

Aus dem Max-Planck-Institut für Arbeitsphysiologie, Dortmund
(Direktor: Prof. Dr. med. G. LEHMANN)

Der Einfluß der Bandbreite eines Geräusches auf die Stärke vegetativer Reaktionen

Von

G. JANSEN und P.-Y. REY

Mit 4 Textabbildungen

(Eingegangen am 8. März 1962)

Fragestellung

Frühere Untersuchungen (LEHMANN, TAMM, MEYER-DELIUS, JANSEN) haben erwiesen, daß Geräusche über 65 phon eine Reaktion der präcapillaren Blutgefäße auslösen. Mit steigender Geräuschintensität wächst der Grad der peripheren Vasoconstriction. Die Dauer der Gefäßreaktion übersteigt die Dauer der Geräuschbeeinflussung (MEYER-DELIUS). Bei orientierenden Versuchen mit Terzbandgeräuschen fiel auf, daß die peripheren Reaktionen schwächer waren als bei Verwendung von Oktavbandgeräuschen gleicher Lautstärke. Daraus ergab sich die Frage: Ist die Reaktion abhängig von der Bandbreite; besteht eine Proportionalität zwischen beiden Größen?

Zur Klärung dieser Fragen wurden mit 17 Versuchspersonen 122 Versuche durchgeführt, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

Methode

Die Versuche wurden in einer schallarmen Kabine durchgeführt (JANSEN). Die Versuchsperson befand sich allein im Raum und bekam außer den Schallreizen keinerlei Anregung. Als Schallreize wurden verwendet: 1. ein sinusförmiger Ton von 3200 Hz, 2. ein Terzbandgeräusch mit dem Mittelwert 3200 Hz, 3. ein Oktavbandgeräusch mit dem Mittelwert 3200 Hz, 4. ein Breitbandgeräusch von 30 bis 20000 Hz. Die Geräusche wurden mit einem Rauschgenerator (Wandel & Goltermann) erzeugt. Die Verstärkung erfolgte über einen 100-W-Verstärker (Telefunken). Die Abstrahlung des Schalls geschah durch Isophonlautsprecher. Zur Erzeugung eines Oktavbandgeräusches verwendeten wir ein Oktavfilter (Wandel & Goltermann). Zur Erzeugung des Terzbandgeräusches wurde ein Terzfilter (Brüel & Kjaer) zwischengeschaltet. Um den reinen Ton zu erzeugen, nahmen wir einen Tonfrequenzgenerator (Rohde & Schwarz) zu Hilfe und verwendeten wieder den 100-W-Verstärker. Die Versuchsanordnung ist in Tabelle 1 dargestellt worden.

Während des einzelnen Versuches wurden die Fingerpulsamplituden nach der Methode BRECHT u. BOUCKE fortlaufend registriert. Das Infraton-Pulsmikrophon wurde an den Endphalangen der Hand befestigt. Die Registrierung der Fingerpulsamplituden erfolgte auf einem Oscilloscript (Philips PT 1000, System Schwarzer). Die Papiergeschwindigkeit betrug 6 cm/min.

Tabelle 1

3,0 min Ruhe			
0,5 min Lärm	Ton	3200 Hz	95 DIN-phon
3,0 min Ruhe			
0,5 min Lärm	Terzbandgeräusch	3200 Hz	95 DIN-phon
3,0 min Ruhe			
0,5 min Lärm	Oktavbandgeräusch	3200 Hz	95 DIN-phon
3,0 min Ruhe			
0,5 min Lärm	Breitbandgeräusch		95 DIN-phon
3,0 min Ruhe			

Auswertung der Versuche

Da die Amplitude und die Pulsfrequenz bei den einzelnen Versuchspersonen unterschiedliche Größen haben, wurden die prozentualen Größenveränderungen in den einzelnen Versuchsphasen ausgewertet. Eine Umrechnung der Absolutwerte in Prozentwerte ist bei der vorliegenden Versuchsreihe erlaubt. In Modellversuchen und bei einem Orthogonalvergleich mit den Werten früherer Versuchsreihen wurde festgestellt, daß das Infraton-Pulsmikrophon linear abhängig ist vom Druck. Es besteht überdies eine Frequenzabhängigkeit. Bei einer Verdoppelung der Pulsfrequenz vergrößert sich die Pulsamplitude um etwa 25%. Da sich in unseren Versuchen die Versuchspersonen in Ruhe befinden und keinen Belastungen ausgesetzt sind (mit Ausnahme der beabsichtigten Schallreize), schwankt die Pulsfrequenz nur in sehr engen Grenzen.

Es wurden nur die Pulsamplituden bei Beginn jeder 6. Sekunde ausgemessen, so daß bei Einteilung der ersten Ruhephase von 3 min in sechs Perioden jede Periode fünf Amplitudenmessungen enthält. Die Werte der Periode vor Beginn einer jeden Lärmperiode wurden als Ausgangswerte ($AM = 100\%$) für die Werte der Lärmperiode angenommen. Nach der Berechnung der individuellen Größen wurden die mittleren Werte für alle Personen und alle Versuche festgestellt und in einer graphischen Darstellung veranschaulicht.

Ergebnisse

Die Mittelwerte aus 122 Versuchen zeigen in jeder Lärmperiode eine Verkleinerung der Fingerpulsamplituden. Die Senkung der Kurve, die die Fingerpulsamplitude wiedergibt, beginnt nicht unmittelbar mit dem Einsetzen des Lärms. Erst nach etwa 6 sec fällt die Kurve sehr schnell und steil ab, um in der 12. sec ihren tiefsten Punkt zu erreichen. Danach steigt sie langsam wieder an (Abb. 1).

Zur Beurteilung der intraindividuellen und interindividuellen Varianz möge die Wiedergabe der Häufigkeitsverteilungen und σ -Grenzen der Werte aus den Ruhe- und Lärmphasen genügen (Abb. 2). Mit Hilfe der t-Funktion wurde geprüft, ob die Differenz zwischen den Mittelwerten der Lärmphasen und den jeweiligen vorhergehenden Ruhephasen signifikant sind. Die Tabelle 2 zeigt, daß dies mit Ausnahme der Mittelwerte von Ruhe — Ton zutrifft.

Die vier Kurven unterscheiden sich dadurch, daß die Senkung immer tiefer wird, je breiter das Frequenzband gewählt wird. Dies bedeutet, daß der reine Ton zu einer minimalen Reaktion führt. Das Terzbandgeräusch bewirkt schon eine wesentlich stärkere Reaktion. Die Prüfung der Signifikanz der beiden Mittelwertsunterschiede (Ton-Terz) nach der t-Funktion ergab ein $t = 3,428$ und erwies sich als sehr signifikant unterschiedlich. Das Oktavbandgeräusch bewirkt eine Verringerung der Fingerpulsamplitude, die noch stärker ausfällt als die durch das Terzbandgeräusch. Die Signifikanzprüfung zwischen Terz und Oktave ergab ein

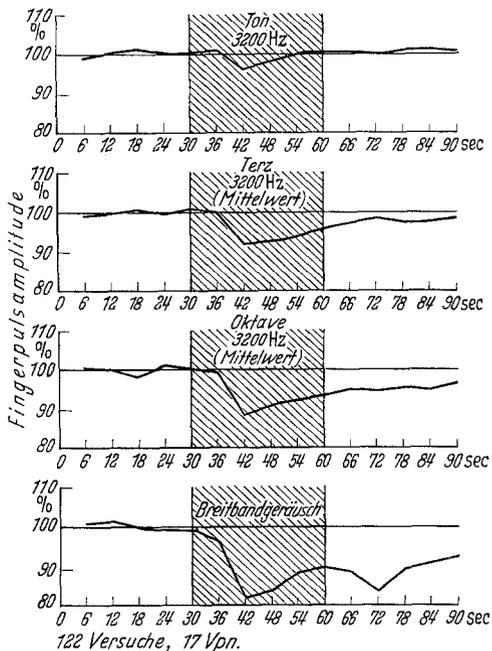


Abb. 1. Die Bedeutung der Bandbreite eines Geräusches von 95 DIN-phon auf die periphere Hautdurchblutung des Menschen

Tabelle 2

Lärmart	AM (%) Ruhe	σ (%) Ruhe	AM (%) Lärm	σ (%) Lärm	t-Test	P	Signifikanz
Ton 3200 Hz	100,2	8,45	98,5	18,35	2,13	0,05	w. s.
Terz 3200 Hz	100,2	8,48	94,9	19,10	6,42	0,001	s. s.
Oktave 3200 Hz	100,1	9,45	92,7	19,65	8,51	0,001	s. s.
Breitband	100,0	8,25	87,8	20,97	13,48	0,001	s. s.

$t = 2,064$, was bedeutet, daß die Mittelwerte nur wahrscheinlich signifikant sind ($p = 2-5\%$).

Die stärkste Lärmeinwirkung wurde durch das Breitbandgeräusch verursacht. Die Unterschiedsprüfung zwischen Oktave und Breitband erbrachte ein $t = 4,217$ und erwies sich damit als sehr signifikant.

Wie die Abb. 1 weiter erkennen läßt, kehren alle Kurven wieder zu ihrer Ausgangsgröße zurück. Die Rückkehr zur 100%-Linie ist jedoch abhängig vom Ausmaß der Senkung in der Lärmperiode. So kehrt die Kurve in der ersten Lärmperiode (Ton) noch während des Geräusches

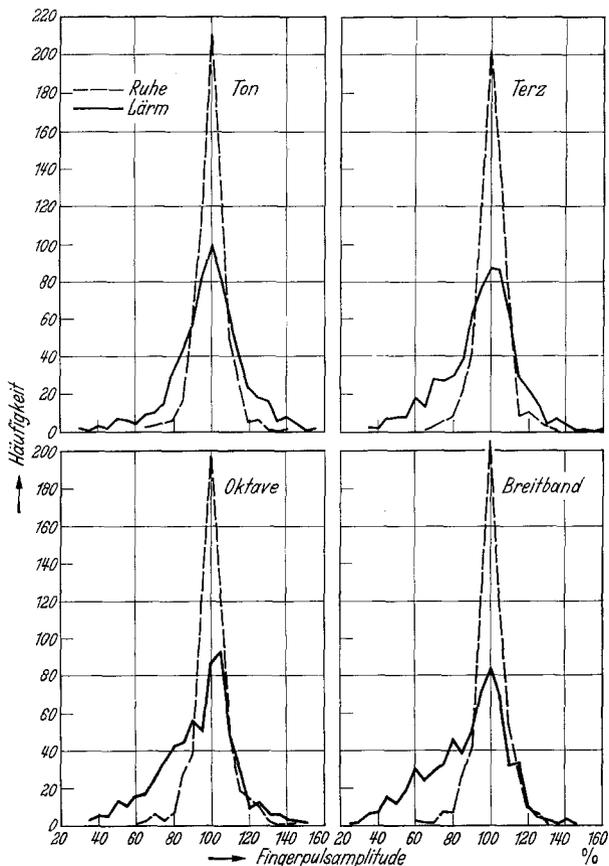


Abb. 2. Häufigkeitsverteilung der Pulsamplitudenveränderungen (in Prozent) bei unterschiedlichen Geräuschen

zum Ausgangswert zurück. Da die Mittelwertsdifferenz zwischen Ruhe- und Tonperiode nicht eindeutig signifikant war, darf gefolgert werden, daß der Einzelton keine eindeutige Veränderung der peripheren Hautdurchblutung bewirkte.

Die Erholung beim Terzbandgeräusch erfolgt erst nach Beendigung der Lärmperiode. Das gleiche gilt auch für das Oktavband- und für das Breitbandgeräusch. In Tabelle 3 sind die Werte der am tiefsten gelegenen Punkte in den einzelnen Lärmperioden und die Unterschiede zwischen den Lärmperioden zusammengefaßt worden.

Um die Erholungszeiten vergleichen zu können, wandten wir folgende Methode an. Wir haben den am tiefsten gelegenen Punkt der Kurve in

Tabelle 3			Tabelle 4				
	Maximale Amplitudenerniedrigung	Unterschiede		Remissionszeit	Unterschiede	α	β
Ton	3,5 %	3,8 %	Ton	53 sec	24 sec	142°	75°
Terz	7,3 %	2,2 %	Terz	77 sec	8 sec	131°	77°
Oktave	9,5 %	8,1 %	Oktave	85 sec	15 sec	123°	77°
Breitband	17,6 %		Breitband	100 sec		115°	75°

der Lärmperiode mit dem Punkt der Kurve, der beim Ende des Lärms erreicht ist, verbunden. Wie aus der schematisierten Darstellung (Abb. 3) ersichtlich ist, haben die Verbindungslinien alle fast den gleichen Neigungswinkel (β). Verlängern wir diese Verbindungslinie bis zum Schnittpunkt mit der 100%-Linie, so definieren wir ein Maß für die Dauer der Lärmreaktion. In Tabelle 4 sind die genauen Zahlenwerte zusammengefaßt.

In Tabelle 4 sind gleichfalls Werte für den Winkel α angegeben (vgl. auch Abb. 3). Diese Winkelgröße kann als Maß für die Gefäßreaktion auf Lärm gewertet werden. Mit zunehmender Bandbreite wird der Winkel zwischen dem Ausgangswert und dem am tiefsten gelegenen Punkt der Kurve immer enger. Die Intensität der Gefäßreaktion ist somit abhängig von der Bandbreite. Die Erholungszeit nach Lärmeinwirkung ist somit abhängig von der Intensität der Gefäßreaktionen.

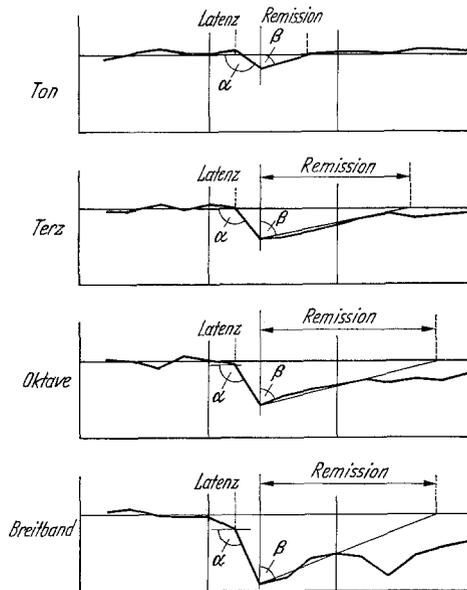


Abb. 3. Schematisierte Darstellung des Verhältnisses der Bandbreite eines Geräusches zur vegetativen Reaktion

Diskussion

Einleitend wurde gefragt, ob die Gefäßreaktion von der Bandbreite abhängig sei. Die Ergebnisse zeigen, daß die Reaktion stärker ausfällt, wenn die Bandbreite vergrößert wird. Der reine Ton bewirkt keine sichere Gefäßreaktion. Das Terzbandgeräusch und das Oktavbandgeräusch

verursachen jedoch eine deutliche Durchblutungsverminderung. Die Reaktion ist beim Oktavbandgeräusch etwas größer als beim Terzbandgeräusch. Die stärkste Durchblutungsverminderung tritt bei Verwendung des Breitbandgeräusches auf. Diese Befunde sprechen eindeutig für eine

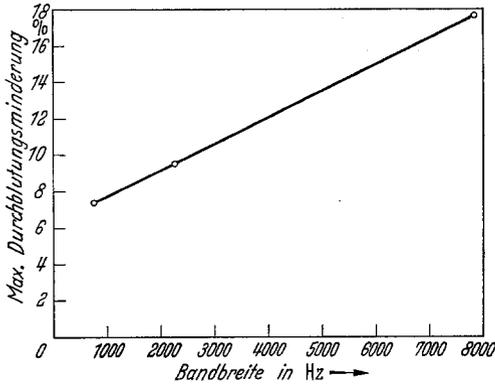


Abb. 4. Abhängigkeit der vegetativen Reaktion von der Geräuschbandbreite

Abhängigkeit der Intensität vegetativer Reaktionen von der Bandbreite eines Geräusches. Eine proportionale Beziehung zwischen Bandbreite und Reaktionsgröße kann aus den vorliegenden Ergebnissen abgelesen werden, wenn die Prozentwerte der maximalen Gefäßreaktion beim Terz-, Oktav- und Breitbandgeräusch graphisch dargestellt sind (Abb. 4).

Das Terzbandgeräusch der Versuchsreihe lag im Bereich von 2850 bis 3600 Hz. Das Oktavbandgeräusch lag im Frequenzbereich von 2240 bis 4500 Hz, während unser Breitbandgeräusch eine effektive Breite von 140—8000 Hz hatte. (Die Frequenzen unter 140 Hz und über 8000 Hz lagen am Ohr der Versuchsperson mehr als 19 dB unter dem Gesamtpegel von 95 dB.) Die zwischen diesen beiden Werten liegenden Frequenzen hatten alle im Terzspektrum eine von 76—89 dB ansteigende Intensität wie in einer Terzanalyse des Geräusches festgestellt wurde. Das Terzbandspektrum des Oktavbandgeräusches zeigte Intensitäten von 87—90 dB in den einzelnen Frequenzbereichen.

Die Größe der Gefäßreaktion scheint nach unseren Werten direkt proportional zur Spektralbreite zu sein, sobald ein bestimmter Gesamtpegel überschritten wird. Dieser kritische Gesamtschallpegel liegt entsprechend unseren Versuchen noch unter 76 dB. In früheren Untersuchungen (LEHMANN, TAMM, MEYER-DELIUS) wurde für Oktavbandgeräusche bereits festgestellt, daß ab 65 DIN-phon periphere Gefäßreaktionen auftraten.

Die Feststellung, daß die Gefäßreaktionen von Bandbreite und Intensität abhängig sind, findet durch neuere Ergebnisse der Neurophysiologie eine Stützung. Die Nervenfasern aus der Basalwindung der Cochlea werden entgegen früheren Anschauungen durch alle Schallfrequenzen erregt. Nervenfasern aus den oberen Teilen der Cochlea sind nur durch tiefe Frequenzen erregbar. Die nervöse Weiterverarbeitung der akustischen Information geschieht in fünf Neuronen bis zur Hirnrinde. Die Faserverbindungen von Neuron zu Neuron leiten die Information jedoch

nicht im Verhältnis 1:1 weiter. Bereits im Cochleariskern erfolgt eine Kontrastanhebung der zugeleiteten Information (KEIDEL). Neuerdings wurde nachgewiesen, daß auch in der Lamina quadragemina und im Corpus geniculatum Kontrastanhebungen erfolgen (KATSUKI). Da wir mit gleichmäßig anregendem Rauschen arbeiteten, stellen wir uns die Kontrastanhebung als eine Verstärkung des Kontrastes vom angeregten zum unerregten Bereich vor. Da aber „ . . . heute noch nicht einmal die Blockschemata, geschweige denn die Steuerkörperkennlinien dieses ‚Netzwerkes‘ des Informationssystems (vom Ganglion spirale bis zur Hörrinde. D. Verf.) physiologisch geklärt sind . . .“ (KEIDEL) wissen wir nicht, wie und nach welchen Regeln die Irradation der Hörreize auf die Kreislaufzentren im Mittel- und Nachhirn erfolgt. Sie muß nach unseren Ergebnissen jedoch proportional zu den elektrischen Begleiterscheinungen im Transformationsorgan erfolgen.

Durch die Auslenkung der Basilarmembran, die gemäß der hydrodynamischen Theorie der Perilymphe, als Ganzes schwingt, entsteht ein Reizfolgestrom. Dieses Wechsellpotential ist in einem weiten Bereich proportional zur Auslenkung der Basilarmembran und damit zur Schallstärke. Es entsteht wahrscheinlich durch Bewegung der Sinneshärcchen und kann als mechanische Modulation des endolymphatischen Bestandpotentials aufgefaßt werden, welches von der Reißnerschen Membran bis zur Lamina reticularis einen großen Potentialsprung aufweist. Die bei weiterer Einwirkung von Schallreizen allmählich auftretende Änderung des Bestandstromes (summing potential) hat zwar weder eine meßbare Latenz noch eine Schwelle, ist jedoch proportional dem geometrischen Mittelwert des Schalldruckes. Schließlich zeigte sich, daß das Aktionspotential des Nervus acusticus intensitätsabhängig ist. Diese Intensitätsabhängigkeit hat einen deutlichen Steilheitsknick etwa 40 dB über der Schwelle (KEIDEL).

Der Ausfall der vegetativ bedingten Gefäßreaktionen scheint somit in seiner Größe eine proportionale Beziehung zu den besonderen Funktionsverhältnissen im Innenohr zu haben. Der genaue Zusammenhang ist jedoch noch nicht geklärt. Im Gegensatz zur Änderung des summing potential ist die Änderung der peripheren Durchblutung linear proportional zum Schalldruck. Entscheidend für die Größe der vegetativen Reaktionen sind also die Anzahl der Frequenzen und der Schalldruck in einem Geräusch.

Der neurophysiologische Aspekt entkräftet gleichzeitig Einwände, die gegen unsere Versuchsergebnisse vorgebracht werden können. Man könnte glauben, daß die vegetativen Reaktionen psychisch bedingte Reaktionen sind. Die relativ lange Latenzzeit von 6 sec, die der eigentlichen Lärmreaktion vorausgeht, spricht eher gegen psychisch bedingte Reaktionen.

Schreckreaktionen verlaufen viel schneller und schlagartiger als in unseren Versuchen. Zudem wurde der Lärm nicht plötzlich, sondern von Hand allmählich auf die festgelegte Lautstärke eingestellt. Weiterhin ist zu beachten, daß die Lärmreaktion auch auftritt, wenn die Versuchspersonen auf Lärm warten. Der Wille ist also ohne Einfluß auf den Eintritt der Reaktion. Überdies ist die Reaktion in der letzten Periode am größten, wenn die Versuchsperson schon an den Lärm gewöhnt ist.

Diese letzte Überlegung kann jedoch den Eindruck erwecken, daß die Reaktion in der letzten Lärmphase als kumulativer Effekt aufgefaßt werden muß. Zur Entkräftung dieses Arguments änderten wir in mehreren Versuchen die Reihenfolge der Lärmphasen. Die Ergebnisse der veränderten Versuchsanordnung ergaben jedoch keine Unterschiede zum allgemeinen Ergebnis.

Ein weiterer Einwand wäre, daß die vegetativen Reaktionen nicht durch äußere Reize, sondern als natürliche Kreislaufregulationen aufzufassen sind, z. B. atmungsbedingte Pulsamplitudenänderungen. Dem steht aber entgegen, daß in den Lärmphasen die Reaktionen wesentlich größer ausfallen und auch signifikante Unterschiede zu den jeweils vorhergehenden Ruhephasen aufweisen.

Es wäre möglich, daß unsere Ergebnisse durch besonders empfindliche Versuchspersonen bedingt sind, die extreme Werte aufweisen und die mittleren Werte unseres Gesamtergebnisses beeinflussen. Um diesem Einwand zu begegnen, führten wir die Versuche mit 17 Versuchspersonen durch. Jede Versuchsperson wiederholte den Versuch sechs- bis achtmal, so daß die intra- und interindividuellen Variationen ausgeglichen wurden (vgl. auch Abb. 2).

Ein letzter Einwand könnte sein, daß die vegetativen Reaktionen besonders stark ausfallen bei schmalbandigen Geräuschen im Frequenzbereich um 3000—4000 Hz. Jedoch sind die Reaktionen während des Breitbandgeräusches viel größer als die Reaktionen bei den anderen Geräuschen, obwohl die partielle Intensität jedes einzelnen Tones zwischen 3000 und 4000 Hz beim Breitbandgeräusch geringer ist als die Intensität dieses Frequenzbereiches in den schmalbandigeren Geräuschen (vgl. auch Abb. 4).

Zusammenfassung

Bei 17 Versuchspersonen wurden in 122 Versuchen die Fingerpulsamplituden in Ruhe und bei Lärm unterschiedlich breiter Frequenzbänder gemessen. Bei Verwendung eines reinen Tones von 3200 Hz mit der Intensität 95 DIN-phon ergab sich keine eindeutige Veränderung der Pulsamplitude, während Terzband-, Oktavband- und Breitbandgeräusche (mit einer jeweiligen Gesamtlautstärke von 95 DIN-phon) zu signifikanten Verkleinerungen der Pulsamplituden führten. Das Ausmaß

der Verkleinerungen war abhängig von der Bandbreite des Geräusches. Breitbandgeräusche bewirken die proportional stärkste Verkleinerung der Pulsamplitude.

Literatur

- BRECHT, R., u. H. BOUCKE: Zur Abnahme des Arterienpulses am Menschen mit dem Infraton-Mikrophon. *Pflügers Arch. ges. Physiol.* **257**, 490 (1953).
- JANSEN, G.: Über die nichtspezifischen Wirkungen des Lärms auf den Menschen. *Med. Welt* **1**, 35 (1960).
- Grundsätzliche Bemerkungen über die experimentelle Lärmforschung. *Forsch.-Bericht NRW*, 793. Köln-Opladen: Westdeutscher Verlag 1959.
- KATSUKI, Y., and T. WATANOBE: Electric responses of auditory neurons in cat to sound stimulation. III. Responses to two sounds delivered simultaneously. *Proc. Jap. Acad.* **34**, 64 (1958).
- KEIDEL, W. D.: Physiologie des Hörens. *Klin. Wschr.* **37**, 1205 (1959).
- LEHMANN, G.: Der Kampf gegen den Lärm. *Dtsch. med. Wschr.* **82**, 465 (1957).
- MEYER-DELIUS, J.: Die Schalleinwirkung auf den Menschen. *Automobiltechn. Z.* **10**, 1 (1957).
- TAMM, J.: Das Lärmproblem und seine medizinische Bedeutung. *MKurse ärztl. Fortbild.* **10**, 1—4 (1955).

Dr. G. JANSEN, 46 Dortmund, Rheinlanddamm 201,
Max-Planck-Institut für Arbeitsphysiologie