



## **Skynjun hljóðstyrks**

**Ritgerð til lokaprófs í tónsmíðum við Listaháskóla Íslands**

**Veturinn 2013-14**

**Björn Pálmi Pálmason**

**Leiðbeinandi: Atli Ingólfsson**

## **Efnisyfirlit;**

1. Úrdráttur	bls. 3
2. Raunhljóðstyrkur	bls. 4
3. Heyranlegt tíðnisvið	bls. 4
4. Skynjaður hljóðstyrkur	bls. 5
5. Hljóðáreiti	bls. 8
6. Samband tíðnisviðs og skynjaðs hljóðstyrks	bls. 12
7. Tíðnirófs hlutfallshylluming	bls. 17
8. Heimildarskrá	bls. 21

### **Úrdráttur:**

Ritgerð þessi fjallar um hljóðstyrk sem er skilgreindur og útskýrt hvernig hann er mældur auk þess sem gerður er greinarmunur á raunhljóðstyrk og skynjuðum hljóðstyrk eftir tíðnirófi. Gerð er grein fyrir helstu atriðum sem koma að sambandi raunhljóðstyrks og skynjaðs hljóðstyrks. Sýndar eru niðurstöður rannsókna á hljóðstyrk allra heyrnlegra tíðna í gröfum og þau útskýrð. Sem samantekt má segja að dýpka megi skilning á hljóðstyrk með sérstakri skoðun á jafnstyrksgröfum. Hvort sem það er skynjaður hljóðstyrkur tveggja hreinna tíðna eða að hluta til hylmuð tíðni má nú álykta með meiri nákvæmni áætlaðan hljóðstyrk og innbyrðis afstöðu hljóðstyrks hvort sem það er með jöfnum hljóðstyrk eða tvöfalt hærri eða lægri styrk. Niðurstöður rannsókna geta nýst tónskáldum og tónlistarmönnum hvort sem það er við útsetningar tónsmíða fyrir hljóðfæri eða við hljóðblöndun tónlistar.

Hver er skynjun okkar á hljóðstyrk? Eyru manna eru skynfæri sem nema hljóð sem þrýstingsbreytingar í lofti sem mismunandi tíðnir og hljóðstyrk. Áður en tekist er á við efnið er rétt að gera grein fyrir nokkrum fræðilegum hugtökum hljóðnámsfræðinnar.

### **Raunhljóðstyrkur**

Desíbel (dB) er mælieining raunhljóðstyrks á skynsviði mannseyrans. Sound Pressure Level eða hljóðstyrkur er mæling á þrýstingsbreytingum í lofti og er því raunhljóðstyrkur. Þá eru lægri mörk skynsviðs mannseyrans notað sem viðmiðunargildi eða fasti til þess að mæla hljóðstyrk. Hann er mældur í desíbelum og er í réttu hlutfalli við fastann á eftirfarandi hátt:  $L_p = 10 \log_{10} (P_{rms}^2 / P_{ref}^2) = 20 \log_{10} (P_{rms} / P_{ref})$  dB, þar sem  $P_{ref}$  er fastinn, viðmiðunargildi hljóðstyrks, og  $P_{rms}$  er hljóðstyrkurinn sem verið er að mæla.  $P_{ref}$  fastinn sem notaður er fyrir hljóðstyrk í lofti er 20 microPascal, 20  $\mu$ Pa, sem almennt er skilgreint sem lægri mörk þess heyranlega hjá meðalmanni. Með öðrum orðum er það lægsta greinanlega hljóðið og er um það bil sá hljóðstyrkur sem heyrir frá mýflugum í þriggja metra fjarlægð. Flestar mælingar nota 20  $\mu$ Pa sem fasta sem þýðir að eitt Pa jafngildir 94 dB. Lægsta mögulega gildi þess heyranlega er skilgreint sem 0 dB en efri mörk eru ekki eins skýrt skilgreind. Eitt atm eða 191 dB hljóðstyrkur er stærsta þrýstingsbreyting sem hrein hljóðbylgja getur þolað í lofthjúpi jarðar án þess að bygljan bjagist.<sup>1</sup> Til viðmiðunar má hafa í huga að 90-95 dB hljóðstyrkur getur skaðað heyrn á lengri tíma, t.d. átta klukkutímum eða lengur. Sársökapröskuldi er náð við 125 dB hljóðstyrk en 140 dB hljóðstyrkur getur á skömmum tíma haft varanlega áhrif á heyrn. Mest af hljóðfæraflutningi fer fram á bilinu 40 - 100 dB.<sup>2</sup>

### **Heyranlegt tíðnisvið**

Mannleg eyru greina breytingar í loftþrýstingi en heyrnin er ekki jafnnám á allt tíðnirófið. Tíðni hljóðs er mæld í einingunni Hertz. Hertz er skilgreint sem sveiflutíðni á sekúndu. Menn heyra tíðnir á bilinu frá 12 Hertz í kjöraðstæðum en þó yfirleitt nær

---

<sup>1</sup> *Sound pressure*, Wikipedia, sótt 8. Janúar 2014, [http://en.wikipedia.org/wiki/Sound\\_pressure#Sound\\_pressure\\_level](http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure#Sound_pressure_level)

<sup>2</sup> *Decibel (Loudness) Comparison Chart*, Galen Carol Audio, sótt 8. Janúar 2014, <http://www.gcaudio.com/resources/howtos/loudness.html>

20 Hertz og upp í 20.000 Hertz eða 20 kHz.<sup>3</sup> Efri mörk heyrnlega tíðnisviðsins lækka með aldrinum.<sup>4</sup>

### Skynjaður hljóðstyrkur

Þar sem við nemum ekki hljóð jafnvel á öllu tíðnisviðinu hefur verið skilgreind mælieining til þess að bæta upp fyrir mismun raunhljóðstyrks og skynjaðs hljóðstyrks. Raunhljóðstyrkur mælir þrýsting en í skynjuðum hljóðstyrk er skynræn svörun mæld. Mælieining skynjaðs hljóðstyrks heitir Phon og er skilgreind sem viðbót við desíbel á eftirfarandi hátt: ákvörðuð er viðmiðunartíðni, eins kHz (1000 Hz) sem er oftast notuð við hljóðstyrksrannsóknir og er nálægt því að vera  $h$  (987,767 Hz)<sup>5</sup>.

Viðmiðunartíðnin er svo borin saman við annað hljóð og þegar skynjaður hljóðstyrkur er jafn milli þessara tveggja hljóða þá er gildi phons jafnt og gildi desíbela viðmiðunartíðninnar. Gildi phons er jafnt gildi desíbela einnar kHz tíðni. Því eru phon og desíbel gildi svipuð fyrir tíðnir sem eru nálægt einnar kHz tíðni en eftir því sem tíðnir hækka og lækka verður meira frávik á gildunum eins og graf eitt sýnir.<sup>6</sup>

Styrkleikasamanburður getur leitt af sér nákvæmari niðurstöður heldur en tilraunir hlustandans til að áætla styrkleika. Af þeirri ástæðu voru styrkleikamælingar skynjaðs hljóðs gerðar sem flokka styrkleika hvaða hljóðs sem er. Þessi nálgun var kynnt til sögunnar á þriðja áratug 20. aldar af Barkhausen. Þegar skynjaður styrkleiki hljóðs sem rannsakað er er sá sami og skynjaður styrkleiki eins kHz tóns sem hefur styrkleika  $x$  í decibelum skilgreinum við rannsakaða hljóðið hafi  $x$  phon, burtséð frá því á hvaða tíðnisviði og af hvaða raunstyrkleika hljóðið er. Skynjaðan hljóðstyrk má rannsaka fyrir hvaða hljóð sem er en best rannsökuðu hljóðin innihalda hreina tóna á ólíku tíðnisviði. Graf eitt sýnir feril phongilda sem hlutfall dB og tíðni og kallast jafn-

---

<sup>3</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics: Facts and Models*, Second Updated Edition, Springer, Berlin Heidelberg, 1999, bls 18.

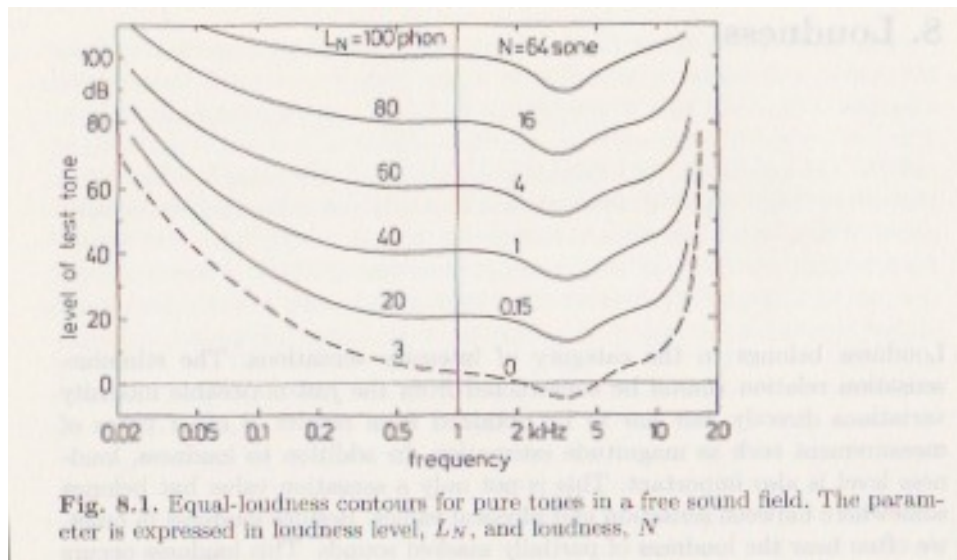
<sup>4</sup> *Hearing range*, Wikipedia, sótt 8. Janúar 2014, [http://en.wikipedia.org/wiki/Hearing\\_range](http://en.wikipedia.org/wiki/Hearing_range)

<sup>5</sup> *Piano key frequencies*, Wikipedia, sótt 8. Janúar 2014, [http://en.wikipedia.org/wiki/Piano\\_key\\_frequencies](http://en.wikipedia.org/wiki/Piano_key_frequencies)

<sup>6</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics: Facts and Models*, Second Updated Edition, Springer, Berlin Heidelberg, 1999. bls. 203

styrkleika graf. Mælingar hafa verið gerðar á nokkrum tilraunastofum með hljóðum sem eru lengri en 500 ms. Hér að neðan er jafn-styrkleika graf fyrir hreina tóna.<sup>7</sup>

### Graf 1:



Vegna skilgreiningarinnar á phon þurfa allir ferlar að fara í gegnum viðkomandi dB gildi einnar kHz tíðninnar sem hefur sama gildi í dB og phon: jafn-styrkleika ferill fyrir 40 phon verður að fara í gegnum 40 dB punkt grafsins við eitt kHz. Heyranlegu mörkin í þögn þegar lægsta skynjaða styrkleika er náð eru einnig punktur á jafn-styrkleika grafinu. Af því að lægsta skynjanlega gildi einnar kHz hljóðbylgju er þrjú dB en ekki 0 dB samsvarar það þrjú phon. Á grafinu sést að fyrir lágar tíðnir svo sem 20 Hz er raunhljóðstyrksmunur phon ferlanna frá 70 dB - 110 dB eða um 40 desíbela styrkleikarými eftir að tónn heyrast. Þetta þýðir að djúpir tónar þurfa háan raunhljóðstyrk til þess eins að heyrast eða um 70 dB. Hinsvegar þarf litla raunhljóðstyrksaukningu til þess að skynjaður hljóðstyrkur aukist hratt en á 40 dB bili þar á eftir fer styrkleikinn frá **ppp** - **fff**<sup>8</sup>. Til viðmiðunar er vert að athuga stöðu phon ferla einnar kHz tíðni en raunhljóðstyrkur þeirra ferla fer frá þrem dB í 100 dB. Því þarf einnar kHz tíðnin aðeins þrjú dB raunhljóðstyrk til þess að heyrast og hefur 97

<sup>7</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 204

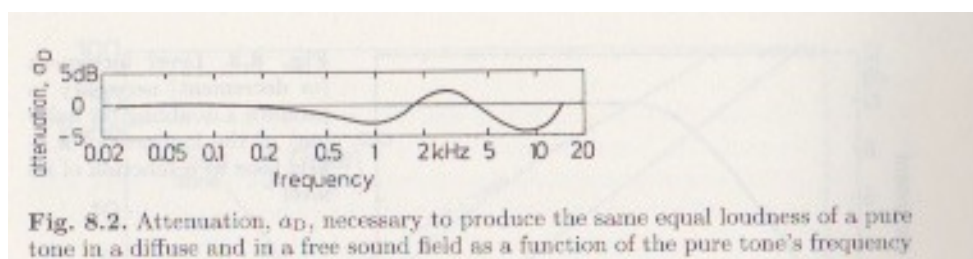
<sup>8</sup> R. Nave, *Music Dynamic Levels*, Georgia State University, sótt 8. Janúar 2014, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/dba2.html>

dB raunhljóðstyrkleikarými og fer frá **ppp** - **fff** á því bili. Einnar kHz tíðni þarf meiri raunhljóðstyrksaukningu en lægri tíðnir til þess að skynjaður hljóðstyrkur aukist.<sup>9</sup>

Næmasta svið heyrnar er milli tvö og fimm kHz sem samsvarar dýfu í öllum jafnstyrkleikaferlunum. Ástæða þessarar dýfu er að stærð eyrnaganga mannsins magna upp tíðnir sem hafa samband milli bylgjulengdar og lengdar eyrnaganganna. Þannig er minni raunhljóðstyrkur skynjaður sem hlutfallslega hærri hljóðstyrkur á tíðni sem liggur á milli tvö og fimm kHz. En þetta næma tíðnisvið nær frá b''' (1975 Hz) til c'''' (4186 Hz)<sup>10</sup>. Fyrir mikinn dB styrkleika verður þessi dýfa enn dýpri, þar sem tíðnir á þessu sviði verða enn hærri en mögulega er gert ráð fyrir miðað við brotarlínuferil marka þess heyrnlega.<sup>11</sup> Jafnstyrkleikagrafið er til dæmis nytsamlegt við útsetningar að því leiti að hægt er með meiri nákvæmni en áður að áætla styrkleikabreytingar ólíkra hljóðfæri eftir ólíku tíðnirófi. Gott er að hafa við hendina heimild um tíðnisvið hljóðfæra þegar gröf þessarar ritgerðar eru rýnd.

Þessar rannsóknir eru venjulega gerðar með þeim hætti að hljóðið berst á viðkomandi framan til (e. Plain Field), en einnig hafa verið gerðar rannsóknir þar sem hljóðið berst úr öllum áttum (e. Diffuse Sound Field). Grafið sem síðarnefndu rannsóknirnar sýna hefur frávík frá grafinu hér að ofan. Ástæðan er sú að heyrn mannsins er ekki jafn næm fyrir hljóði sem berst úr öllum áttum og hljóði sem berst framan til. Einnig hefur hljóð sem berst úr öllum áttum ólíka tíðnisviðseiginleika. Af þessum ástæðum eru jafnstyrkleikagröf hljóðs sem berst framan til og hljóðs sem berst úr öllum áttum ólík. Þennan mun má best sjá á grafi sem sýnir mun mælinganna tveggja miðaða við tíðni.

## Graf 2:



<sup>9</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 204

<sup>10</sup> *Piano key frequencies*, Wikipedia, [http://en.wikipedia.org/wiki/Piano\\_key\\_frequencies](http://en.wikipedia.org/wiki/Piano_key_frequencies)

<sup>11</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 204

Þegar um lágar tíðnir er að ræða, frá 20 til 200 Hz, er mismunurinn hverfandi þar sem heyrn fólks virkar sem mótaki úr öllum áttum (e. Omnidirectional). En frávik einnar kHz tíðni er -3 dB sem þýðir að hljóðstyrkur eins kHz tóns sem berst úr öllum áttum er þrjú phon lægri en hljóð sem berst framan á hlustandan til þess að framkalla jafnan hljóðstyrk. Niðurstöður grafsins sem sýnir styrkleikamun milli rannsóknaraðferða voru gerðar með þröngum tíðnisviðum hvíts hljóðs en ekki hreinum tónum. Hvítt hljóð er skilgreint sem samband margra tíðna yfir vítt tíðnisvið sem hljóma saman og mynda massa. Nota má grafið til þess að álykta hvernig við skynjum tíðnir þegar hreinir tónar berast úr öllum áttum með því að bera saman graf eitt og tvö. Hinsvegar fer skynjaður hljóðstyrkur eftir fleiri breytum svo sem tíðnisviði, tíðnum og lengd sýnishorna auk þess sem að samband dB gilda og skynjaðs hljóðstyrks er ekki línulegt. Þar af leiðandi er hægt að nota gröf eitt og tvö fyrir einfaldan samanburð hljóðstyrks tveggja tíðna. Sem dæmi má taka að ef tónskáld vildi láta piccolo flautu og kontrabassa hljóma með jöfnum hljóðstyrk má sjá á grafinu að bassinn þarf að spila sterkar en flautan auk þess sem að efsta áttund piccolo flautunnar samsvarar tíðnibilinu 2048-4096 Hz en það er á næmasta sviði heyrnar.<sup>12</sup> Hinsvegar þarf að taka mið af fleiri rannsóknum til að meta flóknari samsetningar tíðna. Aukinheldur hafa fleiri breytur áhrif á phongildi hljóðstyrks, svo sem tíðnisvið hljóðs og sambönd ólíkra tíðnisviða. Því væri villandi að nota gröf eitt og tvö til þess að spá fyrir um flóknari hljóðasambönd en hreina tóna.<sup>13</sup>

### **Hljóðáreiti**

Skynjunin sem tengist hljóðáreiti mest er hljóðstyrkur. Samband áreitnis og skynjunar, áreitnis-skynjunar hljóðstyrk, er hægt að mæla með því að svara spurningum um hversu mikið hærri eða lægri hljóðstyrkurinn er miðað við samanburðarhljóð sem er af einnar kHz tíðni við þekkt dB gildi. Hægt er að framkvæma þessa rannsókn með því að finna samband áreitis við hljóðstyrk eða með því að meta hlutfall tveggja ólíkra áreita. Í hljóðnámsfræði er einnar kHz tíðni algengasta samanburðarhljóðið þar sem hljóðstyrkurinn (dB) er gefinn. Samkvæmt skilgreiningu hljóðnámsfræðinnar er 40 dB einnar kHz tíðni eða 40 phon jafnt og eitt sone. Sone er mælieining sem segir

---

<sup>12</sup> *Decibel (Loudness) Comparison Chart*, Galen Carol Audio.

<sup>13</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 204-5



hvenær hljóð hefur tvöfaldast eða helmingast í skynjuðum hljóðstyrk. Fjörtíu phon jafngildir eitt sone, 50 phon jafngildir tvö sone, 60 phon jafngildir fjögur sone og svo fram vegis. Því þarf aðeins tíu phon aukningu til þess að hljóð hafi tvöfaldan skynjaðan hljóðstyrk. Þetta þýðir til dæmis að hægt er að lesa úr grafi eitt að djúpt hljóð (lág tíðni) þarf minni raunverulega hljóðstyrksaukningu til þess að það sé skynjað sem tvöfalt herra heldur en ef hljóð nálægt einnar kHz tíðni.<sup>14</sup>

Til þess að meta skynjaðan hljóðstyrk eru einföldustu hlutföll notuð; að tvöfalda eða helminga skynjaðan hljóðstyrk. Í þessu tilviki leitar viðfangsefnið að hljóðstyrknum sem hljómar tvöfalt sterkar en upphafsgildið sem er viðmiðunargildið. Meðalgildi margra slíkra rannsókna sem sjá má á grafi þrjú sýna að hljóðstyrkur einnar kHz tíðni þar sem hljóðið berst framan á viðkomandi verður að hækka um tíu dB til þess að skynjaður hljóðstyrkur tvöfaldist. Til dæmis, ef mældur hljóðstyrkur einnar kHz tíðni er 40 dB mun viðkomandi skynja að hljóð hafi tvöfaldast þegar mældur hljóðstyrkur nær 50 dB, sem þá jafngildir tvö sone. Til þess að fá feril grafsins yfir allt tíðnisviðið verður að rannsaka tvöföldun og helmingun hljóðs í ólíkum tíðnisviðum.<sup>15</sup>

Fram að þessu í ritgerðinni hafa verið rædd þrjú mikilvæg hugtök í hljóðnámsfræðinni: Desíbel, Phon og Sone. Til þess að skýra muninn á þessum hugtökum má nota sem minnisreglu eftirfarandi orð; þrýsting (dB), svörun (phon) og áreiti (sone). Þrýstingur er jafn raunhljóðstyrk og er mældur í dB og er í raun eðlisfræðileg mæling á þeim loftþrýstingi sem er kvarðaður við lágsta heyranlega hljóð sem fólk nemur. Skynræn svörun er mæld í phon og er jöfn skynræn svörun hljóðs skilgreind við dB gildi einnar kHz tíðni. Áreiti er mælt í sone og segir til um hvenær hljóð hefur tvöfaldast í skynjuðum hljóðstyrk. Samkvæmt skilgreiningu er 40 phon jafnt og eitt sone en við hverja tíu phon aukningu tvöfaldast skynjaður hljóðstyrkur.

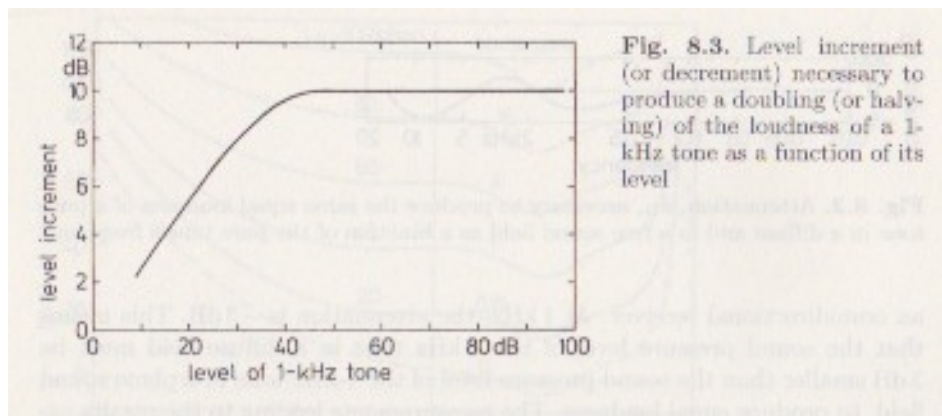
Á grafi þrjú má sjá hljóðstyrksaukningu einnar kHz tíðni til þess að framkalla hljóð sem er skynjað sem tvöfalt herra en upphafshljóðið.

---

<sup>14</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 205-6

<sup>15</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 206

### Graf 3:



Á sambærilegan hátt mun hljóðstyrksminkun af sömu stærð framkalla hljóð sem er skynjað sem helmingi lægra en upphafshljóðstyrkurinn. Niðurstöður sýna að hljóðstyrksaukning og minkun eru næstum því sjálfstæðar fyrir einnar kHz tíðni sem hefur 40 dB styrk eða hærri. Þetta þýðir að ferill skynjaða hljóðstyrkleikans helst stöðugur við tíu phon aukningu sem þarf til þess að tvöfalda skynjaðan hljóðstyrk fyrir ofan 40 phon upphafsgildi. Þegar hljóðstyrkurinn er fyrir neðan 40 phon er hljóðstyrksaukningin sem þarf til þess að tvöfalda minni. Hljóð sem er til dæmis 20 phon þarf fimm phon aukningu og tíu phon hljóð tvö phon aukningu til þess að skynjaður hljóðstyrkur tvöfaldist. Þannig er ferill hljóðstyrksbreytinga brattur fyrir neðan 40 dB.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 206

#### Graf 4:

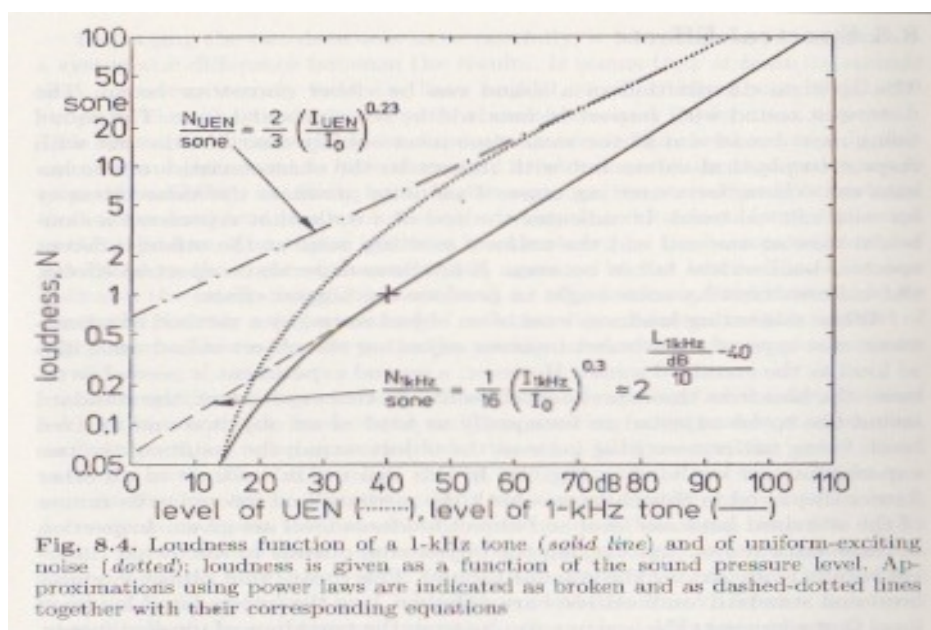


Fig. 8.4. Loudness function of a 1-kHz tone (*soñd líze*) and of uniform-exciting noise (*dotted*); loudness is given as a function of the sound pressure level. Approximations using power laws are indicated as broken and as dashed-dotted lines together with their corresponding equations

Ef notuð er 40 dB einnar kHz tíðni sem viðmiðunarpunktur, en það samsvarar eitt sone, er hægt að reikna út feril skynjaðs hljóðstyrks. Ferillinn er sýndur í grafi fjögur sem óbrotin lína. X-ás sýnir hljóðstyrk í dB og Y-ás sýnir skynjaðan hljóðstyrk í sone fyrir einnar kHz tíðni. Fallið sem samsvarar beinu línunni er gefið með hallatölu óbrotna ferilsins þar sem gildi X-áss er hærra en 40 dB. Fyrir neðan 40 dB er fallið ekki nothæft sem nálgun. Frávikið má sjá á grafinu. Fyrir hljóðstyrk sem er lægri en tíu dB lækkar hljóðstyrkur einnar kHz tíðninnar hratt niður í 0 í skynjuðum hljóðstyrk þegar mældur hljóðstyrkur er þrjú dB.<sup>17</sup>

Graf eitt sýnir einnig sone gildi hvers ferils. Styrkleikagildið sem mælt er í phon samsvarar jafnháum styrkleika einnar kHz tíðni í dB. Af því að aukning um tíu phon samsvarar tvöföldun styrkleikans þegar upphafs phon gildi er 40 eða hærra, samsvarar aukning um 20 phon aukningu í hljóðstyrk með margfeldinu fjórum. Þar af leiðandi er ferill 60 phon = fjögur sone, 80 phon = 16 sone og 100 phon = 64 sone. Þar sem tónlist er almennt skilgreind á sviði fyrr ofan 40 phon gildir þessi einfalda regla um tvöföldun. Ennfrekar hafa styrkleikamerkingar tónlistar verið skilgreindar á eftirfarandi hátt: 40 phon og eitt sone = **ppp**, 50 phon og tvö sone = **pp**, 60 phon og fjögur sone = **p**, 70 dB og átta sone = **mf** (eða **mp**), 80 phon og 16 sone = **f**, 90 phon

<sup>17</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 207

og 32 sone = **ff**, 100 phon og 64 sone = **fff**. Þá er hægt að setja inn styrkleikamerkingar á graf eitt fyrir hvern feril.<sup>18 19</sup>

Í hljóðstyrk fyrir neðan 40 phon er ekki eins auðvelt að segja til um sone gildi en þá verður lækkunin hlutfallslega meiri. Sem viðmiðun má hafa í huga að ferill 20 phon = 0.15 sone. Sem þýðir að ferill 20 phon er 6.6 sinnum veikari en ferill 40 phon. Af skilgreiningu leiðir að mörk heyrnarþröskuldar í ró samsvarar þrjú phon og jafnstyrkleika ferill þrjú phon samsvarar 0 sone.<sup>20</sup>

### **Samband tíðnisviðs og skynjaðs hljóðstyrks**

Tíðnidreifing hljóðs getur verið þröng eða breið. Þrengsta tíðnisviðið er sínusbylgja eða stök tíðni. Hljóð sem er breitt og á sama tíma með jafnri dreifingu tíðna og styrkleika miðað jafnstyrkleika graf (phon gildi), en ekki eðlisfræðileg gildi (dB), er kallað uniform exciting noise (UEN). Þetta hljóð skapar sama hljóðstyrk fyrir allt tíðnisviðið. Ef styrkleiki er ráðinn af tíðnirósvirkni ætti UEN að hafa meiri skynjaðan hljóðstyrk en stök tíðni við sama phon gildi. Þegar styrkleiki UEN er metinn þannig að það hafi sama styrkleika og einnar kHz tíðni með þekktan hljóðstyrk eru tvær aðferðir sem koma til greina. Annars vegar er hægt að stilla UEN við viðmiðunarhljóðið einnar kHz tíðni en hins vegar að stilla viðmiðunarhljóðið einnar kHz tíðni við UEN. Niðurstöður rannsóknar aðferðanna tveggja gefa ólíkar niðurstöður. Í grafi fimm eru niðurstöður beggja rannsókna og meðaltal þeirra sýnd.<sup>21</sup>

---

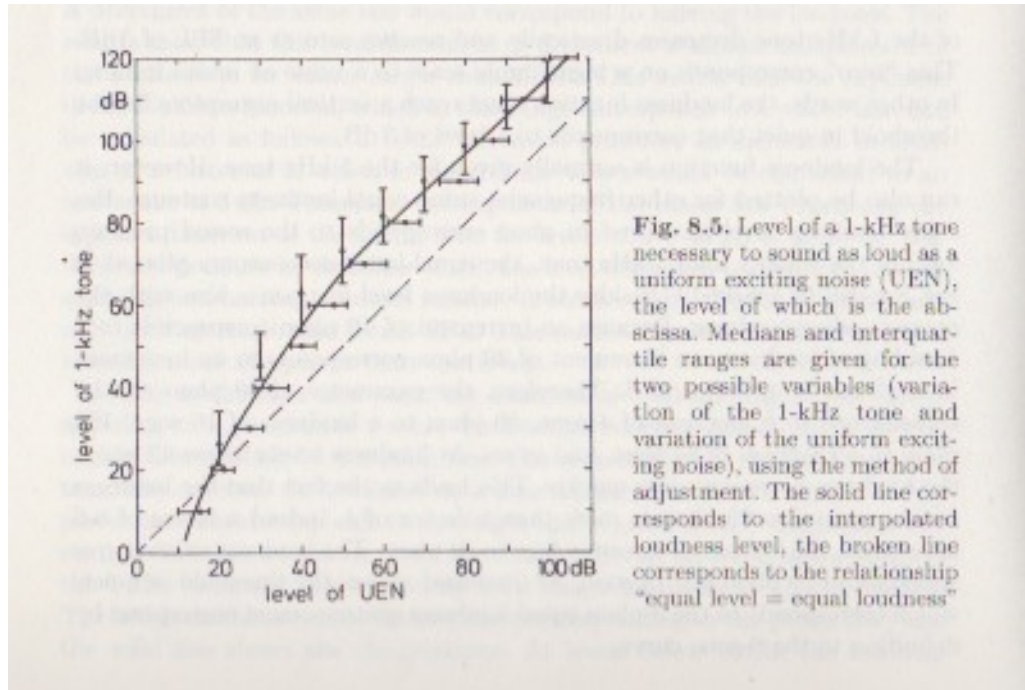
<sup>18</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 207

<sup>19</sup> R. Nave, Music Dynamic Levels

<sup>20</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 207

<sup>21</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 208

### Graf 5:



Graf fimm sýnir að aðferðirnar tvær gefa mismunandi niðurstöður. Við nánari skoðun sést kerfisbundinn munur á þessum tveimur aðferðum. Á lóðréttu strikunum má sjá þegar einnar kHz tíðni var stillt með jöfnum skynjuðum hljóðstyrk og UEN. En á láréttu strikunum má sjá þegar UEN var stillt með jöfnum skynjuðum hljóðstyrk og einnar kHz tíðni. Meðaltal rannsókna tveggja má sjá sem óbrotna línu. Ef niðurstöðurnar eru bornar saman við meðaltalið má sjá að láréttu strikin eru alltaf fyrir neðan meðaltalslínuna. Með öðrum orðum stilltu viðfangsefnin UEN hljóðið með lægri raunhljóðstyrk en einnar kHz tíðni. Meðaltalsferlið er venjulega notað þegar átt er við styrkleikagildi. Samanburður á hljóðunum tveimur sýnir að við sama raunhljóðstyrk í dB er UEN skynjað sem það hafi meiri hljóðstyrk. Brotna línan í grafi fimm sýnir jafnan raunhljóðstyrk í dB fyrir bæði hljóðin. Þegar raunhljóðstyrkur hljóðanna tveggja er minni en eða jafn og 20 dB heyrir betur í einnar kHz tíðni en UEN. Hinsvegar fyrir gildi hærri en 20 dB skapar UEN meiri skynjaðan hljóðstyrk en einnar kHz tíðnin þegar hljóðin eru með jafnt dB gildi. Þegar UEN er 40 dB er það skynjað sem það hafi jafnan hljóðstyrk og 55 dB einnar kHz tíðni. Munurinn er mestur þegar UEN er nálægt 60 dB en þá er einnar kHz tíðnin 78 dB þegar hljóðin eru

stillt sem jöfn eða 18 dB hærra. Munurinn minnkar svo þegar ofar dregur og er 15 dB þegar UEN er 100 dB.<sup>22</sup>

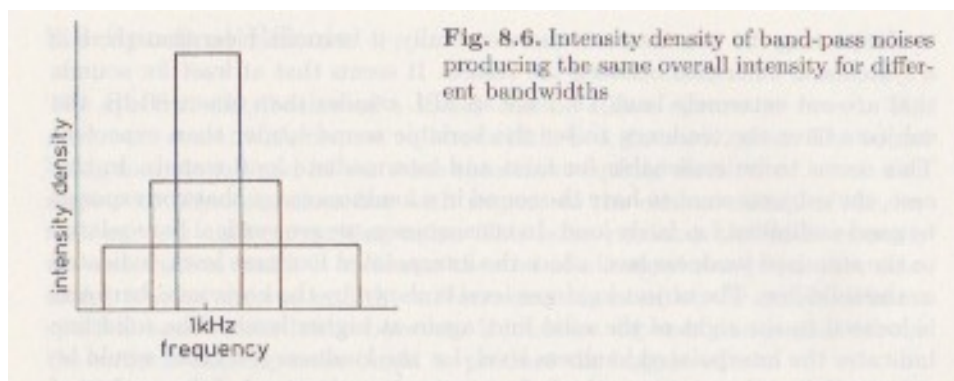
Þar sem UEN felur í sér upplýsingar um fjölbreytt hljóð sem spanna mikið tíðnisvið er mikilvægt að sjá feril þess grafs í samanburði við einnar kHz tíðni. Með því að nota gögn um einnar kHz tíðni og samband einnar kHz tíðni við UEN er mögulegt að reikna út feril UEN jafnhljóðstyrksgrafs allra tíðna. Niðurstöður þeirrar færslu má sjá sem punktalínu á grafi fjögur. Þá eru notaðir sömu viðmiðunarpunktur og einnar kHz tíðnin, nánar tiltekið að eitt sone samsvari 40 dB í jöfnum hljóðstyrk við einnar kHz tíðni. Eins og á grafi fjögur má sjá, hefur UEN náð eitt sone við 30 dB. Skynjaður hljóðstyrkur UEN vex hraðar fyrir hljóðstyrksgildi fyrir neðan 60 dB. Fyrir ofan þetta gildi má námunda gildið með punktastríkslínunni sem hefur hallatölu sem er minni en halltala einnar kHz tíðni. Punktastríkslínunni hefur 0.23 sem hallatölu sem leiðir af sér að gildi UEN og einnar kHz tíðni nálgast hvort annað þegar dB gildið hækkar fyrir ofan 60 dB. Það er áhugavert að UEN sem er 60 dB er skynjað 3.5 sinnum hærra en einnar kHz tíðni við sama dB hljóðstyrk. Þessi niðurstaða er mikilvæg þegar metinn er skynjaður hljóðstyrkur hljóðs með breitt tíðnisvið. Þar sem munur þeirra tveggja hljóða sem notuð voru í tilrauninni að ofan felst aðalega í hversu breitt tíðnisviðið var, þröngt annarsvegar og mjög breitt hinsvegar, liggur beint við að rannsaka skynjaðan styrkleika sem fall af tíðnisviði. Þá er mikilvægt að halda skynjuðum hljóðstyrk stöðugum burtséð frá stærð tíðnisviðsins. Þar sem við vitum nú þegar að breytt tíðnisvið skapar meiri skynjaðan hljóðstyrk er mikilvægt að geta haldið skynjuðum hljóðstyrk stöðugum umfram breytingar á tíðnisviði.<sup>23</sup>

---

<sup>22</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 208-9

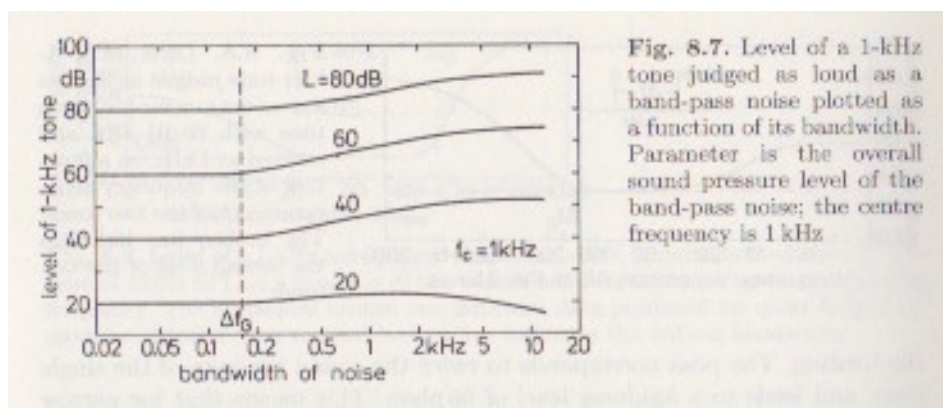
<sup>23</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 209

### Graf 6:



Graf sex sýnir að með því að halda flatarmáli undir ferlinum jöfnu fæst jafnskynjaður hljóðstyrkur. Á myndinni sést styrkleiki á Y-ás og tíðnisvið með einnar kHz tíðni í miðju á X-ás. Sem nálgun má ímynda sér að skynjaður hljóðstyrkur þessara ólíku tíðnisviða sé jafn þegar breiðasta sviðið er **p**, næst breiðasta sviðið er **mf** og þrengsta sviðið er **ff**. Því hefur tíðnisvið hljóðs mikil áhrif á skynjaðan hljóðstyrk. Könnun var gerð þar sem einnar kHz tíðni liggur að miðju en X-ás sýnir stærð tíðnisviðsins umhverfis í Hz og Y-ás sýnir hljóðstyrk einnar kHz tíðni í dB sem þarf til þess að hafa jafnan hljóðstyrk og hvítt hljóð (suð) eftir tíðnisviði.<sup>24</sup>

Niðurstöður þessarar könnunar eru gefnar á **Grafi 7**:



Ferlarnir sýna jafnan hljóðstyrk hvíts hljóðs eftir tíðnisviði en sjá má hversu sterk einnar kHz tíðni þarf að vera til þess að hafa sama skynjaða hljóðstyrk.

Niðurstöðurnar sýna að fyrir lítið tíðnisvið hefur hljóð sama skynjaða hljóðstyrk og einnar kHz tíðnin fyrir sama dB gildi. En þetta einfalda samband helst aðeins fyrir

<sup>24</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 210

tíðnisvið upp að 160 Hz (eða rúmlega það tíðnisvið sem spannar #a" til c" umhverfis h"), sem samsvarar vendipunkti tíðnisviðsins. Fyrir tíðnisvið stærri en 160 Hz vex skynjaður hljóðstyrkur suðsins. Með öðrum orðum þarf hærra gildi einnar kHz tíðni til þess að fá jafnháan skynjaðan hljóðstyrk. Aðeins fyrir hljóðstyrk undir 20 dB verður aukning ferilsins mjög lítil og fyrir mjög breitt tíðnisvið verður hnignun á ferlinum fyrir þetta lágt dB gildi. Fyrir há gildi svo sem 80 dB eða hærri er aukningin fyrir ofan 160 Hz ekki jafn mikil og fyrir minni hljóðstyrk (40-80 dB). Til að mynda er aukning skynjaðs hljóðstyrks 11 dB fyrir 80 dB hljóð með 16 kHz tíðnisvið en 15 dB aukning fyrir 60 dB hljóð við sama tíðnisvið. Þetta þýðir að 60 dB hljóð með 16 kHz tíðnisvið skapar skynjaðan hljóðstyrk sem er 75 phon og hljómar því næstum þrisvar sinnum sterkar en einnar kHz tíðni við sama raunhljóðstyrk. Hinsvegar hefur skynjaður styrkur suðsins tvöfaldast þegar tíðnisviðið er tvö kHz eða stærra fyrir dB gildi suðsins sem eru 40 eða hærri. Tvö kHz umhverfis einnar kHz tíðni samsvarar tíðnisviði frá dýpstu nótu píanós til h".<sup>25</sup>

Út frá grafi sjö má álykta að um það gildi tvær reglur. Fyrri reglan er sú að fyrir tíðnisvið upp að vissu marki er munurinn óverulegur en seinni reglan sýnir að fyrir stærri tíðnisvið eykst skynjaður hljóðstyrkur sem hlutfall af breidd tíðnisviðs.

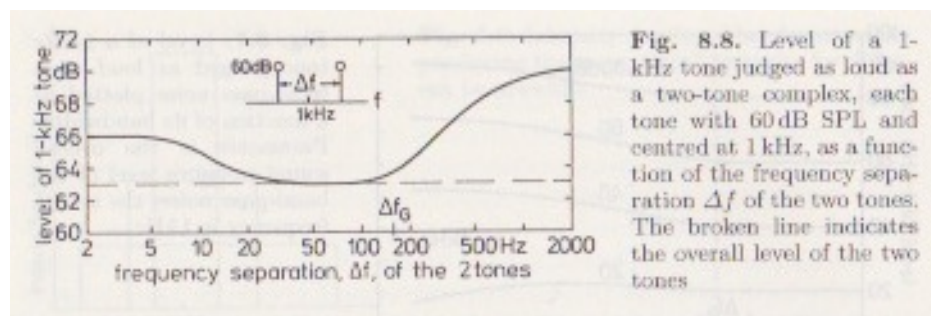
Tíðnisviðið sem aðgreinir þessar tvær reglur er 160 Hz með einnar kHz tíðni að miðju. Þetta þýðir að tíðnisvið sem er stærra en 160 Hz hefur mikið að segja um skynjaðan hljóðstyrk en þegar tíðnisviðið hefur náð tveimur kHz hefur skynjaður hljóðstyrkur tvöfaldast.

---

<sup>25</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 211



**Graf 8:**



Önnur aðferð til þess að mæla skynjaðan hljóðstyrk tíðnisviðs er að mæla skynjaðan hljóðstyrk tveggja tóna með fastan 60 dB raunhljóðstyrk. Svo er stillt einnar kHz tíðni svo hún hafi sama skynjaða hljóðstyrk og tónarnir tveir fyrir öll tíðnibil milli tónanna. Niðurstöður slíkrar rannsóknar eru sýndar á grafi átta. Ferillinn lýsir einnar kHz tíðni sem er metinn með sama hljóðstyrk og tónarnir tveir. Fyrir lítið tíðnisvið milli tónanna tveggja, upp að tíu Hz, er hægt að heyra slög milli tónanna sem leiðir af aukinni hljóðstyrksskynjun. Hápunktur hljóðstyrksaukningarinnar vegna tíðnislaganna samsvarar sex phon aukningu. Fyrir stærri tíðnibil milli tónanna, frá 20 Hz - 160 Hz, er skynjaður hljóðstyrkur jafn við 63 dB. Þetta samsvarar aukningu á hljóðstyrk um þrjú phon. Með öðrum orðum á því sviði sem heyrnin greinir ekki lengur sveiflur tíðninar í hljóðstyrk er hljóðákafinn það sem skapar hljóðstyrkinn. Fyrir tíðnisvið milli tónanna sem er stærra en 160 Hz, vex hljóðstyrkur einnar kHz tíðninar sem er metinn sem jafnhár stórlega. Þessi aukning vex stöðugt þar til 2000 Hz tíðnibili er náð en þá er hljóðstyrkurinn tíu dB hærri en einnar kHz tíðnin. En tíu dB aukning einnar kHz tíðni samsvarar tvöföldun skynjaðs hljóðstyrks. Hér má aftur sjá að á ákveðnu tíðnisvæði má sjá aukningu. Vendipunktur ferilsins gefur til kynna að ákveðið bil milli tónanna segi til um hvort aukning á skynjuðum hljóðstyrk verði. Þannig sýnir graf átta skynjaðan hljóðstyrk sem hlutfall af bilinu milli tónanna í Hz.<sup>26</sup>

### **Tíðnirófs hlutfallshylming (e. Spectrally partial masked loudness) og skynjaður hljóðstyrkur.**

Hvitt hljóð með 30 dB hljóðstyrk færir mörk þess heyranlega til hylmingarmarka á þann hátt að einnar kHz tíðni í 50 dB er skynjuð sem rétt heyranleg í hvíta hljóðinu. Þetta þýðir að skynjaður hljóðstyrkur einnar kHz tíðni, án þess að vera þakin, myndi vera tvö sone en minnar í 0 sone undir þessum kringumstæðum. Þegar hljóðstyrkur

<sup>26</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 211-12

einnar kHz tíðni er aukinn í 80 dB verður skynjaður hljóðstyrkur nálægt skynjuðum hljóðstyrk í óhuldum aðstæðum (án hvíta hljóðsins). Þetta þýðir að hylmingarhljóðið ekki aðeins skapar breytingu í mörkum þess heyranlega til hylmingarmarka heldur skapar líka hylmingu hljóðstyrksferils sem er brattari en óhylmaða skynjaða hljóðstyrksferlið. Með öðrum orðum mun hylmaður hljóðstyrksferill nálgast óhylmaðan feril fyrir há dB gildi. Svokölluð hlutfallshylming skynjaðs hljóðstyrksferils er sköpuð.

**Graf 9:**

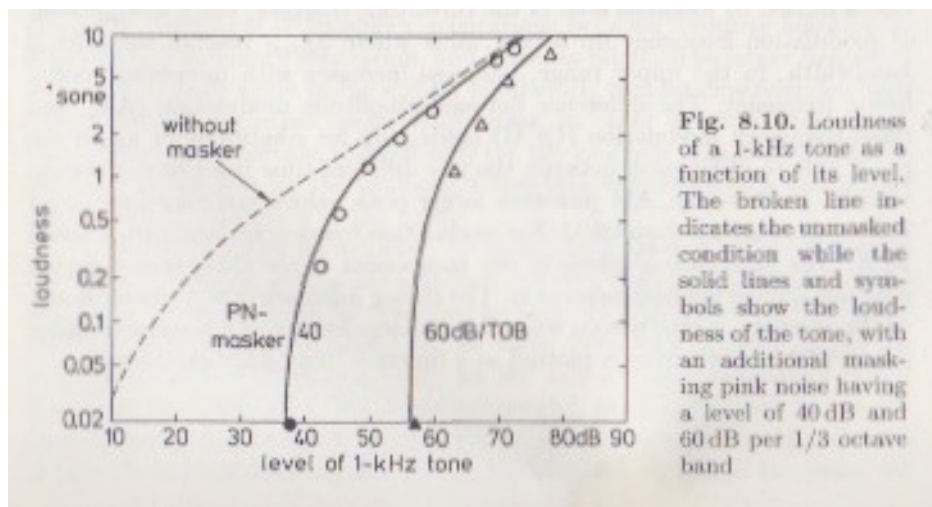


Fig. 8.10. Loudness of a 1-kHz tone as a function of its level. The broken line indicates the unmasked condition while the solid lines and symbols show the loudness of the tone, with an additional masking pink noise having a level of 40 dB and 60 dB per 1/3 octave band

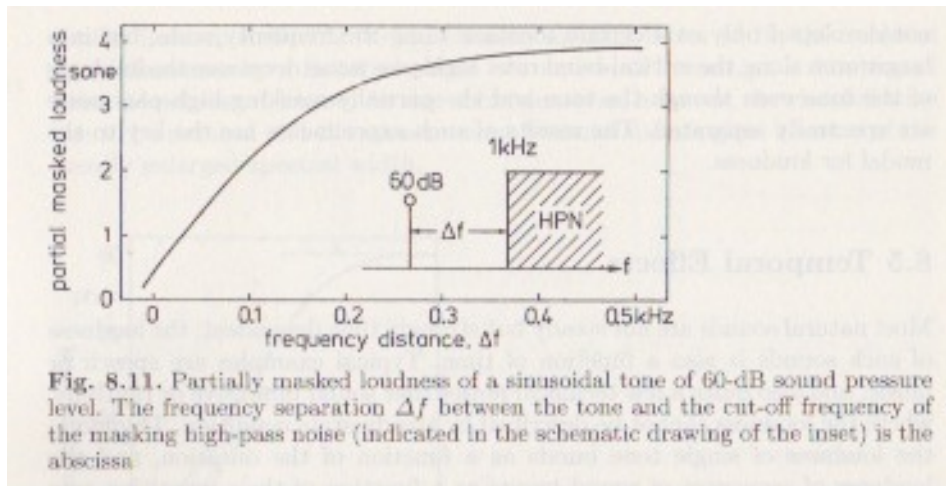
Graf níu sýnir áhrif bleiks hljóðs með hljóðstyrk 40 og 60 dB á skynjaðan hljóðstyrk einnar kHz tíðni sem er mæld sem hlutfall af hljóðstyrk. Bleikt hljóð er skilgreint sem það hafi sama hljóðstyrk fyrir hvern þriðjung áttundar sem það nær yfir. Hljóðstyrkur er hverfandi samkvæmt skilgreiningu þegar hylmingarhljóðstyrksmörkum þess heyranlega er náð sem undir þessum kringumstæðum er við 37 og 57 dB hljóðstyrk. Fyrir ofan hylmingarmörk rís skynjaður hljóðstyrkur hratt og frá 20 til 30 dB fyrir ofan hylmingarmörk nær skynjaður hljóðstyrkur næstum óhylmaðri einnar kHz tíðni í styrkleika. Brotna línan í grafinu táknar feril óhylmaðrar einnar kHz tíðni sem hlutfall skynjaðs hljóðstyrks í sone og hljóðstyrk í dB. Munurinn milli að hluta til hylmaðs hljóðs og einnar kHz tíðninnar er lítill við 70 dB eða um tíu prósent. Fyrir hærri gildi en 70 dB verður munurinn hverfandi lítill. Áhrifin sem sýnd eru í grafi tíu virðast rökrétt og skiljanleg út frá því sem við höfum lært í daglegu lífi þar sem samskipti

eiga sér oft stað í að hluta til hylmuðu hljóðumhverfi svo sem samtal í umhverfi fólks.<sup>27</sup>

Í tónlist mætti ímynda sér hljóðmassa með eins breytt tónsvið og mögulegt er með ppp í styrkleika eða 40 phon en þá skapar hljóðmassinn hylmingarmörk. Ef bæta ætti við hljóðfæri sem ætti að hljóma jafn hátt og hljóðmassinn þyrfti það að hafa pp í styrkleika eða 50 phon. Hinsvegar ef skrifa ætti laglínu sem ætti að heyrast samtímis hljóðmassanum myndi p styrkleiki, 60 phon, nægja til þess að skapa tvöfaldan skynjaðan styrkleika hljóðfærisins miðað við hljóðmassann.

Önnur áhrif sem koma á óvart og eru einnig mikilvæg til þess að fá aukinn skilning á skynjuðum hljóðstyrk eru sýnd í grafi tíu. Til þess að sýna hvernig að hluta til hylmað tíðniróf hefur áhrif á skynjaðan hljóðstyrk, er bætt við hátíðni- hljóði sem er takmarkað við einnar kHz tíðni (þar sem bleika hljóðið er fyrir ofan einnar kHz tíðni yfir tíðnisviðið).<sup>28</sup>

#### Graf 10:



Þetta hátíðnihljóð hefur 65 dB hljóðstyrk fyrir allt tíðnisviðið sem það spannar (fyrir ofan einnar kHz tíðni) og myndi hylma 1100 Hz tíðni ef hljóðin myndu hljóma samtímis. Til þess að byrja í nánast óhylmuðum aðstæðum er 500 Hz tíðni notuð í stað einnar kHz tíðni. Í þessu tilfelli er tíðnibilið milli tíðninnar og hátíðnihljóðsins

<sup>27</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 214

<sup>28</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 214

samtals 500 Hz. Til skiptis hljómar 500 Hz tíðni með 60 dB styrk, sem samsvarar fjögur sone, með hátíðnihljóði og einnar kHz tíðni þar sem einnar kHz tíðni er stillt þannig að hún hafi jafnan skynjaðan hljóðstyrk og 500 Hz tíðnin. Á þennan hátt er hægt að mæla skynjaðan hljóðstyrk 60 dB 500 Hz tíðninnar sem er að hluta til hylmuð með hljóði. Stærð tíðnisviðsins milli 60 dB tíðni og hátíðnihljóðsins er minnkuð í litlum skrefum. Niðurstöðurnar gefa til kynna að hátíðnihljóðið hefur áhrif á skynjaðan hljóðstyrk 60 dB tíðni þrátt fyrir að tíðnin og hátíðnihljóðið séu á ólíku tíðnirófi. Fyrir stórt bil milli tíðni og hátíðnihljóðs eru áhrifin hverfandi. Fyrir 100 Hz tíðnibil er hinsvegar skynjaður hljóðstyrkur á 60 dB 900 Hz tíðni minnuð um helming (tvö sone í stað fjögur sone í þögn) þegar borið er saman við 900 Hz 60 dB tíðni í þögn. Þetta gefur til kynna að hátíðnihljóðið minnar skynjaðan hljóðstyrk tíðninnar.<sup>29</sup>

Graf tíu sýnir sambærilegan skynjaðan hljóðstyrk 60 dB tíðni sem hlutfall af tíðnibili milli tíðninnar og hátíðnihljóðsins. Fyrir stórt tíðnibil er hylmingin mjög lítil. Hylmingin vex með smærri tíðnibilum á þann hátt að skynjaður styrkleiki tíðninnar sem er þakin verður ógreinanleg þegar tíðnibilið nálgast 0. Þetta gefur til kynna að hátíðnihljóð minnar skynjaðan styrkleika hreinnar tíðni þrátt fyrir að tíðnin og hylmingarhljóðið séu á ólíku tíðnirófi. Ef við ímyndum okkur hljóðmassa sem nær frá b" til hæstu mögulegu nótu (tíðni) og allar nótur hafa 65 dB hljóðstyrk myndu nótur fyrir neðan f" sem hafa 60 dB hljóðstyrk ekki verða fyrir áhrifum hylmingar. Hinsvegar á bilinu f" - b" mun hylmingin aukast hratt eftir því sem nótan er nær b". Nótan a" myndi hafa hálfan skynjaðan hljóðstyrk þess sem skynjaður styrkur væri í þögn en #a" myndi hverfa í hylmingu. Þessar niðurstöður eru lykilatriði í að skilja eðli skynjaðs hljóðstyrks.

Sem samantekt má segja að dýpka megi skilning á hljóðstyrk með sérstakri skoðun á jafnstyrksgröfum. Hvort sem það er skynjaður hljóðstyrkur tveggja hreinna tíðna eða að hluta til hylmuð tíðni má nú álykta með meiri nákvæmni áætlaðan hljóðstyrk og innbyrðis afstöðu hljóðstyrks hvort sem það er með jöfnum hljóðstyrk eða tvöfalt hærri eða lægri styrk. Gerð hefur verið grein fyrir helstu atriðum sem koma að sambandi raunhljóðstyrks og skynjaðs hljóðstyrks.

---

<sup>29</sup> E. Zwicker og H. Fastl, *Psycho-acoustics*, bls. 215-16

## Heimildarskrá

Zwicker E. og H. Fastl, *Psycho-acoustics: Facts and Models*, Second Updated Edition, Springer, Berlin Heidelberg, 1999.

*Sound pressure*, Wikipedia, sótt 8. Janúar 2014,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Sound\\_pressure#Sound\\_pressure\\_level](http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_pressure#Sound_pressure_level)

*Decibel (Loudness) Comparison Chart*, Galen Carol Audio, sótt 8. Janúar 2014,  
<http://www.gcaudio.com/resources/howtos/loudness.html>

Nave R., *Music Dynamic Levels*, Georgia State University, sótt 8. Janúar 2014,  
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/sound/dba2.html>

*Piano key frequencies*, Wikipedia, sótt 8. Janúar 2014,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Piano\\_key\\_frequencies](http://en.wikipedia.org/wiki/Piano_key_frequencies)

*Hearing range*, Wikipedia, sótt 8. Janúar 2014,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Hearing\\_range](http://en.wikipedia.org/wiki/Hearing_range)