

# Väriinmittauslaitteiston kehitystyö

Raspberry Pi:illä ja 3-akselin kiihtyvyyssanturilla

## Tiivistelmä

Tekijä(t) Mika Nenonen	Julkaisun laji Opinnäytetyö, YAMK Sivumäärä 44	Valmistumisaika 2022
Työn nimi <b>Väriinmittauslaitteiston kehitystyö</b> Raspberry Pi:llä ja 3-akselin kiihtyvyyssanturilla MPU6050		
Insinööri (ylempi AMK), IoT:stä tekoälyyn		
Toimeksiantajaorganisaatio (jos opinnäytetyöllä on toimeksiantaja) Hioma-Productions Oy		
Tiivistelmä <p>Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli rakentaa ja kehittää väriinmittauslaitteisto IoT:tä hyväksikäyttäen asiakkaan tuotteiden laadunvalvontaan. Yritykselle rakennettiin laitteisto, jossa käytettiin kiihtyvyyssanturia väriinmittaukseen. Laitteistosta saatu data tallennettiin IoT-Pipelineä käyttäen asiakkaan tietokantaan jatkotoimenpiteitä tai myöhempää analysointia varten. Laitteisto havaitsee hylkytuotteet ja antaa informaation niiden kelpaamattomuudesta myyntiin.</p> <p>Järjestelmä tarjoaa informaatiota tuotantoprosessissa esiintyvistä ongelmista ja tuotantolaitteiston kulumisesta sekä tarjoaa kattavan jälkitarkistusmahdollisuuden tuotantoerien vertailuun.</p> <p>Johtopäätöksenä on, että opinnäytetyössä rakennetulla laitteistolla voidaan löytää ja erotella myyntiin kelpaamattomat tuotteet.</p> <p>Laitteisto on sovellettavissa pienin muutoksin erilaisiin käyttökohteisiin.</p>		
Asiasanat Väriinmittaus, MPU-6050, RaspberryPi, IoT		

## Abstract

Author(s) Mika Nenonen	Type of Publication Thesis, UAS	Published 2022
	Number of Pages 44	
Title of Publication <b>Vibration sensor</b> Vibration sensor with Raspberry Pi and MPU-6050		
Degree, Field of Study Master of Engineering, From IoT to AI		
Organisation of the client (if the thesis work is commissioned by another party) Hioma-Productions Oy		
Abstract <p>The purpose of this thesis was to build and develop vibration measurement equipment using IoT for quality control of the customer's products. For the company was build a device that uses an acceleration sensor for vibration measurement. The data obtained from the equipment was stored using IoT-Pipeline in the customer's database for further measures or later analysis. The equipment detects scrap products and provides information if they are usable for sale.</p> <p>In addition, the system provides information about problems occurring in the production process, about the wear of the production equipment and offers a comprehensive post-check option for comparing production batches.</p> <p>The equipment can be applied to various applications with minor changes.</p>		
Keywords Vibration sensor, MPU-6050, Raspberry Pi, IoT		

## Sisällys

Johdanto.....	2
1.1 Tausta ja lähtökohdat .....	2
1.2 Työn tavoitteet ja rajaus.....	2
1.3 Tutkimuskysymykset ja tutkimusmenetelmät .....	3
2 Tuotantoprosessin mittauslaitteisto .....	4
3 Värähtelymittaustekniikan teoriaa .....	5
4 Mittauslaitteiston rakentaminen.....	9
4.1 Lyhyt kuvaus laitteiston toiminnasta.....	9
4.2 Lähtötilanne .....	10
4.2.1 Mekaniikka .....	10
4.2.2 Pneumatiikka.....	10
4.2.3 Ohjaus.....	11
4.2.4 IoT ja datan keräys .....	11
4.2.5 Sähkömekaniikka .....	11
4.3 Työkierto IoT:n ja datan keräyksen kannalta.....	11
4.4 Mittauslaitteiston sijoitus .....	11
4.5 Raspberry PI.....	12
4.6 Mittausdata ja sen käsittely.....	12
4.7 Hylkyarvon määrittäminen .....	12
4.7.1 Johtopäätökset testimittauksista .....	14
5 IoT järjestelmän rakenne .....	16
5.1 GY-521 MPU-6050 .....	17
5.2 Kaapeloinnit ja kytkennät.....	18
5.3 Anturikotelo.....	18
5.4 IoT-järjestelmän kustannukset .....	19
6 IoT järjestelmän asennus ja dataPipelinen rakenne .....	21
6.1 Raspberry PI:n asennus .....	22
6.1.1 Käyttöjärjestelmän asennus.....	22
6.1.2 Käyttöjärjestelmän päivitys .....	22
6.2 Mosquitto MQTT broker.....	23
6.2.1 Mosquitto MQTT brokerin asennus.....	23
6.3 InfluxDB tietokantapalvelin.....	23
6.3.1 InfluxDB:n asennus.....	24
6.4 Node-RED ohjelmointityökalu .....	26

6.4.1	Node-Redin asennus .....	26
6.5	Grafana .....	27
6.6	Grafanan asennus .....	27
7	Node-RED ohjelmointi .....	28
7.1	Node-RED Node.....	28
7.2	Python Koodi .....	29
8	Grafana .....	30
8.1	Grafana Dashboardin rakentaminen .....	30
8.2	Testimittaukset .....	30
8.2.1	Laitteisto .....	30
8.2.2	Mittauksien suoritus .....	33
8.3	Mittausdatan analysointi Grafanalla .....	35
9	Yhteenveto ja pohdinta .....	39
9.1	Käyttösovellus mittauslaitteistolle.....	40
	Lähteet .....	43

## Lyhenteet

GPIO	General Purpose Input Output, yleiskäyttöinen tulo ja lähtö liityntä
IoT	Internet of Things, esineiden internet
I2C	Inter-Integrated Circuit, tiedonsiirtoväylä lisälaitteille
Node-RED	Graafinen ohjelmointiympäristö
NOOBS	New Out Of Box, Raspberry Pin käyttöjärjestelmän asennus zip-paketti
ZIP	Pakattu hakemisto tai asennuspaketti
PLC	A Programmable Logic Controller, ohjelmitava logiikka
InfluxDB	Aikasarjatietokanta varten optimoitu tietokanta
Grafana	Avoimen lähdekoodin ohjelmistö analysointia ja seuranta varten.

## Johdanto

### 1.1 Tausta ja lähtökohdat

Hioma-Productions Oy on hiomalaikkoja ja hiontarvikkeita maahantuova ja valmistava yritys, joka on perustettu 2020. Suuri osa yrityksen tuotannosta menee kiskohiontaan tarkoitettuihin kuppilaiskoihin. Yritys valmistaa erityyppisiä hiomatarvikkeita pienistä karalaikoista aina isoihin pyöröhiontalaiskoihin.

Opinnäytetyön pääasiallisena tarkoituksena on kerätä IoT-dataa laikkojen valmistuseristä sekä samalla testata ja määritellä hylkyyn menevät laikat. Tämän laitteiston tarkoituksena on automaattisesti poistaa laadullisesti huonot kappaleet. Lisäksi opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja valmistaa kiskohiontalaiskojen puhdistus- ja testauslinjasto.

Kuppilaiskojen valmistusprosessissa hiomamassa ja seläke puristetaan isolla hydraulikäyttöisellä puristimella muotoonsa muotin avulla. Kovassa paineessa hiomamassa, joka sisältää eri karkeuksisia hiomajyviä sekä sideainetta, sintraantuu puristuksessa muotoonsa. Tämän jälkeen laikat poltetaan uunissa, joka kovettaa massan lopulliseen lujuteen.

Kuppilaiskojen uunituksen ja jäähtymisen jälkeen ne puhdistetaan mekaanisesti pinnalla olevasta irtoaineesta. Tämän jälkeen yhdelle sadasta laikasta pitäisi laatuvaatimusten mukaan suorittaa räjäytystesti, joka suoritetaan pyörittämällä laikkaa niin kovilla kierroksilla, että se hajoaa. Vaihtoehtona joka kymmenennelle laikalle suoritetaan ryntäystesti, joka kertoo laikan epätasapainon. (SFS-EN12413:2019, 9-11.)

Opinnäytetyössä rakennettavan koneen on tarkoitus testata jokainen kuppilaisikka ja tallentaa mittaustuloksista saadut tiedot tietokantaan myöhempää tarkastelua varten. Mittaustuloksia voidaan analysoida muotin kulumisen hallintaan, laadunvarmistukseen tai jonkun valmistuserän ongelmien selvitykseen. Tällä laitteistolla saadaan myös kokonaiskuva laikkojen laatuvaihteluista pitkällä aikavälillä.

### 1.2 Työn tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa asiakkaalle tuotantolinjasto ja IoT-mittausdataan perustuva laadunhallintajärjestelmä, jolla saadaan dokumentoitua asiakkaan tuotteiden laatueroita värähtelymittauksen avulla. Samalla määritellään hyväksyttävien tuotteiden laatustandardi vertaamalla niitä ennalta määriteltyihin hylätyihin tuotteisiin. Työ rajattiin vain yksittäisen tuotteen ja sen ominaisuuksien tutkimiseksi

alkuperäisen neljän tuotteen yhtäaikaisen yhtäaikaisen sijaan. Koska tuotantolinjaa ei vielä ollut valmiina, rakennettiin vastaava mittaus-prototyypilaitteisto tuotantolinjaa vastaavaksi yksittäiseksi osaksi. Tätä laitteistoa käyttämällä simuloitiin tuotantolinjaston käyttäytymistä mittaustapahtuman aikana.

### 1.3 Tutkimuskysymykset ja tutkimusmenetelmät

Tässä opinnäytetyössä esitellyn kehittämistyön tutkimuskysymyksiä ovat:

1. Kuinka värähtelymittauksen sekä IoT-laitteiston avulla voidaan löytää epätasapainossa olevat vialliset laikat?
2. Miten ja millaisella fyysisellä konstruktiolla värähtelymittaus on mahdollista toteuttaa?

Tutkimuskysymyksellä 2 on lisäksi alikysymys:

3. Millaisia työvälineitä värähtelymittauksen fyysisen konstruktion rakentamiseen tarvitaan?

Tutkimusmenetelmänä käytettiin konstruktivistista tutkimusotetta. Siinä keskitytään tosielämän ongelmiin, eli pyritään tuottamaan innovatiivinen konstruktio sisältäen kehitetyn konstruktion toteuttamisyritys, jolla testataan käytäntöön soveltuvuutta (Lukka 2001).

Ongelmanratkaisuun rakennettiin mittaus- ja testauslaitteisto, jolla suoritettiin lukuisia mittauksia eri asetuksilla ja asiakkaan eri laatuksilla tuotteilla. Laitteistoa käyttämällä saatiin tietoa siitä, oliko ongelma ratkaistavissa vai ei. Toteutuksen ja testauksen perusteella kehitetyllä laitteistolla voidaan selvästi löytää myyntiin kelpaamattomat tuotteet, ja tarvittaessa poistaa ne tuotannosta.

## 2 Tuotantoprosessin mittauslaitteisto

Mittauslaitteiston avulla saadaan yritykselle kattava kuva tuotantoprosessista ja tuotteiden laadusta. Jokainen tuotannosta tullut tuote tarkistetaan automaattisesti. Data tallennetaan tulevaa jatkoanalysointia varten tietokantaan. Tuotteiden laatupoikkeamat kyetään tutkimaan kyseisestä mittausdatasta pitkänkin ajan kuluttua. Tarvittaessa pitkäänkin varastoidut tuote-erät saadaan analysoituja uudelleen ongelmien ilmetessä. Erityisesti kun tuotteet ovat olleet pitkään varastossa ennen käyttöönottoa, kyseisen tuoteerän mittausdata haetaan esiin ja tutkitaan, selviääkö siitä mikä laatupoikkeaman aiheuttaa.

Tuotteita valmistetaan 50000-100000 kappaletta vuosittain, joten mittauksia tulee merkittäviä määriä. Mittauslaitteistolla saadaan automaattisesti karsittua huonolaatuiset tuotteet. Laitteistolla voidaan puuttua nopeammin tuotantoprosessin häiriöihin kuten massan tasalaatuisuuteen ja muotin täytön ongelmiin.

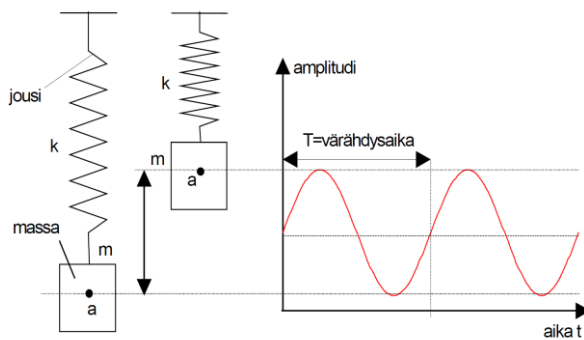
Saatavasta mittausdatasta voidaan ennustaa pitkän aikavälin tuotantolaitteiden huoltamisen tai vaihtamisen tarpeellisuus. Tuotantovälineiden, kuten muottien hankinta helpottuu, kun niiden kulumisen kehittyminen on tiedossa. Raaka-aine ja hioma-ainemassan sekoittumisongelmat saadaan myös selville nopeasti.

### 3 Värähtelymittaustekniikan teoriaa

Kaikissa laitteissa tapahtuu värähtelyä käydessään. Värähtelyä aiheutuu yleensä epätasapainosta, asento- tai valmistusvirheistä sekä vaurioituneista tai muuten kuluneista osista. Yleensä akseli tai roottori on se osa, joka varsinaisesti värähtelee tai aiheuttaa värähtelyä, mutta värähtelyn optimaalisin mittauspaiikka on laitteen rungossa. Värähtely kulkeutuu laitteen runkoon yleensä laakereiden välityksellä, joten paras mittauspaiikka on laakeripesän vieressä tai mahdollisimman lähellä sitä. Käytännön tärinämittauksissa tulosten tulkinta suoritetaan pääasiassa eri taajuusalueilla mitattujen spektrien ja niitä vastaavien tärinän kokonaistasoarvojen perusteella. (ABB Oy.)

Pyörivien laitteiden värähtelystä suurin osa koostuu valmistusepätarkkuuden ja asennusvirheiden lisäksi epäkeskeisyydestä, linjausvirheistä tai mekaanisesta kulumisesta. Muita syitä ovat esimerkiksi voiteluongelma, laakerivaurio tai värinä. (ABB Oy.)

Periaatteessa kaikki värähtelevät laitteet ovat jousi-massasysteemejä, koska mikään konstruktio tai laite ei ole täysin jäykkä. Yksinkertainen esimerkki värähtelevästä systeemistä on jousi- massasysteemi, joka esitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Jousi massasysteemin pisteen a värähtelyn esittäminen aikatasossa (ABB Oy)

Yleisesti tärinä- eli värähtelymittauksiin perustuvia menetelmiä käytetään koneiden vaurioiden ja kunnonvalvonnassa sekä kulumisen ennalta ehkäisemisessä. Tällöin arvioidaan dynaamisia ilmiöitä esimerkiksi epäkeskeisyyttä, tasapainoa, laakeroinnin kuntoa ja voimia, jotka kohdistuvat konstruktion eri komponentteihin. Tärinän mittauksessa käytetään yleisimmin mittareita tai tiedonkeruulaitteita, jolla reaaliaikainen värähtelymittaus-tieto saadaan aikaiseksi. Tiedot tallennetaan tietokantaan. Datan varsinainen analysointi tehdään yleensä tietokoneen avustuksella. Kiihtyvyyksiä ja Tärinää tutkimalla

voidaan havaita mekaaniset välykset, epätasapaino, rakenteen resonanssitaajuudet tai asennusvirheistä johtuva poikkeama. Lisäksi voi esiintyä monia muita virheitä kuten esimerkiksi puutteellinen voitelu tai sen loppuminen. Tärinän analysointiin on olemassa monia erilaisia menetelmiä, joista yleisimpiä nopeuden tehollisarvon RMS mittaaminen (aalto liikkeen neliöllinen keskiarvo eli root mean square sekä erilaiset spektrianalyysit. Näitä kahta voidaan pitää perusmenetelminä, joilla suurin osa vaurioista voidaan löytää. (ABB Oy.)

Periaatteessa kaikki värähtelevät laitteet voidaan kuvata jousi-vaimennin-massa järjestelmän avulla. Kuvauksessa jousille, massoille ja vaimentimille määritetään niin sanotut ekvivalenttiset arvot käyttämällä erilaisia laskentaperiaatteita sekä osien geometriatietoja ja materiaaliarvoja. Yksinkertaisin esimerkki värähtelevästä systeemistä on jousimassajärjestelmä, johon ei vaikuta mitään ulkoisia voimia. Tällaisessa systeemissä massan liike on jaksollista, niin sanottua harmonista liikettä ja systeemiä kutsutaan vapaaksi värähtelysysteemiksi, jos massaansa vaikuttaa jokin ulkoinen voima tai jokin muu suure. (Kunnossapitoyhdistys 2009.)

Värähtelymittaus on eniten käytetty menetelmä kunnonvalvonnassa, ja sitä käytetään myös vianhaussa sekä käytönvalvonnassa. Oikein käytettynä värähtelymittaus on useimmissa tapauksissa paras ennakoivan kunnossapidon mittausmenetelmä, mutta väärin sovellettu resurssien ja ajan tuhlausta. Värähtelymittarit ovat parhaimmillaan nopeiden pyörimisliikkeiden (yli 600 r/min) mittauksessa.

Värähtelymittausmenetelmiä ja mittalaitteita on olemassa lähes rajattomasti, ja ilman aikaisempaa kokemusta on vaikea tietää, mikä mittalaite ja -menetelmä olisi kehitettävien kunnonvalvontatarpeisiin riittävä.

Värähtelymittausmenetelmät voidaan jakaa karkeasti seuraaviin luokkiin:

1. Yksinkertaiset menetelmät koneiden yleistärinän valvontaan ja vierintälaakereiden kunnonvalvontaan.
2. Monimutkaisemmat menetelmät koneiden tärinän tarkempaan valvontaan ja laakereiden kunnonvalvontaan.

Luokkaan 1 kuuluvia mittalaitteita tarvitaan koneiden kunnonvalvontaan yleensä kaksi kappaletta. Toinen mittari mittaa pääasiassa vierintälaakereiden kuntoa, mikä tapahtuu mittaamalla korkeataajuisia värähtelyä, tyypillisesti yli 2 000 Hz taajuudelta. Toista mittaria käytetään koneiden kokonaistärinän havaitsemiseksi taajuusalueelta 10–1000 Hz, joka karkeasti kertoo koneen akselin pyörimiseen liittyvistä ongelmista.

Korkeataajuisen värähtely kasvaa selvästi, kun voitelukalvo katoaa vierintälaakerista tai jokin esimerkiksi kulumisesta johtuva laakerivika pääsee syntymään. Myös erityiset ulträänimittalaitteet kuuluvat tähän luokkaan.

Moniakseliset valvottavat koneet, joiden akselit pyörivät samalla pyörimisnopeudella ovat rakenteeltaan sellaisia, että luokan 1 mittalaitteet yleensä riittävän tarkkoja koneiden kunnonvalvontaan.

Mikäli valvottavissa koneissa on eri nopeuksisia akseleita, ja täten myös voimansiirtolaitteina esimerkiksi hihnakäyttöjä tai hammasvaihteita, on luokan 1 kunnonvalvontalaitteiden käyttö monien vikojen tunnistamiseksi liian epätarkka. Esimerkiksi korkea tärinän kokonaistasoarvo voi olla seurausta suuresta epätasapainosta toisella akselilla, linjausvirheestä, laakeriviasta, välyksestä, joustavasta alustakiinnityksestä, rakenteen värinästä tai pumpun kavitaatiosta. Se voi olla myös luonnollista seurausta koneen tekevästä työstä, kuten vaihteistoissa voiman välityksestä akselilta toiselle ja kompresso-reissa epätasaisesta puristetun ilman poistumisesta. Tällöin kunnonvalvonta suoritetaan usein käyttämällä luokan 2 mittalaitteita, jotka ovat yksi- tai monikanavaisia spektrianalysaattoreita.

Näillä suoritettava tärinän yksityiskohtainen valvonta tarkoittaa sitä, että koneen aiheuttaman värähtelysignaalin eri osataajuudet ja niiden suuruudet erotetaan toisistaan.

Näin yksittäisten koneenosien aiheuttama tärinä pystytään havaitsemaan ja voidaan kohtuullisen luotettavasti seurata eri koneen osien kulumista. Myös erityiset, pitkälle kehitetyt valvontamenetelmät ovat näillä mittalaitteilla mahdollisia: keskiarvostettu aikatasoanalyysi, verhoikäyräanalyysi, vaihekulma-analyysi ja spektrianalyysi.

Riippumatta siitä, minkä tasoista mittalaitteistoa käytetään koneiden kunnonvalvontaan, oleellista on mittaustulosten järkevä käsittely, tallennus ja dokumentointi. Ilman niitä ei vauriokehitystä pystytä havaitsemaan tai ennustamaan luotettavasti. Tämä pätee moneen muuhunkin mittausmenetelmään kuin tärinämittaukseen. (Opetushallitus.)

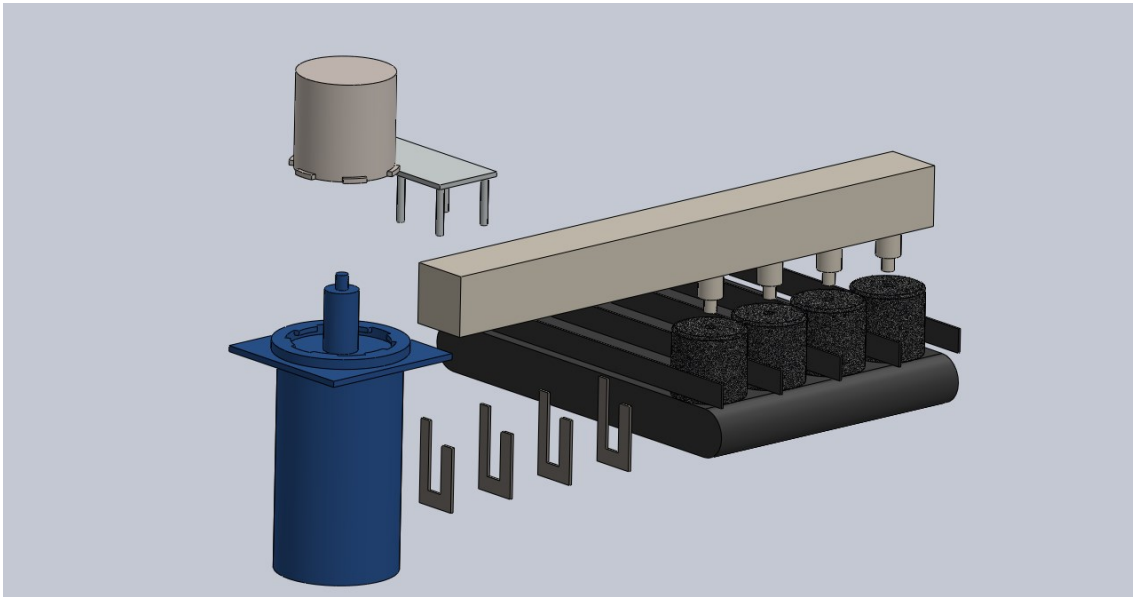
Mittauspisteen valinnassa tulee ottaa huomioon anturin sijoittaminen ja suojaaminen. Anturin tulee olla sijoitettuna sellaiseen paikkaan, että siihen pääsee helposti käsiksi ja vaihtaminen on helppoa ja nopeaa. Mittauspisteen tulee olla mahdollisimman lähellä laitteen jäykkää rakennetta.

Tässä tapauksessa teollisen kunnossapidon lainalaisuudet ovat sovellettavissa suoraan rakennettavaan laadunvalvontajärjestelmään ja sen mittauksiin. Näistä vaihtoehtoista valitaan värähtelymittaus ja siitä saatavat mittaustulokset. Mittauslaitteiston yksinkertaisuuden vuoksi ei ole tarvetta käyttää tässä tapauksessa mitään pitkälle kehittynyttä valvontamenetelmää esimerkiksi spektrianalyysia. (ABB OY.)

## 4 Mittauslaitteiston rakentaminen

Laitteiston toiminnan selvittämiseksi seuraavassa selvitetään koko laitteiston prosessikuvaus piirustuksineen, vaikka opinnäytetyössä käsitellään siitä vain pientä osa-aluetta

### 4.1 Lyhyt kuvaus laitteiston toiminnasta



Kuva 2. Piirustus mittaus ja puhdistusasemasta

Mitattavat kuppilaikat sijoitetaan manuaalisesti kuljetushihnalle 4 kappaleen erissä. Kuljetinhihna vie laikkoja eteenpäin, josta portaalirobotti noukkii ne 4 kappaleen erissä erillisiin tarttajiin. Tarttijat on toteutettu paisuntatuurnalla, joka tarttuu laikkaan sen kiinnitysreiästä, jossa on M22 x 1,5 vasenkätinen kierre.

Pneumaattinen portaalirobotti siirtää laikat sivusuunnassa puhdistusasemaan, jossa laikat puhdistetaan samaan aikaan uretaanihaarukoilla. Puhdistuksen jälkeen laikkojen pyörimisnopeus nostetaan noin 2000 kierrokseen ja jokaisen laikan pyörityskaralla oleva kiihtyvyyssanturi mittaa yksikön värinän eri nopeuksilla.

Tämän jälkeen laikat pysäytetään ja siirretään puhdistettuina ja testattuina takaisin siirtohihnalle. Mittauslaitteistona käytetään koteloitua kiihtyvyyssanturia MPU-6050 jokaisella karalla ja Raspberry PI 4:ää. Data tallennetaan tietokantaan ja sitä analysoidaan tarvittaessa. Komponenttien ja analysointityökalujen valinnat selvitetään kappaleessa 5.

## 4.2 Lähtötilanne

Olemassa olevaa laitteistoa kyseiseen tarkoitukseen ei ole. Koko tuotantolinja ja siihen liittyvät komponentit ja konstruktiot tulee suunnitella ja valmistaa. IoT-järjestelmän testausta ja toimivuuden toteamiseksi valmistetaan testausasema, joka muistuttaa lopullista tuotantolinjastoa.

Tämän prototyypin valmistuksessa aikaa kuluu tuotteiden testaukseen. Mekaaniseen ja sähköisiin ominaisuuksien rakentamiseen ja tutkimiseen. Haasteena on IoT datankeräysjärjestelmä sijaitsee värisevissä ja likaisissa olosuhteissa, joten komponenttien suojaus on ensiarvoisen tärkeää.

Suunnittelua helpottamaan laitteisto jaetaan pienempiin osa-alueisiin: mekaniikka, pneumatiikka, ohjaus, IoT ja datan keräys sekä sähkömekaniikka.

Tärkeimmät osat opinnäytetyön kannalta on karat, jossa värinänmittausanturit ovat kiinni. Yhden karayksikön toiminnan toteamisen jälkeen pitää selvittää, miten samaan aikaan pyörivät karat vaikuttavat toisiinsa ja häiritsevät muiden yksiköiden mittaustulosta. Tämän ongelman takia joudutaan rakentamaan oma testilaitteisto, jotta todennetaan että kyseinen mittaustapahtuma toimii luotettavasti suunnitellussa laitteistossa.

### 4.2.1 Mekaniikka

Mekaniikka toteutetaan pneumaattisesti portaalirobotilla, joka tuo hiomalaikat linjalta mittaus- ja puhdistuspisteeseen. Laikat puhdistetaan irtoaineksestä erillisellä uretaanihäärällä. Tämän jälkeen suoritetaan värinämittaus, jonka jälkeen palautetaan tuotteet liukuhihnalle. Hylkytuotteita todettaessa siirretään ne syrjään logiikan ja pneumaattisen sylinterin avustuksella erilliselle hylky tuotehihnalle.

### 4.2.2 Pneumatiikka

Pneumatiikka toteutetaan Feston vakiokomponenteilla. Sylinterit ja venttiilit sijoitetaan rakennettavaan runkoon. Toteutuksen kannalta ei tarvita suurta mittatarkkuutta, joten kuulamutterit, servomootorit ja muut tarkempaa paikoitusta vaativat anturoinnit eivät tässä tapauksessa ole tarpeellisia. Lisäksi sylinterikäyttöisiä lineaarijohteita käyttämällä saadaan kokonaiskustannukset pysymään järkevinä.

### 4.2.3 Ohjaus

Ohjaus kyseiseen laitteeseen toteutetaan Siemens Logo-logiikalla. Kyseinen logiikka riittää hyvin kaiken IO:n hallitsemiseen. Edullisena ja kompaktina yksikkönä tämäntyyppisen logiikan käyttö puolustaa muutenkin paikkaansa. Logiikassa on vastaava vuokavio-tyyppinen ohjelmistoympäristö kuin Node-Redissä. (Siemens.)

### 4.2.4 IoT ja datan keräys

IoT-laitteistona käytetään Raspberry Pi:tä, johon asennetaan InfluxDB IoT aikasarjadata-tietokanta antureiden datankeräystä varten. Tuloksia analysoidaan Raspberryyntai muualle asennettuun Grafanaan. Lisäarvona asiakas voi käyttää puhelimestai tablettissa käytettävää Grafana vieweriä.

### 4.2.5 Sähkömekaniikka

Karan pyörittämiseen käytettävää sähkömoottoria käytetään erillisellä taajuusmuuntajalla, jota logiikka ohjaa. Tällä tavalla saadaan ohjattua karan pyörimisnopeuksia ja mittaustapahtuman kestoa. Taajuusmuuntaja on yksivaiheinen, jossa on erillinen nopeusvalitsin eri pyörimisnopeuksien säätöä varten. Tuotantoympäristössä ohjelmitava logiikka suorittaa mittauksen käynnistyksen ja mittauksen keston. Vaihtoehtona on, että Raspberry Pi:n Gpio välillä ohjataan taajuusmuuntajaa.

## 4.3 Työkierto IoT:n ja datan keräyksen kannalta

Laikkojen puhdistuksen jälkeen lähdetään suorittamaan mittausta. Laikkoja pyöritetään 1,5 kw sähkömoottorilla, jota säädetään taajuusmuuntajalla. Karoja lähdetään pyörittämään tarkoituksen mukaisella rampilla haluttuun nopeuteen ja mittauksessa saadaan aikasarjadataa kunkin akselin suhteen. Pyörimisnopeus saadaan mittaukseen mukaan joko taajuusmuuntajan ulostulosta tai erillisellä pulssianturilla.

## 4.4 Mittauslaitteiston sijoitus

Kehittämistyön alussa valmista testialustaa ei ollut, joten se oli rakennettava, jotta tarvittavat mittaukset saatiin tehtyä. Oli myös rakennettava demolaitteisto, jolla voitiin todentaa mittauslaitteiston suojaus sekä vaimennus ja kaapelointi. Anturi kiinnitettiin mitattavaan karaan ja tiedonsiirto toteutettiin perinteisesti kaapeloinnilla. Testialustaan ei kehitystyön tässä vaiheessa katsottu järkeväksi liittää langatonta tiedonsiirtoa eikä erillistä

akkua. Testauslaitteisto rakennettiin taajuusmuuntajaohjatusta karamoottorista ja laikan kiinnittimestä alustavia mittauksia varten. Toisin sanoen rakennettiin vaimennettu karamoottori, johon mitattava tuote kiinnitettiin. Karamoottorin runkoon kiinnitettiin MPU6050 anturi. Testauslaitteistoon tehtiin erilliset kiinnitystangot, jolloin anturin paikkaa voitiin siirtää helposti eri kohtiin. Tällä tavalla saatiin selvitettyä mikä on optimaalisin paikka mittauksen kannalta. Karamoottori vaimennettiin erillisillä vaimennustyynyillä, jolloin värinän voimakkuus saatiin säädettyä sopivaksi.

#### 4.5 Raspberry PI

IoT-laitteiston keskusyksikkö sijoitettiin karan/ karamoottorin runkoon suojattuun paikkaan. Tuotantokäytössä tulevaisuudessa anturi kaapelointeineen koteloidaan ja kiinnitetään sopivimpaan kohtaan karan tai moottorin runkoon. Mittausdata siirretään joko langattomasti tai CAT6 suojatulla parikaapelilla yrityksen palvelimelle. Tässä tapauksessa käytettiin langallista yhteyttä. Mittauspaikka on hyvin haastava, joten anturin ja kaapeloinnin suojaus ja kiinnitysten varmistus on hyvin tärkeää.

#### 4.6 Mittausdata ja sen käsittely

Mittausdatan muunnos MPU6050 kiihtyvyyssanturilla Raspberry Pi:hin suoritettiin Python scriptillä ja tallennettiin InfluxDB tietokantaan. Mittausdatan analysointi suoritettiin Grafanalla, josta kunkin mittauksen suorituksesta saadaan värinän maksimiarvot. Grafanasta saadaan myös hälytys, kun kyseisen mittauksen raja-arvo ylittyy määritettyyn hylkyarvoon. (TDK Invensense a.)

#### 4.7 Hylkyarvon määrittäminen

Hylkyarvon määrittämisen kannalta ei ollut tärkeää saada joku tietty numeerinen arvo. Tärkeätä oli saada vertailuarvo, joka saatiin hylätyistä tuotteiden mittauksista. Tätä arvoa verrattiin mitattaviin tuotteisiin. Mittausarvon ylittäessä vertailuarvon varmuuskertoimeen kyseinen tuote hylättiin. Varmuuskerroin tietysti määritellään yhdessä yhdessä yrityksen edustajien kanssa. Testimittauksia tehtäessä mittaustulokset olivat hyvin samankaltaisia eri mittauksien välillä. Samalla tuotteella saatiin identtinen mittaustulos kappaleen ollessa irrotettuna välissä. Tuotantokäyttöä ajatellen tämä on hyvä asia koska kappaleen irrottaminen ei muuta mittaustulosta

Yllätyksenä voi pitää karan kierrosnopeuksien vaikutusta mittausdataan. Visuaalisesti havainnoinut värinä mittauksen alkuvaiheessa pienillä kierroksilla oli huomattavaa, vaikka kiihtyvyydet eivät olleet kovinkaan suuret.

Karan pyörimisnopeuksina käytettiin 500 r/min – 1700 r/min 100 kierroksen portailla. Käytännössä huomattiin, että testilaitteistolla tuolla konstruktiolla oli selvä ominaisvärähtelytaajuus. Tietyillä nopeuksilla värinät rauhoittuivat, eivätkä suurentuneet lineaarisesti.

Ilmiö oli erittäin mielenkiintoinen. Hypoteesina on, että jokaisella laitekonstruktiolla on oma värähtelytaajuutensa, joka joudutaan kalibroimaan uudelleen olosuhteiden vaihdeltaessa. Tässä tapauksessa valmiissa tuotantokoneessa jouduttiin ajamaan vertailuarvot hylkytuotteen kanssa uudelleen ja muuttamaan hylkäysrajaa tapauskohtaisesti.

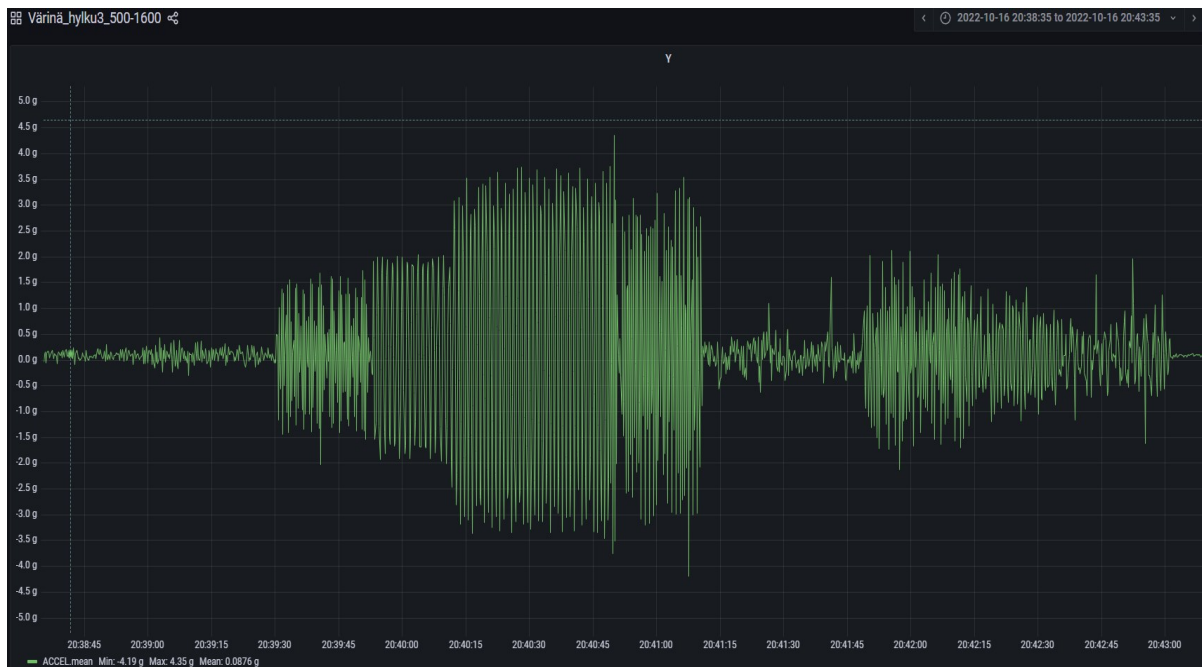
Toinen huomio koski kierrosluvun suhdetta kiihtyvyyssarvoihin. Karan pyöriessä 1300 r/min kiihtyvyydet putosivat kummallakin tuotteella (hylkytuotteella ja hyväksytyllä), hylky 2,1G ja hyväksytyllä 0,6 G:hen. Maksimikiihtyvyys saavutettiin hylkytuotteella 1100 kierroksella minuutissa noin 8G:n ja hyväksytyllä tuotteella 1400 kierroksella minuutissa noin 3,5 G:tä. Kierrosten lisääminen testilaitteistossa ei kasvattanut kiihtyvyyttä yli 1500 r/min vaimennetulla kiinnityksellä.



Kuva 3. Hyväksytyin tuotteen mittausdata Y-akselilta 500-1500 r/min

Hyväksytyin laikan testimittauksessa tuotetta pyöritettiin 500-1500 kierroksen minuutti-pyörimisnopeudella. 1300 kierroksella, joka on samalla pyöritysmoottorin normaalinopeus 50 Hz:llä huomattiin kiihtyvyyden olevan huomattavan paljon pienempi kuin muilla nopeuksilla. Maksimi kokonaiskiihtyvyys on hieman alle 4 G 1400 r/min.

Mittauslaitteiston kiinnitys ja sen vaimennus tuotti hyvin erilaisia mittaustuloksia riippuen siitä, miten mittauslaitteisto oli kiinnitettynä ja kuinka paljon sitä vaimennettiin erilaisilla kumityynyillä. Testilaitteistolla kokeiltiin kolmen eri jäykkyyden omaavia värinänvaimentimia sekä täysin kiinteätä asennusta. Mitä jäykempi kiinnitys lopulta oli, sitä vaikeampi mittausta oli suorittaa epätasapainoisella tuotteella johtuen laitteiston hallitsemattomasta värinästä suuremmilla pyörimisnopeuksilla. Testauslaitteisto ei tahtonut pysyä paikallaan yli 1500 r/min pyöritysnopeuksilla ja laitteiston rikkoutuminen oli todellisena uhkana. Valmiissa tuotantoympäristössä tilanne on varmasti erilainen, mutta testauksien perusteella täysin kiinteä asennus ilman mitään värinänvaimennusta ei ole vaihtoehtona. Lisähaastetta lopulliseen linjastoon toi se, että samalla kiinnityksellä tuotteet tulee puhdistaa puhdistuspisteellä uretaanihaarukoilla, jolloin kiinnitys ei voi olla kovin joustava.



Kuva 4. Hylätyn tuotteen mittausdata Y-akselilta 500-1600 r/min

Hylätyn ajan testimittauksessa tuotetta pyöritettiin 500-1500 kierroksen minuuttipyörimisnopeudella. 1300 kierroksella, joka samalla on pyöritysmoottorin suunniteltu nopeus 50 hz:llä huomaamme kiihtyvyyden olevan huomattavan paljon pienempi kuin muilla nopeuksilla. Maksimi kokonaiskiihtyvyys on hieman yli 8 G 1100 kierroksella/min.

#### 4.7.1 Johtopäätökset testimittauksista

Molempien tuotteiden maksimipikkeamat suhteessa toisiinsa saavutettiin lopulta 1300 r/min.

1100 r/min vastaavasti toisiinsa verratut arvot olivat hylkytuotteella 8 G hyväksytyllä 2,4 G. 1300 r/min hylkytuotteella 2,1G ja hyväksytyllä 0,6 G. 1400 r/min hylkytuotteella 5,25 G ja vastaavasti hyväksytyllä 3,25 G.

Selittämätöntä mittauksissa oli se, että kovemmillä pyörimisnopeuksilla mittaustulosten poikkeamat lähenivät toisiaan. Aiempien kokemusten perusteella tulisi noinkin suuren epätasapainon kertautua huomattavasti suurennettaessa pyörimisnopeutta. Tämän voi kyllä havaita visuaalisesti testilaitteistossa, mutta mittaustuloksissa sitä ei saatu jostain syystä näkymään.

Loppupäätelmänä on se, että jokaisella konstruktiolla on jokin tietty värähtelytaajuus, jossa se käyttäytyy eri tavalla eri pyöritysnopeuksien kanssa. Tämän hallitsemiseksi täytyy laitteistossa suorittaa uusintamittaukset ja määrittellä hylkytuotteen raja-arvot uudelleen. Antureiden ja kiinnitysten rakenne vaikuttaa myös huomattavasti mittausdatan laatuun, joten testaustyötä jatketaan vielä pitkään varsinaisessa tuotantoympäristössä.

Värähtelymittauksen jousisysteemivaikutus oli selvästi havaittavissa mittauksissa käytettäessä erityyppisiä kiinnitysvaihtoehtoja. Mitattavan tuotteen ollessa liian epätasapainossa koko järjestelmä alkoi värisemään hallitsemattomasti ja mittauksessa ei voitu käyttää kovinkaan suuria pyörimisnopeuksia. Vaarana tässä on se, jos mittauspisteeseen tulee viallinen ja epätasapainoinen tuote, joka aiheuttaa koko laitteiston rikkoutumisen jo pienelläkin kierrosnopeudella. Tuotteen paino on noin 3 kg, jos puolet massapainopisteestä on toisella puolella, ei tarvita kovinkaan suurta pyörimisnopeutta että jokin rikkoutuu.

## 5 IoT järjestelmän rakenne

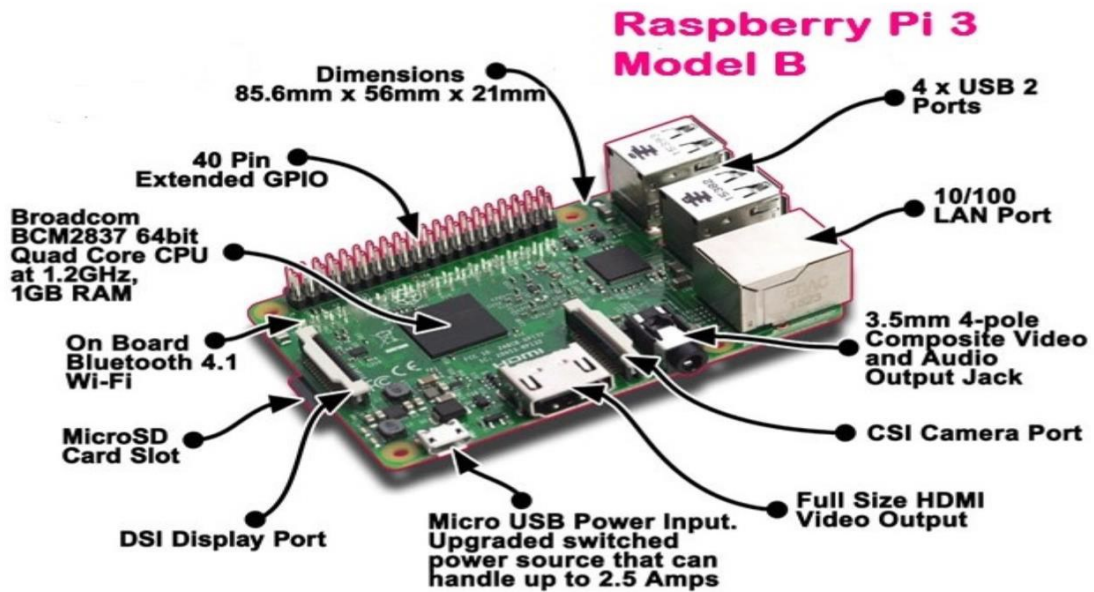
Kehitystehtävän IoT-järjestelmä koostuu seuraavista komponenteista: Raspberry Pi 3 tai 4, GY-521 MPU-6050, tarvittavat kaapeloinnit ja anturikotelo. Raspberry Pi

Raspberry Pi yhden piirilevyn tietokone. Koekäytössä käytettiin PI 2B 1gt muistilla, 3B 1 gb muistilla sekä 4B 2 gb muistilla. PI 2B oli resursseiltaan aika verkkainen, mutta toimi kuitenkin välttävästi kyseisessä käytössä. Raspberryn valintaa puolsi avoin lähdekoodi, edullisuus ja laaja valikoima sovelluksia IoT:lle ja kotiautomaatiolle. (Raspberry Pi Foundation a.)



Kuva 5. Raspberry Pi yhden piirilevyn tietokone (Wikipedia)

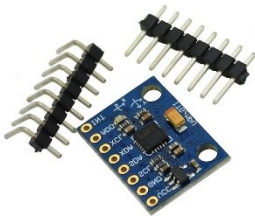
Raspberry Pi:llä on GPIO (General Purpose Input Output) nastat, joista jokainen GPIO-nasta on käytännössä fyysinen linkki Raspberryn ja ulkomaailman välillä. Käytännössä siinä on 26 input tai output pinniä, joita voi käyttää eri toimintojen ohjaukseen tai anturien datan sisään lukemiseen. Lisäksi GPIO tarjoaa Philipsin alun perin kehittämän I2C väylän, jota tässä projektissa käytetään gyroskoopianturin lukemiseen. Ongelmallista tässä tapauksessa on se, että MPU-6050 tukee vain kahta eri osoitetta, joten neljän anturin käyttäminen samassa väylässä ei onnistu. Vaihtoehtona on käyttää valmiissa tuotantolinjassa kahta eri Raspberry Pi:tä, mikä ei sinänsä tunnu kovin järkevältä. Tällaisissa laitteistoissa on järkevää pitää vikaantuvien komponenttien määrä mahdollisimman vähäisinä ja lisäksi kustannukset pysyvät alhaisempina. Uudemmissa Raspberry PI4:llä on kuitenkin mahdollisuus käyttää 6 erillistä I2Cväylää, joten 4 anturin käyttö on mahdollista yhdellä 4 version Raspberryllä. (Raspberry Pi Foundation b.)



Kuva 6. Raspberry PI3 ja sen liitännät (Researchgate)

### 5.1 GY-521 MPU-6050

3 akselinen Gyroskooppi ja kiihtyvyyssanturi: I2C piiri, käyttöjännitteenä 5VDC. Kyseinen piiri sisältää myös lämpötila-anturin.

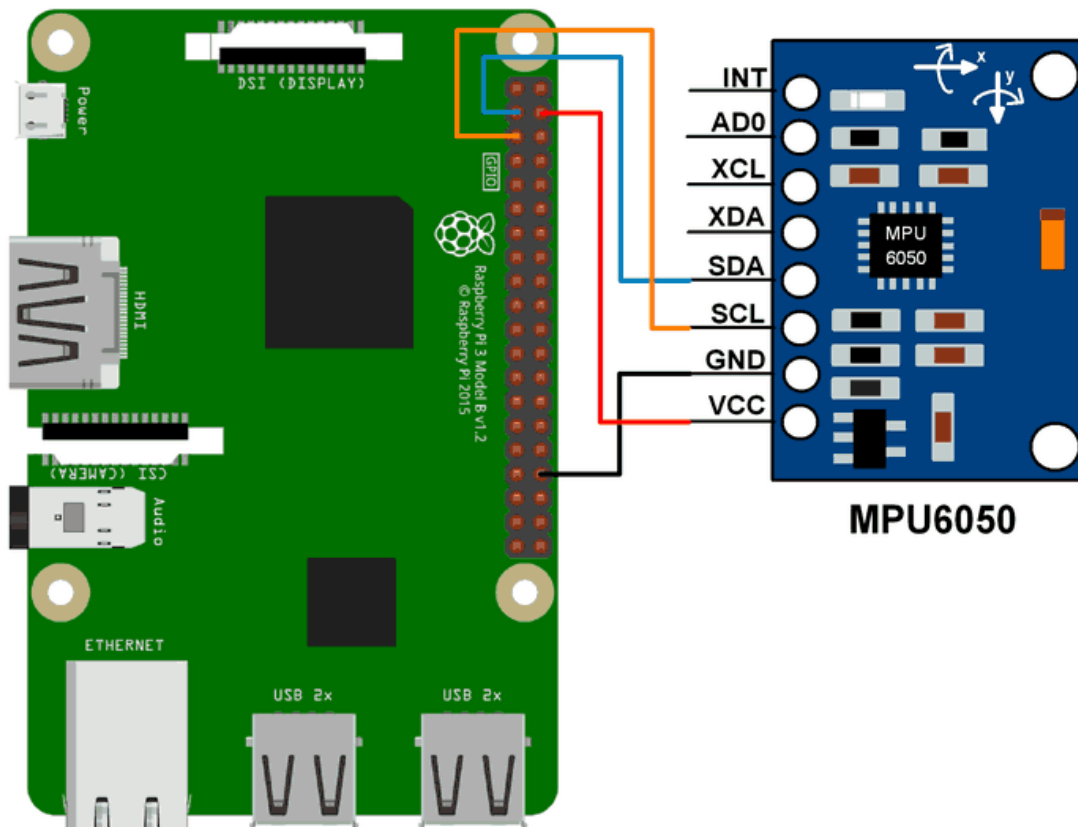


Kuva 7. MPU-6050 anturi (CDON)

MPU6050-anturi on täydellinen 6-akselinen liikkeenseurantalaite. Se sisältää 3-akselisen gyroskoopin, 3-akselisen kiihtyvyyssmittarin ja digitaalisen liikeprosessorin pieneen piirikorttiin. Lisäominaisuutena piirissä on lämpötila-anturi. Anturissa on I2C-väyläliitäntä kommunikoimaan mikro-ohjainten kanssa. I2C-apuväylä kommunikoi muiden tarvittaessa väylään yhdistettävien anturilaitteiden kanssa esimerkiksi paineanturin kanssa. (TDK Invensense b.)

## 5.2 Kaapeloinnit ja kytkennät

Raspberry Pi:hin kytkettiin MPU-6050 anturiin Cat5 Ethernet kaapelilla, SF/UTP. Suojatun kaapelin käyttö on tässä tapauksessa perusteltua johtuen sähkömoottorin läheisyydestä ja sen aiheuttamista magneettikentän häiriöistä etenkin taajuusmuuntajaohjattuna, joka entisestään lisää häiriötä.



Kuva 8. MPU-6050 kytkentä Raspberry Pi:hin (Electronicwings 2022)

## 5.3 Anturikotelo

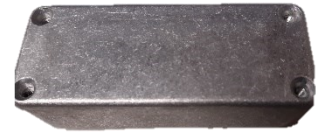
GY-521 anturi sijoitetaan ruuvikiinnitteisenä vedonpoistajineen ja kaapeleineen karaan kiinnitettynä. Vaihtoehtoina ovat teräs, alumiini tai muovikotelot. Anturi kiinnitettiin alustavasti ruuvinreiästä anturikoteloon. Anturikaapeli kiinnitettiin juottamalla nastoihin. Lopullista asennusta varten anturikotelo piirilevyineen täytetään valuhartsilla anturin suojaamiseksi ja irtoamisen ehkäisemiseksi kotelon sisällä.



Kuva 10. Muovikotelo (Starelec a)



Kuva 9. Valualumiinikotelo (Starelec b)



Kuva 11. Alumiinikotelo

Anturikotelon kiinnityspisteiden vaihtoehtojen testaus valmiissa tuotantolaitteistossa tulee viemään paljon aikaa. Ongelmaksi muodostuu miten ne saadaan sijoitettua parhaisiin kohtiin laitteistossa. Tähän testausvaiheeseen tulee varata paljon aikaa projektin toteuttamisvaiheessa.

#### 5.4 IoT-järjestelmän kustannukset

Tämän tyyppisen itse rakennetun IoT-järjestelmän käyttökuntoon saattaminen edellyttää työtä, mutta komponenttikustannukset järjestelmän osalta olivat erittäin maltilliset. Kautta yksinkertaisia mittareita on saatavilla ilman datankeruuta ja räätälöintiä, mutta ne eivät sellaisenaan tule kysymykseen. Hinnat ovat alkaen 1500 € ja siitä ylöspäin. Datankeruuta ja varastointia varten joutuu valmiissa mittareissa tekemään huomattavia lisätoimenpiteitä. Mittareita tarvitaan lisäksi neljä kappaletta, joten valmiit mittarit sopivat mielestäni huonosti tähän käyttökohteeseen.

Seuraavissa taulukoissa 1 ja 2 on eritelty kustannuksia verrattuna siten, että taulukossa 1 on eritelty IoT-järjestelmän kustannukset itse rakennettuna ja taulukossa 2 valmiiden järjestelmien hankintakustannukset.

Tuote	Kappalemäärä	Hinta €
MPU-6050 anturi	4	5
Anturikotelo	4	5
Raspberry Pi 4B	1	100
Kaapelit	4	10
Muut pientarvikkeet	1	20
	<u>Kokonaishinta</u>	<u>200</u>

<b>Tuntimäärä rakentaminen ja testaus</b>	50-100 h
---	----------

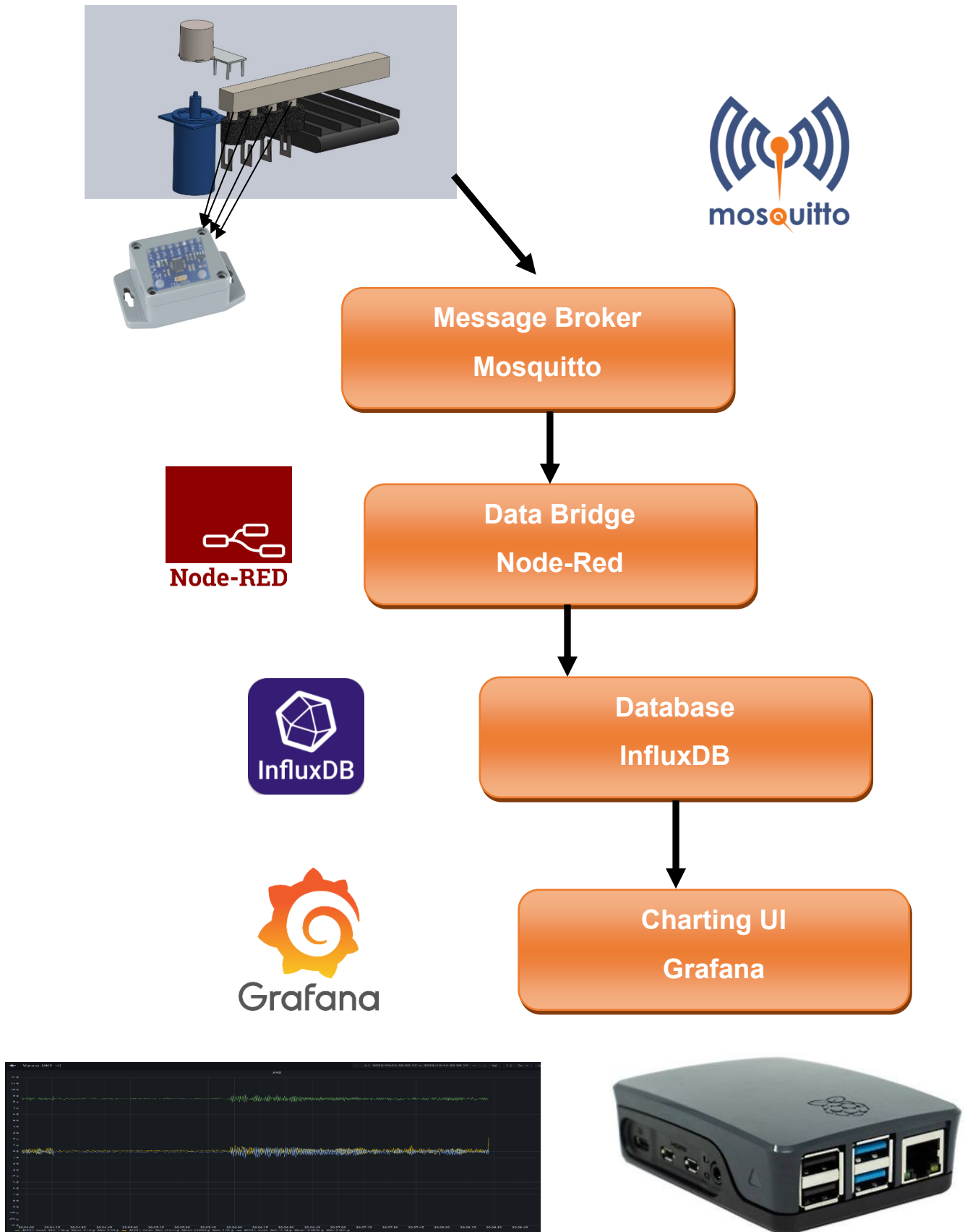
Taulukko 1. IoT-järjestelmän kustannukset itse rakennettuna

Tuote	Kappalemäärä	Hinta €
Probe tyyppinen värähtely mittari	4	1500
	<u>Kokonaishinta</u>	<u>6000</u>

<b>Tuntimäärä räätälöinti ja testaus</b>	40 h
--	------

Taulukko 2. IoT-järjestelmän ja värinänmittauslaitteiston hankkimen valmiina ja valmiin tuotteen räätälöimisen kustannukset

## 6 IoT järjestelmän asennus ja dataPipelinen rakenne



Kuva 12. Data Pipelinen rakenne

## 6.1 Raspberry Pi:n asennus

Kuvasta 12 selviää Data Pipelinen rakenne, jossa karaan kiinnitetyistä antureista aikasarjadata siirtyy Raspberry Pi:ssä sijaitsevaan aikasarjadatatietokantaan.

### 6.1.1 Käyttöjärjestelmän asennus

Käyttöjärjestelmän asennus suoritettiin Noobs tyyppistä asennustapaa käyttämällä Raspberry Pi OS (Raspbian) käyttöjärjestelmän asentamiseksi. Käytännössä internetistä ladataan .zip -tiedosto, joka puretaan muistikortille. Asennus suoritettiin seuraavalla tavalla. Asetetaan tyhjä MicroSD kortti tietokoneeseen ja ladataan Raspberry Pi Imager tietokoneelle. Avataan Raspberry Pi Imager ja valitaan oikea käyttöjärjestelmä sekä oikea image. Valitaan SD-kortti oikealla asematunnuksella, jonne käyttöjärjestelmä asennetaan. Asennettiin lähinnä tulevaisuuden käyttötarkoituksia varten.

### 6.1.2 Käyttöjärjestelmän päivitys

Kun käyttöjärjestelmä on asennettu, seuraavaksi on vuorossa pakettilistauksen päivitys, joka tehdään seuraavalla komennolla terminaali-ikkunassa.

```
$ sudo apt update
```

Sitten tehdään täysi pakettien asennus

```
$ sudo apt full-upgrade
```

Tässä vaiheessa kysytään, jatketaanko pakettien asennusta, johon vastataan "Yes"

Pakettien asennuksen jälkeen, esimerkiksi kernelin, Pi pitää käynnistää uudelleen seuraavalla tavalla:

```
$ sudo reboot
```

Tämän jälkeen kannattaa vielä poistaa paketit, jotka on asennettu, mutta ei enää tarvita komennolla:

```
$ sudo apt autoremove
```

Sitten vielä paketticachen tyhjennys

```
$ sudo apt clean
```

Määritellään Raspberrylle kiinteä IP-numero, jotta siihen saadaan yhteys helposti myöhemmin. Asenettiin myös xrdp ohjelmisto, jota tarvitaan X Windows- implementaatioon. Tällä saadaan Raspberryn graafinen käyttöliittymä tarpeen mukaan käyttöön Windowsin Remote desktopia käyttämällä.

## 6.2 Mosquitto MQTT broker

MQTT on julkaisija/tilasuperustainen viestintäprotokolla. Message Broker toimii viestin välittäjänä; se toimittaa viestin lähettäjältä viestin tilaajalle. Message Broker yhdistää kummatkin toisiinsa ilman, että niiden tarvitsee tietää toistensa verkko-osoitteita. Kommunikointi tapahtuu siten, että laitteet eivät keskustele toistensa kanssa, vaan kaikki viestit kulkevat Message Brokerin kanssa. Viestin sisältöä kutsutaan payloadiksi. Tieto sinänsä voi olla lähes mitä tahansa.

### 6.2.1 Mosquitto MQTT brokerin asennus

Mosquitto asennetaan seuraavasti Raspberry Pi:hin:

```
$ sudo apt install mosquitto mosquitto-clients
```

Asennuksen jälkeen käynnistetään mosquito varmuuden vuoksi uudelleen:

```
$ sudo /etc/init.d/mosquitto restart
```

Mosquitto toimii oletusasennuksen kanssa moitteetta, mutta tietoturvan näkökulmasta olisi järkevää asettaa sille käyttäjätunnus ja salasana. Testiympäristössä sitä ei käytetty, mutta tuotantoympäristössä on tilanne ymmärrettävästi toinen.

## 6.3 InfluxDB tietokantapalvelin.

InfluxDB on tietokanta, joka on optimoitu aikasarjatietokantoja varten. Influxin etuna on suurten tietomäärien tallentaminen, esimerkiksi antureiden lähettämät tiedot. Influx on paljon nopeampi kuin esimerkiksi perinteinen Mysql aikasarjojen tallennuksessa ja niiden käsittelyssä. Influx on yksinkertainen IoT ympäristöön optimoitu tietokantapalvelin, joka koostuu vain muutamista komponenteista. (Influxdata.)

### 6.3.1 InfluxDB:n asennus

Päivitetään Rasperryn resurssiluettelo komennolla:

```
$ sudo apt update && sudo apt upgrade -y
```

Haetaan oikealle Raspberry PI:n versiolle optimoitu säilö:

```
$ wget -qO- https://repos.influxdata.com/influxdb.key | sudo apt-key add -
```

Selvitetään mitä käyttöjärjestelmäversiota Raspberry käyttää:

```
$ lsb_release -a
```

Tässä tapauksessa Buster:

```
$ echo "deb https://repos.influxdata.com/debian buster stable" | sudo tee /etc/apt/sources.list.d/influxdb.list
```

Päivitetään paketit:

```
$ sudo apt update
```

Asennetaan tietokanta

```
$ sudo apt install influxdb
```

Kerrotaan, että Influx käynnistetään järjestelmän käynnistyessä palveluksi:

```
$ sudo systemctl unmask influxdb
```

```
$ sudo systemctl enable influxdb
```

Käynnistetään Influx tällä erää manuaalisesti:

```
$ sudo systemctl start influxdb
```

Luodaan käyttäjä ja salasana

```
$ CREATE USER kayttaja WITH PASSWORD 'salasana' WITH ALL PRIVILEGES
```

Poistutaan influxista:

```
$ exit
```

Editoidaan influxdb.conf:ia siten että Influx käyttää käyttäjäautentikointia seuraavalla tavalla:

```
$ sudo nano /etc/influxdb/influxdb.conf
```

Haetaan konfigurointitiedostosta seuraavat rivit ja muutetaan ne:

```
$ auth-enabled = true
```

```
$ pprof-enabled = true
```

```
$ pprof-auth-enabled = true
```

```
$ ping-auth-enabled = true
```

Tallennetaan muutokset ja poistutaan sudosta. (CTRL+x ja Y ja Enter):

Käynnistetään influx uudelleen:

```
$ sudo systemctl restart influxdb
```

Kokeillaan toimiiko tietokanta

```
$ vflux -username kayttaja -password <salasana>
```

Luodaan tietokanta kiihtyvyyssanturia varten:

```
$ CREATE DATABASE xyz
```

Poistutaan influxista:

```
$ exit
```

## 6.4 Node-RED ohjelmointityökalu

Node-RED on ohjelmointityökalu, jolla voi toteuttaa vuopohjaista ohjelmointia ilman koodia. Node-RED tarjoaa FBP (Flow Based Programming) palikat ja antaa niille omat toiminnot, jolloin vuopohjainen ohjelmointi tulee mahdolliseksi uudella tavalla. Node REDin ohjelmointi muistuttaa suuresti ohjelmoitavista logiikoista tuttua vuokaaviota. Node-RED nimeää laatikoita nodeiksi ja työtilaan sijoitetut nodet yksinkertaistavat muuten monimutkaista toimintaa. Nodeja ja toimintoja on lukuisia erilaisia ja niitä voidaan tarvittaessa asentaa lisää tarvittaessa Node-REDin sisälle. Node-REDin avulla aloittelijakin kykenee hahmottamaan, mitä ohjelmassa tapahtuu, vaikka ei ymmärtäisi jokaista yksittäistä koodin pätkää nodejen sisällä. (OpenJS Foundation 2021a.)

### 6.4.1 Node-Redin asennus

Raspberry PI tarjoaa Node-RED paketin, mutta Node-RED teamin mukaan se ei ole välttämättä paras tapa, joten käytin git-hub skripti käytettiin sen asentamiseen. Asennus suoritettiin useamman kerran ja huomattiin Node-REDin olevan hieman epävakaa. Node-RED kaatui satunnaisesti Raspberry PI 3B:llä. Toivon mukaan päivitys ja uudemman Raspberry Pi:n käyttäminen tekee Node-REDistä stabiilimman.

Asennetaan tarvittavat työkalut ennen scriptin ajamista:

```
$ sudo apt install build-essential git
```

Node-Red Asennusscripti:

```
$ bash <(curl -sL https://raw.githubusercontent.com/node-red/linux-installers/master/deb/update-nodejs-and-nodered)
```

Lisätyökalut Influx tietokantayhteyden aikaansaamiseksi:

```
$ npm install node-red-contrib-influxdb
```

Asennetaan Node-Red palveluksi (käynnistyy järjestelmän käynnistyksen yhteydessä:

```
$ sudo systemctl enable nodered.service
```

Käynnistetään Node-Red manuaalisesti:

```
$ sudo systemctl start nodered.service
```

## 6.5 Grafana

Grafana on avoimen lähdekoodin tehokas ja monipuolinen analyysi- ja seurantaohjelmisto. Grafanan laajennettavuus ja tyylikkyys oli syy, miksi se valikoitui tähän käyttötarkoitukseen. Lisäksi Grafana Viewerin saa helposti mihin tahansa mobiililaitteeseen seuranta- ja analysointia varten. (Grafana Labs.)

## 6.6 Grafanan asennus

Grafanan asennus tapahtuu samantyyppisesti kuin Influxin valmiita säilöjä (repository) käyttämällä.

Asennus tapahtuu seuraavalla tavalla. Asentamalla seuraavat paketit:

```
$ wget -q -O - https://packages.grafana.com/gpg.key  
| sudo apt-key add -
```

Itse säilön asennus:

```
$ echo "deb https://packages.grafana.com/oss/deb  
stable main" | sudo tee -a  
/etc/apt/sources.list.d/grafana.list
```

Päivitetään paketit:

```
$ sudo apt update
```

```
$ sudo apt install Grafana
```

Määritetään Grafana palveluksi, jotta se käynnistyy automaattisesti:

```
$ sudo systemctl enable grafana-server
```

Käynnistetään Grafana Manuaalisesti:

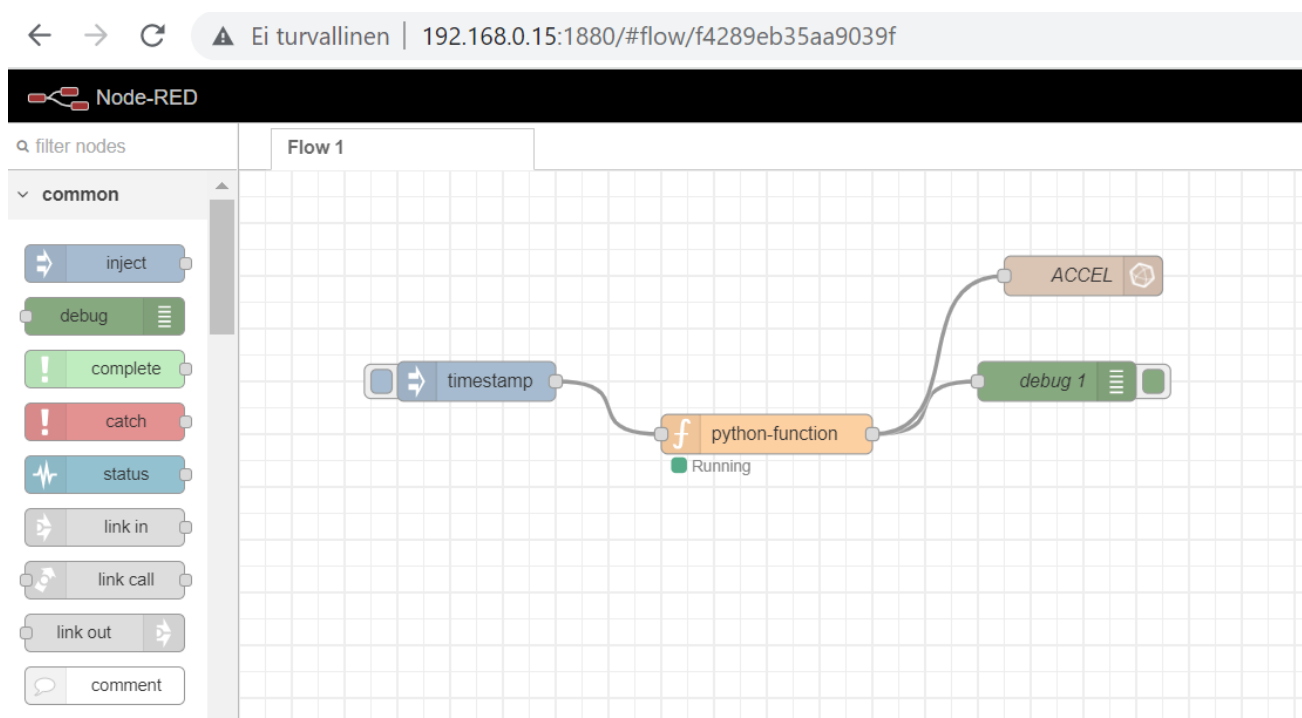
```
$ sudo systemctl start grafana-server
```

## 7 Node-RED ohjelmointi

Anturidatan saamiseksi MPU-6050 InfluxDB tietokantaan käytettiin hyvin yksinkertaista ohjelmointifunktiota Node-REDissa, joka luki Python scriptin avulla X-, Y- ja Z-akselien kiihtyvyydet ja syötti ne InfluxDB Out funktiolla valittuun tietokantaan. MPU-6050 tarjoaa myös 3-akselisen gyroskoopin sekä lämpötilanturin, mutta tässä yhteydessä jätettiin ne käyttämättä tarpeettomina käyttökohteeseen.

Python Scripti lukee jokaisen akselin kiihtyvyyden määritetyllä näytteenottotaajuu-  
della ja siirtää antureiden arvot aikasarjadataa tietokantaan.

### 7.1 Node-RED Node



Kuva 13. Node-RED vuokaavio

Node-Rediin luotu vuokaavio on hyvin yksinkertainen. Kohdassa 8.2 oleva Python koodi lukee kiihtyvyydenturin lukemat muunnoksineen. Tähän käytettiin Node-REDin lisäosana saatavaa python funktiota. Kiihtyvyydät saamiseksi tietokantaan on monia eri tapoja Node-REDin sisällä, mutta tämä todettiin yksinkertaisimmaksi tavaksi. (OpenJS Foundation b.)

Python funktiosta anturilukemat siirtyvät tietokantaan Node-RED InfluxDB in toiminnolla. Tämä node-red-contrib-influxdb toiminnallisuus on myös asennettava erikseen, jotta influxdb-in saadaan käyttöön. (OpenJS Foundation c.)

## 7.2 Python Koodi

```
#Python Node-Redissä

#
import smbus
import math
#osoitteet voi olla myös 0x69
bus = smbus.SMBus(1)
MPU = 0x68

scaling_gyro = 131
scaling_acc = 2048
scaling_temp = 321
offset_temp = 800

def read_word(reg):
    high = bus.read_byte_data(MPU, reg)
    low = bus.read_byte_data(MPU, reg+1)
    word = (high << 8) +low
    return word

def sign_word(reg):
    word = read_word(reg)
    if (word >= 0x8000):
        return -((0xFFFF - word)+1)
    else:
        return word

#3 akselin lukeminen ja skaalaus

acc_x = float(sign_word(0x3b))/scaling_acc
acc_y = float(sign_word(0x3d))/scaling_acc
acc_z = float(sign_word(0x3f))/scaling_acc

#ulos lähtevä tieto ja topicin nimi

msg['payload'] = {'accel_x': acc_x,'accel_y': acc_y,'accel_z': acc_z}
msg['topic'] = "MPU-6050"
return msg
```

## 8 Grafana

### 8.1 Grafana Dashboardin rakentaminen

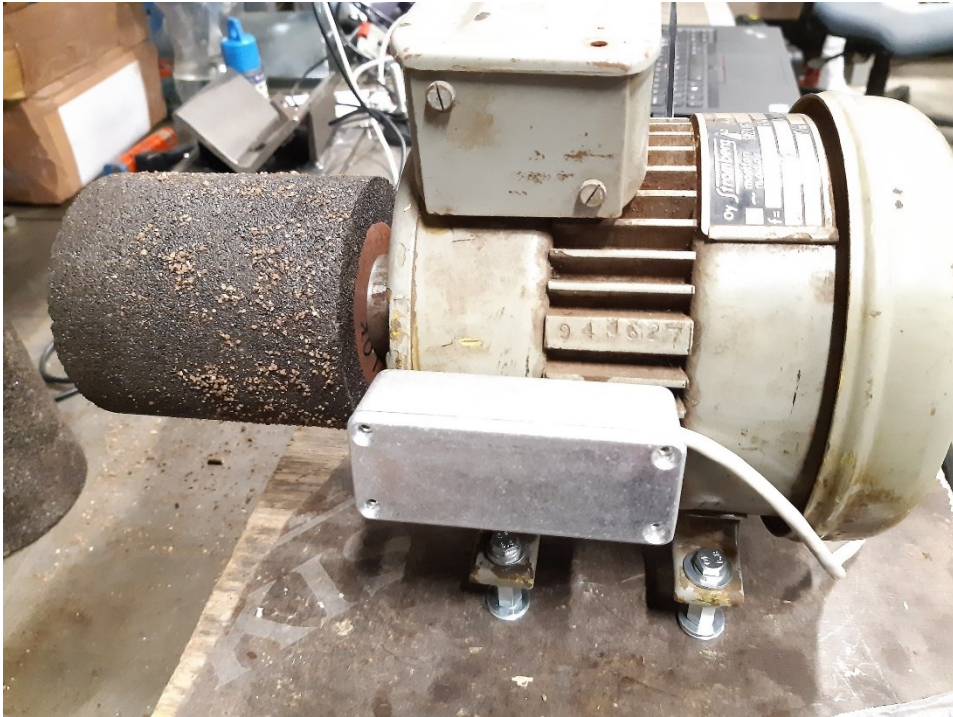
Mittauksia varten jouduttiin hakemaan järkevintä mittaustekniikkaa ja parhaita mittausmenetelmää Grafanasta. Kiihtyvyyssantureiden akselien ja paikan sijoittelu oli omat haasteensa, mutta Grafanassa on paljon mahdollisuuksia tehdä erilaisia kuvaajia ja mittareita, jotta optimaalisin visualisointimenetelmä löytyi. Tämä vaati huomattavasti työtä. Lopulta päädyttiin Y-akselin aikasarjadatan kuvaajaan, joka oli yksinkertaisuudessaan selkeä laikkojen laadun seurantaan ja myöhempää analysointia varten.

Loppukäyttäjän hylkytyökalua varten päädyttiin perinteiseen nopeusmittarinäyttöön ja maksimipoikkeamaan mittauksen aikana (kuvat 18 ja 19). Tämä helpottaa loppukäyttäjää saamaan nopeasti kuvan tuotteen laadusta yhdellä silmäyksellä verrattuna käyrätyyppiin esitystapaan.

### 8.2 Testimittaukset

#### 8.2.1 Laitteisto

Testimittauksia varten rakennettiin karan ja paisuntatuurnan sijaan kuvassa 14 näkyvällä kiinteällä kierre-adapterilla varustettu 3-vaiheinen taajuusmuuntajaohjattu sähkömoottori. Sähkömoottorin akselille sorvattiin kiilavarmisteinen ja M6 mm pultilla kiristettävä M22 x 2,5 vasenkierteinen kiinnitysadapteri tuotteen kiinnitystä varten (kuva 16).



Kuva 14. Testauslaitteiston rakenne



Kuva 15. Testattavat tuotteet



Kuva 16. Karan kiinnitysadapteri M20x2,5 LH

Tällä tavalla päästiin tekemään yksittäisten laikkojen testimittauksia ja todentamaan laitteen toiminta ennen varsinaisen automaatiolinjan rakentamista (kuva 15). Testimittauksissa tuli selväksi, että konstruktion kiinnitys oli ratkaisevassa asemassa, millaista dataa mittauksista saatiin. Jos mittauslaitteisto kiinnitettiin kumityynyillä kiinteään alustaan, kokonaisuus käyttäytyi aivan eri tavalla, jos se on kiinnitetty kiinteästi. Lisäksi kiihtyvyyssanturin sijoituksella oli suuri vaikutus mittauksiin. Mittauksia varten valittiin eniten poikkeamaa tuova akseli, joka tässä konstruktiossa on kyseisellä kiinnityksellä Y-akseli.

Tämä tietysti vaihtelee riippuen siitä, miten päin anturi on asennettuna ja tämä pitää huomioida lopullisessa konstruktiossa, sekä lopullisen kohteen kalibroinnissa ja hylkyarvon määrittelyssä.

### 8.2.2 Mittauksien suoritus

Testimittaukset suoritettiin kahdella hylätyllä laikalla ja viidellä hyväksytyllä. Mittauksia tehdessä laitteiston huomattiin tuottavan joka mittauskerralla lähes identtistä dataa. Riippumatta siitä, että testikappale oli välillä irti karasta, kiihtyvyydsmittauskäyrät olivat toistojen osalta joka kerta lähes identtiset. Mikä on tutkimuksen kannalta hyvä asia.

Hylkyarvoa varten käytettiin hylättyjä tuotteita, jotta saatiin vertailuarvo hylkyyn meneville tuotteille. Käytössä oli kaksi hylättävää tuotetta, josta valittiin parempi. Testimielessä keikelin viittä erillistä hyväksytyä tuotetta, jotka olivat samasta tuotantoerästä. Useista toistoista huolimatta saatiin jokaiselle tuotteelle lähes identtisen mittausdata pyörimisnopeudella 700-1600 r/min.

Tämän jälkeen suoritettiin vertailumittauksia kahdella eri konstruktiolla:

1. Mittauslaitteisto on asennettu värinänvaimennuskumityynyillä alustaan.
2. Mittauslaitteisto on kiinteästi asennettuna alustaan ilman minkäänlaista värinänvaimennusta

Kaikissa mittauksissa MPU-6050-anturi oli asennettuna kiinteästi mittauslaitteiston runkoon ja oli koteloituna alumiiniseen kytkentälaatikkoon.

Kumityynyvaimennuksessa konstruktiolla tuli esiin mielenkiintoinen seikka. Laitteistolla oli ominaisvärähtelytaajuus, joka sattumalta oli sama kuin moottorin ominaispyörimisnopeus (1300-r/min). Tämän nopeuden ylitettyä poikkeamaa tuli enemmän, mutta hylätyn sekä hyväksyttävän tuotteen ero oli selvästi havaittavissa jokaisella nopeudella. Tässä tapauksessa hylkytuotteen poikkeama oli noin nelinkertainen hyväksyttävään tuotteeseen. Kuvista 20 ja 21 näkyy, miten värähtely vähenee 1300 r/min sekä hylkytuotteen, että hyväksyttävän tuotteen kohdalla. Matalammalla tai korkeammalla pyörimisnopeudella kiihtyvyydet jälleen kasvavat. Tässä konstruktiossa maksimikihtyvyydet saavutettiin 1100 ja 1200 r/min nopeudessa.

Kiinteästi asennettuna mittaustulokset alkoivat muistuttaa sitä mitä oltiin alun perin arvioitu.

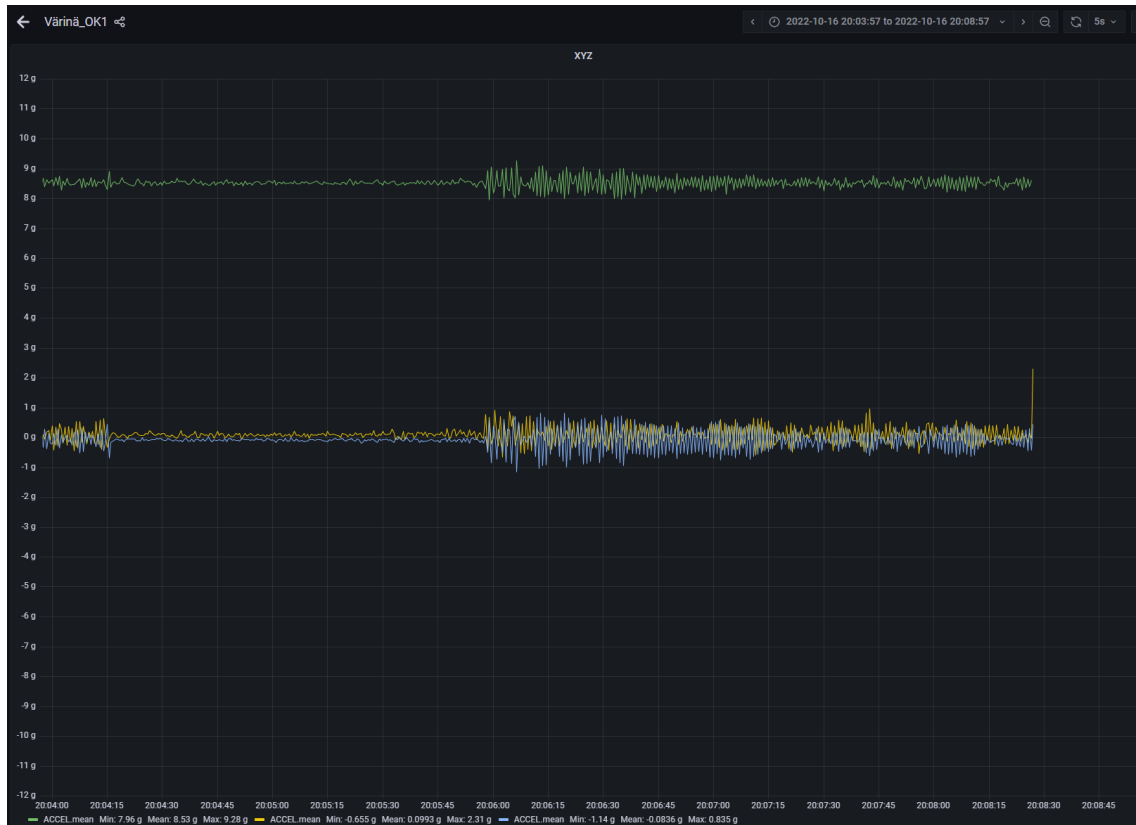
Kiinteällä kiinnityksellä hyväksyttävässä tuotteessa kiihtyvyys ei kasvanut, vaikka nopeutta lisättiin. Kuvassa 22 on nähtävissä nopeutta kasvattamalla 1000-1700 r/min, mutta mittauskäyrä ei olennaisesti muutu. Kokonaiskiihtyvyys pysyi 0,5-0,6 G välillä riippumatta siitä millä nopeudella tuotetta pyöritettiin (kuva 22).

Kiinteällä kiinnityksellä hylkytuotetta testattaessa kiihtyvyys kasvoi rauhallisesti tiettyyn pisteeseen saakka (1400 r/min). Nopeutta vielä nostettaessa konstruktion värähtely kasvoi niin suureksi, että nopeutta ei pystynyt enää kasvattamaan, koska laitteisto ei tahtonut enää pysyä paikallaan (kuva 23). Vaikka kiihtyvyydet olivat maltillisemmat kuin kumityynyvaimennetussa mittauksessa, nopeutta ei voinut nostaa tuon 1500 r/min yli. Mittauslaitteistossa jotakin olisi varmasti rikkoutunut hallitsemattoman resonanssin takia, joka vain kasvoi nopeutta lisättäessä. Kiihtyvyyсарvo sinänsä ei ollut mittauksen mukaan kovin suuri verrattuna esimerkiksi vaimennettuun mittaukseen. Värinä vain siirtyi vaimentamattomana mittauskonstruktion runkoon ja tulevaisuudessa tavoitteenahan on mitata neljä tuotetta samanaikaisesti, joten yksittäisen tuotteen hallitsematon värinä sekoittaa muidenkin samanaikaisesti mitattavien tuotteiden mittaustulokset. Kiihtyvyyksiä verrattaessa hyväksyttävän ja hylätyn laikan kesken kiihtyvyyсарvot samalla pyöritysnopeudella olivat 6,3 kertaiset.

Vaimennetuilla mittauksilla kiihtyvyydet olivat noin 2,5 kertaiset. Vaimennetussa järjestelmässä saatiin paremmin tulkittava mittaustulos, jolla voidaan määritellä paremmin se, millä nopeudella tuotetta pyöritetään. Kiinteässä asennuksessa hylkytuotteen tuotteen mittaustulos on lähes sama riippumatta siitä, millä nopeudella sitä pyöritettiin. Hylätyn tuotteen ongelmaksi tuli hallitsemattomuus, kun tietty pyörimisnopeusraja ylitettiin. Vertailutulos saatiin kyllä selvästi suuremmaksi mutta laitteisto ei välttämättä kestä montakaan mittausta, saati sitten tuhansia mittauksia.

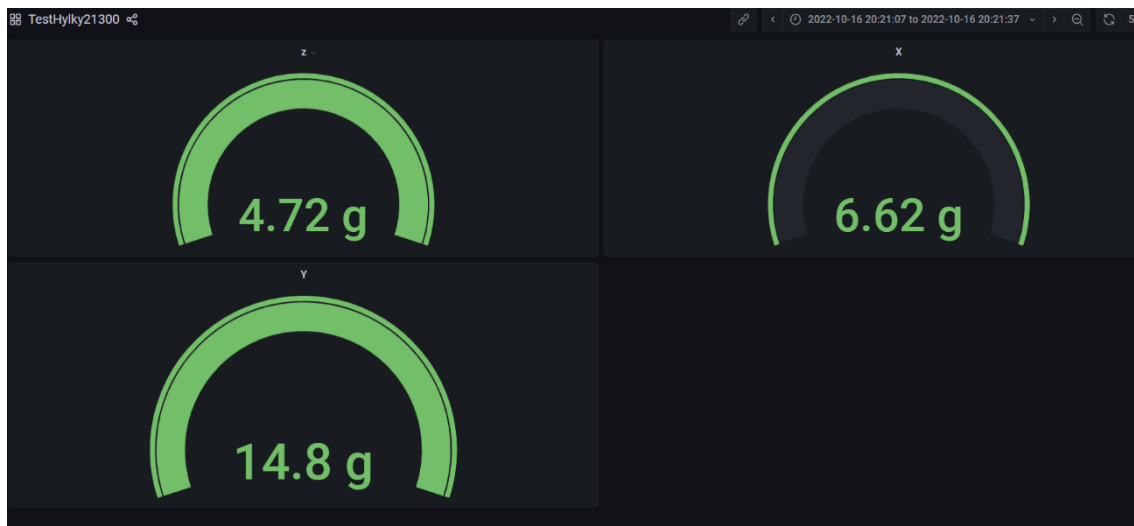
### 8.3 Mittausdatan analysointi Grafanalla

Mittauksissa selvisi, että kaikkien akselien samanaikaisella näkymällä ei saavutettu selkeätä kuvaa laitteiston toiminnasta kuten kuvasta 17 näkyy. Akselien päällekkäisyys samassa kuvaajassa vaikeutti tulkintaa.

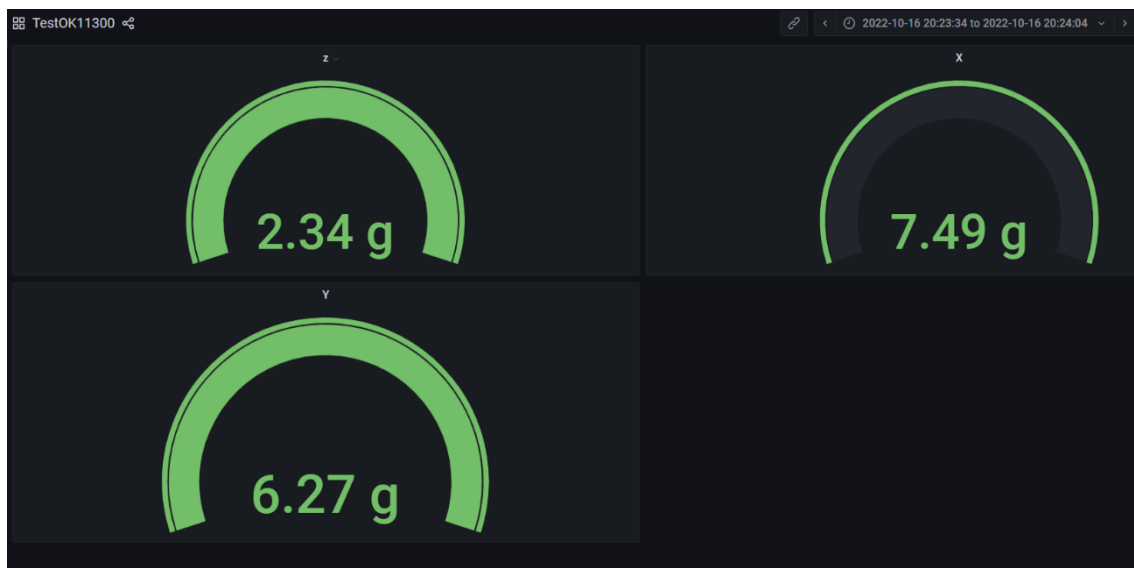


Kuva 17. Kaikkien akselien mittausdata 1300 r/min (Grafana)

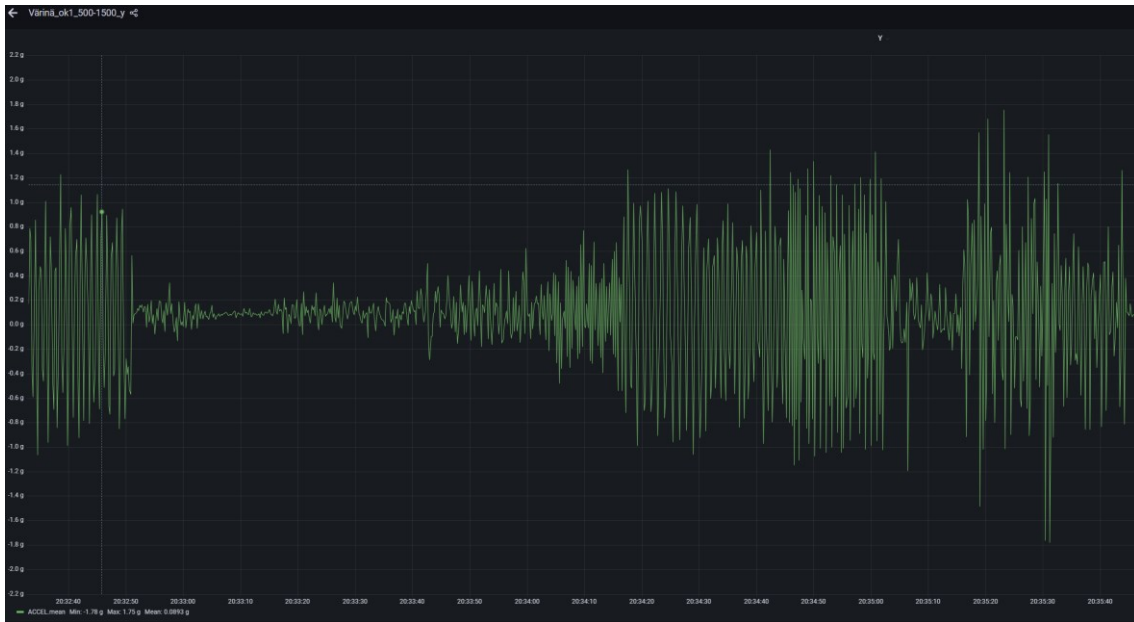
Kuvista 18 ja 19 selviää hyvin nopeusmittarinäyttötyyppisen etu mittaustapahtuman nopeaan havainnointiin kyseinen mittari antaa maksimivärähtelyarvon mittauksen aikana.



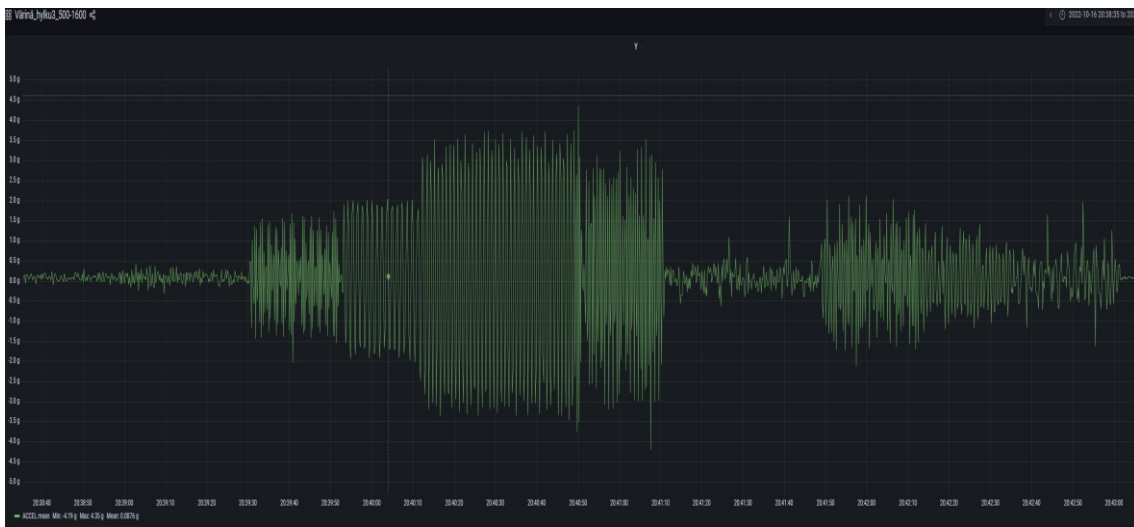
Kuva 18. Mittausdata Gauge max hylättävä tuote (Grafana Gauge)



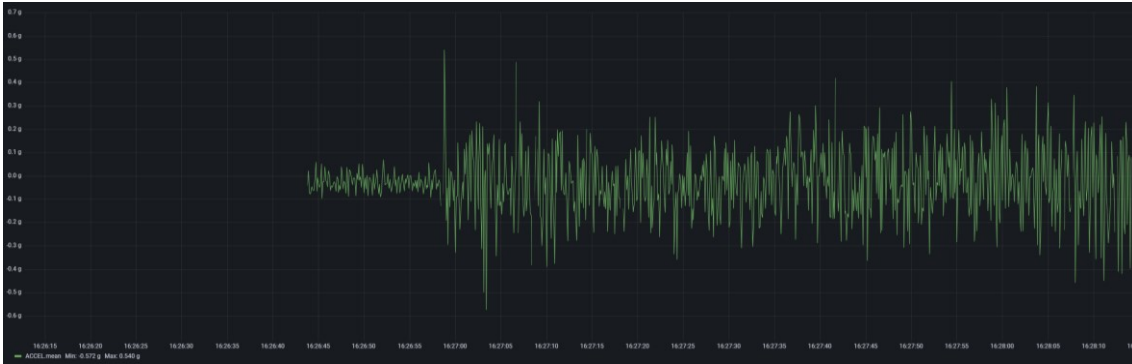
Kuva 19. Mittausdata Gauge max hyväksyttävä tuote (Grafana Gauge)



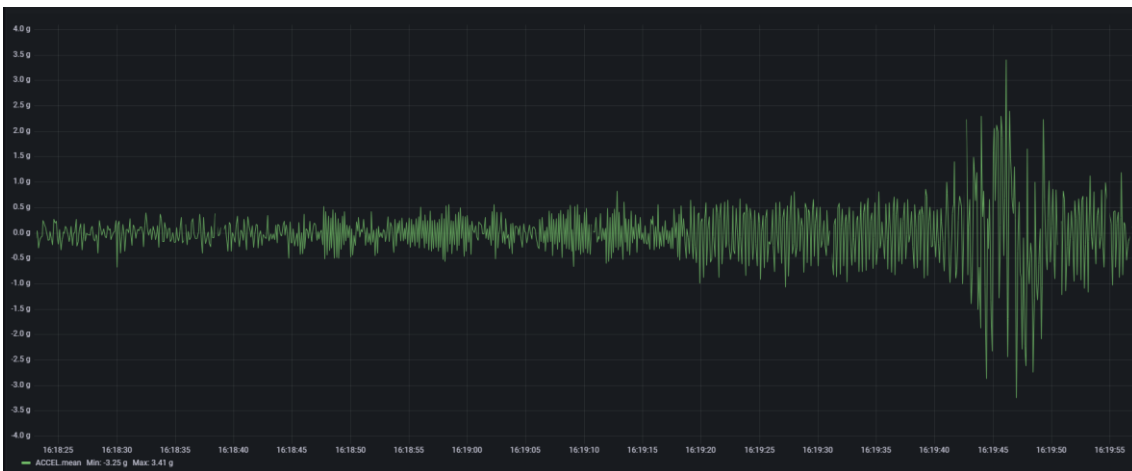
Kuva 20. Mittausdata hyväksyttävä tuote Y-akseli 500-1500 r/min (Grafana)



Kuva 21. Mittausdata hylätty tuote Y-akseli 500-1600 r/min (Grafana)



Kuva 22. Kiinteä asennus Hyväksyttävä laikka 1000-1700 r/min Maks 0,540 G



Kuva 23. Kiinteä asennus Hylättävä laikka 1000-1500 r/min Maks 3,41G

## 9 Yhteenveto ja pohdinta

Mittauslaitteiston rakentaminen ja testimittaukset olivat erittäin mielenkiintoista ja opettavaista. Haastavinta oli muuttujien sovittaminen tätä kyseistä ongelmaa parhaiten palvelevaksi. Lisäksi yllätyksenä tuli mekaanisten rakenteiden aiheuttamat ongelmat ja ominaisuudet, joita ei mitenkään voinut ennakoida. Ne olivat ratkaistavissa vasta siinä vaiheessa, kun testattiin erilaisia vaihtoehtoja mittauksen suorittamisessa. Avainkysymykseksi nousi, mitä mitataan, miten se mitataan ja minne anturit sijoitetaan. Samalla tuli pohdittavaksi vaimennetaanko rakennetta ja kiinnityksiä jotenkin. Mekaaninen vaimennus oli myös hyvin tärkeätä ja tämä asia pitää ottaa huomioon tuotantolinjan runkorakennetta suunniteltaessa. Yllätyksiä tuli monessa kohdassa ja vaati paljon erityyppistä mittausta ja testausta.

Testausmittausten ja rakennetun testipenkin antamien tuloksien perusteella mittaukset kannattaa suorittaa 1100-1200 r/min vaimennetuilla karoilla. Tällöin tulevaisuuden neljän tuotteen samanaikainen mittaus onnistuu hyvin todennäköisesti. Vaimennuksen kanssa joutuu tulevaisuudessa tekemään testityötä, jotta mittaus onnistuu ja jäykkyys riittää myös laikkojen puhdistusprosessiin.

Kuppilaikkojen laadunvarmistus onnistuu tämäntyyppisellä konstruktiolla kaikilla mittaus-tavoilla. Testimittaukset tuottivat selvän eron hyväksyttävien ja hylättävien tuotteiden suhteen. Perusmittausta voi hyvin käyttää jo tällaisenaan tuotteiden laadunvalvonnassa.

Riippumatta laitteen lopullisesta rakenteesta kyseinen värähtelymittausjärjestelmä tuottaa asiakkaalle tiedon siitä, onko tuote myyntiin kelpaava vai ei. Koska jokainen mittauskonstruktio käyttäytyy rakenteellisesti omalla tavallaan, on tärkeää suorittaa kalibrointi-mittaukset kyseisellä laitteella ja määritellä hylkyrajat vertailutuotteen avulla. Lisäksi tulee määritellä tietty varmuuskerroin hyväksyttävään tuotteeseen.

Tuotantokäyttöä ajatellen neljän anturin samanaikainen käyttö aiheuttaa varmasti häiriöitä toisiinsa nähden tämän ratkaisemiseksi valmiiseen tuotantolinjaan kiinnitettävät anturoinnit ja on mitattava, miten kyseinen rakenne mittauksissa käyttäytyy. Tämän tyyppisen neljän karan järjestelmässä jokainen yksikkö aiheuttaa varmasti värinöitä laitteen runkoon. Vaihtoehtona on myös anturirasian kiinnityksen vaimentaminen, jos tämä muodostuu ongelmaksi.

Neljän karan järjestelmän käyttöönotossa pitää varmasti mitata koko järjestelmän ominaisvärinä tyhjänä. Hyväksyttävien laikkojen ryhmän testiajolla saadaan varmasti kuva,

miten kukin yksikkö häiritsee toisiansa. Eri pyörimisnopeuksia käyttämällä varmasti selviää paras nopeus- ja vaimennussuhde tuotantokäytössä.

Yllätyksenä tuli käyttämäni anturin rajoitukset osoiteavaruuden suhteen, joka rajasi käytettävien antureiden määrän kahteen anturiin per I2C-väylä, vaikka väylään pitäisi olla mahdollista kytkeä mitä tahansa ilman määrärajoitteita.

Järjestelmää voi soveltaa moneen muuhunkin käyttötarkoitukseen, kuten alla olevan esimerkin mukaisesti laadunvalvontasovellukseksi ruuvipaalujen asennuksessa. Muina käyttökohteina laitetta voisi soveltaa magneettikiinnitteisenä koneistettavien tai korjauskoneistettavien kappaleiden kohtisuoruuden määrittämiseen, kuten jyrsinkoneen ruuvipuristimen kiinnityksessä, mikä olisi paljon nopeampi kuin heittokellon käyttö. Korjauskoneistuksessa isojen kappaleiden kohtisuoruus tai reikälinjan suoruus karaan nähden olisi nopeasti mitattavissa ja data tallennettavissa, jos sitä tarvitsee myöhemmin esittää mittauspöytäkirjassa. Sovellettavia käyttökohteita on lukemattomia.

## 9.1 Käyttösovellus mittauslaitteistolle

Kyseistä ratkaisua voidaan soveltaa pienin muutoksin ja samanlaista laitteistoa käyttämällä helposti toiseen käyttökohteeseen käyttämällä MPU-6050 gyroskoopianturia. Tässä tapauksessa asennetaan ruuvipaaluja talojen, aitojen, kulkusiltojen, terassien ja katoksien perustuksiksi. Asennus suoritetaan joko käsivaraisesti erillisellä kuvassa 24 näkyvällä ruuvausyksiköllä tai kaivinkoneeseen kiinnitetyllä kuvassa 25. olevalla hydraulikäyttöisellä vääntimellä. Asennusvaiheessa olisi tärkeätä saada paalut ruuvattua suoraan maahan 90 astetta horisonttilinjaa vastaan. Varsinkin kaltevilla alustalla tämä on ongelmallista. Tarkempaa suoruutta ja ruuvaustapahtuman kokonaissuoruuden määrittämiseksi ja sen tallennukseen tämä järjestelmä sopisi loistavasti tähän käyttötarkoitukseen.

Telakaivinkoneella suoritettavaan paalunasennukseen anturi asennuskoteloineen voitaisiin sijoittaa pyörittimen runkoon. Kaapelilla toteutettava tiedonsiirto ei tässä ratkaisussa ole paras mahdollinen ja tiedonsiirto kaivinkoneen hyttiin toteutettaisiin wlan- tai bluetooth-yhteyden avulla. Tietokantaan tallennus ja datan analysointi toisi tässä tapauksessa lisäarvoa paalutusprosessiin. Tärkeintä olisi, että saadaan reaaliaikaisesti tietoa paalutuksen suoruudesta esimerkiksi tablettiin, joka sijaitsee kaivinkoneen sisällä ja siten kaivinkoneen kuljettaja voi kaltevuuskulmaa muuttamalla tehdä muutoksia

paalutustapahtumaan järjestelmän antamien lukemien perusteella. Mittauspöytäkirjaan saadan tiedot paaluttamiseen tarvittavasta kiertovoimasta ja yksittäisen paalun suoritusdatasta.



Kuva 24. Käsisienteinen ruuvausyksikkö (Paalupiste Oy:n kuva-arkisto)



Kuva 25. Kaivinkoneasenteinen paalutusyksikkö (Paalupiste Oy:n kuva-arkisto)

## Lähteet

ABB Oy, TTT-käsikirja 2000-07, luku 23. Helsinki: ABB Oy. Viitattu 28.11.2022. Saatavissa [http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23\\_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf](http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/23_Kunnonvalvonta%20ja%20huolto.pdf)

CDON. GY-521 MPU-6050 3-akselinen gyro ja kiihtyvyyssmittari Arduinolle. Viitattu 30.11.2022 . Saatavissa [https://cdon.fi/lelut/gy-521-mpu-6050-3-akselinen-gyro-ja-kiihtyvyyssmittari-arduinolle-p48215447?gclid=EAlaIQobChMImbHZw8TV-wIVF-qyCh2GRgcYEAQYByABEgJzO\\_D\\_BwE&gclsrc=aw.ds](https://cdon.fi/lelut/gy-521-mpu-6050-3-akselinen-gyro-ja-kiihtyvyyssmittari-arduinolle-p48215447?gclid=EAlaIQobChMImbHZw8TV-wIVF-qyCh2GRgcYEAQYByABEgJzO_D_BwE&gclsrc=aw.ds)

Electronicwings (2022). Viitattu 2.11.2012. Saatavissa <https://www.electronicwings.com/raspberry-pi/mpu6050-accelerometergyroscope-interfacing-with-raspberry-pi>

Grafana Labs. Viitattu.15.11.2022. Saatavissa <https://grafana.com/>

Influxdata. Viitattu 9.11.2022. Saatavissa <https://www.influxdata.com/>

Kunnossapitoyhdistys. Mikkonen, H., Miettinen, J., Leinonen, P., Jantunen, E., Kokko, V., Riutta, E., Sulo, P, Komonen, K., Lumme, V.E., Kautto, J., Heinonen K., Lakka, S. & Mäkeläinen, R. 2009. Kuntoon perustuva kunnossapito: Käsikirja. Helsinki: KP-Media.

Lukka, K. 2001. Konstruktiivinen tutkimusote. Viitattu 8.9.2022. Saatavissa [https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/https://moodle.lut.fi/plu-ginfile.php/1287616/mod\\_resource/content/2/Tutkimusmenetelmist%C3%A4.pdf](https://metodix.fi/2014/05/19/lukka-konstruktiivinen-tutkimusote/https://moodle.lut.fi/plu-ginfile.php/1287616/mod_resource/content/2/Tutkimusmenetelmist%C3%A4.pdf)

OpenJS Foundation (a). Viitattu 29.11.2022. Saatavissa <https://nodered.org>

OpenJS Foundation (b). Viitattu 26.11.2022. Saatavissa <https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-python-function>

OpenJS Foundation (c). Viitattu 19.11.2022. Saatavissa <https://flows.nodered.org/node/node-red-contrib-influxdb>

Opetushallitus. 2022. Kunnossapito mekaniikka. Viitattu 20.11.2022. Saatavissa [http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_k2\\_varahtelymittaukset.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_k2_varahtelymittaukset.html)

Paalupiste Oy 2022

Raspberry Pi Foundation (a). About us. Viitattu 29.11.2022. Saatavissa

<https://www.raspberrypi.org/about/>

Raspberry Pi Foundation (b). Getting Started with your Raspberry Pi. Viitattu

29.11.2022. Saatavissa <https://www.raspberrypi.com/documentation/computers/getting-started.html>

Raspberry Pi Foundation (c). Getting Started with your Raspberry Pi. Viitattu

29.11.2012. Saatavissa <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>

Researchgate. Viitattu 20.11.2022. Saatavissa <https://www.researchgate.net/publication/320225884>

[figure/Raspberry-Pi-3-platform-board-Derek-Molloy-2016-The-Raspberry-Pi-platform-can-run\\_fig8\\_320225884](https://www.researchgate.net/publication/320225884)

SF-En 12413:2019. Viitattu 29.11.2022. Saatavissa <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/009856be-2abe-4783-b678-e87df651276e/en-12413-2019>

[log/standards/cen/009856be-2abe-4783-b678-e87df651276e/en-12413-2019](https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/009856be-2abe-4783-b678-e87df651276e/en-12413-2019)

Siemens. Viitattu 29.11.2022 Saatavissa [https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:12f4ce33-bf6c-4747-8749-c41f4c55107a/dffa-b10079-02-br-logo-](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:12f4ce33-bf6c-4747-8749-c41f4c55107a/dffa-b10079-02-br-logo-210x280-144.pdf)

[210x280-144.pdf](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:12f4ce33-bf6c-4747-8749-c41f4c55107a/dffa-b10079-02-br-logo-210x280-144.pdf)

Starelec (a). Alumiinikotelo 64x58x35mm IP65. Viitattu 30.11.2022. [https://www.starelec.fi/product\\_info.php?products\\_id=30043](https://www.starelec.fi/product_info.php?products_id=30043)

Starelec (b). Muovikotelo kiinnityskulmilla 64x58x35mm harmaa IP65. Viitattu

30.11.2022. Saatavissa [https://www.starelec.fi/product\\_info.php?products\\_id=25431](https://www.starelec.fi/product_info.php?products_id=25431)

TDK invensense (a). MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTrack-

ing™ Devices. Viitattu 29.11.2012. Saatavissa <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>

TDK invensense (b). MPU-6050 Six-Axis (Gyro + Accelerometer) MEMS MotionTrack-

ing™ Devices. Viitattu 20.11.2012. Saatavissa <http://invensense.wpenGINEpowered.com/wp-content/uploads/2020/06/PS-MPU-6500A-01-v1.3.pdf>

Wikipedia. Raspberry Pi. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa [https://fi.m.wikipedia-](https://fi.m.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)

[dia.org/wiki/Raspberry\\_Pi](https://fi.m.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi)