

Kommunikationstechnik I

Prof. Dr. Stefan Weinzierl

Musterlösung 6. Aufgabenblatt

1. Psychoakustik

1.1 Was ist ein Tonschwellenaudiogramm ?

Durch ein Tonschwellenaudiogramm (engl: hearing loss) wird die Hörfähigkeit einer Versuchsperson bestimmt. Dabei wird frequenzabhängig die Empfindlichkeit des Gehörs gemessen und das Ergebnis relativ zur mittleren Hörfähigkeit der Bevölkerung angegeben. Die Messung erfolgt an sieben Frequenzstellen im Bereich von 125 Hz bis 8 kHz im Oktavabstand.

1.2 Beschreiben Sie die Methode der Békésy-Audiometrie zur Bestimmung des Tonschwellenaudiogramms.

Das Verfahren von Békésy dient der Bestimmung der Hörschwelle einer Versuchsperson. Dabei wird die Frequenz eines Sinustons langsam kontinuierlich von 125 Hz bis 8 kHz erhöht (typischerweise in einem Zeitraum von 5 Minuten). Mithilfe eines Knopfes kann die Versuchsperson die Lautstärke des Tones erhöhen und verringern. Der Ton pendelt dabei in einem Bereich von knapp über der Hörschwelle bis knapp unterhalb der Hörschwelle. Die Aufgabe der Person ist es, den Knopf gedrückt zu halten, falls der Ton nicht mehr zu hören ist, sodass sich die Lautstärke wieder erhöht, und ihn loszulassen, wenn er wieder zu hören ist. Die Amplitudenänderungen der Sinustöne werden durch einen Pegelschreiber aufgezeichnet und das Ergebnis entspricht der Hörschwelle der Versuchsperson.

1.3 Beschreiben Sie einige methodische Fehlerquellen, die bei dieser Methode auftreten können, insbesondere das sog. Kriterienproblem.

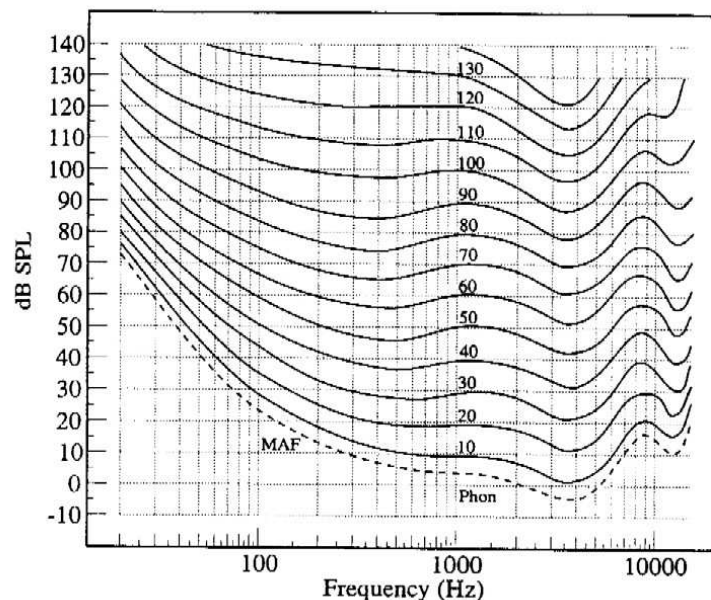
Die wesentlichen Fehlerquellen bei der Messmethode nach von Békésy sind zum einen sog. „Habituations- und Antizipationsfehler“ und zum anderen das sog. Kriterienproblem.

„Habituations- und Antizipationsfehler“ entstehen dadurch, dass der Versuchsperson der Versuchsablauf bekannt ist. Sie hat demnach eine gewisse Erwartungshaltung, auf was sie im folgenden achten soll. Dadurch ist es möglich, dass die Versuchsperson entweder Wahrnehmungen vorwegnimmt (antizipiert) oder zu lange wartet, weil sie eine bestimmte Reizwahrnehmung erwartet.

Das Kriterienproblem besteht darin, dass jede Versuchsperson die Entscheidung treffen muss, wann ein Ton gehört wurde und wann nicht. Das Kriterium für diese Entscheidung wird dabei von verschiedenen Versuchspersonen unterschiedlich gesetzt. Während manche ein sehr striktes Kriterium anwenden und nur dann die Entscheidung treffen, wenn sie sich wirklich sicher sind, werden andere Personen ein weniger striktes Kriterium anwenden und die Entscheidung auch dann treffen, wenn sie sich noch unsicher sind.

1.4 Wann verwendet man bei der Messung von Schallpegeln Frequenzbewertungskurven?

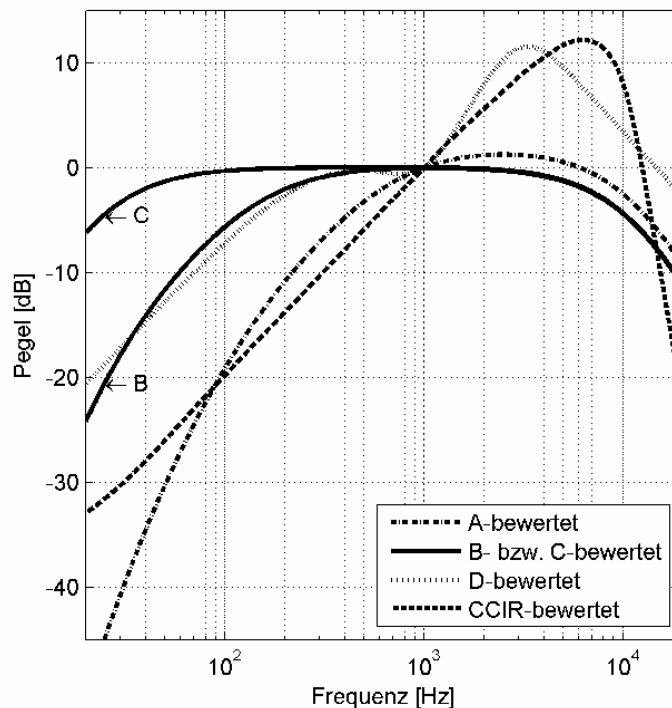
Frequenzbewertungskurven werden immer dann verwendet, wenn man ein an die menschliche Wahrnehmung angepasstes Lautstärkemaß benötigt. Man unterscheidet in der Psychoakustik den Begriffe „Lautheit“ im Gegensatz zur „Lautstärke“ als physikalisch messbare Größe. Die „Lautstärke“ bezieht sich in diesem Zusammenhang auf den Pegel eines Signals. Spricht man zum Beispiel davon, die Lautstärke eines Signals um 3dB zu erhöhen, dann wird man die Amplitude des Signals um 3dB erhöhen und dabei alle im Signal enthaltenen Frequenzen gleichmäßig anheben. Signale mit gleichem (Schalldruck-)Pegel rufen jedoch nicht notwendigerweise die gleiche Lautstärkeempfindung hervor. Betrachtet man die „Kurven gleicher Lautheit“, die von Fletcher-Munson für Kopfhörer- und von Robinson-Dadson für Lautsprecherwiedergabe gefunden wurden, dann kann man erkennen, dass Sinustöne mit verschiedenen Frequenzen unterschiedliche Pegel erfordern um die gleiche wahrgenommene Lautstärke hervorzurufen. Oder anders herum betrachtet: Sinustöne mit gleicher Amplitude aber unterschiedlicher Frequenz werden meist als unterschiedlich laut wahrgenommen.



Aus dieser Erkenntnis hat man die sog. Bewertungskurven entworfen. Bewertungskurven sind Frequenzgänge von Filtern, die auf ein Signal angewendet werden, um ein Maß für die vom Menschen wahrgenommene Lautheit zu bekommen.

1.5 Welche Frequenzbewertungskurven kennen Sie? Wenn die Messung eines Störgeräuschpegels 1. A-bewertet und 2. C-bewertet vorgenommen wird, wie unterscheidet sich das Ergebnis ?

Die bekanntesten Bewertungskurven sind die A-, B-, C-, D- und CCIR-Bewertungskurven (siehe Abbildung).



Die Bewertungskurven A bis D sind den Kurven gleicher Lautheit mit unterschiedlichen phon-Werten angenähert. Der reziproke Verlauf mag zunächst verwundern, erklärt sich jedoch sehr leicht: wie in Aufgabe 1.4 erläutert, werden tiefe und hohe Frequenzen bei gleichem Pegel leiser wahrgenommen als mittlere Frequenzen. Um also ein Lautstärkemaß zu bekommen, das dem menschlichen Hören entspricht, müssen also ebenfalls diese Frequenzanteile entsprechend abgesenkt werden.

Die A-Kurve ist den phon-Kurven unterhalb von 30 phon, die B-Kurve den Kurven zwischen 30 und 60 phon und die C-Kurve den Kurven über 60 phon angenähert. Die D-Kurve entspricht den phon-Kurven mit sehr großer Lautstärke und wird gern bei z.B. bei Messungen von Fluglärm angewendet.

Wie man dem Diagramm entnehmen kann, senkt die A-Bewertungskurve deutlich stärker tiefe Frequenzen ab als die C-Kurve. Frequenzen oberhalb von 1 kHz werden von der A-Kurve etwas stärker bewertet als von der C-Kurve. In der Regel wird man daher bei breitbandigen Signalen durch Anwendung eines A-Bewertungsfilters geringere Pegelwerte erhalten als bei einem C-Bewertungsfiler. Bei der Lärmmessung ist das A-bewertete Ergebnis also besser als das C-bewertete.

1.6 Erklären sie den Sinn der „Loudness“-Taste an Ihrer Hifi-Anlage.

Die Loudness-Taste soll ebenfalls dem Frequenzgang des Gehörs Rechnung tragen. Wie man den Kurven gleicher Lautheit entnehmen kann, werden bei geringen Pegeln sehr tiefe und sehr hohe Frequenzen im Verhältnis zu mittleren Frequenzen stärker benachteiligt als dies bei mittleren oder höheren Pegeln der Fall ist; die Kurven verlaufen in diesen Frequenzbereichen deutlich steiler. Der Loudness-Schalter dient daher dazu, bei geringen Abhörlautstärken eine Korrektur des Frequenzgangs durch Anhebung tiefer und hoher Frequenzen vorzunehmen.

1.7 Für einen psychoakustischen Codec zur Bitratenreduktion soll ermittelt werden, wo die „Transparenzschwelle“ liegt, d.h. bei welcher Bitrate (wobei wir annehmen, dass sie sich stufenlos verändern lässt) ein gerade wahrnehmbarer Unterschied zum Original hörbar ist.

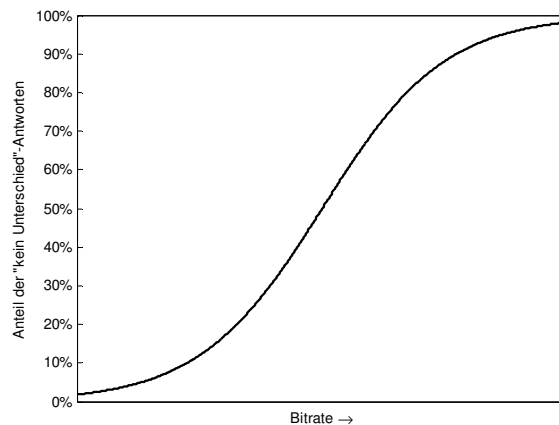
Skizzieren Sie ein mögliches Versuchsdesign 1. nach dem Konstanzverfahren und 2. als adaptiver forced-choice-Versuch und diskutieren Sie Vor- und Nachteile der beiden Verfahren.

Für beide Verfahren bedarf es mehrerer Hörbeispiele, die nach dem zu untersuchenden Kriterium variiert wurden. In dem konkreten Fall handelt es sich dabei also um ein kurzes Stück Audio, das zunächst in unkomprimierter Form vorliegt (Original) und dann mit verschiedenen Bitraten kodiert wurde. Je geringer die Bitrate, desto deutlicher werden Artefakte hörbar sein.

1. Konstanzverfahren

Beim Konstanzverfahren wird der Versuchsperson jeweils ein kodiertes Hörbeispiel im Vergleich zum Original vorgespielt. Die Versuchsperson soll dabei jeweils entscheiden, ob sie einen Unterschied zwischen den beiden Signalen gehört hat, oder nicht.

Für jedes Hörbeispiel wird nach Versuchsende berechnet, welcher Prozentsatz der Versuchspersonen den Unterschied gehört hat. Es ergibt sich ein Kurvenverlauf, der in etwa folgende Form aufweist:



Die Position, an der die Hälfte der Versuchspersonen einen Unterschied zum Original gehört hat, wird als „Schwellwert“ bezeichnet.

Auch bei diesem Verfahren ist das Kriterienproblem vorhanden.

2. Forced-Choice-Verfahren

Die sog. Forced-Choice-Verfahren nehmen der Versuchsperson das Kriterium ab zu entscheiden, ob ein Unterschied gehört wurde oder nicht.

Bei diesen Verfahren werden der Versuchsperson ebenfalls jeweils zwei Signale vorgespielt: das Original und ein Beispiel mit verringerter Bitrate. Die Versuchsperson weiß im Vorhinein, dass immer ein Beispiel das Original ist und das andere eines der zu testenden Signale. Die Versuchsperson soll nun entscheiden, welches der beiden Signale das richtige war.

Bei diesem Verfahren kann es also keine „Jasage“-Tendenz geben, da die Versuchsperson ja weiß, dass es in jedem Durchgang ein zu entdeckendes Beispiel vorkommt.

Meist wird das Forced-Choice-Verfahren auch adaptiv angewendet. Das bedeutet, dass sich das Vorspielen eines Beispiels nach der vorherigen Antwort der Versuchsperson richtet. Hat sie also das Beispiel mit verringerter Bitrate richtig erkannt und ausgewählt, dann wird das Beispiel im folgenden Durchgang eines sein mit geringerem Unterschied zum Original und umgekehrt.

2. Spektrale Lautheitssummation

- 2.1 Erklären Sie, was in der Psychoakustik unter einer „Frequenzgruppe“ verstanden wird.

Das menschliche Gehör teilt den wahrgenommenen Schall in einzelne benachbarte Frequenzbänder auf, um die Hörleistung zu verbessern. Es ist in der Lage, frequenzselektive Filter zu verwenden, um das Hörereignis in einzelne Frequenzbänder zu zerlegen, die dann gemeinsam ausgewertet werden. Frequenzgruppen spielen insbesondere bei der Bestimmung der Lautheit und bei Verdeckungseffekten eine Rolle.

Dass solche Filter existieren wurde von H. Fletcher 1940 in einem Hörversuch nachgewiesen. Er untersuchte, wie groß der Pegel eines Sinustons sein muss, damit er in Rauschsignalen unterschiedlicher Bandbreite entdeckt wird. Die Mittenfrequenz des Rauschens war dabei gleich der Frequenz des Sinustons, die Bandbreite des Rauschens ließ sich bei gleicher Leistungsdichte verändern. Er stellte fest, dass sich der Pegel des Sinustons, der zur Entdeckung nötig war, zunächst mit steigender Rauschbandbreite ebenfalls erhöhte. Ab einer gewissen Bandbreite jedoch blieb dieser Pegel konstant. Weiter entfernt liegende Schallanteile beeinflussen das Entdecken des Sinustons anscheinend also nicht mehr, die Auswertung wird nur in der Nähe der Frequenz des Sinustons vorgenommen. Dies entspricht der Vorstellung frequenzselektiver Filter, die einzelne Frequenzbereiche herausfiltern und auswerten.

Die Betragsfrequenzgang der auditiven Filter verläuft nicht unendlich steil. Wenn jedoch mit Frequenzgruppenfiltern gerechnet wird, wird meist die sog. *equivalent rectangular bandwidth* verwendet, das ist die Bandbreite eines Rechteckfilters, das bei der Filterung eines weißen Rauschsignals ein die gleiche Signalenergie hervorrufen würde. Eine Berechnungsvorschrift für die ERB wurde von Glasberg und Moore in Abhängigkeit der Filtermittenfrequenz f wie folgt angegeben:

$$ERB = 24,7(4,37 \cdot f + 1)$$

- 2.2 Erläutern Sie die Bedeutung der Sone-Skala der Lautheit. Gehen Sie insbesondere darauf ein, wie die Skala gefunden wurde und wie sie sich rechnerisch bestimmen lässt.

Die Sone-Skala gibt die Lautheit als Verhältnisskala an. Sie wurde von dem amerikanischen Psychologen und Physiker Stevens ebenfalls im Hörversuch ermittelt. Den Versuchspersonen wurde eine Sinuston mit einem bestimmten Schalldruckpegel als Standardreiz vorgespielt und dazu jeweils weitere Sinustöne unterschiedlichen Pegels. Die VPn wurden aufgefordert, diese in ihrer Lautheit im Vergleich zum Standardreiz zu beurteilen. Stevens fand heraus, dass eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 10 dB zu einer subjektiven Verdopplung der Lautheit führt und dass die Lautheit und Schalldruck der Sinustöne exponentiell verhalten.

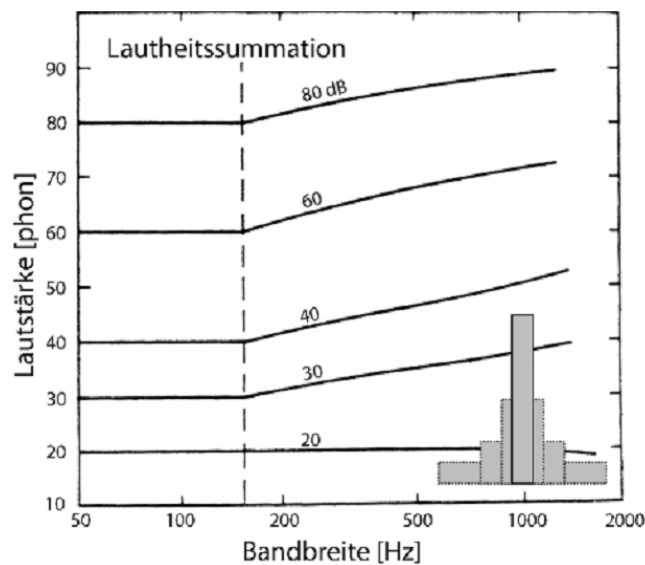
Stevens legte fest, dass die Lautheit eines 1-kHz-Tons von 40 dB_{SPL} dem Wert 1 sone entspricht. Demnach entsprechen 50 dB_{SPL} 2 sone und 60 dB_{SPL} 4 sone. Die Berechnungsvorschrift, um einen Schalldruckpegel in einen sone-Wert umzurechnen

lautet folglich:
$$N = 2^{\frac{L_p - 40}{10}}$$

- 2.3 Auf welche Weise hängt die Lautheit eines Signals mit dessen Bandbreite zusammen? Überlegen Sie, wie sich diese Abhängigkeit in einem Hörversuch bestimmen lässt.

Eine Möglichkeit zur Bestimmung der Lautheit in Abhängigkeit der Bandbreite eines Signals besteht darin, den Versuchspersonen Signale unterschiedlicher Bandbreite, aber gleicher Signalleistung vorzuspielen, und die Versuchspersonen nach ihrem Lautheitseindruck zu fragen. Zwicker und Feldtkeller haben diesen Versuch mit weißem Rauschen durchgeführt, dessen Bandbreite erhöht wurde, dessen Leistung jedoch konstant blieb.

Sie stellten in dem beschriebenen Hörversuch folgendes Ergebnis fest: Erhöht man die Bandbreite des Rauschens, so bleibt die Lautheit bis zur Bandbreite einer Frequenzgruppe konstant. Erhöht man die Bandbreite weiter, so lässt sich ein linearer Anstieg der subjektiv empfundenen Lautstärke feststellen. Sie schlussfolgerten daraus, dass sich innerhalb einer Frequenzgruppe die Schallintensitäten addieren, dass jedoch zur Bestimmung der Gesamtlautheit die Lautheiten der einzelnen Frequenzgruppen summiert werden müssen. Das Ergebnis zeigt die folgende Abbildung:



- 2.4 Überprüfen Sie die von Zwicker und Feldtkeller im Hörversuch gefundenen Ergebnisse, indem sie die Lautheit eines bandbegrenzten weißen Rauschsignals der Bandbreite 100 Hz und die Lautheit eines weißen Rauschsignals der Bandbreite 300 Hz rechnerisch bestimmen. Die Mittenfrequenz betrage in beiden Fällen 1 kHz, der Schalldruckpegel des Rauschens betrage 40 dB.

Die Tabelle der Frequenzgruppen gibt für eine Mittenfrequenz von 1kHz eine Bandbreite von ca.160 Hz an.

Die spektrale Leistungsdichte des weißen Rauschsignals ist innerhalb der Bandgrenzen konstant. Gleichzeitig sind die Gesamtpegel der Rauschsignale ebenfalls konstant. Die spektrale Intensitätsdichte ergibt sich also im Falle des 100-Hz-breiten Rauschens zu

$$\left. \frac{I}{f} \right|_{100\text{Hz}} = \frac{p^2}{Z_0 B} = \frac{\left(p_0 \cdot 10^{\frac{L_p}{20}} \right)^2}{Z_0 B} = \frac{\left(2 \cdot 10^{-5} \frac{N}{m^2} \cdot 10^{\frac{40}{20}} \right)^2}{413,5 \frac{Ns}{m^3} \cdot 100\text{Hz}} = 9,67 \cdot 10^{-11} \frac{Ws}{m^2} \text{ und im Falle des}$$

$$300\text{-Hz-breiten Rauschens zu } \left. \frac{I}{f} \right|_{300\text{Hz}} = \frac{4 \cdot 10^{-6} \frac{N^2}{m^4}}{413,5 \frac{Ns}{m^3} \cdot 300\text{Hz}} = 3,22 \cdot 10^{-11} \frac{Ws}{m^2}.$$

Für die Berechnung der Intensitäten innerhalb der einzelnen Frequenzgruppen, ist es zunächst notwendig, die exakten Frequenzgrenzen der Frequenzgruppen zu bestimmen. Bei einer Frequenzgruppenbreite von 160 Hz und einer Mittenfrequenz von 1 kHz ergeben sich diese an den Stellen:

$$\sqrt{f_{FG,u} \cdot f_{FG,o}} = \sqrt{f_{FG,u} \cdot (f_{FG,u} + B_{FG})} = 1\text{kHz}$$

$$\Rightarrow f_{FG,u} = 923,2\text{Hz}$$

$$\Rightarrow f_{FG,o} = 1083,2\text{Hz}$$

Die Frequenzgrenzen des 300-Hz-breiten Rauschs liegen bei:

$$\sqrt{f_{Rauschen,u} \cdot f_{Rauschen,o}} = \sqrt{f_{Rauschen,u} \cdot (f_{Rauschen,u} + B_{Rauschen})} = 1\text{kHz}$$

$$\Rightarrow f_{Rauschen,u} = 861,2\text{Hz}$$

$$\Rightarrow f_{Rauschen,o} = 1161,2\text{Hz}$$

Die Intensitäten innerhalb der drei Frequenzgruppen berechnen sich zu:

$$I_1 = \left. \frac{I}{f} \right|_{300\text{Hz}} \cdot (f_{FG,u} - f_{Rauschen,u}) = 3,22 \cdot 10^{-11} \frac{Ws}{m^2} \cdot (923,2\text{Hz} - 861,2\text{Hz}) = 1,99 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2}$$

$$I_2 = \left. \frac{I}{f} \right|_{300\text{Hz}} \cdot (f_{FG,o} - f_{FG,u}) = 3,22 \cdot 10^{-11} \frac{Ws}{m^2} \cdot 160\text{Hz} = 5,15 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2}$$

$$I_3 = \left. \frac{I}{f} \right|_{300\text{Hz}} \cdot (f_{Rauschen,o} - f_{FG,o}) = 3,22 \cdot 10^{-11} \frac{Ws}{m^2} \cdot (1161,2\text{Hz} - 1083,2\text{Hz}) = 2,51 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2}$$

Die entsprechenden Schalldruckpegel lauten:

$$L_{p_1} = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{I_1 \cdot Z_0}}{p_0} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{1,99 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2} \cdot 413,5 \frac{Ns}{m^3}}}{2 \cdot 10^{-5} \text{Pa}} \right) = 33,13\text{dB}_{SPL}$$

$$L_{p_2} = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{I_2 \cdot Z_0}}{p_0} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{5,15 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2} \cdot 413,5 \frac{Ns}{m^3}}}{2 \cdot 10^{-5} \text{Pa}} \right) = 37,26\text{dB}_{SPL}$$

$$L_{p_3} = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{I_3 \cdot Z_0}}{p_0} \right) = 20 \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{2,51 \cdot 10^{-9} \frac{W}{m^2} \cdot 413,5 \frac{Ns}{m^3}}}{2 \cdot 10^{-5} \text{Pa}} \right) = 34,14\text{dB}_{SPL}$$

Demnach ergeben sich die Lautheiten in der Einheit *sone* wie folgt:

$$N_1 = 2^{\frac{L_{p1}-40}{10}} = 2^{\frac{33,13-40}{10}} = 0,62 \text{ sone}$$

$$N_2 = 2^{\frac{L_{p2}-40}{10}} = 2^{\frac{37,26-40}{10}} = 0,83 \text{ sone}$$

$$N_3 = 2^{\frac{L_{p3}-40}{10}} = 2^{\frac{34,14-40}{10}} = 0,67 \text{ sone}$$

Summiert man die Lautheiten der einzelnen Frequenzgruppen, dann ergibt sich eine Gesamtlautheit von $N_{ges} = 0,62 \text{ sone} + 0,83 \text{ sone} + 0,67 \text{ sone} = 2,21 \text{ sone}$.

Wandelt man diesen Wert wieder in einen Schalldruckpegel um, so ergibt sich dieser zu:

$$L_{p,ges} = 40 + 10 \log_2(2,21 \text{ sone}) = 51,44 \text{ dB}_{SPL}$$