1

Wahrnehmung von Schall

Unter Wahrnehmung versteht man (nach R. Guski) den 'Prozess der Aufnahme von Information mit dem Ergebnis der Wahrnehmung'. Dass ein Schallereignis wahrgenommen werden kann, setzt dabei eine einfache physikalische Wirkungskette voraus. Eine Schallquelle versetzt die sie umgebende Luft in kleine Schwingungen, diese werden in Folge von Kompressibilität und Masse der Luft übertragen und gelangen zum Ohr des Hörers.

Physikalisch finden dabei kleine Druckschwankungen p in der übertragenden Luft (bzw. dem Gas oder der Flüssigkeit) statt. Man bezeichnet diesen, dem atmosphärischen Ruhedruck p_0 überlagerten Wechseldruck, als Schalldruck p. Er ist die wichtigste akustische Feldgröße, die naturgemäß orts- und zeitabhängig ist. Vom Sender abgestrahlt entsteht ein räumlich verteiltes Schallfeld, das zu jedem Zeitpunkt andere Momentandrücke besitzt.

Das an einem Ort beobachtete Schallereignis besitzt im wesentlichen zwei Merkmale: Es zeichnet sich durch Klangfarbe und durch Lautstärke aus. Das physikalische Maß für die Schallstärke ist der Schalldruck; das Maß für die Farbe ist die Frequenz f, die die Anzahl der Periodendauern pro Sekunde in der Einheit Hertz (Hz) angibt. Der technisch interessierende Frequenzbereich umfasst dabei nicht nur den Hörbereich des menschlichen Ohres, der etwa von $16\,Hz$ bis $16.000\,Hz$ (kurz auch $16\,kHz$) reicht. Der unterhalb davon angesiedelte *Infraschall* spielt zwar auf dem Gebiet des Luftschalls selten eine Rolle, in ihm sind vor allem die Schwingungen von Festkörpern relevant (z.B. Fragen des Erschütterungsschutzes). Im über dem Hörbereich liegenden *Ultraschall* reichen die Anwendungen von der akustischen Modelltechnik bis hin zur medizinischen Diagnosetechnik und zerstörungsfreien Materialprüfung.

Die Grenzen des hier ausschließlich interessierenden Hörschalls sind natürlich nicht scharf angebbar. Abhängig von Faktoren wie etwa dem Lebensalter (aber auch z.B. der Dauerbelastung durch Arbeitslärm oder der gewohnheitsmäßigen Beschallung mit zu lauter Musik) ist die obere Grenze individuell verschieden. Der Wert von $16\,kHz$ bezieht sich auf einen gesunden Menschen von etwa 20 Jahren, die obere Grenze nimmt danach um etwa $1\,kHz$ pro Lebensdekade ab.

Die untere, ebenfalls nur ungefähr bestimmbare Grenze, stellt eine Flimmergrenze dar. Bei sehr tiefen Frequenzen kann man die Elemente einer Ereignisfolge (z.B. einer Reihe von Schlägen) noch wohl voneinander unterscheiden. Steigt die Frequenz über die Flimmerfrequenz von (etwa) 16 Hz an, so werden die Elemente nicht mehr einzeln wahrgenommen, sie scheinen dann vielmehr zu einem andauernden Geräusch zu verschmelzen. Ein solcher Übergang findet zum Beispiel statt, wenn allmählich einsetzender Regen wahrgenommen wird: Man hört zunächst das Klopfen der Einzeltropfen gegen die Fensterscheiben, bis das Geräusch bei entsprechender Regendichte in ein gleichmäßiges Prasseln übergeht. Die Flimmergrenze des Hörens liegt übrigens bei der selben Frequenz, bei der die Bildfolge eines Filmes eine Kontinuität der Bewegungen vorzutäuschen beginnt.

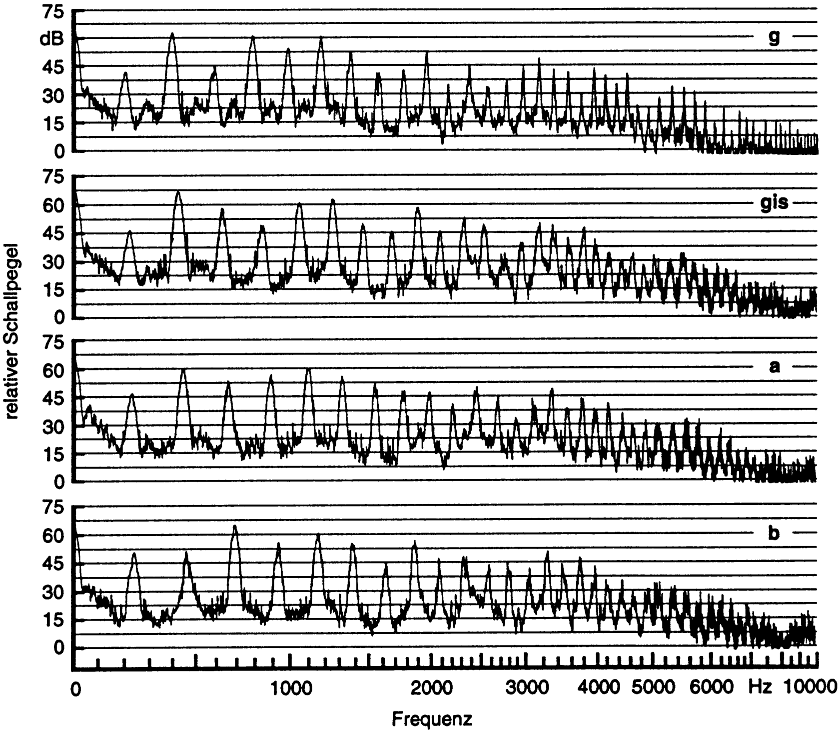

Bild 1.1. Violinen-Klangspektren (aus: Meyer, J.: Akustik und musikalische Aufführungspraxis. Verlag Erwin Bochinsky, Frankfurt 1995)

In der Akustik ist der Begriff Frequenz meist an sogenannte reine Töne gebunden, die in einem zeitlich sinusförmigen Verlauf bestehen. Nur in äußerst seltenen Fällen wird ein solch exakt-mathematisch definierter Vorgang bei natürlichen Schallen auch wirklich beobachtet werden können. Selbst der Ton eines Musikinstrumentes enthält mehrere Farben: Erst das Zusammenwirken von mehreren harmonischen (reinen) Tönen bildet den Instrumentenklang (Beispiele siehe Bild 1.1). Allgemeiner kann man einen beliebigen Zeitverlauf durch seine entsprechende Frequenzzusammensetzung repräsentieren, er ist – ähnlich wie beim Licht – in sein Spektrum zerlegbar. Beliebige Signale lassen sich durch eine Summe von reinen Tönen (mit unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen) darstellen. Diese Vorstellung der aus vielen Frequenzkomponenten zusammengesetzten Signale führt direkt dazu, dass die akustische Wirkung von Schallübertragern (wie zum Beispiel von Wänden und Decken in Gebäuden, die in Kapitel 8 geschildert sind) vernünftigerweise durch Frequenzgänge beschrieben wird. Kennt man beispielsweise den Schalldämmmaß-Frequenzgang einer Wand, so lässt sich leicht vorstellen, wie dieser auf die Übertragung von gewissen Schallen bekannter Frequenzinhalte, zum Beispiel von Sprache, wirkt. Fast immer ist das Dämmmaß tieffrequent schlecht und hochfrequent gut: Die Sprache wird also nicht nur insgesamt leiser, sondern dazu auch noch dumpf durch die Wand übertragen. Die intuitive Vorstellung, dass sich allgemeine Signale als Zusammensetzungen von Tönen auffassen lassen, ist für das Verständnis der meisten in diesem Buch geschilderten Sachverhalte von großem Nutzen. Das mathematische Fundament der Entwicklung eines gegebenen Signals in viele reine Töne ist in Kapitel 13 dieses Buches ausführlich erläutert.

Die Tonhöhenempfindung des Menschen ist nun so beschaffen, dass man die Höhendifferenz zweier Tonpaare dann als gleich hört, wenn das Frequenzverhältnis (und nicht etwa die Frequenzdifferenz) bei beiden Paaren gleich ist. Die Unterschiede im Paar mit den Frequenzen f_{a1} und f_{a2} und im Paar aus f_{b1} und f_{b2} werden als gleich empfunden, wenn

$$\frac{f_{\mathrm{a1}}}{f_{\mathrm{a2}}} = \frac{f_{\mathrm{b1}}}{f_{\mathrm{b2}}}$$

gilt. Man wird also beispielsweise die Übergänge von $100\,Hz$ auf $125\,Hz$ und von $1000\,Hz$ auf $1250\,Hz$ als gleiche Höhenänderung empfinden. Dieser Gesetzmäßigkeit des „relativen Höheneindrucks“ wird in der Musik Rechnung getragen, bei der Unterteilungen in Oktaven (= Verdopplungen einer Frequenz) und in andere Tonintervalle wie Sekunde, Terz, Quart, Quint, etc. schon lange benutzt werden, die sich alle auf die Verhältnisse zweier Frequenzen und nicht auf den „absoluten Zuwachs in Hz“ beziehen.

Diese relative Gesetzmäßigkeit, die allgemeiner besagt, dass Reize R um einen gewissen Prozentsatz erhöht werden müssen, damit sich gleiche Empfindungsänderungen einstellen, ist nicht auf die Tonhöhenempfindung beschränkt sondern trifft auch für andere Sinneswahrnehmungen zu. Ein besonders einfaches, der unmittelbaren Erfahrung leicht zugängliches Beispiel ist die Gewichtsempfindung beim Heben von Gegenständen. So wird man z.B. durch den direkten Vergleich herausfinden können, ob einer Tafel Schokolade (von $200\,g$) ein Streifen (von $20\,g$) fehlt; ebenso lässt sich durch 'Wiegen mit der

Hand' vermutlich feststellen, ob bei einem Liter Milch ($1000\,g$) ein Glas (von $100\,g$) schon weggetrunken worden ist, und auch bei einer Getränkekiste von 10 Flaschen mit zusammen 10 Litern ($10\,kg$) kann man wohl den Verlust einer Flasche ($1\,kg$) durch Anheben beurteilen. Unmerklich bleiben dagegen Verlust oder Zuwachs von $20\,g$ oder $100\,g$ bei der vollen Getränkekiste, und auch dem Liter Milch wird man die Änderung um $20\,g$ nicht anmerken können. Auch würde wohl niemand behaupten, dass der Zuwachs von einem Kilogramm unabhängig vom Ausgangsreiz ($200\,g, 1\,kg$ oder $10\,kg$) die gleiche Empfindungsänderung bewirkt. Ganz offensichtlich gilt auch hier ein relatives Gesetz, nach dem ein Ausgangsreiz prozentual – relativ – geändert werden muss, damit sich die gleiche Empfindungsänderung einstellt.

Natürlich wird man Oktaven (Frequenzverdopplungen) als größere Intervalle hören als z.B. Terzen (mit dem Faktor 1,25 in der Frequenz), auch Gewichtsverdopplungen werden gewiss als größer empfunden als Steigerungen um 10 Prozent auf den Faktor 1,1. Zusammengefasst kann man also feststellen, dass der Zuwachs der Empfindung ΔE für die bislang genannten physikalischen Reize (Tonhöhenempfindung und Gewichtsempfindung) proportional zum Verhältnis aus absolutem Reizzuwachs ΔR und dem Ausgangsreiz R ist:

$$\Delta E = k\frac{\Delta R}{R} \; . \tag{1.1}$$

Dabei ist k eine Proportionalitätskonstante. Für den Reiz „Tonhöhe“ bezeichnet $R = f$ die Frequenz, für die Gewichtsempfindung ist $R = m$ die zu hebende Masse.

Das mit Gl.(1.1) bezeichnete Gesetz der 'relativen Empfindungsänderung' bildet die wichtigste Grundlage für die Wahrnehmungspsychologie. Es geht auf Weber zurück, der es bereits 1834 bei Versuchen mit Gewichtsbelastungen hergeleitet hat.

Eine solche relative Gesetzmäßigkeit Gl.(1.1) trifft auch für die Lautstärkeempfindung zu. Wenn einer Versuchsperson durch wiederholtes Umschalten zunächst ein Schallereignis-Paar mit den Schalldrücken p und 2p und danach ein Paar mit (beispielsweise) $5p$ und $10p$ dargeboten wird, dann sollte der wahrgenommene Lautstärkeunterschied in beiden Paaren als gleich empfunden werden. Wenigstens in etwa folgen also sowohl Tonhöhenempfindung als auch die Lautstärkewahrnehmung dem Gesetz der relativen Änderung (1.1).

Natürlich möchte man nun auch noch den Zusammenhang zwischen den Größen R und E selbst ermitteln. Auch wenn es problematisch (und vermutlich unmöglich) ist, Empfindungen wirklich zu quantifizieren, stellt sich doch die Frage nach dem prinzipiellen Zusammenhang zwischen Reiz und Empfindung. Auf welcher Empfindungsskala lassen sich verschieden große Reize einordnen? Erst mit der Antwort auf diese Frage können Reize hinsichtlich ihrer tatsächlichen Wirkung auf den Menschen eingeordnet werden.

Die gesuchte „Empfindungskennlinie“ $E = E(R)$ lässt sich recht einfach aus dem Änderungsgesetz konstruieren, wenn man zunächst zwei Punkte im Achsenkreuz aus Reiz R und Empfindung E wie in Bild 1.2 wählt. Sinnvoller Weise nimmt man für einen dieser Punkte den Schwellreiz R_0, bei dem die Empfindung $E = 0$ erst einsetzt: Reize $R < R_0$ unterhalb der Schwelle kann man nicht wahrnehmen, man benötigt quasi ein Mindestangebot an Reiz, um diesen auch zu empfinden. Für den zweiten, willkürlich gewählten Punkt wird hier der doppelte Schwellreiz $R = 2R_0$ festgelegt und diesem eine (beliebige) Empfindung E_0 zugeordnet. Das Prinzip des weiteren Kurvenverlaufes ergibt sich dann aus der Betrachtung von Empfindungen $2E_0$, $3E_0$, $4E_0$ .... Für die Empfindung $2E_0$ muss man wegen des Gesetzes der relativen Empfindungsänderung Gl.(1.1) den zu E_0 gehörenden Reiz verdoppeln. Wegen $E_0 = E(2R_0)$ gehört zu $2E_0$ also $R = 4R_0$. Ebenso gehört zu $3E_0$ der Reiz $8R_0$, zu $4E_0$ der Reiz $16R_0$ .... Wie man sieht, lässt die Steigung der Kurve $E = E(R)$ mit wachsendem Reiz sehr rasch nach. Je stärker die Empfindung schon ist, desto mehr Reizzuwachs muss „draufgesattelt" werden, um noch einen gewissen Empfindungszuwachs (z.B. E_0) zu erzielen.

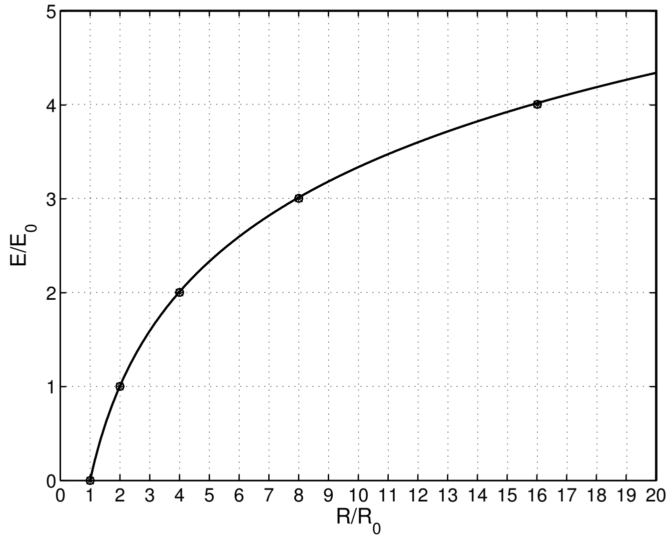

Bild 1.2. Qualitativer Zusammenhang zwischen Reiz R und Empfindung E

Natürlich lässt sich der Zusammenhang $E = E(R)$ auch formal aus dem Änderungsgesetz (1.1) bestimmen. Dazu geht man zu infinitesimal kleinen Änderungen dE und dR über :

$$\mathrm{d}E = k\frac{\mathrm{d}R}{R} \; .$$

Daraus erhält man durch Integration

$$E = 2.3k \lg(R/R_0) \,, \tag{1.2}$$

worin lg den dekadischen Logarithmus bezeichnet (man bedenke, dass die Logarithmen verschiedener Basen zueinander proportional sind, z.B. ist $ln\,x = 2,3\,lg\,x$, siehe auch Anhang A). Die Lautstärkeempfindung ist also proportional zum Logarithmus des physikalischen Reizes (hier der Schalldruck-Amplitude). Dieser durch vielfältige Untersuchungen wenigstens grob als richtig nachgewiesene Zusammenhang ist als Weber-Fechner-Gesetz bekannt.

Das Funktionieren der Sinneswahrnehmung nach einem logarithmischen Gesetz (Verlauf siehe nochmals Bild 1.2) ist eine höchst sinnvolle Entwicklung, die sich vermutlich durch die Evolution für Menschen (und wohl auch für Tiere) herausgebildet hat. Während das logarithmische Gesetz einerseits schwache Reize kurz oberhalb der Wahrnehmungsschwelle $R = R_0$ stark hervorhebt und so „gut empfindbar" macht, werden sehr große Reize in ihrer Wahrnehmung stark abgeschwächt; hier wirkt die Logarithmus-Kennlinie als eine Art von „Überlastschutz". Insgesamt wird so ein sehr breiter physikalischer Wertebereich (schmerzfrei) erfahrbar, es können mehrere Zehnerpotenzen in der physikalischen Größenordnung überdeckt werden. Aus der Entwicklungsgeschichte der Spezies dürfte wohl hervorgehen, dass das Weber-Fechner-Gesetz vor allem für jene Sinneswahrnehmungen zutrifft, für die es auf Grund der vorgefundenen Umwelt einerseits und den (Über-)Lebens-Notwendigkeiten andererseits eine weite Spanne sinnlich erfahrbar zu machen galt. Zum Beispiel wird die Temperaturempfindung wahrscheinlich nicht einem relativen Gesetz folgen, weil der Temperaturbereich, in dem höher entwickeltes Leben überhaupt vorkommt, stark beschränkt ist und weil Schwankungen von Zehntel- oder Hundertstel-Grad für die Individuen bei keiner Temperatur interessieren. Für das Sehen mit ja lebenserhaltender Bedeutung bei geringstem Licht in der Nacht und in grellster Sonne bei Tage wird dagegen gewiss eine relative Gesetzmäßigkeit für die Empfindung zu erwarten sein. Das gilt auch für die Gewichtswahrnehmung bei der es darauf ankommt, geringste noch zu haltende Massen im $1\,g$ Bereich und grosse Gewichte von einigen $10000\,g$ sinnlich handhabbar zu machen. Auch die Lautstärkewahrnehmung folgt dem logarithmischen Weber-Fechner-Gesetz wohl deswegen, weil an das Ohr sowohl die Aufgabe der Wahrnehmung sehr leiser Schalle – wie vom Fall eines Blattes in ruhigster Umgebung – als auch sehr laute Geräusche – wie das Tosen von Wassermassen in naher Nachbarschaft – gestellt worden ist. Tatsächlich können Menschen Schalldrücke wahrnehmen, die von ca. $20 \cdot 10^{-6} N/m^2$ bis etwa $200 N/m^2$ reichen, wobei der obere Wert grob die Schmerzgrenze bezeichnet. Es werden also etwa 7 Zehnerpotenzen vom Lautstärke-Hören überdeckt, das ist ein außerordentlich großes physikalisches Intervall. Wenn man es zur Veranschaulichung in Entfernungen übersetzt, so erhält man z.B. das Intervall von 1 Millimeter gegenüber 10 Kilometer. Das Wunderwerk Ohr macht einen so breiten Wertebereich tatsächlich erfahrbar und nutzt dabei das Gesetz der relativen Empfindungsänderung, aus dem das Weber-Fechner-Gesetz Gl.(1.2) direkt folgt.

Vielleicht lässt sich die Qualität des menschlichen Ohres am Vergleich mit einem optischen Gerät ermessen, dass eine ähnliche Reizskala überdeckt. Es müsste im Millimeter-Bereich ebenso gut operieren können wie im Kilometer-Bereich.

Es ist nun naheliegend, auch für das technische Maß zur Bezifferung der Schalldruck-Größe nicht den physikalischen Schalldruck selbst, sondern eine logarithmierte Größe zu verwenden. National und International wird der Schalldruckpegel L

$$L = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \tag{1.3}$$

mit $p_0 = 20 \cdot 10^{-6}\, N/m^2$ als gut handhabbares, aussagekräftiges Maß verwendet. Die Bezugsgröße p_0 entspricht dabei etwa der Hörschwelle (für eine Frequenz von $1000\, Hz$, wie der nächste Abschnitt zeigt ist die Hörschwelle frequenzabhängig), sodass $0\, dB$ den „gerade noch“ bzw. „gerade nicht mehr“ hörbaren Schall etwa bezeichnet. Wenn nicht anders vermerkt, ist unter p der Effektivwert des Zeitverlaufes zu verstehen (englisch RMS: root mean square). Die Angabe dB (Dezibel)bedeutet keine Maßeinheit, sie soll auf die Verwendung des logarithmischen Bildungsgesetzes hinweisen. Der Vorfaktor 20 (bzw. 10) in Gl.(1.3) ist so gewählt worden, dass $1\, dB$ etwa der Unterschiedsschwelle zwischen zwei Drücken entspricht: Wenn sich zwei Schalle um $1\, dB$ unterscheiden, so empfindet man sie gerade noch als unterschiedlich laut.

Wie man auch der Tabelle 1.1 entnehmen kann, ist durch die Pegelzuordnung der 7 Zehnerpotenzen umfassende physikalische Schalldruck auf einer von etwa 0 bis $140\, dB$ reichenden Skala abgebildet worden. In Tabelle 1.1 sind auch einige Beispiele für Pegel-Größenordnungen alltäglicher Geräusch-Situationen genannt.

Tabelle 1.1. Zuordnung zwischen Schalldruck und Schalldruckpegel

Schalldruck $p\,(N/m^2$, effektiv)	Schalldruck-pegel L (dB)	Situation/ Beschreibung
$2\,10^{-5}$	0	Hörschwelle
$2\,10^{-4}$	20	Wald bei wenig Wind
$2\,10^{-3}$	40	Bibliothek
$2\,10^{-2}$	60	Büro
$2\,10^{-1}$	80	dicht befahrene Stadtstraße
$2\,10^{0}$	100	Presslufthammer, Sirene
$2\,10^{1}$	120	Start von Düsenflugzeugen
$2\,10^{2}$	140	Schmerzgrenze

Bemerkenswert ist, dass selbst die mit den größten Pegeln verknüpften Schalldrücke sehr viel kleiner sind als der atmosphärische Gleichdruck von circa $10^5 N/m^2$. Der Schalldruck-Effektivwert bei $140\, dB$ beträgt dagegen $200\, N/m^2$ und damit nur 1/500 des atmosphärischen Drucks. Der große Vorteil bei der Verwendung von Schallpegeln besteht unbestreitbar darin, dass sie (etwa) ein Maß für die empfundene Lautstärke bilden. Wie fast immer ziehen Vorteile auf der einen Seite Nachteile an anderer Stelle nach sich: Beim Rechnen mit Pegeln muss genauer nachgedacht und ein etwas höherer Aufwand in Kauf genommen werden. Wie groß ist zum Beispiel der Gesamtpegel von mehreren Einzelquellen mit bekannten Einzelpegeln? Die Herleitung des „Pegeladditionsverfahrens“ (in dem die Pegel eben gerade NICHT addiert werden), das mit

$$L_{\text{tot}} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^{N} 10^{L_i/10} \right) \tag{1.4}$$

für inkohärente Teilschalle Antwort auf die Frage gibt, ist in Anhang A ausführlich geschildert (N = Anzahl der inkohärenten Teilschalle der Teilpegel L_i). Beispielsweise geben drei gleichlaute Kraftfahrzeuge den Gesamtpegel

$$L_{\text{tot}} = 10 \lg \left(3\, 10^{L_i/10} \right) = 10 \lg 10^{L_i/10} + 10 \lg 3 = L_i + 4,8\, dB\ ,$$

der um $4,8\, dB$ über dem Einzelpegel liegt (und der nicht etwa 3 mal so groß wie der Einzelpegel ist).

1.1 Terz- und Oktav-Filter

In manchen Fällen ist ein hochauflösendes Verfahren zur Bestimmung spektraler Inhalte von Signalen erwünscht. Das ist zum Beispiel der Fall, wenn es sich um Messungen an einem möglicherweise schmalbandigen Resonator handelt, bei dem gerade die Bandbreite des Resonanzgipfels die eigentlich interessierende Messgröße bildet (siehe Kapitel 5.5). Ein solches hochauflösendes Verfahren besteht z.B. in der sehr oft benutzten, sogenannten FFT-Analyse (FFT: Fast Fourier Transform). Sie wird in diesem Buch nicht behandelt, es sei dazu vor allem auf das Werk von Oppenheim und Schafer: Digital Signal Processing (Prentice Hall, Englewood Cliffs New Jersey 1975) verwiesen.

Oft ist auch eine hohe Auflösung weder erwünscht noch erforderlich. Wenn man z.B. einen Eindruck von der Frequenzzusammensetzung von Straßenverkehrsgeräusch oder Schienengeräusch haben möchte, dann ist es sinnvoll, den Frequenzbereich in nicht zu viele Intervalle zu unterteilen. Einzelheiten innerhalb der gröberen Intervalle wären sehr wenig aussagekräftig, sie wären recht zufällig und würden von Messung zu Messung stark streuen. Innerhalb breiterer Frequenzbänder dagegen sind Messungen gut reproduzierbar (vorausgesetzt natürlich, dass sich z.B. die Verkehrsverhältnisse nicht ändern). Auch werden zu messtechnischen Zwecken oft gezielt breitbandige Signale benutzt. Das ist z.B. bei raumakustischen und bauakustischen Messungen der Fall, die durchweg mit (meist weißem) Rauschen als Anregesignal durchgeführt werden. Spektrale Einzelheiten interessieren hier nicht nur nicht mehr, sie würden gewiss darüber hinaus von der eigentlichen Aussagekraft des Messergebnisses eher ablenken.

Die Messung der Frequenzzusammensetzung von Signalen in breiteren Teilbändern wird mit Hilfe von Filtern durchgeführt. Darunter werden elektrische Netzwerke verstanden, die eine angelegte Spannung nur in einem ganz bestimmten Frequenzbereich durchlassen. Das Filter wird gekennzeichnet durch seine Bandbreite Δf, durch die untere Durchlassgrenze f_u und die obere Durchlassgrenze f_o und durch die Mittenfrequenz f_m (siehe Bild 1.3). Die Bandbreite ist gleich der Differenz aus f_o und f_u, $\Delta f = f_o$ - f_u.

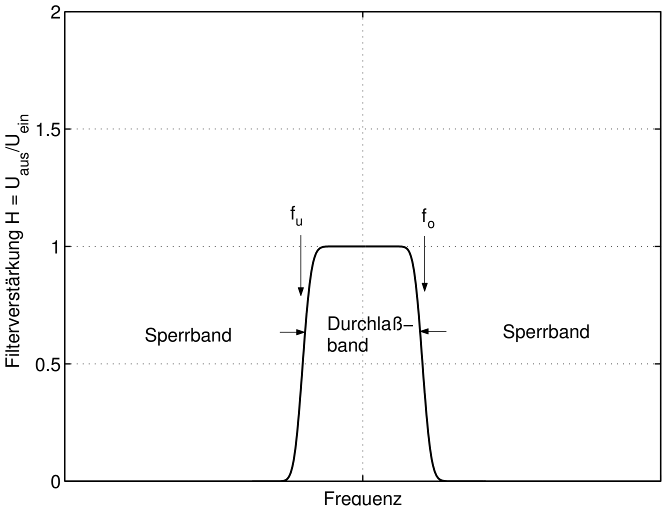

Bild 1.3. Prinzipverlauf des Frequenzganges von Filtern (Bandpässen)

In der Akustik werden fast nur Filter mit konstanter relativer Bandbreite benutzt. Bei ihnen ist die Bandbreite proportional zur Mittenfrequenz des Filters, mit wachsender Mittenfrequenz wächst also auch die Bandbreite des Filters an. Die wichtigsten Vertreter von Filtern konstanter relativer Breite sind das Oktavfilter und das Terzfilter. Für alle Filter konstanter relativer Breite gilt

$$f_m = \sqrt{f_u f_o}$$

Damit liegen alle Filter-Kenn-Frequenzen fest, wenn man noch den Quotienten der Bandgrenzen f_u und f_o angibt:

<u>Oktavfilter:</u>

$$f_o = 2 f_u \ ,$$

daraus folgt $f_m = \sqrt{2} f_u$ und $\Delta f = f_o - f_u = f_u = f_m/\sqrt{2}$.

<u>Terzfilter:</u>

$$f_o = \sqrt[3]{2} f_u = 1,26 f_u \ .$$

Damit ist

$$f_m = \sqrt[6]{2} f_u = 1,12 f_u \quad \text{und} \quad \Delta f = 0,26 f_u \;.$$

Man bezeichnet Terzen auch als Drittel-Oktaven, weil drei sich nicht überschneidende Terzen, die nebeneinander liegen, eine Oktave ausmachen ($\sqrt[3]{2}\sqrt[3]{2}\sqrt[3]{2} = 2$). Die Bandgrenzen und die Mittenfrequenzen der Terzen und Oktaven sind in den Normblättern DIN 45651 und 45652 festgelegt.

Bei der Pegel-Messung wird immer angegeben, mit welchen Filtern die Messung durchgeführt wurde. Da bei der Messung mit (den breiteren) Oktavfiltern mehr Frequenzanteile durchgelassen werden als bei (den schmaleren) Terzfiltern, liegen die Oktavpegel stets höher als die Terzpegel. Der Vorteil bei der Messung der Terzpegel besteht in der höheren Auflösung (mehr Messpunkte im gleichen Frequenzbereich) des Spektrums. Natürlich kann man aus den gemessenen Terzpegeln die zugehörigen Oktavpegel mit Hilfe des Gesetzes (1.4) berechnen. Ebenso lassen sich aus den Terz- oder Oktavpegeln die zu breiteren Frequenzintervallen gehörenden Pegel mit Hilfe der Pegeladdition (1.4) berechnen. Beispielweise wird häufig der (unbewertete) Linearpegel angegeben. Er enthält alle Frequenzanteile zwischen $16\,Hz$ und $20\,kHz$. Er wird entweder direkt mit einem entsprechenden Filter gemessen, oder er kann aus den im Band liegenden Terz- oder Oktavpegeln bestimmt werden (im Fall der Umrechnung aus Oktavpegeln wäre $N = 11$, und die Mittenfrequenzen der Filter durchlaufen die Werte $16\,Hz$, $31,5\,Hz$, $63\,Hz$, $125\,Hz$, $250\,Hz$, $500\,Hz$, $1\,kHz$, $2\,kHz$, $4\,kHz$, $8\,kHz$ und $16\,kHz$). Der Linearpegel ist stets größer als alle Teilpegel, aus denen er berechnet wird.

1.2 Die Hörfläche

Sehr häufig wird bei akustischen Messungen ein anderer Einzahl-Wert, der sogenannte „A-bewertete Schalldruckpegel“ angegeben. Da das zugehörige Messverfahren in etwa die Empfindlichkeit des menschlichen Ohres nachbildet, seien zunächst einige wenige Grundtatsachen über den Frequenzgang der Ohrempfindlichkeit geschildert.

Die Ohrempfindlichkeit hängt von der Tonhöhe ab. Im Bild 1.4 ist diese durch Hörversuche gefundene Frequenzabhängigkeit dargestellt. Eingetragen in das Schalldruckpegel-Frequenzdiagramm sind die Kurven gleicher Lautstärke-Wahrnehmung. Man kann sich zum Beispiel vorstellen, dass die Kurven gleicher Lautstärke-Wahrnehmung folgendermaßen entstanden sind. Einer Versuchsperson wird abwechselnd eine Frequenz von $1\,kHz$ mit einem bestimmten Pegel und eine zweite Frequenz dargeboten mit der Maßgabe, die empfundene Lautstärke der zweiten Frequenz so selbst am Regler einzustellen, dass beide Schalle als gleich laut empfunden werden. Durch Variation der zweiten Frequenz entsteht die Kurve gleicher Lautstärke, die man einfacherweise durch den Pegel des $1\,kHz$-Tones bezeichnet. Durch Änderung des $1\,kHz$-Pegels entsteht eine Kurvenschar, die Hörfläche genannt wird. Zum Beispiel sagt sie aus, dass man einen $100\,Hz$ Ton von etwa $70\,dB$ tatsächlichem Schalldruckpegel und einen $1000\,Hz$ Ton von $60\,dB$ tatsächlichem Schalldruckpegel als gleich laut empfindet, etc. Wie man sieht, ist das Ohr im mittleren Frequenzbereich viel empfindlicher als bei den sehr hohen oder sehr tiefen Frequenzen. Seit einiger Zeit sind die Kurven gleicher Lautstärke-Wahrnehmung erneut in die Diskussion geraten weil sich herausgestellt hat, dass Messmethoden und Messbedingungen nicht ohne Einfluss auf das Ergebnis sind.

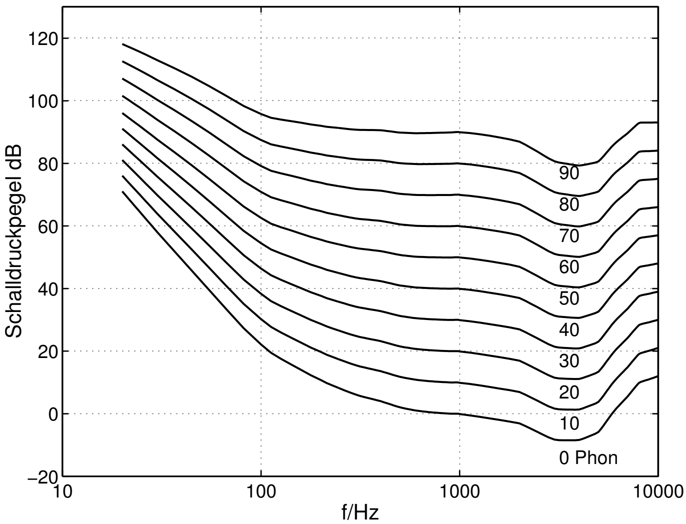

Bild 1.4. Linien gleicher Lautstärke-Wahrnehmung

1.3 Die A-Bewertung

Wie man schon an der Hörfläche erkennen kann, ist der Zusammenhang zwischen den objektiven Größen Schalldruck bzw. Schalldruckpegel und der subjektiven Größe Lautstärke in Wirklichkeit sehr kompliziert. Zum Beispiel ist der Frequenzgang der Ohrempfindlichkeit stark vom Pegel abhängig, die Kurven mit hohem Pegel haben einen deutlich flacheren Verlauf als die mit den kleineren Pegeln. Auch hängt die subjektive Wahrnehmung „Lautstärke“ nicht nur von der Frequenz, sondern auch von der Bandbreite des Schallereignisses ab. Würde man versuchen, eine Messtechnik so zu entwickeln, dass alle Ohreigenschaften dabei berücksichtigt würden, so wäre das nur mit sehr großem Aufwand zu realisieren.

National und international wird mit einem frequenzbewerteten Schallpegel gearbeitet, der auf die Grundtatsachen der Ohrempfindlichkeit wenigstens in etwa Rücksicht nimmt, dabei aber noch mit vergleichsweise einfachem Aufwand bestimmt werden kann. Dieser sogenannte „A-bewertete Schallpegel“ enthält alle Frequenzanteile des Hörbereichs. Praktisch wird der $dB(A)$-Wert mit Hilfe des A-Filters gemessen, dessen Frequenzgang in Bild 1.5 mit wiedergegeben ist. Die A-Filterkurve stellt in etwa die Umkehrung der Kurve gleicher Lautstärke mit dem Pegelwert von $30\,dB$ bei $1\,kHz$ dar. Wie man erkennt, haben die tiefen und die sehr hohen Frequenzen einen wesentlich geringeren Anteil am $dB(A)$-Wert als die mittleren Frequenzen. Natürlich kann man den

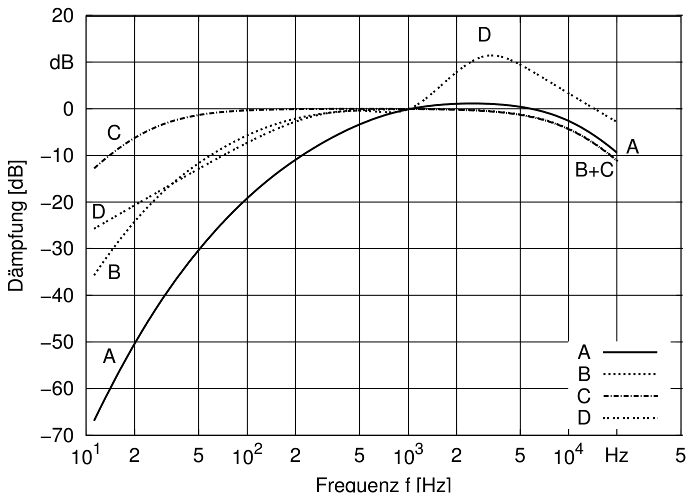

Bild 1.5. A-, B-, C- und D-Filterkurven

A-bewerteten Pegel auch aus den gemessenen Terzpegeln bestimmen. Zu den Terzpegeln werden die im Bild 1.5 angegebenen Pegelwerte addiert, und danach wird nach dem Gesetz der Pegeladdition (1.4) der Gesamtpegel – nun in $dB(A)$ – berechnet:

$$L(A) = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^{N} 10^{(L_i + \Delta_i)/10} \right) \tag{1.5}$$

Dabei sind die Abschwächfaktoren Δ_i dem Bild 1.5 zu entnehmen. Sie können in DIN 45 633 nachgelesen werden. Teilweise sind die Faktoren Δ_i auch in der Übungsaufgabe 2 zu diesem Kapitel genannt.

Bild 1.6 gibt ein praktisches Beispiel für die genannten Pegel-Größen anhand eines Signals, das in weißem Rauschen besteht. Die Terzpegel, der unbewertete Gesamtpegel (Lin) und der A-bewertete Gesamtpegel (A) sind bestimmt worden. Wie man, sieht nimmt der Terzpegel bei weißem Rauschen mit wachsender Frequenz um $1\,dB$ von Terz zu Terz zu. Der lineare (unbewertete) Gesamtpegel ist größer als jeder Terzpegel, der A-bewertete Pegel liegt hier nur wenig unter dem unbewerteten Gesamtpegel (zu weißem Rauschen siehe auch Übungsaufgabe 3).

Für spezielle Geräusche werden in Ausnahmenfällen (insbesondere bei Fahrzeugen, beim Flugverkehr und beim Schießlärm) mittlerweile auch andere Bewertungen (B, C und D) benutzt (siehe auch Bild 1.5). Gesetzliche Regelungen dagegen stellen bis heute auf den $dB(A)$-Wert ab.

Linear gebildeten Einzahlwerten – welches Filter zu ihrer Herstellung auch immer benutzt worden sein mag – haftet immer etwas Problematisches an, weil in ihnen teils erhebliche Wahrnehmungs-Unterschiede nicht zum Vorschein kommen. Zum Beispiel werden durch die A-Bewertung tieffrequente und laute Geräusche viel stärker abgeschwächt als durch die tatsächliche Wahrnehmung (siehe Bild (1.4)). Die A-Kurve reduziert Geräusche im oberen Pegelbereich der Hörfläche weit mehr als das Ohr, nur im unteren Pegelbereich stimmen A- und Ohr-Bewertung auch wirklich etwa überein. Keine einfache Frequenzbewertung kann die daraus möglicherweise entstehenden Ungerechtigkeiten wirklich beheben. Auch sind einfach verständliche und leicht anwendbare Bewertungsverfahren unverzichtbar.

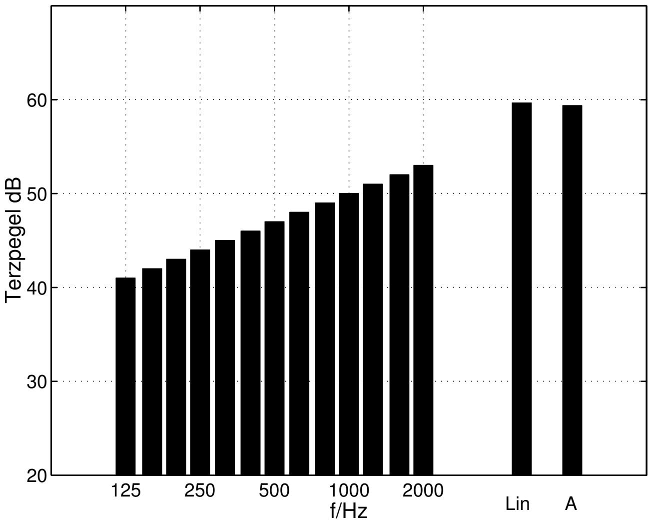

Bild 1.6. Terzpegel, unbewerteter und A-bewerteter Pegel von bandbegrenztem weißem Rauschen

1.4 Zeitlich veränderliche Geräusche

Bei gleichbleibenden, stationären Geräuschen (z.B. von einem Motor mit konstanter Drehzahl, einem Staubsauger oder dergleichen) ist die Feststellung des Pegels recht einfach. Wegen der Gleichförmigkeit des Geräusches genügt die Angabe des A-Pegels (oder der Terzpegel, falls gewünscht).

Wie aber bemisst man intermittierende Signale, wie Sprache, Musik und Verkehrslärm? Natürlich ließe sich einfach der Pegel-Zeitverlauf aufschreiben, aber das genügt nicht: Es sollen die verschiedensten Geräusch-Situationen (z.B. in zwei verschiedenen Straßen) als Ganzes möglichst einfach auch quantitativ miteinander verglichen werden, und das ist anhand der Zeitverläufe gewiss sehr schwierig. Um einfache Vergleichszahlen zu bekommen müssen Mittelwerte über eine geeignete, der Geräusch-Situation angemessene Mittelungszeit gebildet werden.

Am gebräuchlichsten (und einfachsten) ist der sogenannte 'energie-äquivalente Dauerschallpegel' L_{eq}. Er beruht auf dem Schalldruckquadrat im (langen) zeitlichen Mittel:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_{eff}^2(t)}{p_0^2} \right) dt = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} \right) dt \qquad (1.6)$$

($p_0 = 20 \; 10^{-6} \, N/m^2$). Darin bedeutet $p_{eff}(t)$ den Zeitverlauf des Effektivwertes und $L(t) = 10lg(p_{eff}(t)/p_0)^2$ den Pegel-Zeitverlauf. Das Quadrat eines Signal-Zeitverlaufes bezeichnet man auch als 'Signalenergie', der energie-äquivalente Dauerschallpegel gibt so gesehen die mittlere Signalenergie an; daraus erklärt sich die etwas voluminöse Namensgebung. Das Schalldrucksignal kann dabei nach einem A-Filter (oder nach Terzfilterung etc.) gewonnen worden sein, dann handelt es sich eben um den A-bewerteten energie-äquivalenten Pegel (etc.).

Je nach Bedarf und Anwendung werden unterschiedlichste Integrationszeiten T zwischen einigen Sekunden oder Minuten bis hin zu Stunden verwendet. Regelwerke (wie die TA-Lärm) definieren Grenzwerte durch den L_{eq}, der für gewisse, mehrere Stunden umfassende Bezugszeiträume bestimmt wird. So umfasst z.B. der Bezugszeitraum 'nachts' meist die Zeit von 22 Uhr bis 6 Uhr, also 8 Stunden. Bei Messungen wird oft zunächst eine sehr viel kleinere Mittelungszeit benutzt, um den Einfluss von Hintergrundgeräuschen gering zu halten. Aus der Anzahl der Ereignisse wird dann auf den L_{eq}, bezogen auf eine viel längere Zeit, geschlossen. Sei beispielsweise der L_{eq} von einer S-Bahn-Strecke neben einer Straße zu überprüfen. Dann misst man zunächst den energie-äquivalenten Dauerschallpegel für eine Mittelungsdauer, die ungefähr einer einzelnen Vorbeifahrt entspricht, z.B. also den auf 30 Sekunden bezogenen $L_{eq}(30s)$. Angenommen, die Bahn fahre (pausenlos) im 5-Minuten-Takt: dann ergibt sich der Langzeit-L_{eq} (bezogen auf mehrere Stunden, z.B. für die Bezugszeiträume 'tags' oder 'nachts') einfach aus $L_{eq}(lang) = L_{eq}(30s) - 10lg(5min/30s) = L_{eq}(30s) - 10 \, dB$.

Die Verwendung von Mittelwerten ist z.B. für die Festlegung und Überprüfung von Grenzwerten oft sinnvoll und übrigens auch unerlässlich. Andererseits verwischen Mittelwerte – wie ja gerade von ihnen gefordert – Einzelheiten in der zeitlichen Struktur und schildern sehr ungleiche Situationen unter Umständen im gleichen Licht. Es kann durchaus sein, dass die einmal pro

Stunde erfolgende Vorbeifahrt eines Hochgeschwindigkeitszuges und das Dauergeräusch einer dicht befahrenen Straße ähnlich große L_{eq} in langen Bezugszeiträumen besitzen. Wirken beide Quellen zusammen, so kann die eine der beiden Quellen unter Umständen im L_{eq} sogar fast nicht in Erscheinung treten (siehe auch Übungsaufgabe 5).

Der energie-äquivalente Dauerschallpegel bildet nur das einfachste Mittel zur Charakterisierung von zeitlich intermittierenden Schallen. Statistische Aussagen über das Auftreten von Schallpegeln lassen sich gewinnen mit Hilfe der sogenannten Summenhäufigkeitspegel, die mit dem Takt-Maximal-Verfahren ermittelt werden.

1.5 Zusammenfassung

Die Wahrnehmung von Schall gehorcht einem relativen Gesetz: Änderungen werden als gleich empfunden, wenn der Reiz um einen gewissen Prozentsatz vergrößert wird. Das Weber-Fechner-Gesetz, nach dem die Empfindung proportional zum Logarithmus des Reizes ist, stellt eine Schlussfolgerung aus dieser Tatsache dar. Die physikalischen Schalldrücke werden deshalb nach Logarithmieren durch Pegel mit der 'Pseudoeinheit' Dezibel (dB) ausgedrückt. Die etwa 7 Zehnerpotenzen umfassende, für den Menschen relevante Schalldruck-Skala wird dadurch auf eine übersichtliche Pegelskala von etwa $0\,dB$ (Hörschwelle) bis etwa $140\,dB$ (Schmerzgrenze) abgebildet. Um auch den Frequenzgang des Hörens wenigstens grob zu berücksichtigen, benutzt man die das Ohr nachbildende A-Bewertung. Die mit A-Filterung bestimmten Pegel werden in der Pseudoeinheit $dB(A)$ angegeben.

Für zeitlich intermittierende Schalle benutzt man zur Quantifizierung zeitliche Mittelwerte, insbesondere wird der sogenannte 'energie-äquivalente Dauerschallpegel' verwendet.

1.6 Literaturhinweise

Eine Einführung in die Sinneswahrnehmung bietet das Buch von Rainer Guski: Wahrnehmen – ein Lehrbuch (Kohlhammer Verlag, Stuttgart 1996). Ein auch physiologisch orientiertes Werk (es enthält u.a. auch die Darstellung der Gehör-Anatomie und der Reizleitung) ist „Hearing – an Introduction to Psychological and Physiological Acoustics“ von Stanley A. Gelfand (Marcel Dekker, New York 1998).

1.7 Übungsaufgaben

Aufgabe 1

An einem Immissionsort herrscht bereits ein A-bewerteter Schalldruckpegel von $50\,dB(A)$ aus dem Schalleintrag einer benachbarten Fabrik. Nun soll in

$50\,m$ Entfernung zum Immissionsort noch eine Pumpe errichtet werden. Welchen A-Pegel darf die Pumpe höchstens am Immissionsort alleine erzeugen, damit der Gesamtpegel die Grenze von $55\,dB(A)$ nicht überschreitet?

Aufgabe 2

Ein Geräusch enthalte nur die in der Tabelle genannten Frequenzbestandteile.

f/Hz	L_{Terz}/dB	Δ_i/dB
400	78	-4,8
500	76	-3,2
630	74	-1,9
800	75	-0,8
1000	74	0
1250	73	0,6

Man bestimme

- die beiden unbewerteten Oktavpegel,
- den unbewerteten Gesamtpegel und
- den A-bewerteten Gesamtpegel.

Die benötigte A-Bewertung ist in der letzten Spalte der Tabelle angegeben.

Aufgabe 3

Ein Geräusch, das aus sogenanntem weißem Rauschen besteht, lässt sich dadurch definieren, dass der Terzpegel von Terz zu Terz (aufsteigend) um $1\,dB$ anwächst (siehe auch Bild 1.6). Um wieviel steigen dann die Oktavpegel von Oktav zu Oktav? Um wieviel größer ist der Gesamtpegel gegenüber dem kleinsten Terzpegel, wenn N Terzen im Geräusch enthalten sind? Man gebe den Zahlenwert für $N = 10$ an.

Aufgabe 4

Ein Geräusch, das aus sogenanntem rosa Rauschen besteht, lässt sich dadurch definieren, dass die Terzpegel für alle enthaltenen Terzen gleich sind. Um wieviel steigen dann die Oktavpegel von Oktav zu Oktav, und wie groß sind sie? Um wieviel größer ist der Gesamtpegel, wenn N Terzen im Geräusch enthalten sind? Man gebe den Zahlenwert für $N = 10$ an.

Aufgabe 5

An einem Immissionsort neben einer Straße wird der energie-äquivalente Dauerschallpegel für den Bezugszeitraum 'tags' (16 Stunden) ein Wert von $55\,dB(A)$ festgestellt. Daneben wird eine neue Hochgeschwindigkeits-Strecke für die Bahn gebaut. Der auf 2 Minuten bezogene L_{eq} einer Zugvorbeifahrt beträgt $75\,dB(A)$. Die Eisenbahn verkehrt alle 2 Stunden.

Wie groß ist der energie-äquivalente Dauerschallpegel bezogen auf den langen Zeitraum 'tags'

- a) vom Zug alleine und
- b) von beiden Quellen gemeinsam?

Aufgabe 6

Eine S-Bahn verkehre tagsüber von 6 Uhr bis 22 Uhr alle 5 Minuten, und nachts von 22 Uhr bis 2 Uhr alle 20 Minuten (von 2 Uhr bis 6 Uhr sei Betriebspause ohne Zugverkehr). Eine einzelne Zugvorbeifahrt dauert 30 Sekunden, für diese Zeitdauer wird ein Schallpegel von $L_{eq}(30s) = 78\,dB(A)$ gemessen. Wie groß ist der energie-äquivalente Dauerschallpegel für die Bezugszeiträume 'tags' und 'nachts'?

Aufgabe 7

Die Messung des Schalldruckpegels L eines interessierenden Vorganges (z.B. der Emission von einer S-Bahn wie in der vorigen Aufgabe) kann – den Umständen entsprechend – nur bei vorhandenem Hintergrundgeräusch (z.B. von einer Straße) durchgeführt werden. Angenommen, das Hintergrundgeräusch besitze einen um ΔL kleineren Pegel als der zu messende Vorgang: Wie groß ist dann der tatsächlich gemessene Gesamtpegel? Man gebe die allgemeine Gleichung für den Messfehler an und die Zahlenwerte für $\Delta L = 6\,dB$, $\Delta L = 10\,dB$ und $\Delta L = 20\,dB$.

Aufgabe 8

Wie in Aufgabe 7 wird ein Messwert in Gegenwart eines Störgeräusches bestimmt. Wie groß muss der Störabstand sein, damit der Messfehler $0,1\,dB$ beträgt?

Aufgabe 9

Manchmal, in eher seltenen Fällen werden noch feinere Auflösungen als Terzen bei Filtern mit relativer konstanter Bandbreite, sogenannte 'Sechstel-Oktaven' benutzt. Man nenne die Gleichungen für

- die Folge der Mittenfrequenzen,
- die Bandbreite und
- die Bandgrenzen.

Aufgabe 10

In einer Berechnung, in der die drei zu einer Oktave gehörenden Terzpegel und der Oktavpegel genannt sind, erscheint dem Betrachter einer der Terzpegel zweifelhaft zu sein. Wie kann er den Zahlenwert prüfen, wenn er davon ausgeht, dass alle anderen drei Werte stimmen?

http://www.springer.com/978-3-540-71386-9

Technische Akustik
Möser, M.
2007, XVIII, 539 S. 263 Abb., Hardcover
ISBN: 978-3-540-71386-9