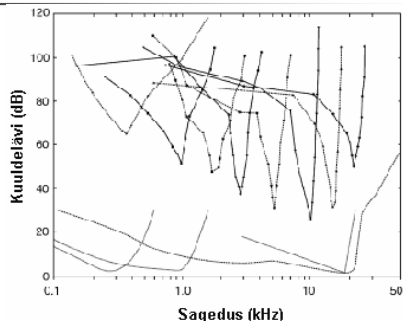


## Kuulmise sagedusselektiivsus

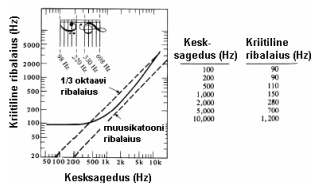


## Kriitilised sagedusribad

- sagedusvahemikud, mille sees 2 või enam heli ärritavad samu tajurakkude gruppe
- kriitilise sagedusriba piires on raske eristada üksikuid helisid
- konstantse helitugevuse korral on heli spektri laienemisel kuuldeaistingu intensiivsus (heli valjus) konstantne senikaua, kuni heli spekter jääb ühe kriitilise sagedusriba piiresse
  - nt. spektri laiuseni  $\Delta f \leq 160$  Hz kesksageduse  $f_0 = 1$  kHz korral
  - heli spektri edasisel laiendamisel ( $\Delta f > 160$  Hz) hakkab heli valjus suurenema

## Kriitilised sagedusribad

- Kriitiliste sagedusribade laiused sõltuvana kesksagedusest:



- oktaav – helikõrguste (-sageduste) kogum, mis jaguneb 6 tervetooniks
  - teineteisest ühe oktaavi kaugusel paiknevatel toonidel on samad nimed, kuid nende sagedused erinevad kaks korda
  - nt. 880 Hz toon (2.oktaavi noot a<sup>2</sup>) on ühe oktaavi võrra kõrgemal kui 440 Hz toon (1.oktaavi noot a<sup>1</sup>)

## Psühhoakustika

- aistingud: kuulde-, nägemis-, maitse-, lõhna-, kompimisaisting
- taju: info vastuvõtmine → kodeerimine → ülekande peaajusse → infotöötlus ajus
- psühhoakustika uurib heliärritajate ja nende põhjustatud subjektiivsete aistingute vahelisi seoseid
- esimesed uurimused: G. Fechner (1801-1887, saksa eksperimentaalpsühholoog)



## Psühhoakustika

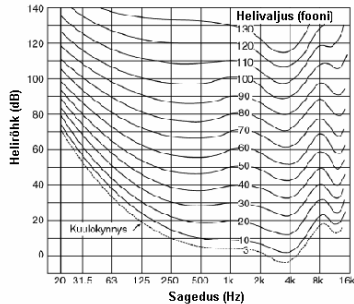
### Fechneri seadus

- ärritaja  $R$  ja aistingu  $S$  intensiivsuste logaritmiline seos
 
$$S = k \log(R)$$
- konstant  $k$  sõltub amplituudist, sagedusest jt. parameetritest
- kirjeldab suhteliselt täpselt helide tajumist
- seadus ei kehti kõikide aistingute korral

## Helivaljus

- alati ei näi suurema helirõhuga (tugevam) heli valjem
- kuuldeaistingu intensiivsus sõltub sagedusest
- helivaljuse mõõtühik – foon
  - helivaljus foonides = helitugevus detsibellides 1000 Hz heli korral
  - teiste sagedustega helide korral üldiselt erineb foonides väljendatud helivaljus detsibellides esitatud helitugevusest

## Helitugevuse (-rõhu) ja -valjuse seos erinevatel sagedustel



© Karjalainen, Välimäki & Rahkila

## Laia spektriga heli valjus

- spektrianalüüs oktaavidena
- Stevens'i tabelist leitakse valjused  $S_i$  igas oktaavis
- helivaljuse indeks

$$S = S_m + 0,3 \sum_i S_i, i \neq m$$

kus  $S_m$  – suurim valjus

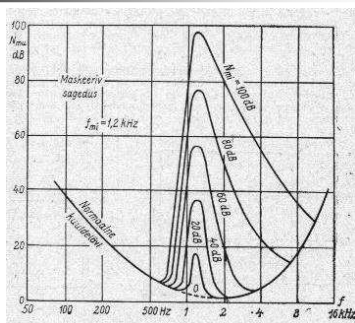
## Muusika dünaamiline diapsoon ja valjus

- Muusika dünaamiline diapsoon
  - helitugevuse muutumise ulatus (2 - 40 dB)
  - *piano, forte* jt. – itaaliakeelsed tähistused muusika valjusele
- Kuulmistaju dünaamiline diapsoon ~140 dB
  - piirid määratud kuulde- ja valulävega

## Maskeerimisefekt

- üks heli võib 'varjata' teise samaaegse heli
- tugevaim heli tõstab kuuldeläve
- ka järjestikused helid võivad varjata üksteist (ajaline maskeerimine)
- uuritakse puhaste toonide, kitsaribalise müra ja valge müra abil
- kasutatakse digitaalse audiosignaali kompressioonil (psühhoakustilised mudelid)

## Maskeerimisefekt



## Maskeerimisefekti omadusi

- mida tugevam heli, seda laiaribalisem maskeerimisefekt
- laiaribaline müra varjab kõiki helisid
- maskeerimisefekt on tugevam maskeerivast helist kõrgemate sagedustega helide jaoks
- lähedaste sagedusega helid maskeerivad teineteist paremini
- esinevad ka **ajalised** maskeerimisefektid:
  - **eelmaskeerimine**: 2-3 ms hiljem tekkiv tugevam heli võib maskeerida eelneva nõrgema heli
  - **järemmaskeerimine**: tugev heli võib maskeerida 20-30 ms hiljem lõppeva nõrgema heli
- ühte kõrva saabuv heli võib maskeerida teise kõrva kuulda heli

## Helivaljuse kasv

- kuulmine keskmistab helienergiat 200 ms kestel
- helivaljus kasvab heli kestuse kasvul kuni 200 millisekundini

## Akustiline refleks

- trummikile ja kuulmeluude jäigastumine tugeva heli toimel (helitugevus > 85 dB)
- sumbuvus 20 dB saavutatakse 150 ms möödumisel
- ei kaitse plahvatushelide eest

## Adaptatsioon

- kuulmisaistingu sobitumine heli omadustega

## Helikõrguste eristamine

- Oktaav – helikõrguste erinevus, millele vastab sageduste suhe 2:1
- Eristuslävi – väevumärgatavale helikõrguste vahele vastav sageduste erinevus  $\Delta f$
- Eristuslävi sõltub sagedusest, tugevusest, kestusest ja heli parameetrite muutumise kiirusest
- Kõrva eraldusvõime =  $\Delta f / f$
- Eristuslävi  $\approx 0,03 \times$  kriitiline ribalaius

## Toonid

- Toon - puhta siinuselise võnkumise põhjustatud heliaisting
  - tooni näiv kõrgus sõltub helivaljusest
  - helikõrguse tajumiseks peab toon kestma vähemalt 2 võnkeperioodi
  - akustilise määramatuse põhimõtte kahe tooni helikõrguse eristamisel: toonide sageduste erinevuse ja tooni kestuse korrutis peab olema suurem kui 0,1:  
 $\Delta f \times \Delta t > 0,1$

## Näiv helikõrgus

- harmoonilise võnkumise helikõrgus võrdub võnkumise sagedusega
- puuduva põhiseduse nähtus: kui helisignaalis puudub põhisedusega komponent, on helikõrgus võrdne kõrgemate harmooniliste suurima ühisteguriga

## Näiv helikõrgus

- Näide puuduva põhisageduse kohta: harmoonilised toonid 600 Hz, 900 Hz, 1200 Hz ja 1500 Hz annavad kuuldavaks tooniks 300 Hz

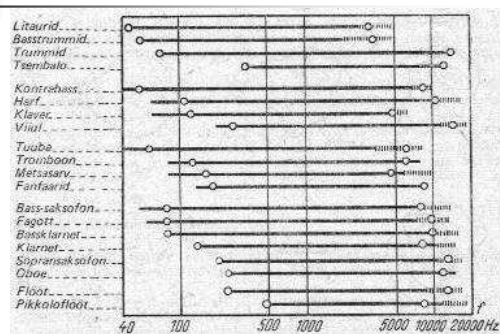
## Absoluutne kuulmine

- võime määrata helikõrgus ilma võrdlushelita
  - sagedustel < 5000 Hz
  - 0,01 %-l inimestest

## Helide sageduslik koostis

- puhas toon: helihark, mõned puhkpillid
- suure amplituudiga madalad harmoonilised: klaver, metsasarv, lauluhääl jt.
- ainult paaritud harmoonilised: klarnet jt. puhkpillid
- kõrgemate harmooniliste suure osatähtsusega helid

## Muusikainstrumentide sagedusalad



## Helide koostis

- Helide sageduslik koostis (spekter) määratakse spektraalanalüüsiga
  - spektrianalüsaatorid
- heli oluliseks tunnuseks on selle algusosa (*attack*)
- ka ajaliselt pööratud heli on raskem ära tunda

## Binauraalne kuulmine ja heliallika asukoha määramine

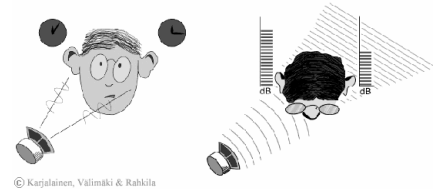
- kahe kõrva olemasolu teeb võimalikuks heliallika suuna määramise
- madalsageduslike helide suuna määramine on raskem kui kõrgemasageduslike helide lokaliseerimine
- põhjus: pea varjestab madalsageduslike helisid vähem
  - 1000 Hz – helitugevuste vahe paremas ja vasakus kõrvas 8 dB (raske eristada)
  - 10 000 Hz – helitugevuste vahe 30 dB

## Heliallika suuna määramine

- sagedustel alla 1000 Hz – helisignaali ajalisel nihkel parema ja vasaku kõrva vahel
- sagedustel üle 4000 Hz – helitugevuste erinevusel kõrvades
- sagedustel 1000–4000 Hz – mõlemal efektil
  - suurim ebatäpsus ~3000 Hz korral
  - kõrgete toonide (>5000 Hz) suuna määramisel on abiks kõrvalestad

## Heliallika suuna määramine

ITD = Interaural Time Difference    ILD = Interaural Level Difference

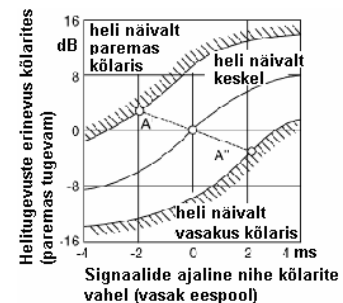


ITD – heli ajalise nihe  
ILD – helitugevuste erinevus

## Stereoheli tajumine

- Kahe koherentse heliallika korral tajutakse virtuaalse ühe heliallika suunda sõltuvalt:
  - helitugevuste erinevusest
  - helisignaali omavahelisest ajalisest nihkest

## Stereoheli tajumine



© Karjalainen, Välimäki & Rähkila

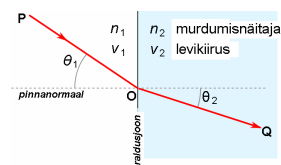
## Helilaine levi – difraktsioon ja refraktsioon

- Difraktsioon – lainefrondi paindumine takistuse taha
- Refraktsioon – helilaine frondi suuna muutus levikeskkondade piiril
  - põhjus: heli levikiiruse muutus

## Refraktsioon

- Lainefrondi suund muutub levikeskkondade piiril vastavalt Snelli seadusele:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$





## Interferents

- kahe või enama laine liitumine vastavalt superpositsiooniprintsiibile



## Viited

- Karjalainen, Välimäki, Rahkila. Helitehnika loengumaterjalid. Aalto Ülikool, Helsingi.