

Lärm - Akustik, Gesundheit, Gesetzgebung

Rolf Bader

Institute of Musicology

University of Hamburg

Neue Rabenstr. 13, 20354 Hamburg, Germany

30. Januar 2020

1 Psychoakustik: Lautstärke vs. Lautheit

Das Grundproblem der Messung von Lärm ist die Übertragung von physikalischen Messgrößen in einen subjektiv empfundenen Lärm. Hier stehen sich zwei Welten gegenüber, a) die der Physik und b) die der Wahrnehmung. *Physikalische* Größen sind etwa Schall, also Schallwechseldruck oder Lautstärke, also Schallintensität. Diese können außerhalb des menschlichen Körpers durch Meßgeräte gemessen werden, etwa durch Mikrophone oder andere Schalldruckempfänger. Die *Wahrnehmung* von Lärm aber geschieht innerhalb des Körpers, durch die Übertragung des Schalls im Ohr in Nervenimpulse, die ins Gehirn überführt werden, und dort eine Wahrnehmung auslösen. Hier sind die Wahrnehmungsgrößen z.B. Lautheit, Rauigkeit, Tonhöhe, das Gefühl des Genervtseins (annoyance), des Abgelenktwerdens, Aufschreckens und vieles mehr.

Diese beiden Welten stehen zueinander in einer Beziehung, die oft sehr kompliziert ist. Die Wissenschaft, die sich mit dieser Beziehung beschäftigt ist die *Psychoakustik*, also die Verbindung von Wahrnehmung (Psyche) und Physik (Akustik). Hier wird seit über hundert Jahren intensiv geforscht, und wie wir sehen werden ist es äußerst schade, daß die meisten dieser Befunde sich nicht in der Gesetzgebung wiederfinden. In der Tat ist die Gesetzgebung auf dem wissenschaftlichen Stand von vor 1933.

1933 veröffentlichten Fletcher und Munson die sogenannten Kurven gleicher Lautheit[Fletcher & Munson1933](siehe Fig. 1). Diese stellen die physikalische *Lautstärke* der wahrgenommenen *Lautheit* gegenüber. Hierbei wurde ein einfacher Sinuston von 1000 Hz mit einer bestimmten Lautstärke, etwa 60 dB Versuchspersonen vorgespielt. Sodann wurde die Frequenz verändert,

die 1000 Hz also z.B. zu 500 Hz gemacht. Hierbei zeigt sich, daß dieser 500 Hz Ton *subjektiv* leiser klingt als der 1000 Hz Ton, obwohl beide mit derselben physikalischen Lautstärke vorgespielt werden. Sodann wird die Versuchsperson gebeten, die Lautstärke des neuen 500 Hz Tons so lange zu verändern, bis die wahrgenommene Lautheit mit der Lautheit des 1000 Hz Tons übereinstimmt. Dieser Vorgang wird mit allen anderen Frequenzen wiederholt, immer beginnend von 1000 Hz und 60 dB Lautstärke. Bei jeder Frequenz wird eine eigene Lautstärke von den Versuchspersonen angegeben und am Ende werden alle Punkte verbunden. Diese Kurve ist nun eine *Kurve gleicher Lautheit*, nicht also gleicher physikalischer Lautstärke sondern der subjektiver Lautheit¹

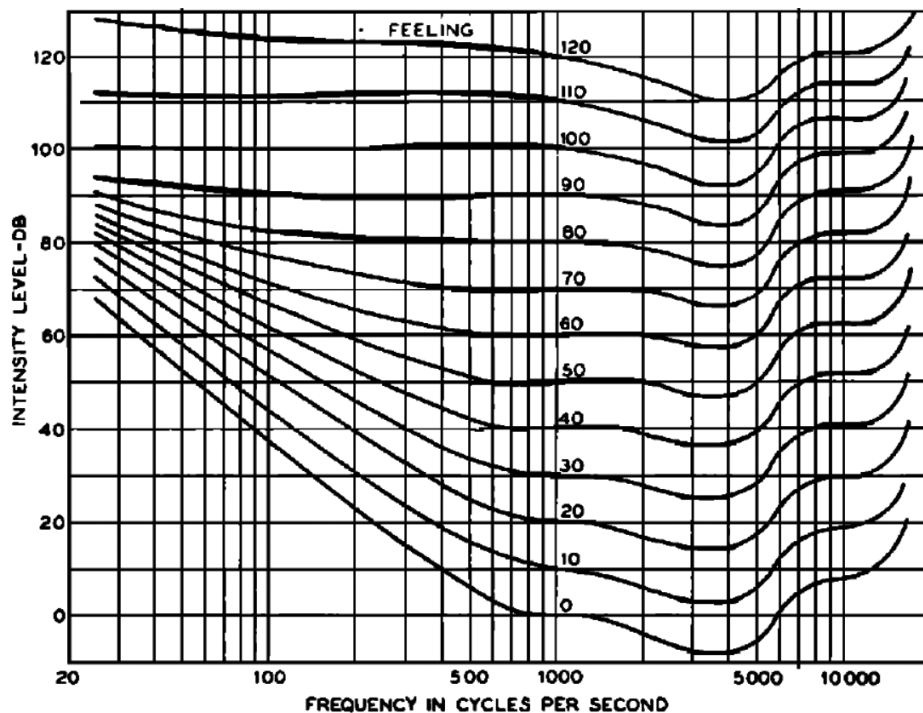


Abbildung 1: Kurven gleicher Lautheit. Vergleich zwischen der physikalischen Lautstärke bei 1000 Hz und der Lautheit (anstatt Hz wird hier cycles per second genannt, was dasselbe ist) . Die Zahlen 0 bis 120 in dB meinen die Lautstärke (hier anstatt Lautstärke 'Intensity Level DB' genannt). Folgt man einer Kurve so gibt diese an, wie stark man die Lautstärke ändern muß, um dieselbe subjektive Lautheit zu erreichen (wie das Wort 'Feeling' über der obersten Kurve andeutet). Aus der Originalveröffentlichung von [Fletcher & Munson1933].

¹Die Kurven gleicher Lautheit wurden seitdem 1933 noch öfters untersucht und vermessen. Die heute geltende Norm DIN ISO 226 (2006) für diese Kurven basiert auf der Messung von 12 Einzeluntersuchungen zwischen 1983-2002. Sie weichen ein wenig von den Kurven von Fletcher & Manson ab, sind aber nicht grundlegend verschieden.[Schmidt 2015]

Diese berühmten Kurven gleicher Lautheit, wie sie in Fig. 1 gezeigt werden, muß man also folgendermaßen lesen: Über jeder Kurve steht die physikalische Lautstärke in Dezibel (dB), mit der der Sinuston zuerst vorgespielt wurde. Z.B. wurde die tiefste Kurve mit 0 dB bei 1000 Hz vorgespielt, was etwa einem Wechselschalldruckpegel von 2×10^{-5} Pa (Pascal) entspricht. Geht man diese Kurve entlang, zu höheren oder tieferen Frequenzen, dann verändert sich die physikalische Lautstärke mit der der Ton vorgespielt werden mußte, um bei den Versuchspersonen dieselbe Lautheit hervorzurufen wie der Ton bei 1000 Hz.

Dies bedeutet also z.B. für den sehr leisen Sinuston von 0 dB bei 1000 Hz (unterste Kurve), daß dieser Ton bei 100 Hz mit fast 40 dB vorgespielt werden muß, damit man denselben Lautheitseindruck hat. Bei 30 Hz sind es sogar schon über 60 dB! Bei höheren Frequenzen ist zu erkennen, daß es um 3000 Hz zu einem Minimum kommt, der Ton also noch leiser vorgespielt werden muß um denselben Lautheitseindruck zu hinterlassen. Hier ist das menschliche Ohr also am empfindlichsten, Sinustöne in diesem Bereich werden von uns viel lauter gehört als in anderen Frequenzbereichen. Dies läßt zu sehr hohen Frequenzen um die 10 000 Hz oder höher wieder nach.

Nun erinnern wir uns an die notwendige Erhöhung beim 0 dB Sinuston bei 1000 Hz, der bei 30 Hz um über 60 dB erhöht werden mußte. Verfolgt man einen Sinuston mit höherem Wert bei 1000 Hz, etwa den bei 60 dB, dann ist dieser bei 30 Hz bei etwa 80 dB, muß also physikalisch nur noch um etwa 20 dB lauter gemacht werden um gleich laut zu erscheinen. Dies setzt sich hin zu lauter Kurven fort, und die 120 dB Kurve zeigt schließlich bei 30 Hz nur noch einen sehr geringen Anstieg, bis etwa 125 dB, also nur noch 5 dB mehr. Offenbar ist also die Abhängigkeit der empfundenen Lautheit bei verschiedenen Frequenzen abhängig von der Grundlautstärke, die bei 1000 Hz eingestellt wurde. Je höher diese Grundlautstärke ist, desto geringer fällt der Unterschied der wahrgenommenen Lautheit aus, verändert man die Frequenz.

Diese Tatsache führt nun zu den verschiedenen Gewichtungen, die man bei dB-Werten findet, die dB(A), dB(B) oder dB(C) Gewichtungen. Die dB(A) Kurve ist in etwa die, welche bei 1000 Hz bei 40 dB liegt. Diese liegt bei 30 Hz bei etwa 80 dB und so ist sie die Kurve, die sehr starke Veränderungen zeigt. Die dB(C) Kurve entspricht etwa der der 110 dB oder 120 dB Kurve. Da sich hier fast keine Änderung zeigt, bedeutet dies, daß praktisch keine Gewichtung benötigt wird. Die dB(B) Kurve war als eine Gewichtung definiert, die zwischen dB(A) und dB(C) liegt, wird aber nicht mehr verwendet. Andere Gewichtungen wurden ebenfalls zeitweise verwendet, etwa die dB(D) Kurve, die aber nicht aus den Kurven gleicher Lautheit abgeleitet wurde, sondern für dauerhaften Flugzeuglärm entwickelt wurde und eine stärkere Gewichtung für Frequenzen um 6000 Hz hat, die bei dieser Lärmart auffällig viel lauter erscheinen. Aber auch diese Gewichtung, wie noch einige andere, ist nicht mehr in Gebrauch.

Gewichtet wird hier nun nach Frequenzen. Bei der weitaus am häufigsten benutzten dB(A) Gewichtung werden also tiefere Frequenzen weniger stark gewichtet, da hier davon ausgegangen wird, daß diese nicht so laut wahrgenommen werden. Das

Frequenzspektrum von 20 Hz 20 000 Hz wird also in Abschnitte unterteilt, sogenannte Bänder, und für jedes dieser Bänder festgestellt, wie hoch die physikalische Lautstärke dort ist. Diese wird multipliziert mit der Gewichtungsfunktion, meist dB(A), so daß tiefere Frequenzen kleiner gerechnet werden. Schließlich werden alle gewichteten Bänder zusammengezählt und ergeben dann einen Lautheitswert, der dann eben nicht mehr als dB (physikalisch), sondern als dB(A) (nach der Wahrnehmung gewichtet) angegeben wird. So ist also dB(A) ein Wahrnehmungswert, von dem behauptet wird, er entspreche der wahrgenommenen Lautheit.

Die zwei heute noch gebräuchlichen Gewichtungen, dB(A) und dB(C) sind also für zwei verschiedene Grundlautstärken, dB(A) für Zimmerlautstärken, wenn einmal ein Auto vorbeifährt, wenn in der Ferne leise ein Flugzeug oder ein Zug zu hören ist, ein Windrad in 1 km Entfernung wuscht oder wenn Kinder in der Entfernung spielen. dB(C) hingegen ist für lauten Lärm, ein Flugzeug fliegt gut sichtbar über die Häuser, ein Zug fährt, oder bremst gar, gleich nebenan, dB(C) gilt in der Nähe einer Autobahn, gleich neben einem Kinderspielplatz, in einem Musikclub oder einem klassischen Konzert mit großem symphonischem Orchester.

Gesetzlich geregelt ist aber, daß *alle* diese Fälle, ob laut oder leise, mit dB(A) gemessen werden müssen. Dies führt dazu, daß lauter Lärm in Zahlenwerten erheblich kleiner gerechnet wird, als er den bekannten wissenschaftlichen Erkenntnissen nach ist. In diesem Fall fällt der Stand der Gesetzgebung also sogar noch vor den wissenschaftlichen Stand von 1933 zurück!

Um wieviel hier die Zahlen manipuliert werden läßt sich einfach an der Kurve in Fig. 2 sehen. Hier sind die Gewichtungskurven dB(A) bis dB(D) eingezeichnet und um wieviel dB sie einen physikalischen Schalldruck, also die Lautstärke, herunterrechnen. Fährt also z.B. ein Dieselfahrzeug, etwa ein Lastwagen oder ein Traktor vorbei, der vor allem tiefe Frequenzen aussendet, etwa um 50 Hz, dann liefert ein Meßgerät, das dB(A) mißt einen völlig anderen Wert als eines, das dB(C) mißt. Bei 50 Hz ist bei der dB(C) Kurve noch keine Gewichtung vorhanden, so daß der physikalische Wert ungewichtet übernommen wird. Bei dB(A) aber werden 30 dB abgezogen. Fährt der Lastwagen oder der Trecker in der Nähe vorbei, ist er so laut, daß mit dB(C) gemessen werden muß. Der Pegel bei 50 Hz könnte etwa um 100 dB liegen. Da das Gesetz aber kein dB(C) kennt, muß auch hier mit dB(A) gemessen werden. Der Wert liegt dann nur noch bei 70 dB(A) und ist meist noch im Bereich des gesetzlich erlaubten. Würde mit der korrekten dB(C) Messung gemessen wäre er weit über dem gesetzlichen Grenzwert und eine Straße dürfte in solcher Nähe zu einem Wohnhaus nicht mehr gebaut werden.

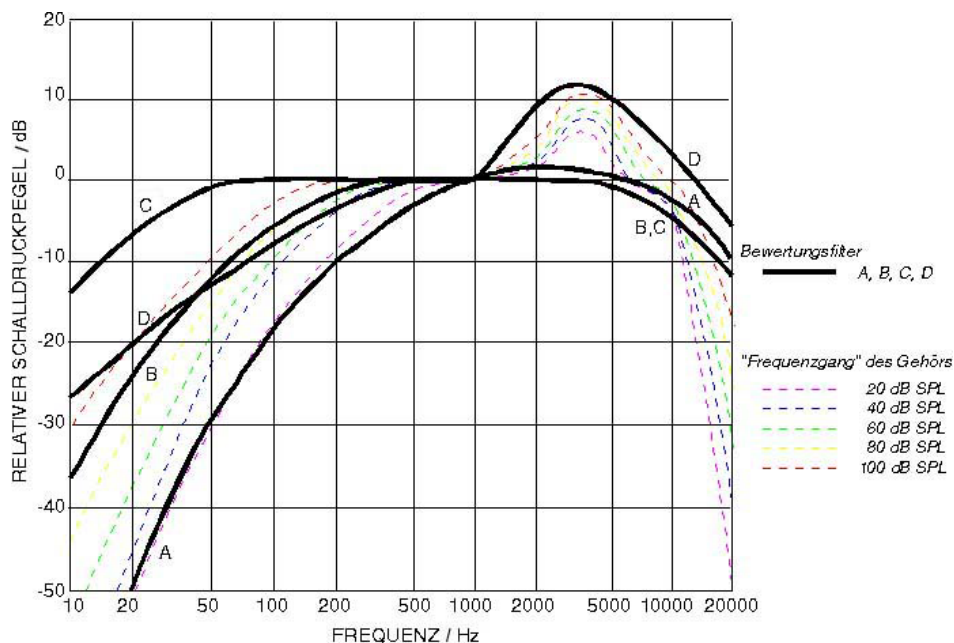


Abbildung 2: Bewertungsfilter für dB(A), dB(B), dB(C) und dB(D). Heute sind nur noch dB(A) und dB(C) gebräuchlich. Für laute Schalle ist dB(C) zu benutzen, für Zimmerlautstärke gilt dB(A). Leider ist im Gesetz nur dB(A) für alle Schallarten vorgesehen. So wird z.B. ein 50 Hz Brummen eines Dieselmotors mit dB(A) gegenüber dB(C) mit etwa 30 dB geringer angegeben. Würde hier mit den wissenschaftlich korrekten Werten gearbeitet, wären viele Anlagen nicht mehr genehmigungsfähig.

Wie kann ein solch grober Fehler in der Gesetzeslage und der Praxis passieren? Im weiteren Verlauf werden wir noch weitere solcher Fehler finden und uns mit der Praxis im Gebiet der Lärmmessung beschäftigen. Eine Antwort aber auf die Frage, warum heutzutage nur noch in dB(A) gemessen wird gab Viggo Kjær in einem Vortrag auf der Tagung *Forum Acusticum* in Budapest 2005, einem internationalen Fachtreffen für Akustik. Kjær ist ein weltbekannter Akustiker, der 1942 mit Vilhelm Brüel eine der wichtigsten Meßtechnikfirmen im 20. Jhd. begründet, und über viele Jahrzehnte geleitet hat, er genoß höchstes Ansehen in der Akustikerszene. Er berichtete über die Anfänge der modernen Meßinstrumente in der Nachkriegszeit. Zu Zeiten, als noch nicht jeder einen Computer hatte und man nicht einfach über das Internet für kleines Geld einen eigenen Schallpegelmessger kaufen konnte waren Meßapparate sehr teuer und nur in Firmen und Instituten vorhanden. Damals, so Kjær, überschwemmten vornehmlich amerikanische Meßtechnikfirmen den Markt mit Meßgeräten, die nur dB(A) messen konnten, also kein dB(C) oder andere Gewichtungskurven. Da dies de facto der Stand der meßtechnischen Möglichkeiten darstellte blieb der Gesetzgebung

nichts anderes übrig, als einzig dB(A) als Meßmethode festzuschreiben. Motivation hierfür soll eben dies gewesen sein, daß viele Flughäfen, Autobahnen, Straßen oder Industriegelände mit dB(C) Messungen nie hätten gebaut werden dürfen, wohl aber mit dem dB(A) Standard. Heute stellen sich solche technischen Probleme nicht mehr, und eine dB(C) Messung ist überhaupt kein Problem.

Die dB(A) Gewichtung ist also schlicht viel zu schlecht, um aus der physikalisch gemessenen Lautstärke eine psychologisch wahrgenommene Lautheit zu berechnen. Dies wurde auch schon früh so gesehen, und so wurde am 16. Juli 1968 eine Verwaltungsverordnung herausgegeben, die die krassesten Fälle von Falschmessungen ein wenig eindämmen sollte, die Technische Anweisung Lärm, kurz TA Lärm. Es handelt sich hier aber bis heute nur um eine Verwaltungsvorschrift, nicht um ein Gesetz. Allerdings ist die TA Lärm heute gerichtlich anerkannt. Auch in der Software, mit der Gutachterfirmen in der Akustik die Auswertungen der Messungen vornehmen, und mit denen Lärmgutachten erstellt werden haben die TA Lärm fest implementiert.

Diese TA Lärm aber ist, wie wir noch sehen werden, leider doch nur ein wenig Kosmetik. Sie benennt aber schon einige Phänomene der Lärmwahrnehmung. Im nächsten Kapitel wollen wir uns also mit dieser TA Lärm beschäftigen.

2 TA Lärm: Bässe, Impulshaftigkeit, Tonhöhen

Die dB(A) Messungen beziehen sich also auf die wahrgenommene Lautheit bei Sinustönen. Real erklingender Schall aber ist natürlich sehr viel komplizierter. Die Lärmgesetzgebung argumentiert aber so, als könne man die Lautheit eines Schalls dadurch ausrechnen, indem man die Lautheit der vielen einzelnen Sinustöne eines komplizierten Schalls einzeln ausrechnet, mit dB(A) gewichtet, und dann alles zusammen zählt. Dies ist jedoch eine nur sehr grobe Näherung, und in den meisten Fällen schlicht falsch. Die Technische Anweisung Lärm (TA Lärm) ist ein erster Ansatz, dies zu verbessern, bleibt aber weit hinter dem Stand der Forschung zurück.

Die grundlegende Annahme, von vielen Sinustönen auf einem komplexen Schall schließen zu können, indem man alle Sinustöne einfach zusammenzählt gilt in der Tat in vielen Bereichen der Akustik. Dies wurde schon von Georg Simon Ohm Anfang des 19. Jahrhunderts postuliert. Eine einfache Sinusschwingung war schon zu seiner Zeit bekannt als die Bewegung eines Pendels oder die einer Kreisbewegung. Die Häufigkeit, mit der diese Bewegung sich innerhalb einer Sekunde wiederholt wird Frequenz genannt und hat in der Akustik die Einheit Hertz, nach Heinrich Hertz, einem deutschen Physiker, der als erster die Radiowellen experimentell nachgewiesen hat. Ohm postulierte nun, daß alle komplizierten Schalle sich aus vielen einzelnen Sinusschwingungen zusammen setzen würden. Umgekehrt könnte man jede noch so komplizierte Schallwelle dadurch synthetisieren, daß man viele dieser Sinuswellen mit verschiedenen Stärken gleichzeitig schwingen läßt, sie einfach addiert.

Auf diesem Prinzip beruhen auch Musikinstrumente wie Synthesizer oder Orgeln.

Dieses Gesetz gilt in der Tat für den Schall in der Luft, wie Lärm ja meist übertragen wird. Dies zeigte zuerst Hermann von Helmholtz in seinem epochemachenden Buch 'Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Grundlage der Theorie der Musik' von 1863 [v. Helmholtz 1863]. Helmholtz hatte gezeigt, daß sich jeder Klang in einzelne Sinusschwingungen zerlegen läßt, die alle ihre eigene Stärke, ihre eigene Amplitude haben. Dieses Gesetz gilt nicht immer, es gibt Fälle in der Akustik, in der sich die Wellen gegenseitig beeinflussen, dies kann man bei Schall in Luft aber vernachlässigen.

Die Tatsache nun, daß dieses Gesetz in der Physik, hier der Akustik gilt heißt aber noch lange nicht, daß es auch in der Psychologie, also der Wahrnehmung von Schall und damit für Lärm gilt. Dies wurde und wird aber oft indirekt angenommen, wie im Falle der Lärmmessungen. Die Ermittlung der dB(A) Werte geht genauso vor. Der Schall wird in sogenannte Frequenzbänder zerlegt, welches Oktavbänder oder Terzbänder sind. Dies kann man sich an einem Klavier anschaulich vorstellen. Alle Sinustöne innerhalb einer Oktave (oder einer Terz), von einem c bis zum c, dem c der nächsthöheren Oktave (oder vom c zum e, der Terz von c), werden zusammengezählt. Daraus wird eine Lautstärke berechnet, die mit der dB(A) Kurve gewichtet, und somit zur Lautheit wird. Dies macht man für Frequenzen von 63 Hz bis etwa 4000 Hz, was acht Oktaven (oder 24 Terzen) entspricht. Hierbei ist 63 Hz die Mitte des ersten Oktavbandes, 4000 Hz die Mitte des letzten. In dieser Rechnung ist Infraschall, der vor allem von Windkraftanlagen ausgeht, nicht enthalten. Infraschall ist Schall mit Frequenzen unter 16 Hz.

2.1 Zeitintegration und Mittelung von Schallereignissen

Die berechneten Lautheiten in den verschiedenen Oktaven zählt man wiederum einfach zusammen und kommt zu dem Lautheitswert LAF, wie sie in der TA Lärm steht. Das L steht für Lautheit, das A für die A-Bewertung und das F für die Zeitbewertung².

Die Zeitbewertung kann F = fast (schnell) mit 125 Millisekunden (ms), slow (langsam) mit 1 Sekunde oder I = Impuls mit 35 ms sein. Dies bedeutet, daß alle Schallereignisse innerhalb von 125 ms, einer Sekunde oder eben 35 ms zusammengezählt werden. Jeder, der sich einmal einen Schallpegelmessgerät gekauft hat kennt diese Einstellungen für F (fast) und S (slow). Wird 'slow' eingestellt ändert sich die Anzeige der Lautheit in dB(A) einmal pro Sekunde, wird 'fast' eingestellt ist dies viel schneller, acht mal pro Sekunde.

Diese Werte sind wichtig wenn es um Impulshaftigkeit geht, was wir weiter unten erörtern. Hier sei aber schon einmal auf eine grundlegende Eigenschaft der Hörwahrnehmung hingewiesen. Schallereignisse, die zeitlich schnell aufeinander folgen können von uns Menschen nur mit einer begrenzten zeitlichen Nähe noch unterschieden werden. Die kann man in der Musik

²Zeitbewertung F nach DIN EN 60651, seit 2003: IEC 61672.

sehr schön sehen. Ein mittelschnelles Tempo wäre 120 Beats Per Minute (BPM), also Schläge pro Minute. Somit hat man zwei Schläge pro Sekunde. Die Musiker unter den Lesern werde natürlich wissen, daß BPM der Zeitwert einer Viertelnote ist. Diese wird oft weiter unterteilt, häufig bis zu einer Sechzehntelnote. Dann haben wir viermal so viele Schläge, also insgesamt acht pro Sekunde. Dem können wir ohne weiteres folgen. In schnellen Musikstilen, wie Bebop, Flamenco, schneller indischer klassischer Musik und vielen weiteren Stilen gibt es aber auch schnellere Tempi, 160 BPM oder gar 240 BPM, etwa im *amadinda*, einer afrikanischer Xylophonmusik in Buganda. Hier haben wir schon 16 Schläge pro Sekunde! Dem können wir fast nicht mehr folgen. Erhöhen wir die Frequenz noch mehr, etwa auf 20 oder 30 Schläge pro Sekunde schaltet unser Wahrnehmungsapparat um, wir hören nicht mehr einzelne Schläge sondern einen tiefen Brummtönen. Denn auch Töne sind ja nichts anderes als Wiederholungen eines Klangs pro Sekunde, die wir dann aber in Hz angeben.

Bekanntlich beginnt unsere Hörwahrnehmung bei etwa 16-20 Hz, was in der Musik auch die Höchstgrenze ist, bei der ein Rhythmus gespielt wird. Dies liegt daran, daß das Gehirn alle Schallereignisse innerhalb von etwa 50 ms als eine Einheit verarbeitet und zeitlich nicht weiter differenziert. 50 ms entspricht 20 Mal pro Sekunde, also 20 Hz, ab wo sich wiederholende Schallereignisse als Tonhöhe wahrgenommen werden. Daher ist die Messung von Lärm mit unterschiedlichen Zeiträumen für das Zusammenzählen, die Integration wichtig.

Nun hören wir aber, daß Schall unter 16 Hz als Infraschall bezeichnet wird und unhörbar sei. Einen musikalischen Rhythmus aber hören wir ja ohne Weiteres. Wie kann das sein? Das liegt einfach darin, daß langsame Ereignisse meist impulsartig sind, wie etwa die Schläge auf eine Trommel oder Gitarrentöne. Wenn es also acht Tommelschläge pro Sekunde gibt hören wir die höheren Frequenzen dieser Tommelschläge. Das heißt aber nicht, daß hier kein Infraschall vorhanden ist. Wenn wir eine solche Musik nach Frequenzen analysieren, und Frequenzen unter 16 Hz mit einbeziehen würden wir bei einem Trommelrhythmus mit acht Schlägen pro Sekunde eine Frequenz von 8 Hz feststellen.

Infraschall ist aber meist anders gemeint. Wenn wir uns den Schall eines solchen Trommelrhythmus in seinem zeitlichen Verlauf anschauen würden wir viele Impulse sehen. Wenn wir einen Infraschall in seinem zeitlichen Verlauf anschauen würden wir eine Art weicher, langgezogener Sinuswelle sehen. Diese Sinuswelle hat nur eine Frequenz von 8 Hz, die des Trommelrhythmus hat noch höhere Frequenzen. Daher hören wir den Trommelrhythmus, über seine höheren Frequenzen, nicht aber den typischen Infraschall, der im Prinzip nur eine reine Sinuswelle ist.

Dies spielt aber bei dem Lärm von Windkraftanlagen eine wichtige Rolle. Hier wird oft von einem Klang berichtet, der wie ein Wusch klingt. Dieser Wusch ertönt jedesmal, wenn sich eines der Rotorblätter über einen bestimmten Punkt hinausbewegt. Dies geschieht vielleicht 2-4 Mal pro Sekunde. Hier liegt also in der Tat ein Infraschall mit 2-4 Hz vor. Allerdings hören wir die höheren Frequenzen dieses Wusches. Zusätzlich zu diesem Schall aber schwingen Windräder noch mit anderen Frequenzen,

die keine höheren Obertöne haben, also keinen direkt hörbaren Wusch erzeugen. Diese Schwingungen sind häufig ebenfalls im Infraschallbereich, aber nicht direkt hörbar. Sie werden aber wahrscheinlich durch das Gleichgewichtssystem wahrgenommen.

Auch wenn wir später noch zum Lärm von Windkraftanlagen kommen wird hier ja schon deutlich, wie viel schwieriger die Sachlage ist und man nicht einfach nur Sinusschwingungen addieren darf. Der Zeitraum spielt offenbar auch eine wichtige Rolle, hier die 50 ms, über die das Ohr alle Schallereignisse als eine Einheit oder Gestalt, als einen Sound versteht. Musikalisch ist gerade hier die Grenze, ab der aus einem Rhythmus ein Klang, ein Sound wird und dies gilt für alle Schallereignisse, für Sprache oder eben auch für Lärm.

2.2 Impulshaftigkeit

Das Beispiel des musikalischen Rhythmus ist auch gut geeignet, ein zweites Problem von Lärm zu behandeln. Jeder kennt es, von einem plötzlichen Knall erschreckt zu werden. Jeder, der neben einer Baustelle gelebt hat kennt die vielen Schläge, Hämmer, also die Schallimpulse, die oft sehr nerven. Diese plötzlichen Impulse sind es, die einen aus der Konzentration bringen und die Aufmerksamkeit eben auf dieses Geräusch lenken. Andere Geräuscharten, die gleichmäßiger sind verursachen dieses Aufschrecken nicht, etwa ein gleichmäßiges Rauschen einer Straße oder auch das Rauschen des Meeres oder eines Waldes, welche oft als eher entspannend oder erfrischend wahrgenommen werden. Diese *ambient sounds* sind es auch, die als Entspannungsmusik in Lounges und Bars, in Fahrstühlen und in Hotels eingesetzt werden, weich, ohne viele Impulse, in der Hoffnung, dem Gast Entspannung, ein chill-out zu ermöglichen.

Nun stellen wir uns zwei Geräusche vor, ein ganz gleichmäßiges und eines aus unregelmäßigen Impulsen. Wenn beide über einen bestimmten Zeitraum gemittelt werden können sie denselben dB(A) Wert ergeben. Der erste Lärm ist zwar kontinuierlich bei sagen wir 60 dB(A), der zweite ist aber meist sehr leise, sagen wir 30 dB(A), hat aber ab und zu einen lauten Impuls von 120 dB(A). Wenn man beide über einen gewissen Zeitraum mittelt werden sich beide im Mittel nicht groß voneinander unterscheiden, der impulshafte Lärm könnte also am Ende auch mit 60 dB(A) angegeben werden. Beide Lärme unterscheiden sich aber grundlegend, der erste ist ein wenig störend, der zweite aber kann einem den letzten Nerv rauben. Auch hier kann es also nicht richtig sein, durch einfache Addition den dB(A) Wert zu ermitteln.

Dies ist aber gesetzlich so geregelt. Die Mittelungen erfolgen über drei mögliche Zeiträume:

- Tag (6.00 18.00 Uhr): 12 Stunden
- Abend (18.00 22.00 Uhr): 4 Stunden
- Nacht (22.00 6.00 Uhr): 8 Stunden

Der oben erwähnte Pegel LAF wird also acht mal pro Sekunde ermittelt, man hat also acht Werte pro Sekunde. Am Tag ergeben sich dadurch $8 * 60 \text{ Sekunden} * 60 \text{ Minuten} * 12 \text{ Stunden} = 345\,600$ LAF-Werte. Diese werden alle zusammen gezählt und durch 345 600 geteilt und ergeben so den Mittelungspegel Leq, auch LAeq oder Lm genannt. Diese Art der Messung ist offenkundig ungeeignet, einen Zusammenhang zwischen physikalischem Schall und einem Lärmeindruck herzustellen, und damit Lärm zu messen. Die TA Lärm fügt daher hinzu, daß einzelne Geräuschspitzen am Tag den Maximalpegel nicht um 30 dB(A), in der Nacht nicht um 20 dB(A) überschreiten dürfen. Die Maximalwerte sind abhängig vom Ort und Zeitraum:

- a) in Industriegebieten 70 dB(A)
- b) in Gewerbegebieten tags 65 dB(A) nachts 50 dB(A)
- b) in Kerngebieten, Dorfgebieten und Mischgebieten Tags 60 dB(A) Nachts 45 dB(A)
- b) in allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten Tags 55 dB(A) Nachts 45 dB(A)
- b) in reinen Wohngebieten tags 50 dB(A) nachts 35 dB(A)
- b) in Kurgebieten, für Krankenhäuser und Pflegeanstalten tags 45 dB(A) nachts 35 dB(A)

Aus: TA Lärm vom 26. August 1998 (letzte Fassung).

Treten einzelne Impulse in einem sonst gleichmäßigen Dauerschall auf, so sind laut TA Lärm 'je nach Störwirkung' Zuschläge von 3 oder 6 dB(A) zum LAeq hinzuzurechnen (TA Lärm A.2.4.4.). In der Regel wird hier 6 dB(A) hinzugerechnet.

Die Beurteilung aber, ob es solche Spitzen gibt oder nicht ergibt sich aus dem sogenannten Taktmaximalmittelungspegel LAF_{Teq}. Dieser wird berechnet, indem Zeiträume von jeweils fünf Sekunden betrachtet werden. Der maximalen LAF während dieser fünf Sekunden wird als einzelner Wert genommen. Jedes fünfsekündige Intervall hat also einen Wert. Nun wird wiederum über die entsprechenden Zeiträume (12, 4 oder 8 Stunden) diese Maximalwerte zusammengezählt und durch die Anzahl der fünf-Sekunden Intervalle geteilt.

Die Konsequenz ist also, daß wenn zu bestimmten Zeitpunkten sehr viele Spitzen auftauchen, zu anderen Zeiten aber nicht, der Mittelwert so gering ist, daß es so aussieht, als gäbe es gar keine Pegelspitzen. Der Aufschlag von 6 dB(A) wird also nicht berechnet. Dies gilt auch, wenn ein Impuls zwar auftaucht, doch vielleicht nur einmal pro Minute. Diese Minute hat 12 solcher fünf-Sekunden Intervalle. Ist eines groß, die anderen 11 aber klein wird das Mittel ebenfalls sehr klein sein.

Das ändert aber nichts daran, daß man durch einen Impuls jede Minute aus der Konzentration gerissen wird, der Blutdruck steigt und weitere gesundheitsgefährdende Stressreaktionen des Körpers folgen, wie wir sie unten noch diskutieren werden.

Auch hier ist die TA Lärm also im Prinzip einem richtigen Problem auf der Spur, aber nicht im mindesten dazu geeignet, es zu lösen.

2.3 Tonhaftigkeit, Informationsgehalt

Meeresrauschen kann sehr entspannend sein. Wenn wir am Strand liegen erreichen Meereswellen, die an den Strand schlagen gerne Lautstärken von 90 100 dB(A). Oft bemerkt man erst wenn man den Strand verläßt, wie laut das Meer wirklich war, indem man die Ruhe hinter einer Düne oft als dann doch recht erleichternd findet. Trotzdem wird Meeresrauschen meist als entspannend empfunden, wenn man es nicht übertreibt.

Als Gegenbeispiel zu solcher Entspannung könnte man den Wecker anführen. Er soll uns nerven und aufwecken. Weckertöne sind daher meist kein angenehmes Rauschen. Sie sind meistens einzelne Sinustöne oder Klänge, also Töne wie sie von Musikinstrumenten oder der Singstimme ebenfalls produziert werden könnten. Wir können Sie nachsingen, ihnen eine Tonhöhe zuschreiben, eine Taste auf dem Klavier finden, die dem Ton entspricht.

Diese Töne unterscheiden sich also grundsätzlich von Meeresrauschen oder von anderen Rauscharten. Der Unterschied liegt darin, daß Töne ein sogenanntes harmonisches Obertonspektrum besitzen. Nehmen wir den Kammerton a, der eine Grundtonhöhe von 440 Hz besitzt. Spielt etwa ein Klavier dieses a, ist es physikalisch aus vielen Sinustönen zusammengesetzt. Der Ton besteht aus einem Grundton und vielen Obertönen. Alternativ sagt man, er habe viele Partialtöne, wobei dann der Grundton der erste Partialton ist.

Diese Obertöne müssen aber ganzzahlige Vielfache des Grundtons sein. Ist der Grundton also 440 Hz dann ist der erste Oberton (der zweite Partialton) bei $2 \times 440 \text{ Hz} = 880 \text{ Hz}$. Der dritte Partialton ist bei $3 \times 440 \text{ Hz} = 1320 \text{ Hz}$, usw. Klänge, die solche Obertonstrukturen haben hören wir als einzelne Töne mit einer bestimmten Tonhöhe. Weicht auch nur ein einzelner Partialton von dieser Reihe ein wenig ab, dann klingt der gesamte Ton sofort sehr schief, rau und unangenehm. Weicht ein Partialton weit ab, dann hören wir einen zweiten Ton neben dem Ton a, wir hören den abgewichenen Partialton als eigenständigen Ton neben dem Ton a.

Mit anderen Worten, unser Gehirn macht die Musik. Wir fusionieren Klänge, die aus harmonischen Obertonstrukturen bestehen zu einem einzigen Ton und hören nicht etwa jeden Partialton einzeln. Dies aber eben nur, wenn die Partialtöne harmonisch zueinander sind, also ganzzahlige Vielfache des Grundtons. Dieses Vermögen des Gehirns ist uns meist gar nicht bewußt, wir kennen es ja nicht anders. Es ist aber eine großartige Leistung, und Versuche, diese Fähigkeit im Computer nachzubilden sind bis heute nur von begrenztem Erfolg, obwohl hier bereits viel Forschungsarbeit investiert wurde.

Der Grund warum das menschliche Ohr und Gehirn harmonische Obertonspektren zu einzelnen, fusionierten Tonhöhereindrücken

zusammenfaßt ist höchstwahrscheinlich der, daß solche harmonischen Obertonstrukturen in der unbelebten Natur nur sehr selten sind. Allerdings finden sie sich regelmäßig bei Tieren und Menschen. Dies hängt damit zusammen, daß es für ein physikalisches System nur in bestimmten Fällen möglich ist, eine so geordnete Struktur wie ein Obertonspektrum zu erzeugen. Das Meeresrauschen schafft das nicht, auch nicht der Wind in den Bäumen oder das Knacksen von Ästen.

Um ein geordnetes, harmonisches Obertonspektrum zu erzeugen brauchen Tiere und Menschen ihren Stimmapparat. Dieser ist hoch kompliziert und organisiert seine Schwingungen selbst, es ist ein selbstorganisierendes System. Solche Systeme zeichnen sich dadurch aus, daß sie es schaffen, durch eben sehr komplizierte Mechanismen am Ende einen hoch geordneten Zustand zu erreichen, hier das harmonische Spektrum. Beim Stimmapparat des Menschen sind es die Stimmlippen, die durch einen Luftstrom, den Atem in Bewegung gesetzt werden. Hier spielen die Formen der Stimmlippen, deren Zusammenspiel, der Luftstrom durch die Lippen und vieles mehr eine Rolle [Bader 2013].

Also sind Klänge mit harmonischen Obertonstrukturen etwas besonderes, sie weisen darauf hin, daß der Klang wahrscheinlich von einem Menschen oder einem Tier stammt. Darauf müssen wir unsere besondere Aufmerksamkeit lenken, wir müssen uns dafür mehr interessieren als für das Rauschen des Windes. Es scheint auch in der Tat so zu sein, daß wir auf solche Klänge automatisch mit viel mehr Aufmerksamkeit reagieren als auf Klänge ohne solche Töne.

Dabei ist es unerheblich, ob neben einem Ton noch weitere rauschhafte Klänge mit zu hören sind. Diese werden als Hintergrund gehört. Allerdings deutet das Vorhandensein einer tonhaften Komponente in dem was wir gerade hören darauf hin, daß uns hier etwas zu interessieren habe und unsere Aufmerksamkeit wird geweckt.

Dies scheint evolutionär in uns verankert. Die Tatsache, daß uns heute viele weitere Schallquellen umgeben, die ebenfalls Töne von sich geben, quietschende Zugbremsen, Flugzeuge, brummende Motoren, Handytöne, Wecker usw. hat uns hierbei nicht abstupfen lassen. Im Gegenteil, gerade die Tatsache, daß wir harmonische Töne in der Musik gebrauchen zeigt, wie besonders diese Töne für uns sind. Und schließlich besteht unsere Sprache zu einem Großteil aus solchen Tönen. Alle Vokale a, e, i, o, u sind solche Klänge (die meisten Konsonanten p, b, t, etc. aber natürlich nicht).

Alles Tonhafte erscheint uns also so, als ob sich dahinter etwas Lebendiges, vielleicht Intelligentes, vielleicht Interessantes oder auch Gefährliches befindet und wir uns eben dafür interessieren sollten. So ist es wohl zu erklären, daß unser Ohr und unser Gehirn solche harmonischen Klänge zu einzelnen Tönen fusioniert, eine Fähigkeit, die sehr kompliziert ist, bis heute nicht wirklich verstanden, und die von der Evolution in unseren Gehirnen so überhaupt nicht hätte eingerichtet werden müssen.

Die Vielfalt der Artikulationen, die mit Tönen möglich sind, die Sprache mit allen möglichen Mittelungsarten, die Musik, das Singen der Vögel und Gackern der Hühner, all dies ist sehr vielfältig und wird je nach Art des Klangs anders wahrgenommen. Alle diese Arten nun faßt die TA Lärm unter den Begriff 'Tonigkeit und Informationshaltigkeit' und befindet, daß in

solchen Fällen bis zu 6 dB(A) auf eine Schallmessung aufgeschlagen werden soll.

Dies ist angesichts der Vielfalt der Töne und Informationen eine derart grobe Schätzung, daß auch hier die Gesetzgebung und die TA Lärm weit hinter den Stand der Forschung herhinkt.

Das Ohr addiert nämlich nicht einfach die einzelnen Parialtöne, wie es im deutschen Gesetz steht, es behandelt diese in hochkomplizierter Weise. Das akustischen Schallsignals, das an der Ohr gelangt, wird ins Innenohr übertragen. Hier regt es die Basilarmembran zu Schwingungen an. Auf dieser Membran sitzen Nervenzellen mit sogenannten Stereocilien, kleinen Haarzellen, die durch diese Membran bewegt werden. Durch diese Bewegung öffnen sich in der Haarzelle winzige Kanäle, durch die kleinste Moleküle, Ionen, in die Zelle einfließen. Dies nun bewirkt in der Zelle eine Spannungsänderung, eine Depolarisation, welche der Nervenimpuls ist, der ans Gehirn weitergegeben wird.

Da diese Übertragung der akustischen Schwingung auf der Basilarmembran zu einem elektrischen Nervenstrom in der Haarzelle sehr kompliziert ist, kann es schlicht nicht sein, daß die einzelnen Partialtöne eines Klangs einfach zusammengezählt werden, um zu einem Lautheitseindruck zu kommen. In der Tat findet bei dieser Übertragung u.a. eine Gleichrichtung der Zeitpunkte statt, mit der die verschiedenen Partialtöne am Ohr ankamen. Das Ohr versucht, diese Zeitpunkte zu synchronisieren [Bader 2015]. Hierdurch werden harmonische Obertonspektren verstärkt, da die Nervenimpulse, die vom Ohr ans Gehirn gehen dann ebenfalls synchron sind. Anstatt also einer ungeordneten Abfolge der Nervenimpulse ergibt sich ein starker Nervenimpuls auf vielen Nervenkanälen gleichzeitig. Diese Synchronisation wird in einzelnen Neuronenverbänden, die dem Ohr unmittelbar nachgeschaltet sind sogar noch verstärkt [Joris 1994].

Diese neuronalen Befunde zeigen sich auch in Hörtests. So wird das Profil eines Klangs, also die Frequenzrelationen benutzt, um Klänge lauter oder leiser wahrzunehmen. Dies geschieht bereits bei nicht-harmonischen oder inharmonischen Klängen, also solchen, die eben keinen fusionierten Ton aufweisen [Green 1988]. Diese Verarbeitung ist sehr kompliziert und schwer zu berechnen. Für einfache harmonische Klänge, wie wir sie hier zu verstehen versuchen, zeigen aber schon einfache Experimente, daß diese harmonischen Klänge bis zu 9 dB lauter gehört werden als Klänge mit derselben physikalischen Energie, die keine harmonischen Spektren haben [Drennan 2001].

Der Hörapparat ist jedoch noch viel komplizierter, was hier nicht im Detail diskutiert werden kann. Es finden vielfältige Maskierungen statt, es werden also einzelne Klangelemente von anderen überschattet. Dies wird im musikalischen Kompressionsformat MP3 verwendet und ist dessen Betriebsgeheimnis. Der sogenannte cochleare Verstärker macht impulshafte Klänge gegenüber einem gleichmäßigen Hintergrundrauschen lauter. Dies sind vor allem Sprache, unregelmäßiger Lärm, Impulse, also das Wusch eines Windrads, das Knattern eines Treckers, das Vorbeirauschen eines Autos usw. Diese Mechanismen sind einerseits wiederum auf der Ebene der Übertragung der Schallwelle auf der Basilarmembran in Nervenimpulse. Viele dieser

Mechanismen sind aber Rückkopplungen von höheren Gehirnregionen. Die einfachsten hier beschriebenen finden zwischen dem Innenohr, dem nächsten Neuronenverband hinter dem Ohr, dem Nucleus Cochlearis und dem darauffolgenden Nervenverband, dem sogenannten Trapezkörper statt. Die Nervenimpulse vom Ohr gelangen zum Nucleus Cochlearis, werden dort verarbeitet, was sehr schnell geschieht, und werden zum Trapezkörper weitergeleitet. Dieser leitet die Nervenimpulse einmal zu höheren Gehirnzentren, dann aber auch wieder direkt zurück zum Innenohr. Hier wirken die Nervenzellen, die die Energie der Schallwelle von der Basilarmembran in Nervenimpulse übersetzt haben plötzlich auf diese Membran zurück. Dies können diese Nervenzellen, da sie sogenannte Motorproteine besitzen, also Moleküle, die sich bewegen können. So ziehen sich diese Zellen in sich zusammen oder dehnen sich aus und klopfen somit aktiv gegen die Basilarmembran. Dies erzeugt wiederum einen Schall, der mit einem Mikrofon am Außenohr aufgenommen werden kann. Das Ohr wird also zum Lautsprecher. Diese otoakustischen Emissionen werden z.B. in der Diagnostik bei Hörschäden von Kleinkindern verwendet. Ist das Kind taub bleiben diese Schallwellen aus.

Die Hörforschung hat in den letzten Jahrzehnten eine schier unendliche Flut an Erkenntnissen über den hoch komplizierten Hörapparat gewonnen, von denen die obigen nur einige Beispiele sind. Ganze Bibliotheken werden so mit Wissen um den Apparat gefüllt. Nichtsdestotrotz findet sich in der TA Lärm ein lapidarer Aufschlag für Informationshaltigkeit von 6 dB(A)!

Hierfür gibt es aber noch nicht einmal eine Meßvorschrift, wie es sonst üblich ist. Es bleibt also dem Gutachter überlassen, ob er nach seinem subjektiven Empfinden im Lärm eine solche Tonhaftigkeit oder einen 'Informationsgehalt' auszumachen in der Lage ist oder nicht.

Hinzu kommt, daß der Lärm selbst von den Gutachtern während des Vorgangs der Begutachtung meist gar nicht gehört wird. Die Gutachter verlassen sich etwa bei Motoren auf die vom Hersteller angegebenen Meßwerte des Lärms. Diese beinhalten natürlich keine Angaben über eine mögliche Tonhaftigkeit, da diese ja keine Meßvorschrift hat und so auch nicht gemessen werden kann.

Das heißt aber nicht, daß es keine Meßmethoden für solche Fälle gäbe. Ein Blick in ein einfaches Tonstudio zur Produktion von Musik genügt, um hier dutzende von Softwaretools, PlugIns oder auch analoge Effektgeräte zu finden, die genau dies tun. Eine Messung der Tonhaftigkeit ist für Software zur Minderung von Störgeräuschen auf Aufnahmen, das Knistern eines Plattenspielers, das Rauschen eines Tonbands, nötig. Sie wird eingesetzt bei der automatischen Extraktion einer Partitur aus einem Musikstück, bei dem man also in den Rechner eine CD einlegt und die Software die Melodien und Akkorde aus dem Klang erkennt. Auch Gitarrensynthesizer, die aus dem Klang einer E-Gitarre die Noten herausfinden, die der Gitarrist gerade spielt sind seit den 80er Jahren auf dem Markt, damals noch als analoge Geräte. Die Liste ist noch länger.

Es existiert also eine große Vielzahl von Algorithmen, Schaltungen, Geräten und Software zur Berechnung von Tonigkeit

oder Informationshaltigkeit, leider aber nicht in der deutschen Gesetzgebung. Die TA Lärm benennt zwar Tonhaftigkeit, nennt aber keine Rechenvorschriften, diese zu berechnen. Es gibt dazu allerdings eine DIN Norm, DIN 45681 'Akustik, Bestimmung der Tonhaltigkeit von Geräuschen und Ermittlung eines Tonzuschlages für die Beurteilung von Geräuschimmissionen'. Diese ist jedoch zur Bestimmung von Tonalität fast völlig ungeeignet.

DIN 45681 berechnet aus dem Geräusch das Spektrum, also die Amplituden der einzelnen Teiltöne. Wenn der Geräusch ein wirkliches Rauschen ist, ohne irgendeinen Ton, den man heraushören kann dann müßten alle Frequenzen in etwa die gleiche Lautstärke haben. Gibt es aber einen einzelnen heraushörbaren Ton dann müßte dieser viel lauter sein als seine Umgebung. DIN 45681 ist eine Vorschrift, genau dies zu untersuchen.

Allerdings geht DIN 45681 davon aus, daß der herausstechende Ton immer praktisch exakt die gleiche Tonhöhe hat und nicht mal lauter und leiser wird. Nehmen wir z.B. das Brummen eines Lastwagens, eine Polizeisirene, das Schreien eines Kindes, Flugzeug- oder Schienenlärm, dann hört man in allen diesen Geräuschen klar eine tonale Komponente, die heraussticht. Bei keinem dieser Lärmarten aber steht der Ton still, weder in der Frequenz noch in der Amplitude. Beim Motor ändert sich die Drehzahl ständig leicht, bei der Polizeisirene sind es zwei verschiedene Töne, die sich auch deshalb leicht ändern, da die Fahrzeuge fahren, ein Kind kann niemals einen einzelnen Ton exakt halten, selbst für ausgebildete Sänger eine Herausforderung, Ein Flugzeug bewegt sich ebenfalls, so daß auch hier die Tonhöhe sich permanent erhöht oder erniedrigt und die Bremsen eines Zuges quietschen entsprechend der Geschwindigkeit des Zuges und werden ständig lauter und leiser. Eigentlich gibt es fast keine Geräusche, bei denen tonhafte Komponenten stehen, wie es DIN 45681 annimmt.

Daher liefert die Meßvorschrift dieser DIN Norm im Normalfall praktisch nie einen Wert. Die Norm ist daher völlig unzureichend für die Messung von Tonhaftigkeit in Lärm. Man müßte also schon zynisch sein, wollte man sich etwa darüber freuen, daß die Norm in der TA Lärm nicht explizit genannt wird, sie würde mehr Schaden anrichten als Nutzen.

Allerdings gibt es weit bessere Methoden auf dem Markt. Eine Methode ist die Einbettung von Tonalität in ein sogenanntes Lautheitsmodell [Sottek 2016]. Solche Modelle versuchen die Funktionen des Ohres nachzubilden und eine wahrgenommene Lautheit dadurch vorherzusagen. Diese Methoden sind denen weit überlegen, die nur auf eine einfachen Frequenzanalyse stützen. Ist ein solches Modell erst einmal vorhanden, kann Tonalität viel realistischer nachgebildet werden. Ein anderer Ansatz ist, viel kürzere Zeitintervalle zu benutzen, als sie die DIN Norm vorschreibt [Desainte-Catherine & Marchand 2000]. Diese Methode ist zwar nicht so ausgefeilt wie ein Lautheitsmodell, aber auch sie ist erheblich besser als die vorhandene DIN Norm.

3 Gesundheitsschäden durch Lärm

Die nachgewiesenen Gesundheitsschäden durch Lärm sind [WHO Noise Guidelines 2018]

- Bluthochdruck
- Koronare Herzkrankheit
- Schlaganfall
- Schlafstörungen und die daraus resultierenden Herz- und Bluthochdruckerkrankungen
- Genervtsein (annoyance), welches inzwischen gleichberechtigt neben den anderen Erkrankungen angesehen wird
- Gedächtnis-, Aufmerksamkeits-, Lese- oder Leistungsstörungen, vor allem bei Kindern
- Permanenter Tinnitus

Die WHO schätzte zuletzt, daß jedes Jahr etwa 1.6 Million Lebensjahre allein durch Transportlärm und allein in Westeuropa 'verloren' gehen [WHO Noise Guidelines 2018]. Hierbei handelt es sich um Lebenszeitverkürzungen, die aufgrund von Lärm entstehen. Früher wurde dies auch auf die durchschnittliche Lebenszeit umgerechnet, so daß es in Europa jährlich etwa 30.000 Lärmtote gibt.

In den letzten Jahren wurde das Genervtsein als gleichwertige Gesundheitsschädigung anerkannt. Die WHO geht etwa für annoyance davon aus, daß jährlich 654 000 Jahre an Leben verloren gehen, wieder allein durch Transportlärm in Westeuropa.

3.1 Subjektive Abhängigkeit von Lärm

Oft werden Beschwerden über Lärm relativiert, indem dessen Akzeptanz durch den Verursacher angeführt wird. Der eigene Lärm störe die Menschen viel weniger als der Lärm der Nachbarn. Die Lärmforschung unterscheidet daher verschiedene Formen von Lärm

- a) Lärm, der gesundheitsschädlich ist, egal wer ihn produziert
- b) Lärm, der gesundheitsschädlich ist, da er nervt (in der englischen Fachliteratur als annoyance gezeichnet)

Die Mechanismen, die zu Gesundheitsschäden führen sind bei beiden gleich. Lärm produziert einen Fluchtreflex, der mit einer Ausschüttung von Angst- und Stresshormonen wie etwa Adrenalin einhergeht [Babisch 2006]. Dies belastet den Körper, so daß es zuerst zu Bluthochdruck kommen kann. Langfristige Schäden durch Lärm sind damit Schlaganfall und Herzinfarkt.

Doch auch das Genervtsein durch Lärm führt meist zu einer Erhöhung des Blutdrucks mit ähnlichen Folgeschäden. Allerdings treten hier weitere Schäden auf:

- a) Die Ablenkung durch Lärm führt zu einer Verminderung der Konzentration und somit zu Leistungssenkung.
- b) Die Ablenkung durch Lärm führt zu einem Einbruch in die Privatsphäre. Da Schall ein Kommunikationsmittel ist führt das Poltern eines Nachbarn dazu, daß der Geschädigte den Eindruck hat, der Nachbar säße quasi mit auf der Couch im Wohnzimmer. Hierdurch werden Gedankengänge oder Gespräche unterbrochen, die emotionale Gestimmtheit erheblich gestört oder private Abläufe behindert.
- c) Durch Senkung der Wohnqualität sinkt auch der Wert einer Immobilie. Dies kann auf dem Land in einigen Fällen zu Verarmung führen, wird etwa ein Windrad neben ein Eigenheim gesetzt und damit die Immobilie wertlos. Ein Wohnen ist dann dort fast nicht mehr möglich, ein Wegzug auch nicht. Dasselbe gilt für Wohnungen im einkommensschwachen Bereich, hier entstehen Lärmghettos, wie etwa im Rheintal oder in der Nähe von Flughäfen. Eine solche Existenzgefährdung ist nicht nur für den Einzelnen ein großes Problem, hier entstehen auch gesellschaftliche Schäden in erheblichem Ausmaß.

Diese Folgeschäden sind wissenschaftliche schwer zu erfassen. Nichtsdestotrotz sind sie da und führen zu gesundheitlichen, privaten und gesellschaftlichen Problemen. Die erhebliche Erhöhung des Lautstärkepegels über die letzten Jahrzehnte hinweg in den Industrie- wie in den Schwellenländern läßt dieses Problem von einer Randerscheinung in den Mittelpunkt gesellschaftlicher Probleme wechseln. Wir können unsere Ohren nicht zu machen.

3.2 Der Lärm der Anderen

So legen Verbraucher heute großen Wert auf leise Haushaltsgeräte in ihrer Wohnung, während der eigene Rasenmäher ruhig laut sein kann. Verkäufer von Kühlschränken und Waschmaschinen geben an, daß Verbraucher 1 dB weniger Lärm in den Herstellerangaben für Lärm durchaus 100 Euro mehr an Kosten des Geräts wert sind. Dies ist zwar irrational, da 1 dB Unterschied nur unter sehr günstigen Umständen überhaupt gehört werden kann, und auch daher, da das dB-Maß an sich für Lärm ungeeignet ist. Trotzdem zeigt es die hohe Sensibilität von Verbrauchern bezüglich des Lärms im Eigenheim. Der Rasenmäher aber, der von den Nachbarn gehört wird, oder das PS-starke Auto, welches Lautsprecher besitzt, die nach außen zusätzlichen Lärm produzieren um das Sounddesign des Autos knurriger und attraktiver klingen zu lassen können oder sollen sogar möglichst laut sein.

Ein solches Verhalten ist durch die kommunikative Funktion von Schall erklärbar, man möchte seiner Umwelt etwas mitteilen.

3.3 Wie misst man Gesundheitsschäden durch Lärm?

Diese komplexe Situation ist das Problem beim Messen von gesundheitlichen Schäden durch Lärm. Prinzipiell gibt es in der Wissenschaft zwei Beweisführungen.

Die Deduktion leitet Folgeschäden von Lärm ab, indem die gesamte Kette von Ereignissen bekannt ist und somit vorausgesagt werden kann, welche Schäden auftreten. Diese Argumentationsweise ist daher schwierig, da der menschliche Körper so komplex ist, daß eine lückenlose Beweiskette nur sehr schwer zu finden ist. Wie es zu Streßsymptomen kommt, wenn ein tiefer Brummtön zu hören ist hängt mit den hochkomplexen neuronalen Netzen im Gehirn zusammen, die zwar schon sehr weit beforscht sind, aber eben noch nicht gut genug. Im Bereich des Infraschalls ist die Situation schon besser, da das Gleichgewichtsorgan des Menschen durch die Infraschallwellen eindeutig gestört wird. Der Zusammenhang aber zwischen Lärm und Brustkrebs ist unbekannt.

Die zweite Beweisführung ist viel aussagekräftiger, die der Induktion, der Empirie. Hier werden Meßdaten von Lärm und Gesundheitsschäden gesammelt. Kommt es zwischen beiden zur Korrelation ist ein Zusammenhang nachgewiesen.

Hier verwendet man heute ein Maß, welches das Vorkommen von Gesundheitsschäden relativ zum Abstand einer Lärmquelle beschreibt. Um wieviel steigt also z.B. das Risiko für Bluthochdruck wenn man 1 km näher zu einer Lärmquelle wohnt, im Vergleich zu diesem Risiko bei Menschen, die etwa 2 km oder weiter entfernt wohnen. Ist dieser Zusammenhang statistisch signifikant dann ist der Gesundheitsschaden durch Lärm nachgewiesen[Berry 2018].

Ein Beispiel für einen Methodenfehler ist die Untersuchung des Bluthochdrucks in der Studie NORAH über Schäden durch den Flughafen Köln/Düsseldorf [Zur Nieden 2016]. Dort wurde der Blutdruck von Anwohnern über einen Zeitraum regelmäßig gemessen und festgestellt, daß es zu keinen Erhöhungen des Blutdrucks gekommen war. Allerdings wurden zu Beginn der Studie alle bereits wegen Bluthochdruck sich in Behandlung befindlichen Personen gänzlich von der Studie ausgeschlossen. Da der Flughafen zum Zeitpunkt des Studienbeginns bereits existierte war also die Personengruppe, die vermeintlich Bluthochdruck aufgrund des Lärms hatten gar nicht mehr Teil der Studie. In der Tat kam NORAH zu dem verblüffenden Ergebnis, daß Lärm keine Steigerung des Blutdrucks bewirkt, verblüffend daher, da fast alle bis dato durchgeführten Studien eben dies zeigen konnten. Auch wurde darauf verzichtet, die Anzahl der Bluthochdruckpatienten um den Flughafen mit der durchschnittlichen Anzahl solcher Patienten in Gebieten mit wenig Lärm zu vergleichen³.

³Dies ist nicht im Paper erwähnt, wurde mir aber auf Nachfrage von der vortragenden Mitautorin des Papers mitgeteilt.

Ein weiteres Problem mit wissenschaftlichen Studien ist deren Anzahl und Qualität. Aufgrund der erst seit 10-15 Jahren an den Universitäten in westlichen Staaten eingeführten Management-Strukturen und einer zunehmenden Neoliberalisierung von Wissenschaft sind Wissenschaftler, aber auch Doktoranden und teilweise bereits Studierende darauf angewiesen, möglichst viele Veröffentlichungen zu produzieren. Dies senkt im Regelfall die Qualität. Um einen Überblick über den Forschungsstand in einem auch nur sehr kleinen Teilgebiet zu gelangen werden heute eigene Review-Teams gebildet. Ein Beispiel ist die Evaluation des Wissenstandes der Beeinträchtigung des Lernens von Kindern durch Lärm. Eine zweijährige Studie der *World Health Organisation (WHO) Europes Guideline Development Group (GDG)* identifizierte hierbei zuerst 1006 Veröffentlichungen in Datenbanken zu diesem Thema. Nach Durchsicht blieben 18 dieser Studien als relevant übrig. Allerdings fanden sich in den Literaturangaben dieser Studien weitere 16 relevante Papers, die in den einschlägigen Datenbanken nicht vorkamen. Dieser Review-Studie schloß dabei Papers aus Konferenzbänden völlig aus. Diese Zahlen zeigen das krasse Mißverhältnis zwischen Quantität und Qualität von wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Aufgrund der politischen Situation an den Hochschulen ist es nicht mehr möglich, wissenschaftliche Ergebnisse aus Einzelstudien unkritisch zu übernehmen, was natürlich sowieso nie stattfinden sollte.

Nun sind wissenschaftliche Studien die Grundlage vieler politischer Entscheidungen. Die Aufweichung der wissenschaftlichen Standards ist also eine ernsthafte Bedrohung rationaler Argumentationen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Für die Feststellung der Gesundheitsschäden durch Lärm ist diese Situation zu berücksichtigen. Da ein eindeutiger und gerichtsfester Beweis hier in näherer Zukunft nicht zu erbringen ist gilt es, gesellschaftlich zu wirken.

4 Lärm und Politik

4.1 Kein Bauvorhaben darf an Lärm scheitern

Dieses Credo ist politisch immer wieder zu hören. Die Argumentation ist, daß wenn Lärm und deren Gesundheitsschäden ein Kriterium für das Bauen von Straßen, Flughäfen, WKAs oder Schienenstrecken wäre man gar nichts mehr bauen könne.

Dies ist falsch.

Fährt ein ICE mit um die 200 km/h kann man sich im Wagen problemlos unterhalten. Dies ist erstaunlich bedenkt man, daß die Lärmquellen, also die Räder nur einen guten Meter unter den Füßen der Fahrgäste sind. Steht man aber einen Meter neben dem Zug während dieser vorbeifährt versteht man sein eigenes Wort nicht mehr. Dasselbe gilt für Autos oder Flugzeuge. Es ist also technisch machbar, Schall derart zu dämpfen, daß er in unmittelbarer Nähe nicht mehr störend wahrgenommen wird. Realisiert wird dies allerdings meist nur für zahlende Kunden. Die Anwohner von Bahnstrecken, Flughäfen oder WKAs

bezahlen eben nicht dafür.

Ein Beispiel ist wiederum der Lärmstudie NORAH entnommen. In einem Fragebogen der den Lärmgeschädigten am Frankfurter Flughafen zugeht wurde die Frage gestellt, wieviel sie als Betroffene bereit seien dafür zu bezahlen, daß ihnen schallschützende Fenster u.ä. eingebaut würden [Giering 2016]. Die Geschädigten wie Kunden zu behandeln, die eine Leistung bezahlen sollen ist hier aber widersinnig, da diese ja keine Leistung erhalten, im Gegenteil, sie werden geschädigt. Gleichzeitig aber ist allen Beteiligten klar, daß diese Schädigung nicht sein müßte. Zu deren Beseitigung benötigt es jedoch Geld, das die Schädiger nicht bezahlen wollen.

4.2 Warum ist die deutsche Lärmgesetzgebung so schlecht?

Wir hatten schon eingangs gesehen, daß die Lärmgesetzgebung auf dem wissenschaftlichen Stand von vor 1933 ist. Hierfür gibt es mehrere Gründe, einer davon ist oben benannt, es geht um Geld.

In einer parlamentarischen Demokratie aber sollte der Bürger regieren. Dies zu realisieren gäbe es mehrere Möglichkeiten. Eine davon ist eine Veränderung der Besetzung der Normkommissionen, in Deutschland beim DIN und der Deutschen Akustischen Gesellschaft, international bei der ISO (International Standardization Organization). Diese empfiehlt Normen, die so in die Politik einfließen. Diese Normen sind nur Empfehlungen, die die Politik übernehmen oder verwerfen kann. Wären diese Empfehlungen jedoch auf dem Stand der Wissenschaft und des technisch machbaren wäre es der Politik möglich, die Lärmsituation in Deutschland entscheidend zu verbessern, sofern sie dies will.

Diese Lärmkommissionen werden von Experten besetzt, die auf dem Gebiet von Akustik und Lärm arbeiten. Hier ist leider festzustellen, daß viele in diesem Gebiet nicht wissenschaftlich unabhängig sind, sondern teilweise in der Industrie oder der Politik arbeiten. Auch Vertreter von Gutachterfirmen sind hier vertreten. Dies ist ebenfalls brisant, werden die Lärmgutachten zu einem Bauvorhaben vom Bauherrn finanziert, der natürlich an einem positiven Bescheid interessiert ist. Hier ist also ganz offenbar ein Interessenskonflikt gegeben.

Oft kann festgestellt werden, daß Lärmgutachten den gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Diese werden heute meist mittels spezieller Software erstellt, welche die gesetzlichen Regelungen implementiert haben und so der Benutzer nur wenig Möglichkeiten hätte, zu Gunsten eines Auftraggebers zu gutachten. Dies ist auch meist nicht nötig, da ja eben die Gesetzeslage so weit hinter der Stand der Wissenschaft und dem Stand der technischen Möglichkeiten herhinkt. Problematisch ist es allerdings, Vertreter von Gutachterfirmen in wissenschaftliche Normkommissionen einzuladen, da hier ein Interessenskonflikt vorliegt. Hier sollte der Gesetzgeber festschreiben, daß nur wirklich unabhängige Wissenschaftler den Normkommissionen angehören dürfen.

5 Was ist zu tun?

5.1 Gesetze

Die Gesetzeslage in Bezug auf Lärm muß verbessert werden. Die dB-Messung ist ungeeignet zur Erfassung von gesundheitsschädlichem und nervendem Lärm. Sie müssen ersetzt werden durch semantische Lärmmodelle. Lärm muß als störende Kommunikation verstanden werden, und Ziel der Gesetzgebung muß sein, unerwünschte Kommunikation zu unterbinden. Ziel ist daher eine Minimierung, am besten Abschaffung von Lärm.

Aus praktischen und historischen Gründen ist eine zweiteilige Lärmgesetzgebung sinnvoll. Die alte dB-basierte Lärmgesetzgebung muß abgeschafft und durch eine semantische Lärmgesetzgebung ersetzt werden. Die Grundgedanken der der TA Lärm, Bass, Impuls- und Tonhaftigkeit müssen durch Helligkeit, Fluktuationen, Dichte, Periodizität und Vokalität erweitert werden. Die Meßmethoden müssen hierbei dem Stand der Wissenschaft entsprechen, also Hörmodelle, semantische Modelle, sowie Modelle der künstlichen Intelligenz im Bereich der auditiven Wahrnehmung umfassen. Dies ist nötig, um gegen Lärm vorzugehen.

Zum anderen ist eine Minimierung von Lärm vonnöten. Da eine solche Minimierung technisch möglich ist muß das Gesetz eine Lärmabgabe vorsehen, die Gebühren für Lärmquellen vorsieht, je geringer der Lärm desto geringer die Gebühr. Diese Regelung wäre analog zu Müll- oder Abwassergebühren. Diese Gebühren müssen so hoch ausfallen, daß eine technische Minimierung der Lärmemission billiger ist als die Entrichtung der Lärmgebühr. Zu zahlen wäre diese Lärmgebühr an die Lärmgeschädigten, also die an Immissionsorten wohnenden.

Die Höhe der Gebühr muß sich nach der Stärke der Störung bzw. der gesundheitsschädigenden Wirkung von Lärm richten. Diese ist nach semantischen Kriterien einzurichten, also in Bezug auf die Frage, wie stark die subjektive Störung ist. Industrie und Privatpersonen können sich so entscheiden, ob sie in Ausnahmefällen sich eine Lärmquelle leisten wollen oder nicht.

5.2 Technische Verfahren zur Lärminderung

Es gilt, sämtliche technische Verfahren zur Lärminderung einzusetzen, die heute existieren. Außerdem müssen neue Verfahren entwickelt werden. Hierfür müssen Forschungsgelder in erheblichem Umfang zur Verfügung gestellt werden.

- Traditionelle Lärmdämmung erfolgt durch viskoelastische Stoffe, etwa Bitumen, mit großer innerer Dämpfung. Hier ist die Entwicklung im Groben abgeschlossen. Gut dämmende Stoffe sind jedoch teuer, etwa solche mit Mikrofasern.
- Gegenschallanlagen bestehen aus Lautsprechern, welche den Lärm mit umgekehrter akustischer Wellenphase an die Lärmquelle schallen, so daß sich der Lärm mit dem Schall des Lautsprechers auslöschen. Ein Beispiel sind Gegenschall-

kopfhörer wie sie z.B. in Flugzeugen die Bässe dämmen. Solche Gegenschallanlagen sind seit vielen Jahrzehnten Stand der Technik.

- Metamaterialien sind Gebilde mit komplizierten Geometrien, welche Eigenschaften besitzen, die nicht in der Natur vorkommen, wie einen negativen Brechungsindex, der akustische Linsen ermöglicht, das Abschotten von Gegenständen gegen Schall und eben auch sehr starke akustische Dämmeigenschaften, die herkömmliche Dämmmaterialien nicht haben. Hier gilt es, erhebliche Forschungsgelder bereit zu stellen, um Metamaterialien zu entwickeln, die massenhaft eingesetzt werden können. Da solche Metamaterialien allein durch eine komplexe Geometrie erzeugt werden und so die Baustoffe herkömmliche, ungefährliche Stoffe wie Holz oder Metall sind, ist deren Produktion, Einsatz und Entsorgung problemlos. Die Hauptlärmquellen ließen sich somit erheblich entschärfen.
- Das Quietschen der Bremsen von Zügen kann durch Verschachtung der Räder erfolgen, wobei in der Verschachtung Dämmstoffe sowie Gegenschallquellen eingebracht werden müssen. Dies führt auch zu einer erheblichen Reduzierung von Lärm während der Fahrt.
- Das Geräusch von Autoreifen auf Straßen kann ebenfalls durch Verschachtung mit entsprechenden Dämmungen erheblich verringert werden.
- Das Motorgeräusch von Autos ist am besten durch flächendeckende Einführung von Elektroautos zu realisieren.
- Der Infraschall von Windrädern kann mit dem heutigen Stand der Technik nicht wirkungsvoll eingedämmt werden. Es ist daher nötig, einen genügenden Abstand zu den Windrädern zu gewährleisten. Dieser Abstand ist individuell zu bestimmen, also nicht durch eine feste Abstandsregel, da jeder Fall ein anderes Gelände aufweist. Ein solcher Abstand muß nach dem heutigen Stand des Wissens wohl größer als 5 km, besser 8 km sein.
- Das Dämmen von Infraschall durch Windräder mittels Dämmung ist einzig mittels Metamaterialien in Zukunft gewinnversprechend. Hier müssen Forschungsgelder bereit gestellt werden.
- Lärm durch Flugschall ist durch erhebliche Dämmung der Triebwerke zu erreichen. Diese Dämmung ist technisch möglich wird aber bisher aus Gründen der Leistungsreduzierung nicht ausgeführt. Hier müssen gesetzliche Regelungen die Einführung dieser Dämmung erzwingen.
- Lärm durch Traktoren in der industriellen Landwirtschaft, wie sie nicht nur auf Feldern sondern auch in Ortschaften und Dörfern unterwegs sind haben heute praktisch keinen Schallschutz für die Umwelt. Trecker und Lastwagen müssen in erheblichem Maße bedämpft werden, ähnlich wie Züge oder Autos durch Schallabsorber und Gegenschallanlagen.

- Öffentliche Gebäude, Schulen, Büros, etc. müssen zur Hälfte durch einen Akustiker geplant werden anstatt wie heute meist üblich fast völlig durch einen Architekten. Die akustischen Eigenschaften von Klassenzimmern, größeren Büros, Konferenzräumen, etc. sind hierbei architektonischen Entwürfen vorzuordnen.
- Konzertsäle sind ebenfalls zuerst akustisch zu realisieren. Hierbei spielt die architektonische Idee ebenfalls eine untergeordnete Rolle. Die heutige Praxis, nachdem ein Raumakustiker beim Bau eines Konzerthauses mit den vom Architekten vorgegebenen Räumen umgehen und unter diesen Umständen noch den eben besten Raumklang realisieren kann muß aufgegeben und durch das Primat der Raumakustik ersetzt werden.
- öffentliche Plätze und Straßen sind ebenfalls zu einem erheblichen Maß durch deren Akustik zu planen.

Literatur

- [Babisch 2006] Babisch, W. (2006) Transportation Noise and Cardiovascular Risk. Review and Synthesis of Epidemiological Studies. Dose-effect Curve and Risk Estimation. WaBoLu-Hefte 1/6, Umweltbundesamt.
- [Bader 2013] Bader, R. (2013). Nonlinearities and Synchronization in Musical Acoustics and Music Psychology. Heidelberg: Springer.
- [Bader 2015] Bader, R. (2015). Phase synchronization in the cochlea at transition from mechanical waves to electrical spikes. Chaos 25, 103124.
- [Berry 2018] Barry, R., Sulsky, S.T., & Kreiger, N. (2018) Using residential proximity to wind turbines as an alternative exposure measure to investigate the association between wind turbines and human health, J. Acoust. Soc. Am. 143, 3278-3282.
- [Desainte-Catherine & Marchand 2000] Desainte-Catherine, M. & Marchand, S. (2000). High-Precision Fourier Analysis of Sounds Using Signal Derivatives. Journal of the Audio Engineering Society, 48 (7/8), 654-667.
- [Drennan 2001] Drennan, W. R. (2001). Sources of variation in profile analysis II. Component spaces, dynamic level and roving level. J. Acoust. Soc. Am., 110 (5), 2498-2504.
- [Fletcher & Munson 1933] Fletcher, H. & Munson, W. A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation. Journal of the Acoustical Society of America, 5, 82-108.

- [Giering 2016] Giering, K., Guski, R., Klein, T., Möhler, U. & Schreckenberger, D.(2016): Willingness to pay in the Rhine-Main region according to aircraft noise, railway noise, road traffic noise. Proceedings of the INTER-NOISE 2016, 7798-7808.
- [Green 1988] Green, D. (1988). Profile Analysis. Auditory Intensity Discrimination. New York: Oxford University Press.
- [Joris 1994] Joris, P. (1994). Enhancement of neural synchronization in the anteroventral cochlear nucleus. I. Responses to tones at the characteristic frequency. *Neurophysiol.* 71 (3), 1022-1036.
- [Schmidt 2015] Schmidt, M. (2015). Forschungsprojekt zu Kurven gleicher Lautstärke für DIN 45680. München: Im Auftrag des DIN.
- [Sottek 2016] Sottek, R. (2016). A hearing model approach to tie-varying loudness. *Acta Acustica united with Acustica*, 102, 725-744.
- [v. Helmholtz 1863] von Helmholtz, H. (1863). Die Lehre von den Tonempfindungen als physiologische Theorie der Musik. Braunschweig: Friedrich Vieweg & Sohn.
- [Michaud et al. 2016] Michaud, D.S., Feder, K., Keith, S.E., Voicescu, S.A., Marro, L., Than, J. Guay, M., Denning, A., McGuire, D. Bower, T., Lavigne, E., Murray, B.J., Weiss, Sh.K., & von den Berg, F. (2016) Exposure to wind turbine noise: Perceptual responses and reported health effects, *J. Acoust. Soc. Am.* 139, 1443-1454.
- [Zur Nieden 2016] Zur Nieden, A., Ziedorn, D., Römer, K., Spilski, J., Möhler, U., Harpel, S., Schreckenberger, D. & Eikmann, Th. (2016): NORAH -field study: The Effects of chronic exposure to traffic noise (aircraft, railway and road) on the self-measured blood pressure. Proceedings of the INTER-NOISE 2016, 7787-7791.
- [WHO Noise Guidelines 2018] World Health Organization Regional Office For Europe (2018) Environmental Noise Guidelines for the European Region. <http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/noise/environmental-noise-guidelines-for-the-european-region>