

# 1. Messverfahren für Geräuschempfindungen

Dieser Abschnitt befasst sich zwar mit Messverfahren für Geräuschempfindungen, beschränkt sich aber darauf, vereinfachend und allgemein verständlich die grundlegenden Sachverhalte darzustellen. Dabei wird auf den mathematischen Hintergrund nahezu völlig verzichtet und nur die Kenntnis von alltagsmathematischen Verfahren wie zusammenzählen, abziehen, malnehmen und teilen vorausgesetzt.

## **Unsere Ohren können extrem geringe und sehr viel höhere Schalldrücke verarbeiten**

Wenn wir Töne oder Geräusche hören, haben unser Ohr und unser Gehirn die Wirkungen von Schallwellen auf unser Ohr ausgewertet. Wir alle kennen Wellenformen auf dem Wasser. Sie unterscheiden sich durch die Höhe der Wellen und ob sie sich langsam von Wellenberg zu Wellenberg bewegen. Hohe Wellen schlagen mit großer Gewalt an die Uferbefestigung. Auch Schallwellen, deren Abstand von Wellental zu Wellenberg groß ist, wirken stärker auf das Trommelfell unserer Ohren als Schallwellen mit einem kleineren Abstand zwischen Wellental und Wellenberg.

Diese Wirkung wird mit Hilfe von Schalldruckmessgeräten erfasst. Unser Ohr ist in erstaunlicher Weise zur Ermittlung von unterschiedlichen Schalldrücken in der Lage. Geräusche, die wir gerade noch hören können (Hörgrenze), sind so leise, dass wir sie nur in einer extrem leisen Umgebung wahrnehmen können. Solche Verhältnisse bestehen im normalen Leben so gut wie nie. Auf der anderen Seite kann unser Ohr auch Geräusche ohne Schaden verarbeiten, die an der so genannten Schmerzgrenze liegen. Der Abstand des Schalldrucks an der Hörgrenze bis zum Schalldruck an der Schmerzgrenze liegt bei 1 zu 1 000 000 000. Kurzzeitig können unsere Ohren sogar einen bis zu 1 000 mal größeren Schalldruck verarbeiten, ohne Schaden zu nehmen. Das ist ein Verhältnis von 1 zu 1 000 000 000 000 (1 zu 1 Billion).

## **Logarithmische Darstellungen sind für die meisten Menschen schwer zu verstehen**

Als Ende der zwanziger Anfang der dreißiger Jahre damit begonnen wurde Schallereignisse zu messen, stellte sich für die Wissenschaftler die Frage, wie man mit diesen großen Unterschieden umgehen könnte. Damals gab es noch keine modernen Rechenmaschinen oder gar Computer. Es war bis in die siebziger Jahre üblich, komplizierte Rechenoperationen mit Hilfe von Logarithmen zu berechnen. Manche

Leserinnen und Leser im Rentenalter werden sich noch an die Rechenschieber und Logarithmentafeln ihrer Schulzeit erinnern. Heute können auch viele Wissenschaftler und Ingenieure mit Logarithmen nichts mehr anfangen.

Deshalb ist es vor der Beschäftigung mit Ergebnissen von Schallmessungen leider nötig, sich wenigstens klarzumachen, dass man mit logarithmischen Werten nicht wie mit normalen Zahlen umgehen kann. Als Einheit für die Messung des Schalldrucks benutzt man ein Dezibel (dB). 1 dB ist ein Zehntel Bel. Wie ein Dezimeter ein zehntel Meter, ein Deziliter ein zehntel Liter ist. Seltsamerweise ist es dann aber üblich immer von 10, 20, 30 usw. Dezibel zu sprechen. Das ist so, als würde man statt von einem Meter von 10 Dezimetern sprechen. Diese eigenartige Gewohnheit macht es Außenstehenden zusätzlich schwer mit dieser Maßeinheit umzugehen.

0 dB ist der Schalldruck an der Hörgrenze, also des leisesten Geräuschs, das man hören kann. Aus nicht ganz verständlichen Gründen werden üblicherweise Schalldruckpegelwerte angegeben. Sie stellen das Vielfache des Schalldrucks an der Hörschwelle dar. Auch das macht "normalen" Menschen das Verständnis nicht gerade leichter. Aber um die grundlegenden Zusammenhänge zu verstehen, ist die Unterscheidung zwischen Schalldruckpegeln und Schalldruck bedeutungslos.

In der nebenstehenden Tabelle ist die logarithmische Schreibweise in Dezibel der normalen Schreibweise gegenübergestellt. Man sieht, dass 50 dB der Zahl 100 000 entspricht. Also einer 1 mit 5 Nullen. Entsprechend steht 60 dB eine Zahl mit sechs Nullen, also 1 Million

gegenüber. 60 dB sind in normaler Schreibweise zehnmal so groß wie 50 dB. In der letzten Spalte der Tabelle kann man ablesen, dass das Doppelte von 50 dB 53 dB ist, 56 dB das vierfache und 59 dB das achtfache. Die Mitte zwischen 50 und 60 dB ist 57 dB und keineswegs 55 dB, wie man vermuten könnte.

Nur wer sich intensiver mit logarithmischen Zahlen beschäftigt, kann damit auch

Logarithmische Schreibweise dB	Normale Schreibweise	Vielfache
60	1.000.000	10
59	794.328	8
57	501.187	5
56	398.107	4
54	251.189	2,5
53	199.526	2
50	100.000	1

rechnen. Wie die nebenstehende Tabelle zeigt, ist die Summe von 50 und 60 dB keineswegs 110 dB sondern 60,4 dB. Deshalb ist es auch der Sinn dieses Abschnitts nicht, die Leserinnen und Leser zum Rechnen mit Dezibel auszubilden, sondern sie davor zu warnen. Dass ein normaler Mensch hier nicht folgen kann, ist den Lärmverursachern natürlich gerade recht.

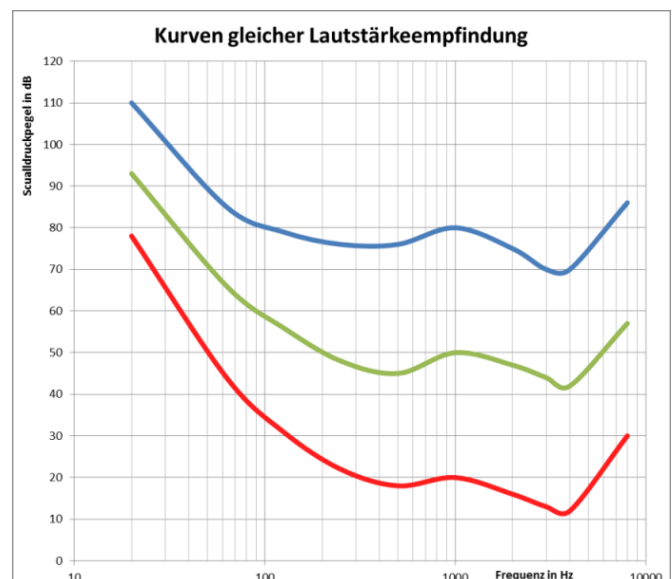
Logarithmische Schreibweise dB	Normale Schreibweise
60	1.000.000
50	100.000
60,4	1.100.000

### Unserer Ohren können einen sehr großen Bereich von Tonhöhen wahrnehmen

Unsere Ohren analysieren aber nicht nur den Schalldruck, um die Lautstärke festzustellen, sie unterscheiden auch wie schnell Wellenberge aufeinander folgen, um daraus Klangeigenschaften des Schalls zu bestimmen. Die Zahl der Abfolgen von Wellenberg zu Wellenberg pro Sekunde ist die Zahl der Schwingungen des Schalls, Frequenz mit der Einheit Hertz (Hz) genannt. Unser Ohr nimmt im unteren Bereich Schwingungen von wenigstens 16-20 Hz als Töne wahr. Bei jungen Erwachsenen liegt der obere Bereich des Hörempfindens bei 16-20 000 Hz. Der Abstand ist 1 zu 1000. Im Rentenalter reicht das Hörempfinden nur noch bis zu etwa der Hälfte des Höchstwerts.

### Die Lautstärke ist vom Schalldruck und der Tonhöhe abhängig

Ob und wie laut wir eine Schallschwingung hören können, hängt nicht nur vom Schalldruck ab, sondern ist je nach der Tonhöhe (Frequenz) unterschiedlich. Dies wurde bereits durch aufwändige Experimente in den dreißiger Jahren ermittelt. Besonders bei Frequenzen unterhalb von 500 Hz ist ein wesentlich höherer Schalldruck erforderlich, um den gleichen Lautstärkeindruck wie bei höheren Frequenzen zu vermitteln. Bei sehr tiefen Frequenzen sind diese Unterschiede beträchtlich. Bei sehr leisen Tönen sind die Unterschiede besonders groß, bei lauten Tönen sind sie deutlich kleiner. Den Lautstärkeindruck bei einer Frequenz von 1000 Hz bezeichnete man mit dem Maß der Lautstärke Phon. Alle Punkte auf der blauen Kurve haben die Lautstärke 80 Phon, auf der grünen Kurve 50 Phon und auf der roten Kurve 20 Phon.

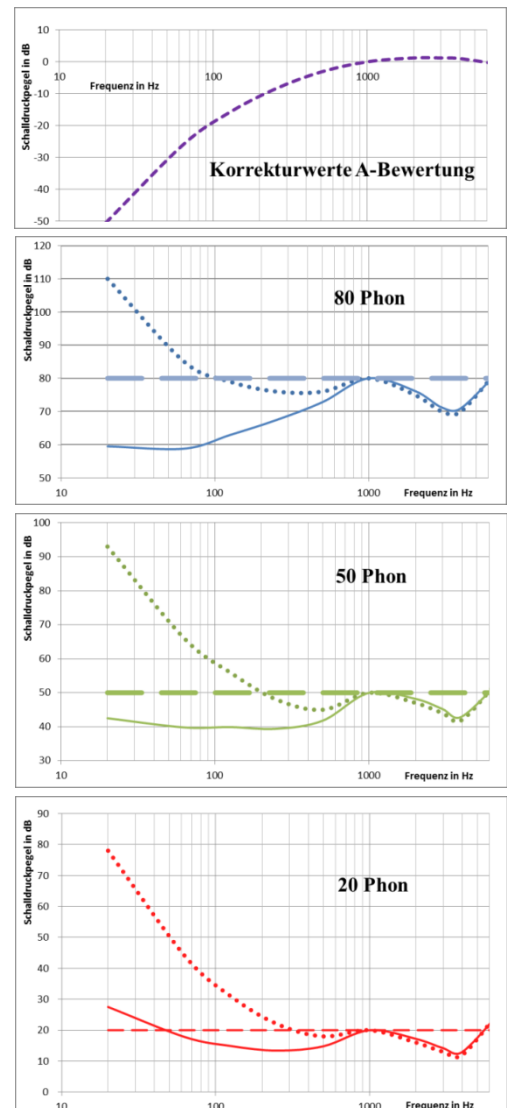


## Korrekturwerte zur Umrechnung von Schalldruckpegeln in Lautstärke

In den dreißiger Jahren mussten die Forscher einen Weg finden, wie man mit Hilfe des Schalldruckpegels die Lautstärke unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Empfindlichkeit der Ohren für verschiedene Frequenzen und Lautstärkebereiche ermitteln kann. Dazu wurden Tabellen entwickelt, die jeweils getrennt für leise, mittlere und laute Schallereignisse abhängig von der Tonhöhe (Frequenz) entsprechende Korrekturwerte festlegten. In Deutschland hatten die Schallmessgeräte lange Zeit einen Schalter mit drei Stufen für leise, mittlere und laute Schallereignisse. Ähnliche Verfahren gab es auch in anderen Ländern.

Als in den sechziger Jahren mit der wachsenden Technisierung des Lebens Lärmmessungen immer wichtiger wurden, gab es Bestrebungen die nationalen Korrektursysteme zu vereinheitlichen. Das Ergebnis war, dass das Korrektursystem für den leisen Schall international für alle Schallmessungen festgelegt wurde. Man einigte sich auf dem kleinsten gemeinsamen Nenner, was den Lärmverursachern natürlich sehr recht war. Denn die Ausweitung der Korrekturmethode für den leisen Schall auf alle Schallmessungen führt zu deutlich niedrigeren Werten bei mittlerem und lautem Schall.

Die nebenstehenden Schaubilder zeigen den Korrekturfaktor und seine Auswirkungen für einen lauten Schall von 80 Phon, einen mittleren Schall von 50 Phon und einen leisen Schall von 20 Phon. Die waagerechte gestrichelte Linie zeigt jeweils den Wert, der durch die Korrektur erreicht werden soll. Die punktierten Linien sind die zu korrigierenden Messwerte. Die durchgezogenen Linien sind die korrigierten Werte. Sie sind nur bei 20 Phon einigermaßen in der Nähe der gestrichelten Ziellinie. Bei den beiden lautereren Werten liegen die korrigierten Werte deutlich unter der Ziellinie. Die Schallereignisse werden künstlich leiser gerechnet, als sie tatsächlich sind.



Die hier verwendeten Ausgangswerte entsprechen einer Messung, die weit verbreitet ist. Es gibt aber auch davon etwas abweichende Messungen, für die sich aber ähnliche Ergebnisse zeigen würden. Solche Messungen sind sehr schwierig und ihre Ergebnisse schwanken in Abhängigkeit von den verwendeten Messmethoden etwas.

Die "Lärm mindernden" Wirkungen des so genannten A-Bewerteten Schalldruckpegels werden nicht nur von Kritikern des Fluglärms und anderer Lärmformen kritisiert, sondern auch von Wissenschaftlern und Spezialisten aus der Hi-Fi-Branche. Wie später gezeigt wird, gibt es schon lange sehr viel bessere Messmethoden.

### **Dauerschallpegel verniedlichen die Lärmbelastung**

Eine weit verbreitete und sehr viel stärker als die A-Bewertung "lärmmindernde" Methode ist die Berechnung von Dauerschallpegeln, die es unter verschiedenen Namen gibt. Dabei werden Schallereignisse, die zum Beispiel während einer Stunde 20 mal für eine Minute auftreten, über die gesamte Stunde verteilt. Die vierzig Minuten ohne Lärm werden einfach mit dem Wert null bei der Ermittlung des Durchschnittswerts berücksichtigt. Der Durchschnitt sinkt auf ein Drittel.

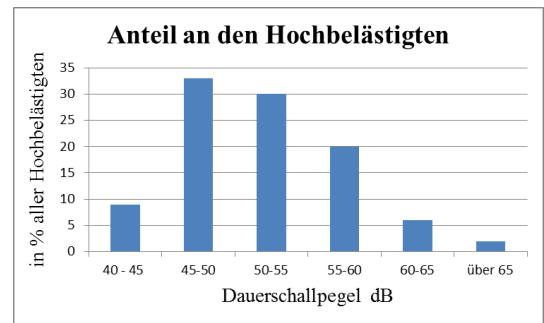
Der Durchschnitt sagt aber auch nichts darüber aus, ob in der Stunde ein oder zwei sehr laute Flugzeuge geflogen sind oder 20 leisere Flugzeuge. In beiden Fällen kann sich der gleiche Durchschnittswert ergeben. Die Lärmforschung hat aber gezeigt, dass die Zahl der Störungen wichtiger ist, als die Lautheit der einzelnen Störung. Bei einer Verringerung des von den Flugzeugen verursachten Schalldruckpegels um nur 3 dB, die gerade noch gut wahrnehmbar ist, können doppelt so viel Flugzeuge fliegen und dennoch nur einen unveränderten Dauerschallpegel bewirken.

### **Der Frankfurter Fluglärminde**

Für den Frankfurter Flughafen wurde der so genannte Frankfurter Fluglärm-Index entwickelt. Er baut auf den oben beschriebenen fragwürdigen Verfahren auf und entwickelt davon ausgehend ein völlig absurdes System. Es wurden Bereiche festgelegt und ihnen Dauerschallpegel zugeordnet. Die Bewohner wurden gefragt, ob und wie stark sie sich von Fluglärm belästigt fühlen. Die nebenstehende Tabelle zeigt das Ergebnis der Befragung. Sie wurde mit Schwergewicht auf stark vom Fluglärm betroffene Gebiete durchgeführt.

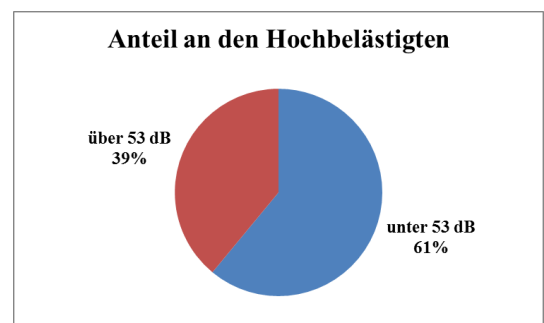


Im nächsten Schritt wurden nur noch die „äußerst“ und „stark“ Belästigten berücksichtigt. Das Argument dafür ist, dass der Index dazu führen soll, Flugrouten so auszuwählen, dass die Zahl der besonders stark betroffenen Menschen so klein wie möglich ist.

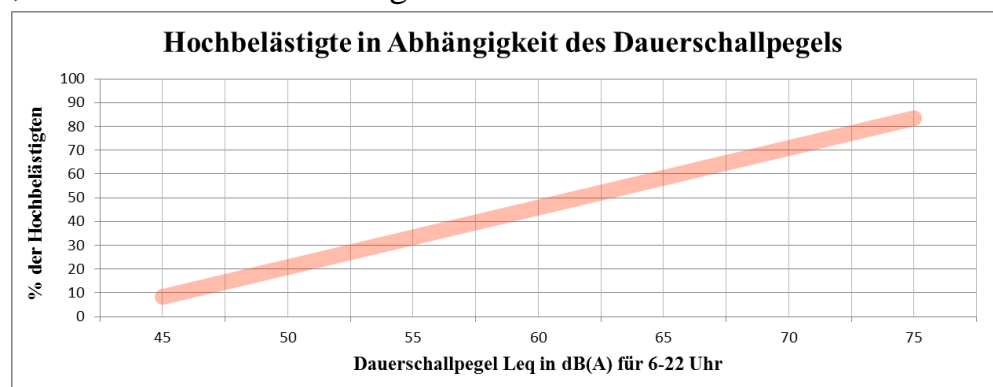


Dies wird auch an anderen Flughäfen so gehandhabt. Die Spezialität des Frankfurter Fluglärm-Index ist, dass man die besonders stark Belästigten nur in den Gebieten berücksichtigt, die einen Dauerschallpegel von wenigstens 53 dB aufweisen. Ursprünglich wollten die Erfinder dieses Indexes sogar die Grenze bei 55 dB Dauerschallpegel ziehen. Dies hätte bedeutet, dass noch nicht einmal 30 % der sich als äußerst und stark betroffenen Bezeichnenden im Index verblieben wären.

Erst die äußerst herbe Kritik eines Wissenschaftlerteams, das ein Gutachten zu diesem Index erstellte, führte dazu, dass die Grenze auf 53 dB gesenkt wurde. Wie die nebenstehende Grafik zeigt, wurden aber auch danach noch über 60 % der äußerst und stark Belästigten aus dem Index ausgeschlossen. Die Gutachter hatten dringend geraten, wie an anderen Flughäfen alle äußerst und stark Betroffenen bis zu 40 dB hinunter einzubeziehen, oder wenigstens die Hälfte der äußerst und stark Belästigten zu berücksichtigen.



Wie das untenstehende Schaubild zeigt, waren in der Untersuchung bei 50 dB Dauerschallpegel noch rund 20 % der Befragten äußerst und stark belästigt, bei 45 dB rund 10 % . Man sollte diese Ergebnisse mit Vorsicht behandeln. Um darauf hinzuweisen, wurde eine sehr breite Linie gewählt. Es gibt andere Untersuchungen, die zu abweichenden, wenn auch ähnlichen Ergebnissen kamen. Auf die methodischen Probleme solcher Untersuchungen einzugehen, würde hier zu weit führen.



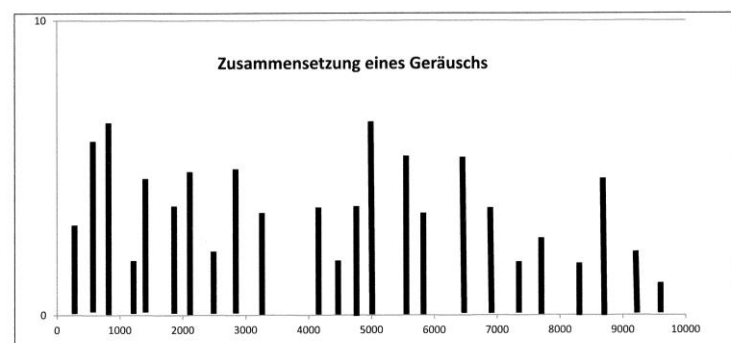
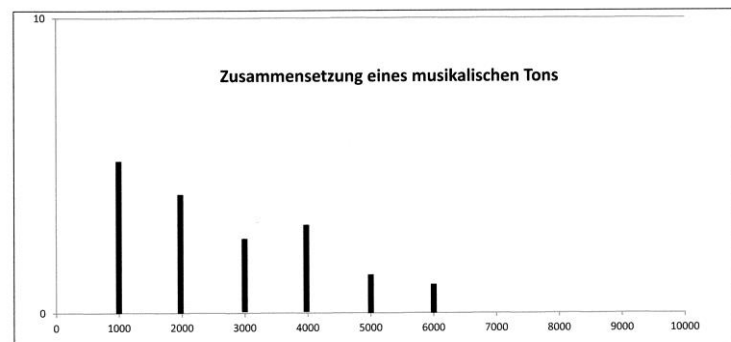
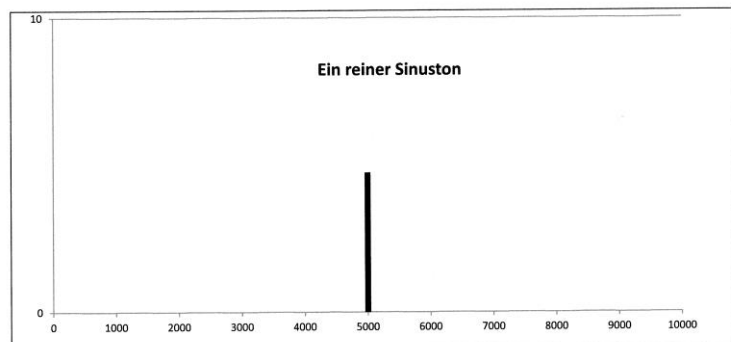
Die Absicht der Verfasser war offensichtlich, einen Index zu konstruieren, der nur das unmittelbare Umland des Flughafens berücksichtigt. Die Behauptung, mit seiner Hilfe könne man Flugrouten so auswählen, dass die Zahl der äußerst und stark Belästigten so klein wie möglich gehalten wird, ist offensichtlich falsch.

### **Es gibt seit längerer Zeit sehr viel bessere Messverfahren für Geräuschempfindungen**

Als Ende der sechziger Jahre international die A-Bewertung bei der Messung von Schalldruckpegeln eingeführt wurde, war die wissenschaftliche Forschung bereits weit fortgeschritten. Die Einführung von wesentlich besseren Verfahren zur Bestimmung der Wirkungen von Lärm stand unmittelbar bevor. Die Wissenschaftler dachten damals, dass die A-Bewertung nur für eine kurze Übergangszeit benutzt werden würde. Aber als die neuen besseren Verfahren zur Verfügung standen, wurden sie zur Messung von Verkehrslärm nicht benutzt, weil sie zeigten, dass die Menschen den Lärm wesentlich lauter und unangenehmer empfanden. Sowohl in den USA wie in

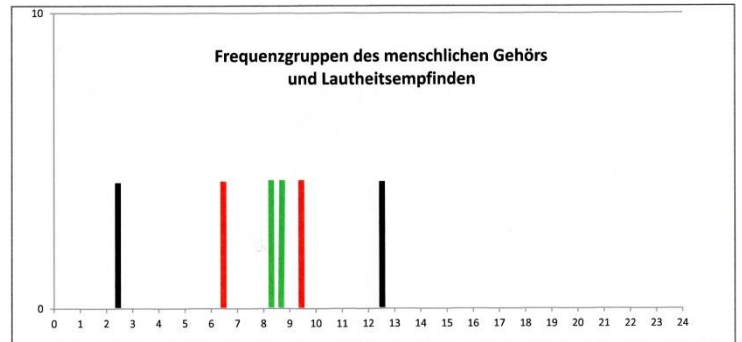
Deutschland wurden damals neue Verfahren entwickelt und auch von der International Standardization Organisation in den ISO Standards sowie eine deutsche Version in einer DIN-Norm festgelegt.

Die Unterschiede zu den alten Verfahren sind beträchtlich. Bei den alten Verfahren wurden Sinustöne zur Messung verwendet. Diese künstlich erzeugten Töne weisen nur eine Frequenz auf. Musikalische Töne bestehen dagegen aus einer ganzen Reihe von Frequenzen und Geräusche in aller Regel aus sehr vielen Frequenzen. Die nebenstehenden Beispiele zeigen den großen Unterschied.



Wie man inzwischen erforscht hatte, nehmen unsere Ohren Geräusche in 24 Frequenzgruppen wahr. Wie sich die verschiedenen Frequenzanteile auf unserer Lautstärkeempfinden auswirken, hängt sehr stark von der Verteilung der Frequenzen auf die 24 Frequenzgruppen ab.

In dem nebenstehenden Schaubild sind verschiedene Verteilungen zweier Frequenzen dargestellt. Die schwarz eingezeichneten Frequenzen liegen in weit voneinander entfernten Frequenzgruppen. Ihre Lautheit kann man einfach zusammenzählen. Die



Summe der Lautheit der Töne ist also doppelt so hoch wie jeder einzelne Ton. Bei den rot eingezeichneten Frequenzen ist der Abstand deutlich geringer, weshalb die Summe der Lautheit beider Töne unterhalb der doppelten Lautheit liegt. Die beiden grün eingezeichneten Frequenzen liegen innerhalb einer Frequenzgruppe, hier ist die Lautheit der Summe beider Töne nur wenig höher als die Lautheit eines einzelnen Tons. In der modernen psychoakustischen Forschung spricht man nicht mehr von Lautstärke, sondern von Lautheit. Damit soll deutlich gemacht werden, dass es nicht um eine technische Größe, sondern um eine Größe menschlicher Empfindungen geht.

In der psychoakustischen Literatur werden Beispiele aufgezeigt, in denen bei gleichen Schalldruckpegeln aufgrund der sehr breiten Verteilung eines Vergleichsgeräuschs gegenüber einem auf eine Frequenzgruppe beschränkten Geräusch eine etwa vierfach so hohe Lautheit ermittelt wird. Dies ist sicher ein Extrembeispiel, aber die Ermittlung einer doppelt so hohen Lautheit und eine unterschiedliche Lautheit bei Geräuschen mit gleichem Schalldruckpegel sind nahezu die Regel.

Als Maß für die so ermittelte Lautheit wurde die Einheit ein Sone gewählt. Sie entspricht einer Lautstärke von 40 Phon. Die nebenstehende Tabelle stellt die Einheiten Sone und Phon einander gegenüber. Ein Sone ist ein recht leises Geräusch. Für die Beschäftigung mit Lärm spielen Werte unterhalb von ein Sone keine Rolle. Die Skala hat gegenüber der Phon-Skala einen großen Vorteil. Man kann immer das Verhältnis von zwei Sone-Werten bilden und daraus sehen, wie viel lauter das Geräusch mit dem höheren Sone-Wert ist. 8 Sone sind also viermal so laut wie 2 Sone. Aus der Phon-Skala oder aus Schalldruckpegeln lassen sich Lautstärkeverhältnisse dagegen nicht so einfach ablesen.

Lautstärke Phon	Lautheit Sone
100	64
90	32
80	16
70	8
60	4
50	2
40	1
20	0,15



## **Nicht nur die Lautheit bestimmt das Lärmempfinden**

Das Lärmempfinden wird nicht nur von der Lautheit beeinflusst, sondern auch von der Art des Geräuschs. Ein in der Lautheit in kurzen Abständen stark schwankendes Geräusch wird unangenehm empfunden. In der Psychoakustik bezeichnet man dies als Rauigkeit. Typisch raue Geräusche sind die Auspuffgeräusche von Sportwagen und Motorrädern, aber auch viele Flugzeuggeräusche. Man kann das Empfinden von Rauigkeit ebenfalls in Messgrößen darstellen. Das gleiche gilt für die Schärfe eines Geräuschs. Wir empfinden ein Geräusch als scharf, wenn es viele hohe Frequenzbestandteile enthält und insgesamt nicht zwischen tiefen und hohen Frequenzen ausgewogen ist. Auch die Empfindung der Schärfe kann in Messgrößen dargestellt werden. Nach den alten Verfahren gemessene Schalldruckpegel für Flugzeuge suggerieren oft eine Abnahme des Lärms, obwohl zum Beispiel die unangenehme Schärfe des Schalls zugenommen hat.

## **Die neuen Messverfahren werden zwar in vielen Bereichen verwendet, aber nicht für Verkehrslärm**

Die neuen Messverfahren werden zwar bei der Messung von Verkehrslärm nicht berücksichtigt, aber sehr wohl in der Industrie zum Beispiel bei der Erfassung und Verringerung von Innenraumgeräuschen in Kraftfahrzeugen benutzt. Dabei werden darüber hinausgehende Methoden für noch feinere Untersuchungen angewendet, auf die hier nicht eingegangen wird. Ironischerweise werden die modernen Verfahren seit längerer Zeit international bei der Zulassung von Flugzeugen aufgrund der Vorgaben der International Civil Aviation Organization ICAO angewendet, wobei aber nicht ganz sicher ist, wie sehr dieses Verfahren durch Einwirkungen der Lobby der Flugverkehrswirtschaft entschärft wurde.

## **Qualitativ hochwertige Schalldruckpegel-Messgeräte können auch für die modernen Messverfahren genutzt werden.**

Moderne, qualitativ hochwertige Schalldruckpegel-Messgeräte bieten die Möglichkeit von Terzband-Analysen. Die Terzbänder entsprechen annähernd den 24 Frequenzgruppen des menschlichen Ohrs. Auf der Basis einer Terzband-Analyse lassen sich mit Computerprogrammen Lautheitswerte berechnen.