



Antti Sohlman

# Lineaaritäryn muuntaminen kulma- täryksi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

16.2.2023

# Tiivistelmä

Tekijä:	Antti Sohlman
Otsikko:	Lineaaritäryn muuntaminen kulmatäryksi
Sivumäärä:	24 sivua
Aika:	16.2.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Automaatiotekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Timo Tuominen Vanhempi Testauslaiteinsinööri Tuomo Asikainen

---

Insinööritöön tavoitteena oli suunnitella ja rakentaa kulmatärylaite Murata Electronics Oy:n validointilaboratorion käyttöön. Kulmatärylaitteella tutkitaan ja testataan gyro-anturin eli kulmanopeusanturin käyttäytymistä taajuusalueen 2–50 kHz yli. Työssä hyödynnettiin olemassa olevaa lineaaritärylaitetta. Lineaariliikkeen muuntaminen kulmamuotoiseksi toteutettiin erillisellä mekaniikalla, joka rakentui lineaaritärin päälle.

Työn sisältöön kuului: Mekaniikan 3D-mallien ja kokoonpanon suunnittelu sekä valmistuskuvien laatiminen Solidworks-ohjelmistolla. Moodianalyysin teko Ansys-ohjelmistolla. Laitteiston kokoonpano ja testaus. Lopuksi ennen virallista käyttöönottoa laadittiin käyttöohjeet.

Mekaniikasta ehdittiin suunnittelemaan kaksi eri versiota, joista jälkimmäinen todettiin kyvykkäämmäksi. Työ kuitenkin osoittautui arvioitua haasteellisemmaksi, eikä kaikkia tavoitteita saavutettu, joten työn laajuutta rajattiin pienemmäksi. Kulmatäry saatiin toimimaan 2–40 kHz:n taajuusalueella X- ja Y-orientaatiossa.

Avainsanat: kulmatäry, laservibrometri, 3D-malli, ominaistaajuus

## Abstract

Author: Antti Sohlman  
Title: Converting a Linear Shaker into an Angular Shaker  
Number of Pages: 24 pages  
Date: 16 February 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering  
Professional Major: Automation Engineering  
Supervisors: Timo Tuominen, Senior Lecturer  
Tuomo Asikainen, Senior Test Equipment Engineer

---

The purpose of this thesis work was to design and develop an angular shaker for Murata Electronics validation laboratory use. The validation laboratory uses the angular shaker to test and investigate the behavior of gyro sensors over the 2–50 kHz frequency range. An existing linear shaker was utilized in this thesis work. Conversion from linear movement to angular movement was implemented with a separate mechanism which was built on top of the linear shaker.

The content of the work included designing of the 3D-models, assembly modeling and the drafting of manufacturing drawings with Solidworks software, as well as modal analysis with Ansys software, the assembly and the testing of the equipment, and the creation of user instructions before the final implementation.

Two different mechanism versions were made. The second version was found to be more capable than the first one. The work proved more challenging than expected and as a consequence, not all objectives were achieved. Hence, the scope of the work was reduced. The angular shaker was made to operate at 2–40 kHz frequencies.

Keywords: Angular shaker, Laser vibrometer, 3D-model, Natural frequency

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Järjestelmä	1
2.1	Lineaaritäräyläite	2
2.2	Laservibrometri	4
2.3	Täräyohjain ja ohjelmisto	5
2.4	Asetusarvojen määrittely	6
3	Mekaniikka	6
3.1	Mekaniikan hahmotelma	7
3.2	Jigi	8
3.3	Voimansiirron osat	9
3.4	Runko-osa	11
3.5	Kokoonpano- ja valmistuskuvat	12
4	Mekaniikan esitestaus	12
4.1	Ensimmäinen versio	12
4.2	Paranneltu mekaniikka	15
4.3	Simulointi	16
5	Lopputestaus	18
5.1	Testaussuunnitelma	19
5.2	Testaus	20
5.3	Tulokset	22
6	Yhteenveto	24
	Lähteet	25

## Lyhenteet ja käsitteet

3D-malli:	Kolmiulotteinen tietokonemalli.
Armature:	Tärylaitteen liikkuva runko-osa.
Doppler-ilmiö:	Aaltoliikkeessä tapahtuva muutos, jota käytetään hyväksi nopeuden mittaamisessa.
dps:	<i>Degrees per second</i> . Kulmanopeuden yksikkö, astetta sekunnissa.
Frequency range:	Taajuusalue.
GAGE:	Toistettavuustesti.
G-arvo:	1 G vastaa maan vetovoimaa $9,81 \text{ m/s}^2$ .
Gyro-anturi:	Kulmanopeutta mittaava anturi.
I/O:	<i>Input / Output</i> . Sisääntulo / Ulostulo.
MSA:	<i>Measurement System Analysis</i> . Yrityksen sisäinen dokumentti laitteiden kyvykkyyden toteamiseksi.

## 1 Johdanto

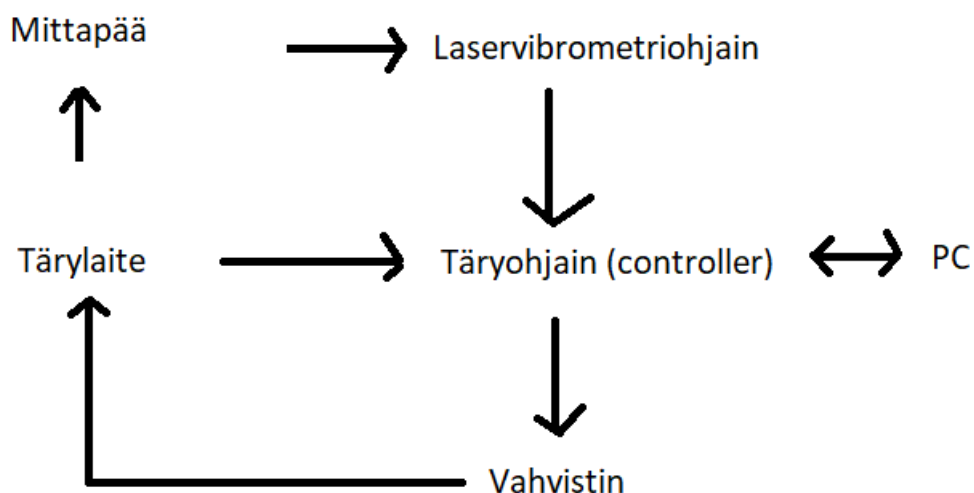
Lähtökohtana tässä insinöörityössä oli suunnitella ja muuntaa Murata Electronics Oy:n laboratorion testilaitteena oleva lineaaritärylaite toimivaksi kulmatärylaitteeksi. Kulmatärylaitteella tarkastellaan kulmanopeutta mittaavien antureiden (gyro-anturi) toimintaa määrätyn taajuusalueen yli.

Tavoiteltava taajuusalue on 2–50 kHz. Johtuen suuresta taajuusalueesta mekaanisten kappaleiden käyttäytyminen eri taajuuksilla oli otettava huomioon. Jokaisella osalla on omat ominaisresonanssitaajuuudet, joihin vaikuttavat esimerkiksi kappaleen muoto, materiaali ja tukipisteet. Ominaisresonanssitaajuudesta voi olla joissakin sovelluksissa hyötyä, mutta tässä työssä ne pyritään rajaamaan tärylaitteen taajuusalueen ulkopuolelle hyvän suunnittelun ja simuloinnin avulla. Ominaisresonanssitaajuuden ilmaantuessa kappaleen liike voi esimerkiksi vaimentua, vahvistua tai liikkeen suunta voi muuttua ei-toivotulla tavalla.

Työn osuus koostui 3D-mallien suunnittelusta, ja niitä hyödynnettiin myös simuloinnissa. 3D-mallien pohjalta laadittiin valmistus- ja kokoonpanokuvat. Laitteen kokoonpanon jälkeen laitteiston kyvykkyyttä mitattiin laservibrometrillä ja kyvykkyuden toteamiseksi tehtiin MSA- ja GAGE-laskelmat.

## 2 Järjestelmä

Kokonaisuudessaan järjestelmä (kuva 1) koostui lineaaritärylaitteesta ja -ohjaimesta, signaalivahvistimesta, laservibrometristä (ohjain ja mittapää), PC-laitteistosta sekä suunniteltavasta mekaniikasta.



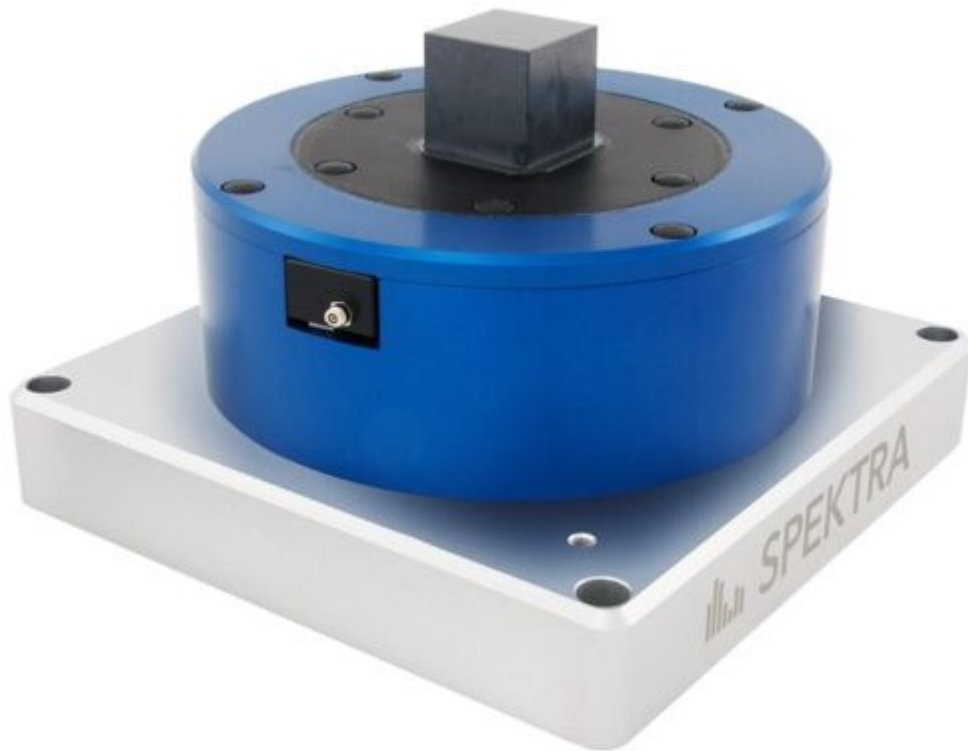
Kuva 1. Järjestelmän kytkentäkaavio.

Käytössä oleva lineaaritäry toimii samalla periaatteella kuin normaali dynaaminen kaiutin. Puhekelaan, joka on magneettikentän sisällä, johdetaan vaihtovirta-signaalia. Induktioilmiön seurauksena syntyy voima, joka liikuttaa puhekela. Puhekela liikkuu luukuttaen kaiuttimen kartiota, joka saa aikaan ääniaaltoja. [1, s. 6.]

## 2.1 Lineaaritärylaite

Lineaaritäryssä kartio on korvattu armaturella, joka ääniaaltojen sijaan tuottaa mekaanista liikettä (kuva 2). Valmistaja ei paljasta tarkempia tietoja armaturen materiaalista, mutta se on valmistettu erittäin kovasta teknisestä keraamista, jonka ensimmäinen resonanssitaajuus tällä mekaanisella rakenteella on erittäin

korkea, yli 52 kHz [2, s. 3–4].



Kuva 2. Lineaaritäry. Täryn keskellä kuution muotoinen noin 30 x 30 mm oleva armature eli liikkuva runko-osa. [3.]

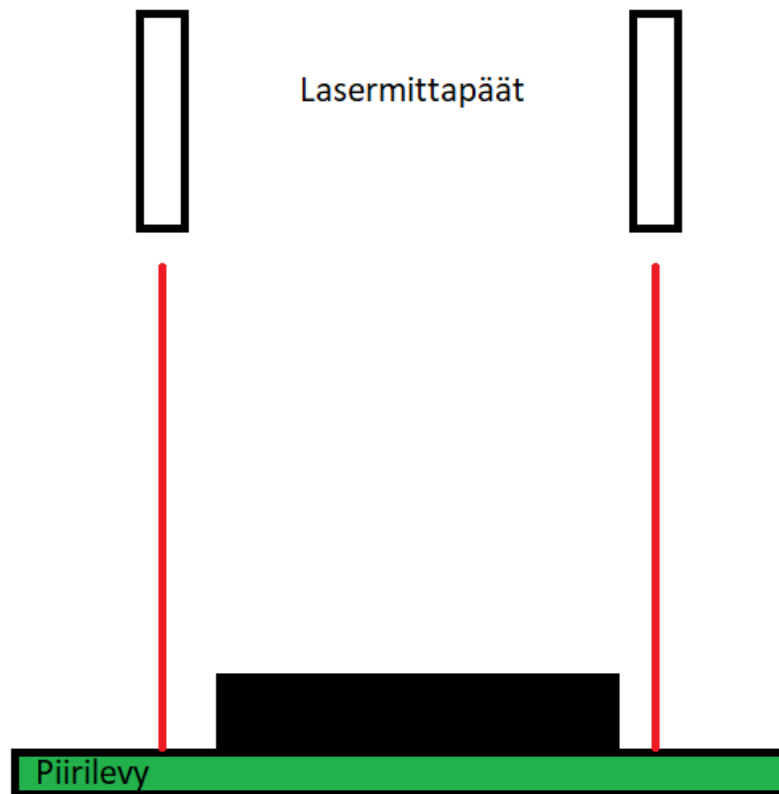
Taajuudet, jotka ovat alhaisempia kuin valmistajan ilmoittama resonanssitaajuus 52 kHz, eivät vaikuta olennaisesti tärylaitteen toimintaan. Toki tulee huomioida, että laite ei ole absoluuttinen ja vain yksi järjestelmänosa. Armaturesta lineaarinen liike johdetaan mekaniikkaan, jonka avulla se muunnetaan keinuvaaksi, kulmamuotoiseksi liikkeeksi.

Tärylaite sisältää sisäisen kiihtyvyyssanturin, jota hyödynnetään tässä järjestelmässä suojaamaan tärylaitetta vaurioitumiselta. Maksimikiihtyvyys tärylle on  $400 \text{ m/s}^2$ , mikä vastaa karkeasti yli 40-kertaista maan vetovoimaa. Kiihtyvyyss- tai virtarajojen ylittyessä järjestelmä keskeyttää ajon.



## 2.2 Laservibrometri

Laservibrometrillä mitataan liikkeen nopeutta. Toiminta perustuu doppler-tekniikkaan. Doppler-tekniikalla saadaan kohteen nopeus selville vertaamalla lähetetyn ja takaisin heijastuneen signaalin taajuutta. Jos taajuus pienenee, mitattava kohde liikkuu etäämmäksi [4, s. 5]. Yksi tämän mittaustekniikan eduista on kosketukseton mittaaminen. Riittävän heijastuksen muodostamiseksi mitattavalle pinnalle on kiinnitettävä heijastinteippi, mikä on toimenpiteenä yksikertaisempi kuin fyysisen anturin kiinnittäminen. Tässä tapauksessa mittaamme piirilevyn pinnalta gyro-anturin molemmiin puolin (kuva 3), jolloin tilanne vastaa todellista tilannetta, jossa gyro-anturia käytetään.



Kuva 3. Periaatekuva lasermittapäiden asettelusta.

Laservibrometriltä on takaisinkytkentä täryohjaimelle, jolla säädetään tärylaitteen toimintaa. Materiaalien resonanssitaajuuksien takia armaturen välittämä liike ei ole suoraan verrannollinen siihen, mitä piirilevyn pinnalla tapahtuu. Näin

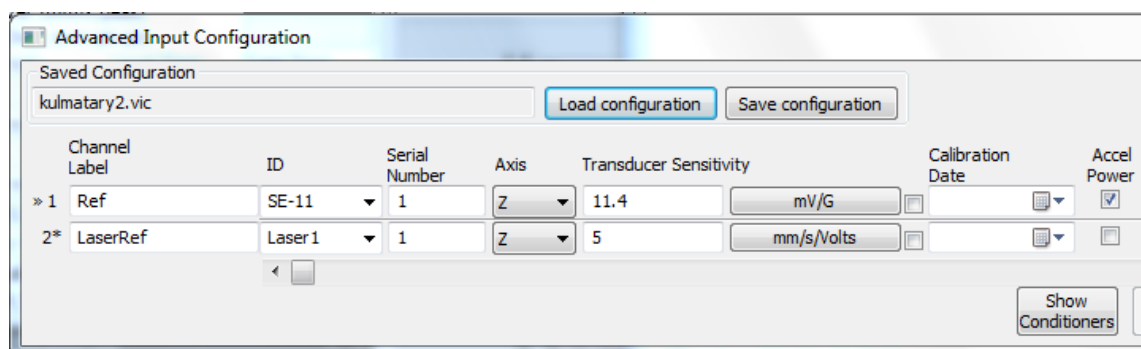
ollen täryohjain säätää armaturelle syötettävän signaalin tasoja takaisinkytkennästä saatuun tietoon perustuen, jotta toiminta on asetusarvojen mukaista.

## Vahvistin

Tärylaitetta ajetaan vahvistimen kautta. Käytettävä tärylaite vaatii tietynlaisen vahvistimen, ja laitevalmistajalla on tähän suositukset. Käytössä on Spektran laitteisto ja vahvistimena Spektra PA15-500. Tärylaitteiden vahvistimet ovat vakaita ja sietävät hyvin ulkoisia häiriöitä ilman, että ulostulosignaali häiriintyy merkittävästi.

## 2.3 Täryohjain ja ohjelmisto

Täryohjaimen eli kontrollerin, PC:n ja VibrationVIEW-ohjelmiston avulla ohjataan järjestelmää. Kontrolleri sisältää I/O-kanavat, joiden kautta koko järjestelmän laitteet ovat kytkettyinä toisiinsa. Sisääntulokanaviin on kytketty täryn sisällä oleva kiihtyvyyssanturi sekä laservibrometri. Ulostulokanava on kytketty vahvistimeen. Kontrolleri säätää vahvistimelle menevää ulostulosignaalia ja sitä kautta tärylaitetta sisääntulokanavien signaalien ja PC-ohjelmiston asetusarvojen perusteella. Asetuksia ei käydä tässä työssä yksityiskohtaisesti läpi, mutta määrittämisessä olennaisimpia ovat taajuusalue (frequency range), taajuuden muutosnopeus (sweep rate), raja-arvot kiihtyvyydelle ja ohjaussignaalin sekä käytettävään anturointiin liittyvät asetukset (kuva 4).



Kuva 4. VibrationVIEW, anturoinnin sisääntulokanavien asetuksia.

Sisääntulojen määrittämisessä määritellään anturikohtaiset asetukset. Ensimmäisen kohdan Ref on tärylaitteen sisäinen kiihtyvyyssanturi ja kohdassa kaksi on laservibrometri. Herkkyys määrittyy käytettävän anturityypin mukaan. Kontrollerilta pystytään tarvittaessa syöttämään anturille käyttöjännite (Accel Power), jos anturilla ei ole omaa erillistä teholähdettä. [5, s. 129.]

## 2.4 Asetusarvojen määrittely

Tuotemäärittelyn mukaan tärytysnopeuden tuli olla kaksi astetta sekunnissa (dps). Nopeuden ( $v$ ), säteen ( $r$ ) ja kulmanopeuden ( $\omega$ ) avulla pystytään tekemään laitteistoon tarvittavat määrittelyt (kaava 1) [6, s. 55]. Kulmanopeuden ( $\omega$ ) yksikkö on radiaania sekunnissa, mutta kaavaan 2 kulmanopeus voidaan syöttää suoraan asteina. Muunnos radiaaneista asteiksi on lisätty kyseiseen kaavaan [7]. Yksiköksi saadaan mm/s, joka voidaan syöttää käytettävän profiilin asetuksiin sellaisenaan.

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (1)$$

$$v = \frac{\omega * r}{180} * \frac{\pi}{1000} \quad (2)$$

$v$  on tangentiaalinen nopeus [mm/s]

$r$  on lasermittapäiden välinen etäisyys [mm]

$\omega$  on kulmanopeus [dps]

Lasereiden välisen etäisyyden ollessa 17 mm saadaan kahden dps:n tärytykselle nopeudeksi 0,593 mm/s. Lasereiden keskinäisen etäisyyden muuttuessa on nopeus laskettava uudelleen, esimerkiksi tuotetyypin vaihtuessa.

## 3 Mekaniikka

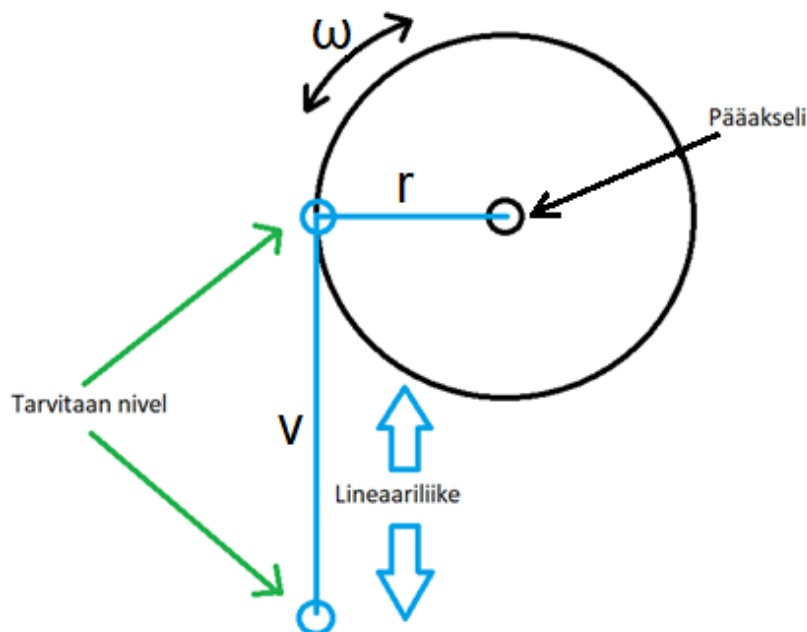
Järjestelmän eri laitteet ja osat ovat kaupallisia lukuun ottamatta mekaniikkaa. Mekaniikan suunnittelussa suuressa roolissa oli käyttäjäystävällisyys: tuotteen ja orientaation eli asennon vaihdon tulisi olla helppo ja nopea toimenpide. Helpokäyttöisyyden lisäksi järjestelmällä oli muitakin vaatimuksia. Mitattavan

tuotteen massakeskipisteen tuli olla keskellä pääakselia eli akselia, jonka suhteen tuotetta tärytetään. Alkuperäisenä tavoitteena oli suunnitella mekaniikka X-, Y- ja Z-orientaatioille. Ensimmäisen prototyypin jälkeen kuitenkin todettiin, että Z-orientaatio rajataan pois ja toteutetaan omana projektinaan myöhemmin. Todettiin myös, että ensimmäisessä vaiheessa tehdään yleismekaniikka, ja tuoterhekohtaiset mekaniikat tehdään myöhemmin yhdessä Z-orientaation kanssa.

Yleismekaniikalla tarkoitetaan, että kaikki tuotteet käyvät kiinnitysten puolesta tärylaitteeseen. Haittapuolena tässä on se, että massakeskipiste ei ole pääakselin keskellä kaikilla tuotteilla. Toisaalta on järkevää ja taloudellisempaa suunnitella yksi toimiva versio, josta voidaan siirtää toimivat ratkaisut muille tuoteversioille.

### 3.1 Mekaniikan hahmotelma

Mekaniikan suunnittelu aloitettiin hahmottelemalla toimintaperiaatetta yksinkertaisesti paperille (kuva 5). Hahmottelun jälkeen suunnittelua jatkettiin Solidworks-ohjelmistolla.

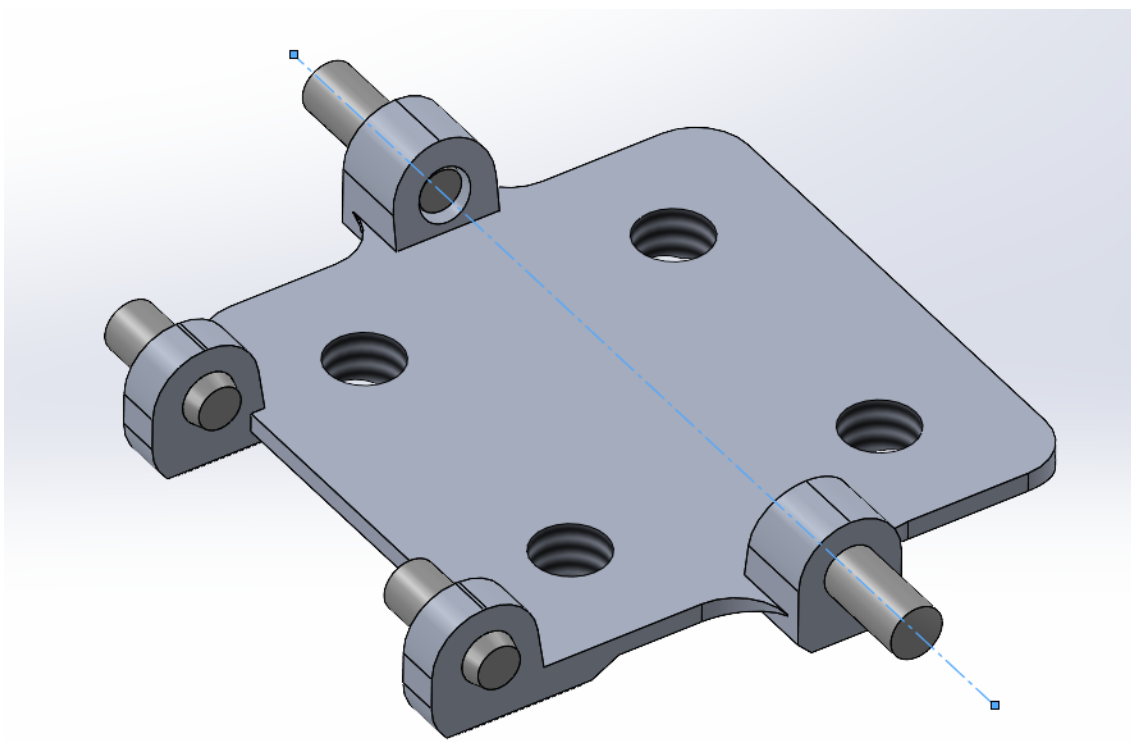


Kuva 5. Yksinkertainen periaatekuva mekaniikasta.

Hahmotelman perusteella tarvitaan pääakselin lisäksi kaksi niveltä lineaariliikkeen muuttamiseksi kulmamuotoon. Pääakseli on toteutettava kahdesta osasta, jotta massakeskipiste saadaan sovitettua keskelle pääakselia. Tärin hyötykuorman ollessa vain 10 grammaa mekaniikan massan tuli olla riittävän pieni, jotta tärinlaite kykenee liikuttamaan mekaniikkaa [2, s. 3]. Massaan pystytiin vaikuttamaan materiaalivalinnoilla sekä mekaniikan rakenteella.

### 3.2 Jigi

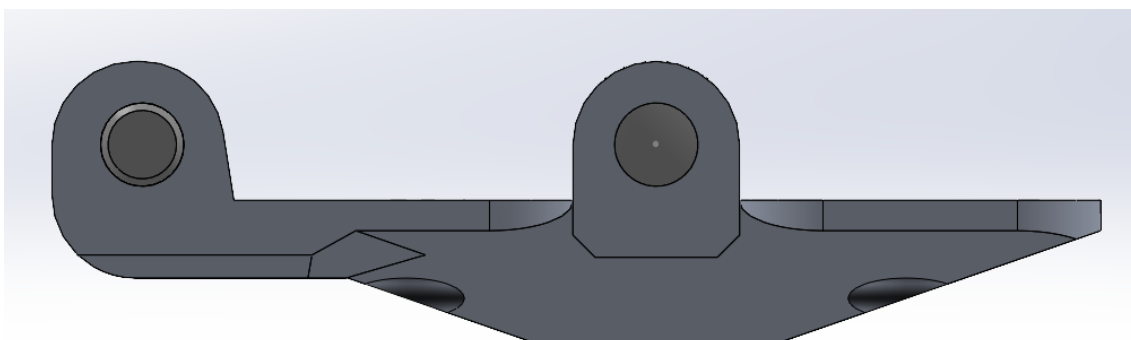
Puhuttaessa jigistä voidaan ajatella se eräänlaisena aputyökaluna tai -telineenä, johon mitattava tuote pystytään kiinnittämään. Mitattava tuote kiinnitetään jigiiin (kuva 6) neljällä DIN 912 -standardin M3 x 4 -kuusiokoloruuvilla. Ruuvi kiinnitys oli luonnollinen valinta, koska tuotteet ovat kiinni piirilevyissä, joissa kiinnityspaikat ruuveille ovat valmiina.



Kuva 6. Ensimmäinen versio jigistä. Sininen katkoviiva kuvastaa pääakselia, jonka suhteen tuotteita tärytetään.

Materiaaliksi valittiin EN AW-7075 -alumiinilaatu, jolla on korkea lujuus ja hyvät mekaaniset arvot [8]. Jigin massa EN AW-7075 -alumiinilla oli 9,38 grammaa sisältäen teräksiset akselit, mikä on hyvin lähellä hyötykuorman maksimiarvoa. Tästä ei kuitenkaan koitunut ongelmaa, koska jigin ja mekaniikan massa ei kohdistu pelkästään armaturen päälle, vaan massa jakautuu myös mekaniikan runkoon. Muita mahdollisia materiaalivaihtoehtoja olivat titaani sekä hiilikuitu, mutta valmistuskustannukset olisivat olleet yli kaksinkertaiset alumiiniin nähden.

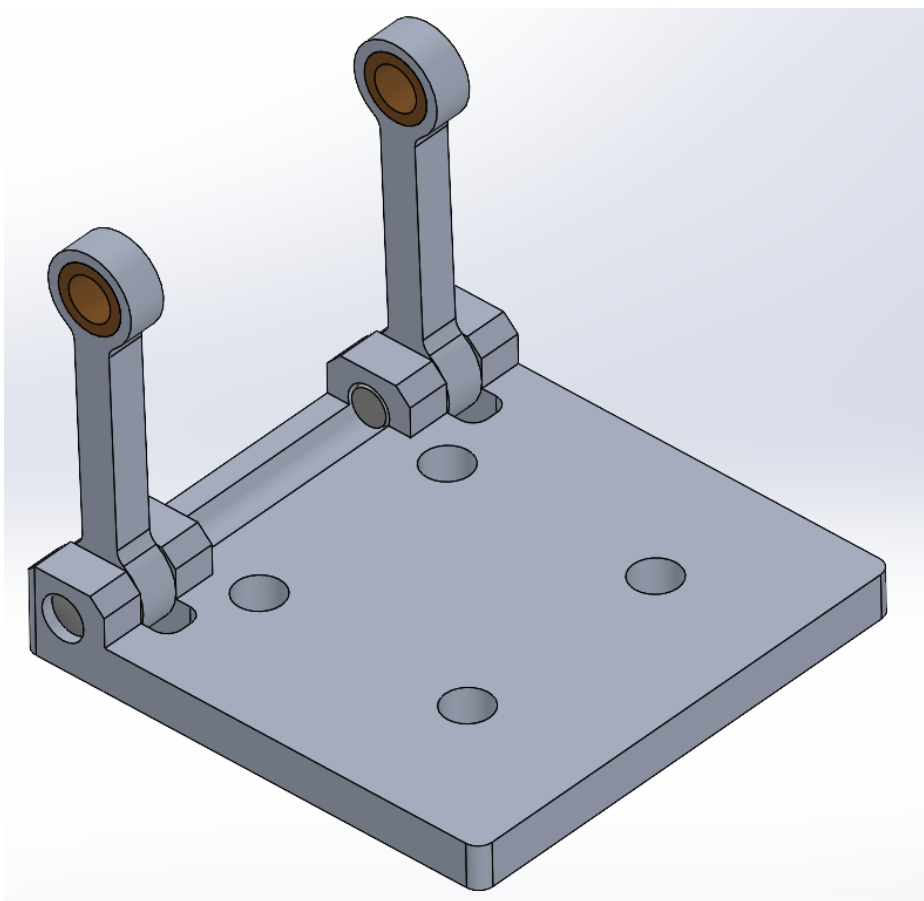
Jigin massa pyrittiin suunnittelussa pitämään mahdollisimman lähellä pääakselia, jotta hitausmomentti ei kasvaisi liian suureksi tärylaitteelle. Hitausmomentti pyrkii vastustamaan kappaleen pyörimisliikettä. Sivukuvannosta (kuva 7) nähdään materiaalivahvuuden ero keskellä ja jigin reuna-alueilla. Mitä lähempänä pyörimisakselia saman massaisen kappaleen massa keskimäärin on, sitä vähemmän voimaa tarvitaan kappaleen pyörittämiseen [9].



Kuva 7. Sivukuvanto jigistä. Materiaalivahvuus on reunoilla pienempi kuin keskellä.

### 3.3 Voimansiirron osat

Voimansiirto koostui kiinnityslevystä ja kahdesta erillisestä voimansiirtotangosta (kuva 8), jotka valmistettiin samasta alumiinilaadusta EN AW-7075 jigi-osan kanssa. Tangot liikkuvat vapaasti akseleiden ympäri, mutta asennus on kiinteä eli kasaamiseen ja purkamiseen tarvitaan puristin tai muu työkalu. Jigi liitetään voimansiirtoon yksikertaisesti liu'uttamalla jigin akselit voimansiirtotankojen läpi. Kiinnityslevy kiinnitetään DIN 912 M3 x 8 -ruuveilla armatureen.



Kuva 8. Voimansiirtokokoonpano. Voimansiirtotangot asennettuna pohjalevyyn.

Tankoihin istutettiin pronssiset liukulaakerit, joiden sovite suhteessa akseleihin toteutettiin työntösovitteella F7 / m6. Pohjalevyn ja akseleiden välinen liitos toteutettiin pakotussoviteella H7 / m6. Pakotussovite vaatii käytännössä puristimen osien liikuttamiseksi. Erityyppisiä sovitteita on useita käyttökohteesta ja tarpeesta riippuen. Näistä muutamia yleisesti käytettyjä on esitetty taulukossa 1.

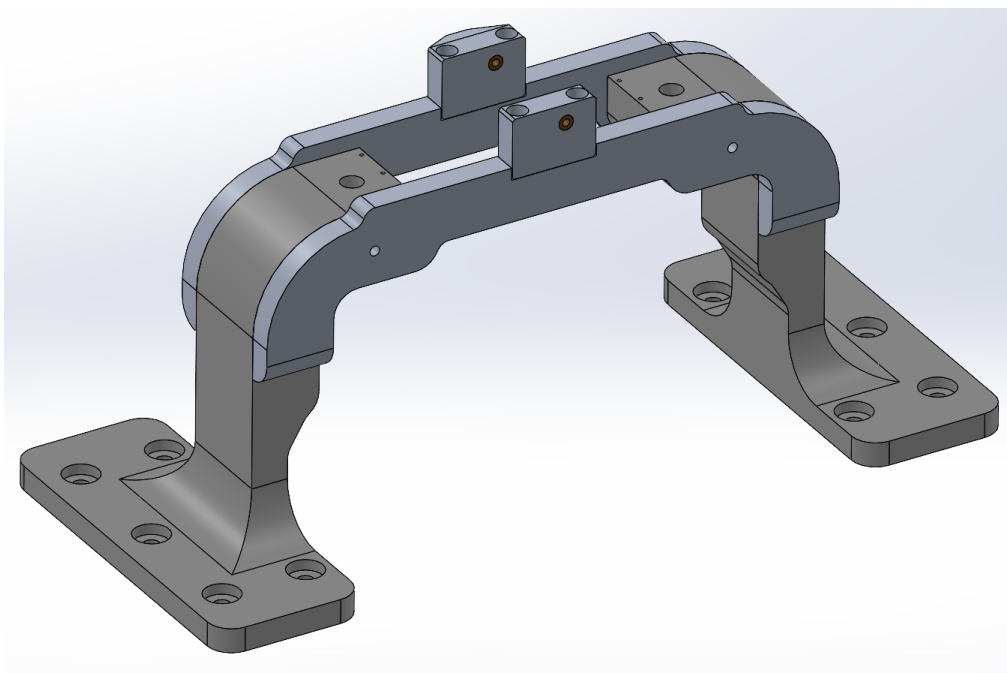
Taulukko 1. Reikä- ja akselisovitteiden käyttökohteita [10, kpl 20, s. 31].

Reikäkanta (SFS 2231)				Käyttökohteita	Akselikanta (SFS2232)				
H7	H8	H9	H11		h6	h7	h8	h9	h11
s6	u7			<b>Luja ahdistussovite.</b> Liittäminen kutistamalla tai paineöljyllä. Vääntömomentin siirtoon ilman kiilaa. <b>Ahdistussovite.</b> Liittäminen puristamalla tai kutistamalla. Siirtää pienehkön vääntömomentin. <b>Helppo ahdistussovite.</b> Kestää pienen vääntömomentin. Laakeriolkki pesäsään, hihnapyörä ja vinohampainen hammaspyörä kiilaliitoksella akselillaan.	P7 P8	P7 P8			
m6				<b>Pakotussovite.</b> Koottava yleensä puristimella. Vaatii kiilavarmistuksen vääntömomenttia siirrettäessä. <b>Helppo pakotussovite.</b> Koottavissa vasaroimalla. Pysyvästi asennetut ketjupyörät ja suorahampaaiset hammaspyörät akselillaan. <b>Tartuntasovite.</b> Liikutettavissa käsin tai kevyesti vasaroimalla. Purettavat hammas- ja käsipyörät akselilla.	M7				
k6					K7				
js6					JS7	JS8	JS8	JS8	
h6	h7/h8	h8	h11	<b>Työntösovite.</b> Liikutettavissa käsin. Pinolit, välirenkaat ja -holkit, sokalla varmistetut navat. <b>Liukusovite.</b> Hitaasti liikkuvat liukulaakerit, männät sylinterissä, aksiaalisesti siirrettävät pyörät. <b>Suurivälyksinen.</b> Karkeat liukulaakeroinnit, suuret lämpötilaerot laakereissa.	H7	H8	H8	H9	H11
	f8	f8				F8	F8	F8	
		d10	d10				D10	D10	

### 3.4 Runko-osa

Runko koostuu tukijaloista, jotka on kiinnitetty DIN 912 M8 x 50 -kuusiokoloruuveilla kivipöytään, sekä runkoraudoista ja niiden päälle tulevista tukipaloista (kuva 9). Molempiin tukipaloihin samankeskeisesti istutetut liukulaakerit muodostavat runko-osan pääakselin. Riittävän tukevuuden saavuttamiseksi rungon massa on lähes 50-kertainen muuhun mekaniikkaan verrattuna. Täryn generoima liike ja voima eivät välity runkoon asti. Tämä tutkittiin ja todettiin myös laservibrometrin avulla mittaamalla.





Kuva 9. Mekaniikan runko-osa.

### 3.5 Kokoonpano- ja valmistuskuvat

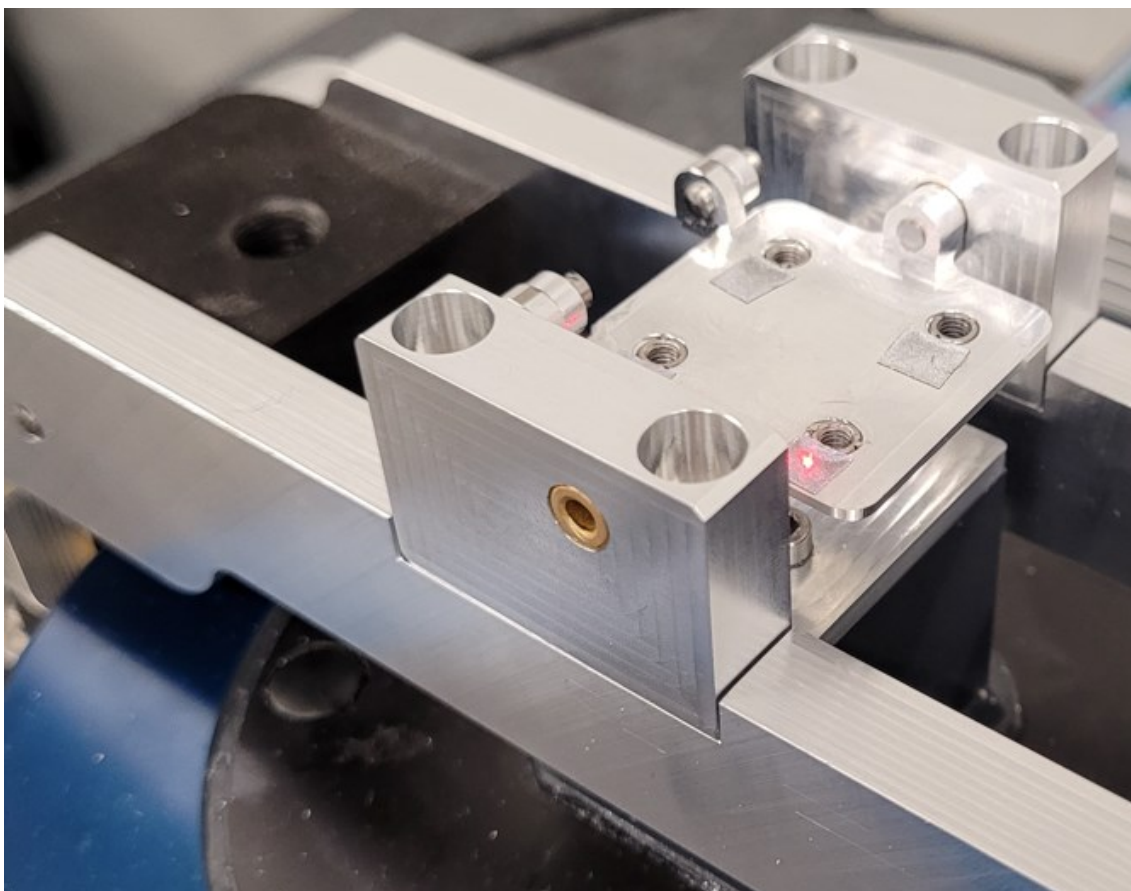
Kokoonpano mallinnettiin Solidworksilla ja todettiin mekaniikan osalta toimivaksi kevyellä liikeanalyysillä. Osista luotiin valmistus- ja kokoonpanokuvat. Yleistoleranssiksi määriteltiin ISO 2768-m ja reikien toleranssit määriteltiin tapauskohtaisesti. Ennen tilausta keskusteltiin myös toimittajan kanssa yksityiskohdista ja varmistettiin, että osissa ei ollut valmistusteknisiä rajoitteita.

## 4 Mekaniikan esitestaus

### 4.1 Ensimmäinen versio

Ennen ensimmäistä testausta ja laitteiston kokoamista osien keskinäiset sovitukset tarkastettiin ja osille tehtiin visuaalinen tarkastus. Ajan säästämiseksi järjestelmän ensimmäiselle versiolle tehtiin esitestaus ennen varsinaisia kyvykkyysmittauksia. Esitestauksen tarkoituksena oli nopeasti kartoittaa mekaniikan toimintaa, seurata profiilin aikana täryn käyttäytymistä ja tarkastella, että ohjelma ajaa profiilin loppuun ilman, että raja-arvot keskeyttävät ajon. Profiililla

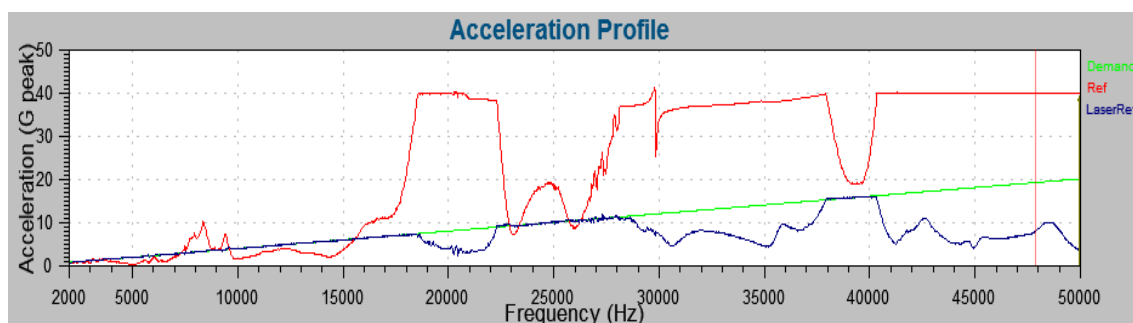
tarkoitetaan normaalin käyttötilanteen testausajoa käsittäen ennalta määritetyt parametrit. Testaus suoritettiin tyhjälle jigille (kuva 10) eli ilman testattavaa tuotetta.



Kuva 10. Mekaniikan ensimmäinen versio kasattuna.

Esitestauksen tuloksena todettiin, että järjestelmä ei toimi halutulla tavalla. Mekaniikka purettiin ja kasattiin uudestaan muutamia kertoja, mutta merkittäviä muutoksia tuloksissa ei havaittu. Tämä oli hyvä tieto toistettavuuden kannalta. Toisaalta nyt oli selvitettävä, mistä järjestelmän toimimattomuus johtui? Profiili saatiin ajettua kokonaisuudessaan läpi ilman keskeytystä tai virhetilanteita. Keskeytys voi aiheutua, jos liike mitattavalla pinnalla vaimenee niin merkittävästi, että laservibrometri ei havaitse liikettä. Kuvan 11 kiihtyvyysofiilista voidaan nähdä, että LaserRef eli laservibrometrin mittaama signaali jigin pinnalta ei pysty seuramaan asetusarvoa Demand. Liike ei kuitenkaan vaimene kokonaan

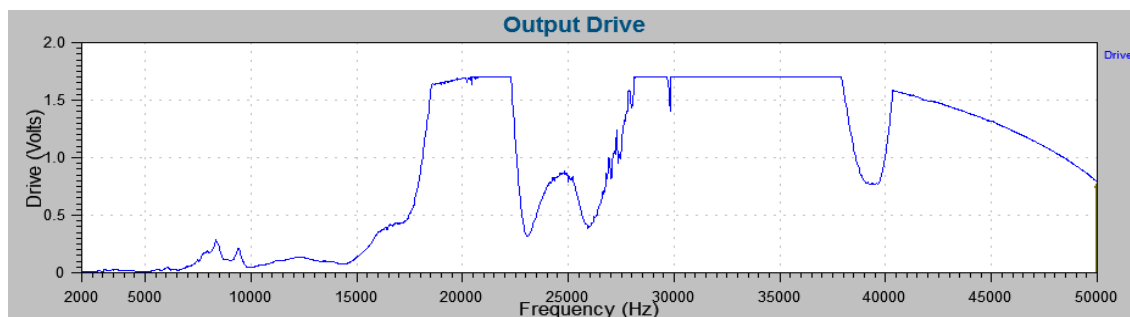
ja profiili ajetaan läpi keskeytyksettä. Kuvassa 11 Ref kuvaa armaturen havaitseman kiihtyvyyden.



Kuva 11. Esitestauksen kiihtyvyysoprofiili.

Vaimentumiseen voidaan nähdä kaksi erillistä syytä, jotka liittyvät raja-arvoihin. Ensimmäinen niistä on tärylaitteen kiihtyvyysoja ja toinen ohjausjännitteen raja. Mikäli toinen tai molemmat raja-arvot saavutetaan, alkaa järjestelmä rajoittamaan tehonsyöttöä tärylaitteelle. Kiihtyvyydestä puhutaan usein myös G-arvona. Yksi G vastaa maan vetovoimaa eli  $9,81 \text{ m/s}^2$ . Kiihtyvyyden raja-arvo on 40 G ja ohjaavan jännitteen raja-arvo 1,7 V, näillä suojataan laitetta ylikuormitukselta ja rikkoontumiselta. Voidaan ajatella, että armaturen kiihtyvyyden ollessa 40 G tärylaitteen maksimikapasiteetti on käytössä.

Tarkemmin tarkasteltuna kiihtyvyysoprofiilista huomataan, että vaimentumista tapahtuu taajuualueilla 18–22 kHz, 28–38 kHz ja 40–50 kHz. Välillä 28–38 kHz:n ohjausjännite (kuva 12) on maksimiarvossaan rajoittaen armaturen liikettä, vaikka maksimikiihtyvyyttä ei saavuteta. Muissa vaimenemiskohdissa armaturen maksimikiihtyvyys saavutetaan matalammalla ohjausjännitteellä, eikä näin ollen ohjausjännitettä voida kasvattaa.

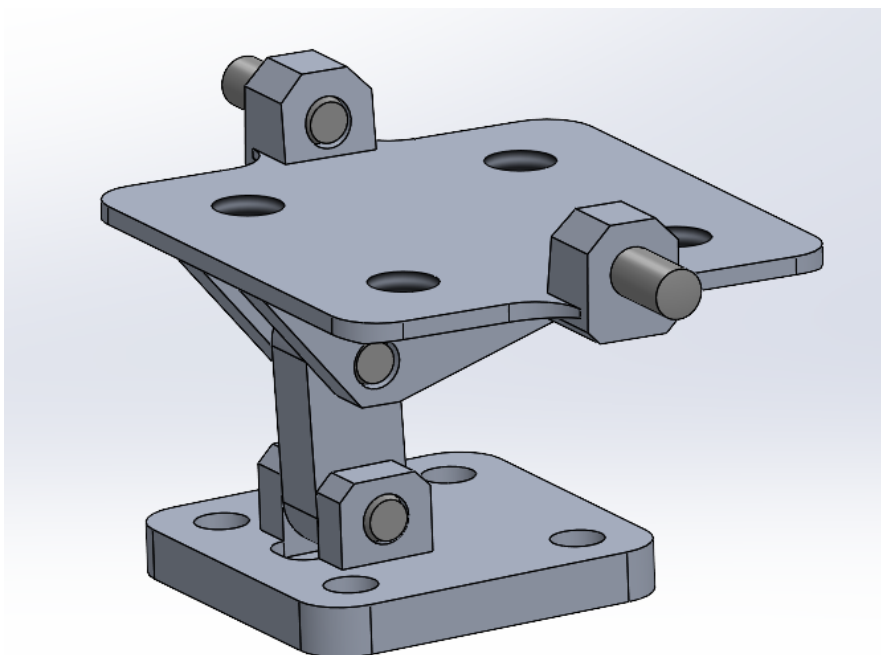


Kuva 12. Esitestauksen ohjauksen ulostuloprofiili, ulostulo ohjaa tärylaitetta.

## 4.2 Paranneltu mekaniikka

Esitestauksen havaintojen perusteella tultiin päätelmään, että voimansiirron tangot ovat liian kaukana pääakselista. Korkeilla, yli 40 kHz:n taajuuksilla liike-matka pienenee hyvin pieneksi, koska kiihtyvyys kasvaa nopeuden ollessa vakio. Näin ollen armaturen liike ei riitä generoimaan riittävää kulmaliikettä.

Mekaniikan toisessa versiossa (kuva 13) voimansiirtotangot siirrettiin lähemmäksi pääakselia, jolloin vastaavalla lineaariliikkeellä saadaan aikaan suurempi kulmaliike. Voimansiirto toteutettiin vain yhdellä tangolla kahden sijaan, jotta välttyttiin mahdolliselta eriaikaisuudelta. Rakenteesta saatiin myös symmetrisempi kokonaisuus.



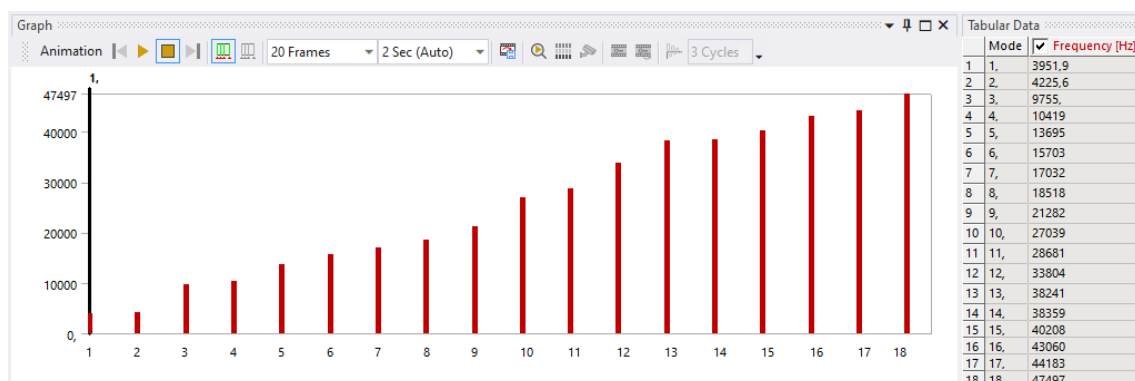
Kuva 13. Kokoonpano, jossa voimansiirtomekaniikan paranneltu versio sekä jigi.

#### 4.3 Simulointi

Toiselle versiolle mekaniikasta tehtiin moodianalyysi. Moodianalyysiä käytetään yleisesti koneiden tai laitteiden suunnittelussa. Esimerkiksi koneessa oleva moottori aiheuttaa käydessään mekaanista värinää jollakin tietyllä taajuudella. Mikäli koneen rakenteen ominaistaajuus on sama tai hyvin lähellä moottorin tuottamaa taajuutta, alkaa rakenne resonoimaan, ja tämän seurauksena laite voi jopa rikkoutua. Moodianalyysin tulosten perusteella rakennetta voidaan muokata, jotta ominaistaajuudet eivät ole moottorin tuottaman taajuuden alueella. Ominaistaajuuksilla on yksilöllinen muoto eli moodi. Samassa systeemissä ei voi siis esiintyä samaa moodia kahta kertaa. [11, s. 5–23.]

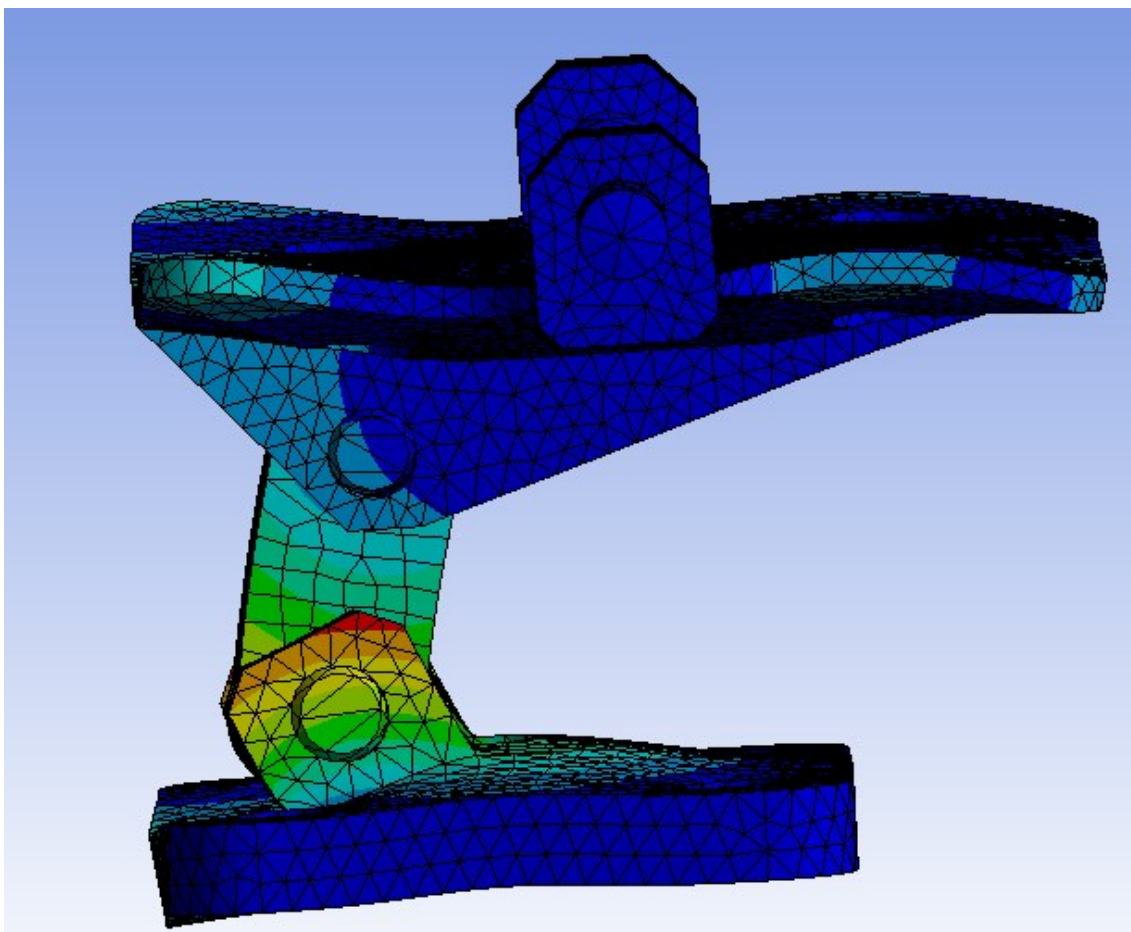
Moodianalyysin tekemiseen käytettiin Ansys-simulointiohjelmistoa. Simuloinnilla ja analyysin tuloksena pyrittiin selvittämään ominaistaajuudet, mutta erityisesti moodit eli muodot olivat tarkastelun kohteena. Moodien avulla pystyttiin

arvioimaan haittaa aiheuttavat ominaistajuuudet. Kuvan 14 grafiikasta nähdään tärylaitteen taajuusalueella 2–50 kHz ilmaantuneet 18 moodia ja niiden taajuudet.



Kuva 14. Moodianalyysin tuloksena saatujen moodien taajuudet.

Suuri osa moodeista oli muodoltaan erittäin haastavia, eikä varmoja päättelyitä niistä voitu tehdä. Kuitenkin moodit 2–4 taajuuksilla 10–15 kHz sekä moodit 14 ja 15 kohdalla 38–40 kHz antoivat viitteitä siitä, että toiminnallisia haasteita on odotettavissa. Kuvasta 15 voidaan päätellä, että tangon alakiinnityksessä tapahtuu vääntymistä, jolloin liike ei välity jigin pinnalle halutulla tavalla.



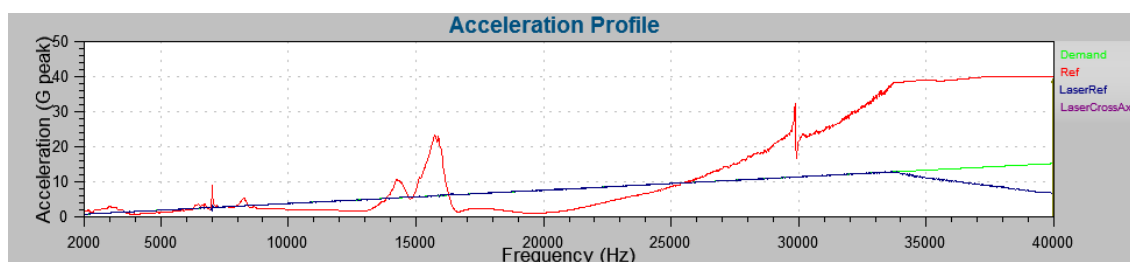
Kuva 15. Moodianalyysin antama muoto taajuudella 40200 Hz.

Täydellistä simulointimallia, joka vastaisi todellista fyysistä tilannetta, on lähes mahdoton tehdä. Moodianalyysin perusteella rakenteeseen ei tehty muutoksia, mutta se antoi viitteitä mahdollisista ongelmallisista taajuuksista. Varsinaisia mittaustuloksia tullaan vertaamaan keskenään simulointitulosten kanssa ja niistä tehtyjen johtopäätösten perusteella pyritään arvioimaan simuloinnin luotettavuutta ja tehokkuutta myös tulevia projekteja varten.

## 5 Lopputestaus

Mekaniikan toiselle versiolle tehtiin vastaavat esitestaukset, jotka tehtiin ensimmäiselle versiolle. Vertaillen nähtiin nopeasti rakenteeseen tehtyjen muutosten vaikutus. Kuvasta 16 nähdään, että taajuusalueella 18–22 kHz aikaisemmin ollut vaimentuma ei poistunut kokonaan, mutta pieneni ja siirtyi 14–16 kHz:n

alueelle. Vaimentuma näkyy armaturen kiihtyvyydessä (Ref), mutta täry pystyy kompensoimaan vaimentuman, jolloin LaserRef pysyy asetusarvossa. Järjestelmä joutuu siis kasvattamaan täryn tehoa.



Kuva 16. Toisen version esitestauksen kiihtyvyysofiili tyhjällä jigillä.

Kaiken kaikkiaan toisen version käyttäytyminen esitestauksen perusteella oli stabiilimpi verrattuna ensimmäiseen. Kuitenkin myös toisessa versiossa on haasteita korkeilla taajuuksilla, mutta varsinaiset testaukset päätettiin tehdä kokonaisuudessaan ilman, että mekaniikkaan tehdään muutoksia. Tästä syystä taajuusalueen ylärajaa laskettiin 40 kHz:iin.

## 5.1 Testaussuunnitelma

Testaussuunnitelma perustui aikaisempien tärylaitteiden suunnitelmiin. Koska täysin vastaavaa laitetta ei ole olemassa, osa kriteereistä sovittiin yhteisen näkemyksen mukaan. Pääkriteerit muodostuivat seuraavanlaisiksi:

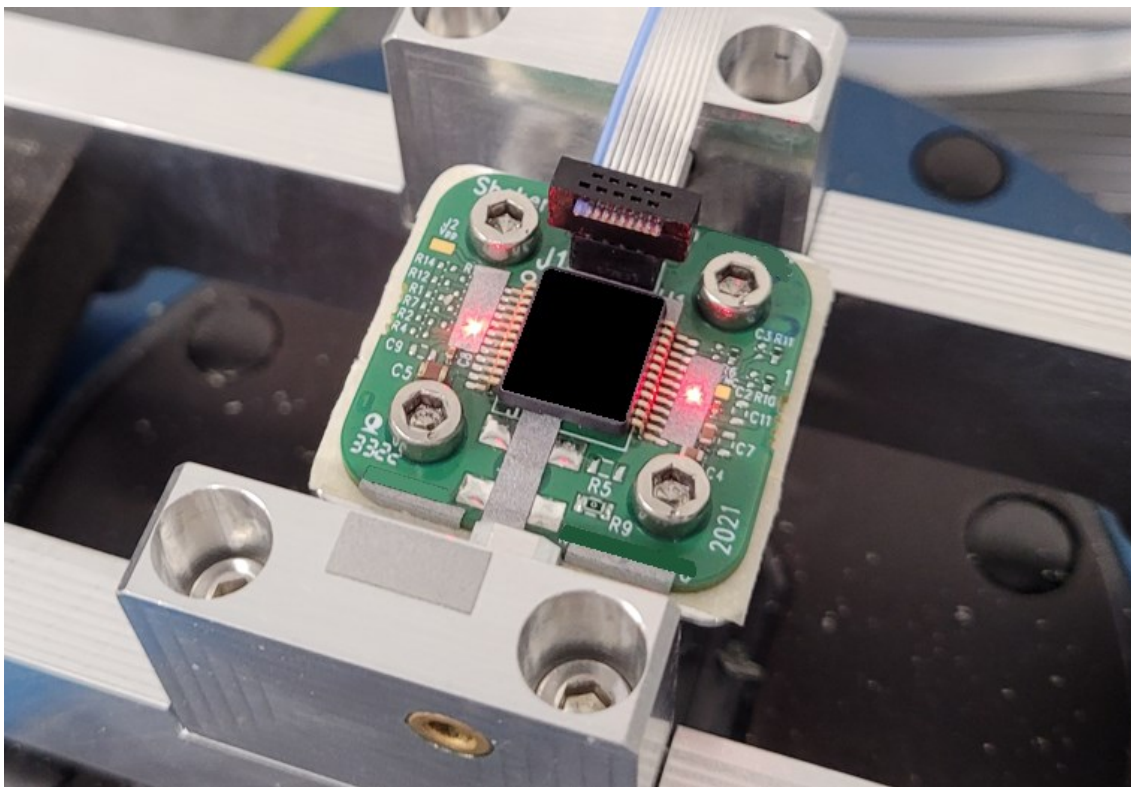
- stabiilisuus  $\pm 10\%$  2 dps:n asetusarvosta
- cross axis -poikittaisliikkeen suhde herätteeseen eli haluttuun liikesuuntaan
- toistettavuuden keskihajonta  $< 0,1$  dps.

Testausta varten laadittiin yrityksen sisäinen Measurement System Analysis -dokumentti (MSA). MSA sisältää suunnitelman sekä testauksen tulokset, ja se tulee hyväksyttäväksi valtuutetuilla henkilöillä ennen laitteen käyttöönottoa.



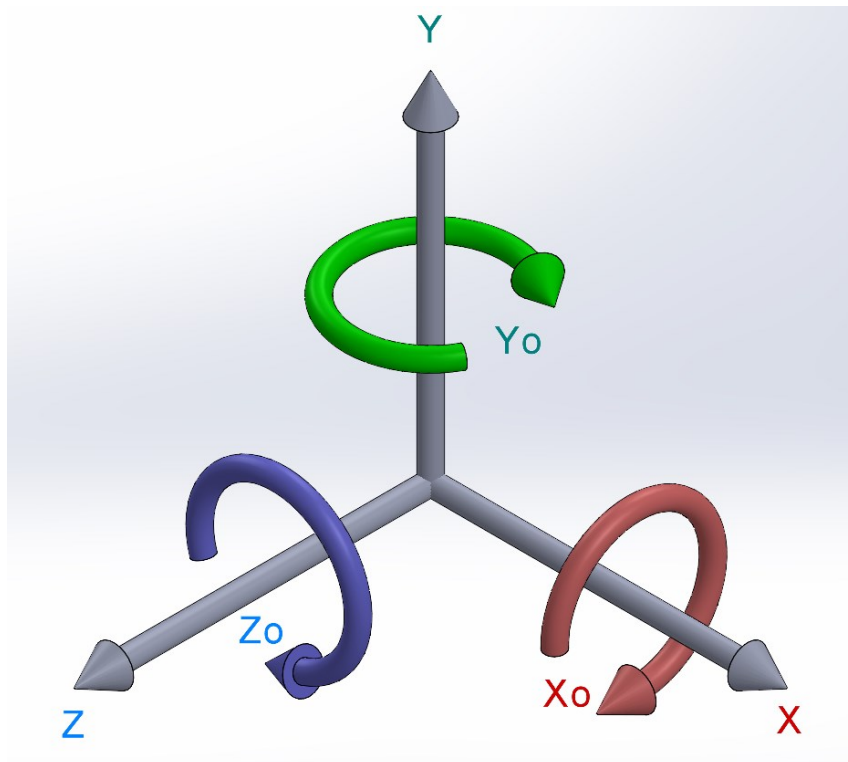
## 5.2 Testaus

Testaus suoritettiin tilanteessa, jossa laitetta tullaan käyttämään normaalisti (kuva 17). Jigiin asennettiin piirilevy, jossa on juotettuna testattava komponentti. Piirilevylle kiinnitettiin heijastinteipit laservibrometriä varten ja testauselektroniikan kaapeli kytkettiin, jotta pystyttiin toteamaan myös testauselektroniikan ja komponentin välinen kommunikaatio.



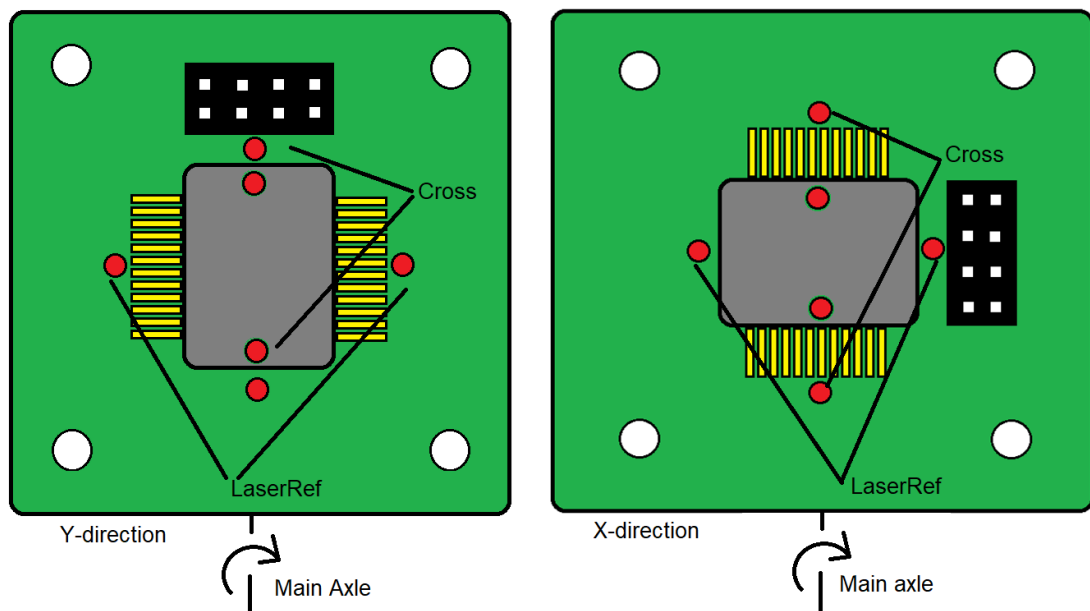
Kuva 17. Järjestelmä valmiina testiajoa ja mittausta varten.

Poikkiakseli eli cross axis -mittauksissa käytimme rinnalla toista laservibrometriä, jotta nähtiin muiden akselien kulmamuotoinen liike. Ihannetilanteessa muut akselit eivät näe mitään liikettä, mutta käytännössä tilanne on toinen. Mittaamalla poikkiakselien liike saadaan tieto siitä, kuinka paljon ne liikkuvat. Tätä tietoa pystytään hyödyntämään tulosten analysoinnissa. Kuvassa 18 on esiteltynä kaikki mahdolliset liikesuunnat. Pääakselin ollessa  $X_0$  tulisi akseleiden  $Y_0$  ja  $Z_0$  pysyä paikoillaan.



Kuva 18. Vapaan kappaleen liikesuunnat.

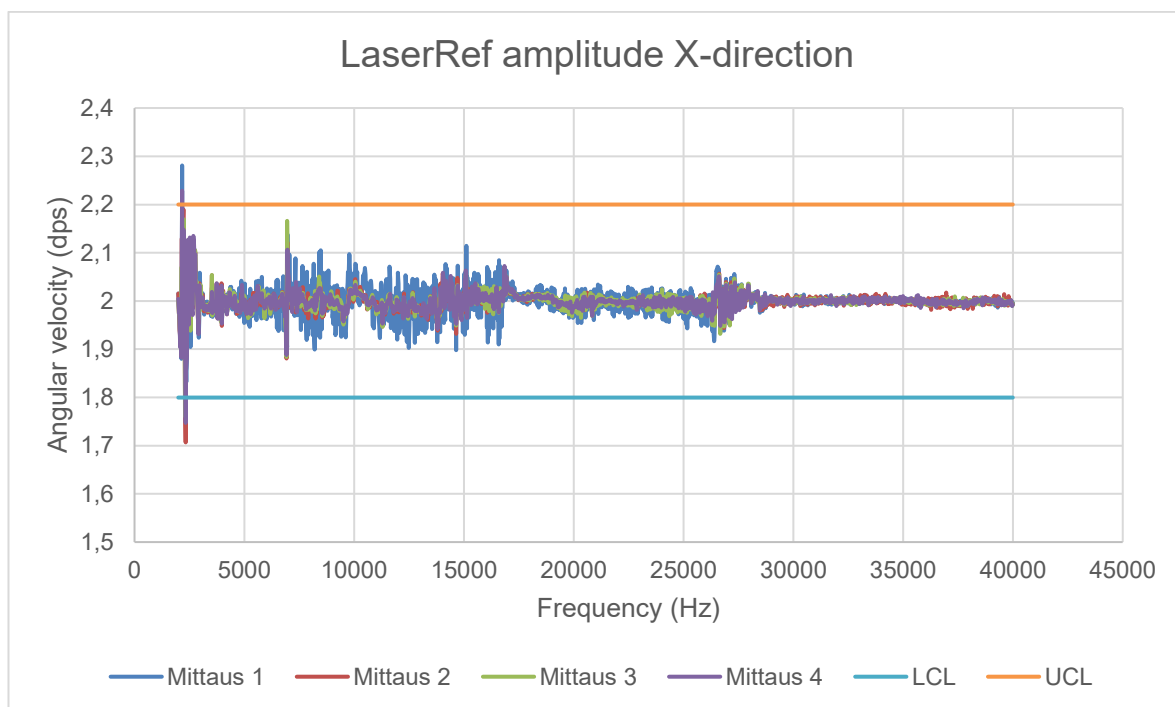
Käytännössä cross axis -mittaukset suoritettiin kohdistamalla rinnakkainen laserservibrometri kuvan 19 mukaisesti sekä piirilevylle että komponentille.



Kuva 19. Cross-pisteet mittaavat poikkiakselin liikettä.

### 5.3 Tulokset

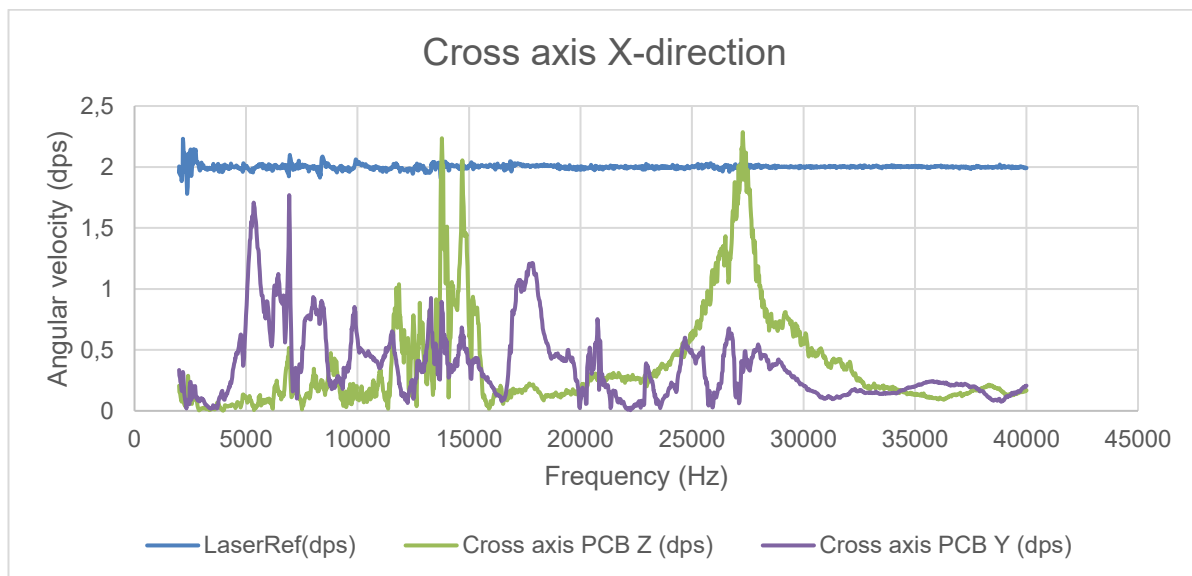
Stabiilisuuden mittarina 2 dps:n asetusarvosta oli  $\pm 10$  %. Kriteerit pääosin täyttyivät, vaikka mittauksen alussa raja-arvot hieman ylittyivät ennen laitteiston stabiiloitumista (kuva 20). Sama ilmiö tapahtuu sekä X- että Y-suunnissa.



Kuva 20. X-suunnan stabiilisuusmittauksen tulokset.

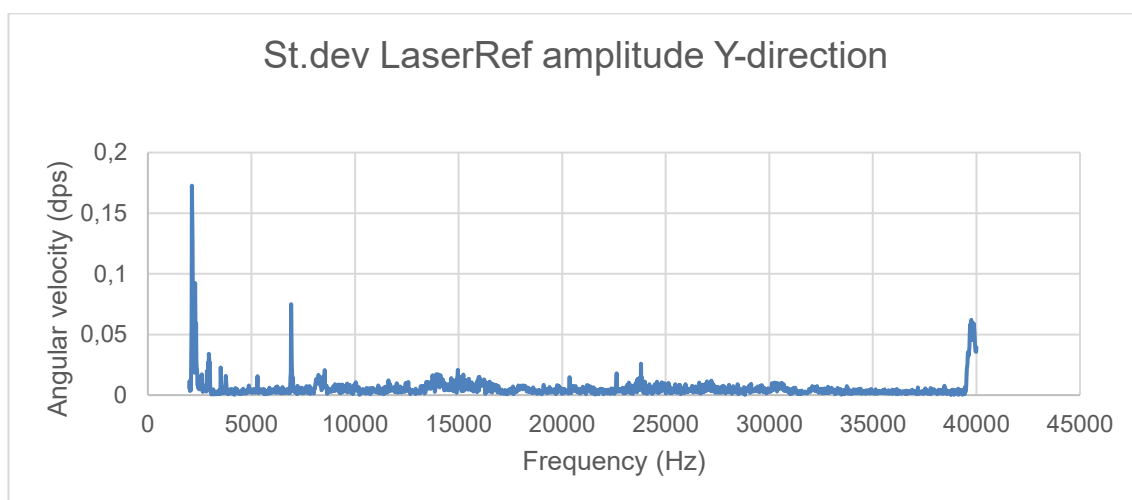
Cross axis -mittauksissa huomattiin, että komponentti näkee tietyillä taajuuksilla merkittävästi isompaa liikettä Yo-suuntaan pääakselin ollessa X (kuva 21). Y-akselin osalta oli nähtävissä vastaavaa käyttäytymistä tuotteen kotelon resonanssitaajuuden kohdalla, mutta liike oli vieläkin voimakkaampi Xo-suunnassa. Kummassakin tapauksessa piirilevyn näkemä muun suuntainen liike oli hyvin maltillinen. Näin ollen voidaan ajatella, että liike tulee komponentin

ominaisuuksista ja järjestelmä itsessään toimii. Tarkat tuotteen resonanssitaajuudet ja amplitudit on jätetty työstä pois.



Kuva 21. X-suunnan cross axis -mittaukset.

Toistettavuudessa pyrittiin tarkkuuteen, jossa keskihajonta on alle 0,1 dps. Mittausaikojen ollessa pitkiä päädyttiin tekemään yhteensä kahdeksan toistomittausta eli neljä per suunta. Mittaukset saatiin näin ajettua läpi kahdessa päivässä. Kuvassa 22 nähdään alun stabiloitumisen epätasaisuus, joka nähtiin myös stabiilisuusmittauksissa. Muilta osin systeemin toistettavuus on hyvä.



Kuva 22. Toistomittausten Y-suunnan keskihajonta.

## 6 Yhteenveto

Työssä suunniteltiin ja rakennettiin kulmatärymekaniikka. Tavoitteena oli saada systeemi toimimaan koko taajuusalueella 2–50 kHz. Johtuen tiukasta aikataulusta ja työn haasteellisuudesta tavoitetta ei kaikilta osin saavutettu, mutta parannus aikaisempaan oli merkittävä. Kulmatäryn jatkokehittämiseen tullaan varmaan tulevaisuudessa aikaa ja resursseja, jotta tavoitteet saadaan täytettyä. Eri materiaaleihin ja valmistusmenetelmiin tullaan kiinnittämään entistä enemmän huomiota ja siihen, miten saadaan pienennettyä hitausmomenttia entisestään. Työ antoi myös näkemystä siitä, millaisia tilanteita kannattaa yrittää simuloida tai onko ylipäänsä mahdollista simuloida siten, että simuloinnin tuloksista on hyötyä suunnittelussa.

Projektin testausvaiheessa järjestelmän kontrolleria päivitettiin kahdella I/O-kanavalla, jotta siihen saatiin kytkettyä kaksi laservibrometriä rinnakkain. Varattu kokonaisbudjetti riitti hyvin sekä kontrollerin päivittämiseen että mekaniikan alihankintaan. Laitteelle laadittiin käyttöohjeet yrityksen sisäiseen järjestelmään ja kulmatäry hyväksyttiin validointilaboratorion käyttöön taajuusalueelle 2–40 kHz.

## Lähteet

- 1 Salminen, Niko. 2022. Johtimien ja akustoinnin merkitys henkilöauton ääntötoistossa. Insinöörityö. Metropolia Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 2 SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden. 2014. SPEKTRA SE-11 Vibration Exciter. Instruction manual.
- 3 SPEKTRA SE-11 tärylaite. Verkkoaineisto. SPEKTRA Schwingungstechnik und Akustik GmbH Dresden. <<https://www.spektra-dresden.com/en/product/details/device-testing/erreger-und-stimuli/schwingung/se-11.html>>. Luettu 21.11.2022.
- 4 Piipponen, Kari-Pekka. 2010. Siirrettävä etäisyyshälytin. Insinöörityö. Kaajanin Ammattikorkeakoulu. Theseus-tietokanta.
- 5 Vibration Research Corporation. 2017. VR9500 Vibration Control System. VibrationVIEW Manual.
- 6 Hautala, Mikko & Peltonen, Hannu. 2002. Insinöörin (AMK) FYSIIKKA OSA I. 6. uudistettu painos. Lahti: Lahden Teho-opetus Oy.
- 7 Tran, Toni. Asteet ja radiaanit. Verkkoaineisto. Matematiikkaa omaan tahtiin. <<https://alpha.omaantahtiin.com/pitkamatikka/maa7/asteet-ja-radiaanit>>. Luettu 15.2.2023.
- 8 Seoksen käyttö. Verkkoaineisto. Alumeco Finland Oy Ab. <<https://www.alumeco.fi/asiantuntemus-ja-tekniikka/alumiinin-tiedot/seoksen-kaytto/?s=0>>. Luettu 10.10.2022.
- 9 Jäykän kappaleen mekaniikka. Verkkoaineisto. Opetus-TV. <<https://opetus.tv/yliopisto/fysiikka/mekaniikka/jaykan-kappaleen-mekaniikkaa/>>. Luettu 12.1.2023.
- 10 Pere, Aimo. 2004. Koneenpiirustus 1 & 2. Espoo: Kirpe Oy.
- 11 Heikkinen, Janne. 2009. Moodianalyysin perusteet. Kandidaatintyö. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. LUTPub-tietokanta.