

C. Maschke¹ · K. Hecht² · U. Wolf¹ · J. Feldmann³

¹ Robert Koch-Institut, Berlin

² Institut für psychosoziale Gesundheit, Berlin

³ Technische Universität, Berlin

19×99 Dezibel(A) – Ein gesicherter Befund der Lärmwirkungsforschung?

Zusammenfassung

Das „Übersteuerungskriterium“ von 19×99 dB(A), das von seinem Begründer Gerd Jansen als gesichertes Erkenntnis der Lärmwirkungsforschung bezeichnet wird und vielfach zur Festlegung von „Lärmbelastungsgebieten“ für den wachen Menschen herangezogen wurde, ist durch eine fehlerhafte physikalisch-mathematische Datenaufbereitung entstanden. Das ist das Ergebnis einer umfangreichen Revision der Originalliteratur. Basierend auf den von Jansen 1967 durchgeführten Laboruntersuchungen, ergibt sich bei physikalisch korrektem Vorgehen eine „vegetative Übersteuerung“ für breitbandige Geräusche ab Schallpegeln von $L_{eq,30s}=88-89$ dB(A) und nicht ab Pegeln von 99 dB(A). Bis zum Vorliegen überlegener wissenschaftlicher Erkenntnisse sollte daher für den wachen Menschen diese korrigierte „Übersteuerungsgrenze“ zur Prävention akuter Fehlregulationen herangezogen werden. Jede Veränderung der „Übersteuerungsgrenze“ wirkt sich auch auf die Anzahl der bisher 19 zulässigen Überschreitungen aus. Die im Rahmen der Revision durchgeführten neuen Berechnungen führen zwar formal auf eine Anzahl von 36 zulässigen Übersteuerungen und damit auf ein korrigiertes „Übersteuerungskriterium“ von „36×88 dB(A)“, das Ergebnis bleibt aber letztendlich unbefriedigend, weil der methodische Ansatz der von Jansen zur Bestimmung der zulässigen Übersteuerungen gewählt wurde, keinen ausreichenden präventivmedizinischen Schutz bietet. Die Anwendung des Übersteuerungskriteriums von „19×99 dB(A)“ führt zu einer erheblichen Unterschätzung der Gesundheitsgefahren durch Fluglärm und ist zur präventivmedi-

nischen Festlegung von Lärmbelastungsgebieten nicht geeignet.

Schlüsselwörter

Lärmwirkungen · Vegetative
Lärmempfindlichkeit · Fingerpulsamplitude ·
Immissionsgrenzwerte · Gesundheitsrisiko

Zur natürlichen Umwelt des Menschen gehören Geräusche. Mit Hilfe ihrer Wahrnehmung orientiert sich der Mensch in seiner Umwelt, erkennt Gefahren, erhält Informationen und kontrolliert Tätigkeiten. Darüber hinaus dient die akustische Kommunikation seiner Persönlichkeitsentfaltung und der Auseinandersetzung mit der sozialen Umwelt. Geräusche wandeln sich zu Lärm, wenn sie als belästigend, als störend, als mit Handlungen oder Intentionen negativ interferierend erlebt und empfunden werden oder die Gesundheit gefährden.

- ▶ Lärm ist unerwünschter Schall.
- ▶ Lärm löst negative Emotionen aus. Das unangenehme Lärmerleben wird u. a. bestimmt durch die Erfahrung, die der Betroffene mit der spezifischen Geräuschquelle in der Vergangenheit gemacht hat, von seiner Einstellung zum Geräusch, von der individuellen psychophysiologischen Reaktionslage (die ihrerseits durch physische und psychische Persönlichkeitsmerkmale sowie durch den Gesundheitszustand bestimmt ist),

vom Vigilanzzustand, von der Geräuschempfindlichkeit sowie vom Zeitpunkt im Tages- und Wochenablauf.

- ▶ Lärm stellt für den Menschen ein unangenehmes Erlebnis dar. Das Lärmerlebnis und die damit einhergehenden Funktionsänderungen können sich als unangenehme Assoziationen mental einprägen und in reaktive Änderungen von Verhaltensweisen (Vermeidungsverhalten und Kommunikationseinschränkungen) einmünden. Dieses wirkt sich besonders im Kindesalter negativ aus.
- ▶ Lärm stört den Schlaf. Die lärmbedingte Aktivierung kann den Schlafablauf stören und bis zum Erwachen führen. Ein ungestörter Schlaf bewirkt Gesundheit, Wohlbefinden, Leistungsfähigkeit, Optimismus. Sofern eine längerfristige Störung des Schlafablaufs auftritt, können gesundheitliche Beeinträchtigungen auftreten.
- ▶ Lärm löst vegetativ-hormonelle Reaktionen aus. Die lärmbedingten Aktivierungsreaktionen sind zunächst nicht als krankhafte Veränderungen des menschlichen Organismus aufzufassen. Bei dauerhafter Belastung oder wiederholter psychophysischer Überlastung können daraus aber funktionale Störungen und langfristig Gesundheitsbeeinträchtigungen resultieren.

Dr. C Maschke
Robert Koch-Institut, Nordufer 20,
13353 Berlin

C. Maschke · K. Hecht · U. Wolf · J. Feldmann

19×99 Dezibel(A) – a secured result of noise-effect-research?

Abstract

The "overload criterion" of 19×99 dB(A), which is marked by its founder Gerd Jansen as secured knowledge of noise effect research and is often used in Germany to detect "noise-endangering areas" for waking humans, is founded on a faulty physically-mathematical data preparation. This is the result of an extensive revision of the original-literature. Based on the laboratory studies accomplished by Jansen in 1967 a physically correct "vegetative overload" for broadband noises emerges for sound levels of $L_{eq, 30s} = 88-89$ dB(A) and not for sound levels of 99 dB(A). This corrected "overload threshold" should be applied to prevent acute misregulation for waking humans until more suitable results of scientific knowledge are available. A change of the "overload threshold" has an effect on the number of allowable transgressions, previously 19. New calculations enforced in the framework of the revision lead to an amount of 36 allowable overloads and thus to a corrected "overload criterion" of „36×88 dB(A)". The result however, remains unsatisfactory, because the methodical base of these calculations given by Jansen offers no sufficient preventive-medical protection. An application of the "overload criterion" of „19×99 dB(A)" leads to a considerable underestimation of noise induced health hazards and is not suitable for detecting preventative "noise-endangering areas".

Keywords

Noise effects · Vegetative noise sensitivity · Plethysmography · Permissible noise thresholds · Health risks

Originalien und Übersichtsarbeiten

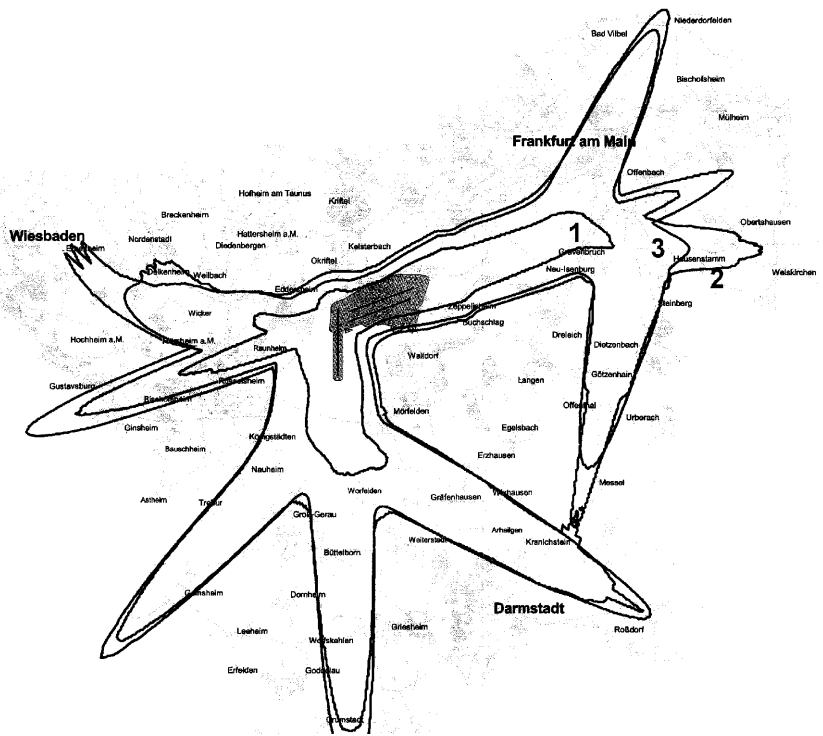


Abb. 1 ▲ Flughafen Frankfurt/Main und Konturen verschiedener Nachtbelastungsgebiete. 1=Jansen; 2=Griefahn; 3=Maschke (Quelle: [2])

Problematik Immissionsrichtwerte

Die beschriebenen Wirkungspfade des Lärms und die Notwendigkeit präventiver Maßnahmen sind allgemein anerkannt (vgl. [1]). Umstritten sind jedoch Immissionsrichtwerte, unterhalb derer die unerwünschten Beeinträchtigungen mit hoher Wahrscheinlichkeit vermieden werden können. Von besonderer Bedeutung sind hier die vegetativ-hormonellen Reaktionen. Eine gestörte vegetative Regulation ist ebenso wie eine unphysiologische Niveaushiftung der Hormone als adverser Effekt einzustufen, als Übergangsstadium von Gesundheit zur Krankheit.

Trotz zahlreicher Untersuchungen kann die Frage nach geeigneten präventivmedizinischen Immissionsrichtwerten zur Vermeidung von Gesundheitsbeeinträchtigungen noch immer nicht zweifelsfrei beantwortet werden, da aufgrund komplexer Pathogenesemechanismen die Aussagekraft z. Z. vorliegender Studien eingeschränkt ist und zunehmend schärfere Evidenzkriterien an die Ergebnisse von Lärmwirkungsstudien gelegt werden. Das kann gravierende Auswirkungen bei der Festlegung von

„Lärmbelastungsgebieten“ zur Folge haben, wie Berechnungen zeigen, die im Rahmen des Mediationsverfahrens „Ausbau Flughafen Frankfurt/Main“ [2] durchgeführt wurden. In Abb. 1 sind Konturen von verschiedenen Nachtbelastungsgebieten für den Flughafen Frankfurt/Main dargestellt, die einmal nach den Vorgaben von Jansen, zum anderen nach den Vorgaben von Griefahn und Maschke von der Hessischen Landesanstalt für Umwelt berechnet wurden. Die Konturen (2) nach Griefahn und (3) nach Maschke unterscheiden sich nur partiell. Die von der Kontur (1) eingeschlossene Fläche, das Nachtbelastungsgebiet nach Jansen ist dagegen um ein mehrfaches kleiner.

„Die Frage nach geeigneten Immissionsrichtwerten zur Vermeidung von Gesundheitsbeeinträchtigungen durch Lärm ist noch immer nicht beantwortet.“

Die Ursache für diesen gravierenden Unterschied ist die Forderung von Jansen [3], dass Schallschutzmaßnahmen auf die „gesicherten“ Befunde der Lärmwir-

kunftsforſchung früher Jahre abzustellen ſind. „Für die ſchwierigen Fragen der Geſundheitsbeeinträchtigungen und Geſundheitsſchäden durch Lärm und insbeſondere Nachfluglärm ſind daher auch weiterhin die geſicherten Befunde der Lärmwirkungsforſchung vor 1984 mit einzubeziehen“... „Zuſammenfaſſend läßt ſich [...] folgern, daß die früher und biſher angewandten Bewertungsverfahren für Geſundheitsbeeinträchtigungen und Schlafſtörungen [...] durch die neuen Ergebniſſe nicht zu verwerfen ſind. Vielmehr ſollten die Schallſchutzmaßnahmen [...] zum Erhalt der menſchlichen Geſundheit weiterhin auf die biſherigen Kriterien abgeſtellt werden“.

Bei dieſer Auſſage iſt zu bedenken, daß Befunde früherer Jahre nicht allein dadurch die heutigen wiſſenſchaftlichen Anforderungen erfüllen, weil ſie vor Jahren als Stand der Forſchung anerkannt wurden. Es verſteht ſich von ſelbſt, daß bei einer aktuellen wiſſenſchaftlichen Beurteilung die heute anerkannten Evidenzkriterien an alle Unterſuchungsergebniſſe angelegt werden müſſen. Eine Überprüfung der als „geſichert“ bezeichneten Befunde früherer Jahre anhand der heute gängigen wiſſenſchaftlichen Kriterien war daher ſeit langem überfällig. Im Mittelpunkt des erſten Artikels ſteht das „Überſteuerungskriterium“ von „19×99 dB(A)“, das auch als ſog. Jansenkriterium bezeichnet wird und in der Rechtsprechung häufige Anerkennung gefunden hat. Neben dieſem „Überſteuerungskriterium“, das auf die Diſſertation von Jansen im Jahre 1967 [4] zurückgeht, iſt auch das Kriterium zur Vermeidung von lärmbedingten Schlafſtörungen zu beurteilen, das ſich auf frühe Arbeiten von Jansen und von Griefahn (z. B. [5, 6]) ſtützt. Der Beſtandheit der nächtlichen Schutzmaßnahmen wird in einem zweiten Artikel nachgegangen.

Die kritiſche Überprüfung der genannten Kriterien wurde im Rahmen des Planfeſtſtellungsverfahrens für den Flughafen Berlin/Brandenburg International anhand der von Jansen vorgelegten Begründung ſowie der angelegenen Originalliteratur vorgenommen¹.

¹ Die vorliegende Publikation bezieht ſich auf eine gutachterliche Stellungnahme, die vom Miniſterium für Arbeit, Soziales und Geſundheit des Landes Brandenburg in Auftrag gegeben wurde.

Um die Leſbarkeit des Artikels zu verbessern, wurden Zitate in *kursiv* geſetzt. Dabei wurden die im Original verwendeten Formatierungen nicht be-rückſichtigt. Einfügungen bzw. Auslaſſungen innerhalb der Zitate ſind durch [eckige Klammern] gekennzeichnet. Weiterhin war es unumgänglich, uns verſchiedener Fachausdrücke zu bedienen, deren Bedeutungen dem Leſer zum beſſeren Verſtändnis des Textes bekannt ſein ſollten. Ausgewählte Fachausdrücke werden daher am Ende des Artikels in einem umfangreichen Glossar erläutert.

Vegetative Übersteuerung

Die Frage, „in welchem Ausmaß der wache Organismus mit hohen Geräuschpegeln belastet werden kann, ohne Schaden zu nehmen“, wird im lärmmediziniſchen Gutachten für den Flughafen Berlin/Brandenburg International wie folgt beantwortet: „Die Berechnungen der Experimentalwerte [4] führten zu einer Formel, aus der ſich die Größe der vegetativen Reaktion aus den akustiſchen Parametern beſtimmen läßt. Die dazugehörige Kurve zeigt einen leicht S-förmigen Verlauf, der bei 99 dB(A) einen Umſchlagpunkt aufweiſt“ [7].

„Bleibt man nun mit dem Mittelungspegel unter 80 dB(A), alſo dem Schwellenwert für Lärmschwerhörigkeit, z. B. bei $L_{eq3}=79$ dB(A) und einem Beurteilungszeitraum von 16 Stunden (960 min), ergibt ſich für Einzelpegel von 99 dB(A) (Überſteuerungsgrenze) eine Gesamtbe-lastungszeit von 9,6 min, die man als ſelten und damit als nicht geſundheitsgefährdend bezeichnen kann. Wenn man die Dauer eines Fluglärmereigniſſes mit 30 s anſetzt, kommt man zu einer Zahl von 19×99 dB(A) am Tage, was einem $L_{eq3}=79$ dB(A) entspricht. Die meiſten Fluglärmereigniſſe liegen erheblich unter der Dauer von 30 s, nur wenige darüber, ſo daß dieſes Zeitmaß einen tragbaren Kompromiß darſtellt“ [7 S. 32, 33]. „Der ſo ermittelte Grenzwert für Überſteuerung von 19×99 dB(A) iſt als Beginn der Gefährdung der Geſundheit zu bewerten. Er iſt anzueſiedeln im Indifferenzbereich zur Grenze eher krank [...]“ [7 S. 33].

Wie aus den Zitaten zu entnehmen iſt, beſteht das „Überſteuerungskriterium“ einerſeits aus einer „Überſteuerungs-

grenze“, die aus Laborverſuchen mit Breitbandgeräuschen ermittelt wurde (99 dB(A)) und andererſeits aus einer Anzahl von 19 zuläſſigen Überſteuerungen, die aus einem Vorſorgewert für „Lärmschwerhörigkeit“ abgeleitet wurden.

Die „Übersteuerungsgrenze“ von 99 dB(A)

Jansen verweiſt zur Begründung der „Überſteuerungsgrenze“ von 99 dB(A) auf ſeine Publikation „Zur nervöſen Belastung durch Lärm“, die er 1967 veröffentlicht hat [4]. Sie enthält Grenzwerte hiñſichtlich der vegetativen Beſtandheit durch Geräusche, die aus Laborverſuchen abgeleitet wurden. In dieſen Studien wurde die Verminderung der Fingerpulsamplitude als Maß für die phyſiologiſche Reaktion unterſucht. Die Abb. 2 zeigt die von Jansen und Griefahn [8, 9, 10, 11, 12] wiederholt publizierte Grenzl意思ien für die Bereiche „mögliche vegetative Reaktionen“, „deutliche vegetative Reaktionen“, „Gefährdung“ und „Schädigung“.

Die um 1 dB pro Oktave abfallende Grenzl意思ie (4) zwiſchen dem Bereich der „Gefährdung“ und dem Bereich der „Schädigung“ gibt nach Jansen an, oberhalb welcher Grenze bei häufig oder über längere Zeit einwirkenden Terzbandbreiten Geräuschen eine Geſundheitsgefährdung nicht mehr auszuſchließen iſt. Bei breitbandigen Geräuschen iſt die Grenzl意思ie 3 heranzuziehen. „Während [...] die Linie 4 lediglich für Geräusche gilt, bei deren Frequenzſpektrum ein einzelner Terzbandpegel 10 dB über alle anderen Terzbandpegel herausragt, iſt bei einem breit verteilten, mehrgipfligen Frequenzſpektrum die Grenzl意思ie 3 als kritiſcher Wert anzueſehen“ [4, S. 46]. Formal behandelt Jansen die Grenzl意思ie (3) als Terzſpektrum und ſummiert die A-bewerteten Schallpegel der 16 Terzbändern von $f_m=200$ Hz–6400 Hz energetiſch auf. Auf dieſe Weiſe ergibt ſich ein Gesamtpegel von 99 dB(A), den er als „Überſteuerungsgrenze“ für breitbandige Geräusche bezeichnet [10, 11].

Die Feſtlegung eines Gesamtpegels von 99 dB(A) als „Überſteuerungsgrenze“ iſt durch die vom Autor vorgelegten Unterſuchungsergebniſſe nicht gerechtfertigt.

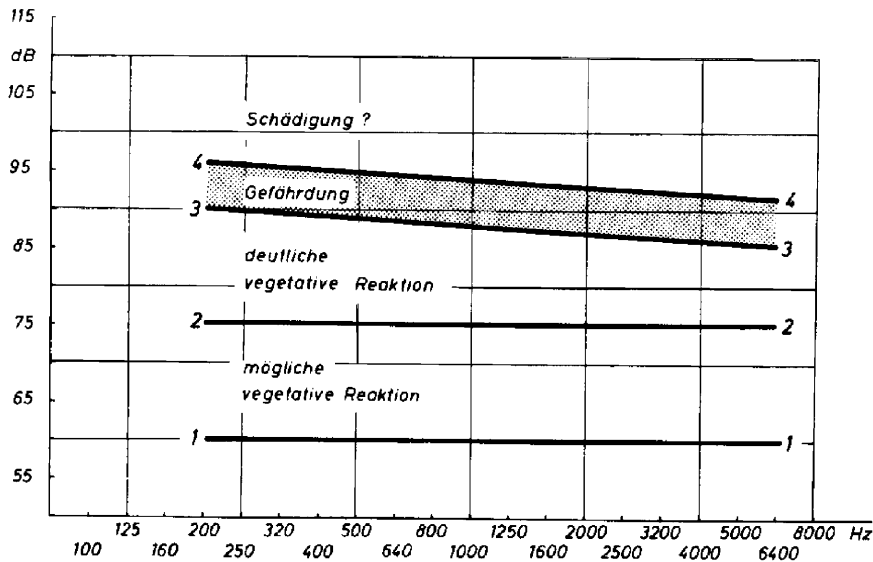


Abb.2 ▲ Grenzl原因 zur Beurteilung lärmbedingter vegetativer Reaktionen (Quelle: [12])

Darstellung der Untersuchungsergebnisse und der Datenaufbereitung der zugrunde liegenden Experimente [4]

In den Untersuchungen wurde die Fingerpulsamplitude (Amplitudenverminderung in Prozent) als Indikator für die Stärke einer vegetativen Reaktion auf Lärm untersucht. Beschallt wurden 20- bis 30jährige Probanden sowohl mit terzbandbreitem Rauschen im Bereich der Terzmittenfrequenzen von $f_m=200$ Hz bis 6400 Hz als auch bei gleichzeitiger Darbietung von zwei Terzbandgeräuschen $f_m=1600$ Hz und 3200 Hz [4, S. 34]. Zusätzlich werden Ergebnisse zur Fingerpulsamplitude vorgelegt, die mit breitbandigen Geräuschen (gemessen in dB oder in dB(B)) gewonnen wurden [4, S. 11, 15, 19]. Bei der Beschallung mit Terzbandrauschen von 30 s Dauer (16 Terzen jeweils 60 bis 110 dB in 10 dB Schritten) zeigte sich in Pegelbereichen oberhalb von 60 dB eine lineare Abhängigkeit der Amplitudenverminderung (Reaktionsgröße) von den Mittenfrequenzen (200 bis 2500 Hz) der Terzbänder. Die Verläufe der Regressionsgeraden (Steigung und Höhenlage) wiesen aber deutliche Unterschiede in Abhängigkeit vom Terzpegel auf (vgl. Abb. 3; durchgezogene Linien). Um die allgemeine Gesetzmäßigkeit der Regressionsgeraden zu erhalten, wurde die Pegelabhängigkeit von Steigung und Höhenlage der Regressionsgeraden (Regressionskoeffizienten) jeweils durch ein Polynom 3. Ordnung angenä-

hert. So war es möglich, die Abhängigkeit der Amplitudenverminderung von der Mittenfrequenz der Terzbänder auch für solche Terzpegel zu berechnen, die nicht untersucht wurden. Die auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse gewonnenen Regressionsgeraden sowie die prognostizierten Verläufe für die Pegelstufen 85, 95 und 105 dB sind gemeinsam in Abb. 3 verzeichnet.

Die grafische Darstellung der Regressionsgeraden in Abb. 3 zeigt, dass die Fingerpulsamplitude (Reaktionsgröße) bei einer Beschallung mit einem festen Terzband mit steigendem Pegel kontinuierlich, aber nicht gleichmäßig abnimmt. Im Pegelbereich von 80 bis 95 dB wird die Minderung der Fingerpulsamplitude bei jedem Pegelschritt geringer. Wird der Pegel weiter erhöht, so nimmt die Minderung der Fingerpulsamplitude mit den Pegelschritten wieder zu (95 bis 110 dB). Dieser Zusammenhang wird deutlich, wenn wir in der Abb. 3, z. B. für das Terzband mit der Mittenfrequenz von 2000 Hz, die Schnittpunkte mit den sieben Regressionsgeraden aufsuchen und die zugehörigen Reaktionsgrößen (Verminderung der Fingerpulsamplitude) tabellarisch zusammenstellen.

Die Fingerpulsamplitude vermindert sich bei einer Erhöhung des Terzpegels von 80 dB auf 85 dB von 18% auf 23,2%, d. h. um 5,2% (Tabelle 1). Wird der Terzpegel um weitere 5 dB auf 90 dB erhöht, so vermindert sich die Fingerpulsamplitude nur um weitere 2,2% auf insgesamt 25,4%. Bei einer Pegelerhöhung

von 90 dB auf 95 dB und von 95 dB auf 100 dB verringert sich die Fingerpulsamplitude jeweils um nur noch 1% auf insgesamt 26,4% bzw. 27,4%. Bei einer Pegeländerung von 100 dB auf 105 dB beträgt die zusätzliche Minderung der Fingerpulsamplitude dagegen wieder 4,6%; bei der Pegeländerung von 105 dB auf 110 dB bereits 7,8%. Im Bereich um 95 dB (Terzpegel) muss demzufolge ein Umschlagpunkt liegen, den Jansen als Beginn einer vegetativen Übersteuerung interpretiert. „Unter Hinblick auf die Fragestellung (experimentell ermittelte Grenzwerte vegetativer Belastbarkeit) liegt für einen prophylaktisch denkenden Mediziner der Gedanke nahe, dass eine reizadäquate Verarbeitung des Schallreizes oberhalb der kritischen Kurve nicht mehr erfolgt, sondern dass die vegetativen Funktionen hier übersteuert sind“ [4, S. 44].

Werden nun die Pegelwerte der Umschlagpunkte für alle 16 Terzbänder berechnet und in ein Terzpegel-Frequenz-Diagramm als Polygonzug eingezeichnet, so ergibt sich die Grenzlinie (4), wie sie in der Abb. 2 verzeichnet ist.

Die Grenzlinie (4) gibt nach Jansen an, bei welchem Pegel eines Terzbandes eine vegetative Übersteuerung nicht mehr ausgeschlossen werden kann. Aus der Grenzlinie kann ein konkreter Pegelwert abgelesen werden, sofern die Mittenfrequenz des Terzbandes vorgegeben wird. Die Herleitung der Grenzlinie (4) ist insgesamt nachvollziehbar, obwohl im Detail kritische Fragen zu stellen sind, die am Ende des Kapitels erläutert werden.

Im Gegensatz zur Grenzlinie (4) wurde die Grenzlinie (3) aber nicht durch eine Beschallung mit einzelnen Terzbändern gewonnen, sondern – wie bereits erwähnt – aus Untersuchungsergebnissen abgeleitet, die mit breitbandigen Geräuschen durchgeführt wurden. „Die experimentell ermittelte Intensitätsabhängigkeit vegetativer Reaktionen aus Versuchen mit Breitbandgeräuschen [...] zeigte eine (annähernd) lineare Beziehung zwischen Intensität und Reaktionsgröße; doch hat die Kurve der Originalwerte einen Knick bei 88 dB (Umschlagpunkt), d. h. dass bei 88 dB die kritische Grenze der Breitbandgeräusche erreicht ist“ [4, S. 45; Unterstreichungen durch 13].

„Wir untersuchten den Einfluss des Breitbandgeräusches bei 54 (...) dB bis 102 (...)

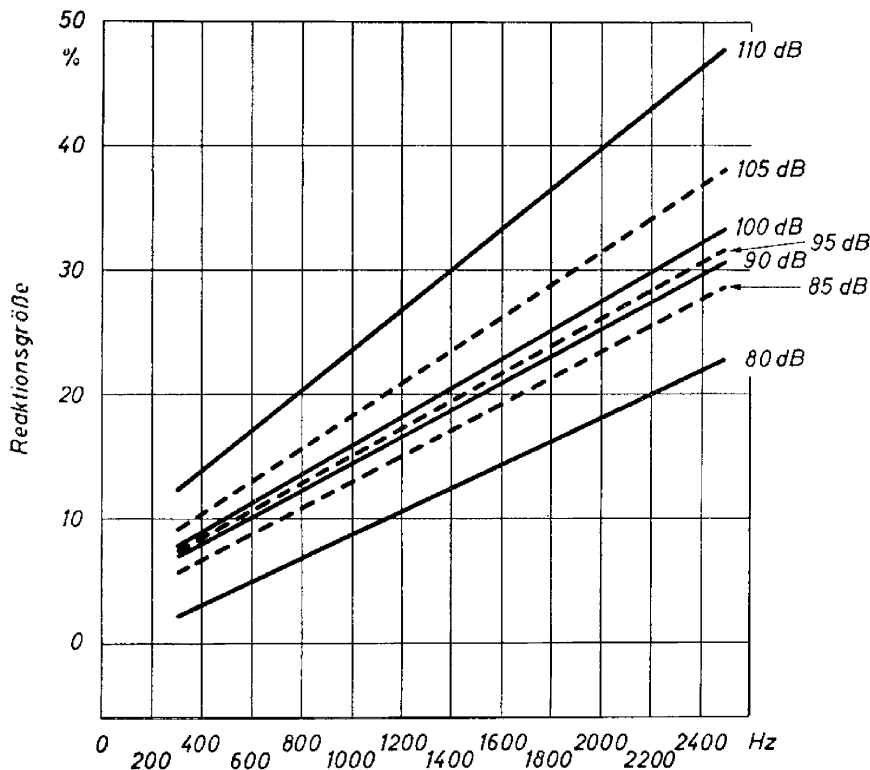


Abb. 3 ▲ Lineare Abhängigkeit der Amplitudenverminderung (Reaktionsgröße) von den Mittelfrequenzen der Terzbänder bei verschiedenen Schallpegeln (Quelle[4], S. 42)

dB in einer Versuchsreihe mit 90 Versuchen. Dabei zeigte sich, dass bei 54 dB noch keine Wirkung zu erkennen ist. Erste geringgradige Reaktionen treten bei 68 dB auf. Eine deutliche Reaktion ist bei 74 dB zu finden; hierbei ist allerdings zu erkennen, dass die Reaktion gegen Lärmende wieder in Richtung Ausgangslage abklingt. Erst bei 88 dB ist die Reaktion so ausgeprägt und anhaltend, dass sie als ausgesprochene Lärmreaktion zu bewerten ist“ [4, S. 11] (Abb. 4).

Weiter wird ausgeführt: „Diese Befunde berechtigen uns zu der Aussage, dass alle (breitbandigen) Geräusche, die oberhalb von 88 dB gelegen sind, als unzumutbar anzusehen sind“ [4, S. 46; Unterstreichungen durch 13]. Um dieses Ergebnis ebenfalls in dem Terzpegelfrequenzdiagramm (Abb. 2) darstellen zu können, wird die Grenzlinie (3) eingeführt, die parallel zur Grenzlinie (4) verläuft und die bei der Mittelfrequenz von 1000 Hz den Wert 88 dB erhält. „Die Grenzlinie 3 verläuft bei 1000 Hz durch 88 dB und hat den Abfall 1 dB pro Oktave“ [4, S. 46]. Eine Begründung für diese Parallelverschiebung ist der Arbeit

von Jansen [4] nicht zu entnehmen. Das Vorgehen muss als äußerst willkürlich bezeichnet werden, weil die Grenzlinie (4) sechzehn experimentell ermittelte „Reaktionspegel“ (Umschlagpunkte) verbindet, die jeweils nur für ein Terzband Gültigkeit haben, während sich bei einer Breitbandanregung folgerichtig nur ein einziger „Reaktionspegel“ (Umschlagpunkt) und damit keine Grenzlinie über der Frequenz ergibt. Dieser Sachverhalt führt bei einer gemeinsamen Darstellung der Ergebnisse in einem Terzpegel-Frequenzdiagramm zu Konflikten und lässt sich nur lösen, wenn der Umschlagpunkt der Breitbandanregung nicht als „Reaktionspe-

gel“ sondern als Terzspektrum dargestellt wird. Bei einer Darstellung als Terzspektrum sind aber physikalische Gesetzmäßigkeiten zu beachten, die von den Autoren im folgenden behandelt werden.

Das gesuchte Terzspektrum für das Breitbandrauschen (weißes Rauschen) muss, wie die folgende Rechnung zeigt, einen Anstieg von 1 dB pro Terz aufweisen, da Terzfilter mit zunehmender Mittelfrequenz (Δf_m) auch eine größere Bandbreite (Δf_{Terz}) aufweisen (Filter relativer Breite, vgl. auch Abb. 5). Mit der Notation nach Abb. 5 gilt für zwei aufeinanderfolgende Terzen:

$$\Delta f_{2Terz} = \sqrt[3]{2} \cdot \Delta f_{1Terz}$$

Die Bandbreite jeder folgenden Terz ist um den Faktor $\sqrt[3]{2}$ größer als die Bandbreite der vorhergehenden Terz. Besteht wie bei weißem Rauschen eine statistische Gleichverteilung der Intensität über alle Frequenzen, d. h. die Intensitätsdichte ($I/\Delta f$) des Geräusches ist konstant, so können die Terzpegel nach der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$L_{pTerz} = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{\Delta f} \cdot \Delta f_{Terz} \right) \text{ dB}$$

Für zwei aufeinanderfolgende Terzen ergibt sich dementsprechend

$$L_{p2Terz} = 10 \cdot \log \left(\frac{I}{\Delta f} \cdot \sqrt[3]{2} \cdot \Delta f_{1Terz} \right) \text{ dB}$$

und wir erhalten einen Anstieg von 1 dB pro Terz oder 3 dB pro Oktave.

$$L_{p2Terz} = L_{p1Terz} + 10 \cdot \log \left(\sqrt[3]{2} \right) = L_{p1Terz} + 1 \text{ dB}$$

Das Breitbandrauschen (weißes Rauschen) kann in einer Terzpegeldarstellung nicht den gleichen Abfall von 1 dB pro Oktave aufweisen, wie die Grenzlinie (4).

Tabelle 1

Terzpegel und Reaktionsgröße für das Terzband mit der Mittelfrequenz 2000 Hz

Terzpegel	80 dB	85 dB	90 dB	95 dB	100 dB	105 dB	110 dB
Reaktionsgröße	18%	23,2%	25,4%	26,4%	27,4%	32%	39,8%

Die Werte wurden aus [4] Abb. 30 grafisch ermittelt, da die in der Arbeit verfügbaren Zahlen so stark gerundet sind, dass eine Berechnung ausschied.

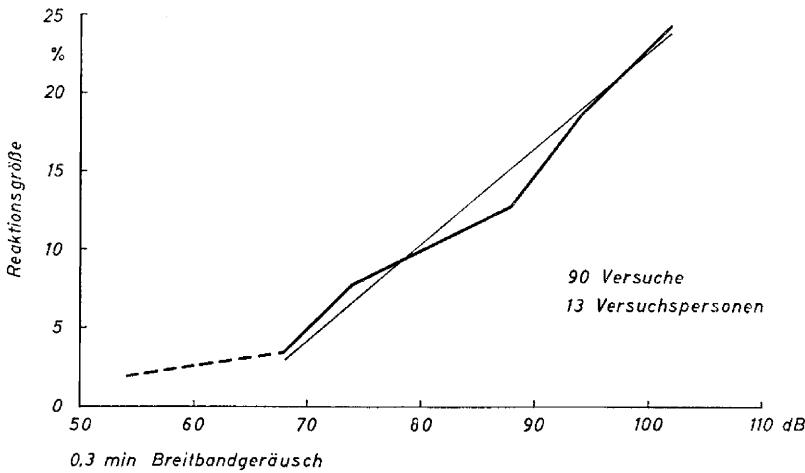


Abb.4 ▲ Prozentuale Erniedrigung der Fingerpulsamplitude (Reaktionsgröße) in Abhängigkeit von der Intensität (Schallpegel) eines Breitbandgeräusches (Quelle: [4], S. 11)

Vollkommen unverständlich bleibt auch die Tatsache, dass die Grenzlinie (3) so weit verschoben wird, dass sie für das Terzband mit der Mittenfrequenz $f_m=1000$ Hz einen Pegel von 88 dB anzeigt. Diese Festlegung steht im Widerspruch zum Grundsatz der Energieerhaltung in einem geschlossenen System [15]. Nur durch eine veränderte mathematische Beschreibung (Darstellung in 16 Terzpegeln) darf sich die Gesamtintensität (Energie pro Zeit und Fläche) des Breitbandgeräusches nicht ändern. Der Energieerhaltungssatz lässt sich sinnbildlich an einem Alltagsbeispiel erläutern:

Betrachten wir eine Flasche mit Wasser, so können wir dieses Wasser auf verschiedene leere Gläser verteilen. Die Wassermenge in allen gefüllten Gläsern zu-

sammen kann aber nicht mehr sein, als zuvor in der Flasche war. Analog verhält es sich mit der Energie eines geschlossenen Systems. Durch ein Aufteilen der Intensität des Breitbandgeräusches (Flasche) auf 16 Terzen (Gläser), darf die Summe der Intensitäten in den Terzbändern nicht größer werden als die Intensität, die im breitbandigen Geräusch vorhanden war. Bleiben wir bei unserem Alltagsbeispiel, so bedeutet die willkürliche Festlegung der Grenzlinie (3), dass in den Terzbändern der Grenzlinie (Gläser) nun mehr Intensität (Wasser) enthalten ist als zuvor im Breitbandgeräusch (Flasche) war.

Die Energiebilanz ist bei 16 Terzbändern mit jeweils gleicher Intensität dann korrekt, wenn wir die Pegel der Terzbänder nach der folgenden Formel berechnen:

$$L_{\text{Terz}} = L_{\text{Breitband}} - 10 \cdot \lg(16) \text{ dB} \\ = L_{\text{Breitband}} - 12 \text{ dB}$$

- L_{Terz} Pegel der Terzbänder in dB
- $L_{\text{Breitband}}$ Pegel des breitbandigen Geräusches in dB
- 16 Anzahl der Terzbänder.

Für die Grenzlinie (3) muss noch die bereits hergeleitete Steigung der Grenzlinie mit 1 dB pro Terz als Randbedingung berücksichtigt werden. Damit ergibt sich für die in der Abb. 2 dargestellten Grenzlinie (3) ein Korrekturterm von annähernd 15 dB bei 1000 Hz (vgl. Tabelle 2).

Die von Jansen seit Jahren publizierte „Grenzlinie“ (3) und damit auch die „Grenzlinie“ (2) müssen bei 1000 Hz um etwa 15 dB zu niedrigeren Pegeln verschoben werden, damit sie energetisch mit der Grenzlinie (4) in ein gemeinsames Pegelfrequenzdiagramm eingezeichnet werden können. Diese notwendige energetische Korrektur wird in der Arbeit von Jansen [4] nicht vorgenommen, und daraus resultiert der schwerwiegende Fehler. Nach der grafischen Parallelverschiebung der Grenzlinie in die Position 3, wird fälschlicherweise davon ausgegangen, dass damit ein Terzspektrum entstanden ist und sich in jeder der 16 Terzbänder soviel Schallenergie befindet, wie es die „Grenzlinie“ (3) vorgibt. Wird nun die A-Bewertung auf jeden dieser (fiktiven) Terzpegel angewendet, so ergibt sich bei einer energetischen Addition der von Jansen angegebene Übersteuerungspegel von 99 dB(A).

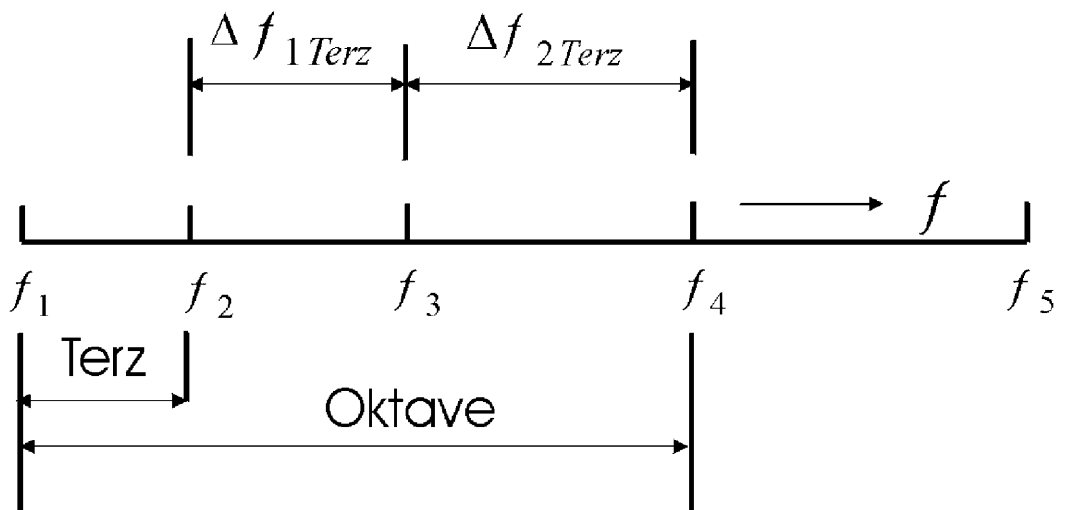


Abb.5 ► Notation für aufeinanderfolgende Terzen in einer Oktave (Quelle: nach [14])

Tabelle 2

Terzpegel und A-bewertete Terzpegel der korrigierten Grenzlinie 3 sowie die resultierenden Gesamtpegel

Terzmittenfrequenz Hz	Terzpegel dB	A-Bewertung dB	A-bewerteter Terzpegel dB(A)
200	66,24	10,9	55,34
250	67,24	8,6	58,64
315	68,24	6,6	61,64
400	69,24	4,8	64,44
500	70,24	3,2	67,04
640	71,24	1,9	69,34
800	72,24	0,8	71,44
1000	73,24	0,0	73,24
1250	74,24	-0,6	74,84
1600	75,24	-1,0	76,24
2000	76,24	-1,2	77,44
2500	77,24	-1,3	78,54
3150	78,24	-1,2	79,44
4000	79,24	-1,0	80,24
5000	80,24	-0,5	80,74
6300	81,24	0,1	81,14
Gesamtpegel	88,00		88,42

Der Grundgedanke, sich von Rauschsignalen zu lösen und über eine A-Bewertung (eines Terzspektrums) eine sehr grobe „Übersteuerungsgrenze“ für breitbandige Geräusche zu berechnen, ist aus praktischen Erwägungen durchaus zu begrüßen. Jedoch darf dann die A-bewertete Summation, wie bereits dargelegt wurde, nur mit den „energiegerichteten“ Terzpegeln durchgeführt werden, so dass sich, wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, als „Übersteuerungsgrenze“ ein gerundeter Gesamtpegel von 88 dB(A) ergibt².

Werden die Irrtümer bei der Datenaufbereitung in [4] korrigiert, so ergibt sich für eine Beschallung mit breitbandigen Geräuschen eine „vegetative Übersteuerung“ ab Schallpegeln von $L_{Aeq,30s} \approx 88$ dB(A). In Abb. 6 sind abschließend die energetisch korrekten „Grenzlinien“ verzeichnet. Die gepunkteten Linien wurden von Jansen anhand von Versuchen mit terzbandbreitem Rauschen ermittelt. Sie stellen „Reaktionspegel“ (Umschlagpunkte) für einzelne Terzbänder dar und sind nur gültig, so-

fern im wesentlichen eine terzbandbreite Anregung vorliegt. Die durchgezogenen Linien sind – unseren Ausführungen entsprechend – Terzspektren von „Reaktionspegeln“, die eine energierichtige Umsetzung der Versuchsergebnisse darstellen, die mit breitbandigem Rauschen (weißem Rauschen) gewonnen wurden.

Die beschriebenen Irrtümer bei der Datenaufbereitung geben Anlass, die interne Validität der „Übersteuerungsgren-

ze“ von 99 dB(A) in Frage zu stellen. Es erübrigt sich folglich, die externe Validität genauer zu überprüfen. Darunter ist die Übertragbarkeit der im Labor mit künstlichen Geräuschen gewonnenen Ergebnisse auf reale Lärmsituationen zu verstehen. Dass die Vasokonstriktion ebenso wie die hormonelle Reaktion als Bestandteil der unspezifischen Stressreaktion durch intervenierende Variablen (Confounder) stark moderiert wird, zeigt eine japanische Arbeit [17], in der die Reaktion der Fingerpulsamplitude auf weißes Rauschen mit der Reaktion auf das Geräusch eines Hochgeschwindigkeitszuges (Shinkansen) verglichen wurde. Als signifikante Faktoren für die Änderung der Fingerpulsamplitude wurde neben dem Schallpegel der Geräuschtyp ($p < .01$) sowie die Persönlichkeit (subject) ($p < .01$) ermittelt.

Die Belastbarkeit der energetisch korrigierten „Übersteuerungsgrenze“ muss sich demzufolge in zukünftigen wissenschaftlichen Untersuchungen zeigen [12]. Bis zum Vorliegen überlegener wissenschaftlicher Erkenntnisse sollte aber für den wachen Menschen die korrigierte „Übersteuerungsgrenze“ von 88 dB(A) zur Prävention akuter Fehlregulationen durch breitbandige Geräusche eingesetzt werden.

Neben der willkürlichen Festlegung der „Grenzlinie“ (3), sind aus heutiger Sicht auch Details der Datenaufbereitung für die Grenzlinie (4) in Frage zu stellen. So wurden die Regressionsgeraden nicht über alle Terzmittenfrequen-

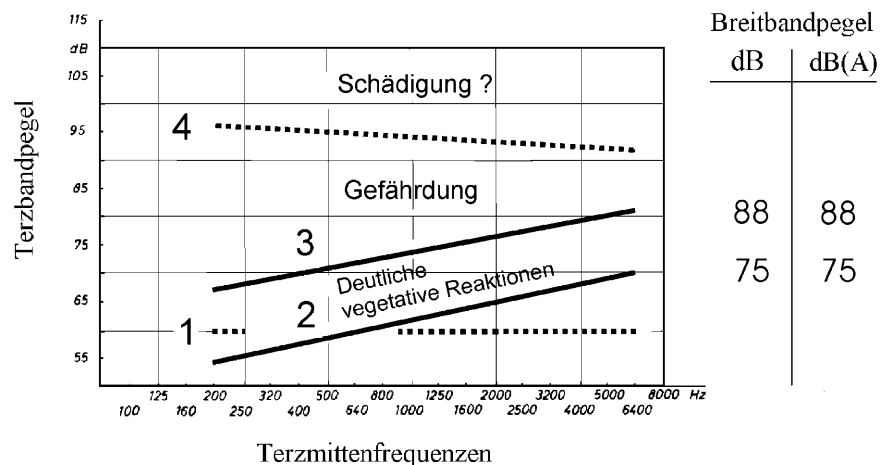


Abb. 6 ▲ Korrigierte Grenzlinien zur Beurteilung lärmbedingter vegetativer Reaktionen. Die gestrichelten Grenzlinien 1 und 4 stellen „Reaktionspegel“ dar und gelten nur für terzbreites Rauschen. Die durchgezogenen „Grenzlinien“ 2 und 3 sind Terzspektren für „Reaktionspegel“ die für weißes Rauschen ermittelt wurden. Für diese Terzspektren ist der unbewertete und der A-bewertete Gesamtpegel am rechten Rand der Grafik verzeichnet (Quelle: [16])

² Der Publikation „Zur nervösen Belastung durch Lärm“ ist nicht eindeutig zu entnehmen, ob der Pegel der Breitbandgeräusche in dB oder dB(B) gemessen wurde [4]. Lagen B-bewertete Pegel vor, so ergibt die „energiegerichtete“ Umrechnung einen Pegel von 89 dB(A).

zen berechnet, sondern nur für die Terzmittenfrequenzen von 200 bis 2500 Hz (vgl. Abb. 3), ohne diese grobe „Datenbereinigung“ inhaltlich zu begründen. „Eine Prüfung auf Linearität der Regression mit Hilfe der F-Verteilung zeigte, dass der Anstieg der Kurven im Intervall von 200 Hz bis 2500 Hz als linear betrachtet werden kann, während dies im oberen Frequenzbereich zwischen 3000 Hz und 6000 Hz nicht mehr der Fall ist. Eine weitergehende mathematische Behandlung der oberhalb von 3000 Hz liegenden Messwerte unterließen wir, da dieser Bereich nur noch vier Terzen umfasste“ [4, S. 39; Unterstreichung durch 13].

Die von Jansen erwähnte statistische „Prüfung auf Linearität“ wird nicht dokumentiert, und es wird in der Publikation kein Maß für die Güte der linearen Anpassung der Messergebnisse (Bestimmtheitsmaß) mitgeteilt (vgl. [4, S. 39]). Für die „allgemeine Grundgleichung“ wählt Jansen, ohne inhaltliche Begründung, ein Polynom dritten Grades (vgl. [4, S. 40, Abb. 28]. Die zur Verfügung stehenden drei Freiheitsgrade (bei vier experimentell ermittelten Pegelstufen) erlauben jedoch keine statistische Überprüfung der einzelnen Polynomkoeffizienten, und so ist es gewagt, die Lösung des entsprechenden Gleichungssystems (vgl. [4, S. 41]) als allgemein gültige Grundgleichung anzusehen.

Die Anzahl von zulässigen Übersteuerungen

Zur Herleitung der Anzahl von zulässigen Übersteuerungen wird von Jansen der Pegel der „Übersteigerungsgrenze“ energetisch mit einem Vorsorgewert für Lärmschwerhörigkeit in Form eines Dauerschallpegels verrechnet, indem für jede Übersteuerung eine Dauer von 30 s angesetzt wird. Der Vorsorgewert erhält einen Pegel von 79 dB(A) mit der Begründung, dass dieser Dauerschallpegel unter dem Schwellenwert für eine Lärmschwerhörigkeit liegt. „Auch weiß man, dass die Lärmschwerhörigkeit bei 85 dB(A) in 1,0% der Fälle auftritt. Bleibt man nun mit dem Mittelungspegel unter 80 dB(A), also dem Schwellenwert für Lärmschwerhörigkeit, z. B. bei $L_{eq3} = 79$ dB(A) und einem Beurteilungszeitraum von 16 Stunden (960 min), ergibt sich für Einzelpegel von 99 dB(A) (Übersteigerungsgrenze) eine Gesamtbelastungszeit von 9,6 min, die man als sel-

ten und damit als nicht gesundheitsgefährdend bezeichnen kann“ [7, S. 32].

Obwohl die Autoren diesem methodischen Ansatz sehr kritisch gegenüberstehen, wie am Ende des Kapitels ausgeführt wird, soll im folgenden die Herleitung von zulässigen Übersteuerungen aus Vorsorgewerten für eine Lärmschwerhörigkeit (Gehörgefährdung) formal nachvollzogen werden.

Der Vorsorgewert von 79 dB(A) ist – wie Jansen ausführt – auf die Vermeidung einer Lärmschwerhörigkeit abgestellt, die nach VDI 2058 [18] einen Hörschaden darstellt. Aus präventivmedizinischer Sicht ist deshalb zu fordern, dass als Vorsorgewert ein *no adverse effect level* verwendet wird, um auch solche lärmbedingten Hörverluste zu vermeiden, die noch nicht als Hörschaden zu bezeichnen sind. Die WHO gibt als *no adverse effect level* einen Pegel von $L_{eq3, 8h} = 75$ dB(A) an [19]. Unabhängig von der Frage, welcher der beiden Vorsorgewerte heranzuziehen ist, müssen die genannten Vorsorgewerte korrigiert werden. Der Vorsorgewert von 79 dB(A) zur Vermeidung einer Lärmschwerhörigkeit ist ebenso wie der *no adverse effect level* der WHO auf einen repräsentativen Arbeitstag von acht Stunden bezogen ($L_{Ex, 8h}$).

Unter Beachtung der „Energie-Äquivalenz“ bei Hörverlusten (vgl. z. B. [20]) ist einem Dauerschallpegel über acht Stunden die gleiche gehörbeeinträchtigende Wirkung zuzuordnen wie einem um 3 dB(A) reduzierten Dauerschallpegel über 16 Stunden. Gemäß der Begründung von Jansen, dass ein Vorsorgewert zur Vermeidung von Lärmschwerhörigkeit herangezogen werden soll, ist für eine Expositionszeit von 16 Stunden ein Mittelungspegel von $L_{eq3, 16h} = 79$ dB(A) – 3 dB(A) = 76 dB(A) zu verwenden.

Der in [7] vorgelegten Begründung weiter folgend, ist nun die Einwirkdauer zu ermitteln, in der ein konstantes Geräusch mit einem Schallpegel an der „Übersteigerungsgrenze“ die gleiche Schallintensität enthält, wie der vorgegebene Mittelungspegel über 16 Stunden (äquivalente Einwirkdauer). Das ergibt bei der in [7] betrachteten Pegeldifferenz von 99 dB(A) – 79 dB(A) = 20 dB(A) eine äquivalente Einwirkdauer von 9,6 min. Setzen wir, wie Jansen es fordert, jede Übersteuerung mit einer Dauer von 30 s an, so errechnen sich 19 zulässige Überschreitungen.

Die äquivalente Einwirkdauer (t_E) kann nach den Gesetzen der Pegelrechnung durch die folgende Gleichung berechnet werden:

$$t_E / \text{min} = \frac{960}{10^{0,1 \frac{L_{dif}}{dB(A)}}}$$

mit: $L_{dif} = L_{Grenze} - L_{Hör}$ dB(A)

t_E äquivalente Einwirkdauer in Minuten,

L_{dif} Pegeldifferenz in dB(A),

L_{Grenze} Pegelwert der „Übersteigerungsgrenze“ in dB(A)

$L_{Hör}$ äquivalenter Dauerschallpegel zur Vermeidung von Hörschäden bzw. Hörverlusten in dB(A).

Da sowohl die von Jansen errechnete „Übersteigerungsgrenze“ von 99 dB(A) als auch der Vorsorgewert zur Vermeidung einer Lärmschwerhörigkeit von 79 dB(A) korrigiert werden müssen, ergibt sich aus den korrigierten Werten eine Pegeldifferenz von 88 dB(A) – 76 dB(A) = 12 dB(A). Diese Pegeldifferenz entspricht nach beschriebener Umrechnung einer äquivalenten Einwirkdauer von 60,6 min bzw. einer Häufigkeit von 121 zulässigen Übersteuerungen in 16 Stunden. Es ist aber ferner zu bedenken, dass der Dauerschallpegel von $L_{eq3, 16h} = 76$ dB(A) zur Vermeidung einer Lärmschwerhörigkeit nur dann angesetzt werden darf, wenn kein nächtlicher Fluglärm vorliegt, wenn also die Expositionsdauer tatsächlich nur 16 Stunden beträgt. Beträgt die Expositionsdauer 24 Stunden muss mit einem noch kleineren Mittelungspegel gerechnet werden. Passchier-Vermeer [21] errechnete unter Berücksichtigung von Urlaubstagen und Wochenenden eine Pegeldifferenz von 6 dB(A) zwischen dem $L_{Ex, 8h}$ und einem $L_{eq3, 24h}$ bei gleichem Gehörschädigungspotential. Nach Passchier-Vermeer muss den Berechnungen für eine 24-Stunden Exposition ein Dauerschallpegel von 79–6 dB(A) = 73 dB(A) zugrunde gelegt werden, und es ergibt sich eine Pegeldifferenz von 88–73 dB(A) = 15 dB(A). Bei der Ermittlung der äquivalenten Einwirkdauer muss in diesem Fall von 24×60=1440 min ausgegangen werden (24 Stunden Expositionsdauer). Ersetzen wir in obiger Gleichung die 960 min durch 1440 min, so erhalten wir eine äquivalente Einwirkdauer von 45,5 min. In diesem Fall ergeben sich 91 zulässige

Überschreitungen in 24 Stunden. Wird darüber hinaus der von der WHO [19] angegebenen *no adverse effect level* von $L_{Ex,8h}=75$ dB(A) zur sicheren Vermeidung lärmbedingter Hörverluste herangezogen, so ergibt sich für eine 24-Stundenexposition eine Differenz von 88 dB(A)– 69 dB(A)= 19 dB(A) und somit eine äquivalente Einwirkdauer von 18,1 Minuten. Diese Einwirkdauer entspricht einer Anzahl von 36 zulässigen Übersteuerungen in 24 Stunden.

„Statt einer ‘Übersteuerungsgrenze von 19×99 dB(A)’ ergeben sich 36×88 dB(A).“

Neben diesen formalen Korrekturen ist der methodische Ansatz zur Festlegung von zulässigen Übersteuerungen in Frage zu stellen. So wird der Schallpegel einer potentiellen vegetativen „Übersteuerung“ mit einem Dauerschallpegel, der noch keine „Lärmschwerhörigkeit“ (Hörverlust) erwarten lässt, mit dem Hinweis verrechnet, „dass zwischen der zeitweiligen Hörschwellenverschiebung TTS und der Größe der vegetativen Reaktion eine umgekehrt proportionale Beziehung besteht“ [7, S. 32]. Der Weg von dieser Feststellung zu einer energetischen Verrechnung des Schallpegels der „Übersteuerungsgrenze“ mit einem Vorsorgewert zur Vermeidung einer Lärmschwerhörigkeit (Hörverlust), kann von den Autoren nicht nachvollzogen werden. Untersuchungen an großen Kollektiven von Lärmexponierten in der Industrie haben gezeigt, dass sich eine Dosis-Wirkungs-Beziehung formulieren lässt, die im Mittel eine recht zuverlässige Vorhersage einer zu erwartenden Gehörschädigung erlaubt (vgl. z. B. [22]). Eine Gefahr für das Hörvermögen besteht demzufolge, sofern eine „kritische Schalldosis“ überschritten wird. Zur „kritischen Schalldosis“ tragen jedoch alle Schallereignisse bei, nicht nur diejenigen die eine „Übersteuerungsgrenze“ erreichen oder überschreiten. Auch die Feststellung, dass 9,6 min von 16 Stunden (960 min) „als selten und damit als nicht gesundheitsgefährdend“ ([7, S. 32]) einzustufen sind, ist medizinisch nicht zu begründen. Eine mögliche Gesundheitsgefährdung muss immer im gegebenen Kontext betrachtet werden. Dies soll das folgende Beispiel verdeutlichen:

Wenn ein Arzt einen Schnupfen pro Jahr noch als gesundheitlich unbedenklich gelten lässt, so wird er einen Herzinfarkt pro Jahr nicht mehr als gesundheitlich unbedenklich bezeichnen, obwohl beide Krankheiten nur einmal pro Jahr, also formal gesehen selten, auftreten. Eine Gesundheitsgefährdung kann demzufolge nicht allein mit einer Häufigkeit (Einwirkdauer) gleichgesetzt werden, sondern muss immer im Zusammenhang mit dem Gesundheitsrisiko für das Einzelereignis beurteilt werden. Um dieses Ereignisrisiko beurteilen zu können, sind potentielle Pathogenesemechanismen zu erarbeiten und präventivmedizinisch zu bewerten. Die Anzahl zulässiger vegetativer Übersteuerungen ist hiervon nicht ausgenommen. Eine globale Gleichsetzung der Begriffe „selten“ und „nicht gesundheitsgefährdend“ darf in der Medizin nicht vorgenommen werden.

Nachwort

Das diskutierte „Übersteuerungskriterium“ von „ 19×99 dB(A)“, das von seinem Begründer Gerd Jansen als gesicherte Erkenntnis der Lärmwirkungsforschung bezeichnet wird und vielfach zur Festlegung von „Lärmgefährdungsgebieten“ herangezogen wurde, ist, wie gezeigt werden konnte, durch eine fehlerhafte physikalisch-mathematische Datenaufbereitung entstanden. Die Anwendung dieses Übersteuerungskriteriums führt zu einer erheblichen Unterschätzung der Gesundheitsgefahren durch Fluglärm. Bis zum Vorliegen überlegener wissenschaftlicher Erkenntnisse sollte für den wachen Menschen die korrigierte „Übersteuerungsgrenze“ von 88 dB(A) zur Prävention akuter Fehlregulationen herangezogen werden. Die Ableitung von zulässigen Überschreitungen der „Übersteuerungsgrenze“ anhand eines Vorsorgewertes für „Lärmschwerhörigkeit“ (Hörverlust) muss als willkürlich bezeichnet werden. Dem Tatbestand einer vegetativen Übersteuerung wird bei dieser Betrachtung kein eigenständiger Krankheitswert beigemessen. Grundsätzlich wäre es wünschenswert, die Anzahl von zulässigen Übersteuerungen anhand von Schutzziele zu bestimmen, die sich am Krankheitswert der vegetativen Übersteuerung orientieren. Die im Artikel dargelegten Korrekturen führen zwar formal auf eine Anzahl von 36 zu-

lässigen Übersteuerungen und damit auf ein korrigiertes „Übersteuerungskriterium“ von „ 36×88 dB(A)“, die errechnete Anzahl zulässiger Übersteuerungen bleibt aber letztendlich unbefriedigend, weil der methodische Ansatz in Frage zu stellen ist.

An dieser Stelle möchten wir noch darauf hinweisen, dass präventivmedizinische Maßnahmen nicht ausschließlich unter dem Aspekt der wissenschaftlichen Evidenz erwogen werden dürfen. Die rasche Entwicklung technologischer und gesellschaftlicher Prozesse macht es gelegentlich erforderlich, Entscheidungen auf einer noch nicht vollständig gesicherten Kenntnislage zu treffen. Dies ist immer dann der Fall, wenn bestimmte Entwicklungstendenzen auf handlungsrelevante Gefährdungspotentiale hindeuten, bei denen aber angesichts der Dynamik der Entwicklung eine abschließende Klärung nicht abgewartet werden kann. Die Frage, ob und inwieweit akute Fehlregulationen ein Gesundheitsrisiko darstellen, kann davon nicht ausgenommen werden.

Im Einzelnen sind die folgenden Bewertungsdimensionen in den Entscheidungsprozess einzubeziehen [23]:

- Art und Schweregrad der denkbaren Auswirkungen (Endpunkte),
- die Häufigkeit, mit der Expositionen in der Bevölkerung oder in bestimmten Bevölkerungsgruppen auftreten (Verbreitung),
- die Wahrscheinlichkeit, mit der bei einer bestimmten Exposition mit dem Auftreten dieser Wirkungen zu rechnen ist (Risikohöhe) und schließlich das Ausmaß der Verlässlichkeit, das der Risikoprognose zukommt (Evidenz).

Präventivmedizinische Maßnahmen müssen sich daher an den wissenschaftlichen Erkenntnissen orientieren, die z. Z. der Entscheidung die größte wissenschaftliche Aussagekraft besitzen. Das beharrliche Festhalten an früheren Erkenntnissen der Lärmwirkungsforschung kann, wie im Fall des hier diskutierten Übersteuerungskriteriums von „ 19×99 dB(A)“ zu wissenschaftlich unverantwortlichen Resultaten bezüglich der Notwendigkeit von Schallschutzmaßnahmen führen.

Glossar: Begriffsbestimmungen, Definitionen, Erläuterungen

A-Bewertung

National und international wird die Pegel- und Frequenzabhängigkeit der akustischen Wahrnehmung vereinfachend durch Frequenzbewertungskurven (A, B und C) berücksichtigt. Sie repräsentieren die frequenzabhängige Empfindlichkeit des Gehörs in verschiedenen Pegelbereichen. Aufgrund internationaler Vereinbarungen wird heute nahezu ausschließlich die A-Bewertungskurve verwendet. Der A-bewertete Schalldruckpegel wird mit dem Größenzeichen (LA) bzw. mit der Messwertangabe als dB(A) gekennzeichnet.

Äquivalente Ereignisdauer (Flugereignis)

Die äquivalente Ereignisdauer eines Fluglärmereignisses ist die Zeit eines gedachten (fiktiven) Dauergeräusches, das die gleiche Schallenergie enthält wie das an- und abschwellende Fluglärmereignis. Für das Dauergeräusch wird ein Schallpegel vorgegeben, der dem Maximalpegel des Fluggeräusches entspricht (vgl. [24]).

Äquivalenter Dauerschallpegel

Zur einfachen Beschreibung von zeitveränderlichen Geräuschen (z. B. Verkehrsgeräusche) dient der äquivalente Dauerschallpegel L_{eq} in dB [25, 26]. Er wird in einigen Regelwerken als Mittelungspegel (L_m) bezeichnet. Der (energie)äquivalente Dauerschallpegel (L_{eq}) ist der Schallpegel eines gedachten (fiktiven) Dauergeräusches, welches die gleiche Schallenergie enthält, wie ein zeitlich schwankendes Geräusch. Er ist zusammen mit der Dauer des Zeitintervalls, für das er gilt, ein Maß für die „Schalldosis“ – also gewissermaßen für die einwirkende „Menge an Schall“. Wirkt ein Geräusch mit konstantem Pegel nur über die Hälfte der Mittelungsdauer ein, verringert sich der äquivalente Dauerschallpegel um 3 dB. Sofern Missverständnisse nicht auszuschließen sind, sollte dieser Halbierungsparameter q in dem Größenzeichen des Dauerschallpegels vermerkt werden ($L_{eq,q}$). Ebenso ist es vielfach sinnvoll, auch die Mittelungs-

dauer anzugeben (z. B. $L_{eq,3,16h}$). Die Mittelungsdauer wird in Stunden (h), Minuten (m) oder Sekunden (s) angegeben.

Aktivierungsreaktion

Der spezifische Wahrnehmungsprozess ist immer an eine unspezifische Aktivierung gekoppelt. Sie hat die Aufgabe, entsprechend den einwirkenden Informationen, Anforderungen bzw. Belastungen den optimalen und ökonomischsten Funktionszustand herzustellen vergleichbar mit der Gangschaltung von Fahrzeugen bei Berg- und Talfahrt. Unter Aktivierung wird daher eine flexible komplexe Variable verstanden, auf die sich jeder aktuelle funktionelle Zustand eines psychophysiologischen Systems abbilden lässt. Die Aktivierung kann auf Graduierungsskalen dargestellt werden z. B. in der Reihenfolge: Relaxierter Wachzustand → Erwartung → Erregung → Beanspruchung (Stress) → Angst → Panik. Aktivierungsprozesse können auf allen Ebenen der Steuerung und Regulation ablaufen (Zentralnervensystem, peripheres Nervensystem, hormonelles System usw.). Daraus leitet sich ab, dass sich ein bestimmter Aktivierungsprozess in vegetativen Parametern (z. B. Fingerpulsamplitude, Hautwiderstand), in Verhaltensparametern (z. B. Reaktionszeiten, Häufigkeit von Körperbewegungen), im Erleben (z. B. subjektive Aussagen, Befinden), in ZNS-Parametern (z. B. EEG) und in Abhängigkeiten von chronobiologischen Kriterien (z. B. zirkadianer Rhythmus) reflektiert und nachweisen lässt.

Akute Fehlregulation

Unter akuter Fehlregulation wird von den Autoren eine zeitweilige (zeitbegrenzte) reversible inadäquate Veränderung der biologischen Homöostase verstanden. Sie kann z. B. bei einem kurzzeitigen Lärmereignis auftreten. Sie lässt sich in biologischen Parametern objektiv messen.

Bandbreite (Frequenzbandbreite)

Die Schallintensität (vgl. Glossar *Intensität*) ist bei Geräuschen beliebig über der Frequenz verteilt. Zur detaillierteren Beschreibung wird daher das Frequenzspektrum der Intensität bzw. die Intensitätsdichte herangezogen. Der Bereich

zwischen oberer und unterer Frequenzgrenze der Schallintensität wird als Frequenzbandbreite oder kurz als Bandbreite bezeichnet.

Breitbandige Geräusche

Als breitbandige Geräusche werden Geräusche bezeichnet, deren Frequenzbandbreite mehr als eine Dekade umfasst.

Dezibel

Das Dezibel ist die Einheit des Schalldruckpegels (vgl. Glossar *Schalldruckpegel*).

Energieerhaltungssatz

In einem abgeschlossenen System bleibt die Energie stets erhalten, und nur die Energieformen können sich ändern. Als abgeschlossenes System ist die Gesamtheit der am Energieaustausch beteiligten Systeme zu betrachten.

Fingerpulsamplitude

Akustische Reize können Vasokonstrictionen hervorrufen (vgl. Glossar *Stress*). Die periphere Durchblutung und damit lärmbedingte Vasokonstrictionen kann mit plethysmografischen Methoden besonders gut im Bereich der Fingerbeere gemessen werden. Die Pulsamplitudenregistrierung an der Fingerbeere wird als Fingerpulsamplitude bezeichnet.

Freiheitsgrade

Die Anzahl von Messwerten, die bei der Berechnung einer statistischen Prüfgröße (z. B. t-Wert, F-Wert usw.) frei bzw. unabhängig voneinander variieren können (vgl. z. B. [27]) werden als Freiheitsgrade bezeichnet.

Gestörte Regulation

Die Autoren verstehen unter einer gestörten Regulation, eine durch exogene (auch endogene) Reize auftretende zeitweilige oder permanente Veränderung der Regulation psychobiologischer Prozesse, z. B. die Veränderung des vegetativ-hormonellen Funktionssystems und Störungen von Bedürfnissen. Sie lässt sich in biologischen Parametern objektiv messen.

Gesundheitsbeeinträchtigung durch Lärm

Gesundheitliche Schädigungen durch Lärmwirkungen können aural (Hörminderung) und extraaural (Störungen der Regulationen des vegetativen hormonellen-immunologischen Systems und des Schlafes) zum Ausdruck kommen. Die gesundheitsschädigende Wirkung des Lärms ist nicht einfach zu beurteilen, u. a. weil

- ▶ sie einer chronisch verlaufenden Pathogenese unterliegt,
- ▶ die Resistenz bzw. Sensibilität gegenüber gesundheitsschädigenden Lärmwirkungen großen individuellen Schwankungen unterliegt,
- ▶ das Verhältnis von Einwirkdauer des Lärms und Erholungsmöglichkeiten in lärmfreien Zeiten eine große Rolle spielt.

Hörminderung/Hörverlust

Durch andauernde oder häufige Schalleinwirkung hoher Intensität verschiebt sich die Hörschwelle zu höheren Pegeln. Eine zeitweilige Hörschwellenverschiebung wird als vorübergehende Hörminderung (temporary threshold shift, TTS) [18] oder als Vertäubung bezeichnet. Sie bildet sich nach Ende der Schallbelastung wieder zurück. Eine bleibende Hörminderung (permanent threshold shift, PTS) [18] wird als Hörverlust (hearing loss) oder permanente Vertäubung [1, Abs. 389] bezeichnet.

Hörschaden

Überschreitet ein Hörverlust für ausgewählte Frequenzen einen vorgegebenen Wert, so wird der Hörverlust als Hörschaden bezeichnet. Die VDI 2058 [18] definiert einen Hörschaden als audiometrisch nachweisbaren Hörverlust im Innenohr, sofern bei 3000 Hz eine Hörminderung von 40 dB überschritten wird.

Intensität (Schallintensität)

In einem Schallfeld wird durch die fortlaufenden Schallwellen mechanische Energie von der Schallquelle abtransportiert. Die Transportgeschwindigkeit ist gleich der Schallgeschwindigkeit. Die mittlere Energie, die pro Zeit (Sekunde)

und pro Fläche (Quadratmeter) im Schallfeld transportiert wird, wird als Intensität I bezeichnet, mit der Einheit W/m^2 .

Lärmschwerhörigkeit

Der Begriff Lärmschwerhörigkeit wird auch in der Fachliteratur nicht einheitlich angewandt. Überwiegend und auch von den Autoren wird unter Lärmschwerhörigkeit ein Hörschaden (vgl. *Glossar Hörschaden*) verstanden (z. B. [18, 28]). Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen bezeichnet dagegen eine permanente Vertäubung (vgl. *Glossar Hörminderung/Hörverlust*) als Lärmschwerhörigkeit [1, Abs. 389].

Maximalpegel

Der Maximalpegel (L_{max}) ist der Pegel des höchsten Effektivwertes (Wurzel aus dem quadratischen Mittelwert) des bewerteten Schalldrucks. Er hängt bei der Messung von der verwendeten Zeitbewertung (Trägheit der Anzeige) ab. Für Fluglärm wird die Zeitbewertung *slow* (Zeitkonstante 1 s) eingesetzt.

Mittelungspegel

Zum Mittelungspegel vgl. *Glossar Äquivalenter Dauerschallpegel*.

Mittelfrequenz

Frequenzschritte konstanter Bandbreite werden durch ihren Frequenzumfang charakterisiert. Der Frequenzbereich lässt sich durch die Angabe einer Bandbreite (vgl. *Glossar Bandbreite*) und einer Mittelfrequenz (f_m) darstellen. Die Mittelfrequenz teilt den Frequenzschritt arithmetisch in zwei gleiche Teile. Liegen Frequenzschritte relativer konstanter Bandbreite vor wie bei Terzen und Oktaven, so teilt die Mittelfrequenz die Bandbreite geometrisch in zwei gleiche Teile.

Oktavbänder

Erste Informationen über die Frequenzzusammensetzung bzw. über die Frequenzbandbreite eines Geräusches können den Pegeln für Oktav- oder Terzbändern entnommen werden (Oktav- oder Terzspektrum). Bei aufeinanderfolgenden Oktavbändern unterscheiden

sich obere und untere Grenzfrequenz jeweils um den Faktor 2. Die konstante relative Bandbreite beträgt 70,7% der Oktav-Mittelfrequenz.

Schalldruckpegel

Aus praktischen Erwägungen wird der Schalldruck nicht in Mikrobar oder Pascal angegeben, sondern als Schalldruckpegel (L_p) in Dezibel. Im direkten Vergleich zweier Geräusche ist ein Pegelunterschied von ca. 1 dB gerade wahrnehmbar, ein Pegelunterschied von 3 dB gut wahrnehmbar [29]. Der Schalldruckpegel ist definiert als:

$$L_p = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} = 10 \cdot \lg \frac{I}{I_0} \text{ [dB]}$$

L_p = Schalldruckpegel in dB

p = effektiver Schalldruck in Pa

p_0 = Bezugsschalldruck $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

I = Intensität in W/m^2

I_0 = Bezugsintensität 10^{-12} W/m^2

Stress

Wie jeder andere Umwelteinfluss (physikalisch, chemisch, meteorologisch, sozial u. a.), der auf den Menschen mit einer bestimmten Intensität einwirkt, so können auch akustische Ereignisse, neben der spezifischen Reaktion (Wahrnehmung), auch unspezifische Reaktionen hervorrufen. Diese äußern sich psychisch (im Erleben) u. a. als Anspannung, Aktivierung, erhöhte Emotionalität und Vigilanz, gesteigerte Erregbarkeit, Gereiztheit, Aggressivität oder auch als Depression und Lethargie. Biotisch (messbar) drücken sie sich u. a. durch erhöhten Blutdruck, beschleunigte Atem- und Herzfrequenz, gesteigerten Stoffwechsel, herabgesetzten Hautwiderstand sowie durch eine vermehrte Ausschüttung der Nebennierenhormone Adrenalin, Noradrenalin und Kortisol aus.

Aufgabe der unspezifischen Reaktivität als Antwort auf Umwelteinflüsse ist es, Energiereserven zu mobilisieren, um auf veränderte Anforderungen, Gefahren, Belastungen, Belästigungen, Umweltbedingungen usw. im Interesse der Lebensexistenz reagieren zu können. Die unspezifische Reaktion wird als Stress oder als Beanspruchung bezeichnet. Unter regulationstheoretischem Aspekt ist unter Stress eine zeitweilige

oder permanente Veränderung der psychobiologischen Homöostase (Gleichgewicht aller Funktionssysteme eines Organismus) zu verstehen.

Es wird in Eustress (normaler Stress) und Disstress (krankheitsauslösender Stress) unterschieden. Permanenter Stress drückt sich gewöhnlich im Disstress aus. Der stressauslösende Faktor wird als Stressor bezeichnet. Lärm ist ein Stressor, der bei permanenter Wirkung Disstress verursacht.

Terzbänder

Erste Informationen über die Frequenzzusammensetzung bzw. über die Frequenzbandbreite eines Geräusches können den Pegeln für Oktav- oder Terzbändern entnommen werden (Oktav- oder Terzspektrum). Bei aufeinanderfolgenden Terzbändern stehen untere und obere Grenzfrequenz jeweils im Verhältnis von $1: \sqrt[3]{2}$. Die relative Bandbreite beträgt 23,2% der Terz-Mittelfrequenz.

Terzpegel

Als Terzpegel wird der Schalldruckpegel bezeichnet, der aus der Intensität (vgl. Glossar *Intensität*), die im betrachteten Terzband liegt, errechnet werden kann (vgl. Glossar *Schalldruckpegel*).

Übersteuerung

Ist eine kurzfristige Belastung, die zu einer akuten Fehlregulation führt (vgl. Glossar *akute Fehlregulation*).

Vegetativ-hormonelle Reaktion

Unter dem Begriff vegetativ-hormonelle Reaktion werden durch Schallreize ausgelöste Veränderungen verschiedener vom Hypothalamus gesteuerter vegetativ-hormoneller Funktionen zusammengefasst.

Weißes Rauschen

Ein wichtiger Sonderfall des allgemeinen Rauschens ist das sogenannte weiße Rauschen. Bei diesem ist im gesamten Frequenzbereich die Intensität pro Frequenzbandbreite (I/Hz), die als Intensitätsdichte bezeichnet wird, konstant (vgl. Glossar *Intensität*). Das Hörereignis des weißen Rauschens ist informationsarm, da es keine Klangfärbung

aufweist. Es wurde daher oft zur Beschallung bei psychoakustischen Untersuchungen eingesetzt. Heute wird überwiegend mit realen Geräuschen gearbeitet, da die Übertragbarkeit (externe Validität) der mit weißem Rauschen gewonnenen Ergebnisse stark eingeschränkt ist.

Literatur

- SVRU (1999) Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. Sondergutachten: Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen. Eigenverlag, Wiesbaden
- Mediationsverfahren (1999) Gutachten über die Fluglärmbelastung in der Umgebung des Flughafens Frankfurt am Main für den Ist-Zustand 1998. Hessisches Landesamt für Umwelt (HfU), Wiesbaden
- Jansen G, Linnemeier A, Nitzsche M (1995) Methodenkritische Überlegungen und Empfehlungen zur Bewertung von Nachtfluglärm. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 42:91–106
- Jansen G (1967) Zur nervösen Belastung durch Lärm. Steinkopff Verlag, Darmstadt
- Jansen G (1970a) Beeinflussung des natürlichen Nachtschlafes durch Geräusche. Forschungsbericht des Landes Nordrhein-Westfalen Nr. 2131. Westdeutscher Verlag, Köln Opladen
- Griefahn B, Jansen G, Klosterkötter W (1976) Zur Problematik lärmbedingter Schlafstörungen – eine Auswertung von Schlaf-Literatur. Umweltbundesamt Bericht 4/76
- Jansen G (2000) M8 Medizinisches Gutachten über die Auswirkungen des Fluglärms auf die Bevölkerung in der Umgebung des Flughafens Schönefeld; Ausbau Flughafen Schönefeld, Antrag auf Planfeststellung. Flughafen Berlin Schönefeld GmbH
- Jansen G (1970b) Zur Störung des natürlichen Nachtschlafes durch Fluglärm. Kampf dem Lärm 17:148–152
- Jansen G, Griefahn B (1975) Schallwirkungen beim Menschen und Fragen des Gehörschutzes. In: Heckl M, Müller HA (Hrsg) Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer, Berlin Heidelberg New York, S 70–86
- Jansen G (1982) Medizinisches Sachverständigengutachten gemäß § 40, Abs. 1, Ziff. 10b Luft-VZO über die Auswirkungen des Fluglärms auf die Bevölkerung in der Umgebung des Flughafens Stuttgart nach Verlegung und Verlängerung der Start- und Landebahn nach Osten. Im Auftrag der Flughafengesellschaft Stuttgart
- Jansen G (1984) Medizinisches Gutachten für den Flughafen Hannover. Im Auftrag der Flughafengesellschaft Hannover
- Griefahn B (1982) Grenzwerte vegetativer Belastbarkeit. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 29:131–136
- Maschke C, Hecht K, Balzer H-W (1996) Lärmmedizinisches Gutachten für den Flughafen Hamburg Vorfeld II. Hauptteil und Anhang A. Im Auftrag der Flughafengesellschaft Hamburg
- Henn H, Sinambari GR, Fallen M (1999) Ingenieurakustik – Grundlagen, Anwendungen, Verfahren. Vieweg Verlag, Wiesbaden
- Fercher AF (1992) Medizinische Physik – Physik für Mediziner, Pharmazeuten und Biologen. Springer, Wien New York
- Maschke C, Hecht K, Niemann H, Gottwald S, Bärndal S (2000) Gutachterliche Stellungnahme zu den lärmmedizinischen Gutachten M8 und M9 „Ausbau Flughafen Schönefeld“. UBICOM, Berlin
- Ohkubo C, Miyazaki K, Osada Y (1976) Response of finger pulse amplitude to intermittent noise. Bull Inst Public Health 25(1):1–8
- VDI 2058–2: 1988–06 (1988) Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- WHO (1980) Noise. WHO, Genf
- ISO: 1990-01 (1999) Acoustics: Determination of occupational noise exposure and estimation of noise induced impairment, (Akustik; Bestimmung der berufsbedingten Lärmexposition und Einschätzung der lärmbedingten Hörschädigung). ISO, Genf
- Passchier-Vermeer W (1993) Noise and Health. The Hague: Health Council of the Netherlands, Publication no. A93/02E
- Zenner HP, Struwe V, Schuschke G, Spreng M, Stange G, Plath P, Babisch W, Rebentisch E, Plinkert P, Bachmann KD, Ising H, Lehnert G (1999) Gehörschäden durch Freizeitlärm. HNO 47:236–248
- Neus H, Boikat U, v. Manikowsky S, Kappos A (1995) Vergleich zwischen verkehrsbedingten Lärm- und Luftverschmutzungsfolgen: Der Beitrag der Umweltepidemiologie zu Risikoabschätzungen. Bundesgesundheitsbl 38:146–150
- DIN 45643-1: 1984-10 Messung und Beurteilung von Flugzeuggeräuschen; Mess- und Kenngrößen. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45641: 1990-06 Mittelung von Schallpegeln. Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 60804: 1994-05 (1994) Integrierende mittelwertbildende Schallpegelmessung. Beuth Verlag, Berlin
- Bortz, J (1985) Lehrbuch der Statistik: für Sozialwissenschaftler. Springer, Berlin, Heidelberg, New York Tokyo
- BG (1991) Empfehlungen des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften für die Begutachtung der beruflichen Lärmschwerhörigkeit – Königsteiner Merkblatt, 3., ergänzte Aufl. Schriftenreihe des Hauptverbandes der gewerblichen Berufsgenossenschaften, Sankt Augustin
- Gottlob D, Kürer R (1994) Beurteilung von Geräuschmissionen (Vorschriften – Normen – Richtlinien). In: Heckl M, Müller HA (Hrsg) Taschenbuch der Akustik, 2. Aufl. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, S 86–122