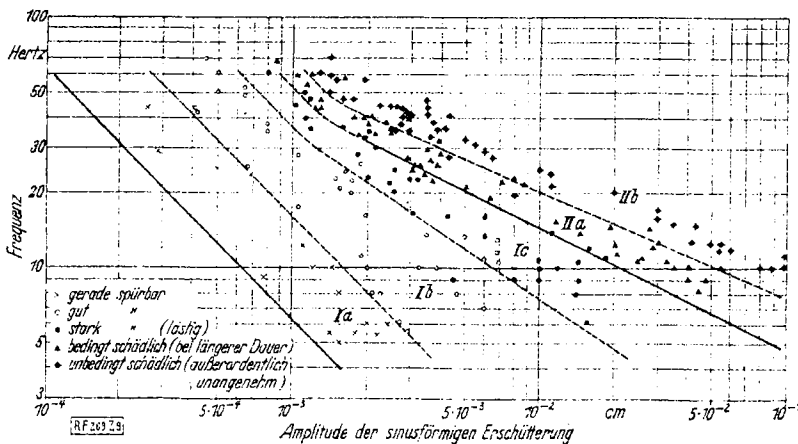


Abb. 9. Gebiete verschiedener Empfindungsstärke liegender Menschen gegen Horizontal-Erschütterungen in Richtung der Körperachse

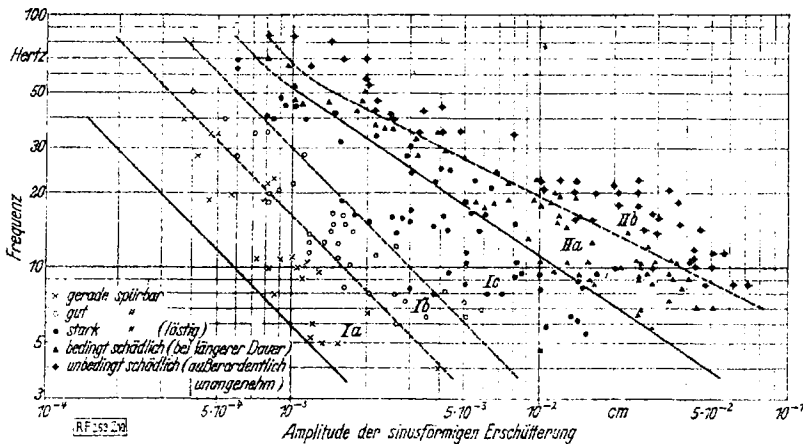


Abb. 10. Gebiete verschiedener Empfindungsstärke liegender Menschen gegen Horizontal-Erschütterungen senkrecht zur Körperachse

rührt wahrscheinlich davon her, daß diese Schwingungen den Kopf in eine stärkere Relativbewegung zum Körper bringen, als Schwingungen in Richtung der Körperachse und als beim Stehen. Beim Stehen ist der Mensch gegen Vertikalschwingungen, Abb. 6, empfindlicher als gegen Horizontalschwingungen, Abb. 7, was sich aus der Art der Erschütterungsübertragung auf den Kopf erklärt.

Auf einige Sonderbeobachtungen sei noch zum besseren Verständnis der Zusammenhänge hingewiesen. Bei den Untersuchungen an liegenden Menschen war der Kopf gegen die erschütterte Plattform durch ein Kissen abgedeutert. Bei einer Person zeigte sich trotzdem bei ganz bestimmten Schwingungszahlen weit unterhalb des Beeinflussungsgebietes II ein unangenehmes Gefühl, das oberhalb und unterhalb dieser Versuchsfrequenzen verschwand. Es muß sich hierbei wohl um eine Resonanzschwingung der Organe im Kopf handeln. Bei anderen Personen wirkten selbst kurzzeitige Beanspruchungen im Versuchsgebiet II noch bis zu zwei Tagen als Benommenheitsgefühl und als Kopfschmerz nach, trotzdem während der kurzen Beobachtungsdauer keine Schmerzen gespürt worden waren.

Wenn beim liegenden Menschen das Kissen unter dem Kopf entfernt wurde, der Schädel somit unmittelbar den Erschütterungen ausgesetzt war, wurden die Einflüsse wesentlich früher beobachtet als bei abgedeutertem Kopf. Im allgemeinen rückten hierbei die Grenzkurven um zwei Gebiete herab, d. h. der unmittelbar beeinflusste Kopf

empfindet z. B. bereits beim Übergang vom Gebiet Ia zu Ib ein äußerst unangenehmes, wahrscheinlich zu Schädigungen führendes Gefühl. Auch die untere Reizschwelle rückt bei unmittelbarer Beeinflussung des Kopfes erheblich herab.

Diese einzelnen Beobachtungen zeigen die dem Körper zukommende wichtige Aufgabe der Abfederung von Stößen und Erschütterungen, die bei unmittelbarem Auftreffen auf den Kopf für das Gehirn schädlich sein würden.

Eine weitere Beobachtung sei noch erwähnt. Wurde eine Versuchsperson einer Schwingung mit wachsender Amplitude unterworfen, so zeigte sie sich bei einem bestimmten Wert stärker gestört, als wenn bei gleicher Frequenz dieselbe Schwingungsamplitude bei abnehmenden Amplituden eingestellt wurde. Es ist dies eine Anpassungserscheinung, die bei der Untersuchung anderer menschlicher Sinnesorgane bereits allgemein festgestellt wurde und die z. B. beim menschlichen Auge als „Adaption“ Bedeutung hat⁵⁾. Bei Beginn der Beobachtungen ging man daher grundsätzlich jeweils von dem Zustande der Ruhe aus und setzte die Versuchsperson dann einige Minuten dem zu prüfenden Einfluß aus.

Bei zwei Personen schwankten die Werte nach beiden Richtungen stark. Eine davon war sehr nervös und besonders stark empfindlich gegen Erschütterungen; bei der anderen, auf dem Lande aufgewachsenen und dort lebenden Person wurde wesentlich geringere Empfindlichkeit als bei den übrigen Versuchspersonen festgestellt.

4. Auswertung der Versuchsergebnisse. Die Auswertung der Versuchsergebnisse zeigt, daß sich die Grenzkurven der verschiedenen Empfindungsgebiete abhängig von der Amplitude a und der Frequenz n durch eine Gleichung

$$a \cdot n^k = c$$

darstellen lassen, wobei der Exponent k und der Beiwert c je nach der Lage der Grenzkurve verschieden sind. Zusammenhänge dieser Art gelten nahezu genau bis zur Frequenz von rd. 40 Hertz. Die Werte k und c sind entsprechend dem Verlauf der Grenzkurven in Abb. 6 bis 10 in Zahlentafel 1 eingetragen.

Für die Reizschwelle der Erschütterungsempfindung ist für alle vier untersuchten Fälle der Exponent $k=1$. Dies bedeutet, daß der Reizschwellenwert für sämtliche Frequenzen und Amplituden jeweils einen gleichbleibenden Wert $a \cdot n$ besitzt, daß also die untere Reizschwelle festgelegt ist durch eine konstante Schwingungsgeschwindigkeit. Gegen das Schädlichkeitsgebiet verschieben sich die Grenzlinien so, daß k zunimmt. Ein Wert $k=2$ entspricht einer Linie konstanter Beschleunigung $a \cdot n^2 = c$.

Es zeigt sich somit, daß für die Reizschwelle das Produkt $a \cdot n$ und somit die Schwingungsgeschwindigkeit für die Empfindungsstärke des Menschen entscheidend ist, während für starke Erschütterungen die Beschleunigung und deren zeitliche Änderung mehr und mehr von Einfluß wird.

Die Ergebnisse lassen mit Sicherheit den Grad der Schädlichkeit nicht nur sinusförmiger Schwingungen, sondern periodischer Schwingungen jeder Art feststellen. Durch Aufnahme eines Erschütterungsbildes lassen sich jeweils die Amplitude und Frequenz der einzelnen Teilschwingungen finden. Unter Zuhilfenahme der Schaubilder 6 bis 10 ist dann ohne weiteres der Grad der Schädlichkeit der einzelnen Teil-Erschütterungen feststellbar. Dagegen sagt das Ergebnis zunächst über den Einfluß von Stößen auf den menschlichen Organismus nichts aus. Versuche hierüber sind im Gange. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse wird demnächst folgen.

Grundsätzlich muß der Mensch vor allen Erschütterungseinflüssen der Gebiete II geschützt werden. In ausgesprochenen Wohngebieten sind auch Erschütterungen zu vermeiden, die in die Gebiete I c fallen. Das Einhalten dieser Vorschriften wird sicher eine Abnahme der Nervosität der Menschen in Großstädten und Industriebezirken zur Folge haben und damit zur Hebung der Gesundheit und Leistungsfähigkeit beitragen.

Zahlentafel 1

Exponenten k und charakteristische Beiwerte $c = a \cdot n^k$ für die Grenzen der Empfindungsgebiete des Menschen gegen Erschütterungen

Grenzlinie zwischen Gebiet		Werte k und c für Abbildung					Gefühlswerte
		6	7	8	9	10	
0/I a	k c	1 0,005	1 0,006	1 0,012	1 0,006	1 0,006	Reizschwelle
I a/I b	k c	1 0,014	1 0,018	1 0,034	1 0,016	1 0,0164	Beginn d. gut Spürbaren
I b/I c	k c	1 0,04	1,8 0,66	1,5 1,33	1,5 0,20	1 0,03	Beginn d. Lästigen
I c/II a	k c	1,6 0,528	2,1 4,74	2,3 14	2,0 2,18	1,5 0,375	Schädlichkeitschwelle
II a/II b	k c	2,0 3,0	2,4 24,4	2,6 70	2,4 13,3	2,0 3,7	Gefährlichkeitsgrenze

5. Vergleich mit älteren Ergebnissen. Über die Beeinflussung des Menschen durch Erschütterungen liegen nur vereinzelte Ergebnisse vor. Geiger⁶⁾ erwähnt, daß sinusförmige Vertikal-schwingungen von 10 Hertz und 0,0025 cm Amplitude unangenehm empfunden werden; bei 5 Hertz

⁵⁾ M. Luckiesh, Licht und Arbeit, Berlin 1926, S. 116.

⁶⁾ J. Geiger, Mechanische Schwingungen, Berlin 1927, S. 250.

tritt dies bei einer Amplitude von 0,006 cm ein. Horizontalschwingungen von 5 Hertz werden bereits bei 0,003 cm unangenehm empfunden, bei 0,007 cm wirken sie stark störend. Diese Ergebnisse zeigen angenäherte Übereinstimmung mit den Werten der Abb. 6 und 7: sie liegen jeweils im Gebiet Ib.

Reiher⁷⁾ stellt fest, daß Horizontalschwingungen von 2,5 Hertz und 0,037 cm Amplitude für stehende Menschen im Gebiet des „sehr Unangenehmen“ liegen. Auch hier zeigt sich gute Übereinstimmung mit den vorliegenden Werten (Ic in Abb. 7).

Digby und Sankey⁸⁾ führten Versuche in der Weise durch, daß sie eine Tischplatte in vertikale Sinusschwingungen versetzten und daß der Beobachter die Hand auf den Tisch setzte oder den Kopf in die auf den Tisch gestützte Hand legte. Dabei wurde für alle Empfindungsgebiete die Beziehung $a \cdot u = c$, d. h. Kennlinien gleichbleibender Schwingungsgeschwindigkeit, gefunden, und zwar:

Reizschwelle	$a \cdot u = 0,005 \text{ cm/s}$
deutlich fühlbar (beginnt)	$a \cdot u = 0,01 \text{ „}$
lästig (beginnt)	$a \cdot u = 0,05 \text{ „}$
Schädlichkeitsgrenze	$a \cdot u = 0,1 \text{ „}$

Diese Abhängigkeit der Empfindungsstärke von der Schwingungsgeschwindigkeit wurde bei den vorliegenden Untersuchungen für die Gebiete der erträglichen Schwingungen angenähert gefunden.

Bei stärkeren Erschütterungen Ic bis II trat dagegen eine Annäherung an Werte ein, die von Mallock⁹⁾ festgestellt wurden und die eine Abhängigkeit der Empfindungsgrenzen von den auftretenden Beschleunigungen in der folgenden Weise feststellte, wobei $g = 981 \text{ cm/s}^2$ die Erdbeschleunigung bedeutet.

Reizschwelle: bei Beschleunigung	$0,005 g = 4,9 \text{ cm/s}^2$
deutlich fühlbar	$0,01 g = 9,8 \text{ „}$
lästig	$0,05 g = 49,05 \text{ „}$
Schädlichkeitsgrenze	$0,1 g = 98,1 \text{ „}$

Die grundsätzliche Abweichung dieser beiden Beobachtungsreihen voneinander erklärt sich vielleicht daraus, daß Digby und Sankey ihre Messungen hauptsächlich im Gebiet tiefer Frequenzen, Mallock die seinigen im Gebiet hoher Frequenzen durchführte und daß dann die Ergebnisse auf das gesamte Gebiet erweitert wurden.

Nach den vorliegenden Beobachtungen dürfte weder die eine noch die andere Anschauung grundsätzlich zutreffen, die Zusammenhänge sind verwickelter, als daß sie für alle Frequenz- und Amplitudengebiete durch einfache Einflußgrößen charakterisiert werden könnten.

6. Zusammenfassung. Um brauchbare Unterlagen für die Beurteilung der Beeinflussung des menschlichen Körpers durch horizontale und vertikale Erschütterungen zu schaffen, wurden diese Einflüsse systematisch untersucht.

Eine Plattform wurde in sinusförmige Horizontal- und Vertikalschwingungen veränderlicher Größe versetzt. Die zu beobachtende Person lag oder stand auf dieser Plattform, so daß die Schwingungen in der Körperachse oder senkrecht dazu wirken konnten. Die Versuche hatten zum Ziel, die Reizschwelle und die Schädlichkeitsschwelle der Erschütterungsempfindung festzustellen und für das Zwischengebiet gegebenenfalls Grenzen verschiedener Beeinflussungsgrade festzulegen.

Die Ergebnisse wurden in Diagramme eingetragen und zeigen im Gegensatz zu älteren Untersuchungen, daß eine grundsätzliche allgemeine Abhängigkeit der Empfindungsstärke von nur einer der für die Charakterisierung von Schwingungen maßgebenden Größen (Amplitude, Frequenz, Geschwindigkeit, Beschleunigung) nicht besteht. Die Reizschwelle der Erschütterungsempfindung liegt bei allen vorgenommenen Untersuchungen bei einem konstanten Wert des Produktes aus Frequenz und Amplitude, also bei einer konstanten Schwingungsgeschwindigkeit, während das Kennzeichen der Schädlichkeitsgrenze je nach der Art der Beanspruchung wechselt.

Für periodische Erschütterungen jeder Art läßt sich durch Messung der Größe und Art der Störung und nach Feststellen der Amplitude und Frequenz der sinusförmigen Teiltöne bestimmen, in welches Empfindungsgebiet die jeweilige Teilfrequenz fällt, d. h. ob die fragliche Störung für den menschlichen Organismus schädlich ist oder nicht. [RF 269]

⁷⁾ H. Reiher, VDI-Zeitschr. Bd. 74 (1930) S. 601.

⁸⁾ W. Digby u. H. R. Sankey, The Electrician Bd. 67 (1911) S. 888.

⁹⁾ A. Mallock, Board of Trade Report 1902, Appendix 5.