

## Helid

---

Helid on need, milledest paljude arvates saab alguse õige multimeedium, teevad ju muusika, inimhääli, signatuurid ja heliefektid arvutiprogrammi tõeliselt põnevaks.

Räägime kõigepealt helide olemuse teoreetilisest poolest.

**Definitsioon:** **Heli** on elastses keskkonnas leviv elastsuslaine (gaasis või vedelikus - pikilaine, tahkes - ka ristlaine), mida on võimalik kuulda. Laiemas tähenduses mõistetakse heli all igasugust elastses keskkonnas levivat lainet.

Multimeediumi seisukohalt on olulisem mõista heli olemust vastavalt järgmisele definitsioonile:

**Heli** on õhu või muu meediumi võnkumine, mis saab põhjustada kuulmisnärvide kaudu aistingut.

Siinjuures on oluline erinevus „heli“ ja „hääle“!

**Hääle** on kõris tekitatav ja suus kuuldavale toodav heli.

**Akustiline** signaal on andmeid kandvast helist koosnev signaal.

**Kõne** on hääle mustrid vaadeldavas loomulikus keeles või selliseid mustreid simuleerivad akustilised signaalid.

## Helid meie ümber

---

Kõik kuuldavad helid ümbritsevas keskkonnas on **analoogkujul**. Analooghelid on mingite kuuldavate võnkumiste sari, mida võib visualiseerida nagu järgmisel joonisel.



Joonis 1 Puhta tooni võnkekõver

Nii paistaks puhta tooni võnkekõver ostsillograafi (seade kiiresti muutuvate suuruste muutumiskõvera jälgimiseks) ekraanil. Nagu paljude teistegi looduslike protsesside korral moodustab see sinusoidi. Enamik helisid pole aga puhtad toonid vaid erinevate helide kombinatsioonid ja seetõttu näevad nende võnkekõverad välja tunduvalt komplitseeritumad. Isegi ühest ja samast allikast (inimene kõnelemas, muusikainstrument vms) pärit heli on tunduvalt komplitseeritum koosnedes põhitoonist (*fundamental frequency*) millele liidetakse harmoonilised (*harmonics*) ja ebaharmoonilised (*inharmonic*) võnked.

**Harmoonilised võnked** (*harmonics*), mis on aluseks võetud põhitooni (*fundamental frequency*) täisarvu kordsed. Harmoonilisi võnkeid nimetatakse sageli ka ülemtoonideks (*overtone*). Muusikas on nii, et põhitooni sageduse korrutamisel kahe astmega (2, 4, 6, 8, ...) saame ühe oktaavi võrra kõrgema noodi (tajutav sagedus)!

**Mitteharmoonilised** (*inharmonic*) võnked on põhitooni mitte-täisarvu kordsed.



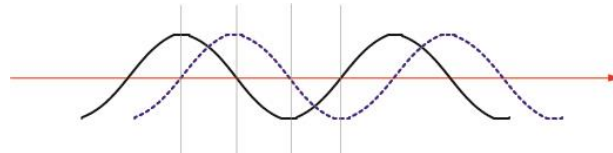
Joonis 2 Tüüpiline heli võnkekõver

Võnkekõvera osa, mis algab keskjoonest, läbib laine maksimumpunkti, miinimumpunkti ja lõpeb taas keskjoonel, nimetatakse **tsükliks** (*cycle*).

Tsükli ajalist kestust nimetatakse **perioodiks** (*period*).

Tsükli pikkust väljendatakse ka **lainepikkusega** (*wavelength*), mis on kahe järjestikuse tsükli analoogiliste punktide vaheline kaugus.

Võnkekõvera puhul räägitakse ka **faasist** (*phase*). Võngete faasi kirjeldatakse nurgakraadidega, üks terviklik tsükkel on  $360^\circ$ . Võnkekõvera nullpunkt enne positiivset osa on  $0^\circ$ . Kahe võnkekõvera faasierinevust mõõdetakse kraadides nende võngete tsüklite alguspunktide vahel. Alloleval joonisel on kahe võnke faasierinevus  $90^\circ$ .

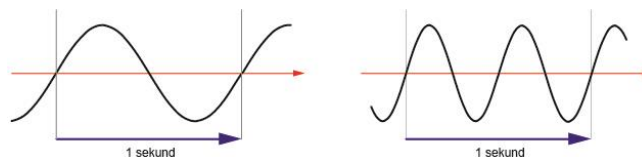


Joonis 3 Kaks võnget  $90^\circ$  faasierinekega

## Sagedus

**Sagedus** (*frequency*) on termin, mis väljendab tsüklite arvu ajaühikus. Sageduse mõõtühikuks on Herts (**Hz**).

$$1 \text{ Hz} = 1 \text{ tsükkel} / 1 \text{ sekund}$$



Joonis 4 Sagedus

Sageduse väljendamiseks kasutatakse veel ka mõõtühikuid kiloherts ja megaherts.

$$1 \text{ kiloherts (kHz)} = 1000 \text{ Hz}$$

$$1 \text{ megaherts (MHz)} = 1000000 \text{ Hz} = 1000 \text{ kHz}$$

Mida suurem on sagedus, seda kõrgema heliga on tegemist.

- Tavaline inimene kuuleb helisid 20 Hz kuni 17 kHz (paremal juhul isegi 16 Hz kuni 20 kHz).  
Vanusega kaasneb ülemise kuulmisläve langus 17 kHz või isegi 15 kHz ja madalamale tasemele (üle 55 aastastel väheneb kuulmislävi umbes 80 Hz poole aastaga), alumine lävi püsib enam-vähem sama.
- Kõige tundlikum on inimese kuulmismeel sagedusvahemikus 2000 – 4000 Hz.
- Helisid, mis on madalamad inimesele kuuldavatest helidest nimetatakse infrahelideks ja kõrgemaid ultrahelideks.
- Koerad, kassid ja hiired kuulevad helisid sagedusega kuni 50 kHz. Delfiinid ja vaalad kuulevad helisid sagedusega kuni 80 kHz ja mõned nahkhiired isegi kuni 100 kHz.
- Mehed suudavad laulda isegi nii madala häälega, mille sagedus on 60 Hz, naishääl võib lauldes küündida sageduseni 12000 Hz.  
Inimese kõne sagedus jääb tavaliselt 5 kHz piiridesse. Kõne põhitooni sagedus jääb meestel tüüpiliselt vahemikku 85 – 155 Hz, naistel vahemikku 165 – 255 Hz, siinjuures jääb see enamasti kõne sageduspiirkonnast (*frequency band*) allapoole. Harmoonilised võnked ulatuvadki kuni 5 kHz sageduseni.

- Telefonisüsteemides suudetakse reeglina edastada helisid sagedusega 220 Hz kuni 3500 Hz. Enamuse telefonivõrkude edastatava heli sagedusulatus on siiski vahemikus 280 Hz – 3300 Hz.
- Üks tuntumaid sagedusi on klaveri suure oktavi A noot, mille sagedus peab olema 440 Hz. Selle sama sagedusega on ka tuntuim helihark (A-440).

Nagu eespool mainitud, ei ole enamuse helivõnkeid kirjeldatavad ilusate korrapäraste sinusoididega vaid komplekssete, keerukate, erinevate sinusoidide liitmisel saadud kõveratega (Jean-Baptiste-Joseph Fourier). Perioodiliste võngete korral on komponentideks

### Helikõrgus

---

Muusikas tähendab helikõrgus (*pitch*) noodi tajutud sagedust. Näiteks eespool nimetatud 440 Hz sagedusega klaveri suure oktavi A noot, mida tuntakse ka *concert pitch* nimetuse all. Helikõrgust nimetatakse üheks muusika fundamentaalseks aspektiks.

Helikõrgus on vastandina, sagedusele (vibratsiooni füüsiline mõõt) inimese kõrva poolt tajutav. A nooti tajub kõrv sõltumata instrumendist, millega see kuuldavale tuuakse, sama helikõrgusega nagu 440 Hz puhast tooni kuid kuuldav heli ei pruugi sisaldada seda sagedust või ainult seda sagedust. Väike muutus sageduses ei too kaasa tajutavat helikõrguse muutust. Helikõrguse muutust tajutakse, kui sageduse muutus on viis sajandikku kuid see varieerub kuulmisulatuses piires. Paremini tajutakse erinevust, kui korraga kostab kaks erineva helikõrgusega heli.

Helikõrgusele (muusikas) viidatakse enamasti nootidega. Konkreetse noodi helikõrgusele vastav sagedus pole muusikas nii tähtis kui nootide omavaheline suhe.

Nootide suhteliste helikõrguste määramiseks kasutatakse mitmeid skaalasisid, läänekultuurides on enim levinud 12 noodi kromaatilise skaala, milles kahe järgneva noodi helikõrguse suhe on kaheteistkümnnes juur kahest (umbes 1,05946). Iga järgneva oktavi sama noot on kaks korda kõrgema sagedusega eelmisest (näiteks ühe oktavi A sagedus on 440 Hz, järgmise oktavi A 880 Hz).

### Tämber

---

Tämber (*timbre*) on heli omadus, mis viitab tema kvaliteedile. Muusikas on tämber omadus, mis võimaldab eristada erinevaid muusikainstrumente.

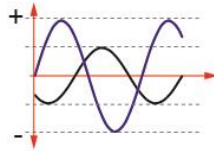
Iga heli koosneb põhitoonist (*fundamental*) ja ülemtoonidest (*overtones* ehk *harmonics*), mille sagedused on põhitooni sageduse täisarvukordsed. Paljud muusikainstrumentid tekitavad ka ebaharmonilisi (*inharmonic*) toone, mille sagedused pole põhitooni sageduse täisarvukordsed. Erineva sagedusega toonide amplituudide tasakaal annabki igale instrumendile iseloomuliku hääle (tämbri). Seda asjaolu kasutab ära ka FM süntees.

### Amplituud

---

Helivõnkel on lisaks sagedusele veel teinegi oluline parameeter: amplituud (*amplitude*).

**Amplituud** on võnkekõvera harja kaugus keskjoonest ja iseloomustab helitugevust. Mida suurem amplituud, seda valjem heli.



Joonis 5 Kaks võnget erineva amplituudiga

Erinevad helivõnke osad võivad omada erinevat amplituudi, seejuures kas negatiivset või positiivset. Helitugevuse puhul vaadeldakse muidugi amplituudi absoluutväärtust.

Amplituud iseloomustab samas ka seda, kui suurt jõudu rakendati ehk kui palju energiat kulus heli tekitamiseks. Mida rohkem kulutatakse energiat, seda suurem on võnke amplituud ja seda tugevam heli tekib.

Samas ei oma amplituudi muutmine (heli valjemaks/vaiksemaks) mingit mõju sagedusele ja vastupidi.

### Helitugevus

Suurem amplituud tuleneb suuremast heli tekitavast jõust. Suurema amplituudiga helivõnked avaldavad ka kuuldeorganitele suuremat survet.

Helitugevuse mõõtmisel mõõdetaksegi tegelikult helivõngete poolt avaldatava surve taset (inglise keeles *sound pressure level* ehk *SPL*).

Kõrv tajub heli survet logaritmilise kõvera järgi. Helivõnke energia suurendamine kaks korda ei too kaasa kaks korda valjema heli tajumist. Näiteks kaks viiulit ei kosta kaks korda valjemini kui üks. Alles siis, kui helivõnke energiat suurendatakse umbes 10 korda, tajume me kaks korda valjemat häält. Kümnekordse võnke energia kasvuga seotud mõõtühik on bell (*bel*) (nimi on pandud Alexander Graham Belli järgi).

**Definitsioon:** Kahe signaali suhtelise tugevuse kümnendlogaritmi nimetatakse telefoni leiutaja Alexander Graham Belli järgi Bel:

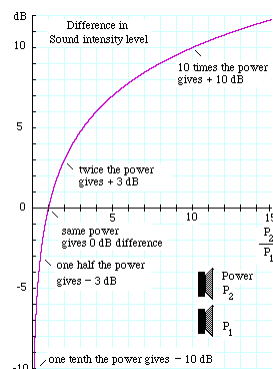
$$\text{Bel} = \log_{10}(P_2 / P_1)$$

kus  $P_1$  ja  $P_2$  on signaalide 1 ja 2 võimsused vattides.

Kuna see on praktiliseks kasutamiseks liiga suur ühik, siis on kasutusele võetud kümme korda väiksem ühik – detsibell (*decibel*), mida tähistatakse **dB**.

$$\text{dB} = 10 * \log_{10}(P_2 / P_1)$$

Alloleval joonisel ongi näha helitugevuse muutuse graafik, millel kahe signaali tugevuse erinevus kasvab kuni 15 kordseks!



Joonis 6 Helitugevuse muutus, signaalide erinevus 15 kordne (<http://www.phys.unsw.edu.au/jw/dB.html>)

## Multimeedium, helid, helisalvestus

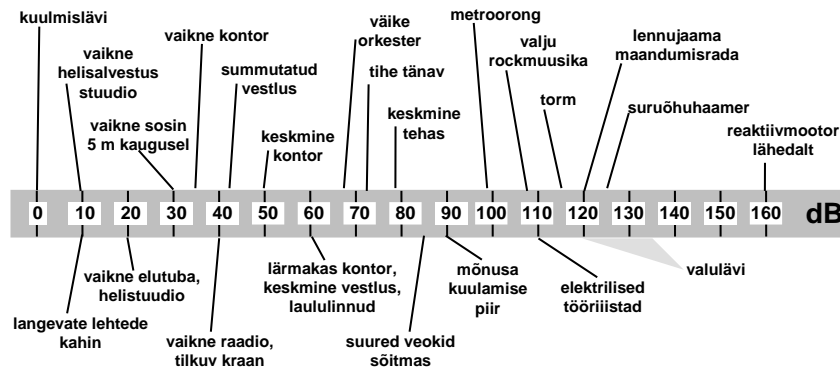
Kui  $P_1$  ja  $P_2$  on võrdsed, siis saame väärtuseks 0 dB, kui  $P_2$  on kaks korda suurem kui  $P_1$ , siis saame väärtuseks 3dB, 10 korda tugevamaks muutunud signaali korral saame väärtuseks 10 dB!

Eelpooltoodud kahe viuli näites saame helitugevuse muutuse 3 dB.

Helitugevuse muutus 1 dB on väikseim, mida treenitud kõrv suudab sagedusel 1 kHz eristada.

Kuna detsibell on suhteline ühik helitugevuse muutumise mõõtmiseks, siis on erinevate helide iseloomustamiseks tema abil vaja mingit nn. nullpunkti.

Kokkuleppeliselt on mõõt 0 dB inimese kuulmislävi (väikseim hääl, mida keskmine inimene suudab tajuda).



Joonis 7 Mõningate tüüpiliste helide/keskkondade skaala

Heli tekitamise võimsust mõõdetakse vattides (*watts*). Võimsuse suurendamine kümme korda kasvatab heli võnkeenergiat 10 korda ja see toob kaasa helitugevuse kasvu 10 dB, sada korda, toob kaasa helitugevuse muutuse 20 dB jne.

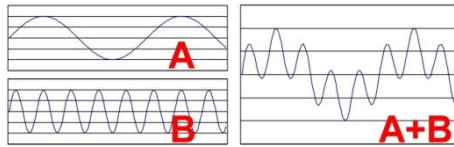
dB	võimsus vattides (W)	näide
195	25-40 miljonit	rakett
170	100000	järelpõletiga lennukimootor ( <i>with afterburner</i> )
160	10000	lennuki turbomootor ( <i>7000 lbs. thrust</i> )
150	1000	
140	100	
130	10	75 instrumendiga orkester <i>fortissimo</i> mängides
120	1	suur ( <i>chipping</i> ) haamer
110	0.1	<i>Riveting</i> masin
100	0.01	kiirteel sõitev auto
90	0.001	metroorong ( <i>shouting voice</i> )
80	0.0001	1952 Chevrolet Corvette salongis kiirusel 60 miili tunnis
70	0.00001	vestlus
60	0.000001	suur kauplus
50	0.0000001	keskmine korter või väike kontor
40	0.00000001	Chicaco elurajoonid öösel
30	0.000000001	väga vaikne sosistamine
20	0.0000000001	helistuudio

Inimese hääle helitugevus võib olla:

- vesteldes (*conversation*) 60 – 65 dB;
- loengut pidades (*dictation*) 65 – 70 dB;
- hüüdes (*calling out*) 80 – 85 dB.

## Võngete liitmine

Komplekssemad võnked saadakse erinevate võngete liitmisel. Võngete liitmisel saadakse uus võnne, mille amplituud saadakse igal ajahetkel komponentide amplituudide liitmisel.



Joonis 8 Kahe võnke liitmine

Kui liita kaks võrdse sageduse ja amplituudiga võnget, mille faasid ühtivad, saame kahekordse amplituudiga võnke. Liites kaks võrdse sageduse ja amplituudiga võnget, millede faasierinevus on  $180^\circ$ , siis kaks võnget justkui tühistavad teineteist (*phase cancellation*). Viimane tulemus oleks kuuldav vaikusena.

## Heli levimine

Helivõnked vajavad levimiseks mingit meediat (kandjat, keskkonda), näiteks õhku (vaakumis helivõnked levida ei saa). Heli levimiskiirus on erinevate meediate korral erinev ning sõltub lisaks kõigele veel ka temperatuurist. Toatemperatuuril ( $20^\circ \text{C}$ ) näiteks on heli levimiskiirus õhus  $332 \text{ m/s}$ , vees  $1490 \text{ m/s}$ , graniidis ja marmoris  $4000 \text{ m/s}$ , terases  $5100 \text{ m/s}$ , klaasis  $5000 \text{ m/s}$  ja hõbedas  $2700 \text{ m/s}$ . Heli kiirus kasvab temperatuuri tõustes. Järgnevas tabelis on toodud heli kiirus mõningates ainetes temperatuuril  $0^\circ \text{C}$ .

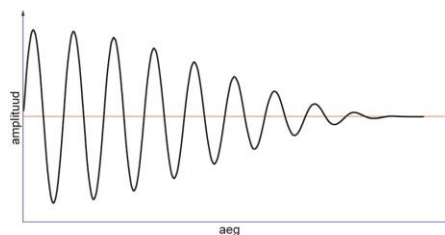
Heli kiirus gaasides (m/s)		Heli kiirus tahketes ainetes (m/s)		Heli kiirus vedelikes (m/s)	
Hapnik	316	Alumiinium	5080	Benseen	1326
Heelium	965	Hõbe	2700	Elavhõbe	1451
Lämmastik	334	Jää	3260	Etanool	1180
Süsinikdioksiid	259	Plii	1200	1,2,3 –propantriool	1925
Vesinik	1264	Teras	5050	2 –propanoon	1190
Õhk	331	Valgevask	3200 – 3500	Vesi	1410

Samas on heli levimiskiirus sõltumatu heliallikast, st. samalt kauguselt kostab püssipauk meieni sama kiiresti kui viiulimäng.

Kuigi püssipauk ja viiulimäng kostavad meieni võrdse kiirusega, oleme kõik märganud, et teatud kauguselt, ei kosta meieni kumbki neist helidest, st. helivõnkumine ei levi lõpmatu kaugele vaid sumbub.

Sumbumine tähendab seda, et võnkeamplituud heliallikast ajas ja ruumis eemaldudes väheneb. Seda põhjustavad kaks faktorit:

1. Võnkeenergia jaguneb järjest suurema massi peale, kuna helilained heliallikast eemaldudes ringikujuliselt muudkui kasvavad.
2. Keskkonna takistus.



Joonis 9 Võnke sumbumine

**NB!** Takistus on fikseeritud suurus ja igal keskkonnal erinev.

**NB!** Sumbumisel muutub ainult amplituud, mitte sagedus!

### ***Helivõnke parameetritega seotud seadmete omadused***

---

Järgnevas seletame mõningaid mõisteid, mida kohtab erinevate seadmete või meediakandjate iseloomustustes.

#### **Sagedusriba**

---

Sagedusriba (*frequency response*) viitab madalaimatele ja kõrgeimatele sagedustele, mida antud meedium või seade suudab edastada või vastu võtta. Näiteks seade, mille iseloomustuses on sagedusribana kirjas 30 Hz – 20 kHz  $\pm 3$  dB laseb läbi sagedusi 30 Hz kuni 20 kHz amplituudi varieerumisega kuni 3 dB. Mida väiksem varieerumine, seda parem. Ideaalne oleks 0 dB ehk *flat* varieeruvus, tavaline on  $\pm 3$  dB, mis tegelikult on ju 6 dB (-3 kuni 3).

Kõigile tuntud märges “**Hi-Fi**” koduse stereosüsteemi nime järel tuleneb sõnadest *High-Fidelity* (kõrge loomulikkus), mille jaoks standard DIN 45500 kehtestab miimumnõudmisena madalaimaks taasesitatavaks sageduseks 40 Hz. See on liiga leebe, eriti kui arvestada, et mõned orelid suudavad mängida noote, millele vastab heli sagedusega 16 Hz.

#### **Dünaamikaulatus**

---

Dünaamikaulatus ehk lühendatult DNR või DR (*Dynamic range*) kirjeldab erinevust nõrgima ja tugevaima signaali vahel, mida antud seade või meedium suudab loomulikult edastada. Dünaamikaulatust mõõdetakse harilikult detsibellides.

Inimene kuuleb "mõnusasti" helisid vahemikus 0 dB (vaikus) kuni 90 dB, seega oleks normaalne dünaamikaulatus 90 dB. CD pakub dünaamikaulatust 96 dB, helikassett aga ainult 48 dB.

#### **Müra ja signaali suhe**

---

Müra (*noise*) on igasugune soovimatu materjal, mis kaasneb soovitud signaaliga. Kõigi seadmete ja meediumidega kaasneb mingisugune taustamüra (*noise floor*). Seda võib kuulda näiteks, kui mängida magnetofonis tühja linti.

Müra ja signaali suhe SNR (*signal to noise ratio*) väljendab tüüpiliselt optimaalse tugevusega signaali ja taustamüra (*noise floor*) erinevust detsibellides. Mida suurem erinevus, seda parem. Näiteks telefonisüsteemides on see kuni 45 dB, vinüülplaatidel 60 dB ja CD-DA puhul 80 dB.

#### **Moonutus**

---

Moonutused (*distortion*) on igasugused muudatused, mis teevad signaali tema originaalkujust erinevaks. Elektroonilist signaali võivad mõjutada mitmesugused moonutused:

- Mittelineaarne (*non-linear*) moonutus – on selline, mille korral väljundsignaal ei muutu proportsionaalselt sisendsignaaliga. Mittelineaarsel moonutusel on mitu alaliiki:
  - Amplituudi moonutus – väljundsignaali amplituud ei muutu samas suurusjärgus, kui sisendsignaalil.

- Harmooniline (*harmonic*) moonutus – väljundsignaalile on lisatud harmoonilisi sagedusi (seadme või anduri/muunduri (*transducer*) poolt), harilikult proportsioonis sisendsignaali amplituudiga.
- Intermodulatsiooni (*intermodulate*) moonutus – lisab väljundsignaalile sagedusi, mis ei pruugi olla harmoonilised sisendsignaali komponentidega.
- Väreelus (*flutter distortion*) – tuleneb ajalistest kõrvalekalletest füüsilistes mehhanismides, näiteks lindile salvestamisel või elektroonikakomponentides, näiteks ostsillaatoris (võnkegeneraator).
- Sageduse (*frequency*) moonutus – on moonutus, mille korral väljundsignaalil on sisendsignaalist erinev sagedus.
- Faasimoonutus (*phase distortion*) – muudab väljundsignaali võnkefaasi sisendsignaali omast erinevaks.

### Loomulikkus

---

Loomulikkus (*fidelity*) on heli, video ja fotorealistlike kujutiste korral kasutatav termin, mis viitab, kui loomulik on väljundsignaal originaali suhtes. Loomulikkust mõjutavad sagedusriba (*frequency response*), müra ja signaali suhe (*signal to noise ratio*) ning moonutused (*distortion*).

### Ribalaius

---

Ribalaius (*bandwidth*) on seadme sagedusriba äärmuste erinevus. Kui seadme sagedusriba on 5 kHz kuni 15 kHz, siis ribalaiuseks on 10 kHz.

### Helisalvestuse ajalugu

---

Helisalvestusseadmete eellasteks on kellamängud ja muusikaautomaadid.

Varasel keskajal püüdis heli olemust lahti mõtestada Rooma mõtleja Bonetius Antonius kes oli veendumusel, et heli on mingisugust liiki energia mida saab suletud ruumi koguda. Seda teooriat püüdis 16. sajandi lõpul praktikas tõestada universaalõpetlane Giambattista della Porta (1535 – 1615) kes üritas oma sõnu rauast toru sisse püüda, toru sulgeda ja hiljem teises kohas välja lasta. Ebaõnnestumise põhjuseks pidas ta liiga aeglast käeliigutust – heli jõudis torust enne välja lipsata.

### Muusikaautomaadid

---

Vanima kellamängu joonis pärineb 13. sajandist ja asub Itaalias, Orvieto kiriku fassaadil. Tegemist polnud veel automaatse pilliga vaid kariljooniga, kus mängimiseks kasutati vahetult vasarakesi. Hilisemad kellamängud olid juba automaatpillid, mille "programm" oli salvestatud tihvtidega trumlile.

Automatiseeriti ka oreleid, milledest vanimate hulgas on "Salzburgi sarvvärk", mille ehitamine algas 1502. aastal (18. saj. keskel oli sellel pillil juba 350 vilet). 17. sajandil võeti automaatorelite juhtimiseks kasutusele spetsiaalne vileventiile juhtiv vaakumsüsteem.

Järgmisena hakati automatiseerima erinevaid pille ja 19. sajandil hakati neid kasutama meeleoluka muusika mängimiseks kõrtsides ja kohvikutes. Kasutati tihvtidega trumleid ja aukudega metallplaate.

19. sajandi teisel poolel võeti kasutusele perfokaardid ja perfolindid. Erinevate palade perfolintide loomiseks hakati kasutama ka kuulsate pillimeeste abi. On teada näiteks pianist



Arthur Rubinsteini kontsert 1920. aastal Carnegie Hallis New Yorgis, kus pianisti klahvivajutused salvestati perfolindile. Sääraseid salvestusi on siirdatud ka kaasaegsematele plaatidele, näiteks Nõukogude ettevõtte Melodia andis 1970ndatel aastatel välja rea grammofoniajastu eelsest ajast pärit kuulsuste esinemistega. Loomulikult annab selline salvestus muusiku esinemisest vaid ülimalt pealiskaudse pildi.

Omamoodi huvitav idee helisalvestusest pärineb parun Karl Friedrich Hieronymus von Münchhauseni lugudest, pasunahelid külmusid postipoisi pasunasse ja ilmusid kuuldavale alles hiljem kamina kohal sulades.

### **Analooghelisalvestuse ajalugu**

---

- Umbes 1850. aastal ehitas prantslane Édouard-Léon Scott de Martinville seadme, mille ruupori suudmesse paigutatud membraanile kinnitatud seaharjas joonistas sujuvalt edasitõmmatava tahmase klaasi pinnale lainejoone. Seadme nimeks sai fonoautograaf (*phonautograph*). Hiljem kasutas ta vändast pööratavale silindrile kinnitatud paberit ja tinti. Fonoautograafi eesmärgiks oli helivõnkumist nähtavaks muuta ja analüüsida. Selliseid seadmeid hiljem hakati nimetama kümograafideks ja neid kasutati isegi veel 1950-ndatel aastatel.

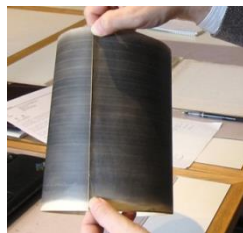


Joonis 10 Édouard-Léon Scott de Martinville



Joonis 11 Phonoautograph

2008. aastal õnnestus dešifreerida 9. aprillil 1860 tehtud salvestis, selleks osutus 10 sekundi pikkune fragment prantsuse rahvalaulust "Au Clair de la Lune", esitajaks ilmselt Édouard-Léon Scott de Martinville'i tütar. Seda loetakse pragu maailma vanimaks helisalvestuseks.



Joonis 12 Fonoautogramm, mis õnnestus dešifreerida

- 1876. aastal leiutas Emil Berliner mikrofone. Ta müüs oma leiutise patendi 50000\$ eest Belli telefonikompaniile. Esimese kasutuskõlbliku mikrofone ehitas Alexander Graham Bell. Mõiste "mikrofon" pakkus alles 1927. aastal välja Sir Charles Wheatstone.



Joonis 13 Alexander Graham Bell kõnelemas oma ehitatud mikrofone

- Esimene reaalselt töötav helisalvestusseade on fonograaf (*phonograph*), mille tööpõhimõtte kirjeldas 1877. aastal Charles Cros Prantsusmaal ning temast sõltumatult ehitas valmis Thomas Alva Edison USA-s ja. Thomas Alva Edison tehtud maailma esimene helisalvestus oli laulust "*Mary had a little lamb*" (Edisoni väitel 12. august 1877, tõenäolisemalt siiski hiljem, novembris või detsembris). Fonograaf salvestas helivõnkumise nõela abil tinapaberiga kaetud silindrile (toimus võnkekõvera tinapaberi pinnale muljumine). Piiratud oli salvestuse kestus, rullile mahtus vaid paar minutit, ka helikvaliteet oli väga kehv, lisaks tavaliselt muutus salvestus juba 10 kuulamise järel kasutuskõlbmatuks. Reaalset kasutust leidis selline aparaat laadaatraksioonina, kus esitati meie isa palvet, mille kõigi jaoks tuttav tekst peitis pisut halba kvaliteeti. Rakenduskohtadeks pakuti veel näiteks inkubaatorisse kanaema häält tegema. Thomas Alva Edison esitas patenditaotluse 24. detsembril 1877.

1887 aastal alustas tegevust *The Edison Speaking Phonograph Company* ning helisalvestused hakkasid tasapisi levima.



Joonis 14 Edison oma fonograafi varajase variandiga



Joonis 15 Edisoni täiustatud fonograaf 1899

Alexander Graham Bell täiustas fonograafi ehitust ja võttis kasutusele vaharullid, millele salvestati juba "graveerimise" meetodil, hiljem võttis vaharullid kasutusele ka Edison. Fonograafi puuduseks oli lisaks helikvaliteedile veel see, et salvestuste paljundamine oli väga raske. Esimesi tinapaberiga kaetud silindreid ja vaharulle ei saanud üldse paljundada. Salvestuste tiražeerimiseks tuli sama etteastet korduvalt salvestada, näiteks muusikasalvestuste tegemisel asetati pillimeeste ette mitu fonograafi, suuremate tiraazide saamiseks tuli üht ja sama lugu mängida palju kordi järjest.

- Fonograafi asus välja tõrjuma Emil Berliner 1887. aastal leiutatud lamedaid plaate mängitav "*gramophone*". Grammofoni tööpõhimõtte on tegelikult sama kui fonograafil kuid plaate sai kopeerida (originaalist tehti galvaanilise tehnoloogia abil metallist matriits ja edasi kasutati kumpressimist. Esialgu tehti plaadid ühe poolega, hiljem võeti kasutusele kahe poolega plaadid. Materjalina kasutati looduslikust vaigust tehtud šellakit. Salvestuste sagedusvahemik oli praeguste telefonidega võrreldav 150 – 2000Hz.



Joonis 16 Berliner gramfon

Hüpe kvaliteedis saabus elektri appitulekuga salvestamisel juba 1925. aastal ja taasesitamisel kodudes peale teist maailmasõda, sagedusvahemikuks saavutati 100 – 5000Hz. Kitsaskohaks jäi salvestuskestus, tollased 12 tollised plaadid pakkusid vaid 2 korda 5 minutit heli. Vinüüli kasutuselevõtuga plaadi materjaliks (pärast teist maailmasõda), saavutati kahinavabam plaat, mille ühele poolele saab jäädvustada kuni pool tundi helimaterjali.

- 1888. aastal sõnastas Oberlin Smith magnetilise salvestuse põhimõtted.
- 1894 leiutas Guglielmo Marconi raadio.
- Magnetofoni eellaseks on Taani inseneri Valdemar Poulseni 1898. aastal leiutatud "telegraphone", mis talletas helivõnkumise jäljendi muutuvate jääkmagnetväljade jadana elektromagneti eest kiiresti edasikeritavale terastraadile.



Joonis 17 Poulseni telegrafon

- 19./20. sajandivahetusel polnud olemas võimendeid ja salvestus jäi vägagi mannetuks. Elektronlambi leiutamise järel võeti magnetsalvestusseade oma pika katkematu salvestuskestuse tõttu kasutusele ringhäälingus. 1932. aastal kasutas BBC esmakordselt teraslindil põhinevat salvestit (Marconi-Stille, lindi laius 3mm, paksus 0,08mm, liikumiskiirus 1,5m/s, pooletunnine salvestus vajas 3km linti, mis kaalus 25kg). Terastraat asendati peagi raudoksiidiga kaetud paber- ja lõpuks plastlindiga.
- 1912. aastal ehitas Lee de Forest oma vaakumtoruga võimendi "Audion", mis sai teerajajaks helide elektroonilisel võimendamisel.
  - 1925. aastal avaldati esimesed salvestused, mille tegemisel oli kasutatud mikrofoni.
  - 1931. aastal tehti esimene stereosalvestus (*Bell Telephone Laboratories*).
  - 1935. aastal töötati välja kõrgemate sageduste valjuhääldi (*tweeter*) ja bassvaljuhääldi (*woofer*) tehnoloogia vähendamaks kõlarite tekitatavaid moonutusi.
  - 1935 ehitati esimene tõeline magnetlinti kasutav salvestusseade: "*magnetophone*" (BASF/AEG).
  - 1939. aastal hakati salvestuse kvaliteedi parandamiseks kasutama eelpinget (eelmagneetimist, *AC Bias*).
  - 1947. aastal saavutas Peter Goldmark (Columbia Records, CBS-i omanduses) grammofonil kvaliteetse heli 33 pöörde juures minutis (senise 78 asemel). Sündis LP (*Long Play*) heliplaat, mis mahutas 20 minutit kummalegi poole. 1948. aastal tutvustaski CBS maailmale *Long Play* (LP) plaati.
  - 1954. aastal muutuvad avalikkusele kättesaadavaks stereo linnid.
  - 1958. ilmuvad turule stereo LP plaadid. Ilmuvad esimesed stereokõrvaklapid (Koss).
  - 1962. aastal on eetris esimene stereo raadiosaade.
  - 1963 tutvustab Philips helikassetti (*compact cassette*), mis 1964. aastal ka turule jõuab.
  - 1969 võetakse kasutusele Dolby müratasandus (*noise reduction*).

### ***Digitaalse helisalvestuse ajalugu***

---

Digitaalse helisalvestuse ajalugu ulatub tagasi 1930-ndatesse aastatesse kui telefoniside arendamisega tegelev inglane Alec Reeves 1937. aastal esimesena heli numbrilisele kujule teisendas. Tema lõi PCM (*Pulse Code Modulation*) algoritmi ja täiendas süsteemi ka veaparandusega. Teise maailma ajal loodi Reevesi juhtimisel digitaalne otseliin Winston Churchilli ja Franklin Roosevelti vahel, eesmärgiks pealtkuulamiskindlus.

- Tööd digitaalseks helisalvestuseks alustas Ameerika poolel Thomas Greenway Stockham MIT-s (*Massachusetts Institute of Technology*) juba 1962. aastal. Ta töötas digitaalse helilindi kallal, kasutas arvutit TX-0 ja Bernie Gordon'i loodud analoog-digitaalmuundurit

ja digitaal-analoogmuundurit. 1975. aastal rajas ta oma firma Soundstream Inc ja ehitas 16-realise Honeywell stuudiomagnetofoni põhjal 16-bitise digitaalse helisalvesti, mis salvestas diskreetimissagedusega 50 kHz. 1994 sai Thomas G Stockham esimesena Grammy tehnikaauhinna.



Joonis 18 Thomas Greenway Stockham oma digitaalse helisalvestajaga

- 1972. aasta 24. prillil tegid Nippon-Columbia (Denon) insenerid Tokyo Aoyama Tower Hall'is Tšehhoslovakkia kvarteti Smetana kontserdist 50 minutilise digitaalsalvestise. See anti välja vinüülplaadil ning hiljem ka CD-l.
- Esimene Euroopas tehtud digitaalne helisalvestus pärineb 1974. aastast Pariisi Notre Dame katedraalist.
- 1976. aastal tehti USA-s Santa Fe ooperiteatris Tom Stockham'i väljatöötatud Soundstream digitaalse salvestajaga (salvestas lindile) esimene 16-bitine digitaalne helisalvestus.
- Samal aastal toodi avalikkuse ette ka Apple I personaalarvuti, millel oli sisseehitatud 8-bitine analoog-digitaal/digitaal-analoogmuundur ja valjuhääldi.
- 1978. aasta juunis sai alguse kommertslik PCM helisalvestus. Betamax videokaameratele lisati 14-bitine digitaalne lisaseade, mis võimaldas salvestada ja taasesitada helisid dünaamikavahemusega 80 dB.
- 1980. aastal töötasid Sony ja Philips välja audio-CD standardi.
- Esimene CD plaat valmistati 1981. aastal Hannoveris Polydori tehases. Plaadile oli salvestatud Straussi "Alpisümfoonia", esitajaks Berliini Filharmoonia orkester.
- CD jõudis turule 1982. aasta augustis, esimeseks masstoodangu plaadiks oli ABBA "Visitors".
- 1986. aastal tutvustati maailmale DAT-i (*Digital Audio Tape*), tegijateks taas Sony ja Philips.
- 1988. aastal ületas CD-de müük esmakordselt LP plaatide müüki.
- 1991. aasta mais toodi avalikkuse ette MD (*MiniDisc*), mis jõudis müüki 1992. aastal.
- 1994. aastal tutvustati avalikkusele *Compact Flash Memory* kaarti.
- 1995. aastal kehtestati DVD standard ja 1998. aasta septembris DVD-Audio 1.0 formaat.
- 1999. aasta septembris kuulutab Sony välja SACD (Super Audio CD), millele üleminek pidavat olema võrreldav üleminekuga helikassetilt CD-le.