

MSM-materiaalit vedenalaisissa äänilähteissä

1.1.2024 - 30.6.2025

Kari Ullakko, Juhani Tellinen, Olavi Mattila, Kari Korpiola

Tikomati Oy

Panu Maijala

Patria Oy

Tutkimusseminaari MATINE

20.11.2025

Esityksen sisältö

- Hankkeen tiedot
- Tausta: nykyiset vedenalaiset äänilähteet
- Hankkeen tavoitteet
- Mitä ovat MSM-materiaalit?
- MSM-äänilähteiden suunnittelu, mallinnus, valmistus ja testaus
- Vastemittaukset Patrian vesialtaassa
- Suuritehoisten äänilähteiden mallinnus
- Yhteenveto ja ehdotukset jatkotoimiksi

Hankkeen tiedot

Aihe: MSM-materiaalit vedenalaisissa äänilähteissä

Hankkeen kesto: 1.1.2024 - 30.6.2025

Osapuolet ja henkilöstö:

- Tikomat Oy: Kari Ullakko, Juhani Tellinen, Olavi Mattila, Kari Korpiola
- Patria Oyj: Panu Maijala

MATINEn rahoitus: 126 400 €

Tutkimuksen tausta

- Vedenalaisen sodankäynnissä käytetään **sonareita** ja **akustisia raivaimia**. Sonareilla paikallistetaan ja seurataan vedenalaisia kohteita, kun taas akustisilla raivaimilla pyritään laukaisemaan vedenalaisia miinoja jäljittelemällä alusmelua. Näissä tarvitaan hyvin kontrolloituja ja tehokkaita vedenalaisia äänilähteitä.
- Perinteiset vedenalaiset äänilähderatkaisut ovat yleensä **pietsosähköisiä**, **magnetostriktiivisiä**, tai sähkömagneettisella kentällä liikuteltavaan **(puhe-)kelaan perustuvia** ja niillä on vaikea tuottaa vaadittavia äänenpaineita riittävän laajalla taajuusalueella. Lisäksi kehitys kulkee kohti autonomisia laitteita, jolloin laitteiden hyötysuhde nousee tärkeäksi valintakriteeriksi.
- Uusia aktuaattorimateriaaleja ja -teknologioita etsitään aktiivisesti.

Hankkeen tavoite ja tieteellinen merkittävyys

- Tällä tutkimuksella **selvitetään magneettisiin muistimetalleihin (MSM)** perustuvien aktuaattoreiden soveltuvuus vedenalaisiin äänilähteisiin. MSM-aktuaattoreiden tuottama liike on noin 50 kertaa suurempi kuin piezosähköisillä ja magnetostriktiivisilla aktuaattoreilla.
- **Tavoitteena** on kehittää MSM-materiaaleihin perustuvia vedenalaisia äänilähteitä eri taajuuksalueille.
- **Hankkeen tieteellinen merkittävyys:** Ensimmäisenä maailmassa kehitämme vedenalaisia äänilähteitä, joissa käytetään MSM-materiaaleja liikkeen tuottamiseen.

Mahdolliset sovellukset

- **Akustisilla raivaimilla** pyritään tuottamaan yli 200 dB @1 m äänenpainetasoja erittäin laajalla taajuusalueella 10 Hz – 100 kHz. Aktiivisonareissa voidaan käyttää hyvin suuria taajuuksia, ja on täysin kiinni vedenalaisesta kohteesta ja halutusta erotteluresoluutiosta, mitä taajuuksia tulee käyttää. Suurtaajuiset aktiivisonarit toimivat taajuusalueella 10 – 50 kHz ja keskitaajuiset 3 – 10 kHz alueella. Erityisen vaativat, paljon tehoa tarvitsevat sotilaskäyttöön tarkoitetut sukellusveneentorjunta-aktiivisonarit saattavat toimia myös suhteellisen pienillä taajuuksilla, alkaen taajuudesta 1 kHz.
- **Vedenalaiset digitaaliset puhelimet** toimivat 8 – 40 kHz taajuuksilla. Hyvin pitkän kantaman yhteyksissä on käytetty taajuuksia alkaen 300 Hz.
- Tarvetta olisi myös äänilähteille, joilla voidaan tuottaa ääntä jopa alle 10 Hz taajuudella.

MSM-ilmiön toimintaperiaate

MSM-metallit (Magnetic Shape Memory Materials)

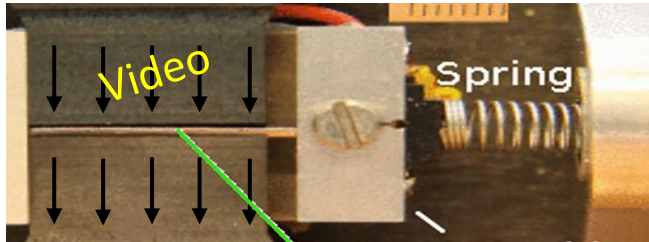
venyvät jopa 12 %, kun niihin kohdistetaan magneettikenttä.

MSM-ilmiön keksi Kari Ullakko MIT:ssä vuonna 1996:

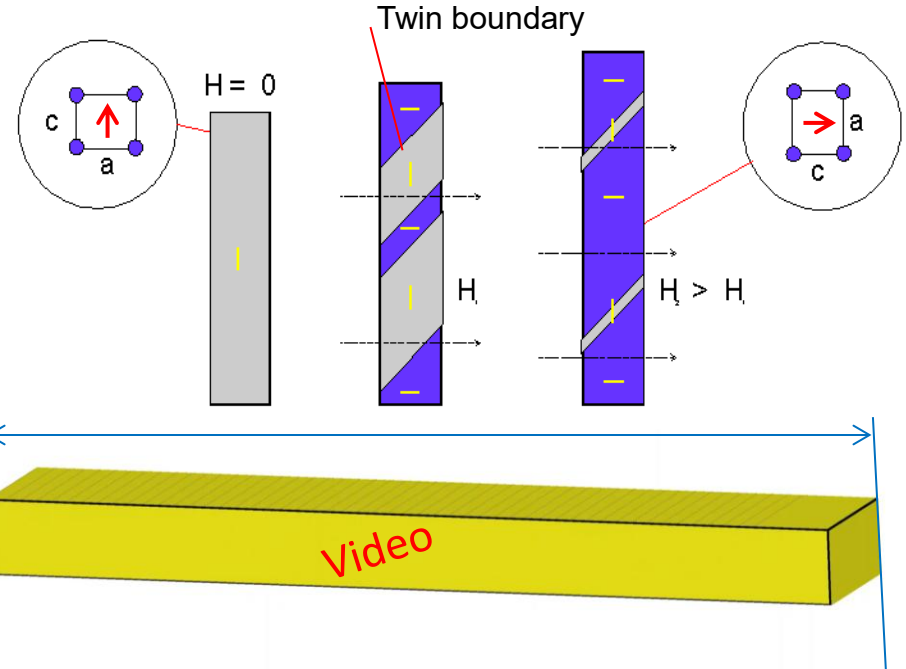
K. Ullakko, et al. Appl. Phys. Lett., Vol. 69 (13), pp. 1966-1968, 1996,

johon on viitattu jo yli 3500 kertaa. Seitsemän kansainvälistä konferenssia on järjestetty MSM-materiaaleista.

Alternating magnetic field between 0 – 0.2 T

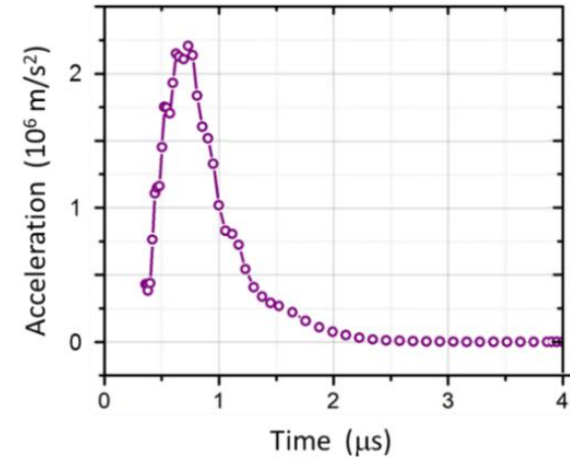
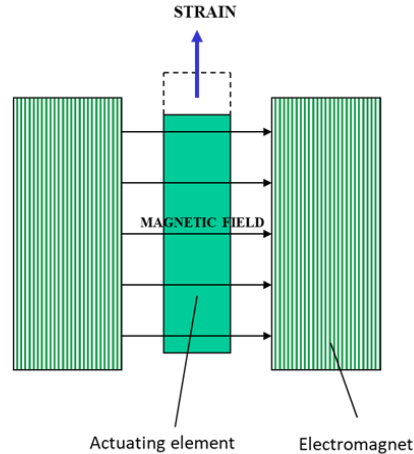


MSM material (Ni-Mn-Ga) 1 x 2 x 20 mm³



MSM-elementin suoritusarvot

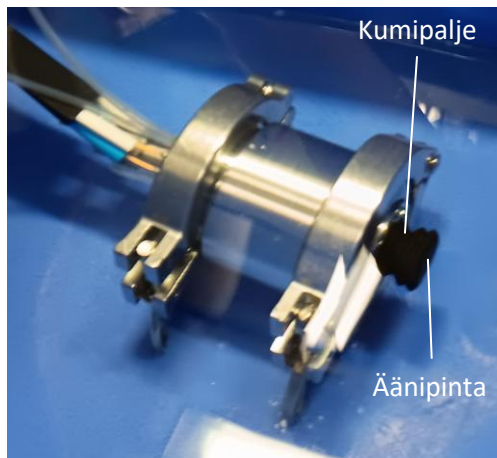
- Muodonmuutosnopeus jopa **4 m/s** ja kiihtyvyys **2 000 000 m/s²**
- Vasteaika < **0,5 μ s**
- Hyötysuhde yli **90 %** ja muodonmuutos säilyy ilman lisäenergiaa



MSM-materiaalit soveltuvat vedenalaisiin äänilähteisiin, koska ne tuottavat **suuren liikkeen suurella kiihtyvyydellä ja laajalla taajuuskaistalla.**

Mallinnettiin ja valmistettiin kaksi MSM-äänilähdettä

Äänilähde 1

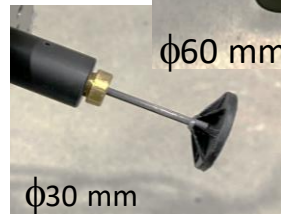


- Paineuormitteinen
- MSM-elementti 1 x 2 x 20 mm³
- Amplitudi 0 – 0,4 mm
- Voimantuotto 4 N
- Äänen tuottava pinta $\phi 12$

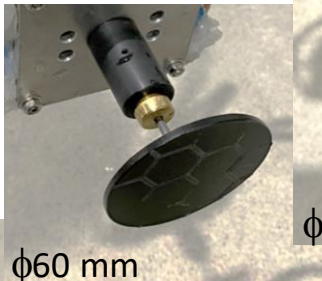
Äänilähde 2



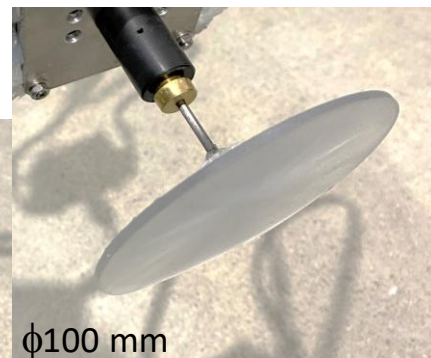
- Jousikuormitteinen
- MSM-elementti: 6 kpl 0,95 x 0,9 x 16 mm³, josta magneettipiirin sisällä vain 10 mm (tilavuus 45 mm³)
- Amplitudi 0 – 0,33 mm
- Voimantuotto 13 N
- Virta 0 - 6 A
- Häviöteho MSM-elementeissä on 7 W (20 kHz) ja 1,6 W (10 kHz)



$\phi 30$ mm



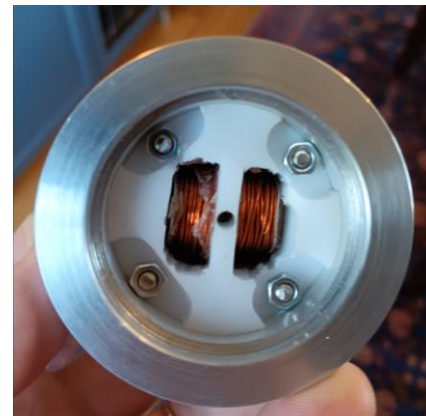
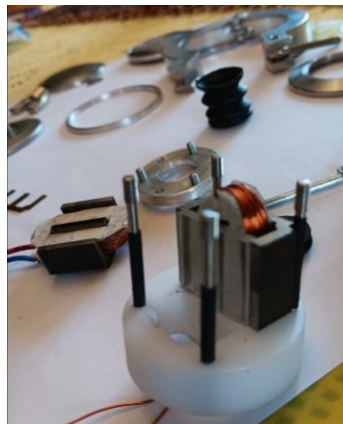
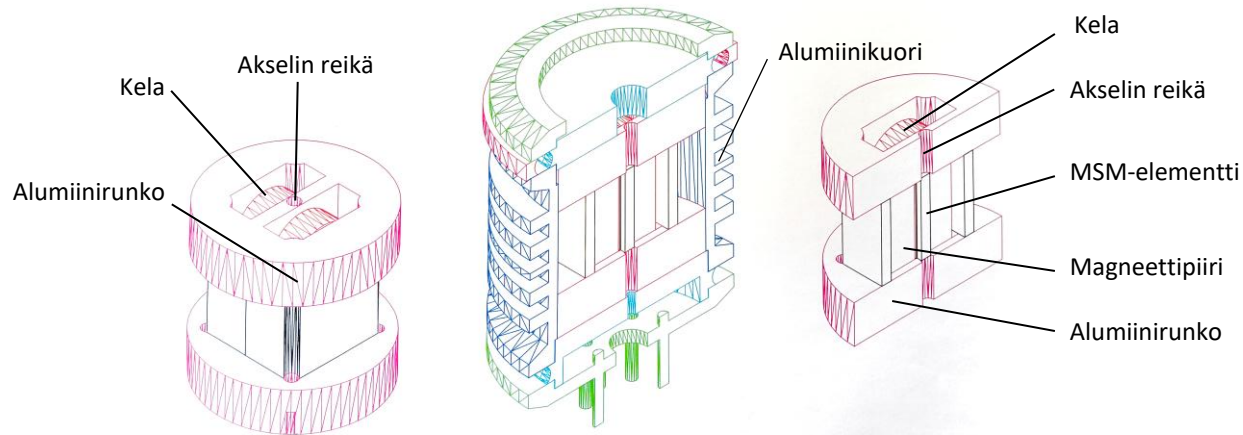
$\phi 60$ mm



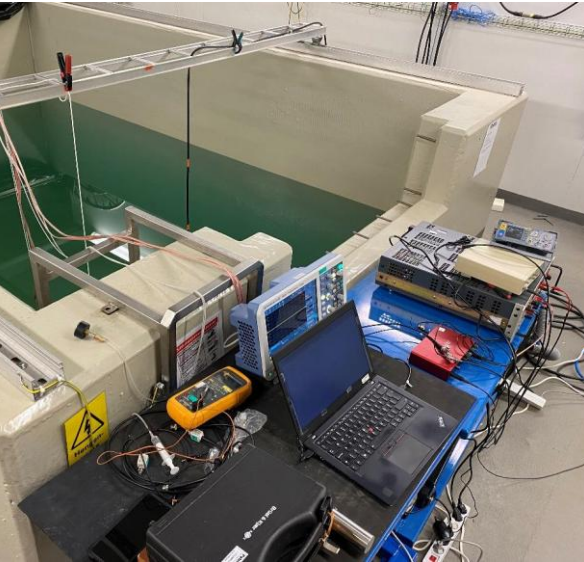
$\phi 100$ mm

Kolme vaihdettavaa äänipintaa
($\phi 30$ mm, $\phi 60$ mm ja $\phi 100$ mm)
hiilikuituvarteen kinnitettyinä

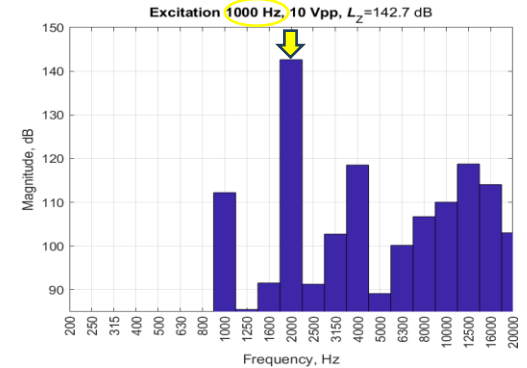
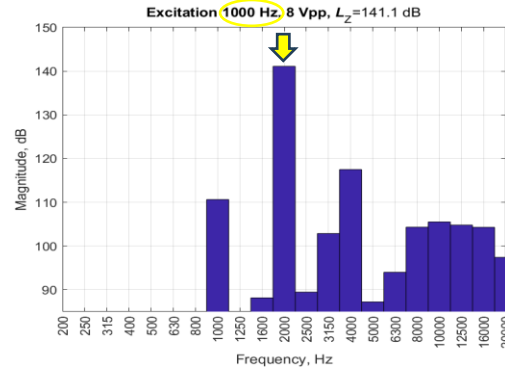
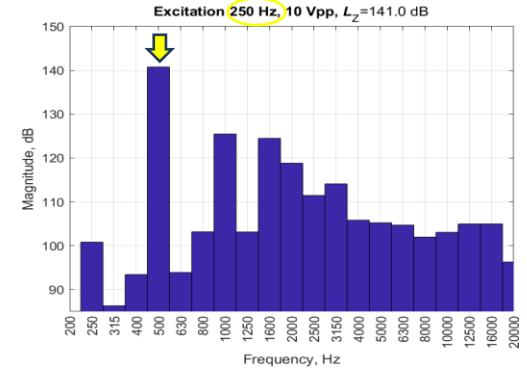
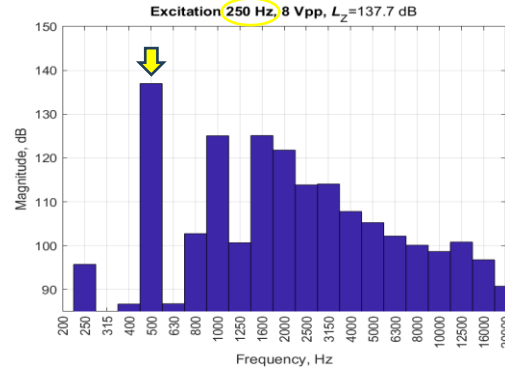
Äänilähteen 1 valmistaminen



Äänilähde 1: vastemittaukset Patrian altaassa



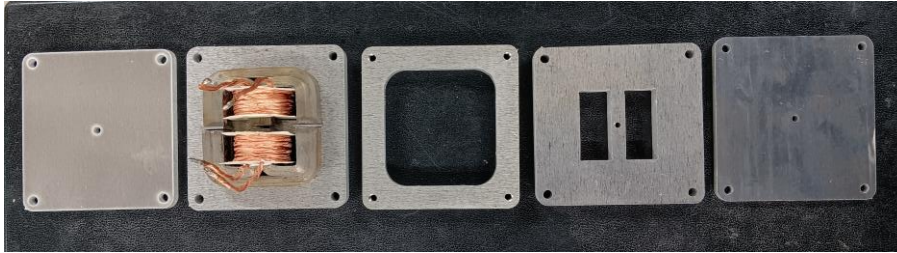
Äänilähteen ja hydrofonin etäisyys 840 mm
Syvyys 1000 mm



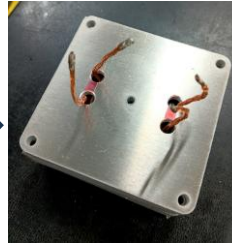
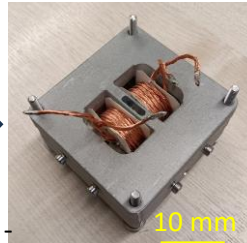
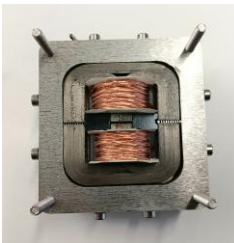
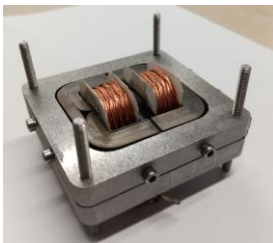
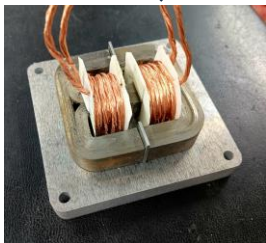
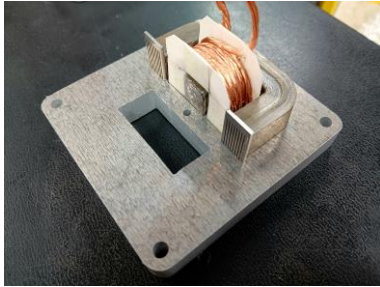
Koska äänilähde tuotti ääntä korkeillakin taajuuksilla, päätimme tehdä toisen äänilähteen (Äänilähde 2), joka suunniteltiin korkeille taajuuksille.

Äänilähde 2: valmistuksen vaiheet

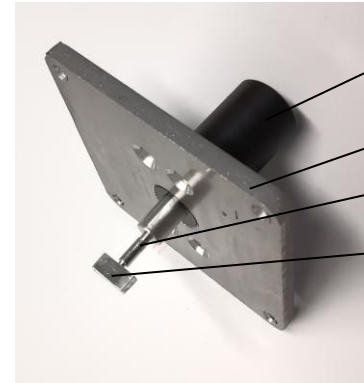
a) Vesileikattiin alumiinilevyistä äänilähteen rungon osat



b) Magneettipiiri

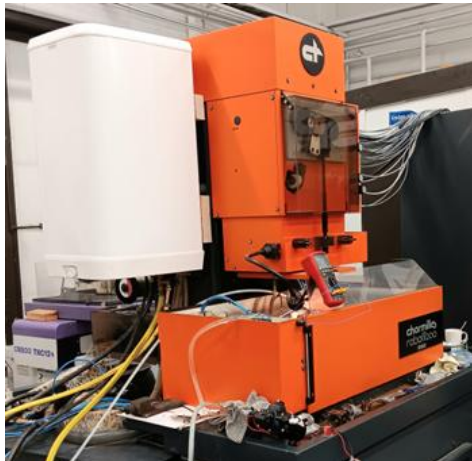


c) MSM-elementtien asennus ja äänilähteen kokoonpano



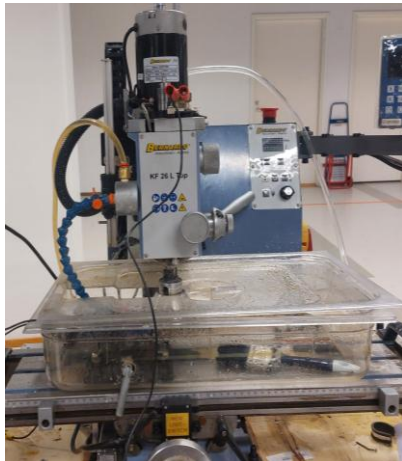
MSM-elementtien valmistus

Elementtien leikkaus



Kehitettiin MSM-elementtien EDM-leikkaustekniikkaa erilliskiteisestä Ni-Mn-Ga-kangesta Tamspark Oy:ssä.

Elementtien hionta ja kiillotus

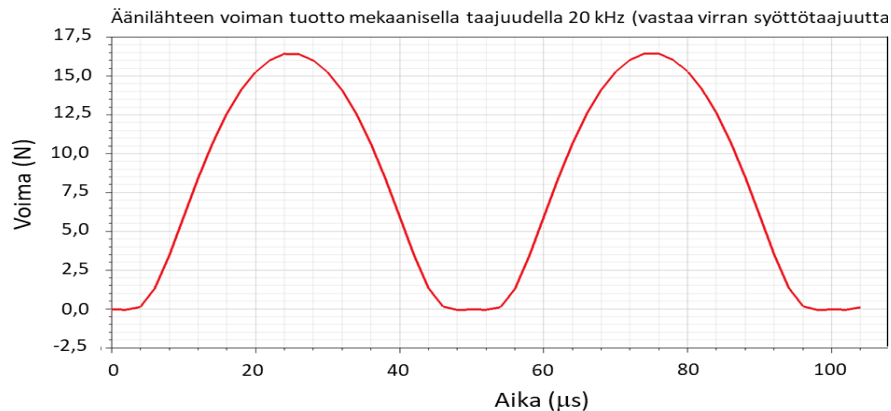
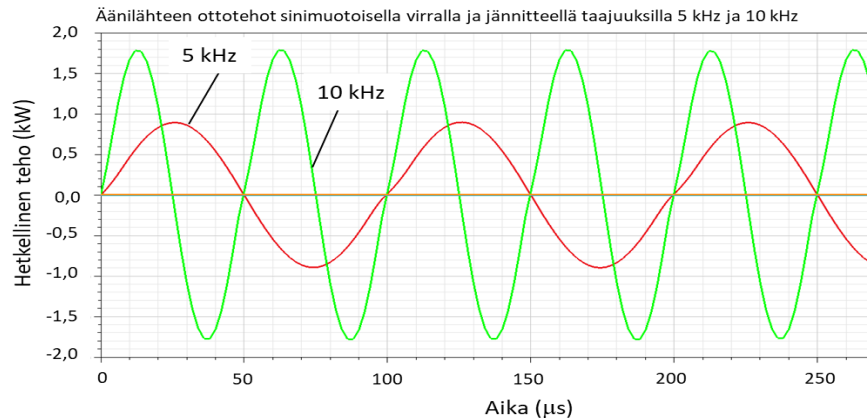
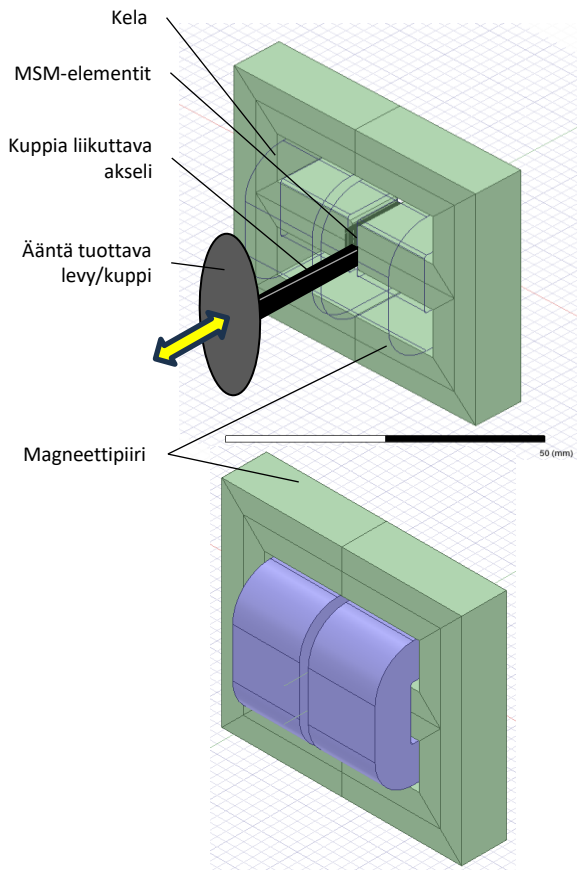


- Kehitimme jysinkoneesta sähkökemiallisen työstökoneen.
- Timanttilaikan ja MSM-elementin väliin johdetaan sähkövirta elektrolyyttiliuoksessa.
- Laite työstää mekaanisesti noin 10% ja elektrolyyttisesti 90%.

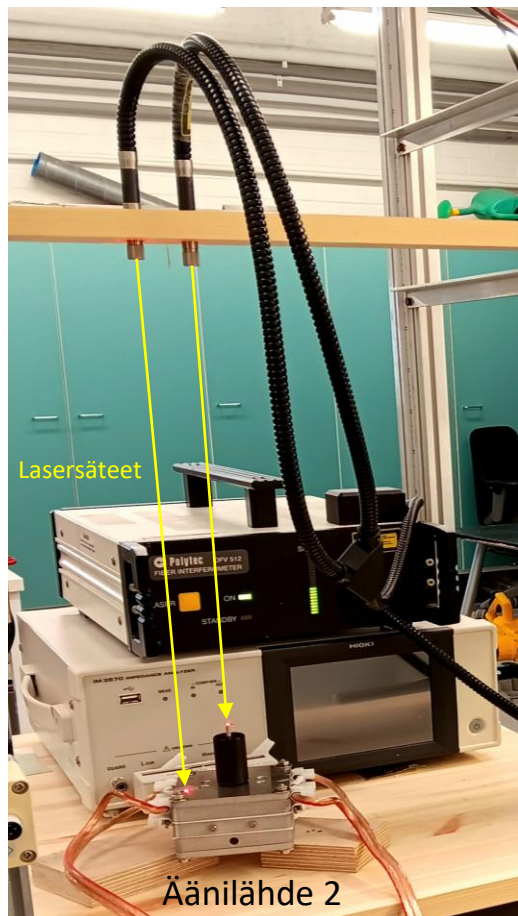


Kiilloituskertojen lukumäärä

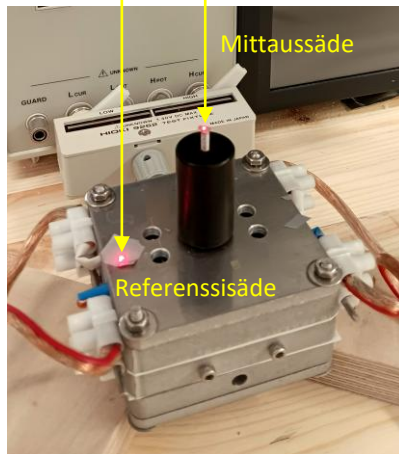
Äänilähteen 2 mallinnettu ottoteho ja voimantuotto



Taajuusvasteen mittausjärjestely



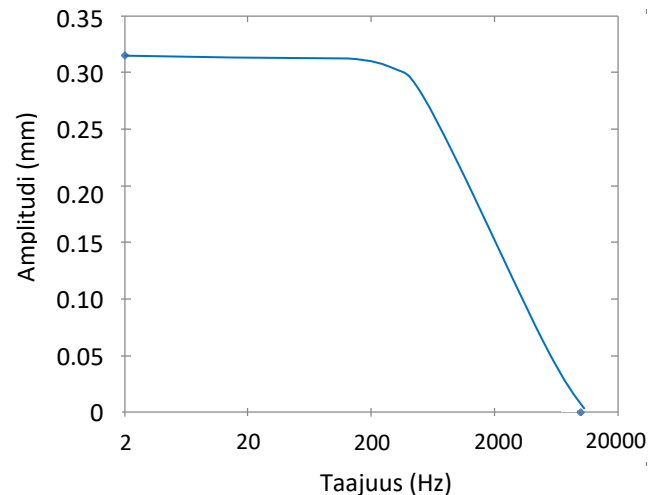
Äänilähde 2 (jousikuormitus)



Äänilähde 1 (paineakuormitus)

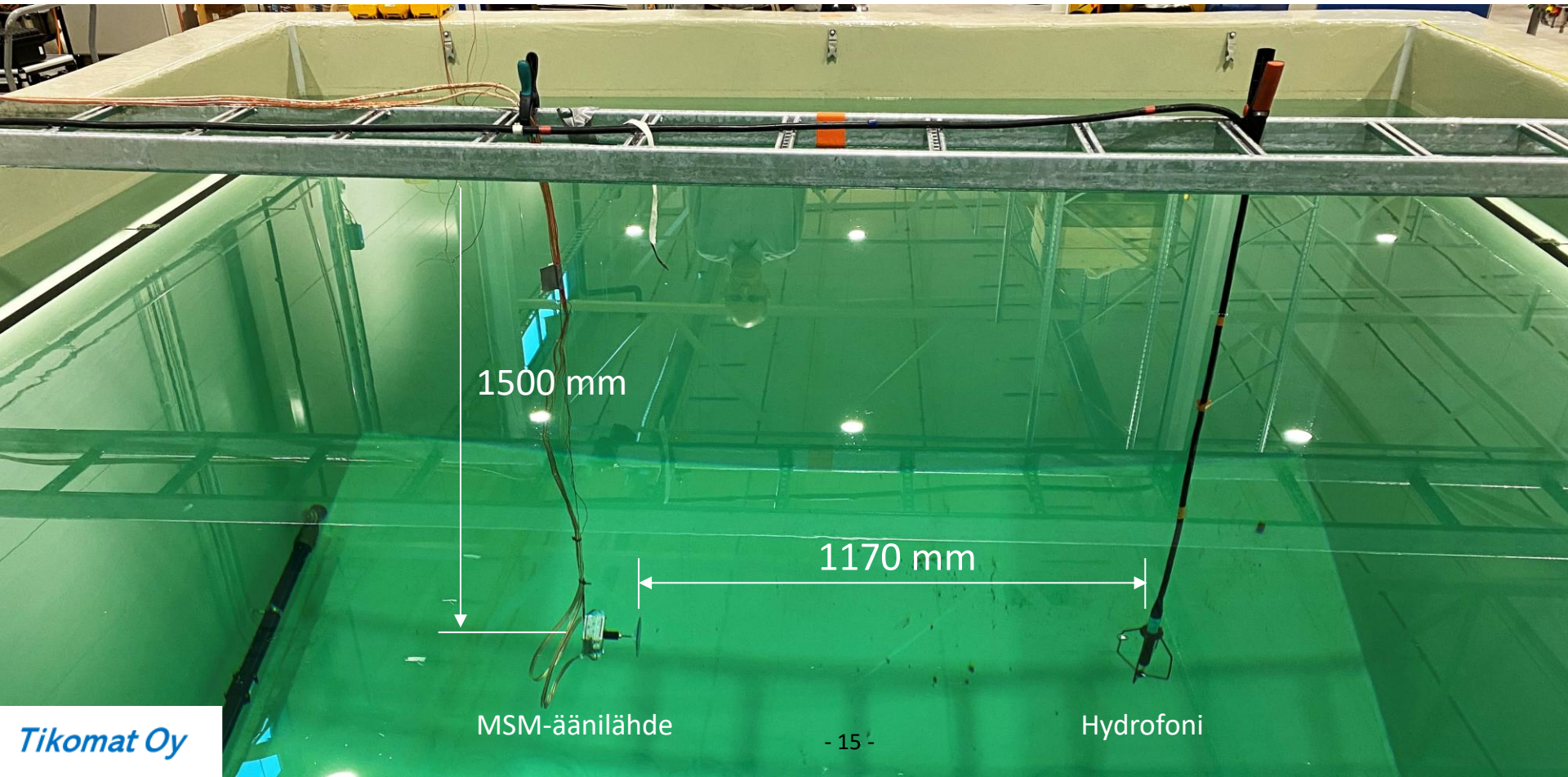


Äänilähteen 2 mitattu liike vs. taajuus



- Liikeamplitudi on 0,33 mm taajuusalueella n. 2 –500 Hz, ja taajuudella 2 kHz Hz liike on vielä puolet tästä.
- Äänilähteen 2 tuottama voima on noin 13MPa (Mallinnustulos 16 MPa)
- Pääsyy liikkeen pienenemiseen suurilla taajuuksilla ovat pyörrevirtahäviöt MSM-elementissä (7 W).
- Mitatut suoritusarvot vastaavat mallinnustuloksia.

Äänilähde 2: akustiset vastemittaukset Patrian vesialtaassa



1500 mm

1170 mm

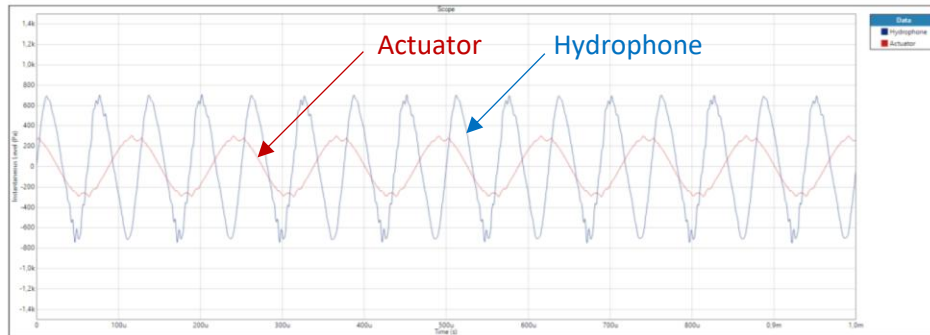
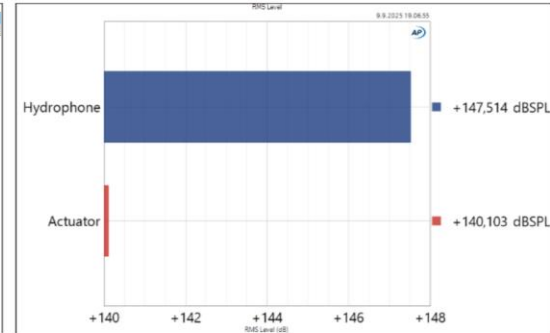
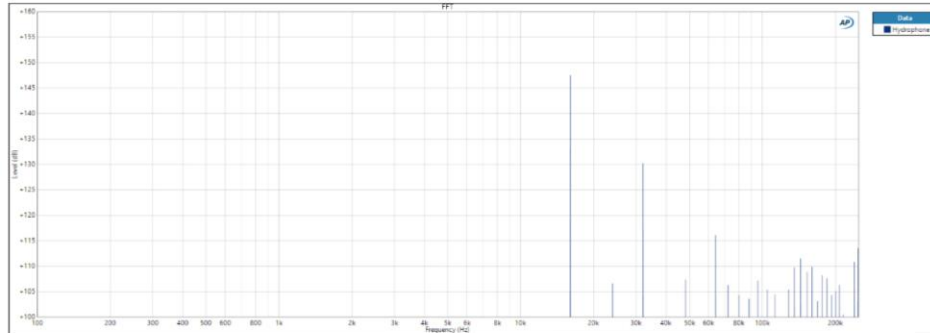
MSM-äänilähde

Hydrofoni

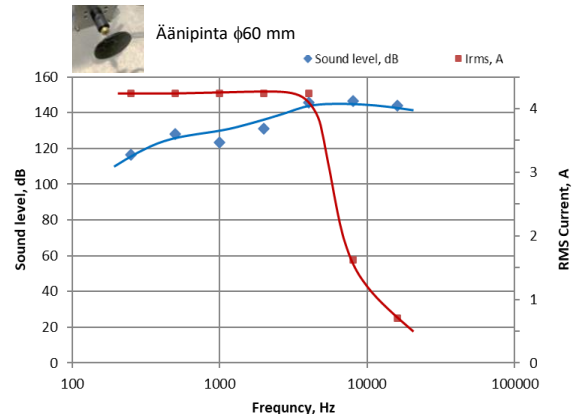
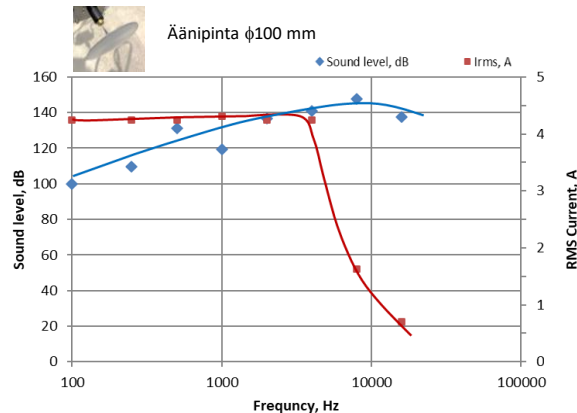
Mittausesimerkki 16 kHz

Patria

16 kHz, 147.5 dB, THD 14.5 %, 113 V, 2.3 A

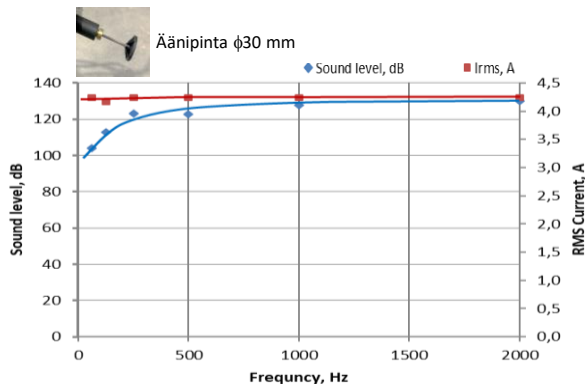


Vastemittaustulokset (äänipinta $\phi 60$ mm ja $\phi 100$)

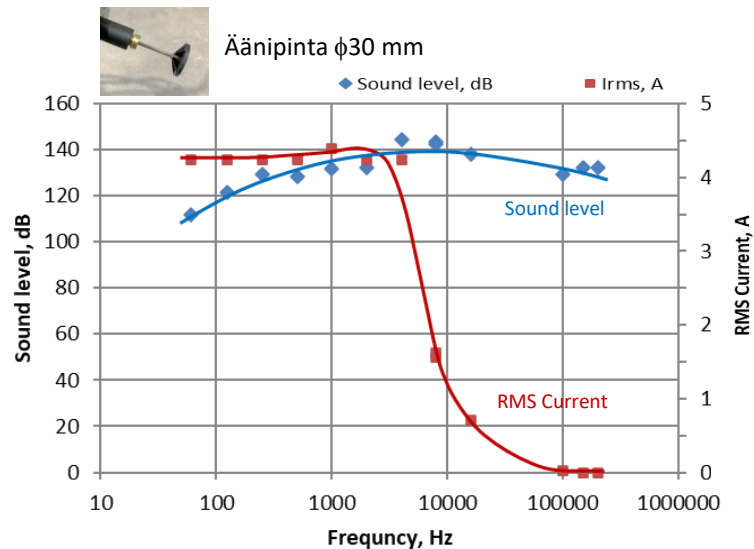


Audiovahvistimen tuottama virta (RMS Current) pienenee noin 2 kHz jälkeen.

Äänipinnan $\phi 100$ liikettä saattaa pienentää aktuaattorin liikkuminen edestakaisin.

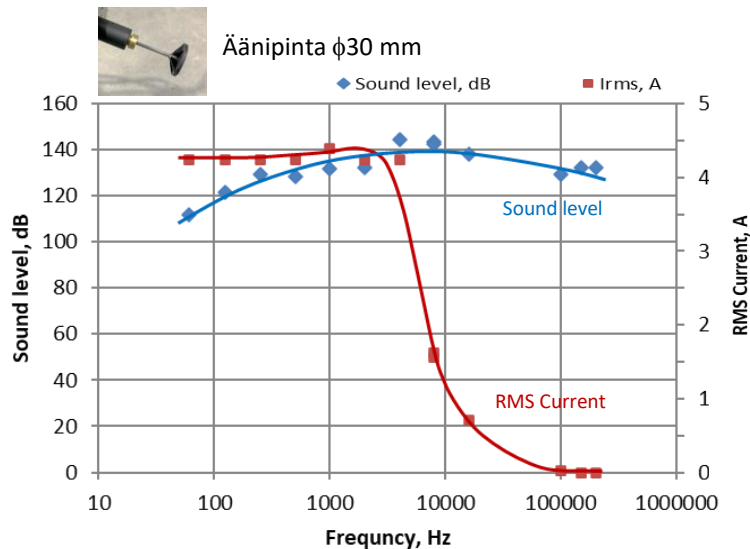


Vastemittaustulokset (äänipinta $\phi 30$ mm)

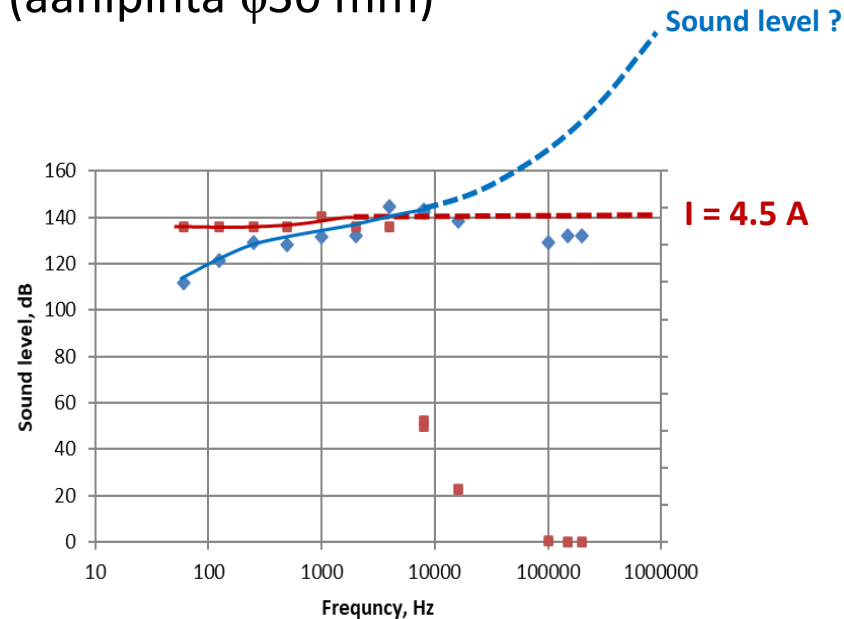


Äänenvoimakkuus säilyy 130 dB:sä, vaikka virta putoaa 4,5 A:sta noin tuhannenteen osaan taajuuksvälillä 2 - 200 kHz.

Vastemittaustulokset (äänipinta $\phi 30$ mm)

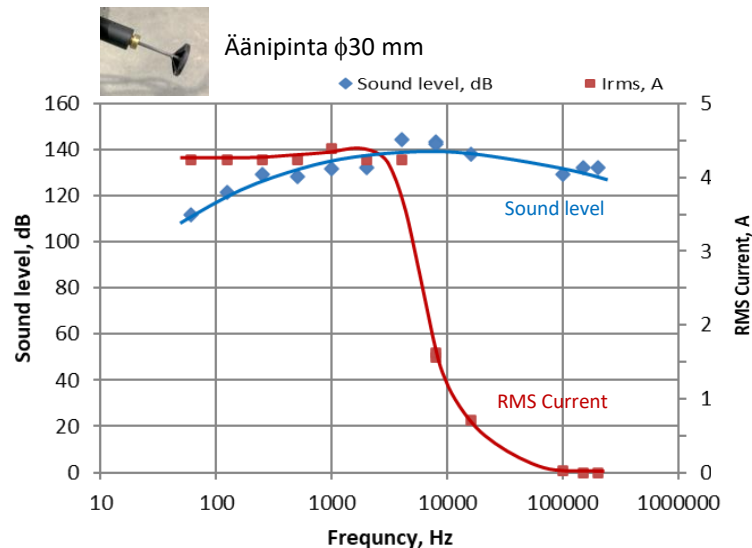


Äänenvoimakkuus säilyy 130 dB:sä, vaikka virta putoaa 4,5 A:sta noin tuhannenteen osaan taajuuksvälillä 2 - 200 kHz.

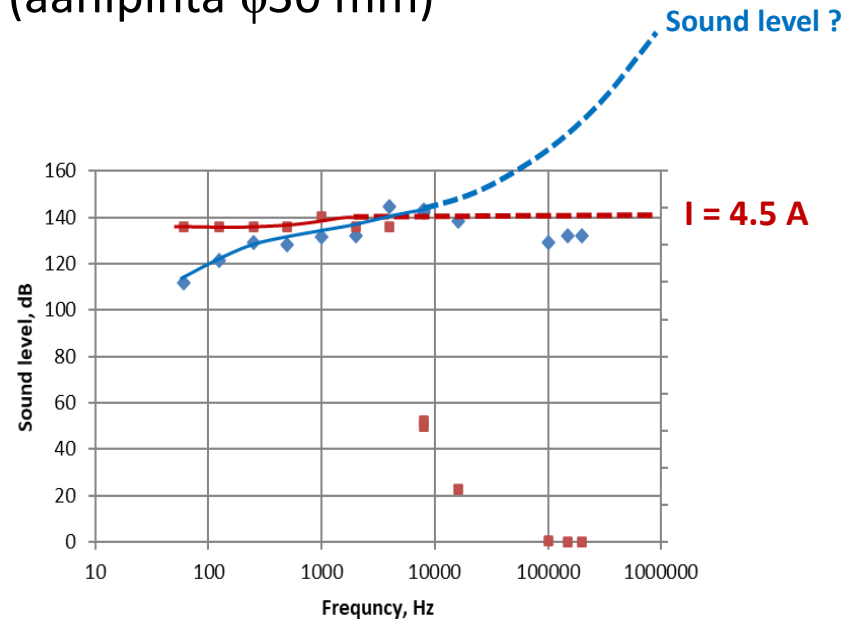


Kuinka suuri olisi äänenvoimakkuus taajuudella 200 kHz, jos virtalähteemme tuottaisi virran 4,5 A koko mittaustaajuualueella (kuva yllä)?

Vastemittaustulokset (äänipinta $\phi 30$ mm)



Äänenvoimakkuus säilyy 130 dB:sä, vaikka virta putoaa 4,5 A:sta noin tuhannenteen osaan taajuuksvälillä 2 - 200 kHz.



Ääni tuotettiin MSM-elementillä, jonka tilavuus on vain 45 mm^3 .

Kuinka suuri olisi äänenvoimakkuus, jos elementti olisi 1000 kertaa suurempi (45 cm^3), eli ääntä tuottava voima olisi tuhatkertainen? Vahvistuisiko äänenvoimakkuus 60 dB?

MSM-materiaali vs. Terfenol D ja piezo

MSM-materiaali soveltuu korkeataajuisiin äänilähteisiin, koska kiihtyvyys on suuri:

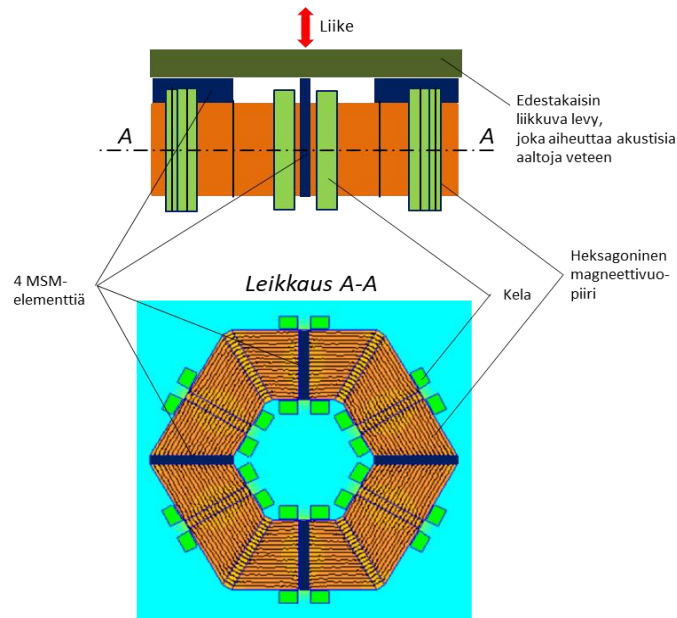
Materiaali	Kiihtyvyys
MSM-materiaali (Ni-Mn-Ga)	200 000 g (A. Saren, Doctoral Thesis, 2018, https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158839/Andrey%20Saren_A4.pdf?sequence=1)
Piezomateriaali (PZT)	10 000 g (https://www.physikinstrumente.com/en/expertise/technology/piezo-technology/properties-piezo-actuators)
Terfenol D (DyTbFe)	200 g (Yafang Li et al., Micromachines 2023, 14(6), 1103; https://doi.org/10.3390/mi14061103)

MSM-materiaali soveltuu laajakaistaisiin äänilähteisiin, koska liikeamplitudi on suuri:

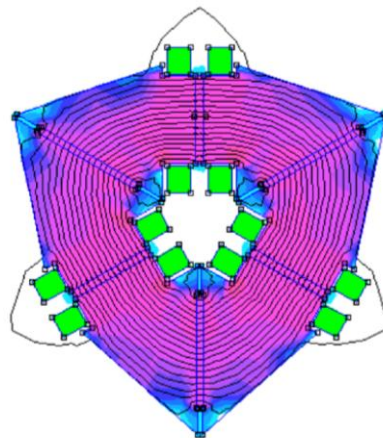
Materiaali	Muodonmuutos
MSM-materiaali (Ni-Mn-Ga)	12 % (A. Sozinov, A. A. Likachev, N. Lanska, and K. Ullakko, Appl. Phys. Lett. 80, pp. 1746-1748, 2002.)
Piezomateriaali (PZT)	0,15 % (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666351122000717)
Terfenol D (DyTbFe)	0,2 % (https://earthrare.com/terbium/tbdyfe/)

Mallinnettuja suuritehoisia MSM-äänilähteitä

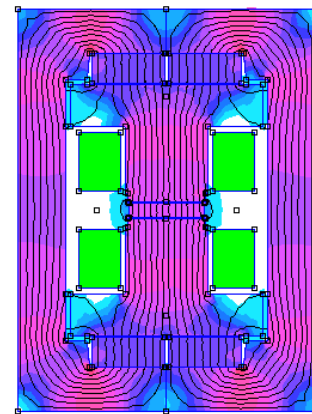
Kun vuopiireihin luodaan magneettikenttä kelaparien avulla, niin MSM-elementit pitenevät ja nostavat kansilevyä ylöspäin.



- Voima 20 kN
- Liike 3 mm
- Mekaaninen teho 3 kW
- Akustinen teho veteen >1 kW
- Halkaisija 700 mm ja korkeus 200 mm
- Massa 100 kg



- Voima 500 N
- Liike 3 mm
- 3 paria MSM-elementtejä 4 x 45 x 100 mm
- Halkaisija 200 mm ja korkeus 150 mm



- Voima 500 N
- Liike 3 mm
- Mitat: 200 x 270 x 150 mm³

Yhteenveto

- Valmistimme kaksi MSM-äänilähdettä ja mittasimme niiden vasteet vedessä. Vaste pysyi noin 130 dB:ssä taajuuteen 200 kHz saakka, vaikka äänilähteeseen syötetty virta putosi 1/1000 osaan 2 kHz:n jälkeen. Äänen tuotti vain 45 mm³:n suuruinen MSM-elementti. Kuinka suuri olisi äänenvoimakkuus 1000 kertaa suuremmalla elementillä (1000-kertainen voima) ja riittävällä virralla?
- MSM-materiaali soveltuu suurtaajuusäänilähteisiin, koska sen kiihtyvyys on suuri, ja myös matalataajuusäänilähteisiin, koska liikeamplitudi on suuri.
- Mallinsimme myös suuritehoisia MSM-äänilähteitä, jotka voivat tuottaa yli 3 kW tehoja.

Ehdotus jatkotoimenpiteiksi:

1. Valmistetaan suuritehoinen suurtaajuusäänilähde.
2. Valmistetaan suuritehoinen äänilähde taajuusalueelle 1 – 500 Hz
(Tällä taajuusalueella aktuaattorin liikeamplitudi ei pienene taajuuden funktiona, kuva sivulla 14). Vaihtoehtoisesti valmistetaan äänilähde taajuusalueelle 1 – 100 Hz.
3. Testataan painealueella 1 – 5000 bar, muuttuuko MSM-äänilähteen tuottama äänenvoimakkuus vedenpaineen funktiona. Oletamme, että ei muutu.

Kiitokset

Kiitämme **Tamspark Oy**:tä yhteistyöstä MSM-elementtien leikkaus- ja kiilloitustekniikan kehittämissä sekä muoviosien suunnittelusta ja 3D-tulostuksesta.

VT Tekniikka Oy:tä kiitämme sähkökemiallisen työstötekniikan kehittämisestä.