

# Lärmexposition und Gesundheit bei Kindern und Jugendlichen

## Grundlagen und Forschungsergebnisse

C. Maschke, K. Hecht

| Inhaltsverzeichnis   | Seite     |
|--|-----------|
| <b>1 Einleitung</b> .....  | <b>9</b>  |
| <b>2 Gesundheitsbegriff</b> .....                                    | <b>9</b>  |
| <b>3 Das auditorische System</b> .....                               | <b>11</b> |
| 3.1 Das Ohr .....  | 11        |
| 3.2 Die Hörbahn .....  | 11        |
| 3.2.1 Afferente Hörbahn .....  | 11        |
| 3.2.2 Efferente Hörbahn .....  | 13        |
| 3.3 Verarbeitung akustischer Stimuli im auditorischen System .....   | 13        |
| 3.3.1 Die Lautstärkewahrnehmung .....                                | 13        |
| 3.3.1.1 Die „Physical Correlate“ Theorie .....                       | 14        |
| 3.3.2 Informationsgehalt .....                                       | 15        |
| 3.3.3 Das zeitliche Auflösungsvermögen .....                         | 15        |
| 3.3.3.1 Das Gesetz der ersten Wellenfront .....                      | 15        |
| 3.3.3.2 Echoschwelle .....   | 15        |
| 3.3.3.3 Dauer der Einwirkung .....                                   | 15        |
| <b>4 Akustische Maßzahlen</b> .....                                  | <b>15</b> |
| 4.1 Bewertete Pegelmaße .....  | 16        |
| 4.2 Pegelmaße für zeitveränderliche Geräusche .....                  | 16        |
| 4.3 Pegelmaße im Immissionsschutz .....                              | 17        |
| <b>5 Aurale Wirkungen</b> .....                                      | <b>17</b> |
| 5.1 Lärmbedingter Hörverlust .....                                   | 19        |
| 5.1.1 Hörverlust durch laute Einzelereignisse .....                  | 19        |
| 5.1.1.1 Kinderspielzeug, Schreckschusswaffen, Feuerwerkskörper ..... | 20        |
| 5.1.2 Hörverlust durch lautes Hören von Musik .....                  | 22        |
| 5.1.2.1 Diskotheken bzw. Clubs .....                                 | 23        |
| 5.1.2.2 Kopf- oder Ohrhörer .....                                    | 25        |
| 5.1.2.3 Musikgroßveranstaltungen .....                               | 27        |
| 5.1.3 Zusammenfassung .....  | 27        |
| 5.2 Behinderung der Kommunikation und Orientierung .....             | 28        |
| 5.2.1 Störungen des Spracherwerbs bei Kindern durch Lärm .....       | 28        |
| 5.2.2 Geistige Leistungen von Kindern und Lärm .....                 | 28        |
| 5.2.2.1 Schule .....   | 29        |
| 5.2.2.2 Frühkindliches Alter und Kindertagesstätten .....            | 32        |
| <b>6 Extraaurale Wirkungen</b> .....                                 | <b>32</b> |
| 6.1 Aktivierungstheorie .....  | 32        |
| 6.1.1 Schallereignis und Aktivierungsniveau .....                    | 32        |
| 6.2 Aktivierungsniveau und Leistung .....                            | 34        |
| 6.2.1 Unerwünschte Aktivierung und Steuerung .....                   | 35        |
| 6.3 Vegetativ-hormonelle Reaktion und Gesundheit .....               | 35        |
| 6.3.1 Lärmwirkung auf das kardiovaskuläre System von Kindern .....   | 37        |
| 6.3.2 Lärmwirkung auf das hormonelle System von Kindern .....        | 37        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 6.3.3    | Tieffluglärmwirkung bei Kindern .....          | 37        |
| 6.4      | Schlafstörungen .....                          | 38        |
| 6.4.1    | Schlaf, Schlafstadien und Schlafstruktur ..... | 38        |
| 6.4.2    | Auswirkungen von Lärm auf den Schlaf .....     | 40        |
| 6.4.3    | Schlafstörungen bei Kindern .....              | 41        |
| <b>7</b> | <b>Schlussbemerkung</b> .....                  | <b>42</b> |
| <b>8</b> | <b>Literatur</b> .....                         | <b>42</b> |

## 1 Einleitung

Die Krankheitsmuster von Kindern haben sich in diesem Jahrhundert deutlich gewandelt. Die althergebrachten Kinderkrankheiten sind weitgehend unter medizinischer Kontrolle. Die wichtigsten Krankheiten, mit denen Kinder heute konfrontiert werden, sind chronische Krankheiten und behindernde Konditionen, die als neue „pädiatrische Morbidität“ bezeichnet werden [Landrigan et al. 1999]. Umweltbelastungen und deren ungenügende Bewältigung und Nichtverarbeitung durch die Kinder und Jugendlichen prägen Krankheitsmuster geistiger und emotioneller Prozesse, die ein Leben lang bestehen können (z.B. [Hellbrügge 1977, Chanaschwili et al. 1984, Kestenbaum et al. 1996, Wassermann 1996]).

- Kinder wachsen und entwickeln sich, ihre empfindlichen Entwicklungsprozesse können leicht beeinträchtigt werden.

Viele Organsysteme kleiner Kinder (u.a. das Nervensystem, das Immunsystem und die Fortpflanzungsorgane) unterliegen starkem Wachstum und Entwicklung. Während dieser Phasen werden neurale Strukturen entwickelt und wichtige Verknüpfungen hergestellt. Die Entwicklung des Kindes ist nicht darauf abgestimmt, starke Umweltbelastungen zu kompensieren. Es besteht ein hohes Risiko für bleibende Fehlfunktionen.

- Kinder haben noch wesentlich mehr Lebensjahre vor sich als die meisten Erwachsenen.

Kinder haben bedeutend mehr Zeit, chronische Krankheiten zu entwickeln, die durch frühe belastende Umwelteinflüsse angestoßen wurden. Viele Krankheiten, die durch Umwelteinwirkungen ausgelöst werden, brauchen Jahrzehnte zur Entwicklung. Es ist davon auszugehen, dass umweltbedingte Erkrankungen Produkte eines mehrstufigen Prozesses sind, ein Prozess der viele Jahre von der Exposition bis zur Manifestation einer Krankheit benötigt.

- Die kindlichen Stoffwechselfvorgänge sind noch nicht voll entwickelt.

Umweltbedingter Stress kann insbesondere im frühen Säuglingsalter die Entwicklung autonomer Regulationsmechanismen behindern und einem Fehlverhalten Vorschub leisten.

Die gesellschaftliche Herausforderung ist demzufolge groß und umfasst zwei wichtige Aspekte:

- Es ist zu bestimmen, welche kausalen Zusammenhänge zwischen belastenden Umwelteinflüssen im Kindesalter und späteren Krankheiten bestehen und
- es sind wissenschaftlich basierte Strategien zu entwickeln, die gesundheitsgefährdende Umwelteinflüsse verhindern sowie bisher nicht vermeidbare umweltbedingte Störungen der heranwachsenden Generation kompensieren.

Lärm, der heute in Form von Verkehrslärm zu einer allgegenwärtigen Umweltbelastung geworden ist, macht hier keine Ausnahme. Die gesundheitlichen und ökonomischen Konsequenzen für Kinder, die mit einer zunehmenden „Verlärmung“ von Umwelt und Freizeit einhergehen, erhalten erst in den letzten Jahren die notwendige Aufmerksamkeit. Eine Risikobewertung, in der Kinder in das Zentrum des Interesses gerückt werden, ist dringend erforderlich.

## 2 Gesundheitsbegriff

Der Gesundheitsbegriff ist weniger naturwissenschaftlich als soziokulturell und damit gesellschaftlich determiniert. Er bedeutete im Altertum Genussfähigkeit, im Mittelalter Glaubensfähigkeit und umschreibt gegenwärtig praktisch vorwiegend Arbeits- bzw. Erwerbsfähigkeit. Die WHO (Ottawa-Charta 1986) definiert Gesundheit "als ein befriedigendes Maß von Funktionsfähigkeit in physischer, psychischer, sozialer und wirtschaftlicher Hinsicht und von Selbstbetreuungsfähigkeit bis ins hohe Alter".

Dass Lärm selbst die physische Funktionsfähigkeit von Erwachsenen beeinträchtigen kann, zeigt eine klassische

Langzeituntersuchung von Graff (1968). Die Wissenschaftlerin untersuchte 117 gesunde Mitarbeiter einer Kesselschmiede eines metallverarbeitenden Betriebes (Bergmann-Borsig, Berlin-Wilhelmsruh) über mehr als 10 Jahre. Der durchschnittliche Lärmpegel betrug 95 dB(A), wobei Pegelspitzen bis zu 120 dB(A) gemessen wurden. Nach 13,5 Jahren Betriebszugehörigkeit in der Kesselschmiede, zeigten 38% eine arterielle Hypertonie des Schweregrades 2 und 3. Weitere 43 % hatten eine arterielle Hypertonie des Schweregrades 1. Die Befunde beider Hypertoniker-Gruppen wiesen noch weitere Symptome kardiovaskulärer Krankheiten auf. Nur 19% waren frei von kardiovaskulären Befunden. In der Kontrollgruppe (Transportarbeiter) hatten 16% der Arbeiter zu diesem Zeitpunkt kardiovaskuläre Symptome aufzuweisen. 84% waren ohne Befund.

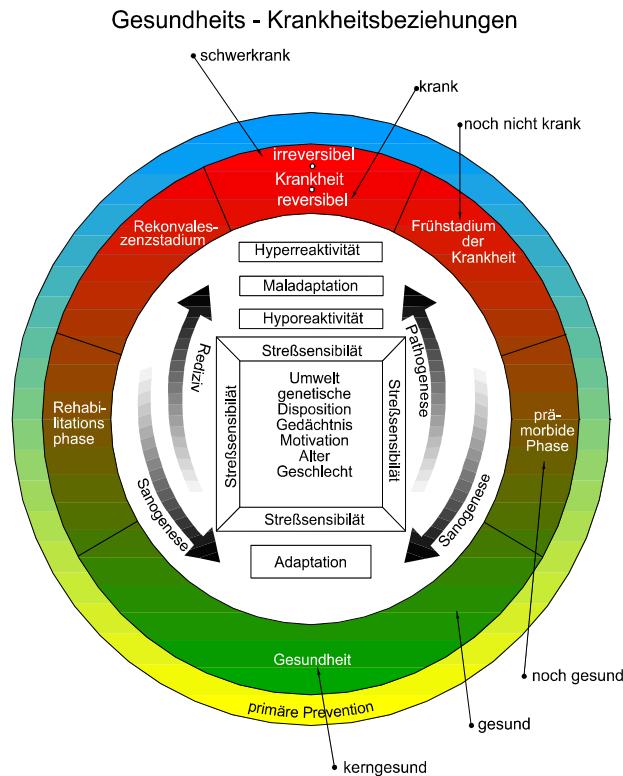
Intensiver Lärm ist demzufolge imstande, auch außerhalb des Gehörs pathogene Prozesse auszulösen. Dieser Prozess beginnt in dem Augenblick, wo die regulatorische Einrichtung des Körpers nicht mehr ausreicht, die Lärmbelastung zu kompensieren und kann mit dem Tod enden. Der Übergang von Gesundheit zur Krankheit erfolgt also nicht abrupt, sondern ist

fließend (vgl. SVRU 1999). Gesundheit und Krankheit können als Pole eines Kontinuums im Wechselspiel sanogener und pathogener Prozesse aufgefasst werden. Überwiegt die Sanogenese, so liegt Gesundheit vor, überwiegt die Pathogenese, dann entsteht Krankheit.

Unter Sanogenese sind hier vielfältige Schutz- und Anpassungsmechanismen zusammengefasst, die mit dem Ziel mobilisiert werden, die Homöostase im Organismus aufrechtzuerhalten oder wiederherzustellen.

Während z.B. Infektionskrankheiten kurze Zeit nach der Infektion merklich wirken und akut die Gesundheit und Leistung beeinträchtigen, benötigt der Lärm Jahre oder sogar Jahrzehnte, häufig für die Betroffenen unmerklich wirkend, um organisch manifestierte Krankheiten zu verursachen. In diesem Wirkungsgefüge ist eine durch Lärm gestörte Entwicklung von Kindern ebenso wie eine gestörte Regulation als prä-morbide Phase einzustufen und als Übergang von Gesundheit zur Krankheit zu betrachten.

Der Beginn der Wirkungskette ist das auditorische System, das in einen Bereich der Reizkodierung (Ohr) und einen Bereich der Reizverarbeitung (Hörbahn) unterteilt wird.



**Abb. 1:** Schema der Gesundheits-Krankheitsbeziehung nach Hecht

### 3 Das auditorische System

Das auditorische System kann unterteilt werden in einen Bereich der Reizkodierung (Ohr) und den Bereich der Reizverarbeitung (Hörbahn).

#### 3.1 Das Ohr

Das zentrale Organ einer lärmbedingten Gehörschädigung ist das Innenohr mit seinen Schallrezeptoren (Haarzellen). Die bioelektrischen Vorgänge der nervösen Kodierung sind nur unter Energieaufwand möglich. Die Energie wird im wesentlichen aus Glukose gewonnen. Bei Sauerstoffmangel, z. B. durch hohe Beanspruchung, wird auf anaeroben Stoffwechsel umgeschaltet. Dabei entsteht, analog der Überstrapazierung eines Muskels, Milchsäure als Abfallprodukt. Als Folge solch einer Übersäuerung der Haarzelle kann der Zellkern anschwellen. Hält die Übersäuerung zu lange an, kann der Zellkern platzen und die Haarzelle degeneriert [Berg 1980].

Eine Schädigung der Haarzellen kann auch infolge einer kurzfristigen mechani-

schen Überlastung des Gehörs durch extrem hohe Schalldruckspitzen entstehen. Hier ist ein Verklumpen oder Brechen der Cilien zu beobachten [Spreng 1991].

Das zentrale Organ extraauraler Lärmwirkungen ist die Hörbahn mit ihren verschiedenen Verarbeitungsebenen.

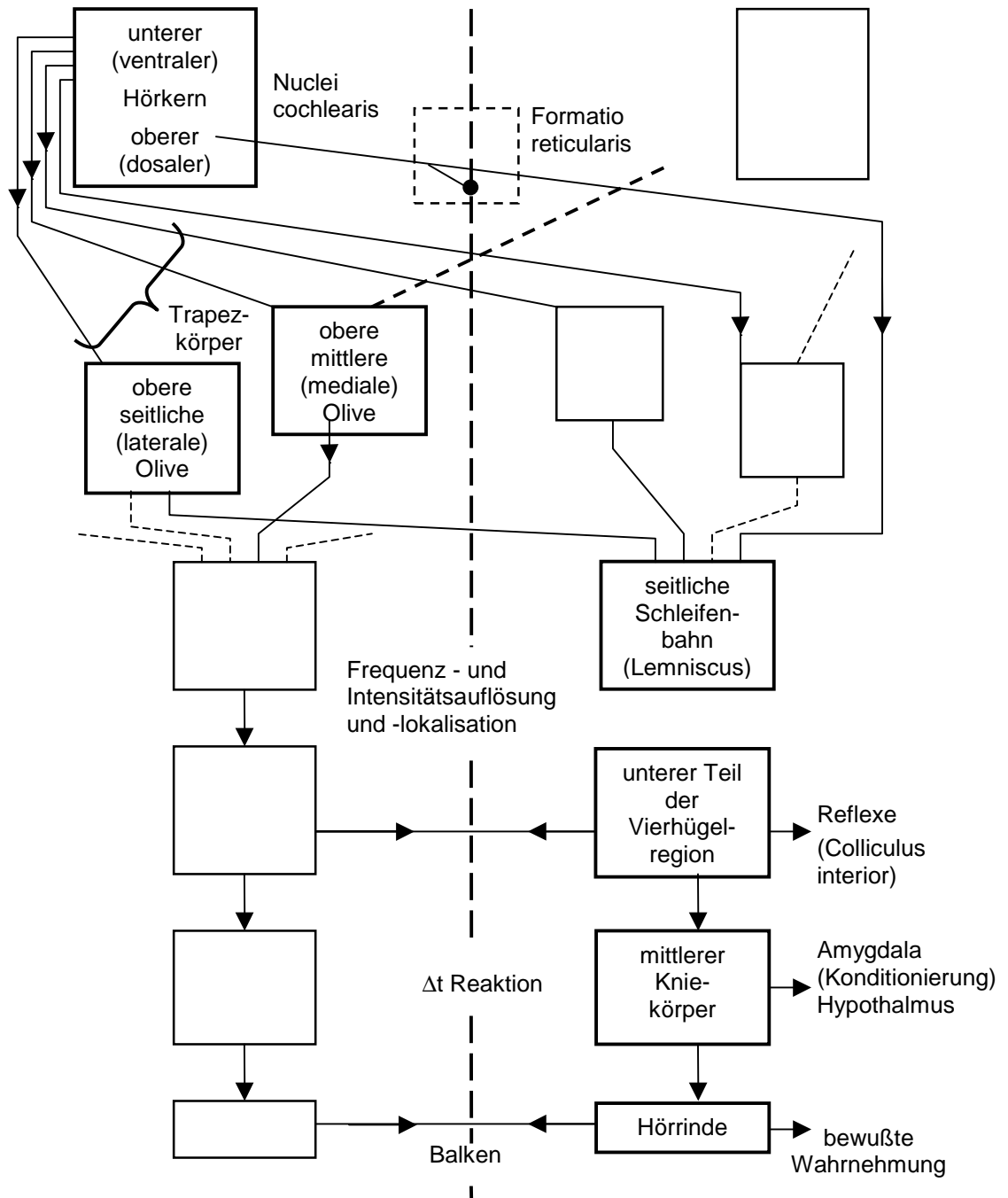
#### 3.2 Die Hörbahn

Die Hörbahn besteht sowohl aus Nervenfasern, die Nervenimpulse aus dem Innenohr zur Hörrinde leiten (afferente Hörbahn), als auch aus Nervenfasern, die Impulse von höheren Verarbeitungsebenen zurück an das Innenohr leiten (efferente Fasern).

##### 3.2.1 Afferente Hörbahn

Die im Innenohr ausgelösten Nervenimpulse (Aktionspotentiale) werden über die afferente Hörbahn zu spezifischen Arealen der Hirnrinde (Cortex) geleitet, in denen das Hörereignis entsteht. Von dieser afferenten Hörbahn zweigen auf verschiedenen Verarbeitungsebenen Nervenfasern ab und

stellen direkte Verbindungen mit anderen Funktionssystemen her.



Zur besseren Übersichtlichkeit ist die Hörbahn nur für ein Ohr dargestellt. Die Stationen des zweiten Ohres sind angedeutet.

**Abb. 2:** Afferente Hörbahn (Quelle: nach Hellbrück 1993 und Spreng 1999)

Die **erste Verarbeitungsstation** stellt das Ganglion Spirale dar. Hier laufen die mit den Haarzellen verbundenen Neuronen zum Hörnerv (Nervus acusticus) zusammen.

Die **zweite Station** bilden die drei Hörkerne (nuclei cochlearis). Dort teilt sich die Hörbahn und führt zu unterschiedlichen Arealen.

Ein Strang führt zu den Oliven (**dritte Station**).

Ein zweiter Strang endet in der *Formatio reticularis*. Bei der *Formatio reticularis* handelt sich um eine Zellformation, die sich vom Rückenmark bis in das Mittelhirn erstreckt. Über die *Formatio reticularis* findet eine Regulation des Aktivierungszustandes statt (ARAS: Aszendierendes Retikuläres Aktivierungs-System [Moruzzi 1949, Starzl 1951]). Das ARAS nimmt auch in der Organisation des Schlaf-Wach-Zyklus eine führende Rolle ein [Koella 1988]. Der dritte Strang führt zu den Oliven, die dem erregten Ohr gegenüberliegen (kontralaterale Seite).

Die **vierte Station** ist die seitliche Schleifenbahn (*Lemniscus lateralis*). Der Hauptstrang der Hörbahn führt zur kontralateralen Seite. Die seitliche Schleifenbahn verarbeitet Informationen von beiden Ohren, die über die untere Vierhügelregion (**fünfte Station**) und den mittleren Kniekörper (**sechste Station**) an die Hörrinde weitergeleitet werden.

Im Bereich des mittleren Kniekörpers bestehen direkte Abzweigungen vom Hörnerv zum Mandelkern (*Amygdala*) und zum Hypothalamus. [z. B. Spreng 1999] Dies ist der direkte Weg der Schallaktivierung.

Der Mandelkern zeichnet sich durch eine außergewöhnliche Lernfähigkeit (Plastizität) aus, insbesondere hinsichtlich aversiver, also mit negativer Bewertung verbundener, wiederholter bzw. konditionierender Schallreize (Furchtzentrum). Mit dem Einlaufen der durch Schalle bewirkten Erregungen kann der Mandelkern sich zunächst

unter Einfluß der gleichzeitig aktivierten Hirnrinde und des Hippocampus so plastisch verändern, dass der gesamte Organismus sensitiver auf aversive Geräusche wird. Im Endeffekt liegt dann ein sehr schnelles und grobes Verarbeitungsmuster vor, welches auf komplexe Reize (z.B. Flugzeugschalle) mit direktem Zugriff auf vegetative und hormonelle Funktionseinheiten sowie auf emotionale Bereiche reagiert. Es ist hinzuzufügen, dass dieses derart gebahnte System auch während des Schlafs nahezu voll aktiv ist.

Des Weiteren findet hier ein Abgleich mit anderen Sinnesorganen statt. Die Hörrinde ist die **siebte und letzte Station** der afferenten Hörbahn. Sie endet in der Heschl'schen Querwindung des Schläfenlappens.

### 3.2.2 Efferente Hörbahn

Parallel zu der afferenten Hörbahn besteht eine efferente Hörbahn (zentrifugale Bahn). Sie erstreckt sich vom Cortex bis zur Cochlea. Ein wichtiger Teil ist das olivocochleare Bündel. Die Nervenfasern kommen von den oberen Oliven und gehen bis zu den Haarzellen in der Cochlea. Der größte Teil von ihnen führt zu den äußeren Haarzellen. Der kleinere Teil bildet Synapsen mit den afferenten Fasern. Eine efferente Innervation wird durch höhere Schallpegel (ca. 40 dB) ausgelöst. So entsteht ein geschlossenes Regelsystem, das bei niedrigen Pegeln als Verstärker arbeitet und bei hohen Pegeln für eine Reduktion der Empfindlichkeit sorgt.

## 3.3 Verarbeitung akustischer Stimuli im auditorischen System

### 3.3.1 Die Lautstärkewahrnehmung

Tragen wir den Pegelbereich hörbaren Schalls über der Frequenz auf, so entsteht die sogenannte Hörfläche, wie sie in Abbildung 3 dargestellt ist. Die untere Grenze der Hörfläche ist die Hörschwelle, die obere Grenze die Schmerzschwelle. Schall mit Frequenzen unter 16 Hz (Infraschall) bzw. über 20 kHz (Ultraschall) wird auch bei hohem Pegel nicht mehr als Hörereignis wahrgenommen. In diese Hörfläche

che können Kurven gleicher Lautstärke (Isophone, Einheit Phon) gelegt werden, die an Probandengruppen durch experimentellen Vergleich mit einem 1000-Hz-Bezugston gewonnen wurden. Sie sind ebenso wie ausgewählte Schallquellen in der Abb.3 verzeichnet.

Als Faustregel gilt, dass eine Pegelerhöhung von 10 Phon einer Verdoppelung der Lautstärke entspricht. Es bestehen jedoch sehr große interindividuelle Schwankungen.



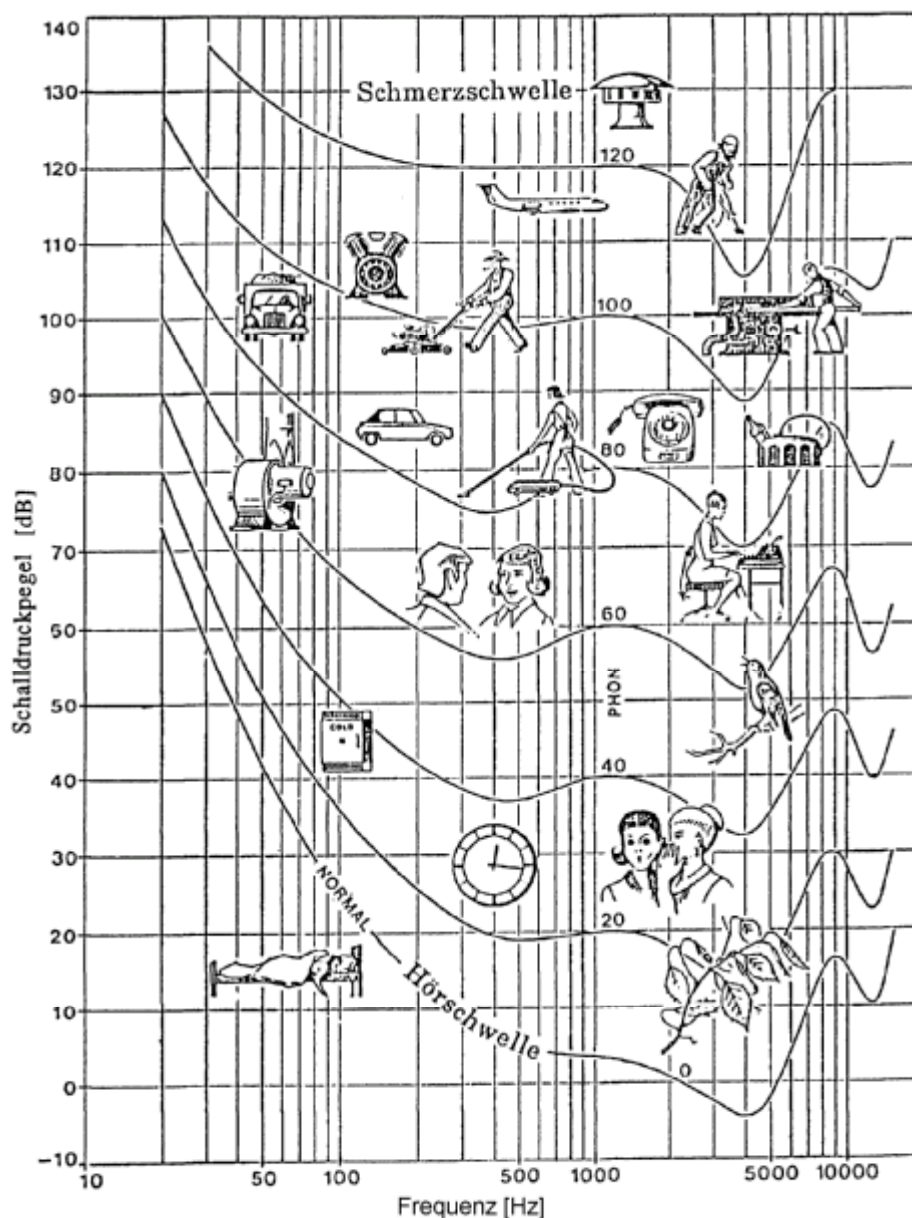


Abb. 3: Kurven gleicher Lautstärke (Isophone) (Quelle: Ginn 1978)

### 3.3.1.1 Die „Physical Correlate“ Theorie

Für die Lärmwirkungsforschung ist die „Physical Correlate“ Theorie [Warren 1982] von Bedeutung. Sie beschäftigt sich mit der Frage, wozu die Lautstärkewahrnehmung dem Menschen dient.

Ihre einfache Antwort besagt, dass die Lautstärkewahrnehmung dem Menschen Informationen über die Entfernung von einer Schallquelle gibt und

zwar - im Gegensatz zur optischen Wahrnehmung - aus allen Richtungen (Warnorgan).

Nahe Schallquellen sind laut, entfernte Schallquellen entsprechend leise. Das gilt jedoch nur unter bestimmten Bedingungen. Einerseits muss sich der Schall ungehindert ausbreiten können, andererseits dürfen die Entfernungen nicht zu groß sein (maximal ca. 50 m). Warren konnte seine Theorie nicht nur mit Experimenten zur Lautstärkewahr-

nehmung belegen, sondern auch mit Experimenten zur Verständigung. Menschen passen die Lautstärke ihrer Nach der „Physical Correlate“ Theorie implizieren laute Geräusche eine nahe Geräuschquelle und damit möglicherweise eine Gefährdung, auf die der Organismus mit einer erhöhten Aktivierung reagieren muss.

### 3.3.2 Informationsgehalt

Wesentlich für den Aktivierungsprozess ist der Informationsgehalt des Schallereignisses. Das Aktivierungspotential nimmt grundsätzlich mit dem Informationsgehalt zu. Stark informationshaltige Geräusche können bereits bei relativ niedrigen Pegeln eine erhöhte Aktivierung hervorrufen.

Geräusche mit hohem Informationsgehalt zeichnen sich dadurch aus, dass sie schnelle zeitliche Veränderungen (Pegel, Frequenz) aufweisen. Geräusche, die sich nur langsam oder kaum verändern, enthalten nur dann eine bedeutsame Information für den Menschen, sofern ihr Pegel unerwartet hoch ist (vgl. „Physical Correlate“ Theorie), oder das erwartete Geräusch ausbleibt. Hier ist das Rauschen von Wind und Wasser zu nennen. Dagegen enthalten sprunghafte zeitliche Änderungen, z. B. das Knacken eines Zweiges, eventuell überlebenswichtige Informationen.

Aus diesem Grund ist es für alle höher entwickelten Organismen wichtig, Veränderungen in ihrer Umwelt schnell wahrzunehmen und darauf zu reagieren.

### 3.3.3 Das zeitliche Auflösungsvermögen

Nicht nur die unspezifische Aktivierung, sondern die Wahrnehmung insgesamt ist abhängig von der Zeitstruktur des Schallereignisses.

#### 3.3.3.1 Das Gesetz der ersten Wellenfront

Das Gehör ist in der Lage, einem Hörereignis einen „Entstehungsort“

Stimmen an die Distanz zwischen dem Sprecher und dem Empfänger an.

(Hörereignisort) zuzuordnen (Lokalisation). Wenn zwei Schallereignisse zu einem Hörereignis verschmelzen, dann wird der Hörereignisort durch den Schall bestimmt, der als erster das Ohr erreicht hat. Dieser Effekt wird als „Gesetz der ersten Wellenfront“ bezeichnet [Cremer 1948]. Ohne diese Eigenschaft des Gehörs wäre die akustische Kommunikation und Orientierung in Räumen stark eingeschränkt.

#### 3.3.3.2 Echschwelle

Im Zusammenhang mit dem „Gesetz der ersten Wellenfront“ stellt sich die Frage, ab welchem Zeitunterschied zwei Schallereignisse wahrgenommen werden können. Normalerweise werden Schallreflexionen von Wänden, Decken, Böden oder Gegenständen nur dann als Echo wahrgenommen, wenn zwischen Direktschall und reflektiertem Schall eine Zeitdifferenz von 30 - 50 ms vergeht [Lochner 1958]. Bei kleineren Zeitdifferenzen verschmelzen Direktschall und Reflexionen zu einem Hörereignis. Dieses Hörereignis enthält jedoch Informationen über die Räumlichkeit der Reflexionen, die als Raumeindruck zusammengefasst werden können.

#### 3.3.3.3 Dauer der Einwirkung

Für die Lautstärkewahrnehmung ist die Dauer des Schallereignisses wichtig. Bis zu einer Schalldauer von etwa 150 bis 200 ms ist die Lautstärke abhängig von der Expositionsdauer. Es gilt die Regel: Halbiert sich die Dauer des Schallereignisses, so sinkt die Lautstärke und entspricht einer Pegelabnahme von 3 dB.

Diese zeitabhängige Lautstärkewahrnehmung ist wichtig bei sehr kurzen Schallereignissen mit hohen Anstiegsgeschwindigkeiten (z. B. Schüsse, Explosionen, Stoßgeräusche). Aufgrund der kurzen Wirkdauer ist die Lautstärke wesentlich geringer, als nach dem maximalen Schalldruckpegel zu erwarten wäre. In diesen Fällen sagt die Lautstärke wenig über die me-

mechanische Beanspruchung des Innenohres aus.

#### 4 Akustische Maßzahlen

Schall wird durch ein logarithmisches Maß, den Schalldruckpegel (Einheit: Dezibel, dB) gemessen. Im direkten Vergleich zweier Geräusche ist ein Pegelunterschied von ca. 1 dB gerade wahrnehmbar, ein Pegelunterschied von 3 dB gut wahrnehmbar. Der Schalldruckpegel ist definiert als:

$$L = 20 \cdot \lg \frac{p}{p_0} [dB]$$

L = Schalldruckpegel

p = effektiver Schalldruck in Pascal

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

#### 4.1 Bewertete Pegelmaße

Aus dem Bedürfnis heraus, die Lautstärke von Schallereignissen mit einer Pegelmessung genauer zu erfassen, wurden Bewertungsverfahren entwickelt. Diese Bewertungsverfahren berücksichtigen grob die Schallverarbeitung des menschlichen Ohres. Es handelt sich im wesentlichen um eine Frequenzbewertung und eine Zeitbewertung.

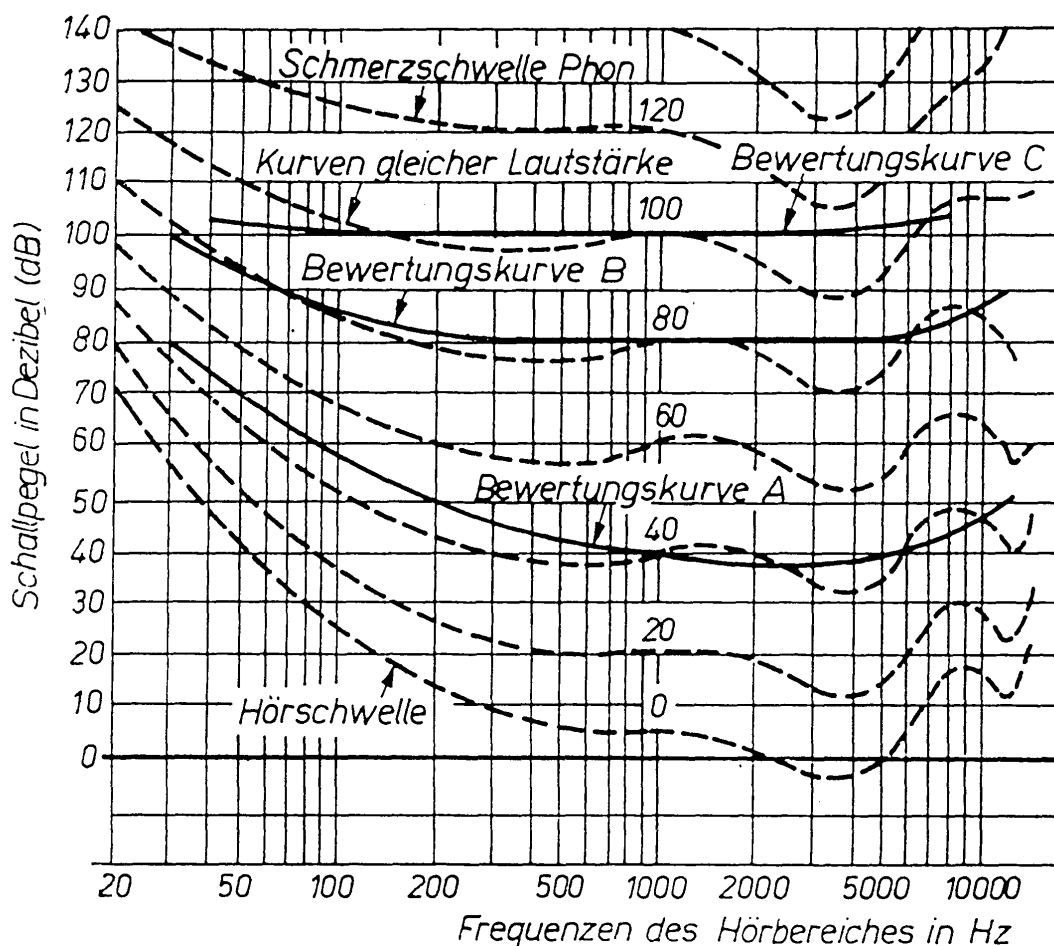
#### Frequenzbewertung

Wie der Abb. 4 zu entnehmen ist, sind die Kurven gleicher Lautstärke sowohl vom Pegel als auch von der Frequenz abhängig. Bei gleichem Schalldruckpegel werden insbesondere tiefe aber

auch hohe Töne leiser wahrgenommen als Töne mit Frequenzen um 2000 Hz. Diese Frequenzabhängigkeit ist bei niedrigen Schalldruckpegeln stark ausgeprägt und nimmt mit wachsendem Pegel ab.

#### Frequenzbewertungskurven

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 (vgl. Abb. 4).



Aufgrund internationaler Vereinbarungen wird heute nahezu ausschließlich die A-Bewertungskurve verwendet. Bei dieser Einschränkung standen praktische Aspekte wie die einheitliche Anwendbarkeit und die Prognosefähigkeit der Immissionswerte aus den Emissionswerten im Vordergrund. Ein wesentlicher Nachteil dieser Vereinbarung ist jedoch, dass insbesondere bei tieffrequenten Schallereignissen mit hohen Pegeln eine erhebliche Unterschätzung der Lautstärke erfolgen kann.

### Zeitbewertung

Die neurale Verarbeitung benötigt zum vollständigen Aufbau der Lautstärkempfindung etwa 150 bis 200 ms (vgl. Absatz 2.3.3.3). Kürzere Geräuschimpulse werden daher leiser wahrgenommen als es der Schalldruckpegel erwarten ließe. Diese Trägheit des Gehörs muss bei Schallpegelmessungen berücksichtigt werden, sofern die Lautstärke von Schallereignissen ermittelt werden soll. Andererseits können kurze Geräuschimpulse mit sehr hohen Schalldrücken Innenohrschäden hervorrufen, obwohl die wahrgenommene Lautstärke unterhalb der Schmerzschwelle liegt. Diese Pegelspitzen können nur erfasst werden, wenn die Messung nahezu trägheitsfrei durchgeführt wird.

Um den unterschiedlichen Anforderungen bei der Pegelmessung gerecht zu werden, kann die dynamische Eigenschaft eines Pegelmessers eingestellt werden. International sind drei Trägheitsstufen ( $\tau$ ) genormt (DIN EN 60651). Es sind dies die Anzeigarten:

- *slow* (S;  $\tau=1s$ )
- *fast* (F;  $\tau=125ms$ )
- *impulse* (I;  $\tau=35ms/\tau_{ab}=1,5s$ )

Je kürzer die Zeitkonstante  $\tau$  ist, um so schneller folgt die Messung den Schalldruckänderungen. Bei der Zeitbewertung *impulse* wurde die Abklingkonstante ( $\tau_{ab}$ ) erheblich verlängert, um das Ablesen der Maximalpegel zu erleichtern.

Zur Messung der absoluten Pegelspitzen wird die Zeitbewertung *peak* eingesetzt. Ihre Anstiegskonstante ist nicht festgelegt. Typische Werte sind  $\tau = 50\mu$  Sekunden (Gottlob et al. 1994).

Die gewählte Zeit- und Frequenzbewertung wird in der Messangabe verzeichnet, z.B.  $L_{AF}$ ,  $L_{CS}$ . Der erste Index kennzeichnet die gewählte Frequenzbewertung, der zweite Index die gewählte Zeitbewertung. Eine alleinige Frequenzbewertungsangabe (z.B.  $L_A$ ) zeigt an, dass mit der Zeitbewertung *fast* gemessen wurde. Vielfach wird die verwendete Zeit- und Frequenzbewertung auch in der Messwertangabe dokumentiert, z.B. in dB(A), dB(CS) usw..

### 4.2 Pegelmaße für zeitveränderliche Geräusche

Die überwiegende Zahl von Umweltgeräuschen ist nicht konstant, sondern ändert sich mit der Zeit. Zur Kennzeichnung von Geräuschen mit zeitlich schwankendem Pegel sind verschiedene Maßzahlen entwickelt worden. Das wichtigste Maß ist der äquivalente Dauerschallpegel (DIN 45641 bzw. DIN EN 60804).

#### Äquivalenter Dauerschallpegel

Der äquivalente Dauerschallpegel  $L_{eq}$  ist der Schallpegel eines gedachten (fiktiven) Dauergeräusches, das die gleiche Schallenergie enthält wie das zeitlich schwankende Geräusch. Dieser äquivalente Dauerschallpegel (früher energieäquivalente Dauerschallpegel) ist durch folgende Gleichungen definiert:

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{T} \int_0^T 10^{0,1 \cdot L(t)/dB} dt \right] dB$$

$$L_{eq} = 10 \cdot \lg \left[ \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right] dB$$

T Mittelungsdauer (z. B. 16 oder 24 Stunden)

L(t) momentaner Schalldruckpegel

Wirkt ein Geräusch mit konstantem Pegel nur über die Hälfte der Mittelungsdauer ein, so verringert sich der  $L_{eq}$  um 3 dB. Dieser Halbierungsparameter q kann mit dem Größenzeichen des Dauerschallpegels vermerkt werden ( $L_{eq3}$ ), um Missverständnisse z.B. bei Fluglärm zu vermeiden. Das „Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm“ vom 30.3.1971 definierte einen Immissionspegel mit einem Halbierungsparameter von  $q = 4$  ( $L_{eq4}$ ). Der durch das

Gesetz geforderte Immissionspegel stellt eine Kenngröße hinsichtlich der „Störwirkung“ von Fluglärm auf den Menschen dar.

#### 4.3 Pegelmaße im Immissionsschutz

Die Kenntnis des äquivalenten Dauerschallpegels reicht in der Regel nicht aus, die Auswirkung einer Geräuschsituation auf den Menschen angemessen zu beurteilen, da eine Vielzahl von Faktoren die Wirkung beeinflussen (Moderatoren), die auch bei einer „gehörgerechten“ Pegelbildung nicht erfasst werden. Diese Einflussgrößen werden bei Pegelmaßen im Immissionsschutz pauschal durch Zuschläge (Abschläge) berücksichtigt.

#### Beurteilungspegel

Der Beurteilungspegel  $L_r$  (DIN 45645; TA-Lärm) wird aus dem über die Be-

urteilungsdauer ermittelten, äquivalenten Dauerschallpegel gebildet, indem Zu- oder Abschläge für verschiedene Merkmale der Schallexposition sowie örtliche und zeitliche Bedingungen der Immission vorgenommen werden. Welche der Einflussgrößen und in welcher Höhe sie zu berücksichtigen sind, ist in den einzelnen Regelwerken nicht einheitlich festgelegt. Die örtliche Situation wird durch eine Staffelung der Immissionswerte berücksichtigt. Der erhöhten Empfindlichkeit in den Nachtstunden wird durch eigene Immissionswerte für die Nacht Rechnung getragen, die i.d.R. 10-15 dB niedriger liegen als die Immissionswerte für den Tag.

$$L_r = L_{AeqTr} + K_I + K_{Ton} + K_{Inf} + K_{Qu} + K_{Sit} + K_R$$

mit:

$L_{Aeq,Tr}$  A-Bewerteter äquivalenter Dauerschallpegel für die Beurteilungsdauer  $T_r$

$K_I$  Zuschlag für Impulshaltigkeit

$K_{Ton}$  Zuschlag für Tonhaltigkeit

$K_{Inf}$  Zuschlag für Informationshaltigkeit

$K_{Qu}$  Zuschlag oder Abschlag für Quelleneigenschaft

$K_{Sit}$  Örtliche Situation

$K_R$  Zuschlag für Ruhezeiten am Tage

(Formel entspricht nicht der DIN, sondern soll dem besseren Verständnis dienen)

Zur Beurteilung einer Geräuscheinwirkung wird der Beurteilungspegel mit den zulässigen Immissionswerten verglichen, die in den betreffenden Regelwerken verzeichnet sind.

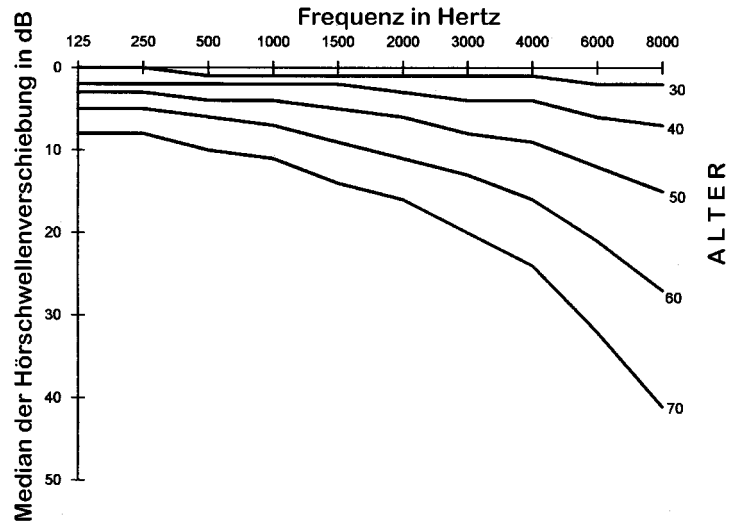
#### 5 Aurale Wirkungen

Schall kann bei hohen Intensitäten das Gehör schädigen. Die Folge einer Gehörschädigung ist ein Verlust der Hörfähigkeit, der als Hörminderung oder Hörverlust bezeichnet wird. Eine Hörverlust kann nicht nur auf eine Geräuschbelastung zurückgeführt werden. In diesem Zusammenhang sind Krankheiten, z.B. Entzündungen des Mittelohres aber auch ototoxische Drogen und erbliche Faktoren, zu nennen.

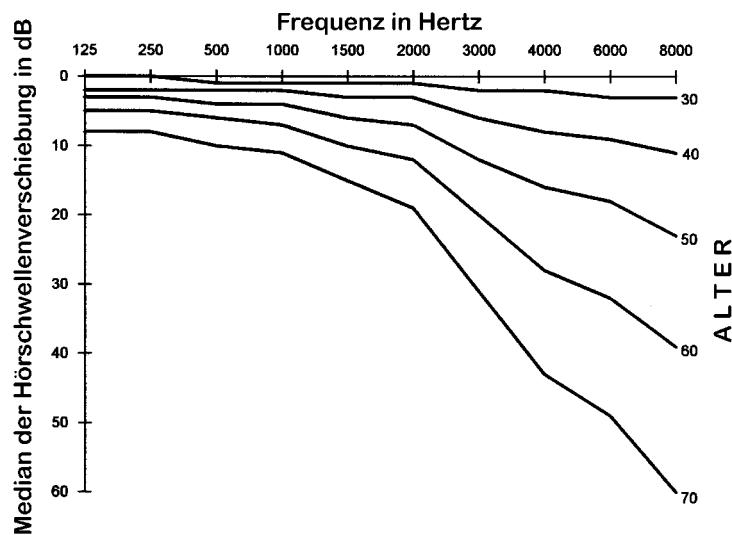
Ein weiterer wichtiger Faktor ist das Alter. Eine Abnahme der Hörfähigkeit mit dem Alter wird als altersbedingter Hörverlust oder Presbycusis bezeichnet. Der altersbedingte Hörverlust ist ein allmählicher Prozess, der in den westlichen Industriestaaten mit einem Alter von etwa 30 Jahren beginnt. Die Abbildungen 5 und 6 zeigen den Mittelwert des altersbedingten Hörverlustes für die männliche und weibliche Bevölkerung in westlichen Industriestaaten gemäß ISO 7029. Der mittlere Wert von Personen mit einem Alter von 25 Jahren wurde als Bezugswert (0 dB) gewählt. Der altersbedingte Hörverlust beginnt bei höheren Frequenzen; mit zunehmendem Altern ist auch ein Hörverlust bei den tieferen Frequenzen zu verzeich-

nen. Im allgemeinen haben Frauen im gleichen Alter ein etwas besseres Hörvermögen als Männer. Die Abbildungen

beziehen sich auf otologisch unauffällige Bevölkerungsgruppen, die keinem Arbeitslärm ausgesetzt waren.



**Abb. 5:** Median des altersbedingten Hörverlustes von otologisch ausgewählten weiblichen Bevölkerungsgruppen, die keinem Arbeitslärm ausgesetzt waren (Quelle: ISO 7029)



**Ab. 6:** Median des altersbedingten Hörverlustes von otologisch ausgewählten männlichen Bevölkerungsgruppen, die keinem Arbeitslärm ausgesetzt waren (Quelle: ISO 7029)

## 5. 1 Lärmbedingter Hörverlust

Ein vermindertes Hörvermögen muss als ein starkes soziales Handikap eingestuft werden. Im Falle einer Kombination von altersbedingtem Hörverlust und geräuschbedingtem Hörverlust, ist die Abnahme der Sprachverständlichkeit ein lang andauernder Prozess, der sich über Jahre erstreckt. Schwierigkeiten bei der Sprachverständlichkeit sind zuerst in lauter Umgebung (Selbstbedienungsrestaurants, Feste, laute Veranstaltungen) festzustellen. Später treten Schwierigkeiten auch während Gottesdiensten, Theateraufführungen und öffentlichen Sitzungen auf; auch dann, wenn die Hörgeschädigten sich näher an den Sprecher begeben, und die Mitmenschen anfangen, die verminderte Hörfähigkeit zu registrieren. Im nächsten Stadium werden Telefonanrufe zum akuten Problem und selbst Unterhaltungen in ruhiger Umgebung werden schwierig; besonders, wenn die Unterhaltung mit Fremden geführt wird. Schließlich wird die Verständigung mit nahen Freunden und Familienangehörigen kritisch. Eine verminderte Hörfähigkeit kann teilweise durch ein Ablesen der Mundbewegungen kompensiert werden, ohne dass es dem Gehörgeschädigten bewusst wird. Sogar kleine Hörverluste zeigen bereits negative Effekte auf die Sprachverständlichkeit unter normalen Bedingungen. So zeigen Untersuchungs-

ergebnisse, dass ein Hörverlust von 10 dB, gemittelt über 2000 und 4000 Hz und über beiden Ohren den Anfang einer verminderten Sprachverständlichkeit kennzeichnet (Passchier-Vermeer 1993). Überschreitet der Hörverlust einen festgelegten Wert, so wird der Hörverlust als Hörschaden bezeichnet (Impairment of hearing). Dafür ist nach der ISO 1999 [ISO 1999] ein Hörverlust von 25 dB oder mehr gemittelt über die Oktaven von 500, 1000 und 2000 Hz erforderlich.

### 5.1.1 Hörverlust durch laute Einzelereignisse

Systematische Untersuchungen über Gehörschäden durch laute Einzelereignisse liegen nur aus Tierversuchen vor. Die Auswertung der bei Tierversuchen verwendeten Schallintensitäten, Schalldauern und Gehörschäden führt zu kritischen Schädigungskurven (Damage Risk Contour). Eine derartige Risikokurve, welche den gerade noch zulässigen Spitzenpegel in Abhängigkeit von der äquivalenten Einwirkdauer darstellt, ermöglicht die Abschätzung der Gehörschädlichkeit von Einzelereignissen. In der folgenden Abbildung ist eine Risikokurve verzeichnet, die von Spreng veröffentlicht wurde [Spreng 1994].

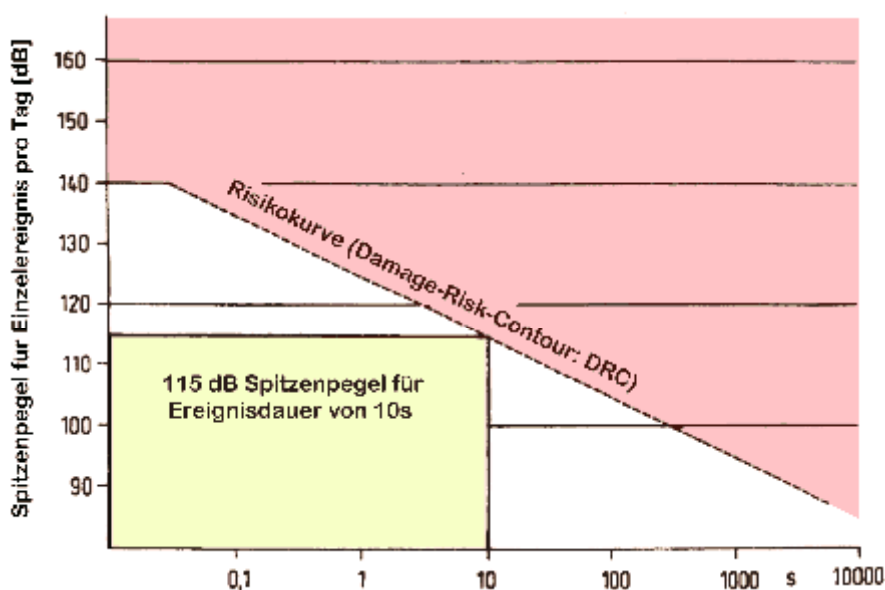


Abb. 7: Risikokurve (Damage-Risk-Contour: DRC) für tägliche Spitzenpegel (modifiziert nach Spreng)



Wird diese Abschätzung für ein lautes Einzelereignis, z.B. für ein Fluggeräusch vorgenommen (äquivalente Ereignisdauer = 10 Sekunden), so ergibt sich aus der Risikokurve von Spreng ein Spitzenpegel von 115 dB, der bei zivilem Fluglärm einem Maximalpegel von etwa  $L_{ASmax} \cong 103$  dB(A) entspricht. Einzelne maximale Verkehrslärmpegel unter 100 dB(A) können danach als unbedenklich hinsichtlich einer mechanischen Gehörschädigung angesehen werden. Derart hohe Pegel sind durch Verkehrslärm nur in Ausnahmefällen anzutreffen.

Alarmierende Messergebnisse erhalten wir jedoch, wenn wir Vorrichtungen zur Knallerzeugung, wie Spielzeugpistolen oder Schreckschusswaffen sowie Feuerwerkskörper betrachten. Hier liegen die Spitzenpegel zum Teil weit über der Schädigungsschwelle für einmalige Ereignisse.

#### 5.1.1.1 Kinderspielzeug, Schreckschusswaffen und Feuerwerkskörper

Die Tabelle 1 enthält Immissionspegel, die durch gängige Feuerwerkskörper hervorgerufen werden. In den Tabellen 2a und 2b sind Kinderspielzeuge und deren Schallpegel verzeichnet, die gehörschädigende Pegelspitzen erreichen können.

Typische Immissionspegel von Schreckschusswaffen, die bei Jugendlichen sehr beliebt sind, sind der Abbildung 8 zu entnehmen. Die Daten zeigen, dass bereits ein einzelner in Ohrnähe abgegebener Schuss aus einer Kinderpistole bzw. einer Schreckschusswaffe Innenohrschäden verursachen kann. Bei Feuerwerkskörpern besteht insbesondere dann ein erhöhtes Gehörschadensrisiko, wenn beim Abbrennen die Prüfdistanz von 8 m Entfernung (1. Verordnung zum Sprengstoffgesetz 1998) nicht eingehalten wird. Die gewählte Distanz zu einem gezündeten Knallkörper wird von Jugendlichen überwiegend durch die Größe des Knallkörpers bzw. durch die erwartete Lautstärke bestimmt. Daraus resultiert eine erhöhte Gefährdung durch „kleine“ Böller. Die Knalle der kleineren Knallkörper weisen eine kürzere Wirkdauer auf, die bei gleichem Schalldruckspitzenpegel  $L_{peak}$  eine wesentlich geringere Lautstärkewahrnehmung hervorruft. Der Abstand zum Knallkörper wird bei kleinen Böllern verkürzt [Weith 2000]. Zudem sind kleine Knallkörper preiswerter und werden daher eher in höherer Stückzahl erworben und abgebrannt.

**Tab. 1:** Mittlere Immissionspegel (Schalldruckspitzenpegel  $L_{peak}$ ) für gängige Feuerwerkskörper (Quelle: Weith 2000).

| Knallkörper              | Bodenentfernung zum Knallkörper |     |            |     |            |     |            |     |
|--------------------------|---------------------------------|-----|------------|-----|------------|-----|------------|-----|
|                          | 1m                              |     | 2m         |     | 4m         |     | 8m         |     |
|                          | $L_{peak}$                      | SDT | $L_{peak}$ | SDT | $L_{peak}$ | SDT | $L_{peak}$ | SDT |
| Kanonenschlag, kubisch C | 159,2                           | 4,3 | 154,5      | 3,7 | 149,3      | 3,6 | 144,3      | 5,0 |
| Super-Böller II          | 155,9                           | 2,4 | 151,7      | 3,4 | 145,1      | 2,9 | 139,2      | 3,1 |
| China-Böller D           | 151,6                           | 2,6 | 148,0      | 3,6 | 143,0      | 3,2 | 137,8      | 3,4 |
| China-Böller B           | 157,1                           | 1,3 | 152,3      | 1,3 | 148,9      | 1,7 | 142,9      | 1,4 |
| China-Böller A           | 152,1                           | 1,0 | 147,1      | 0,5 | 144,9      | 2,8 | 138,2      | 2,9 |

$L_{peak}$  = Schalldruckspitzenpegel;

SDT = Standardabweichung

Unter präventivmedizinischem Aspekt ist zu fordern, dass Feuerwerkskörper sowie Schreckschusswaffen und insbesondere Spielzeugpistolen bei ordnungsgemäßem Gebrauch einen Immissionspegel von  $L_{peak} = 140$  dB nicht

überschreiten dürfen. Bei Spielzeugpistolen ist auch von Schüssen in unmittelbarer Nähe des Ohres auszugehen. Die Tabellen 2a und 2b enthalten demzufolge Immissionspegel in einer Entfernung von 2,5 und 25 cm

zum Ohr, die jedoch zeit- und frequenzbewertet sind. Der Schalldruckspitzenpegel ( $L_{\text{peak}}$ ) liegt etwa 10-20 dB höher.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass bei Kindern auch unerwartete Immissionspegel unter  $L_{\text{peak}} = 140$  dB vermieden werden sollten, um ein konditionierendes Erschrecken zu vermeiden. Die Notwendigkeit, das Erschrecken bei lauten Schallereignissen zu berücksichtigen, zeigt das folgende Beispiel, das die beiden amerikanischen Verhaltenspsychologen John Watson und Rosalie Rayner anfang der zwanziger Jahre durchführten (beschrieben bei [Stein 1982]) und das als inhumanes Experiment in die Wissenschaftsgeschichte eingegangen ist:

In einem Heim für Waisenkinder befand sich auch der Knabe Albert, 11 Monate alt. Dieser spielte gern mit Pelztieren (Kaninchen, Ratten). Besondere Freude hatte er, wenn er diese Tiere streicheln konnte. Als sich

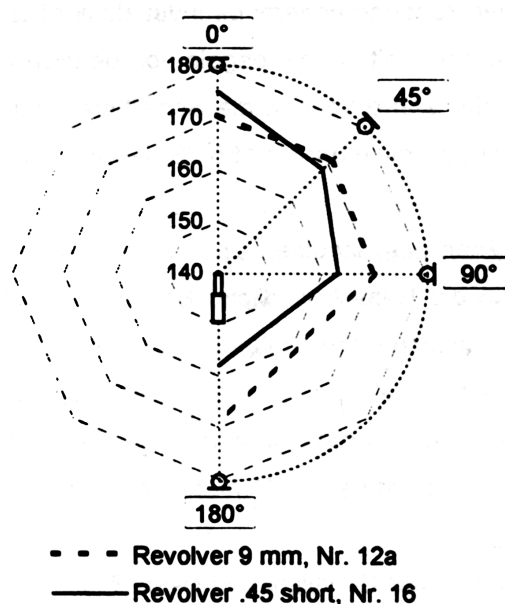
Albert wieder mit seinen Tieren beschäftigte und sie streichelte, schlich sich John Watson an Albert heran und schlug mit einem Hammer auf eine Eisenstange. Das Kind erschrak, war schockiert und weinte. Als sich Albert erholte hatte und erneut zaghaft mit den Tieren zu spielen begann, wiederholte Watson sein Experiment. Von diesem Zeitpunkt an hatte Albert eine bleibende Phobie gegen Tiere und Pelze. Sobald er ein Tier sah, lief er davon und weinte. Diesen psychischen Schaden soll er sein Leben lang behalten haben. Mit diesem „Experiment“ wird belegt, dass laute Schallereignisse, wenn sie unerwartet auftreten und der Betroffene sehr sensibel ist, nicht nur zu Hörverlusten führen können, sondern auch zu psychischen Störungen.

**Tab. 2a:** Geräuschentwicklung bei Spielzeug in dB(A); Messergebnisse an (zufällig) ausgewählten deutschen Spielwaren (Quelle: Europäisches Gremium CEN/TC31 „Sicherheit von Spielzeugen“ zitiert nach Zenner 1999)

| Spielzeug            | Entfernung vom Ohr |         |
|----------------------|--------------------|---------|
|                      | 2,5 cm             | 25cm    |
| Trötttrompete        | 116-117            | 100-104 |
| Trompete klein       | 123-125            | 100-102 |
| Einfachtrompete      | 109-116            | 92-100  |
| Doppeltrompete       | 109-124            | 92-106  |
| Indianertrompete     |                    | 100-110 |
| Signalpfeife         | 118-124            | 102-108 |
| Trillerpfeife        | 126-128            | 112-114 |
| Schiedsrichterpfeife | 127-129            | 107-109 |
| Knackfrosch          | 128-129            | 120-121 |
| Knackfiguren         | 134-135            | 120-122 |

**Tab. 2b:** Geräuschentwicklung bei Spielzeugwaffen in dB(A); Messergebnisse an (zufällig) ausgewählten deutschen Spielwaren (Quelle: Europäisches Gremium CEN/TCSL „Sicherheit von Spielzeugen“ zitiert nach Zenner 1999)

| Spielzeugwaffen              | Entfernung vom Ohr |         |
|------------------------------|--------------------|---------|
|                              | 2,5 cm             | 25cm    |
| Pistole                      | 130-135            | 113-121 |
| Pistole mit Streifenmunition | >135               | >135    |
| Pistole mit Knallplättchen   | >135               | >135    |
| Luftgewehr                   | >135               | >135    |



**Abb. 8:** Mittlerer Immissionspegel (Schalldruckspitzenpegel  $L_{peak}$ ) von Schreckschusswaffen (Revolver) in Abhängigkeit vom Einfallswinkel (Abstand: 0,5 m) (Quelle: Dieker 1998)

### 5.1.2 Hörverluste durch lautes Hören von Musik

Das Thema Gehörschäden bei Jugendlichen findet in steigendem Maße öffentliches Interesse. „Die Jugend von heute kann nicht mehr hören, jeder 4. Jugendliche hat einen Hörschaden“. Diese oder ähnliche Schlagzeilen gehen immer wieder durch die Presse. Diskothekenbesuche und Walkman®-Hören werden als Ursachen für Hörverluste genannt. Die wissenschaftliche Literatur zu diesem Thema ist umfangreich (z.B. Irion 1979, Babisch et al. 1989, Borchgrevink 1993, Schuschke et al. 1994, Ising et al. 1997 und 1998, Passchier-Vermeer et al. 1998,

Zenner et al. 1999, Babisch 2000). Der verfügbare Erkenntnisstand wird nachfolgend anhand von Untersuchungsergebnissen des Instituts für Wasser-, Boden- und Lufthygiene (Umweltbundesamt) dargestellt.

Für die Abschätzung des Gehörschadensrisikos ist neben dem Schallpegel (gemessen als äquivalenter Dauerschallpegel) die Expositionsdauer maßgebend. Aus diesen beiden Expositionsgrößen lässt sich eine mittlere wöchentliche Schalldosis berechnen, auf deren Grundlage sich ein Gehörschadensrisiko bestimmen lässt.

Bei einer repräsentativen Befragung von 505 jungen Erwachsenen (18-19 Jahre) in

Deutschland (1993) wurde die mittlere wöchentliche Expositionsdauer von Frei-

zeitbeschäftigungen erhoben. Die Ergebnisse enthält Tabelle 3.

**Tab. 3:** Laute Freizeitbeschäftigungen 18- bis 19jähriger. Angegeben sind Prozentsätze bezogen auf die Gesamtgruppe von 505 repräsentativ gezogenen Personen, ihre mittlere wöchentliche Exposition sowie die mittlere Dauer dieser Exposition während des Lebens. (Quelle: Zenner 1999)

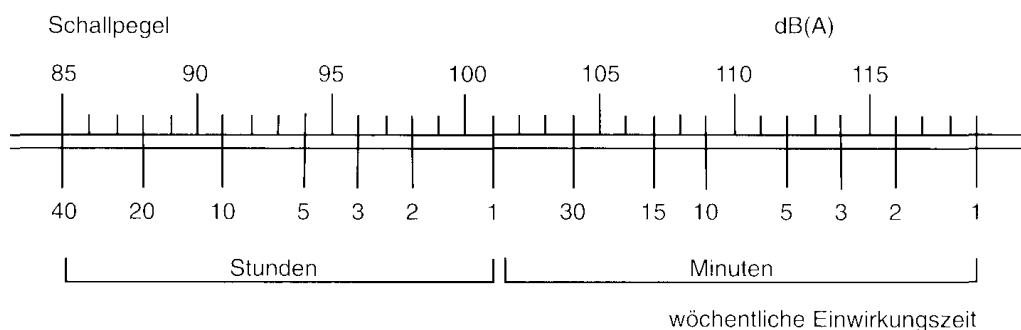
| Beschäftigung           | Prozent-satz | Stunden / Woche | Dauer (Mo-nate im Leben) |
|-------------------------|--------------|-----------------|--------------------------|
| Disko-, Clubbesuch      | 79,7         | 6,2             | 30,6                     |
| Musik laut hören        | 71,9         | 11,4            | 44,3                     |
| Musik machen            | 7,5          | 9,7             | 49,2                     |
| Motorrad / Moped fahren | 21,5         | 8,3             | 20,3                     |
| Sonstiger Motorsport    | 2,5          | 9,5             | 12,8                     |
| Schießsport             | 2,0          | 3,7             | 16,3                     |
| Sonstiges               | 2,6          | 7,4             | 40,2                     |

Die lauten Freizeitbeschäftigungen, die am häufigsten von den jungen Erwachsenen genannt wurden, sind Disko- und Clubbesuch (79,7%) sowie das Hören lauter Musik (71,9%). Gleichzeitig ist das Hören lauter Musik die längste wöchentliche Schalleexposition (11,4 Stunden pro Woche). „Musik machen“ (9,7 Stunden) und „sonstiger Motorsport“ (9,5 Stunden) folgen auf den Rängen 2 und 3.

Für die Gefährdung des Gehörs ist die „Schalldosis“ entscheidend. Sie wächst bei gleicher Expositionsdauer mit dem Schall-

pegel und bei gleichem Pegel mit der Expositionsdauer.

Einer „Schalldosis“ von 85 dB(A) bei 40 Wochenstunden entspricht auf der Grundlage des Isoenergieprinzips (ISO 1999) einem Schallpegel von 95 dB(A) bei 4 Wochenstunden. Bei 101 dB(A) ist die gleiche Schalldosis bereits nach einer Stunde erreicht. In Abb. 9 ist die wöchentliche Einwirkzeit zum Schutz vor einem berufsbedingt erhöhten Hörschadensrisiko (VDI 2058-3) Expositionspegeln zwischen 85 und 119 dB(A) gegenübergestellt.



**Abb. 9:** Wöchentliche Einwirkzeit zum Schutz vor einem berufsbedingt erhöhten Hörschadensrisiko bei Expositionspegeln zwischen 85 und 119 dB(A) (Quelle: Ising et al. 1999).

5.1.2.1 Diskotheken bzw. Clubs

Bickerdike und Gregory ermittelten 1980 eine mittlere Aufenthaltsdauer in Diskotheken von 2,5 Stunden und eine vom Alter abhängige Anzahl der Disothekenbesuche. Die wöchentliche Aufenthaltsdauer hat nach neueren Untersuchungen zugenommen (Zenner 1999). Aussagen über ein Gehörschadensrisiko durch Diskothekenbesuche lassen sich im Zusammenhang mit den mittleren Musikschallpegeln und der Häufigkeit von Diskotheken bzw. Clubbesuchen treffen. Die Verteilung von Musikschallpegeln auf der Tanzfläche von Berliner Diskotheken ist sowohl für das Jahr 1984 als auch für die Jahre 1994/97 der Abbildung 10 zu entnehmen. Annä-

hernd 80% der Berliner Diskotheken wiesen in den Jahren 1994/97 auf der Tanzfläche Schalldruckpegel von  $L_{eq} = 96-105$  dB(A) auf. Bei diesen Pegelangaben ist aber zu beachten, dass nur ein Teil der Aufenthaltsdauer in der Diskothek auf der Tanzfläche verbracht wird. Die Pegelbelastung außerhalb der Tanzfläche ist extrem von den baulichen Bedingungen der Diskothek abhängig.

Die statistische Häufigkeit von Diskothekenbesuchen ist der Abbildung 11 zu entnehmen. Dargestellt ist die typische altersabhängige Anzahl von Diskothekenbesuchen (Median) und die Anzahl für eine 10%- Extremgruppe (10%-Perzentil).

Abb. 10: Verteilung der gemittelten Musikschallpegel auf Tanzflächen Berliner Disko-

theken 1984: n=29; 1994/1997: n=14 (Quelle: Ising 1998)

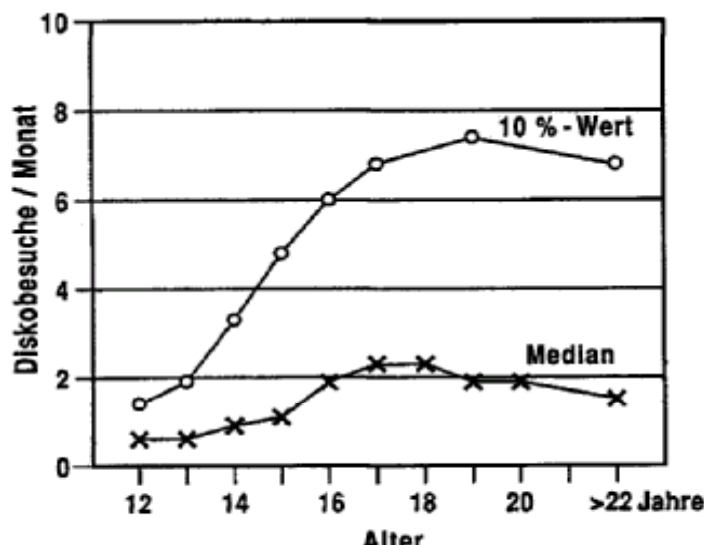
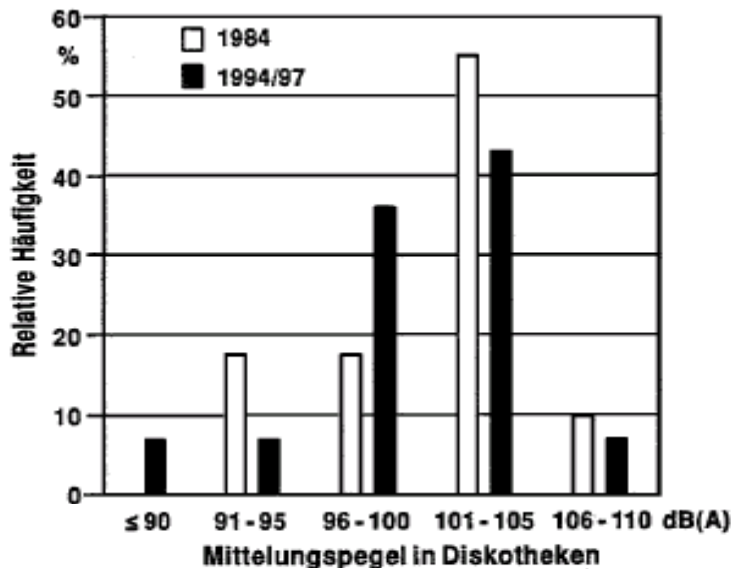


Abb. 11: Altersabhängigkeit der Anzahl von Diskothekenbesuchen pro Monat. Dargestellt sind die Verläufe des Medians (50%-Wert) und der 10%-Extremgruppe (Quelle: Ising 1998)

Im Alter von 16-22 Jahren sind bei typischem Verhalten (Median) etwa 2 Diskothekenbesuche pro Monat zu verzeichnen. Für die 10%-Extremgruppe steigt die Anzahl von Diskothekenbesuchen auf mehr als 6 Besuche im Monat.

Bei zwei Diskothekenbesuchen pro Monat (Median) mit einer Aufenthaltsdauer von jeweils 1 Std. auf der Tanzfläche, sowie einer ansonsten lärmarmen Freizeitgestaltung und einer geringen Arbeitslärmbelastung besteht keine unmittelbare Gefahr für das Gehör. Dies gilt jedoch nicht für die 10%-Extremgruppe mit 6 oder mehr Besuchen pro Monat. Hier ist allein aufgrund der Diskothekenbesuche von einem erhöhten Gehörschadensrisiko auszugehen. Neben den Diskothekenbesuchen wird von Kindern und Jugendlichen auch laute Musik über Kopfhörer oder Ohrhörer gehört.

#### 5.1.2.2 Kopf- oder Ohrhörer

Für das Hören lauter Musik über Kopfhörer lassen sich 3 Gründe angeben (Zenner 1999):

- Die Umgebung wird durch die laute Musik nicht wesentlich gestört, so dass meistens keine Rückmeldung erfolgt.
- Lärm anderer Art, z.B. Straßenverkehrslärm, kann übertönt (verdeckt) werden.

- Die Lautstärke im Kopfhörer wird nach längerem Hören erhöht, vermutlich um die entstandene Ver-täubung auszugleichen.

Nach einer britischen Studie aus den 80er Jahren (20-22 jährige Studenten) wurde Hintergrundmusik im Mittel mit einem Pegel von 74 dB(A) gehört und bei direktem Musikhören mit einem Pegel von ca. 83 dB(A). Bei diesen Intensitäten besteht keine unmittelbare Gefahr eines Hörschadens für den durchschnittlichen Walkman®- oder Diskman®-Benutzer.

Die Ergebnisse des Instituts für Wasser-, Boden- und Lufthygiene zeigen jedoch eine starke Abhängigkeit vom Alter der Hörer. Kinder und Jugendlichen im Alter von 12-16 Jahren hörten Walkman® mit einem typischen Hörpegel (Median) um 90 dB(A). Für 10 % der Schüler lag der Hörpegel über 100 dB(A), wie der Abbildungen 12 zu entnehmen ist. Für die über 18jährigen ergaben sich dagegen Werte, die mit den britischen Ergebnissen vergleichbar sind.

Die Dauer des Walkman®-Hörens wird in der Abb. 13 in Abhängigkeit vom Alter dargestellt. Die typische Hördauer (Median) liegt bis zu einem Alter von 15 Jahren unter 30 Minuten täglich und erhöht sich bei den Älteren auf etwa 1 Stunde täglich.

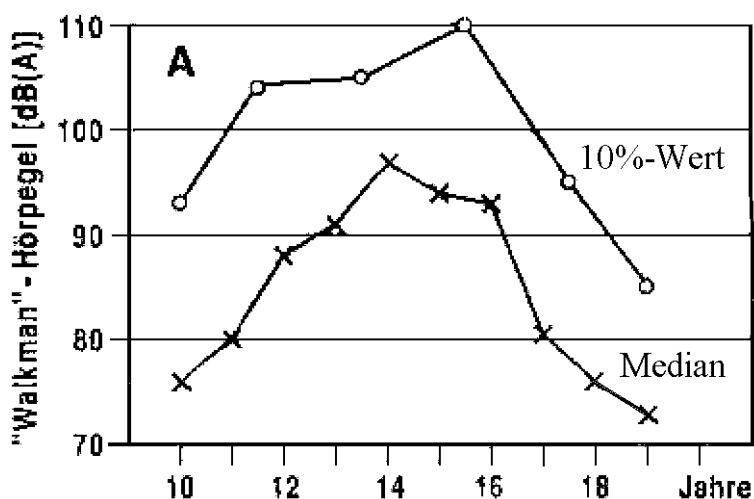
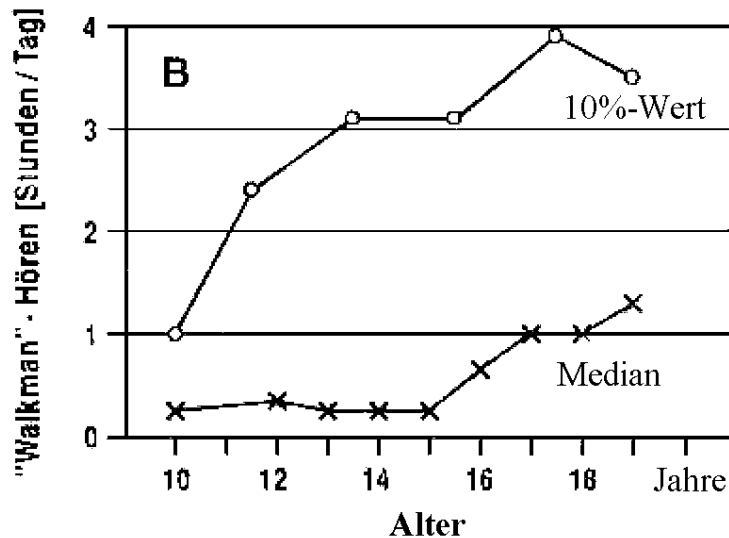


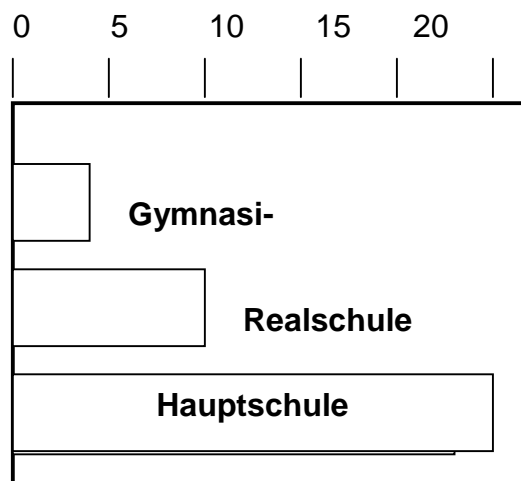
Abb. 12: Der Musikpegel (Kurzzeitmittlungspegel, freifeldkorrigiert) (Walkman-Hörgewohnheiten von 681 Schülerinnen und Schülern in Abhängigkeit vom Alter) (Quelle: Ising 1998)



**Abb. 13:** Die tägliche Hördauer (Walkman-Hörgewohnheiten von 681 Schülerinnen und Schülern in Abhängigkeit vom Alter) (Quelle: Ising 1998)

Berechnet man aus diesen Daten, die den Abb. 12 und 13 zugrunde liegen, den auf 40 Stunden pro Woche bezogenen Dauerschallpegel, so kommen über 20% der untersuchten Jugendlichen auf Werte von 90 dB(A) und darüber“ [Ising 1998]. Damit liegt die wöchentliche Schalldosis dieser Jugendlichen weit über einem „unkritischen“ Wert.

Weiterhin zeigt sich, dass Jungen vergleichsweise häufiger hohe Schallpegel einstellen als Mädchen. Der Schultyp als Indikator für den Sozialstatus hat ebenfalls einen deutlichen Einfluss auf die Hörgewohnheiten. Mit höherem Schulstatus nimmt der Anteil von Schülern ab, die Walkman® mit einem Hörpegel von 90 dB(A) und mehr hören.



**Abb. 14:** Anteile von 12-17jährigen Schülerinnen und Schülern mit Walkman®-Expositionspegeln ( $L_m > 90$  dB(A) für 40h/Woche) in Abhängigkeit vom Schultyp (Quelle: nach Ising 1998)

Neben Diskotheken und ohrnahen Schallquellen gehören Musikgroßveranstaltungen zu den lauten Schallexpositionen von Jugendlichen. Pegelan-

gaben von Open-Air-Konzerten und Großveranstaltungen in Hallen sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

**Tab. 4:** Pegelangaben für Musikgroßveranstaltungen (Quelle: Zenner 1999)

| Autor                  | Pegel                                    | Bemerkungen                           |
|------------------------|--|---------------------------------------|
| Bickerdike und Gregory | 89-119 dB(A)<br>Mittelwert 107 dB(A)     | Median 104 dB(A)                      |
| Fern                   | 101,2 ± 5,8 dB(A)<br>107, 2 ± 10,1 dB(A) | In Raummitte<br>Nähe der Lautsprecher |
| Clark                  | Mittelwert 103,4 dB(A)                   |                                       |
| Axelsson               | Mittelwert 101,2 dB(A)<br>97-110 dB(A)   | 5-35m von der Bühne                   |

### 5.1.3 Zusammenfassung

Werden die Quellen lauter Musik im Einzelnen betrachtet, so ist bereits für Jugendliche, die extrem laut bzw. lange Walkman® hören, von einem erhöhten Gehörschadensrisiko auszugehen. Gleiches gilt für extrem häufige Diskothekenbesuche. Wird darüber hinaus die Kombinationsbelastung (Diskothek und Walkman©) beachtet, so ergibt sich die folgende Abschätzung [Zenner 1999]: Die ermittelten Schallpegel in Diskotheken und beim Hören tragbarer Musikabspielgeräte

sowie die wöchentlichen Nutzungsdauern lassen erwarten, dass nach 10 Jahren bei ca. 10% der Jugendlichen ein musikbedingter Hörverlust von mindestens 10 dB(A) auftreten wird. Da z.B. bei den 40jährigen Männern von einem altersbedingten Hörverlust von ebenfalls etwa 10 dB auszugehen ist (vgl. Abb. 6), sind bei 10% der 40jährigen Hörverluste von 20 dB und mehr zu erwarten, die in dieser Größenordnung die Kommunikation deutlich beeinträchtigen.



**Tab. 5:** Studien zu mittleren Hörschwellen bei unterschiedlich mit Musikschall belasteten Diskothekenbesuchern (Quelle: Babisch 2000)

| Studie            | N    | Musik-Quelle        | Alter (Jahre) | Frequenz (kHz) | Mittlerer Hörschwellenunterschied (dB) |
|-------------------|------|---------------------|---------------|----------------|--|
| Taylor, 1976      | 69   | HiFi & Diskothek    | B-A           | 6              | 6,3                                    |
| Fern, 1981        | 666  | Diskothek & Konzert | 9-25          | 3 - 6          | 1,5 – 3,3                              |
| Carter, 1982      | 656  | Diskothek & Konzert | 16-21         | 6              | 4,0                                    |
| Irion, 1983       | 77   | HiFi & Diskothek    | B-A           | 6              | 3,0                                    |
| Carter, 1984      | 141  | Diskothek & Konzert | 16-20         |                | k. A.                                  |
| Mori, 1985        | 175  | HiFi & Diskothek    | 20-29         | 4 ; 6          | 5,0 ; 4,0                              |
| Lindemann, 1987   | 163  | Diskothek & Konzert | 22-26         |                | k. A.                                  |
| Babisch, 1989     | 204  | Diskothek & Konzert | 13-19         | 4              | 4,0                                    |
| Meyer-Bisch, 1996 | 1364 | Diskothek, Konzert  | 14-40         | 3 - 16         | 0,5 ; 4,0                              |
| Rudloff, 1996     | 227  | Musikkonsum         | 14-18         |                | k. A.                                  |
| Hoffmann, 1997    | 424  | Diskothek           | 19-21         | 6 - 16         | 0,8 – 1,8                              |

Die in Felduntersuchungen beobachteten Hörverluste sind geringer als die nach ISO [ISO 1999] errechneten Hörverluste. Sie liegen in der Größenordnung von 2-5 dB für den mittleren Hörschwellenunterschied bei Frequenzen im Bereich der c5-Senke (vgl. Tab. 5). Die Ergebnisse sind jedoch keine Entwarnung. Das Hauptproblem epidemiologischer Studien zu den Auswirkungen lauter Musikbeschallung besteht in der nicht immer verlässlichen Erhebung der Schalldosis. Eine genaue Erhebung ist nur mit sehr großem Aufwand möglich. Entsprechend unsicher sind die Expositionsberechnungen, die den vorliegenden Studien zu Grunde liegen. Die ermittelten mittleren Hörschwellenunterschiede dürften das Problem daher eher unterschätzen als überschätzen.

Schick et al. (1999) gehen davon aus, dass bereits in jeder Schulklasse in Deutschland 5 bis 10 % der Kinder Hörverluste aufweisen. In Schweden sollen 15% aller Schüler an Hörverlusten leiden (Costa et al. 1990). Unabhängig von einer Gehörgefährdung müssen auch die akuten Beeinträchtigungen durch Schall, wie Kommunikations- und Leistungsstörungen beachtet werden.

## 5.2 Behinderung der Kommunikation und Orientierung

Grundsätzlich gilt, dass jeder hörbare Schall durch Verdeckung bzw. Drosselung die Kommunikation bzw. den Spracherwerb beeinträchtigen kann [UBA 1990]. Mit steigendem Pegel ist i.a. eine Zunahme der Kommunikationsstörungen zu beobachten. Bei Kin-

dem steht die Störung des Spracherwerbs im Vordergrund.

### 5.2.1 Störungen des Spracherwerbs bei Kindern durch Lärm

Kinder können aufgrund geringerer Redundanz unvollständig verstandene Worte nicht so leicht ergänzen wie Erwachsene. Die Sprachverständlichkeit ist folglich schon bei geringeren Lärmpegeln eingeschränkt. Im Rahmen der Sprachentwicklung ist es besonders wichtig, dass Kinder ausreichend gut verstehen, da sie den Text sonst nicht korrekt verarbeiten können, der Lernprozess damit länger dauert und es zu einer zumindest verzögerten, wenn nicht verminderten Sprachentwicklung kommt. Hinzu kommt noch, dass Erwachsene unter Lärm unbewusst einfache Satzkonstruktionen, ein eingeschränktes Vokabular und eintönige Sprache verwenden. Damit verschwinden die für den Spracherwerb wichtigen Hilfen des Sprachrhythmus und der Betonung. Diese Beeinträchtigungen können von Seiten der Eltern durch gezielte Sprachförderung kompensiert werden. In Kindergärten oder Schulen ist solch eine individuelle Kompensation nicht zu erbringen. Die Lehrer sollten also einwandfrei zu verstehen sein [Cohen 1981a, 1981b, Spreng 1994]. Es besteht die Vermutung, dass Kinder bei erhöhtem Lärmpegel in ihrer Fähigkeit des Sprechens und Lesens beeinträchtigt sind [Dejoy 1984].

Inwieweit Lärmwirkungen an dem rapiden Anstieg der Sprachstörungen in Deutschland beteiligt sind, muss noch eingehend untersucht werden. Köster (1999) berichtet unter Bezugnahme auf den logopädischen Dienst der Stadt Düsseldorf, dass 1973 bei 7% der Kinder Sprachstörungen diagnostiziert wurden, 1998 waren es bereits 28%. Eine verspätete Behandlung kann zu einer Legasthenie führen.

### 5.2.2 Geistige Leistungen von Kindern und Lärm

Für die Geräuschbelastung in der Schule sind im wesentlichen drei Faktoren verantwortlich:

1. Die Geräusche der Schüler
2. Die Geräusche des Umfeldes (z.B. Verkehrsgeräusche)
3. Die akustische Klassenraumsituation.

Die teilweise hohen Schallpegel in den Klassenräumen aufgrund der Geräusche der Schüler sind nicht Gegenstand der folgenden Betrachtungen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die „Akustik in den Schulen ein Stiefkind-dasein fristet“ (Schick 1999) und oftmals zu einer für Schüler und Lehrer belastenden Geräuschsituation beiträgt. Dies gilt auch für Kindertagesstätten (vgl. [Berger 2000]). Im Mittelpunkt der folgenden Ausführungen steht jedoch die Beeinflussung geistiger Leistungen durch Verkehrslärm.

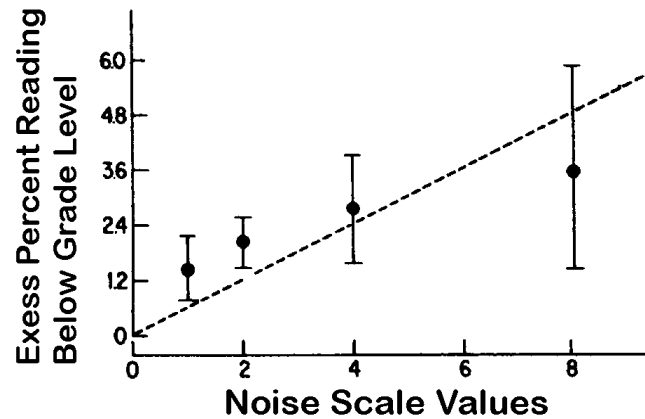
#### 5.2.2.1 Schule

Bronzaft und McCarty [Bronzaft 1975] beobachteten an Kindern, die an der lauten Frontseite des Schulgebäudes unterrichtet wurden (Schienenlärm), dass sie eine schlechtere Lesefähigkeit auswiesen als Kinder auf der lärmarmen Rückseite des Schulgebäudes. Nach entsprechenden Schalldämmungsmaßnahmen waren die beobachteten Unterschiede in der Lesefähigkeit nicht mehr nachzuweisen. Lukas et al. [Lukas 1981] und Green et al. [Green 1980] berichteten über Auswirkungen von Lärm auf schulische Leistungen. So wurde in Brooklyn und Queens der Prozentsatz der Schüler bestimmt, deren Lesefähigkeiten unterhalb ihrer Klassenzugehörigkeit lag (vgl. Abb. 15) [Green 1982].

Den Schulen wurden Geräuschkonturen (NEF) der Flughäfen von New York City zugeordnet (vgl. Tab. 6). Dosis-

Wirkungs Betrachtungen legen nahe, dass der Prozentsatz der Schüler, deren Lesefähigkeit unterhalb der Klas-

senzugehörigkeit lag, mit dem NEF steigt (vgl. Abb. 15).



**Abb. 15:** Prozentsatz von Schülern, deren Lesefähigkeiten unterhalb ihrer Klassenzugehörigkeit war (Quelle: Green 1982)

**Tab. 6:** Fluglärmkonturen und äquivalenter Dauerschallpegel

| Noise Escale Value | NEF Kontur         | $L_{Aeq, 24h}$ |
|--------------------|--------------------|----------------|
| 0                  | außerhalb 30       | unter 63 dB(A) |
| 1                  | 30 berührend       | ca. 63 dB(A)   |
| 2                  | zwischen 30 und 40 | 63-73 dB(A)    |
| 4                  | 40 berührend       | ca. 73 dB(A)   |
| 8                  | innerhalb 40       | über 73 dB(A)  |

Die Ergebnisse unterstreichen die Forderung nach einer ungestörten Kommunikation in Schulen. Auch andere Studien verweisen auf die nachteilige Wirkung von Lärmwirkungen auf schulische Leistungen, wobei immer wieder festgestellt wurde, dass die abgelenkte Aufmerksamkeit eine Hauptursache für die Beeinträchtigung ist [Sanz 1993, Schick 1990].

So ermittelte Hygge [Hygge 1993] bei Schülern, die er Fluglärm mit einem  $L_{eq}$  von 66 dB(A) aussetzte, eine signifikante Beeinträchtigung des Langzeitgedächtnis.

Cohen [Cohen 1973, 1980] untersuchte bei Schulkindern der dritten und vierten Klasse die Auswirkungen von Fluglärm während des Unterrichts auf Blutdruck und geistige Leistung der

Schüler. Die untersuchten Kinder besuchten die vier lautesten Schulen in der Flugschneise vom Los Angeles International Airport (142 Schüler) oder drei Kontrollschulen in leiseren Gebieten (120 Schüler). An den fluglärmbelasteten Schulen ereignete sich während der Unterrichtszeit alle 2,5 Minuten ein Überflug. Lärmmessungen in den Klassenräumen (ohne Kinder) ergaben einen mittleren  $L_{peak}$  von 74 dB(A) und einen maximalen  $L_{peak}$  von 96 dB(A). In den nicht fluglärmbelasteten Schulen wurde ein mittlerer  $L_{peak}$  von 56 dB(A) gemessen. Am Ende des Unterrichts wurde der Blutdruck in ruhiger Umgebung gemessen und die Kinder führten Verständnisaufgaben (cognitive tasks) aus.

Die Studie ergab, dass die Kinder der lauten Schulen längere Zeit benötigten, um Rätsel zu lösen, oder sie brachen die kognitiven Aufgaben früher ab als Kinder an nicht fluglärmbelasteten Schulen. Kinder, die bereits seit längerer Zeit die lauten Schulen besuchten, wurden leichter von Stimmen abgelenkt und machten mehr Fehler. Die Autoren bemerken, dass es hinsichtlich der Motivation und der Ausführung von Verständnisaufgaben keine Adaptation an den Lärm zu geben scheint. Die Auswirkungen weisen auf eine Art von Hilflosigkeit der geräuschbelasteten Kinder hin.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommt eine Studie am alten und neuen Münchener Flughafen [Bullinger 1990, Hygge et al. 1993, Evans et al. 1995, von Mackensen 1994]. Die Untersuchung belegt, dass fluglärmexponierte Kinder am alten Flughafen mehr Fehler bei schwierigen Leseaufgaben machten, eine reduzierte Erinnerungsleistung beim Langzeitgedächtnis und längere Reaktionszeiten aufwiesen aber einen höheren Lernfortschritt beim Kurzzeitgedächtnis hatten als Kinder in Kontrollgebieten.

Bei den Kindern aus den Gebieten um den neuen Flughafen „Franz-Josef Strauß“ war vor Aufnahme des Flugverkehrs kein Unterschied in allen un-

tersuchten Bereichen zwischen den näher und weiter vom Flughafen entfernt wohnenden Kindern feststellbar. Nach Umstellung des Flugverkehrs wiesen die nun vom Fluglärm betroffenen Kinder andere Werte auf als die Vergleichsgruppe:

- anfänglich bessere, bei längerfristigen bzw. schwereren Aufgaben aber schlechtere Leistungen;
- reduzierte Erinnerungsleistung;
- direkt nach Aufnahme des Flugverkehrs schnellere Reaktionszeiten, dann aber langsamer;
- im räumlichen Vorstellungsvermögen bessere Leistungen.

Die Unterschiede waren signifikant und die Werte vergleichbar mit denen der Kinder am alten Flughafen zum ersten Messzeitpunkt, d.h. vor Schließung des Flughafens.

In den Gemeinden um den neuen Flughafen begannen die Veränderungen im Bereich Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit nach Einsetzen des Flugbetriebs und waren deutlich im zweiten Jahr nach Bestehen des Flughafens vorhanden.

In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse der „Umweltliste“ im Hinblick auf Fluglärm dargestellt. Ein hoher Wert steht für eine hohe Beeinträchtigung.

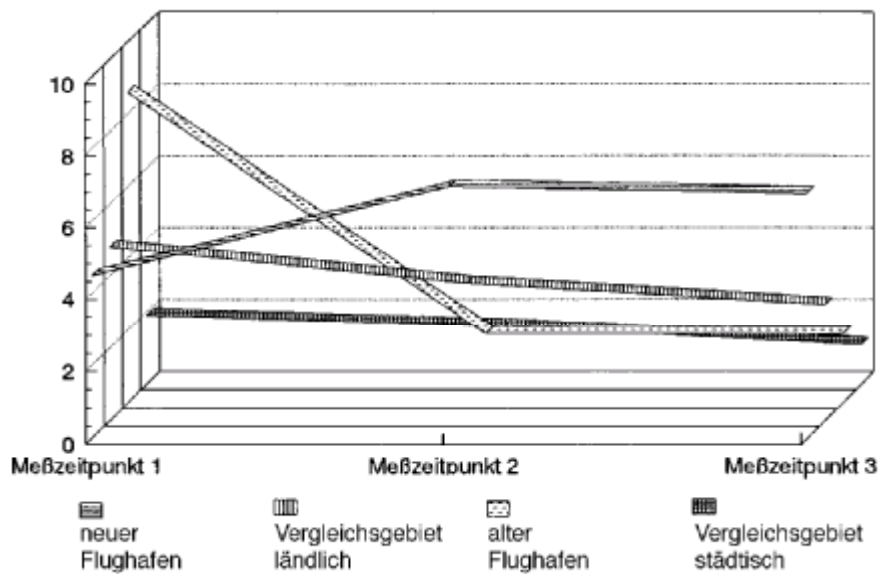


Abb. 16: Ergebnis der Umweltliste für drei Messzeitpunkte (Quelle: von Mackensen 1994)

Aus der Abbildung wird deutlich, dass die Kinder aus dem ländlichen Expositionsgebiet (neuer Flughafen) nach Umzug des Flughafens (Messzeitpunkt 2) einen deutlichen Anstieg der Beeinträchtigung durch Fluglärm zeigen, während dies für das ländliche Vergleichsgebiet (Vergleichsgebiet ländlich) nicht der Fall ist. Die Kinder aus dem Stadtgebiet München (alter Flughafen) erleben nach Schließung des Flughafens (Messzeitpunkt 2) einen drastischen Abfall der Beeinträchtigung durch Fluglärm.

Bei der Bewertung der Ergebnisse kommen die Autoren zu dem Schluss, dass die Ergebnisse nicht besorgniserregend sind, da die Messwerte im Bereich der Norm lagen. Fluglärm stelle aber eine Belästigung dar und kann zu einer Beeinträchtigung der Konzentrationsfähigkeit und Lesefähigkeit bei Kindern führen.

Dem steht das Ergebnis einer Studie von Ko [Ko 1981] entgegen, der bei Schülern, die über 5 Jahre an Schulen mit Fluglärm (mittlerer  $L_{\text{peak, außen}} = 90-94 \text{ dB(A)}$ , bis zu 80 Überflüge pro Tag) unterrichtet wurden, keinen signi-

fikanten Unterschied in der Leistung zu Schülern, die während dieses Zeitraum nicht fluglärmexponiert waren, feststellen konnte.

Auch die häusliche Lärmsituation wurde in wenigen Studien betrachtet. So fand Cohen [Cohen 1973, 1980] für Kinder in hochbelasteten Schulen kein Unterschied zwischen denjenigen, die in einer ruhigen Wohnumgebung lebten, und denjenigen, die in einer lauten Wohnumgebung lebten. Untersuchungen an Kleinkindern zeigen jedoch [Olsho 1985, Pappo 1989], dass auch durch zunehmende Lärmwirkungen außerhalb der Schule (zu Hause, im Hort usw.) die Sprachentwicklung leidet, weil die Kinder auf laute Geräusche inkonsequent reagieren, Worte und Sätze nicht behalten und nicht interpretieren können. Außerdem tritt eine schnelle Ermüdung der auditiven Wahrnehmung ein.

Der Bericht der Einschulungsuntersuchung 1996 / 1997 des Landes Brandenburg weist u. a. aus, dass 6% der Kinder als schulunfähig eingestuft werden mussten (1992 - 1993 waren es noch knapp 3%), weil sich große Mängel in der Sprachentwicklung (Sprach-Sprechschwierigkeiten und Unkonzentriertheit) zeigten. Bundesweit sollen jährlich 5 bis

10 % der Einschulkinder zurückgestuft werden.

Nach Berglund [Berglund 1995] ist in Innenräumen von Schulen und Kindertagesstätten ein über die Aufenthaltsdauer gemittelter Dauerschallpegel (Pegel, der Ioff [1994] begrüßen Immissionsrichtwerte für Schulen, kritisieren jedoch das Konzept des äquivalenten Dauerschallpegels. Sie regen an, im schulischen Bereich den Wirkpegel (zum Wirkpegel vgl. TA-Lärm) als Messgröße der Geräuschbelastung zu verwenden.

#### 5.2.2.2 Frühkindliches Alter und Kindertagesstätten

Eine Studie von Wachs [1987] belegt, dass alltäglicher hoher Lärm in Wohnräumen, dem ein Säugling ausgesetzt ist, Fehlentwicklung und Leistungs-Demotivation nach sich ziehen kann.

In Kindertagesstätten ist häufig die unzureichende Raumakustik ein wesentlicher Störfaktor [Maxwell und Evans [Maxwell 1998]. Wird die Schallbelastung durch raumakustische Maßnahmen vermindert, so sind geistige Leistungen wie Anfangslesen und Zahlenlernen erheblich verbessert. Nach Miller [1982a, b, 1984] messen Kindergartenkinder und Grundschüler dem Lärm eine größere Bedeutung bei, als ältere Kinder. Gleiches wird auch von Holmes [1991] berichtet, die feststellt, dass die Lärmbelastung mit zunehmendem Alter als weniger bedeutungsvoll für das Lernen angesehen werden kann, als psycho-soziale Faktoren.

### 6 Extraaurale Wirkungen

Wirkungen von Lärm außerhalb des auditorischen Systems werden als extraaurale Lärmwirkungen bezeichnet. Wie bereits in dem Abschnitt „Verarbeitung akustischer Stimuli im auditorischen System“ besprochen (vgl. Abb. 2), bestehen direkte Verbindungen der afferenten Hörbahn zum Mandelkern (Amygdala) und zum Hypothalamus im Bereich des mittleren

nicht durch die Kinder erzeugt wird) von  $L_{Aeq, innen} = 35 \text{ dB(A)}$  einzuhalten, um die geistigen Leistungen der Kinder nicht zu beeinträchtigen. Schuschke und Rud-

Knieskörpers. Das ist der direkte Weg der Schallaktivierung, die mit einer Beeinflussung von vegetativen, hormonellen und Immunfunktionen verbunden ist. Die Grundprinzipien der extraauralen Beeinflussung durch Schall lassen sich besonders anschaulich anhand der Aktivierungstheorie und der Leistung beschreiben.

#### 6.1 Aktivierungstheorie

Die Aktivierungstheorie beruht auf der These, dass durch jeden Reiz zwei Prozesse ausgelöst werden:

1. Der Reiz verändert Verhaltensweisen oder löst diese aus. Damit besitzt die Reizung eine Steuerungsfunktion.
2. Der Reiz verursacht einen biochemischen Vorgang, in dessen Folge der Organismus mit Energie versorgt wird, die er zur Ausführung von Handlungen benötigt. In diesem Sinn besitzt die Reizung eine Mobilisierungsfunktion.

Bezogen auf ein Schallereignis lassen sich diese Aussagen folgendermaßen interpretieren:

Durch ein Schallereignis erhält eine Person Informationen über sich und die Umwelt. Diese Informationen ermöglichen eine Entscheidung darüber, welches Verhalten in der gegebenen Situation angemessen ist.

Dieser Vorgang wird als Steuerung bezeichnet.

Die Steuerung reicht aber keinesfalls aus, um ein Verhalten (z.B. Flucht oder Kampf) zu realisieren. Dem Organismus muss vielmehr Energie zur Verfügung stehen. Die Energie wird unter dem Eindruck des Schallereignisses mobilisiert.

Dieser als Aktivierung bezeichnete Prozess lässt sich nur indirekt messen. Als Messgrößen bieten sich insbesondere die Parameter der Energiemobilisierung an. Typische Messgrößen sind z.B. die Stresshormone der Nebenniere (Adrenalin, Noradrenalin, Cortisol), oder die Pulsfrequenz sowie der Blutdruck.

### 6.1.1 Schallereignis und Aktivierungsniveau

Wie bei der Wahrnehmung stellt sich auch bei der Aktivierung die Frage

nach dem Zusammenhang zwischen Schallereignis und Aktivierung.

Das Aktivierungsniveau hängt, wie schon vom Hörereignis bekannt, von dem Schalldruckpegel, der Frequenz (bzw. der Frequenzzusammensetzung), sowie von der zeitlichen Struktur des Schallereignisses ab.

Die Abhängigkeit lässt sich qualitativ bestimmen und ist in den folgenden Abbildungen verzeichnet.

Die Höhe des Aktivierungsniveaus steigt mit dem Schalldruckpegel und strebt in einen "Sättigungsbereich".

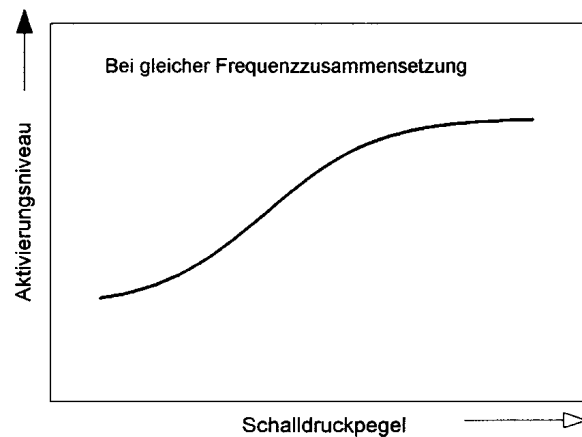


Abb. 17: Schalldruckpegel und Aktivierungsniveau

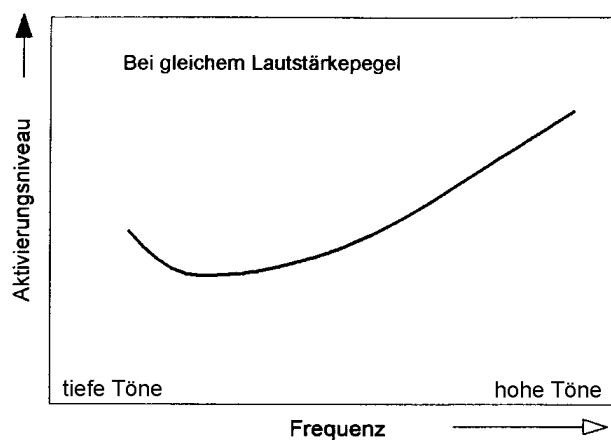


Abb. 18: Frequenz und Aktivierungsniveau

Bei gleichem Lautstärkepegel ist das Aktivierungsniveau bei tiefen Tönen, aber insbesondere bei hohen Tönen gegenüber Tönen im mittleren Frequenzbereich erhöht.

Zusätzlich ist eine Abhängigkeit von der zeitlichen Struktur des Schalls zu beobachten. Die erhöhte Aktivierung basiert auf folgender Grundregel:

Das Aktivierungsniveau steigt um so höher, je häufiger sich der Schall-druckpegel ändert, je größer die Änderungsgeschwindigkeit ist und je stärker sich die Frequenzkomponenten mit der Zeit ändern.

Aber auch der Informationsgehalt greift in den Aktivierungsprozess mit ein.

Das Aktivierungsniveau nimmt grundsätzlich mit dem Informationsgehalt des Schallereignisses zu.

Zusammenfassend kann festgehalten werden:

Das Anforderungsniveau, das aufgrund des Schallereignisses vom Individuum erwartet wird, bestimmt die Aktivierung.

## 6.2 Aktivierungsniveau und Leistung

Die Auswirkung einer Aktivierung lässt sich besonders gut in Zusammenhang mit der Leistung beschreiben, sofern der Einfluss von Motivation und Emotionen vernachlässigt wird.

Nach den bisherigen Ausführungen liegt die folgende Erwartung nahe:

Je höher das Aktivierungsniveau steigt, d.h., je mehr Energie dem Körper zur Verfügung steht, desto mehr kann geleistet werden.

Bei dieser im Grundsatz richtigen These muss beachtet werden, dass die mobilisierte Energie ungerichtet ist und zum zielgerichteten Einsatz einer Steuerung bedarf. Je mehr Energie zu Verfügung steht, desto schwerer ist es, sie zielgerichtet einzusetzen, d.h. zu kontrollieren. Mit steigender Aktivierung treten also zwei Tendenzen auf, welche die Leistung gegenläufig beeinflussen:

Die Mobilisierung von Energie kommt einerseits der Schnelligkeit und Nachhaltigkeit einer Leistung zugute, andererseits stellt sie erhöhte Anforderungen an die Steuerung.

Auf diese Weise erhalten wir den vielfach publizierten Zusammenhang zwischen Leistung und Aktivierung (Yerkes-Dodsonsches Gesetz) wie er in der Abbildung 19 verzeichnet ist.

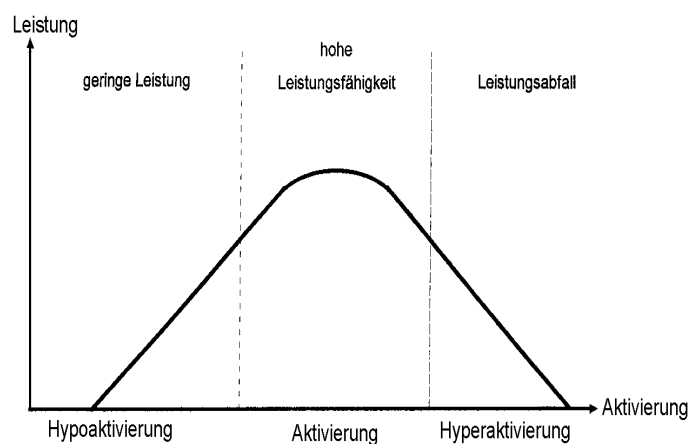


Abb. 19: Aktivierungsniveau und Leistung

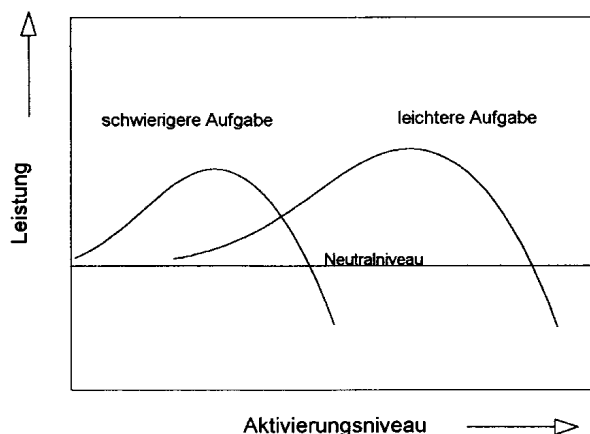


Der qualitative Verlauf der Leistung in Abhängigkeit vom Aktivierungsniveau kann als Zusammenspiel einer leistungsfördernden Komponente und einer leistungsmindernden Komponente interpretiert werden. Die leistungsfördernde Komponente beruht auf der zunehmenden Energiemobilisierung, die leistungsmindernde Komponente beinhaltet die Steuerungsschwierigkeiten, die sich bei der Kontrolle der mobilisierten Energie ergeben. Das Aktivierungsniveau kann anhand der Leistung in drei Bereiche eingeteilt werden, die mit den Begriffen „geringe Aktivierung“, „gute Aktivierung“ und „Überaktivierung“ charakterisiert werden können.

Was kennzeichnet diese Bereiche?

#### Geringe Aktivierung:

Die Leistung steigt monoton mit zunehmender Aktivierung. Die Energiemobilisierung kommt der Tätigkeit zu-



**Abbildung 20:** Aktivierungsniveau in Abhängigkeit von leichten / schwierigen Aufgaben

#### 6.2.1 Unerwünschte Aktivierung und Steuerung

Was geschieht aber eigentlich, wenn eine Person bemerkt, dass ihr Aktivierungsniveau ihrer Tätigkeit nicht angemessen ist?

gute. Die Steuerung bereitet keine Schwierigkeit.

#### Gute Aktivierung:

Die Aktivierung entspricht den Anforderungen der Tätigkeit. Es ist zu beachten, dass der Leistung durch den Arbeitsablauf Grenzen gesetzt sind. Die Aktivierungsunterschiede in diesem Bereich bleiben i.a. ohne Auswirkung auf die Leistung.

#### Überaktivierung

Die Leistung nimmt aufgrund erhöhter Steuerungsanforderung mit zunehmender Aktivierung deutlich ab. Die Arbeitsschritte werden zunehmend unkontrolliert und überhastet.

Aus diesen Ausführungen wird deutlich, dass die optimale Aktivierung von der ausgeführten Tätigkeit abhängig sein muss.

Bei Tätigkeiten muss folgender Grundsatz beachtet werden:

Je differenzierter bzw. schwieriger eine Tätigkeit ist, desto niedriger liegt der Bereich optimaler Aktivierung.

Sobald das Aktivierungsniveau die optimale Höhe zu überschreiten droht, versucht das Individuum gegen zu regeln.

Dieser Regelungsprozess kann eine Erniedrigung des Aktivierungsniveaus bewirken, oder auch eine qualitativ höhere Stufe der Steuerung verursachen. In beiden Fällen muss der Organismus eine zusätzliche Belastung bewältigen, die nur kurzfristig erbracht werden kann und ihren "Tribut" fordert.

Welches Ausmaß der Aktivierung im Einzelfall erreicht wird, hängt nicht nur vom Schallereignis, von der Tätigkeit und von der Bewertung ab, sondern ebenfalls vom Aktivierungsniveau, welches ohne Einfluss der Reizung bereits vorhanden war. Das gleiche Schallereignis kann dem einen zur optimalen Leistungsbereitschaft verhelfen, den anderen in einen Zustand allzu hoher Aktiviertheit versetzen.

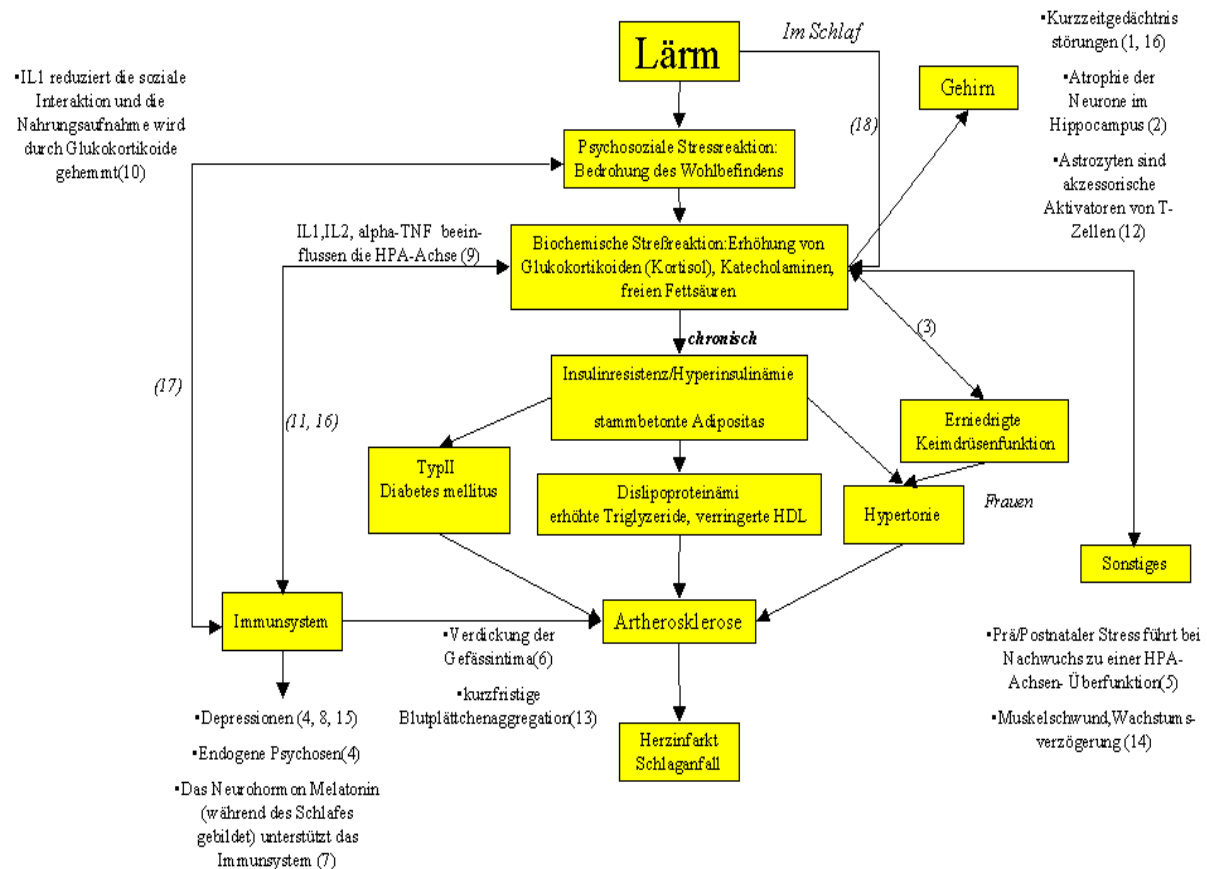
Letzteres ist das Grundprinzip der extraauralen Lärmwirkung. Die Betroffenen fühlen sich z.B. gestört oder belästigt, verbunden mit einer vegetativen Gesamtumschaltung, die sowohl in biochemischen als auch in physiologischen, motorischen und kognitiven Funktionsbereichen beobachtet werden kann.

### **6.3 Vegetativ-hormonelle Reaktion und Gesundheit**

Das pathogenetische Konzept, das Lärmeinwirkungen mit Gesundheitsgefahren verbindet, lehnt sich an bekannte Stressmodelle an. Zentrales Bindeglied sind die Aktivierungshormone der Nebenniere, die auch als Stresshormone bezeichnet werden. Die Beanspruchung des Organismus zeigt sich anhand von Verschiebungen im Konzentrationsniveau dieser Hormone in Blut, Urin oder Speichel. Ein andauerndes unphysiologisches Konzentrationsniveau ist als adverser Effekt einzustufen. Zunächst erfolgen diese Prozesse mit dem Ziel, die Anpassung des Organismus an veränderte Situationen zu gewährleisten

(Eustress). Andauernde Aktivierung durch hohe Lärmexposition kann schließlich zu Regulationsstörungen führen (Disstress) und pathologische Prozesse auslösen. Lärm ist aber nicht einfach ein physikalischer Reiz, sondern auch ein individuelles Erlebnis. Eine unzureichende Bewältigung moderater Lärmexpositionen kann ebenfalls zu einem inadäquaten, riskanten neuro-endokrinen Reaktionsmuster und schließlich zu Regulationskrankheiten führen. Darüber hinaus beinhaltet die Stressreaktion Veränderungen von immunologischen Parametern (u.a. Interleukine und Blutbildparameter), die im wesentlichen über das hormonelle System gesteuert werden. Die Gesundheitsgefährdung von Schall besteht demzufolge einerseits in einer Beeinträchtigung des Gehörs und andererseits in einer unerwünschten, chronischen Aktivierung.

Fassen wir die beschriebenen Wirkungen von Lärm zusammen, so kann ein vereinfachtes Pathogenesemodell für extraaurale Lärmwirkungen angegeben werden, das in der folgenden Abbildung dargestellt ist :



1. Kirschbaum 1996 (Review McEwen 1998), 2. Lupien 1997 (Review McEwen 1998), Sapolsky (Review Uno 1989), 3. Review McEwen 1998 (erniedrigter Östrogenspiegel führt zur Steigerung der HPA-Achse, 4. Anisman 1993, Zucharko (Review Anisman); Zubin u. Spring 1977, 5. Morici 1997, 6. Castellanos 1991, 7. Bakker 1998, 8. Connor 1998, 9. Müller 1997, 10. Nguyen 1998, 11. Leo 1998, 12. Fontana, 13. Gordon 1973, 14. Maestroni 1990, 15. Fahlbusch 1995, 16. Born et al. in press, 17. Henry 1989, 18. Maschke 1998

**Abb. 21:** Pathophysiologische Auswirkungen und Erkrankungen durch Lärmstress (Quelle: nach Maschke<sup>1</sup>)

Die Ausführungen zeigen, dass chronische Lärmbelastung insbesondere auf das Herz-Kreislauf-System einwirkt und als Gesundheitsrisiko interpretiert werden kann. Unter diesem Gesichtspunkt kommt der Verminderung der Lärmbeanspruchung eine große präventivmedizinische Bedeutung zu.

### 6.3.1 Lärmwirkung auf das kardiovaskuläre System von Kindern

Zur Lärmwirkung auf das kardiovaskuläre System von Kindern liegen

mehrere Studien vor; eine davon wurde in Deutschland durchgeführt [Karsdorf 1968]. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass korrelative Beziehungen zwischen erhöhtem Blutdruck und stärkerer Lärmexposition bestehen. Als Studien mit Querschnittscharakter war die Evidenz jedoch schwach [Bullinger 1990].

Die kardiovaskulären Parameter von Kindern reagieren sehr schnell auf Lärm, bilden sich aber auch schnell

<sup>1</sup> Das Modell der pathophysiologischen Auswirkungen und Erkrankungen wurde dem laufenden Forschungsprojekt „Epidemiologische und tierexperimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Lärmstress auf das Immunsystem und die Entstehung von Atherosklerose“ entnommen. Das Projekt wird vom Umweltbundesamt finanziert.

zurück. So sind die beobachteten Blutdruckerhöhungen nicht als Gesundheitsgefährdung zu interpretieren. Kinder – ausgenommen Kleinkinder - weisen im allgemeinen eine geringere Lärmreaktivität auf.

Nach R. Pothmann [Pothmann 1992] zeigte eine Studie in Wuppertal 1990 an 5244 Schulkindern, dass 90% der Schüler (vom 9. Lebensjahr an) an Stressinduzierten Kopfschmerzen litten. Etwa 80% der Kinder litten so stark, dass sie ihren Tagesablauf unterbrechen mussten. Ähnliche Ergebnisse wurden auch in Studien in Schweden, Finnland und Kasachstan gefunden. Ursachen sollen vor allem soziale Stressfaktoren sein. Lärm wird in diesen Studien nicht erwähnt.

Hinsichtlich der Lärmwirkungen auf das kardiovaskuläre System und der vegetativ-hormonellen Beanspruchung lassen die vorliegenden Untersuchungsergebnisse keine verminderten Zumutbarkeitsgrenzen gegenüber Erwachsenen erkennen.

### 6.3.2 Lärmwirkung auf das hormonelle System von Kindern

Die Auswirkungen von Fluglärm auf das hormonelle System von Kindern wurden in der Münchener Fluglärmstudie (vgl. Absatz 4.2.2 ) untersucht und die Ergebnisse von Evans, Hygge, Bullinger und anderen mehrfach veröffentlicht (z.B. [Evans 1995]). Die Autoren untersuchten Kinder im Alter von 8-11 Jahren in der Umgebung des alten Flughafens München-Riem und in der Umgebung des neuen Flughafens München „Franz-Josef Strauß“. Sie fanden signifikante Unterschiede in der Stresshormonausscheidung (Katecholamine) vor der Schließung des alten Flughafens und nach der Öffnung des neuen Flughafens im Vergleich zu Kontrollgruppen. Vor der Eröffnung des neuen Flughafens und nach Schließung des alten Flughafens waren kei-

ne signifikanten Unterschiede zu den Kontrollgruppen zu verzeichnen.

Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen bewertet die Studie wie folgt: „In den prospektiven epidemiologischen Studien von Evans et al. [1995, 1998] führte Fluglärm zu deutlichen Erhöhungen der Katecholamine, während die Veränderungen im Cortisolspiegel nicht signifikant waren. Nach Evans et al. und nach anderen Autoren [...] kann eine erhöhte Katecholaminausscheidung als verlässlicher Parameter für chronische Exposition gegenüber Stressoren angesehen werden, [...]“ [SVRU 1999, Abs. 418].

### 6.3.3 Tieffluglärmwirkung bei Kindern

Eine besondere Art der Beeinflussung von psychischen und physiologischen Prozessen stellt der Tieffluglärm bei Kindern dar, der von verschiedenen Wissenschaftlern untersucht wurde [Poustka 1990, 1991a, 1991b, 1992, Ising 1991, Schmeck 1991, 1992a, 1992b]. Bei diesen Untersuchungen wurde festgestellt, dass vor allem bei jüngeren Kindern der Tieffluglärm Stressreaktionen (startle – reactions) auslösen kann, die Ausdruck kurzfristiger psycho-physiologischer Aktivierung (Orientierungsreaktion, Abwehrreaktion) sind. Auch stressbedingte Veränderungen, die im Zusammenhang mit Angstzuständen auftreten, wurden festgestellt. Infolge dieser Untersuchungen hat man sich wissenschaftlich damit auseinandergesetzt, Fluglärmwirkungen im Sinne von Körperverletzungen zu betrachten [Preuss 1989].

Untersuchungen an 10- bis 13-jährigen Kindern in militärischen Tieffluggebieten ergaben, dass nur bei Mädchen der Blutdruck signifikant anstieg. Die Jungen blieben diesbezüglich unbeeinflusst. Das gleiche zeigt sich auch bei psychomatischen Störungen (Angst, Schlafstörungen, Entwicklungsretardierungen).

Diese Ergebnisse erfahren unterschiedliche Interpretationen. So wurden die niedrige Hörschwelle sowie die niedrige Auslöseschwelle für Schreckreflexe bei Mädchen angeführt [Ising et al. 1991]. Der Faktor Angst den Schmeck und Poustka [Schmeck 1992a, 1992b] heraus arbeiten konnten, wird in diesem Zusammenhang nicht diskutiert.

Beziehungen zwischen Lärm des militärischen Tieffluges und anderen belastenden Faktoren wurden von Schmeck und Poustka [Schmeck 1992a, 1992b] an 4 bis 5-jährigen sowie 6 bis 12-jährigen Kindern (n = 376) mittels verschiedener psychologischer und psycho-physiologischer Diagnostikmethoden untersucht. Sie verglichen in einem Tieffluggebiet und in einem Referenzgebiet ohne Fluglärm psychisch gesunde und psychisch auffällige Kinder. Von den 376 untersuchten Kindern gehörten 240 zur Gruppe der Gesunden und 136 zur Gruppe der psychisch Auffälligen.

Die psychisch Auffälligen wurden noch einmal in ängstliche Kinder und Kinder mit ausagierenden Störungen unterteilt. Es wurden folgende Ergebnisse erzielt:

Herzfrequenz, Herzschlagvolumen, Spon-tanfluktuationen der Hautleitwerte sowie systolischer und diastolischer Blutdruck unterschieden sich in allen Gruppen signifikant voneinander. Hohe Werte der o. g. Reaktionen waren bei ängstlichen Kindern festzustellen. Kinder mit ausagierenden Störungen wiesen niedrigere Werte auf.

Werte, wie sie bei der letzten Gruppe gefunden wurden, beobachteten auch Garralda et al. [Garralda 1990, 1991]. Sie kamen zu der Auffassung, dass die Reaktivität von Kindern und Jugendlichen mit Störungen im Sozialverhalten gering ist.

Jüngere Kinder haben eine erhöhte Anfälligkeit für Angststörungen im Tief-

fluggebiet, Mädchen stärker als Jungen. Die Ängste gehen mit einem erhöhtem Aktivierungsniveau einher, das sich auch in den vegetativen Funktionen äußert (Herzfrequenz, Hautleitwert, Blutdruck).

Ängstliche Kinder haben demzufolge ein besonders hohes Aktivierungsniveau. Da-raus ist die Schlussfolgerung zu ziehen, dass Tieffluglärm Angst erzeugt und durch die Angst die Kinder empfindlicher gegen Tieffluglärm werden. Hierbei zeigt sich das gleiche bei der Lärmwirkung, was Trieger [Trieger 1975] für den Schmerz postulierte: Angst macht den Schmerz noch schmerzhafter. Offen ist bisher die Frage geblieben, ob es bei lärmexponierten gesunden Kindern inter- und intraindividuelle Hyper- oder/und Hypo-reaktionen gibt [Bullinger 1990]. Die Beantwortung dieser Frage bedarf noch eingehender Untersuchungen.

## 6.4 Schlafstörungen

Als Schlafstörungen werden alle objektiv messbaren und/oder subjektiv empfundenen Abweichungen vom normalen Schlafverlauf bezeichnet [Griefahn 1985]. Schlafstörungen können sowohl durch endogene als auch durch exogene Einflussgrößen hervorgerufen werden. Zum Spitzenfeld der exogenen Ursachen gehört der Lärm.

### 6.4.1 Schlaf, Schlafstadien und Schlafstruktur

Schlaf ist kein Zustand genereller motorischer, sensorischer, vegetativer und psychischer Ruhe, sondern besitzt eine komplexe Dynamik. Die charakteristischen Merkmale des menschlichen Schlafs sind Periodik, Dynamik, veränderte Motorik und Sensorik sowie eine veränderte Bewusstseinslage. Durch die Aufzeichnung des Elektroenzephalogramms (EEG), des Elektromyogramms (EMG) und des Elektrookulogramms (EOG) ist es möglich, die

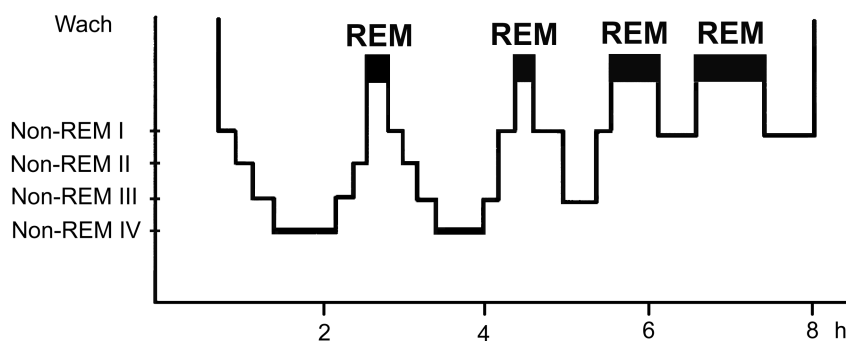
Dynamik des Schlafes (Schlafverlauf) objektiv zu beschreiben und zu beurteilen. Gemäß den Kriterien von Rechtschaffen und Kales [1968] werden der REM Schlaf (benannt nach den schnellen Augenbewegungen, rapid eye movements in diesem Schlafstadium) und vier NON-REM Schlafstadien unterschieden.

Der Anteil der einzelnen Schlafstadien am Gesamtschlaf ist weitgehend altersspezifisch. Von bis zu 60% REM-Schlafanteil im Neugeborenenalter verbleiben dem Erwachsenen etwa 20 %.

Der Schlaf zeigt ein typisches Profil. Nach dem Einschlafen werden zuerst die NON-REM -Stadien von I bis IV durchlaufen, anschließend in umgekehrter Reihenfolge. Nach dem NON-REM -Schlaf erreicht der Schläfer den REM-Schlaf, um dann erneut in den NON-REM -Schlaf einzutreten.

Der Weg bis zum tiefen Schlaf (NON-REM IV) und zurück wird als Schlafphase zusammengefasst, der REM-Schlaf stellt eine zweite Schlafphase dar. Die beiden Schlafphasen bilden eine Schlafperiode. Insgesamt durchläuft der Schläfer bis zu 6 Schlafperioden pro Nacht, in denen sich die REM-Phasen von zunächst 10 Minuten auf bis zu 40 Minuten verlängern und sich somit in der zweiten Hälfte des Schlafes konzentrieren. Ein selektiver REM-Entzug führt zu einer partiellen Kompensation des verlorenen REM-Schlafes in der verbleibenden Schlafzeit. Die Schlafphase vom Einschlafen bis zum Erwachen wird als REM-Latenz bezeichnet, die Intervalle zwischen den REM-Phasen als Schlafzyklen.

In Abbildung 22 ist das Schlafzyklogramm eines jungen gesunden Schläfers dargestellt.



**Abb. 22:** Schlafzyklogramm eines jungen, gesunden Schläfers (Quelle: Hecht 1992, 1998)

Die für die Erholung des Menschen wichtigsten Stadien sind Stadium III & IV des NON-REM-Schlafes (Deltaschlaf) und der REM-Schlaf. Der Deltaschlaf (tiefer Schlaf) ist für die körperliche Erholung verantwortlich, der REM-Schlaf (Traumschlaf) für die geistig-emotionelle Erholung sowie für die kontinuierliche Vervollkommnung des individuellen Verhältnisprogramms, indem der Transfer vom Kurz- ins Langzeitgedächtnis stattfindet.

Neben der biologischen ist auch die psychische Komponente des Schlafes zu beachten. Jegliche Störung des Nachtschlafes wird von den Menschen als etwas Unangenehmes, als ein Eingriff in ihre Intimsphäre bewertet. Das Erwachen während des Nachtschlafes wird subjektiv als unangenehm erlebt und ruft negative emotionale Zustände hervor.

Beim Erwachen stellt sich in Abhängigkeit von den Schlafstadien unterschiedliches Erleben ein. Erwachen aus dem Stadium IV (Deltaschlaf) geht mit Benommenheit, Bewusstseinsstrübung und Orientierungsstörungen ein-

her. Erwachen aus dem REM-Schlaf ist u. a. begleitet vom Gefühl der schweren Gliedmaßen, Schläppheit und Muskelbeschwerden. Dem Erwachen aus dem oberflächlichen Schlaf (Stadium II, NON-REM-Schlaf) folgt ein relativ schnelles Wachsein. Umso schwerer ist aber daraufhin das Ein-

schlafen. Da bei alten Menschen der oberflächliche Schlaf überwiegt, haben sie oft Probleme, nach einem nächtlichen Weckereignis wieder einzuschlafen. Die Weckschwelle ist in den verschiedenen Schlafstadien unterschiedlich, ebenso Wahrnehmung und Motorik.

**Tab. 7:** Wahrnehmung, Empfindung und Motorik in den verschiedenen Stadien des Schlaf - Wach - Zyklusses (Quelle: Koella 1988)

| Indikator       | entspanntes Wachsein  | NON-REM I   | NON-REM II  | NON-REM III  | NON-REM IV   | REM   |
|-----------------|---|---|---|--|--|---|
| Bewußtsein      | uneingeschränkt   | Aufnahme von Informationen noch möglich<br>hypnagoge Halluzinationen  | erloschen   | erloschen  | erloschen  | erloschen   |
| Weckschwelle    | normale Beantwortung äußerer Reize  | erhöht  | noch höher als Stadium I  | noch höher als Stadium II  | ähnlich wie Stadium III  | noch höher als Stadium IV   |
| Augenbewegungen | schnelle und langsame   | langsame  | keine   | keine  | keine  | schnelle  |
| Motorik         | Muskeltonus mittelhoch bis hoch<br>Reflexe erhalten<br>Bewegungsartefakte | Muskeltonus mittelhoch bis hoch<br>Reflexe erhalten<br>gelegentlich Bewegungsartefakte, hypnagoge Muskelzuckungen | Muskeltonus mittelhoch<br>Reflexe erhalten<br>gelegentlich Bewegungsartefakte | Muskeltonus mittelhoch<br>Reflexe erhalten<br>keine Bewegungsartefakte | Muskeltonus niedrig bis mittelhoch<br>keine Bewegungsartefakte | Muskeltonus auf nahe Null abgefallen<br>Reflexe erloschen<br>gelegentlich Muskelzuckungen |
| EEG             | Alpha-Wellen im Wechsel mit Beta-Aktivität                                | generelle Verminderung der Alpha-Wellen<br>Auftreten von flachen Theta-Wellen                                     | Spindeln<br>K-Komplexe<br>Beta-Wellen und Theta-Wellen                        | 20 – 50 % Delta-Wellen, eingefügt in Abschnitte von Theta-Wellen       | 50 – 100 % Delta-Wellen mit hoher Amplitude (> 75 µV)          | Beta-Wellen mit einzelnen Alpha- und Theta-Wellen<br>Sägezahnwellen                       |

#### 6.4.2 Auswirkungen von Lärm auf den Schlaf

Die durch Lärm hervorgerufenen Schlafstörungen lassen sich anhand ihrer zeitlichen Folge in Primär- und Sekundärreaktionen unterscheiden.

Zu den Primärreaktionen gehören:

- kurzfristige Änderungen im EEG (Nullreaktionen),
- Verflachung der momentanen Schlaftiefe (Stadienwechsel) bis hin zu Aufwachreaktionen,

- Veränderungen der Schlafstadienverteilung,
- Verlängerungen der Latenzzeiten (insbesondere der Einschlafzeit),
- Verkürzung der Gesamtschlafzeit,
- Zunahme (Dauer) der Zeiten hoher Muskelanspannung (Körperbewegungen),

aber auch vegetative Reaktionen wie:

- Änderungen der Atemfrequenz,





seltener Zugvorbeifahrten). Bei weniger ungewöhnlichen Geräuschen tritt ein wesentlicher Anstieg der Anzahl der Aufgeweckten erst oberhalb von 40 dB(A) auf. Bemerkenswert hohe Schallpegel von 90 dB(A) und mehr können besonders von Kindern überschlafen werden. Die Weckwirkung ist nicht nur von der Höhe des Schallpegels abhängig, sondern auch von dessen Abstand zum jeweiligen Grundgeräuschpegel.

Grundsätzlich muss die häufige Störung physiologisch programmierter Funktionsabläufe als gesundheitlich bedenklich gelten. Dies gilt auch für die Aufwachreaktionen. Lärmbedingte Wachphasen müssen als abnormal und langfristig als Gesundheitsrisiko beurteilt werden. Andererseits ist eine

grobe Störung physiologischer Funktionsabläufe bereits unterhalb der Aufwachschwelle zu verzeichnen. Es ist daher wenig sinnvoll, aus einer mittleren experimentellen Weckschwelle einen hygienischen Grenzwert für den Schutz des Schlafes abzuleiten.

#### 6.4.3 Schlafstörungen bei Kindern

Es liegen bis heute nur wenige Studien vor, in denen Schlafstörungen von Kindern untersucht wurden. Eine schwedische Felduntersuchung von Eberhardt zeigt, dass Verkehrslärm auf den Nachtschlaf von Kindern deutlich geringere Auswirkungen hat als auf den Schlaf von Erwachsenen.

**Tab. 8:** Eberhardt J. (1990). The disturbance by road traffic noise of the sleep of prepubertal children as studied in the home (Quelle: nach Maschke et al. 1997).

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Art der Studie              | Feld  |
| Art des Lärms               | LKW-Lärm, intermittierend   |
| Anzahl der Probanden        | 8   |
| Alter der Probanden (Jahre) | 6-11  |
| Eigenschaften               | normalhörend, lebten an Straßen ohne nächtlichen Verkehrslärm   |
| Versuchsdauer (Tage)        | 21  |
| Anzahl der Lärmnächte       | 4-5   |
| Schallbelastung             | 68 LKW-Lärmereignisse mit $L_{Amax} = 45, 55, 65$ dB(A)   |
| Anzahl der Ruhenächte       | 7 (2 Bezugsnächte)  |
| Schallbelastung             | Hintergrundpegel < 26 dB(A)   |
| Anzahl der Gewöhnungsnächte | 2   |
| Dauer der Exposition        | ganze Nacht (Lärmereignisse willkürlich verteilt)   |
| Datenerhebung               | EEG, EOG, EMG, Körperbewegungen, Befragung  |
| Besonderheiten              | Lärm wurde zu Hause in den Schlafrum eingespielt  |
| Untersuchungsparameter      | Gesamtschlafdauer, Schlafstadienlatenz, Arousalreaktionen, Aufwachreaktionen, Dauer der Wachphasen, des Leicht-, Tief- und REM-Schlafes, Körperbewegungen, subjektive Schlafqualität, erinnerbares Erwachen |

Aus der Studie kann auf eine Belastungsdifferenz von etwa 10 dB(A) geschlossen werden.

Hinweise, dass Kinder wesentlich schwerer aufzuwecken sind, sind auch in anderen Studien enthalten. Neugeborene sollen erst bei 80 dB(A) aus dem Schlaf erwachen [Spreng 1998]. Schuschke [Schuschke 1976] bemerkt in diesem Zusammenhang, dass die erhöhte „Lärmresistenz“ von Kleinkindern auf den Schlafverlauf zurückzuführen sein könnte, der einen großen Anteil (etwa 50%) des REM-Schlafes (Traumschlaf) am Gesamtschlaf auf-

Dieses Problem muss durch einen eigenen Immissionsgrenzwert für den Zeitbereich 19:00 bis 22:00 Uhr gelöst werden. Die gesonderte Betrachtung der Abendstunden ist nicht nur im Hinblick auf die Kinder sinnvoll, da in diesem Zeitbereich auch bei Erwachsenen eine erhöhte Sensibilität gegenüber Lärm zu verzeichnen ist.

weist. Bekanntlich ist der Mensch aus dem REM-Schlaf schwerer zu erwecken als aus den Non-REM Schlafphasen.

Unter Berücksichtigung möglicher „Kompensationskosten“ für die Lärmadaptation ist für Kinder ein Zuschlag (Bonus) von 5 dB(A) anzusetzen [Maschke et al. 1996].

Zwingend zu beachten sind aber die früheren Zubettgehzeiten von Kindern. Die Immissionsgrenzwerte für den Tag liegen weit über dem Schwellenwert für Schlafstörungen bei Kindern.

## **7 Schlussbemerkung**

Noch ist die Kenntnis über die Einflüsse von Lärm auf die Gesundheit von Kindern und Jugendlichen lückenhaft, da diesem Problem in der Vergangenheit nicht die notwendige Aufmerksamkeit gewidmet wurde. Die hier aufgezeigten Ergebnisse wissenschaftlicher Arbeiten zeigen aber, dass Kinder und auch Jugendliche als Risikogruppen einzustufen sind, aber ein sehr differenziertes Herangehen bei der Beurteilung von Lärmwirkungen im Kindes- und Jugendalter notwendig ist. So sind stark altersspezifische Probleme zu verzeichnen.

Unverkennbar ist auch die Tatsache, dass noch ein erheblicher Forschungsbedarf besteht, um wissenschaftlich basierte Strategien zu entwickeln, die geeignet sind gesundheitsgefährdende Expositionen zu verhindern sowie bisher nicht vermeidbare

umweltbedingte Störungen der heranwachsenden Generation zu kompensieren.

Das Bild würde deutlicher werden, wenn man bei zukünftigen Untersuchungen mit Altersgruppen arbeiten würde, die sich an neurophysiologisch-psychischen Entwicklungsstufen orientieren. Eine Einteilung in:

- Säuglingsalter
  - Vorschulalter
  - Grundschulalter
  - Frühe Adolenz (12-14 Jahre)
  - Mittlere Adolenz (14-16 Jahre)
  - Späte Adolenz (18 Jahre und älter)
- (vgl. [Kerstenbaum 1996, Wassermann 1996]) ist auch für die Lärmproblematik zu empfehlen.

## 8 Literatur

- Babisch, W, H. Ising (1989): Zum Einfluss von Musik in Diskotheken auf die Hörfähigkeit. *Soz. Präventivmed.* 34, 239-242
- Babisch, W. (2000): Gehörschäden durch Musik in Diskotheken. *Umweltmedizinischer Informationsdienst* 2, 3-9
- Berg, M. (1980): Pathologie des Lärmschadens. In: M. Berg (Hrsg.): *Lärmschäden des Ohres*. Thieme Verlag, Stuttgart
- Berger, M., S. Berger, H. Rohn, M. Schlagintweit, K. Sieg (2000): Verbesserung der Raumakustik eines Kindergartens anhand eines konkreten Beispiels in Wünsdorf. *Umwelttechnisches Seminar*, Technische Universität Berlin
- Berglund, B., Th. Lindvall (1995): *Community Noise - Archives of the Center of Sensory Research*, Stockholm
- Borchgrevink, H. M.(1993): Music-induced hearing loss > 20 dB affects 30% of Norwegian 18 year old males before military service - the incidence doubled in the 80's, declining in the 90's. In: M. Vallet (ed.): *Proceedings of the 6th Congress on Noise as a Public Health Problem*. Vol.2. INRETS, Nice; s. 25-28
- Bronzaft, A., D. Mc Carthy (1975): The effect of elevated train noise on reading ability. *Environment and Behavior* 7; S. 517-527
- Bronzaft, A. (1981): The effect of a noise abatement program on reading ability. *Environmental Psychology* 3; S. 215-222
- Bullinger, M.(1990): Forschungsvorhaben: Medizinpsychologische Längsschnittstudie zur Wirkung von Fluglärm auf Kinder und Erwachsene im Einzugsbereich des neuen Flughafens München-Erding und des alten Flughafens München-Riem. *Konzeption*
- Chananaschwili, M. M., K. Hecht (1984): *Neurosen*. Akademie-Verlag, Berlin
- Cremer, L. (1948): *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik Bd.1*. Hirtzel-Verlag, Stuttgart
- Cohen, S., D. Glass, J. Singer. (1973): Apartment noise, auditory discrimination, and reading ability in children. *Journal of Experimental Social Psychology* Sep Vol 9 (5); S. 407-422
- Cohen, S., G. W. Evans, D. S. Krantz, D. Stokols (1980): Physiological, motivational and cognitive effects of aircraft noise on children. *American Psychologist* 35; S. 231-243
- Cohen, S., G. W. Evans, D. S. Krantz, D. Stokols (1981a): Cardiovascular and behavioral effects of community noise. *American Scientist* Sept-Oct vol 69 (5); S. 528-535
- Cohen, S., G. W. Evans, D. S. Krantz, D. Stokols (1981b): Aircraft noise and children: Longitudinal and cross-sectional evidence on adaptation to noise and the effectiveness of noise abatement. *Journal of Psychology* Feb Vol 40 (2); S. 331.345
- Costa, O., P.A. Hellström, A. Axelson (1990): Temporary threshold shift induced by music. *Unveröffentlichter Bericht*
- Dejoy, D.M. (1984): The nonauditory effects of noise: Review and perspectives for research,. *The Journal of Auditory Research* 24; S. 123-150
- Dieker, L. (1997): *Messung und Bewertung der Geräuschimmission in unmittelbarer Nähe von Schreckschusswaffen*. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin
- DIN 45641 : 1990-06: *Mittlung von Schallpegeln*. Beuth Verlag, Berlin
- DIN 45645-1 : 1996-07: *Ermittlung von Beurteilungspegeln aus Messungen: Geräuschimmissionen in der Nachbarschaft*. Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 60651 : 1994-05: *Schallpegelmesser*. Beuth Verlag, Berlin
- DIN EN 60804 :1994-05: *Integrierende mittelwertbildende Schallpegelmesser*. Beuth Verlag, Berlin
- Evans, G., S. Hygge, M. Bullinger (1995): *Chronic Noise and Psychological Stress*. Department of Design and Environmental Analysis

- Garralda, M. E., J. Connell, D. C. Taylor (1990): Peripheral psychophysiological reactivity to mental tasks in children with psychiatric disorders. *European Archives of Psychiatry and Clinical Science* 240; S. 44-47
- Garralda, M.E., J. Connell, D. C. Taylor (1991): Psychophysiological anomalies in the children with emotional and conduct disorders. *Psychophysiological Medicine* 21; S. 947-957
- Ginn, K.B. (1978): *Architectural Acoustics*. Brüel & Kjaer Publication; S. 22
- Görlich, R. (1975): Beurteilung der Geräuschimmission (Vorschriften – Normen – Richtlinien). In: M. Heckl, H. A. Müller (Hrsg.): *Taschenbuch der Akustik*. 1. Auflage; Springer Verlag, 87-132
- Gottlob, D. und R. Kürer (1994): Beurteilung von Geräuschimmissionen (Vorschriften – Normen - Richtlinien). In: M. Heckl, H. A. Müller (Hrsg.): *Taschenbuch der Akustik*. 2. Auflage; Springer Verlag, 86-122
- Graff, C., F. Bockmühl, V. Tietze (1968): Lärmbelastung und arterielle (essentielle) Hypertoniekrankheit beim Menschen. In: S. Nitschkoff, G. Kriwizkaja: *Lärmbelastung, akustischer Reiz und neurovegetative Störungen*. Georg Thieme, Leipzig
- Griefahn, B. (1985): *Schlafverhalten und Geräusche*. Enke Verlag Stuttgart
- Green, K., B. Pasternack, R. Shore (1980): Effect of aircraft noise on children's reading and hearing levels. *Journal of the Acoustical Society of America* 68 (Supplement 1); S. 90f
- Green, K., B.S. Pasternack, R.E. Shore (1982): Effects of aircraft noise on reading ability of school-age children. *Arch. Environm. Health* 37 (1); S 24-31
- Hecht, K. (1992): *Besser schlafen, schöner träumen*. Südwest Verlag
- Hecht, K. (1998): *Neugeborenen durch gesunden Schlaf*. Cormoran Verlag, München
- Hecht, K., C. Maschke, H.U. Balzer, S. Bärndal, C. Czolbe, A. Dahmen, M. Greusing, J. Harder, A. Knack T., Leitmann, P. Wagner und I. Wappler (1999): *Lärmmedizinisches Gutachten DA-Erweiterung Hamburg*, Berlin
- Hellbrück, J. (1993): *Hören - Physiologie, Psychologie und Pathologie*. Hogrefe-Verlag, Göttingen, Bern, Toronto Seattle
- Hellbrügge, T. H. (1977): Physiologische Zeitgestalten der kindlichen Entwicklung. In: J. H. Scharf, H. v. Mayersbach (Hrsg.): *Nova Acta Leopoldina*; S. 365-387
- Holmes, R.M. (1991): If it's fun, is it schollwork? A kindergartner's analysis. *Reading Improvement* 28, 52-56
- Hygge, S. (1992): Vergleichende Untersuchungen über Wirkungen über Flug-, Straßen- und Schienenlärm auf das Langzeitgedächtnis und Erinnern von Texten bei 12-14jährigen Schülern. *Schrift. Reihe Verein WaBoLu Gustav Fischer, Stuttgart*, S. 416-421
- Hygge, S., G. W. Evans, M. Bullinger (1993): The Munich Airport Noise study: Psychological, cognitive, motivational and quality of life effects on children. In: *Proceedings from the conference "Noise and Man"*, Nizza, July
- Irion, H. (1979): Gehörschäden durch Musik – Eine kritische Literaturübersicht. *Kampf dem Lärm* 26, 91-100
- Ising, H., I. Curio, H. Otten, E. Rebentisch, W. Schulte(1991): *Gesundheitliche Wirkungen des Tieffluglärms – Hauptstudie*. Umweltforschungsplan des Bundesministers für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. *Lärmbekämpfung. Forschungsbericht 91-10501116*, Umweltbundesamt Berlin; S. 205
- Ising, H., W. Babisch, J. Hane, B. Kruppa (1997): Loud music and hearing risk. *Journal of Audiological Medicine* 6, 123-133
- Ising, H., W. Babisch (1998 ): *Gehörschadensrisikos durch laute Musik und Akzeptanz von Pegelbegrenzungen: Überblick über empirische Studien des Instituts für Wasser-, Boden- und Luft-hygiene*. 1. DAGA-Tagungsband: *Sozioakustik: Psychologische und medizinische Aspekte der Lärmbelastung*, 195-201
- Ising, H., C. A. Sust, P. Plath (1999): *Gehörschäden durch Musik*. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 7. Auflage

- ISO 1999 : 1990-01: Acoustics: Determination of occupational noise exposure and estimation of noise induced impairment, (Akustik; Bestimmung der berufsbedingten Lärmexposition und Einschätzung der lärmbedingten Hörschädigung). ISO, Geneve
- ISO 7029 (1984): International Organization for Standardization 7029. Acoustic Threshold of hearing by air reduction as function of age and sex for otologically normal persons. ISO, Geneve
- Karsdorf, G., H. Klappach (1968): The influence of traffic noise on the health and performance of secondary school students in a large city. *Zeitschrift für die Gesamte Hygiene* 14; S. 52-54
- Kestenbaum, C.J., P.D. Trautman (1996): Normale Entwicklung und große Probleme in der Adoleszenz. In: H.U. Wittchen (Hrsg): *Das große Handbuch der seelischen Gesundheit*. Beltz-Quadriga, Weinheim Berlin, 256-274
- Köster, W. (1999): *Politik für die nächste Generation*. Olzog Verlag, München
- Ko, N.W.M., H.J. Head, J. Chan (1981): Effects of Aircraft Noise on Pupil Performance – A Long-Term Assessment. *Applied Acoustics* 14; S. 399-402
- Koella, P. (1988): *Die Physiologie des Schlafes*. Gustav Fischer Verlag
- Landrigan, P.J., J.E. Carlson, C.F. Bearer, J.S. Cranmeer, R.D. Bullard, R.A. Etzel, J. Groopman, J.A. McLachlan, F.P. Perera, J.R. Reigart, L. Robinson, L. Schell and W.A. Suk (1999): Gesundheit von Kindern und Umwelt: Eine neue Agenda für präventive Forschung. *medizin – umwelt – gesellschaft* 12, 105-116
- Lochner, J.P.A., Burger, J.F. (1958) The subjective masking of short time delayed echoes: their primary sounds and their contribution to the intelligibility of speech. *Acustica* 8; S. 1-10
- Lukas, J.S., R. Dupree, J. Swing (1981): Report on a study of the effects of freeway noise on academic achievement of elementary school children, and a recommendation for a criterion level for a school noise abatement program. Sacramento. CA: Office of Noise Control, Epidemiological Studies Section, California Department of Health Services (April)
- Maschke, C., D. Arndt, H. Ising, G. Laude, W. Thierfelder; S. Contzen (Hrsg.) (1995a): Nachtfluglärmwirkungen auf Anwohner. *Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene* 96; S. 1-140
- Maschke, C., M. Druba, F. Pleines (1997): Kriterien für schädliche Umwelteinwirkungen: Beeinträchtigung des Schlafes durch Lärm - eine Literaturübersicht, Forschungsbericht 97-10501213/07. Umweltbundesamt, Berlin
- Maschke, C., T. Rupp, K. Hecht (2000): The Influence of Stressors on Biochemical Reactions – A review of the present scientific findings with Noise. *Int. J. Hyg. Environ. Health* 203/1.
- Maxwell, L.E., E. Evans (1998): Interior noise exposure and reading readiness among preschool children. In: Carter, N.; Soames Job, R.F. (eds.): *Noise Effects '98*. 7<sup>th</sup> International Congress on Noise as a Public Health Problem Vol. 1. Sidney, 373-376
- Miller, P.H. (1982a): Childrens and adults integration of information about noise and interest levels in their judgements about learning. *J. of Experimental Child Psychology* 33, 536-546
- Miller, P.H., P.H. Zalenski (1982b): Preschoolers knowledge about attention. *Development Psychology* 18, 871-875
- Miller, P.H., K.A. Shannon (1984): Young childrens understanding of the effects of noise and interest on learning. *Genetic Psychology Monographs* 110, 71-90
- Moruzzi, G.; Magoun, H.W. (1949): Brain item reticular formation and activation of EEG, *Electroenceph. clin. Neurophysiol.* 1
- Olsho, L. W. (1985): Infant auditory perception: Tonal masking. *infant behavior and development* 8; S. 371-384
- Papso, C. F., I. M. Blood (1989): Word recognition skills of children and adults in background noise. *Ear & Hearing* 10; S. 235-236
- Passchier-Vermeer, W. (1993): *Noise and Health*. The Hague: Health Council of the Netherlands, Publication no. A93/02E
- Passchier-Vermeer, W., H. Vos, J.H.M. Steenbekkers (1998): Popmusic through headphones and hearing loss. TNO-Report, Vol. 98.036, Leiden

- Pothmann, R. (1992): Kopfschmerzen bei Schulkindern. Med Report 6/16; S1
- Poustka, F. & Schmeck, K. (1990). Über die psychischen Auswirkungen von militärischer Tiefflugtätigkeit auf Kinder. Ergebnisse einer epidemiologischen Untersuchung in Westfalen. Zeitschrift für Kinder- und Jugendpsychiatrie 18 (2); S. 61-70.
- Poustka, F. (1991a): Die physiologischen und psychische Auswirkungen des militärischen Tiefflugbetriebs. Huber Verlag, Bern
- Poustka, F. (1991b): Psychische Auffälligkeiten bei Kindern in Gebieten unterschiedlicher Tiefflugaktivitäten. In: F. Poustka (Hrsg.): Die physiologischen und psychischen Auswirkungen des militärischen Tiefflugbetriebs. Huber Verlag; Bern, S. 144-156
- Poustka, F., P. Eckermann, K. Schmeck (1992): Effect of aircraft noise and psychosocial stressors on mental disturbance of children and adolescents: An epidemiological survey in Westphalia. In: H. Remschmidt & M. Schmidt (Hrsg.): Developmental psychopathology. child and youth psychiatry: European perspectives, Vol 2. Hogrefe & Huber Publishers, Göttingen; S. 83-96
- Preuss, S. (1989): Tiefflug ist Körperverletzung. Über die psychischen Auswirkungen des militärischen Tieffluges auf Kinder. Paed. Extra & Demokratische Erziehung 2 (9); S. 38-42
- Rechtschaffen, A., A. Kales (1968): A manual of standardized terminology, techniques and scoring system for sleep stages of human subjects. Public Health Service, U.S. Government Printing Office, Washington D.C.
- Robinson, D.W., R.S. Dadson (1956): A re-determination of the equal-loudness relations for pure tones. Brit. J. of Appl. Phys. 7, 166-188
- Schick, A., M. Klatte, M. Meis (2000): Noise Stress in Classrooms. In: A. Schick, M. Meis, C. Reckhardt (Hrsg). Contributions to Psychological Acoustics – Results of the eight Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg
- Schmeck, K. (1991). Psychophysiologische Auswirkungen des militärischen Tiefflugbetriebs auf Kinder und Jugendliche. Ergebnisse einer Felduntersuchung in Westfalen. In: F. Poustka (Hrsg.): Die physiologischen und psychischen Auswirkungen des militärischen Tiefflugbetriebs. Huber Verlag, Bern; S. 119-134
- Schmeck, K. (1992a): Beeinträchtigung von Kindern durch Fluglärm. Auswirkungen von militärischem Tieffluglärm auf psychophysiologische Reaktionen von Kindern und Jugendlichen. Ergebnisse einer Felduntersuchung in Westfalen. Klotz Verlag
- Schmeck, K., Poustka, F. (1992b): Psychophysiologische und psychiatrische Untersuchungen bei Kindern und Jugendlichen in einer Tiefflugregion. Schr.-Reihe Verein WaBoLu 88, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart
- Spreng, M., Leupold, S., Firsching, P. (1991): Gehörschäden durch Impulslärm – Vorschlag für ein gehörschadensrichtiges Impulsbewertungssystem. Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Forschungsbericht FB 630, Dortmund
- Spreng, M. (1994c): Beeinträchtigung der Kommunikation durch Lärm. Umweltbundesamt Berlin, Forschungsbericht 105 01212/06
- Spreng, M. (1998): Lärm und seine Auswirkungen auf Wahrnehmung und Sprache. In Rosenkötter, H.; U. Minning; S. Minning: Auditive Wahrnehmung und Hörtraining. Auditoria, Lörrach-Hauingen, 36-54
- Spreng, M. (1999): Periphere und zentrale Aktivierungsprozesse. In: H. Ising und C. Maschke (Hrsg.) Beeinträchtigung der Gesundheit durch Verkehrslärm – ein deutscher Beitrag. Im Auftrag des Bundesministeriums für Gesundheit
- Schuschke, G. (1976): Lärm und Gesundheit. VEB Verlag Volk und Gesundheit, Berlin
- Schuschke, G., F. Rudloff, S. Grasse, E. Tanis (1994): Untersuchungen zu Ausmaß und möglichen Folgen jugendlichen Musikkonsums, Ergebnisse der Befragung. Zeitschrift für Lärmbekämpfung 41, 121-128
- Schuschke, G., C. Maschke (2000): Lärm als Umweltfaktor. In: Dott, Merk, Neuser, Osieka (Hrsg.), Lehrbuch der Umweltmedizin. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, in press

- 
- Starzl, T.E. (1951): Organisation of the diffuse thalamic projection system. *J. Neurophysiol* 14
- SVRU (1999): Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen. Sondergutachten: Umwelt und Gesundheit – Risiken richtig einschätzen. Eigenverlag, Wiesbaden
- TA-Lärm (1998): Sechste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundesimmissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zum Schutz gegen Lärm – TA-Lärm). Bundesdrucksache 254/98
- Trieger, N. (1975): Die Schmerzausschaltung. Quintessenz, Berlin, Chicago, Rio de Janeiro, Tokyo
- UBA (1990): Interdisziplinärer Arbeitskreis für Lärmwirkungsfragen beim Umweltbundesamt Gutachterliche Stellungnahmen zu Lärmwirkungsbereichen (1982-1990) Umweltbundesamt, Berlin
- VDI 2058-3 : 1999-02: Beurteilung von Lärm am Arbeitsplatz unter Berücksichtigung unterschiedlicher Tätigkeiten Nachbarschaft. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf
- v. Mackensen S. (1994): Lebensqualität von Kindern im Verlauf von veränderten Umweltbedingungen. Eine kontrollierte Längsschnittstudie. Diplomarbeit. Katholische Universität Eichstätt, Philosoph.-Pädagog. Fakultät
- Wachs, T.D. (1987): Specificity of environmental action as manifest in environmental correlates of infant's mastery motivation. *Development Psychology* 23, 782-790
- Warren, R.M. (1982): Auditory perception. A new synthesis. Pergamon Press Elmsford, New York
- Wassermann, G.A. (1996): Entwicklungsstörungen, häufige Probleme und Verhaltensauffälligkeiten von Vorschulkindern. In: H.U. Wittchen (Hrsg): Das große Handbuch der seelischen Gesundheit. Beltz-Quadriga, Weinheim Berlin, 256-274
- Weith, W. (2000): Schallimmission von pyrotechnischen Knallkörpern und ihre präventiv-medizinische Bewertung. Diplomarbeit, Technische Universität Berlin
- WHO-Ottawa (1986): Charta zur Gesundheitsförderung. In: T. Abelin, Z. J. Brzezinski (Hrsg.): Measurement in health promotion and protection Kopenhagen (WHO Regional Publications) European Series No. 22, S. 653-658
- Zenner, H.P., V. Struwe, G. Schuschke, M. Spreng, G. Stange, P. Plath, W. Babisch, E. Rebentisch, P. Plinkert, K.D. Bachmann, H. Ising und G. Lehnert (1999): Gehörschäden durch Freizeitlärm. *HNO* 47, 236-248