

(Aus dem Kaiser Wilhelm-Institut für Arbeitsphysiologie Dortmund-Münster.)

Die Wirkung sinusförmiger Vertikalschwingungen auf den sitzenden und stehenden Menschen.

Von

E. A. Müller.

Mit 13 Textabbildungen.

(Eingegangen am 12. Januar 1939.)

Die Wirkung sinusförmiger Horizontal- und Vertikalschwingungen auf den (stehenden oder liegenden) Menschen ist 1931 von *Reiher* und *Meister*¹ untersucht worden. In einem Frequenzbereich von 3—70 Hertz wurden Amplituden von 0,0001—0,1 cm erreicht. 10 Versuchspersonen (Vp.) zwischen 20 und 27 Jahren hatten nach 5 Min. Einwirkungszeit anzugeben, ob die Schwingungen „nicht spürbar“, „schwach spürbar“, „gut spürbar“, „stark spürbar“, „unangenehm“ oder „sehr unangenehm“ waren. *Reiher* und *Meister* fanden, daß die Reizschwelle, d. h. die Grenze zwischen den Angaben „nicht spürbar“ und „schwach spürbar“, stets bei einem konstanten Wert des Produktes aus Frequenz und Amplitude liegt. Im übrigen konnten sie eine Abhängigkeit der Empfindungsstärke von nur einer Größe (Amplitude, Frequenz, Geschwindigkeit, Beschleunigung) nicht nachweisen. Die Grenzen zwischen den zitierten subjektiven Angaben waren durch die Gleichung $a \cdot n^k = c$ darzustellen, in der a die Amplitude, n die Frequenz und k und c für jede Grenzlinie, Körperstellung (stehend, liegend) und Schwingungsrichtung (vertikal, horizontal) verschiedene Konstanten bedeuten. Besonders unempfindlich waren die Vp. im Liegen gegen vertikale Schwingungen, besonders empfindlich im Stehen gegen Vertikalschwingungen.

In einer amerikanischen Arbeit (*Olley*²), die ebenfalls von Technikern durchgeführt wurde, interessierte die im Automobil noch als „comfortable“ empfundene Einstellung von Frequenz und Amplitude. Es wurden sinusförmige Horizontalschwingungen zwischen 1 und 6 Hertz und zwischen 0,1 und 6,0 cm Amplitude geprüft. Als Sitz wurde ein gefedertes und gepolstertes Sitzkissen aus einem Auto verwendet. Es fehlen genauere Angaben über dieses Sitzkissen.

Unter den Physiologen hat zuerst *Schubert*³ im Zusammenhang mit der Physiologie des Menschen im Flugzeug die Ergebnisse der Techniker einer kritischen Betrachtung unterzogen. Er hat darauf hingewiesen, daß stets mehrere Sinnesorgane durch die Erschütterungen betroffen sind, so daß eine einheitliche Beziehung zwischen Empfindungs- und Erschütterungsstärke, wie sie von *Zeller*⁴ angenommen wurde, nicht zu erwarten ist. Eine klare Darstellung des Problems der Schwingungswirkung auf den Menschen und die Zitate einer Reihe weiterer Arbeiten

finden sich in der Einleitung einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung von *Cörmann*⁵, in der eine Apparatur für Schwingungen zwischen 20 und 1000 Hertz und Amplituden zwischen mehreren Millimetern und $\frac{1}{1000}$ mm beschrieben wird.

Bei der praktischen Bedeutung von Schwingungen sind diese wenigen Bearbeitungen des Schwingungsproblems durch Nichtphysiologen unbefriedigend. Wir haben daher unsererseits sinusförmige Schwingungen untersucht, die auf den stehenden und sitzenden Menschen in Richtung der Körperachse einwirkten. Neben der Erfassung der subjektiven Angaben über die erträglichen Grenzwerte von Amplitude und Frequenz wurde der Einfluß der Schwingungen auf die Atmung, den Energieverbrauch, den Blutdruck, den Puls und die Blutverteilung gemessen. Zugleich wurde die Mitbewegung des Kopfes und Rumpfes registriert und das Gesamtbild der physiologischen Wirkungen analysiert.

Versuchsanordnung.

Abb. 1 zeigt die Anordnung der verwendeten Apparatur. Der aus U-Eisen geschweißte Rahmen *R* von 0,75 m Länge und 0,5 m Breite ist um die horizontale Achse *X X*₁ drehbar an der Wand befestigt. Im freien Ende des Rahmens ist durch eingefügte Bretter die in Abb. 1 schraffierte Schwingungsfläche *S-Fl* geschaffen.

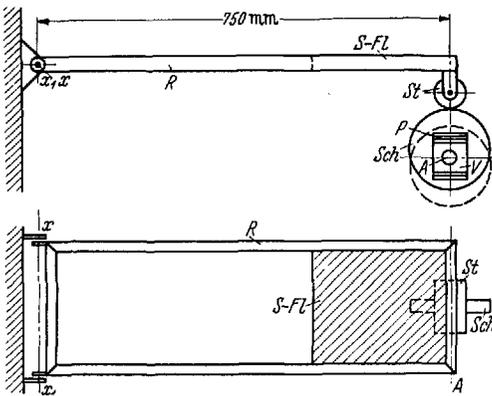


Abb. 1.

Die freie Breitseite des Rahmens trägt in einer abwärts gerichteten Gabel die Stahlrolle *St* von 47 mm \varnothing , die in Kugellagern gut gepaßt läuft. Diese Rolle steht über der Achse der Stahlscheibe *Sch* von 127 mm \varnothing . Die Scheibe *Sch* besitzt eine rechteckige Aussparung, die der Vierkant *V* und eine Reihe von Paßstücken *P* genau ausfüllen. Durch verschiedene Verteilung der Paßstücke auf beide Seiten des Vierkants läßt sich die Scheibe *Sch* in verschiedener Größe (1—20 mm) exzentrisch zur Welle *A* einstellen. Die Welle *A* wird über ein stufenloses Ölgetriebe von einem Drehstrommotor mit Tourenzahlen zwischen 0 und 1200 U/min beliebig angetrieben.

Bei dieser Anordnung kommt es bei exzentrischer Einstellung der Scheibe *Sch* zu sinusförmigen Schwingungen der Schwingungsfläche *S-Fl*. Da das Ölgetriebe jedoch keine zwangsläufige Kuppelung zwischen Elektromotor und Welle *A* bildete, erforderte der Anstieg der Schwingungsfläche eine etwas längere Zeit als der Wiederabfall. Eine Registrierung der Schwingungen der Schwingungsfläche ergab (Tabelle 1).

Am größten ist die Verzerrung der Sinuskurve bei großer Amplitude und niedriger Frequenzzahl. Größere Amplituden als 1,6 cm konnten daher nicht untersucht

Tabelle 1. Belastung: 68 kg.

Amplitude in cm	Anstiegszeit in % der Gesamtzeit bei Hertz					
	2	4	5	6	8	10
0,5	—	51	—	50	50	50
0,8	56	54	—	54	52	—
1,6	65	57	55	—	—	—

werden. In der Wirkung auf die Vp. kompensiert der raschere Abfall den langsameren Anstieg der Schwingungsfläche bis zu einem gewissen Grade.

Es ist ein weiterer Nachteil unserer Apparatur, daß aus räumlichen Gründen der Abstand der Achsen $X X_1$ und A relativ klein gewählt werden mußte. Die Amplitude nimmt daher vom freien Ende des Rahmens nach der Achse $X X_1$ verhältnismäßig stark ab. Die in dieser Arbeit angegebenen Schwingungsflächen-Amplituden (S-Fl-Ampl.) gelten jeweils für den Punkt der Schwingungsfläche, der von der Längsachse des Körpers geschnitten wurde.

Um die Vertikalbewegungen des Kopfes bei den verschiedenen Amplituden und Frequenzen aufzuzeichnen, bedienten wir uns folgender Anordnung (Abb. 2). Der Metallbügel B ist in geeigneter Weise so mit dem Kopf gelenkig verbunden, daß seine Gelenkpunkte $a—a_1$ etwa in eine beide Ohrklappen verbindende Achse fallen. Der Bügel hängt mit einem Faden an der Feder F , die senkrecht über der Kopfmittle an der Zimmerdecke befestigt ist. Auf der schnell laufenden berußten Trommel T werden die Kopf-Vertikalschwingungen aufgezeichnet. In ähnlicher Weise konnten die Bewegungen anderer Körperpunkte registriert werden.

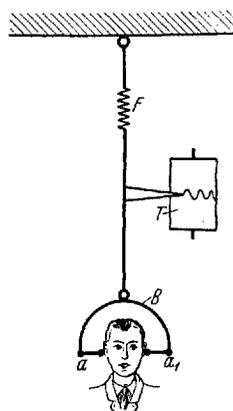


Abb. 2.

Die Ventilationsgröße wurde mit einer trockenen Gasuhr, der Gasstoffwechsel nach *Douglas-Haldane* bestimmt. Als Ventile bewährten sich die Glimmergas-maskenventile der *Auer-Gesellschaft*.

Puls und Blutdruck sind während stärkerer Schwingungen nicht zu bestimmen. Sie wurden dann unmittelbar nach Aufhören des Schwingungsversuches gemessen.

Um einen Eindruck über die Blutverteilung zu erhalten, wurde die Hauttemperatur des Unterschenkels mit Widerstandsthermometern verfolgt. Das Widerstandsthermometer wurde mit einigen Bindenwicklungen auf einer bestimmten Hautstelle fixiert.

Als Vp. standen zur Verfügung:

Die Versuche fanden in folgenden Variationen statt: Sitzend ohne Polster SI , stehend auf der ganzen Fußfläche bei durchgedrückten Knien ST_1 , stehend auf

der ganzen Fußfläche bei leicht gebeugten Knien ST_2 und stehend auf den Zehenspitzen bei leicht gebeugten Knien ST_3 . Untersucht wurden Frequenzen von 2—20 Hertz und Amplituden von 0,08—1,6 cm.

Vp.	Geschlecht	Alter in Jahren	Gewicht in kg	Größe in cm
A	♀	26	65	159
B	♀	37	62	173
C	♀	17	60	166

Subjektive Erträglichkeitsgrenzen.

Wir haben zunächst versucht, die Grenzwerte der Frequenz zu bestimmen, die bei verschiedenen Amplituden im Sitzen und Stehen 1—2 Min. ertragen werden konnten. Diese auf der subjektiven Meinung der Vp. beruhenden Bestimmungen sind sicherlich sehr unsicher und unzuverlässig. Sie geben aber, so lange man keinen objektiv erfaßbaren Test für die Schwingungswirkungen besitzt, ein verwendbares Maß für den Einfluß von Frequenz und Amplitude sowie für die federnde Wirkung des Stehens gegenüber dem Sitzen. Wir untersuchten Vp. A im Sitzen, Vp. B bei den drei verschiedenen Arten des Stehens. Das

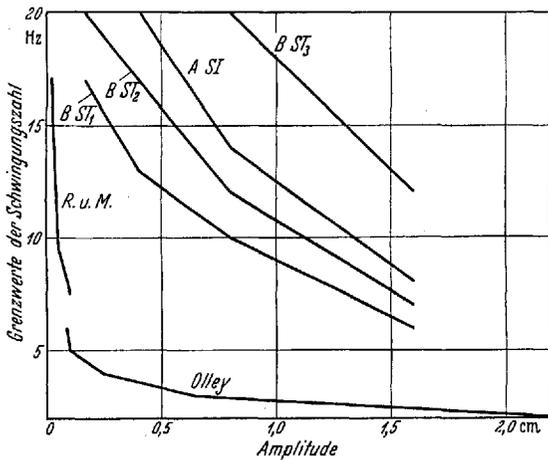


Abb. 3.

Ergebnis ist in Abb. 3 zusammengestellt. In dieser Abbildung sind zugleich aus der in der Einleitung referierten Arbeit von *Reiher* und *Meister*¹ die höchsten beim Stehen und vertikaler Schwingungsrichtung erreichten Werte sowie die Werte der Arbeit von *Olley* kurvenmäßig eingetragen. Sämtliche Kurven betreffen die vertikale Schwingungsrichtung.

Obwohl die 6 Kurven der Abb. 3 auf Grund subjektiver Aussagen unter verschiedenen Bedingungen in drei verschiedenen Laboratorien gewonnen wurden, zeigen sie einen sehr ähnlichen Verlauf. Mit zunehmender Amplitude sinkt in allen Kurven stetig die Frequenz, die den gleichen subjektiven Eindruck hervorruft. Es gibt keine Schwingungszahl im Mittelbereich, die besonders günstig oder ungünstig ist. Direkt vergleichbar ist nur die von *Reiher* und *Meister* als obere Grenze des gefährlichen und schädlichen Bereiches angegebene Kurve beim Stehen und bei vertikaler Schwingungsrichtung mit unseren Kurven für B ST, die unter den gleichen Bedingungen ermittelt wurden. Unsere Vp. erträgt sehr viel höhere Frequenzen als die Vp. von *Reiher* und *Meister*. Die Unsicherheit der subjektiven Beurteilung kommt in dieser Differenz zum Ausdruck.

In Abb. 4 ist das Produkt aus Grenzfrequenz und Amplitude als Ordinate, die Amplitude als Abszisse aufgetragen. Das Produkt aus Frequenz und Amplitude ist der Schwingungsgeschwindigkeit proportional. Mit Zunahme der Amplitude ist für den gleichen subjektiven Eindruck eine höhere Schwingungsgeschwindigkeit erforderlich. Eine

bestimmte Schwingungsgeschwindigkeit wird subjektiv um so stärker empfunden, je größer die Frequenz, je kleiner entsprechend die Amplitude ist.

Die mittlere Beschleunigung b berechnet sich vom Durchlaufen des Umkehrpunktes (Geschwindigkeit 0) bis zum Erreichen der Höchst-

Tabelle 2.
Beschleunigungsgrenzwerte
in cm/sec^2 .
Darunter zugehörige Frequenz
in Klammern.

Versuch	Amplitude in cm			
	0,16	0,4	0,8	1,6
B ST ₁	600 (17)	900 (13)	1000 (10)	700 (6)
B ST ₂	800 (20)	1500 (17)	1400 (12)	1000 (7)
A SI		2000 (20)	2000 (14)	1300 (8)
B ST ₃			4000 (20)	2900 (12)

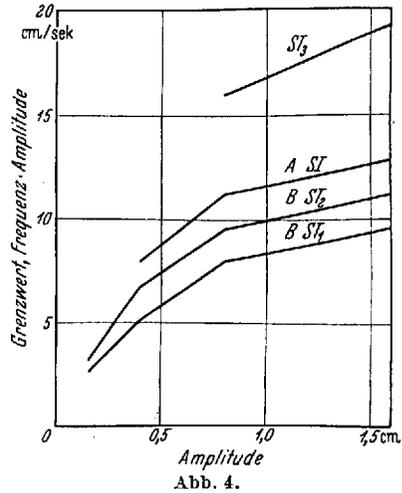


Abb. 4.

geschwindigkeit in der Mittelstellung der Schwingungsfläche zu $b = 4 A n^2 \pi$,

worin A die Amplitude in Zentimetern, n die Frequenz in Hertz bedeutet. Die maximale Beschleunigung berechnet sich zu $b_{\text{max}} = 2 A n^2 \pi^2$.

Sie ist etwa 60% größer als die mittlere Beschleunigung. Die Beschleunigung wächst also proportional der Amplitude, jedoch proportional dem Quadrat der Schwingungszahl. Errechnen wir nach der ersten Formel aus unseren Ergebnissen die maximal erträglichen b -Werte, so erhalten wir die Werte der Tabelle 2.

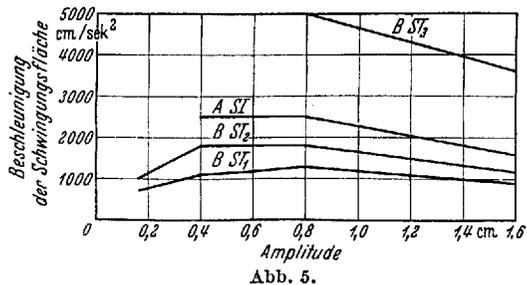


Abb. 5.

Zeichnen wir in Abb. 5 die maximal erträgliche mittlere Beschleunigung b als Ordinate, die Amplitude wieder als Abszisse auf, so finden wir ebensowenig wie *Reiher* und *Meister* eine konstante Beschleunigung bei jeder Kurve als begrenzenden Faktor. Während jedoch die Grenzwerte der subjektiv empfundenen Erträglichkeit mit abnehmender Amplitude bei stetig zunehmender Frequenz liegen (Abb. 3), ist in Abb. 5 in einem weiten Bereich eine relative Konstanz der Grenzwerte der Beschleunigung für die verschiedenen Amplituden zu verzeichnen. Wir werden später sehen, daß einige Abweichungen von dieser Konstanz erklärbar sind.

Die Übertragung der Schwingungen auf den Körper.

Die Schwingungen der Schwingungsfläche bringen den sitzenden bzw. stehenden Körper in Schwingungen, die in verschiedenen Teilen sehr verschieden sind. Wenn sich bei langsamer Frequenz die Schwingungsfläche langsam hebt und senkt, folgen alle Körperpartien des Menschen auch bei größerer Amplitude nahezu getreu dem Bewegungsablauf. Bei höheren Frequenzen weicht jedoch die Bewegungskurve vieler Körperpunkte von der der Schwingungsfläche ab. Die Masse des

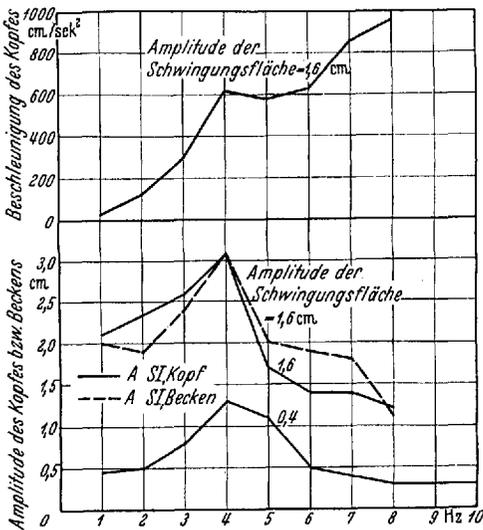


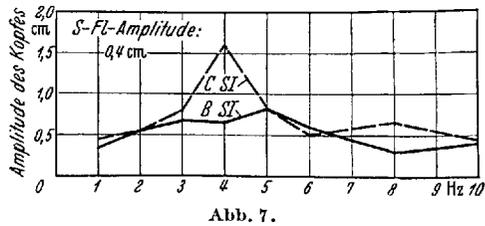
Abb. 6a unteres Feld, Abb. 6b oberes Feld.

und C im Sitzen, bei Vp. B auch im Stehen (stramm, kniefedernd, zehenfedernd) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den Abb. 6—8 dargestellt. Die Resultate an Vp. A in Abb. 6a zeigen, daß die Amplitude des Kopfes nur bei sehr wenigen Frequenzen der Amplitude der Schwingungsfläche (S-Fl-Amplitude) gleich ist. Bei 0,4 cm S-Fl-Amplitude ist die Kopfamplitude bei 1 und 2 Hertz etwa gleich groß. Bei weiter zunehmender Schwingungszahl steigt sie stark an, um bei 4 Hertz ein Maximum mit mehr als 300% der S-Fl-Amplitude zu erreichen. Sie fällt dann wieder ab, ist bei 7 Hertz der S-Fl-Amplitude gleich, bei 8 Hertz nur mehr $\frac{3}{4}$ so groß wie diese. Einen ganz gleichartigen Verlauf zeigt die Kopfamplitude bei 1,6 cm S-Fl-Amplitude mit veränderter Frequenz. Es ist bemerkenswert, daß im Maximum die Kopfamplitude hier nur auf etwa 200% der S-Fl-Amplitude vergrößert ist, im absoluten Maß dagegen etwa um den gleichen Betrag wie bei der 0,4 cm-S-Fl-Amplitude. Die Eigenschwingung des Körpers ist vermutlich in beiden Fällen maximal angeregt.

Körpers, die Elastizität der Weichteile und die Gelenkverbindungen der einzelnen Körperteile ergeben eine Verkleinerung oder Vergrößerung der Schwingungsamplituden in verschiedenen Körperpunkten. Da die stärkeren und frequenteren Schwingungen, wie auch *Reiher* und *Meister* beobachteten, vor allem im Kopf unangenehm empfunden werden, untersuchten wir die Vertikalbewegungen des Kopfes bei einigen Schwingungsamplituden und -frequenzen. Die Versuche wurden bei Vp. A, B

In Abb. 6a ist für die 1,6 cm-S-Fl-Amplitude eine weitere gestrichelte Kurve gezeichnet, die nach Befestigung des in Abb. 2 von der Feder F ausgehenden Fadens an einem Hüftgürtel in Rückenmitte aufgenommen wurde. Sie gibt ungefähr die Amplitude des Beckens wieder. Die Beckenamplitude ist zwischen 1 und 4 Hertz etwas kleiner, zwischen 4 und 8 Hertz etwas größer als die Kopfamplitude. Der im ganzen gleichartige Verlauf der Kurven der Kopf- und Beckenamplitude deutet darauf hin, daß hauptsächlich die Elastizität der Gefäßweichteile die Dissoziation der S-Fl- und Körperamplitude verursacht.

Aus allen Kurven läßt sich ablesen, daß bis zu 4 Hertz die wachsende Resonanz des Körpers und Kopfes zu einer



Amplitudenvergrößerung

führt. Bei höheren Frequenzen kommt es dagegen zu einer Dämpfung und damit Amplitudenverkleinerung.

Zwei andere Vp. hatten im Sitzen ebenfalls Kopfamplituden mit Maxima bei 4 und 5 Hertz (Abb. 7, B SI und C SI). Individuell sehr verschieden war das Ausmaß der Amplitudenvergrößerung im Maximum.

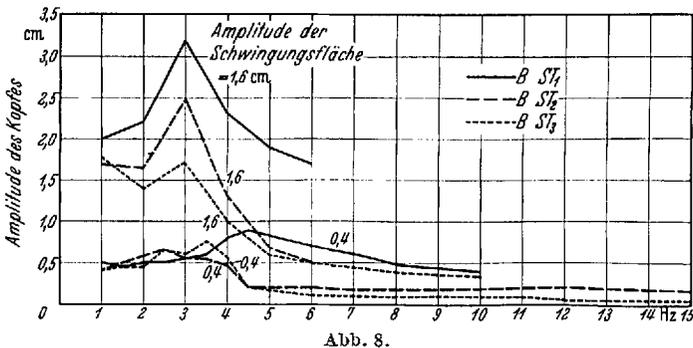


Abb. 8.

In Abb. 8 finden sich die entsprechenden Kurven der Vp. B für das Stehen zusammengestellt. Auch hier treten Maxima auf, die zwischen 3 und 4,5 Hertz liegen. Die Dämpfung ist bei größeren Frequenzen beim Strammstehen nicht so stark wie beim Sitzen. Federndes Stehen in den Knien und mehr noch in den Zehen führt dagegen zu einer außerordentlich starken Dämpfung der Kopfschwingungen. Bei Frequenzen von 5 Hertz aufwärts ist die Kopfamplitude bei einer S-Fl-Amplitude von 1,6 cm und Zehenfederung sogar kleiner als bei einer S-Fl-Amplitude von 0,4 cm und strammem Stehen.

Wir finden also, daß der Körper mit seinen einzelnen Teilen Schwingungen ausführt, die sehr verschieden von der Schwingungsfläche sind,

auf der er sitzt oder steht. Der Körper ist in sich nicht starr und ist auch nicht starr mit der Schwingungsfläche verbunden. Es bestehen elastische Koppelungen, die naturgemäß individuelle Unterschiede aufweisen, so z. B. bei verschiedener Entwicklung der Weichteile des Gesäßes. Bei kniefederndem oder zehenfederndem Stehen tritt noch eine aktive Tätigkeit der Bein- und Fußmuskulatur hinzu, die reflektorisch der plötzlichen Entlastung bzw. Belastung beim Sinken und Steigen der Schwingungsfläche entgegenwirkt. Wir werden später über den Energieverbrauch berichten, den dieser Muskeleinsatz benötigt.

Wir wollen versuchen, den Verlauf der Kurven der Abb. 6—8 zu den gefundenen subjektiven Erträglichkeitsgrenzen in Beziehung zu setzen. Man würde erwarten, daß der Frequenzbereich, der besonders beim Sitzen durch Resonanz eine Vergrößerung der Kopfamplitude gegenüber der S-Fl-Amplitude aufweist, von den Vp. besonders unangenehm empfunden wird, unangenehmer vor allem als der anschließende höhere Frequenzbereich. Wir müssen uns jedoch erinnern, daß das subjektive Empfinden ungefähr mit der Beschleunigungsgröße verknüpft ist, daß also die Frequenz im Quadrat zur Wirkung kommt. Zeichnen wir in Abb. 6b die mittleren Beschleunigungswerte des Kopfes für 1,6 cm-S-Fl-Amplitude als Ordinate ein, so ist der Anstieg der sich ergebenden Kurve mit der Frequenz zwischen 4—6 Hertz nur unterbrochen. Der Kurvenverlauf gibt aber keinen Anhalt mehr für ein subjektiv angenehmeres Empfinden bei 5—6 Hertz als bei 4 Hertz. Dennoch bedeutet der steile Anstieg der Beschleunigungswerte zwischen 1 und 4 Hertz, daß eine

Herabsetzung der Frequenz in diesem Bereich sehr viel bedeutsamer sein muß als etwa von 6 auf 4 Hertz.

Bei höheren Frequenzen ist bei allen Versuchen eine starke Dämpfung der Körper- bzw. Kopfschwingungen gegenüber den Schwingungen der Schwingungsfläche vorhanden, am stärksten bei zehenfederndem Stehen

Tabelle 3.

Versuchsart	Bei 1,6 cm-S-Fl-Amplitude		
	Grenzfrequenz Hertz	Kopf-amplitude bei Grenzfrequenz cm	Kopfbeschleunigung bei Grenzfrequenz cm/sec ²
B ST ₁	6	1,7	770
B ST ₂	7	0,5 *	280
A SI	8	1,2	960
B ST ₃	12	0,3 *	540

* Werte extrapoliert.

(ST₃). Diese Dämpfung ist mit den gefundenen Erträglichkeitsverhältnissen bei einer Amplitude von 1,6 cm in Tabelle 3 verglichen worden.

Die in der letzten Spalte, der Tabelle 3 enthaltene mittlere Kopfbeschleunigung bei der Grenzfrequenz ist bei den 4 Versuchsarten sehr verschieden. Sie ist beim Sitzen mehr als 3mal so hoch wie beim kniefedernden Stehen. Wir schließen daraus, daß nicht bei allen 4 Versuchsarten die Beschleunigung des Kopfes bzw. Körpers den Grenzwert der Frequenz bestimmt. Bei B ST₂ und auch bei B ST₃ wird durch die

Federbewegung der Knie- bzw. Fußgelenke die Beschleunigung des Kopfes außerordentlich stark gedämpft. Die Frequenz der Schwingungsfläche kann aber nicht so weit erhöht werden, daß der Kopf die Beschleunigungswerte erreicht, die er beim Sitzen und strammen Stehen verträgt, weil die Bewegungen im Fuß- und Kniegelenk die entsprechenden Frequenzen nicht mitmachen können. Die Maximalfrequenz der Hin- und Herbewegungen eines Gelenkes liegt nämlich in der Größenordnung von 7—12 Bewegungen/sec, in der Größenordnung also der in Tabelle 3 für B ST₂ und B ST₃ gefundenen Maximalfrequenzen. Es entspricht dabei der Erfahrung, daß das Fußgelenk mit dem kleineren Hebelarm und der kleineren Muskelmasse eine größere Frequenz erlaubt als das Kniegelenk. Es kommt hinzu, daß tatsächlich subjektiv Krampfgefühle in den Muskeln bei ST₂ und ST₃ in den Grenzfrequenzen auftraten, während bei ST₁ und SI unangenehme Sensationen in Kopf und Brust vorherrschten.

Der Unterschied der Grenzfrequenz zwischen Sitzen und strammen Stehen (ST₁) erklärt sich dagegen zwanglos aus der besseren Dämpfung beim Sitzen. Die maximalen Kopfbeschleunigungswerte beider Versuchsarten liegen in der gleichen Größenordnung. Werden die Frequenzen bei ST₂ und ST₃ durch die maximale Bewegungsfrequenz der Gliedmaßen begrenzt, die bei ST₁ und SI dagegen durch unangenehme empfundene Beschleunigungswirkungen in Gehirn und Eingeweiden, so muß auffallen, daß beide Kurvenpaare in den Abb. 3—5 einen so gleichartigen Verlauf aufweisen. Offenbar muß auch bei Bewegungen der Gliedmaßen das Produkt aus Bewegungsamplitude und Quadrat der Bewegungsfrequenz die ungefähre größtmögliche Frequenz bei einer bestimmten Amplitude angeben.

Die Wirkung der Schwingungen auf die Ventilation.

Die Schwingungen verändern sowohl den Atemtypus als auch das Atemvolumen. Da, wie wir später sehen werden, der Gasstoffwechsel unter dem Einfluß der Schwingungen zunimmt, ist eine entsprechende Zunahme der Ventilation zu erwarten. Wollen wir feststellen, ob die Ventilationszunahme über das notwendige Maß hinausgeht, so müssen wir den Quotienten Ventilation/Sauerstoffverbrauch (beide Größen in ltr/min.) bilden. In Tabelle 4 ist dieser Quotient für Vp. A beim Sitzen (A SI) und für Vp. B bei kniefederndem Stehen (B ST₂) wiedergegeben.

Wie die Tabelle 4 zeigt, sind die Quotienten in der Ruhe bei beiden Vp. mit 21,3 bzw. 21,5 ungefähr gleich groß. In den Schwingungsversuchen liegen die Quotienten höher. Eine gewisse Erhöhung kommt durch die Zunahme des Energieverbrauches zustande, die gewöhnlich eine relativ größere Zunahme der Ventilation bedingt. Wir wollen daher eine geringe Vergrößerung des Quotienten bis 25 (d. h. um etwa 15%) nicht auf die Schwingungen zurückführen. Wir finden dann, daß die

Vp. B beim kniefedernden Stehen niemals einen größeren Quotienten als 25 aufweist, während Vp. A bei Amplituden von 0,4 und 0,8 cm von 6 Hertz an, bei der Amplitude von 1,6 cm von 4 Hertz an wesentlich höhere Quotienten zeigt. Gerade bei diesen stärker erhöhten Quotienten ist der Energieverbrauch der Vp. A sehr viel kleiner als der der Vp. B (Tabelle 5). Damit sind diese hohen Quotienten eindeutig als schwingungsbedingt anzusehen. Die Abhängigkeit des Quotienten Ventilation/Sauerstoffverbrauch von der Frequenz und Amplitude ist in Abb. 9 für Vp. A dargestellt. Bei 6 Hertz wird ein Maximum erreicht. Zwischen 4 und 6 Hertz findet sich die stärkste Zunahme, während Frequenzen über 6 Hertz den Quotienten nicht weiter erhöhen.

Tabelle 4.

Amplitude cm	Hertz	Ventilation	
		Sauerstoffverbrauch	
		A SI	B ST ₁
Ruhe		21,3	21,5
0,4	4	23	23
	6	33	21
	8	29	23
	10	32	25
0,8	2	23	25
	4	23	24
	6	45	25
	8	42	25
1,6	2	24	22
	4	28	22
	5	44	23

Die fehlende Beeinflussung der Atmung durch die Schwingungen bei Vp. B erklärt sich durch die bessere Abfederung, die im Kniegelenk beim Stehen mit leicht gebeugten Knien erreicht wird. Im Sitzen zeigt die Vp. B gleichfalls eine deutliche Vermehrung des Quotienten Ventilation/Sauerstoffverbrauch, z. B. bei einer Amplitude von 0,8 cm und 6 Hertz von 21,5 auf 37.

Nach unseren Messungen der Körperamplitude an Vp. A würden wir die stärkste Zunahme des Quotienten eher zwischen 2 und 4 Hertz erwarten. Es handelt sich jedoch um 2 verschiedene elastische

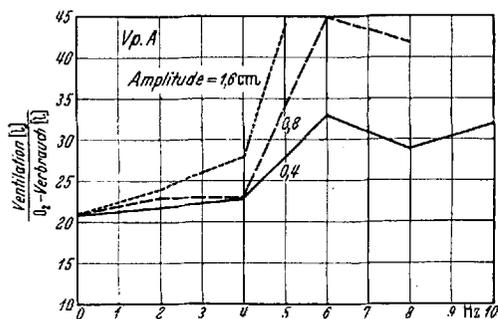


Abb. 9.

Systeme. Die Mitbewegung des Gesamtkörpers hängt von dessen Masse und der Elastizität der Gesäßpolsterung ab. Die Wirkung der Schwingungen auf die Ventilation ist dagegen folgendermaßen zu erklären: Die Eingeweide liegen zwischen zwei elastischen Membranen, zwischen dem Zwerchfell und der Bauchdecke. Sie nehmen beim Steigen bzw. Fallen des Sitzes eine gewisse lebendige Energie auf, die im höchsten bzw. tiefsten Punkt zu einer Fortführung ihrer Bewegung unter Dehnung des Zwerchfells bzw. der Bauchdecke führt. Reflektorische Gegenkontraktionen der Zwerchfell- und Bauchdeckenmuskulatur bremsen vermutlich

diese Ausschläge. Es kommt so eine künstliche Atmung vom Zwerchfell aus zustande, die bei stärkeren Schwingungen Impulse des Atemzentrums überflüssig macht. Es ist daran zu denken, daß auch der Brustkasten zu Schwingungen angeregt werden kann, die in bezug auf die Atmung den schon beschriebenen Schwingungen des Zwerchfells entgegenwirken müssen. Die Größe der Beeinflussung der Atmung durch Schwingungen wird schließlich davon abhängen, ob die Eingeweide gefüllt sind, ob gasgefüllte Hohlräume vorhanden sind und ob durch einengende Kleidung die Nachgiebigkeit der Bauchdecken verringert ist. Wir führten hierzu folgende Versuche durch:

Bei einer S-FI-Amplitude von 0,8 cm und Frequenzen von 5 und 7 und 12 Hertz wurde bei der weiblichen Vp. A im Sitzen die Ventilationsgröße bestimmt. In der Versuchsreihe A I trug die Vp. einen der handelsüblichen Strumpfhalter, bestehend aus einem etwa 20 cm breiten elastischen Leibgurt. In Versuchsreihe A II war dieser Gurt abgelegt. Abb. 10 zeigt die prozentuale Zunahme der Ventilationsgröße in beiden Versuchsreihen in Abhängigkeit von der Schwingungsfrequenz. Bei 5 Hertz steigt die Ruheventilation von 6 ltr/min bei Tragen des Gurtes um 75%, ohne Gurt um 135%. Bei den größeren Frequenzen ist der relative Unterschied geringer, aber doch noch sichtbar.

Die Kurven B I und B II zeigen das Resultat entsprechender Versuche bei 5 und 10 Hertz mit der männlichen Vp. B im Sitzen. Vp. B trug eine Gürtelhose in der Versuchsreihe I mit geschlossenem, in der Versuchsreihe II mit offenem Gürtel und Hosenbund. Ein wesentlicher Unterschied zwischen beiden Versuchsreihen I und II ist nicht aufzuweisen. Das ist auch erklärlich, da Gürtel und Hosenbund im Gegensatz zu dem Strumpfhalter nur auf geringer Breite die Bauchdeckenelastizität beeinflussen. Auffallend ist der große Unterschied in der Zunahme des Atemvolumens bei den beiden Vp. bei 10 Hertz bei unbeeugten Bauchdecken (A I und B I). Die kleinere, jüngere, weibliche Vp. hatte offenbar von Natur weniger nachgiebige Bauchdecken als die größere, ältere, männliche Vp. Es empfiehlt sich für alle Berufe, die Schwingungen ausgesetzt sind, das Tragen eines breiten Leibgurtes. In den Versuchen dieser Arbeit wurde übrigens von der Vp. A der Leibgurt stets getragen.

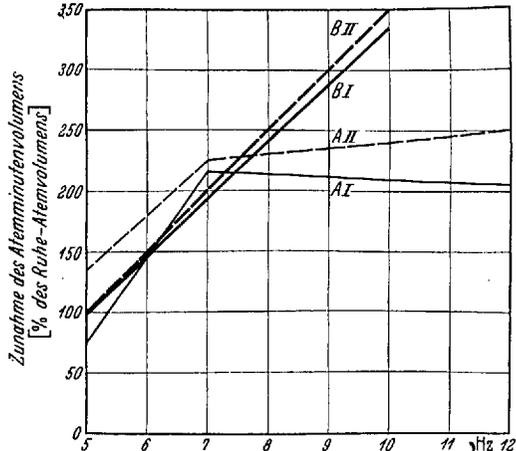


Abb. 10.

Die Hyperventilation unter dem Einfluß der Schwingungen ist natürlich keine Hyperventilation im physiologischen Sinn. Die hohe Atemzahl von 300 Atembewegungen in der Minute bei 5 Hertz führt bei den höchsten beobachteten Hyperventilationen von 7,5 ltr/min nur zu einem Atemvolumen von 30 ccm je Atemzug. Die zahlreichen Verdichtungen und Verdünnungen der Luft in den Atemwegen und Lungen beeinflussen sicher den effektiven schädlichen Raum (*Schoedel*⁶) und ändern überhaupt den ganzen Atemvorgang. Das Atemzentrum konnte jedoch durch Einschränkung der willkürlichen Atmung die Wirkung der Schwingungshyperventilation in unseren Versuchen ausgleichen, wie sich aus den normalen respiratorischen Quotienten unserer Gasstoffwechselversuche ergibt.

Die Wirkung der Schwingungen auf den Gasstoffwechsel.

Unter dem Einfluß der Schwingungen führt der Körper zur Erhaltung seines Gleichgewichtes im Sitzen oder Stehen eine große Zahl zusätzlicher Muskelbewegungen aus, die eine Zunahme des Energieverbrauches bewirken. Die Zunahme des Energieverbrauches wurde bei Vp. A im Sitzen (A SI), bei Vp. B bei kniefederndem Stehen (B ST₂), nach der

Methode von *Douglas-Haldane* bei verschiedenen Amplituden und Frequenzen bestimmt. Die Schwingungen wirkten jedesmal bereits 5 Min. vor Beginn des Respirationsversuches auf den Körper ein, damit bei Versuchsbeginn konstante Stoffwechselbedingungen zu erwarten waren. Der Respirationsversuch dauerte 5—10 Min. An jedem Versuchstag wurde der Ruhestoffwechsel bei Vp. A im Sitzen, bei Vp. B im Stehen bestimmt und von dem am gleichen Tage gefundenen Energieumsatz im Schwingungsversuch abgezogen.

Die Zunahme des Energieverbrauches im Schwingungsversuch ist in Tabelle 5 in Prozenten des Ruhestoffwechsels ausgedrückt. Die

Tabelle 5.

S-FI-Amplitude cm	Hertz	Zunahme des Energieverbrauches in % des Ruheenergieverbrauches	
		A SI	B ST ₂
0,08	4	1	—
	8	—	0
	12	4	0
0,4	4	2	16
	6	4	41
	8	8	50
	10	16	54
0,8	2	10	5
	4	13	41
	6	31	75
	8	36	111
1,6	2	— 5	39
	4	50	90
	5	56	104

Tabelle enthält Mittelwerte aus jeweils 2—3 Versuchen. In Abb. 11 ist der Einfluß der verschiedenen Frequenzen auf den Energieverbrauch bei verschiedener Amplitude für beide Vp. zu übersehen. Bei einer Amplitude von 0,08 cm bleiben im Sitzen und Stehen die Änderungen unterhalb 4%, also innerhalb der Fehlergrenzen. Im übrigen wächst die Zunahme des Energieverbrauches etwa proportional der Frequenz und

der Amplitude. Der Anstieg der Kurven ist sehr viel stärker beim Stehen als beim Sitzen.

Untersucht man, welcher Art die Muskelarbeit ist, die dem Körper durch die Schwingungen aufgezwungen wird, so ergeben sich zwei verschiedene, in ihrer Wirkung entgegengesetzte Formen. Durch verstärkte statische Muskelarbeit wird der Körper versuchen, seine Stellung gegen die zusätzlich zur Schwerkraft auftretenden Kräfte aufrechtzuerhalten und der Bewegungskurve der Schwingungsfläche in allen Teilen zu folgen. Durch dynamische Muskelarbeit wird andererseits reflektorisch den Schwingungen entgegengearbeitet. Im Sitzen wird dem plötzlichen

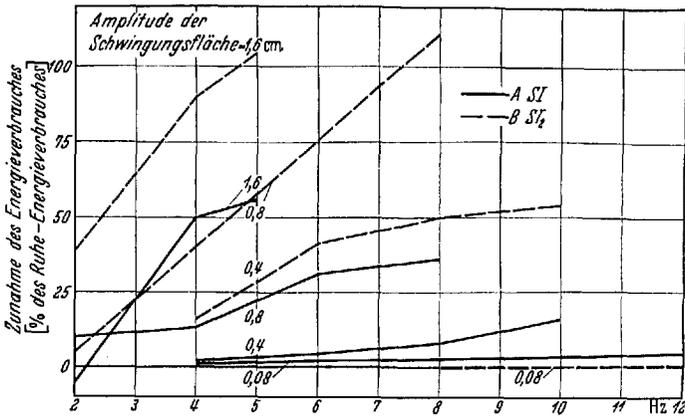


Abb. 11.

Sinken der Schwingungsfläche durch Körperstreckung, im Stehen durch Streckung der Beine begegnet und die Körper-Kopf-Amplitude in der beschriebenen Weise bei höheren Frequenzen verkleinert.

Den dynamischen Anteil der Muskelarbeit könnte man aus der Differenz von Schwingungsflächen- und Kopfamplitude errechnen, wenn diese Differenz nicht auch durch die Elastizität der Körperteile verursacht sein könnte. Führt man orientierungshalber eine Leistungsberechnung für den Körper durch und vergleicht sie mit dem Energieverbrauch, so ergibt sich folgendes: Die Leistung der Schwingungsapparatur am Körper ist gleich Körpergewicht mal Frequenz mal S-FI-Amplitude. Das Produkt aus Körpergewicht mal Frequenz mal Kopfamplitude gibt uns dagegen ungefähr an, welchen Teil der Leistung der Schwingungsapparatur der Körper aufnimmt. Die Differenz der beiden Leistungswerte ist die maximale Leistung der Beinmuskulatur. In Tabelle 6 ist diese Leistung für B ST₂ errechnet und in mkg/min. und cal/min ausgedrückt. Daneben steht der Energieverbrauch, gleichfalls in cal/min. Aus beiden Werten wurde ein Wirkungsgrad gebildet (letzter Stab der Tabelle), der angibt, welcher Teil des Energieverbrauches für mechanische Arbeit aufgewendet wurde. Dieser Wirkungsgrad hat beim Stehen eine

normale Größe. Beim Sitzen ist er dagegen sehr hoch. Das erklärt sich eben dadurch, daß beim Sitzen die Amplitudendämpfung nicht mit Muskelarbeit zusammenhängt, sondern eine Folge der Gesäßelastizität ist, wie auch schon aus dem Verlauf der Becken- und Kopfamplitude geschlossen werden konnte. Die niedrigen Wirkungsgrade beim Stehen deuten andererseits darauf hin, daß hier wesentliche Teile der Amplitudendämpfung der dynamischen Muskelarbeit zuzuordnen sind. Der Einfluß vermehrter statischer Muskelarbeit ist vieldeutig, da sie einerseits Energiemehrverbrauch ohne Arbeitsleistung, also eine Verschlechterung des Wirkungsgrades bedingt, andererseits durch Veränderung der Elastizität die Amplitudendämpfung verbessern und so einen höheren Wirkungsgrad im letzten Stab der Tabelle 6 ergeben kann.

Tabelle 6.

Versuchsart	Amplitude		Frequenz Hertz	Leistung der Schwingungs- apparatur mgk/min	Vom Körper auf- genommene Leistung mgk/min	Leistung der Beinmuskulatur		Energie- mehr- verbrauch cal/min	Wir- kungs- grad
	Schwin- gungs- fläche cm	Kopf cm				mgk/min	cal/min		
B ST ₂	0,4	0,2	6	94	47	47	110	480	0,23
	0,4	0,2	8	125	62	63	148	575	0,26
	0,4	0,2	10	156	78	78	183	630	0,29
	1,6	1,3	4	250	204	46	108	1050	0,10
	1,6	0,7	5	312	137	175	410	1210	0,34
A SI	0,4	0,3	8	125	94	31	73	80	0,91
	0,4	0,3	10	156	117	39	91	175	0,52

Wie Abb. 11 zeigt, setzt beim kniefedernden Stehen eine stärkere Tätigkeit der Beinmuskulatur bei 0,4 und 0,8 cm Amplitude erst bei etwa 2 Hertz ein. Es existiert also eine Reizschwelle der Frequenz — und wahrscheinlich auch der Amplitude — für die reflektorische Gegenkontraktion der Muskeln.

Die Wirkung der Schwingungen auf den Kreislauf.

Wenn wir die Wirkung der Schwingungen auf den Kreislauf erfassen wollen, so müssen wir Reaktionen ausschließen, die einfach die Folge des erhöhten Energieverbrauchs darstellen. Wir erreichen das dadurch, daß wir bei einer Frequenz und Amplitude untersuchen, die einen nennenswerten Energiemehrverbrauch nicht aufweist. Bei B ST₂ (kniefederndes Stehen) gilt dies für 12 Hertz (Abb. 11) und für eine S-FI-Amplitude von 0,08 cm. Dieser vibrationsartige Schwingungseinfluß auf den Körper stört zudem nicht eine Messung von Puls und Blutdruck während der Schwingungen selbst. In Abb. 12 sind die Mittelwerte von Versuchen an 4 verschiedenen Tagen wiedergegeben. Auf eine Vorperiode von 8 Min. folgt eine Schwingungsperiode von 15 Min. Die Messungen

wurden in einer Nachperiode von 5 Min. fortgesetzt. In der Vor- und Nachperiode stand die Vp. bequem auf der Schwingungsfläche. Wir finden in Abb. 12 Kurven für den maximalen Blutdruck, für den Puls, für die Hauttemperatur eines Beines sowie für die Zahl der Atemzüge. Die Atemzahl ist während der ganzen Versuchszeit unverändert. Der Blutdruck und die Beintemperatur sinken dagegen sofort nach Einsetzen der Schwingungen, während der Puls gleichzeitig zunimmt. Puls und Blutdruck erreichen nach etwa 10 Min. konstante Werte. Die Beintemperatur sinkt bis zum Aufhören der Schwingungen und auch noch nachher weiter. Puls und Blutdruck nähern sich in der Nachperiode wieder den Ausgangswerten.

Die Messungen von Puls, Blutdruck und Atemzahl sind schon bei einer Amplitude von 0,4 cm nicht mehr möglich. Wir können dann nur

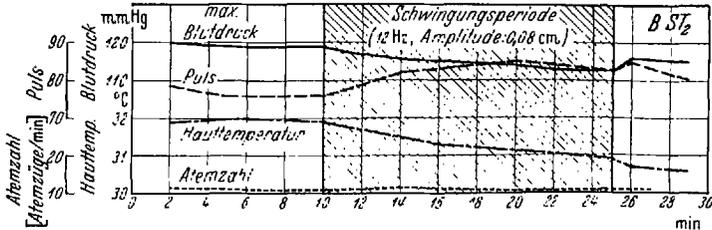


Abb. 12.

unmittelbar vor und nach der Schwingungseinwirkung diese 3 Werte erfassen. Für ein weites Bereich von Frequenz und Amplitude haben wir für A SI und B ST₂ solche Messungen nach 10—15 Min. Schwingungseinwirkung vorgenommen. Über die Werte ist zu sagen, daß sie außerordentlich unregelmäßig sind, sowohl nach Richtung als auch nach Größe. Am deutlichsten und beständigsten war bei B ST₂ eine Blutdrucksenkung (bis zu 14 mm Hg) und eine Pulszunahme (bis zu 14 Schläge). Bei A SI fanden sich im Durchschnitt keine Veränderungen. Die Atemzahl war in beiden Versuchsreihen häufig herabgesetzt. Die oben beschriebene Einwirkung der Schwingungen auf die Atmung erübrigt bei stärkeren Graden die spontane Atembewegung und vermindert sie schon bei geringeren.

Die Messung der Hauttemperatur am Unterschenkel konnte in allen Versuchen auch während der Schwingungen durchgeführt werden. Tabelle 7 enthält Mittelwerte des maximalen Temperaturabfalls während 10—15 Min. Schwingungszeit. Die Werte für A SI stehen in Klammern unter denen für B ST₂. Es sind jeweils Mittelwerte aus 2—4 Versuchstagen.

Auch diese Ergebnisse streuen stark, zeigen aber trotzdem eine Tendenz zur Zunahme mit der Frequenz und mit der Amplitude. In der großen Mehrzahl der Fälle sind außerdem die Werte im Stehen größer als im Sitzen. Der Verlauf des Temperaturabfalles ist sehr verschieden. In

einigen Fällen werden während der Schwingungszeit die Ausgangswerte wieder erreicht. Ist der Ausgangswert hoch, so ist der Abfall gewöhnlich stärker und andauernder. Es genügt schon 1 Min. Schwingungszeit, um

Tabelle 7. Maximale Abnahme der Beintemperatur in Grad während der Schwingungen bei B ST₂ und (A SI).

Hertz	Amplitude der Schwingungsfläche			
	0,08	0,4	0,8	1,6
2	0,6	—	1,0 (0,5)	1,2 (0)
4	0,6 (0,4)	0,7 (0,2)	1,4 (0,7)	1,7 (0,8)
5	—	—	—	2,4 (1,5)
6	—	0,6 (0,2)	2,0 (1,4)	—
8	0,6 (0,2)	0,4 (0,6)	2,4 (1,3)	—
10	—	0,6 (0,7)	—	—
12	0,9 (0,9)	—	—	—

sowohl im Stehen wie im Sitzen einen Temperaturabfall hervorzurufen, der in 2 Min. zum Ausgangswert zurückkehrt. Nach 2 Min. Schwingungszeit bleibt die Senkung schon längere Zeit bestehen (Abb. 13).

Bei einer Analyse der Beobachtungen am Kreislauf können wir rein hydrostatische Wirkungen auf die Blutverteilung ausschließen, da die Kräfte in Richtung Körper-Kopf durch die Kräfte in Richtung Kopf-Körper kompensiert werden. Die beobachteten Wirkungen dürfen wir daher als reflektorische Wirkungen ansehen. Es könnten zentral oder peripher bekannte Reflexvorgänge durch die

Schwingungen ausgelöst werden. Eine mögliche Erklärung ist folgende: Die abdominalen Organe und Reservoirs füllen sich unter dem Schwingungsreiz stark mit Blut. Die Folge ist ein geringeres Blutangebot an das

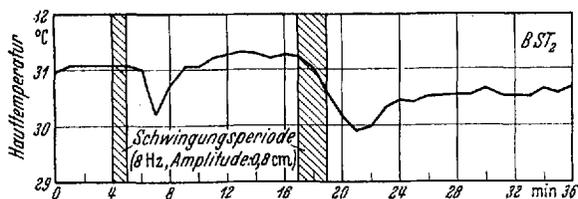


Abb. 13.

Herz — Blutdruckabfall — und ein Einsatz der regulatorischen Carotissinusreflexe — Gefäßkontraktion (Beintemperaturabfall) und Pulsbeschleunigung.

Man könnte daran denken, daß die Schwingungen direkt die Gefäße der Beine zu Kontraktionen reizen und der Temperaturabfall so zu erklären ist. Diese Annahme ließ sich jedoch in folgender Weise ausschließen:

Die Vp. A drückte im Stehen mit dem leicht gebeugten Arm den schwingenden Sitz an einem daran befestigten Handgriff senkrecht nach unten. Sie stand dabei auf einer Dezimalwaage, die ins Gleichgewicht

gebracht und dann auf der Gewichtsseite um 0,5 kg entlastet worden war. Der abwärtsgerichtete Druck der Vp. auf den Handgriff betrug daher genau 5,0 kg, wenn die Vp. durch diesen Druck die Waagenzeiger in Nullstellung hielt. Der Handgriff wurde bei einer Amplitude von 0,12 cm mit 12 Hertz in Schwingungen gebracht. Der Körper der Vp. blieb von diesen Schwingungen unbeeinflusst, während Arm und Teile des Schultergürtels den Schwingungen voll ausgesetzt waren. Wir verfolgten die Hauttemperatur am Unterarm. Wir fanden in 4—7 Min. Schwingungszeit Temperaturabnahmen im Mittel von $0,3^{\circ}$, gegen $0,9^{\circ}$ bei gleicher Amplitude und Frequenz am Bein. Dieser Befund spricht jedenfalls gegen ein Überwiegen einer unmittelbaren Wirkung der Schwingungen auf die Gefäße der Extremitätenmuskulatur.

Es paßt nicht in dieses Bild, daß bei B ST₂ Temperaturabfall, Puls- und Blutdruckwirkung größer sind als bei A SI, obwohl die Körperamplituden bei B ST₂ besser gedämpft sind. Bei den größeren Amplituden ist dieser Unterschied wohl einfach eine Folge des bei B ST₂ sehr viel stärker vermehrten Energieverbrauches (Abb. 11). Im übrigen können auch individuelle Unterschiede der Ansprechbarkeit der Kreislaufreflexe vorliegen. Unsere Versuche reichen nicht aus, diese Fragen eindeutig zu beantworten. Sie zeigen nur, daß Blutverschiebungen auftreten, die unter Umständen auch die Leistungsfähigkeit der Zentren beeinträchtigen können. Hier eröffnet sich ein theoretisch und praktisch interessantes Forschungsgebiet.

Praktische Folgerungen.

Es scheint uns verfrüht, näher auf die Theorie der Schwingungseinwirkungen auf den Körper einzugehen und etwa eine Analyse der Schwingungswirkungen auf die einzelnen Organe zu versuchen. Mögliche Zusammenhänge und Wirkungsmechanismen wurden jeweils im Anschluß an die einzelnen Ergebnisse erörtert. Es sollen dagegen einige Regeln festgelegt werden, die für die Praxis von Bedeutung sind:

1. Da eine bestimmte Schwingungsleistung um so geringere subjektive Beschwerden macht, je größer in ihr die Amplitude, je kleiner die Frequenz ist, ist die Federung von Fahrzeugen entsprechend abzustimmen.

2. Eine Resonanz des sitzenden oder stehenden Körpers auf sinusförmige Schwingungen besteht zwischen 3 und 5 Hertz.

3. Für Personen, die berufsmäßig stärkeren Schwingungen ausgesetzt sind, empfiehlt sich das Tragen eines breiten Leibgurtes.

4. Der beste Schutz gegen Stoß- und Schwingungseinwirkungen ist das Stehen auf den Zehen mit leicht gebeugten Knien. Er bedingt jedoch bei längerer Ausführung einen hohen Energieverbrauch. Stehen mit durchgedrückten Knien und auf den Absätzen ist dagegen sehr viel weniger schwingungsdämpfend als Sitzen auf harter Holzbank.

Zusammenfassung.

Die Wirkung sinusförmiger Vertikalschwingungen auf den sitzenden und stehenden Menschen wurde für Amplituden von 0,08—1,6 cm und Frequenzen bis zu 20 Hertz untersucht.

Die subjektiv angegebenen Grenzwerte der Erträglichkeit sinken in jedem Falle schneller mit der Zunahme der Frequenz als mit der Zunahme der Amplitude. Eine einheitliche Abhängigkeit von nur einer Größe — der Amplitude, der Frequenz, der Geschwindigkeit oder der Beschleunigung — ist nicht nachzuweisen. Beim Sitzen sind bei einer bestimmten Amplitude höhere Frequenzen zu ertragen als beim strammen Stehen. Die höchsten Frequenzen werden bei federndem Stehen auf den Zehen ausgehalten.

Eine Untersuchung der Mitbewegung des Kopfes und Körpers zeigte, daß zwischen 3 und 5 Hertz eine Resonanz besteht, während bei höheren Frequenzen eine zunehmende Dämpfung festzustellen ist. Beim Federn in den Knie- oder Fußgelenken erfolgt die Dämpfung hauptsächlich durch reflektorische Muskelbewegungen, deren Maximalfrequenz von 7 bis 12 Hertz zugleich die Grenzwerte der Erträglichkeit bestimmt. Wir finden gleichzeitig eine stärkere Zunahme des Energieverbrauches.

Die Schwingungen vermehren die Atmung sehr viel stärker als den Energieverbrauch. Sie regen Schwingungen der Eingeweide zwischen Bauchfell und Zwerchfell an, die durch Bauchgurte zu dämpfen sind. Die Mehrventilation zeigt eine der Schwingungszahl entsprechende hohe Atemfrequenz bei kleinstem Atemvolumen. Sie ist von geringem Wert für die Belüftung der Alveolen, so daß durch Einschränkungen der normalen Atembewegungen in dem untersuchten Bereich eine Akapnie vermieden werden kann.

Die Wirkung der Schwingungen auf den Kreislauf besteht in einer Abnahme des maximalen Blutdruckes bei erhöhter Pulsfrequenz. Die Extremitätendurchblutung ist herabgesetzt, ohne daß eine direkte Wirkung der Schwingungen auf die Gefäße der Extremitäten nachzuweisen wäre. Vermutlich kommt es primär zu einer Blutansammlung in den abdominalen Gefäßen.

Das Ergebnis dieser Arbeit wurde in einigen praktischen Regeln ausgewertet.

Herrn Dr. J. Deiters bin ich für wertvolle technische Beratung bei der Durchführung und Abfassung dieser Arbeit zu Dank verpflichtet.

Literaturverzeichnis.

- ¹ Reier u. Meister: Forsch. Ing.wes. 2, 381 (1931). — ² Olley: S. A. E. J. 34 (1934 I). — ³ Schubert: Physiologie des Menschen im Flugzeug. Berlin 1935. — ⁴ Zeller: Diss. Techn. Hochsch. Braunschweig 1933. — ⁵ Cörmann: Luftfahrtmed. 2, 295 (1938). — ⁶ Schoedel: Erg. Physiol. 39, 450 (1937).