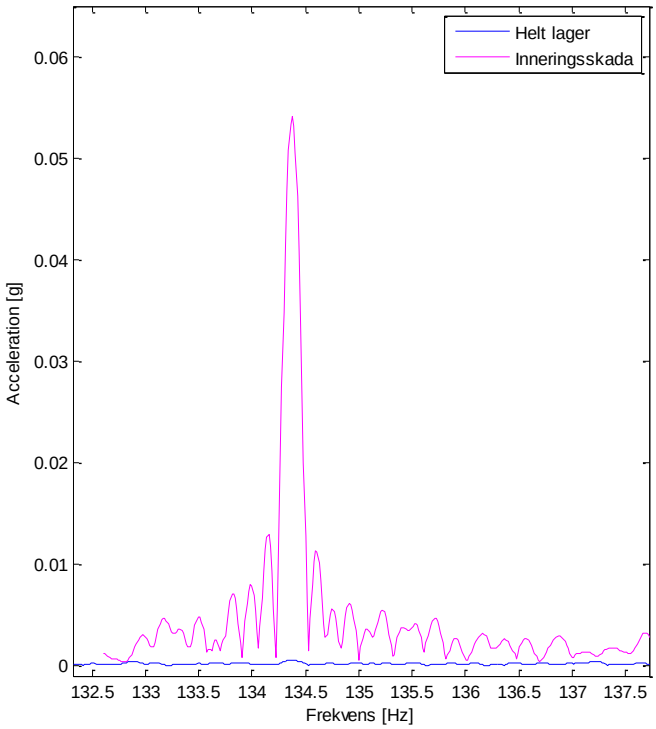
CHALMERS



Prototyp för konditionsbaserat underhåll med simpla sensorer

Analys av vibrationsdata som underlag för konditionsbaserat underhåll av maskiner

Kandidatarbete inom Produkt- och produktionsutveckling

SOFIA BÖRJESSON

VIKTOR HOLCK

KIM KARLSSON

KARL-OSCAR SKALBERG

Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

Sammandrag

Konditionsbaserat underhåll är en underhållsstrategi som ökar resursutnyttjandet i förhållande till de traditionella underhållsstrategierna, det vill säga avhjälpande och förebyggande underhåll. En nackdel med konditionsbaserat underhåll är dock höga uppstartskostnader jämfört med de andra strategierna.

Projektet syftade till att undersöka om enkel hårdvara kunde användas för att via mätning av vibrationer ge underlag för bedömning av roterande maskiners kondition. Projektet utfördes på Chalmers tekniska högskola och kombinerades med studiebesök hos företag.

Utförandet av projektet baserades på utvecklingsplattformen .NET Gadgeteer där de viktigaste komponenterna var huvudkortet ”FEZ Raptor” och accelerometern ”Accel G248”. Inom ramarna för projektet utvecklades även en testmiljö, mjukvara för datainsamling samt analysmetod för insamlad mätdata. Validering av mät- och analysmetoder visade att det var möjligt att detektera fel däribland slitna skärstål och lagerskador. Test i industri detekterade lagerskada cirka en vecka innan lagret verkligen havererade. Därmed har en enkel form av konditionsbaserat underhåll kunnat genomföras med simpla sensorer och analysmetoder.

Abstract

Condition Based Maintenance is a maintenance strategy that leads to increased resource utilization relative to traditional matinenance strategies such as run-to-failure and preventive maintenance. However, one of the disadvantages of condition based maintenance is the high start-up cost compared to the other maintenance strategies.

The purpose of the thesis was to investigate whether simple hardware could be used to, by measuring vibrations, provide a basis for assessing the condition of rotating machinery. The thesis was conducted at Chalmers University of Technology in combination with field trips to companies.

Execution of the thesis was based on the rapid-prototyping environment .NET Gadgeteer of which the most important components were the mainboard "FEZ Raptor" and the accelerometer "Accel G248". Within the scope of the project a testing environment, software for data collection and a method for analysis of the collected data were also developed. Validation of the measuring and analysis methods showed that it was possible to detect errors such as inner and outer race defects on bearings as well as worn out turning tools. Tests in a factory detected a faulty bearing which subsequently failed approximately one week later. Thus an elementary form of condition based maintenance has been implemented with simple sensors and analysis.

Förord

Rapporten är en sammanfattning av ett kandidatarbete som genomfördes under vårterminen 2015 på Chalmers tekniska högskola.

Projektet har varit både roligt och lärorikt och detta mycket tack vare givande företagskontakt. Företag har visat stort intresse, enagagemang och hjälpsamhet. För validering upplät Autotube sin vibrator vilket Jan Börjesson hjälpte till med. Björn Lenér från IFM har varit till väldigt stor hjälp, bidragit med mycket kunskap, inspiration och upplät även IFMs demorigg för tester samt lånade ut ett av företagets mätverktyg. På SCA gav Peter Kebke oss möjlighet att testa prototypen i verklig industri vilket har varit väldigt viktigt för att verifiera funktionen. Då möjlighet fanns att testa på lager i drift och som senare också havererade. Andreas Lood från Schaeffler Group har svarat på många frågor och informerat kring företagets lager och utrustning för konditionsbaserat underhåll. Vidare vill ett tack också riktas till handledare Jon Andersson som med stor entusiasm handlett projektet.

Sofia, Viktor, Kim och Karl-Oscar, Chalmers tekniska högskola, Göteborg 2015

Ordlista

CATIA V5 - Computer Aided Three-dimensional Interactive Application, programvara för 3D-modellering

CSV - Comma separated value

G - Gravitationskonstanten, 9,81 m/s^2

FFT - Fast Fourier Transform, snabb Fouriertransform

Fouriertransform - Generalisering av Fourierserie, förenklat förklarat en transform som transformerar mellan tids- och frekvensplan

Frekvensplanet - En graf över frekvensplanet visar hur mycket av signalen som återfinns i varje given frekvens

IP-klass – Från engelskans ”Ingression Protection”, klassificering av motståndskraft mot inträngande objekt, t.ex. damm, och vätska.

MATLAB - Matrix Labratory, programvara för matematiska och tekniska beräkningar

PSL - Production Systems Laboratory, lokal på Chalmers tekniska högskola

PWM - Pulse-width modulation

RMS - Root Mean Square

Sampeltid - Används i denna rapport som tid mellan två sampel (datapunkter)

Samplingsfrekvens - Frekvensen samplingen sker i, beräknas (1/sampeltiden)

Tidsplanet - Hur en signal förändras över tid

Innehållsförteckning

1 Inledning 1
1.1 Syfte 2
1.1 Uppgift 2
1.1.1 Deluppgifter 2
1.2 Avgränsningar 2
2 Teoridel 5
2.1 Hård- och mjukvara 5
2.1.1 .NET Gadgeteer 5
2.1.2 Arduino™ Uno 5
2.2 Konditionsbaserat underhåll 5
2.2.1 Definition 5
2.2.2 Historia 5
2.2.3 Metod/Utförande 6
2.2.4 Nackdelar och framtidsmöjligheter 6
2.3 Vibrationsmätning 6
2.3.1 Sensortyper 7
2.4 Befintliga produkter 7
2.4.1 Lutron Electronics VB-8201HA 8
2.4.2 IFM Electronics VNB001 8
2.4.3 FAG SmartCheck 8
2.4.4 SPM Instrument MG-4 8
3 Metod 9
3.1 Inventering av kundbehov 9
3.2 Produktutvecklingsmetod 9
3.3 Datainsamling 10
3.4 Analysmetod 10
3.5 Reflektion 10
4 Steg 1 – Indelning av projektet 11
4.1 Företagskontakt 1 11
4.1.1 Genomförande Företagskontakt 1 11
4.1.2 Resultat Företagskontakt 1 11
4.1.3 Reflektion Företagskontakt 1 12
4.2 Testmiljö 12
4.2.1 Genomförande testmiljö 12
4.2.2 Resultat testmiljö 16
4.2.3 Reflektion testmiljö 17

4.3 Hårdvara för datainsamling 18
4.3.1 Genomförande av hårdvara för datainsamling 18
4.3.2 Resultat av hårdvara för datainsamling 18
4.3.3 Reflektion av hårdvara för datainsamling 19
4.4 Mjukvara för datainsamling 19
4.4.1 Genomförande av mjukvara för datainsamling 19
4.4.2 Resultat av mjukvara för datainsamling 19
4.4.3 Reflektion av mjukvara för datainsamling 20
4.5 Inledande analys 20
4.5.1 Inledande tester 20
4.5.2 Frekvensanalys 21
4.5.3 Resultant 22
4.5.4 Tidsvariationer 23
4.5.5 Begränsningar hos accelerometer 24
4.6 Tester och validering 25
4.6.1 Teoretisk indata 25
4.6.2 Tester med kontrollerad indata från vibrator 26
4.6.3 Tester på testmiljö 34
5 Steg 2 – Vidareutveckling och fortsatta tester 37
5.1 Företagskontakt 2 37
5.1.1 Genomförande Företagskontakt 2 37
5.1.2 Resultat Företagskontakt 2 38
5.1.3 Reflektion kring Företagskontakt 2 38
5.2 Hårdvara för datainsamling 38
5.2.1 Genomförande för datainsamling 38
5.2.2 Resultat för datainsamling 39
5.2.3 Reflektion för datainsamling 39
5.3 Inkapsling 39
5.3.1 Genomförande Inkapsling 39
5.3.2 Resultat Inkapsling 41
5.3.3 Reflektion Inkapsling 42
5.4 Mjukvara för datainsamling 42
5.4.1 Genomförande av mjukvara för datainsamling 43
5.4.2 Resultat av mjukvara för datainsamling 43
5.4.3 Reflektion av mjukvara för datainsamling 43
5.5 Vidareutveckling av analysmetod 44
5.5.1 Accelerometer med större mätintervall 44

5.5.2 Kalibrering för frekvensfel 44
5.5.3 Hastighet och amplitud 45
5.5.4 Optimering av antal datapunkter 47
5.5.5 Lageranalys 49
5.6 Tester och validering 53
5.6.1 Lagerskador 53
5.6.2 Tester på maskiner 63
5.6.3 Test i industrin 66
6 Diskussion och slutsats 69
6.1 Framtid 69
7 Referenser 71
Bilaga A – Funktionell kravspecifikation testmiljö I
Bilaga B – Referenslösning II
Bilaga C – Testmiljö Konceptgenerering IV
Bilaga D – Konceptval testmiljö X
Bilaga E - Ritningar på testmiljö XII
Bilaga F - Funktionell kravspecifikation inkapsling XV
Bilaga G - Konceptgenerering Inkapsling XVI
Bilaga H - Konceptval inkapsling XVIII
Bilaga I – Mätningar i industri XX
Bilaga J – CSV fil XXIII

1 Inledning

Ett stopp i tillverkningen inom bilindustrin kan kosta 175 000 kr[1] i minuten, vilket visar vikten av en störningsfri produktion [1]. För att uppnå en störningsfri produktion är underhåll en av grundpelarna. Underhåll är åtgärder avsedda att behålla eller återställa en komponent eller ett system av komponenter till ett sådant tillstånd att en krävd funktion kan utföras. Traditionellt sett har två former av underhåll förekommit, en som bygger på att enheten körs tills den fallerar (avhjälpande underhåll) och en som baseras på att underhåll sker i förebyggande syfte (förebyggande underhåll) i intervall baserat på erfarenhet [2].

De traditionella underhållsstrategierna är dock inte utan brister. Avhjälpande underhåll innebär till exempel många och oförutsedda stopp i produktionen eftersom underhåll endast sker när problem uppstår [2]. De oförutsedda stoppen leder förutom förlorad kapacitet också till säkerhetsbrister och onödigt komplicerade reparationer [2]. Förebyggande underhåll drabbas av färre oförutsedda stopp men har istället problemet att komponenter servas och byts ut trots att de kan ha lång driftstid kvar. Detta leder till onödiga kostnader för företag samt påverkar miljön negativt [2].

Ett sätt att komma till rätta med problemen hos de båda traditionella underhållsstrategierna är konditionsbaserat underhåll [3]. En maskins underhållsbehov bestäms då genom mätningar, ofta genom kontinuerlig insamling av vibrationsdata eller att vibrationsdata samlas in av ett portabelt instrument under en kort period [4]. Mätresultaten analyseras sedan och på så sätt kan livslängden och konditionen hos olika komponenter bestämmas. Med hjälp av detta utförs underhåll då det verkligen behövs samtidigt som antalet oförutsedda stopp hålls till ett minimum. Detta är en metod som börjar användas allt mer eftersom 99 % av alla mekaniska fel avger indikationer innan maskinen går sönder [5]. Vanliga indikationer är nya vibrationer eller vibrationsmönster men mätningar och analys av bland annat effekt, ljud och temperatur förekommer också. För en exakt analys krävs dock mycket kunskap, högkvalitativa mätinstrument och kraftfull mjukvara vilket gör att en noggrann metod för konditionsbaserat underhåll är dyrt att implementera [3].

Konditionsbaserat underhåll används idag endast till viss del i industrin [6]. Detta eftersom de höga implementeringskostnaderna ofta hindrar implementering i hela produktionen och då prioriteras de mest kritiska maskinerna. En annan starkt bidragande faktor till att konditionsbaserat underhåll inte används i högre utsträckning är att ett visst intresse och kunskap kan behövas för det företag där implementering ska ske. Dessa maskiner är ofta dyra, har hög utnyttjandegrad, har en mycket viktigt roll i tillverkningsprocessen och ett stopp i dessa maskiner orsakar stora problem för resten av produktionen. Även de mindre kritiska maskinerna påverkar produktionen och ett minskat antal oförutsedda stopp bland dessa hade gynnat effektiviteten. Dock är idag kostnaderna för att implementera konditionsbaserat underhåll höga vilket hindrar implementering på alla typer av maskiner [6].

En snabb undersökning av marknaden visar att många produkter och metoder som säljs är väldigt precisa och innehåller avancerade instrument och analysmetoder vilket leder till ett högt pris. En enklare produkt och metod bör kunna implementeras till en lägre kostnad och därmed användas på fler maskiner. En sådan lösning kanske inte kan förutsäga alla fel eller arbeta med samma precision som en mer komplex variant men kan vara tillräcklig för konditionsbaserat underhåll på mindre kritiska maskiner.

”Machinery distress very often manifests itself in vibration or a change in vibration pattern. Vibration analysis is, therefore, a powerful diagnostic tool and troubleshooting of major process machinery would be unthinkable without modern vibration analysis.” [3]

[1] $22 000/minut år 2006, omräknat till SEK och justerat för inflation.

1.1 Syfte

Kandidatarbetes syfte är att undersöka om enkla sensorer med tillhörande hårdvaruplattform kan erhålla tillräckligt hög noggrannhet för att utifrån analys av uppmätta fysiska signaler avgöra en maskins behov av underhåll. Detta för att förenkla implementering av konditionsbaserat underhåll.

Som tidigare nämnts är konditionsbaserat underhåll troligtvis framtidens underhållsstrategi men är idag dyrt att implementera vilket hindrar många aktörer. Det är önskvärt att i så stor utsträckning som möjligt använda sig av konditionsbaserat underhåll då det är fördelaktigt ur både ett ekonomiskt och hållbarhetsperspektiv.

Ett led i att göra tekniken mer tillgänglig är att minska uppstartskostnaderna. Detta ska kandidatarbetet bidra till genom att utföra tester som avgör om det är möjligt att använda enkla sensorer och analysmetoder. Testerna ska avgöra huruvida sensorerna klarar av att samla in data med tillräckligt hög kvalité, om enkla analysmetoder kan användas för analys och dessutom om beräkningarna kan göras direkt i en mikrokontroller.

Resultatet från kandidatarbetet hoppas lägga en god grund för att kunna utveckla enkla och billiga tillämpningar av konditionsbaserat underhåll i framtiden. I projektet kommer även en prototyp tas fram för att testa och visa att enkel hårdvara och analysmetoder räcker för att införa konditionsbaserat underhåll.

1.1 Uppgift

Huvuduppgiften är att med hårdvaruplattformen .NET Gadgeteer skapa prototyp för att med vibrationsdata som grund identifiera fel som skulle kunna användas för konditionsbaserat underhåll. Genom att avläsa och analysera vibrationer skall maskinens behov av underhåll bestämmas. För att lösa huvuduppgiften bryts den ner i deluppgifter.

1.1.1 Deluppgifter

Huvuduppgiften resulterar i följande deluppgifter.

- Konstruera en testmiljö som ger förutsättningar att utveckla och validera resultat från de metoder som används för analys samt den konfiguration som används för mätplattformen.
- Konstruera och konfigurera mätplattformen på ett sådant sätt att kvalité och kvantitet erhålls för utdata så att frekvensanalys kan utföras.
- Konstruera mjukvara för analys av mätdata på ett sådant sätt att fel kan identifieras och förutsägas manuellt.

1.2 Avgränsningar

Inledande litteraturstudier har visat att vibrationsmätning kan användas för att förutsäga mekaniska fel. För att avgränsa arbetet begränsas mätningarna till vibrationer på roterande maskiner. Om andra typer av mätningar underlättar arbetet och samtidigt ger likvärdiga eller förbättrade resultat kan även detta göras.

Plattformen .NET Gadgeteer, se avsnitt 2.1.1, med tillhörande sensorer kommer att användas för mätning av vibrationer. Det huvudkort som kommer att användas är ”FEZ Raptor” vilket är det kraftfullaste kortet som finns tillgängligt för plattformen. Dessa komponenter finns redan tillgängliga för gruppen och erbjuder god prestanda jämfört med andra plattformsalternativ. Vad det gäller analys av data ska denna genomföras med relativt enkla analysmetoder såsom mönster för frekvensamplitud. Tolkningen av analysen skall ske manuellt och om möjligt med enklare algoritmer för ett specifikt fel och maskin.

Den färdiga hård- och mjukvarulösningen skall ej vara en färdig produkt utan en prototyp som klarar att identifiera ett eller ett fåtal fel. Nedlagd arbetsinsats för projektets genomförande skall ej behöva överstiga kursens storlek. Arbetet skall främst baseras på tester snarare än beräkningar, särskilt avseende

vibrationsmönster och förändringar av dessa men även för konstruktion av test- och mätplattform. Arbetet kommer att i huvudsak genomföras på Chalmers med den utrustning som där finns att tillgå. Visst material kan köpas in men begränsas av den budget Chalmers har för utförande av kandidatarbetet.

2 Teoridel

I det här avsnittet beskrivs teori om de områden som berör projektet som hård- och mjukvara, konditionsbaserat underhåll, vibrationsmätning samt andra liknande projekt.

2.1 Hård- och mjukvara

I det här avsnittet behandlas .NET Gadgeteer och Arduino™ Uno, de två hårdvaruplattformarna som används inom projektet.

2.1.1 .NET Gadgeteer

.NET Gadgeteer är en standard och prototypplattform som skapats och underhålls av Microsoft [7] [8]. Plattformen kombinerar fördelarna med objektorienterad programmering, sammansättning utan behov av lödning och snabb konstruktion av fysisk produkt med hjälp av CAD [8]. Plattformen skapades först som ett internt prototypverktyg hos Microsoft men det intresse som fanns för plattformen gjorde att den kom att bli tillgänglig för utbildning och hobbybruk [9].

Hårdvaran för plattformen består av huvudkort med mikrokontroller och moduler som kan kopplas till dessa [7]. Plattformen har idag flertalet hårdvarutillverkare och bygger på .NET Micro Framework vilket möjliggör användande av Visual Studio och det objektorienterade programmeringsspråket C# för utveckling [8].

Plattformen är uppbyggd av moduler som enkelt kan kopplas samman med ett standardiserat gränssnitt och tillföra funktionalitet såsom ljuduppspelning, olika former av displayer, sensorer och kommunikationsmöjligheter [7] [8]. Den mjukvara som behövs för modulernas funktion finns tillgänglig och behöver därför inte utvecklas från grunden vilket kraftigt minskar tidsåtgången för utveckling [7]. Möjligheten att kombinera och bygga ut funktionaliteten med moduler möjliggör skapande av såväl enkel som komplex utrustning med plattformens hårdvara [8]. Den kraftfulla kombinationen av plattformens hård- och mjukvarumöjligheter möjliggör snabbt skapande av prototyper och produkter med hög flexibilitet [8].

2.1.2 Arduino™ Uno

Arduino™ Uno är en mikrokontroller baserad på Open Source som lämpar sig väl för många typer av projekt. Exempelvis kan olika typer av motorstyrning, sensorer, ljus, displayer och kommunikationsmoduler användas vilket ger stora möjligheter att anpassa plattformen för användningsområdet. Plattformen är billig och kompatibel med de flesta operativsystem [10].

2.2 Konditionsbaserat underhåll

Konditionsbaserat underhåll är en underhållsstrategi som föreslår beslut om reparation eller utbyte av komponenter med hjälp av nuvarande eller framtida kondition hos maskinen [11]. Metoden kommer beskrivas utförligare i detta teoriavsnitt.

2.2.1 Definition

Underhållsteknik definieras som ”Åtgärder för att vidmakthålla eller återställa prestationsförmågan hos tekniska utrustningar, såväl hos ett helt tekniskt system som hos en enstaka komponent i ett system” [2]. Det kan alltså innefatta allt från planering till utförande av service såsom smörjning eller det mekaniskt arbete för att reparera en komponent.

2.2.2 Historia

Den första typen av underhåll innebär ingen planering eller förebyggande arbete, då används komponenten tills den inte längre fyller sin funktion och först då reperaras eller byts den ut [3]. Denna typ av underhållsstrategi kallas avhjälpande underhåll och kallas på engelska ofta för ”run-to-failure” [3] [2].

För att minska antalet oförutsedda stopp utvecklades en ny strategi, förebyggande underhåll, där underhåll sker i förebyggande syfte, ofta baserat på ett förutbestämt tidsintervall oberoende av komponentens kondition [3]. Detta används i industrin idag men denna typ av underhåll maximerar inte utnyttjandet utan leder till att komponenter byts ut för tidigt vilket skapar slöseri [11]. Kraven på tillförlitlighet i produktion ökar ständigt vilket leder till att kostnaden för förebyggande underhåll ökar ännu mer då fler förebyggande åtgärder krävs för att uppnå en högre tillförlitlighet [3].

För att förhindra höga kostnader och maximera utnyttjandet av komponenter kan konditionsbaserat underhåll implementeras [3]. Konditionsbaserat underhåll är en effektiv metod som rekommenderar underhållsåtgärder baserat på tillståndskontroll [3]. Onödigt underhåll undviks genom att underhållsåtgärder endast sker då komponenten visar tecken på defekter [3]. Den enklaste typen av konditionsbaserat underhåll är då tillståndskontroll sker med endast visuell kontroll av komponenten och beslut om underhåll tas baserat på erfarenhet. Detta är dock en osäker metod [3].

Moderna och mer pålitliga metoder för konditionsbaserat underhåll baseras på mätningar av framförallt vibrationer. För att minska kostnader för inspektion och öka pålitligheten och därmed kostnader för oförutsedda stopp, sker tillståndskontroll av komponenten genom en sensor som mäter kontinuerligt eller genom ett portabelt instrument som mäter periodiskt [11].

2.2.3 Metod/Utförande

Moderna typer av konditionsbaserat underhåll består vanligtvis av tre steg, datainsamling, databehandling och beslutsfattande [3]. Datainsamlingen sker, som tidigare nämnts, genom tillståndskontroll. Data från tillståndskontrollen behandlas sedan för att filtrera bort störningar och med hjälp av algoritmer hitta variationer som tyder på begynnande fel [11]. Beslut tas sedan om när och hur underhåll ska ske [11].

Analys av tillståndskontroll är en bra metod för att förutsäga fel eftersom 99 % av alla mekaniska fel avger någon typ av indikation innan fel sker [5]. Vanliga indikationer är förändringar i vibrationer, värmeökning eller förändringar i olja [11].

2.2.4 Nackdelar och framtidsmöjligheter

Konditionsbaserat underhåll kräver dock mycket kunskap för att kunna användas på ett önskat sätt [11]. Det krävs tillförlitlig data och framförallt kunskap om implementering för att kunna införa effektiva algoritmer vilket ger en hög implementeringskostnad [11] [3]. För vissa typer av tillämpningar kan det vara svårt att få relevant tillståndsdata vilket gör det dyrt och i princip omöjligt att förutsäga fel med hjälp av analys [11]. En annan aspekt att fundera på innan konditionsbaserat underhåll implementeras är hur metoden för användning av resultatet ska se ut för att på effektivaste sätt utföra planering och praktiska underhållsåtgärder [11].

Idag finns ingen allmän metod eller produkt för att utföra konditionsbaserat underhåll och de produkter som finns är väldigt specificerade på en viss komponent eller en viss bransch [11]. Detta beror på att olika maskiner och branscher har väldigt olika krav [11]. Men är det möjligt att utveckla en universell metod som passar många olika tillämpningar kan det vara till stor nytta [12]. Om tillståndskontroll har implementerats på stora delar av produktionen finns möjligheter att använda detta även för andra tillämpningar i framtiden [12]. Ett exempel på det kan vara att analysera produktionen ur ett helhetsperspektiv med hjälp av tillståndsdata för att bland annat utvärdera total effektivitet [12].

2.3 Vibrationsmätning

Vibrationsmätning är den vanligast förekommande och mest kostnadseffektiva metoden för att avgöra en maskins kondition [13]. Metoden bygger på att det i roterande maskiner under drift naturligt förekommer vibrationer och att man genom att mäta variationer hos dessa kan avgöra om något i maskinen är på väg att fallera. På så sätt kan underhåll utföras innan ett eller flera kritiska fel orsakats.

Metoden som sådan är inte ny, redan 1974 specificerades grundläggande riktlinjer för hur mätningarna skulle utföras och vilka gränsvärden som skulle gälla av det internationella standardiseringsorganet ISO. Denna standard, ISO 2372:1974, har sedan dess reviderats till ISO 10816-1:1995 och dessa är de standarder företag verksamma inom området hänvisar till i beskrivningen av vad deras produkter klarar av att mäta alternativt är anpassade till [13] [14] [15] [16] [17].

Vibrationsmätning enligt ISO 10816 görs horisontellt, vertikalt eller axiellt och beroende på maskintyp är frekvensområdet flexibelt mellan en undre gräns på 2 eller 10 Hz och en övre gräns på 1000 kHz [13]. Mätningarna görs ofta med accelerometer och är ett RMS-värde på hastighet, acceleration eller förskjutning vilket i standarden benämns som ”vibrationsmagnitud”. Standarden har delats upp för att gälla flera olika typer och storlekar av maskiner, till exempel ”ISO 10816-2:2009 Land baserade ångturbiner och generatorer större än 50 MW med en normal arbetshastighet på 1500 RPM, 1800 RPM, 3000 RPM och 3600 RPM” och den ur projektets synvinkel mer intressanta ”ISO 10816-3:2009 Industriella maskiner med nominell effekt över 15 kW och nominell hastighet mellan 120 och 15 000 RPM där mätningarna görs in-situ”[2] [18].

Hos roterande maskiner är det inte ovanligt att eventuella fel skapar vibrationer som direkt kan härledas till motorns varvtal [5] . På så sätt är det i vissa fall möjligt att inte endast förutsäga att ett fel kommer uppstå utan även vilket fel genom att analysera de uppkomna vibrationerna [19].

2.3.1 Sensortyper

Vid mätning av vibrationer är det främst två olika sensortyper som brukar användas, piezo eller mikroelektromekaniska (MEMS). Piezo-accelerometrar använder sig av piezoelektriska samband för att mäta acceleration, det vill säga att de använder ett material vars resistans ändras när det utsätts för en kraft varpå förändringen mäts och kan omvandlas till acceleration [20].

MEMS-accelerometrar drar istället nytta av de framsteg som gjorts inom framställningen av integrerade kretsar, så som etsning och mikrolitografi, och kan förenklat sägas vara miniatyriserade mekaniska och elektro-mekaniska maskinelement [21] . I arbetet användes en mikroelektromekanisk sensor som säljs av GHI Electronics, se avsnitt 2.1.1 samt 4.3, under namnet Accel G248 vilken är baserad på kretsen MMA8453Q från Freescale Semiconductor, Inc. [22] [23]. MEMS-sensorerna kännetecknas bland annat av låg produktionskostnad. Vanliga användningsområden är till exempel för att utlösa krockkuddar i bilar samt stegräknare och liknande [20] [24].

2.4 Befintliga produkter

Produkter liknande projektets mål finns idag på marknaden, några av aktörerna är SKF, IFM Electronics, SPM Instrument, Kittiwake Holroyd, Rockwell Automation och Schaeffler. Gemensamma nämnare är att det erbjuds både handhållna instrument för att avgöra en maskins befintliga kondition samt lösningar för fast installation avsedda att ge kontinuerlig övervakning, då inte sällan med möjlighet att ”larma” till PLC eller via GSM.

Handhållna mätinstrument används ute i industrin som ett alternativ till kontinuerliga system för vibrationsmätning. Vilket kan genomföras genom att personal utför mätningar inom ett visst intervall. Detta medför dock att sannolikheten för att man utför mätningar vid rätt tidpunkt minskar [24].

Av intresse för arbetet bedöms MG-4, VNB001 samt SmartCheck från SPM Instrument, IFM Electronics respektive Schaeffler Group vara då de uppfyller krav liknande de som ställs på projektets prototyp. Bland annat har de ingångar för flera olika sensorer och kan alltså mäta på flera punkter samtidigt, inkapslingen är IP-klassad och när ett tröskelvärde nås kan de larma till exempelvis PLC. MG-4 har även möjlighet att larma trådlöst via GSM-nätet [15].

[2] Bägge titlar fritt översatta.

2.4.1 Lutron Electronics VB-8201HA

Vibrationsmätare VB-8201HA är ett handhållet mätinstrument som kan användas för att mäta olika typer av vibrationer. Instrumentet fungerar så att man håller mätarens givare mot den punkt som ska mätas, montering kan ske med hjälp av en magnet. Vibrationer kan mätas i både acceleration och hastighet i kombination med att instrumentet kan ställas in på topp (peak) eller medelvärde (RMS) för att erhålla önskad utdata. Instrumentets frekvensområde ligger mellan 10 och 1000 Hz och kan mäta hastighet mellan 0.5-199.9 mm/s och acceleration mellan 0.5-199.9 m/s^2 [25] .

2.4.2 IFM Electronics VNB001

VNB001 avsedd för fast montering och används främst till kontinuerlig övervakning, även om den också kan användas som ett handhållet instrument. VNB001 är MEMS-baserad och mäter vibrationsmagnitud i enlighet med ISO 10816. Mätning sker i en riktning och mätområdet är 0-500 mm/s, beroende på vibrationsfrekvensen, eller 2-1000 Hz. Liksom VB-8201HA kan VNB001 ställas in på att visa peak- eller RMS-värden. Vibrationsmätningarna kan kombineras med exempelvis temperaturmätning genom att ansluta en sådan sensor till mätaren. VNB001 har en kapslingsklass IP-67 vilket medger montering i utsatta miljöer inom industrin då enheten är dammtät och vattentät. När VNB001 används för kontinuerlig övervakning kan den lagra mätvärden i upp till tre år samt ”larma” till PLC om ett tröskelvärde uppnås.

Figur 1. Vibrationsmätare VNB001

2.4.3 FAG SmartCheck

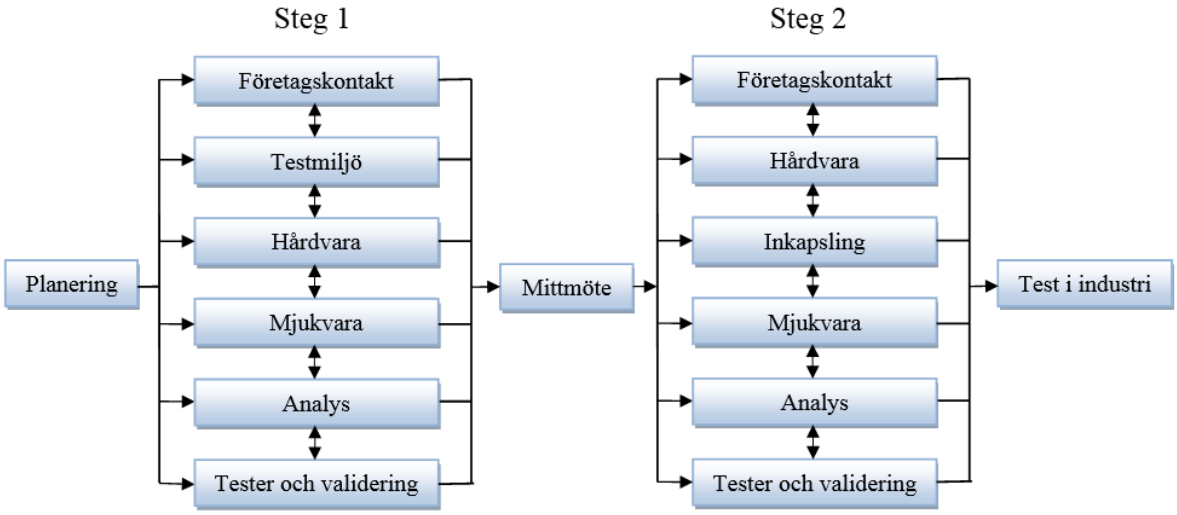
Komplett lösning med inlärningsförmåga. Monteras direkt på maskinen som ska övervakas och fastställer sedan själv referensnivån efter rådande förhållanden och visar sedan status genom att med en LED blinka grönt, gult eller rött i stigande grad av allvarlighet för felet. Utöver möjlighet att mäta temperatur och vibrationer direkt i huset kan sensorer anslutas för ökad funktionalitet. Dessutom finns möjlighet för anslutning till nätverk och därigenom fjärrstyrning samt avläsning av värden utan att vara på plats. På så sätt kan övervakning och analys utföras på distans och rekommendationer om underhåll göras utan att kunden själv behöver ha någon särskild kunskap.

2.4.4 SPM Instrument MG-4

Används för kontinuerlig övervakning. MG-4 har ett ställbart mätområde med undre gräns på 3, 10 eller 100 Hz och övre gräns på 1000 eller 2000 Hz. Produktens inkapsling är IP-klassad, IP-65, samt medger väggmontering. Anslutning till PLC är möjlig, samt även att sända konditionsinformation över GSM. MG-4 kan mäta vibrationstal samt avgöra lagerkondition med hjälp av stötpulsmätning.

3 Metod

Det här avsnittet beskriver de metoder som användes under arbetet för att uppnå de olika deluppgifterna i projektet. Huvudmetodiken i projektet utfördes genom en iterativ process och arbetet med de olika områdena i projektet utfördes parallellt, se Figur 2. Utvecklingen delades upp i steg 1 och steg 2, där steg 1 är på mer grundläggande nivå och steg 2 bygger på vidareutveckling av steg 1.



Figur 2. Blockdiagram över projektets två steg

Resterande metoder som användes var inventering av kundbehov, produktutvecklingsmetoden Värdemodellen, datainsamling och analysmetod för utförande av de olika stegen.

3.1 Inventering av kundbehov

För att undersöka potentiella kunders behov genomfördes två intervjuer, en kortare och en längre, med en representant från Swedish Match respektive IFM Electronics. Upplägget för bägge intervjuerna var att ha några förutbestämda frågor och sedan låta intervjuaren ha möjlighet att styra intervjun i den riktning som bedömdes mest intressant.

Eftersom personerna som intervjuades hade skilda arbetsroller ställdes inte exakt samma frågor vid de olika intervjuerna, fokus vid intervjun med Swedish Match låg på att undersöka hur intressant konditionsbaserat underhåll skulle vara för dem samt om, och i så fall var, de implementerade det någonstans i verksamheten idag. Då intervjupersonen från IFM i huvudsak arbetade som Product Marketing Director låg fokus där istället på att ta reda på vad han upplevde var de vanligaste kundkraven, tekniska detaljer vid mätning samt de största utmaningarna vid implementation av konditionsbaserat underhåll.

3.2 Produktutvecklingsmetod

Produktutvecklingsmetoden Värdemodellen har använts som underlag för metod och arbetsmodell för produktframtagning under projektet. Modellen beskriver ett metodiskt sätt att arbeta för att skapa kundvärde och utföra produktutvecklingsprojekt. Metoden innebär att skapa kundvärde vilket är ett viktigt begrepp att uppnå inom produktutveckling för att tillfredsställa kunden [26]. För att utföra ett bra utvecklingsarbete kommer metoder såsom kravspecifikation, referenslösning, systematiska metoder för konceptval och konceptgenerering att användas. Eftersom projektet inte kommer generera en färdig slutprodukt kommer vissa delar av Värdemodellen att bortses från då de inte är relevanta. Samt att de olika utvecklingsområdena i projektet skiljer sig så kommer de att vara framtagna med olika steg i Värdemodellen utifrån olika behov. Produktutvecklingsmetoden kommer användas för att generera en testmiljö samt inkapsling se avsnitt 5.3, av hårdvaruplattformen .NET Gadgeteer se avsnitt 2.1.1.

3.3 Datainsamling

För att registrera och lagra data vilken kan användas för analys av vibrationer har plattformen .NET Gadgeteer, se avsnitt 2.1.1, med tillhörande moduler använts. Mer om hårdvarukonfigurationen finns beskrivet i avsnitt 4.3 och 5.2 där konfigurationen beskrivs för de två stegen i genomförandet av projektet. Plattformens mjukvara har skapats i Microsofts utvecklingsmiljö Visual Studio 2013 [27]. Det programmeringsspråk som använts för mjukvaruutvecklingen är C# då det är ett välanvänt språk för plattformen [28]. Detta medför bättre tillgång på exempelkod och information jämfört med andra alternativ, drivrutiner för plattformen är även de skrivna i språket.

3.4 Analysmetod

Med analys avses i rapporten sättet att läsa in, behandla och visualisera data från mätningar. Det som analyserats är data från ett SD-kort med information om tid och acceleration i x-, y- och z-led. Analysens uppgift är att visualisera resultatet på lämpligt sätt utifrån vilken information som önskas.

För att åstadkomma detta används numeriska beräkningsmetoder med hjälp av programvaran MATLAB. Numeriska beräkningar är lämpligt då stora mängder data ska hanteras. Andra programvaror hade kunnat användas men då MATLAB fanns tillgänglig samt innehöll den funktionalitet som behövdes valdes denna.

Metoden för att bearbeta och visualisera information om vibrationen hos maskinen har utvecklats genom att lägga till nya funktioner och återkoppla med valideringstester. Detta eftersom projektet framförallt skulle baseras på tester. Vidareutveckling och validering har skett kontinuerligt under hela projektets gång. Då syftet är att använda enkla analysmetoder har enklast möjliga lösning testats i första hand. Valideringsmetoder har varierat beroende på vad för metod som ska validerats men har bland annat varit teoretisk indata, mätningar med kända vibrationer eller fel.

3.5 Reflektion

Ett alternativ till den iterativa processen skulle kunna varit att fokusera på en deluppgift i taget, utvecklingen av testmiljön hade först kunnat slutföras, därefter mjukvaran för datainsamling och sist mjukvaran för analys. Denna metod valdes bort då ansvarsfördelningen blev tydligare om utvecklingen skedde parallelt. Risken att arbeta med ett område i taget skulle också varit att om ett område tar längre tid än förväntat skulle ett annat område kunna behöva hoppas över helt då tiden är begränsad. Med metoden som valdes kunde tydliga ansvarsområden delas upp och arbetet gick lättare att fördela även om viss skillnad i arbetsbelastning under vissa perioder förekom då delarna berodde på varandra.

Produktutvecklingsmetoden Värdemodellen valdes då den har stort kundfokus vilket har varit givande då kundkontakten har lett till många givande samtal och tester. Det negativa med att använda en så pass utförlig produktuvecklingsprocess har dock varit att mycket tid har lagt på produktutvecklingsprocessen. Hade en enklare metod valts där man i princip bara tar första bästa lösning, hade processen tagit mindre tid och mer tid hade kunnat spenderas för att exepelvis genomföra fler tester och vidareutveckling.

Både utveckling av mjukvara för datainsamling och utveckling av analysmetoder har baserats på ”trial and error”. Detta var nästan oundvikligt då information om hårdvara och accelerometer modulen var mycket bristfällig och då är det väldigt svårt att använda någon medod liknande Vattenfall-modellen, så kallad ”write once”. Inriktiningen på projektet var också att fokusera mer på praktik och tester än på teori vilket också ”trial and error” metoden lämpar sig bäst för.

Det har inte visats sig några större svagheter i de metoder och verktyg som valts för arbetet, de har uppfyllt sina syften väl och inga uppenbart bättre alternativ kan ses.

4 Steg 1 – Indelning av projektet

Under steg 1 i projektet genomfördes utvecklingsarbete av testmiljön som genererades fram genom ovan nämnda beskrivna metoder. Parallellt skapades och utvecklades ett enklare program för hårdvaruplattformen .NET Gadgeteer för insamlig av data, vilket var huvudfokus i det här steget. För att sedan kunna analysera all insamlad data utvecklades ett grundläggande analysprogram. Parallellt med detta fördes under steg 1 kontinuerligt kontakt med företag för att få fler referenser kring vibrationsmätning samt efterfrågan på marknaden.

4.1 Företagskontakt 1

Genom att ta kontakt med företag som är verksamma inom området avsåg projektet att under steg 1 ta reda på vad som redan finns, hur det implementeras och vem som vill att det utförs inom området vibrationsmätning.

4.1.1 Genomförande Företagskontakt 1

För att få en bild av kundbehov samt produkter liknande den som skulle tas fram gjordes en undersökning av befintliga aktörer på marknaden. Kontakt togs med tre företag som i olika grad är verksamma inom vibrationsmätning. Det första företaget som kontaktades, härefter ”verkstadsföretaget”, har sin huvudverksamhet inom andra områden men kompletterar detta med konditionsövervakning för att erbjuda sina kunder totallösningar inom verkstadsindustrin. Det andra företaget, härefter ”vibrationsmätningsföretaget”, som i huvudsak arbetar med konditions-övervakning samt IFM Electronics.

Verkstadsföretaget kontaktades då det sedan tidigare var känt att de har bra lösningar inom konditionsbaserat underhåll och vibrationsmätningsföretaget eftersom en av deras produkter utifrån produktbeskrivningen bedömdes lämpa sig väl som referenslösning. Då inget av företagen besvarade kontakten fick alternativ undersökas och ett av dem var företaget IFM Electronics, vilka erbjöd sig att svara på frågor samt upplät sin demorigg för projektet att utföra mätningar på. Denna användes under steg 2 för att validera och utveckla analysmetoden.

Kontakt med Swedish Match togs under en arbetsmarknadsmässa, där en företagsrepresentant lägligt nog kunde svara på frågor om deras produktion samt intresse för och svårigheter med att implementera konditionsbaserat underhåll i större utsträckning.

Utöver detta gjordes tidiga tester hos företaget Autotube då kontakter fanns sedan tidigare och det var känt att de har noggrann vibrationsutrustning som kunde användas för att generera kontrollerad indata.

4.1.1.1 IFM Electronics

IFM är en komponentleverantör som grundades 1969 i Tyskland och har nationellt huvudkontor i Göteborg. Företaget tillverkar olika typer av givare för tillämpning i industri och har haft produkter inom vibrationsbaserad tillståndsövervakning sedan 2003 [24].

4.1.1.2 Swedish Match

Swedish Match utvecklar, tillverkar och säljer produkter inom områdena Snus och moist snuff, cigarrer och tuggtobak samt tändstickor, tändare och kompletterande produkter. I fabriken i Göteborg tillverkas portionssnus, där det är av kritiskt vikt för produktionen att vakuum-pumparna till förpackningsmaskinerna hålls i drift. Där används idag olika produkter för konditionsbaserat underhåll men om implementationen var enkel och kostnaderna låga ser de gärna att det tillämpas på fler platser i tillverkningen.

4.1.2 Resultat Företagskontakt 1

Kontakt med ovan nämnda företag resulterade i att analysmetoden, under steg 2, kunde verifieras genom att använda noggrann indata samt gav djupare förståelse för och inriktning på problemområdet lagerskador.

4.1.3 Reflektion Företagskontakt 1

För mycket tid och fokus lades på att få kontakt med verkstadsföretaget respektive vibrationsmätningsföretaget, vilka inledningsvis bedömdes som mest intressanta att samarbeta med. Den hjälp som mottagits från företag under arbetets gång har varit mycket givande och av avgörande betydelse för att förstå marknaden, hur befintliga produkter implementeras samt inte minst för att verifiera analys och metod för datainsamling. Hade därför projektet i ett tidigare skede gått vidare med andra aktörer hade det ökade utbytet med dessa antagligen bidragit till att projektet nått ännu längre än vad som gjordes.

4.2 Testmiljö

En av de stora delarna av projektet var att generera en testmiljö för användning vid utveckling av mjukvara för hårdvaruplattfomen .NET Gadgeteer samt analysprogramm.

4.2.1 Genomförande testmiljö

Konceptgenereringen och framtagningen av testmiljön utfördes med systematiska metoder som produktutvecklingsmetoden Värdemodellen beskriver. Som tidigare nämnts användes endast de mest relevanta stegen i metoden eftersom alla delar inte var lämpliga för testmiljön samt att den bara är en del av projektet, vilket medförde viss tidsbegränsning för konceptarbete.

4.2.1.1 Funktionell kravspecifikation

Ett tidigt steg i processen innan kraven fastställdes i kravspecifikationen var formulering av funktioner (se bilaga A) som är ett viktigt steg för att uppfylla behov och önskemål för en produkt.

4.2.1.2 Krav på testmiljön

Kraven på testmiljön formulerades utifrån flera olika synvinklar, dels hur produkter på marknaden var specificerade gällande ljudnivå såväl som reglering av vibrationer. Ett exempel på en befintlig produkt på marknaden är ett vibrationsbord som kan regleras upp till 200 Hz och avge olika vibrationer. Eftersom projektets testmiljö skiljer sig mot många andra produkter på marknaden, formulerades krav och önskemål utifrån projektets behov. Därav formulerades krav som bland annat reglerbara motorer samt avge vibrationer upp till 200 Hz vilket även kan hänvisas till vibrationsbordet. Andra önskemål som storleken på plattformen och låg ljudnivå var relevanta för enkel användning, se Tabell 1.

.

Tabell 1. Kravspecifikation testmiljö

Kriterie	Målvärde	Krav	Verifiering
1. Funktion			
1.1 Avge vibrationer	<200 Hz	K	Uppskattning
1.2 Reglerbar testmiljö		K	Utformning/Design
1.3 Vibrationsförändring		Ö5	Motorstyrning
1.4 Införning av störningar		Ö5	
2. Utformning			
2.1 Storlek vibrationsplattform	>150x150 mm	Ö3	Mätning
2.2 Enkel transport		Ö4	Design
2.2 Möjlighet för utveckling		Ö5	Mätning
2.3 Möjlig utökning av sensorer		Ö3	Analys
2.4 Enkel att bygga		Ö4	Analys
3. Material			
3.1 Förmåga att leda vibrationer		K	Analys
4. Användning			
4.1 Lätt att använda		K	Analys
4.2 Låg Ljudnivå	<80dB	K	Mätning
5. Modularisering			
5.1 Enkel att reparera/utveckla		Ö	Design

4.2.1.3 Kända koncept

Tanken bakom att ha med steget kända koncept från produktutvecklingsmetoden i analysen var att skapa idéer till kreativa och innovativa lösningar för konceptgenereringen. Detta medförde att nya användningsområden för olika typer av vibrationsutrustning blev tydliga vilket medförde nya idéer till utvecklingen. Ett exempel på detta är en reglerbar vibrationsbänk, från Copenhagen Vibrator Products, som är ett bord som genom manuell styrning kan åstadkomma vibrationer i ett intervall upp till 200 Hz se Figur 3 [29].

Figur 3. Vibrationsbord från kända koncept

Det här passade för utförandet av huvudfunktionen då frekvenserna ligger inom uppskattat område från kravspecifikationens krav. Den befintliga anläggningen är stor och lämpar sig ej för detta projekt i ett tidigt skede. Då ett krav på testmiljön var att den skulle vara enkel att implementera och använda överallt för att effektivt kunna utveckla hårdvaruplattformen.

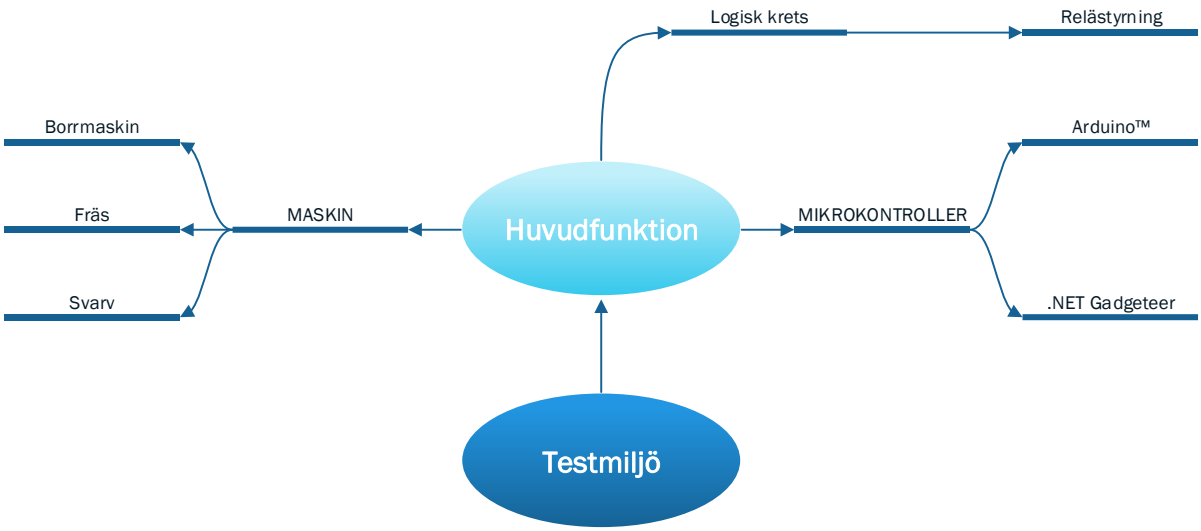
4.2.1.4 Referenslösning

Utifrån inventeringen av kända koncept fastställdes vibrationsbordet som den optimala lösningen på problemet och valdes till referenslösning, vilken utgjorde grunden för den fortsatta konceptgenereringen. Att vibrationsbordet valdes som referenslösning innebär att alla genererade koncept sedan jämfördes och bedömdes mot denna. För mer information kring referenslösningens funktion, uppdelning och rangordning av delsystem se bilaga B.

4.2.1.5 Brainstorming

För att säkerställa att ett speciellt koncept inte fastställdes i ett tidigt skede utfördes brainstorming, vilket genererade flera olika idéer och lösningar på huvudfunktionerna, se Figur 4. I kombination med inventeringen av kända koncept utvecklades dessa lösningar vidare för att uppnå kreativa och innovativa koncept. Detta medförde några huvudområden för utförande av huvudfunktionerna:

- Mikrokontroller – Arduino™ Uno
- Mikrokontroller – .NET Gadgeteer
- Logiska kretsar – Relästyrning
- Maskiner – Borrmaskin, Svarv, Fräs



Figur 4. Brainstorming testmiljö

4.2.1.6 Konceptgenerering

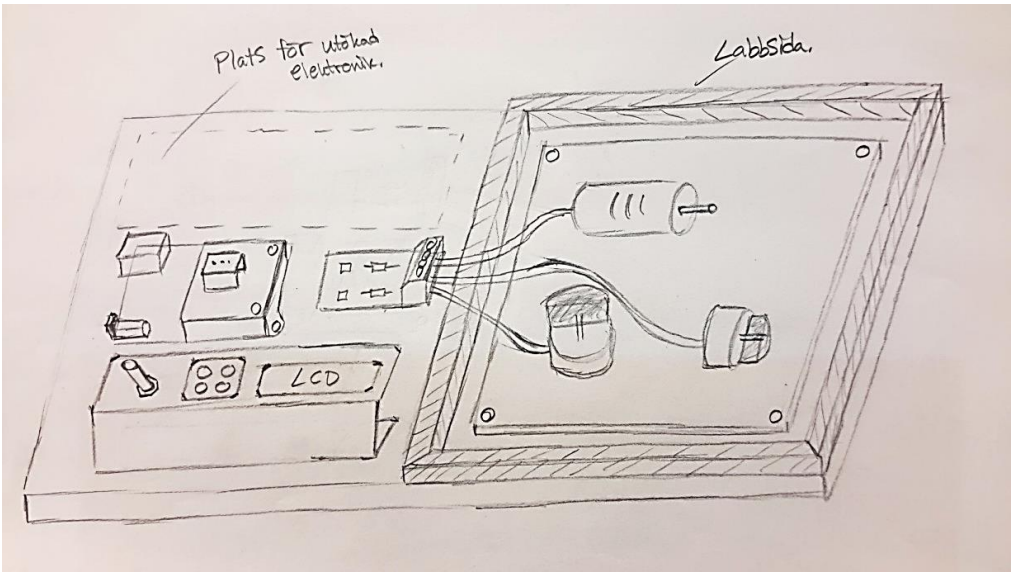
Totalt genererades 14 olika koncept från de tidigare stegen i utvecklingen (se bilaga C). Val av koncept gjordes med systematiska metoder att säkerställa att det slutgiltiga valet blev så bra som möjligt. För att åstadkomma detta användes Pughmatriser. I Pughmatrisen användes referenslösningen som referens och de andra koncepten värderades i jämförelse med denna. Jämförelsen gjordes utifrån olika kriterier som till största delen kom ifrån önskemål och krav från kravspecifikationen. Matriser är ett bra verktyg för att uppnå objektiv utvärdering av koncepten men sunt förnuft och logiskt tänkande är också en viktig del i processen för konceptval. Se bilaga D för mer information om Pugh-matriserna.

Det är tänkt att i steg 2 av projektet använda koncepten som är befintliga maskiner (pelarborrmaskin, svarv och fräs) att utföra mätningar på. Därför var dessa mindre relevanta vid framtagningen av testmiljön.

Brainstorming användes med inspiration från tidigare kända koncept och lösningar för att hitta helhetskoncept. Fokus var att hitta många möjliga lösningar som uppfyller kraven som ställts i kravspecifikationen. I vissa koncept var olika dellösningar för delsystemen möjliga, varför koncepten sinsemellan uppvisar vissa likheter.

4.2.1.7 Valt koncept

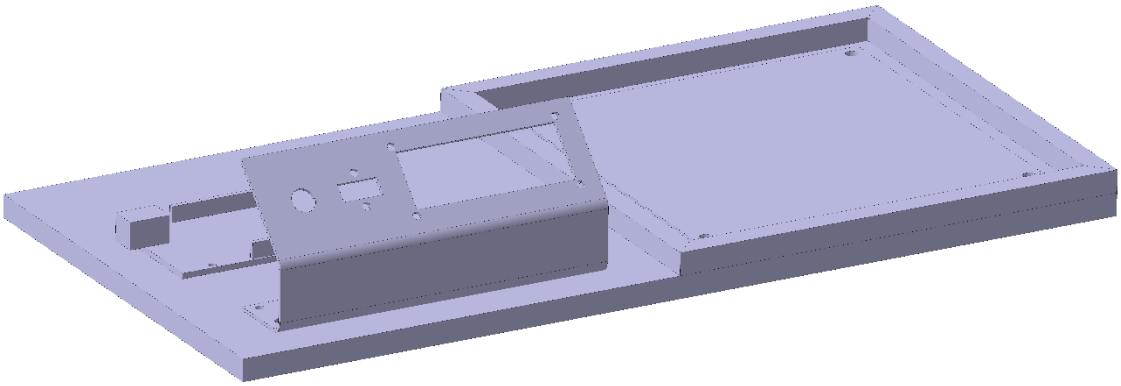
Det valda konceptet, koncept 12 (se bilaga C), bygger på en plattform som kan regleras med en mikrokontroller. Konceptet har genererats och designats så att både mjukvaran, elektronikdelen och vibrationsdelen ska kunna ändras och utvecklas. Detta för att kunna utveckla vibrationsdelen separat genom att kunna variera montering av plåten, genom fast montering, montering med fjädrar eller ingen montering alls. Med anledning av att inte begränsa möjligheterna från början. Elektronikdelen monteras separat då dessa är känsliga för vibrationer. En manöverpanel ska monteras för enkel styrning manuellt av testmiljön samt ha en LCD för att kunna se olika tillstånd på motorerna. Samt att ställa in olika sekvenser eller program för styrning av vibrationer se Figur 5.



Figur 5. Koncept 12 testmiljö med möjlighet för stor utveckling.

4.2.1.8 Modellering

För CAD-modellering användes CATIA V5-6R som ett verktyg för design och utveckling av testmiljön, samt för att kunna realisera utseende/form. Därmed var det möjligt att få en inblick i om idén var möjlig att skapa i kombination med att eventuella fel kunde upptäckas i ett tidigt skede. Med hjälp av CAD gjordes detaljkonstruktion och ritningar som sedan användes som underlag för konceptgenerering och tillverkning. Detta medförde att det var möjligt på ett enkelt sätt kunna presentera idéerna för handledare i prototyplabbet. Ritningar skapades på delarna: huvudplattformen, listerna, vibrationsplåten och manöverpanelen (se bilaga E). Manöverpanelen sparades även som en DXF-fil för att kunna skäras ut i den vattenskärare som fanns tillgänglig i prototyplabbet. För mer dokumentation av ritningar och CAD-modellering, se Figur 6.



Figur 6. CAD-modell över valt koncept

4.2.1.9 Framtagning av prototyp

Tillverkningen av testmiljön utfördes i Chalmers prototyplabb genom arbete i träverkstaden och metallverkstaden. Plattformen och listerna tillverkades av trä, vibrationsplåten samt klämmorna för DC-motorerna tillverkades av stål och manöverplåten tillverkades av aluminium som skars ut i vattenskärare. Detta monterades sedan ihop med det befintligt sortiment av skruvar och fjädrar. Prototypens syfte var främst att i ett tidigt skede erbjuda en testmiljö för utveckling av analys och mjukvara.

4.2.1.10 Programmering

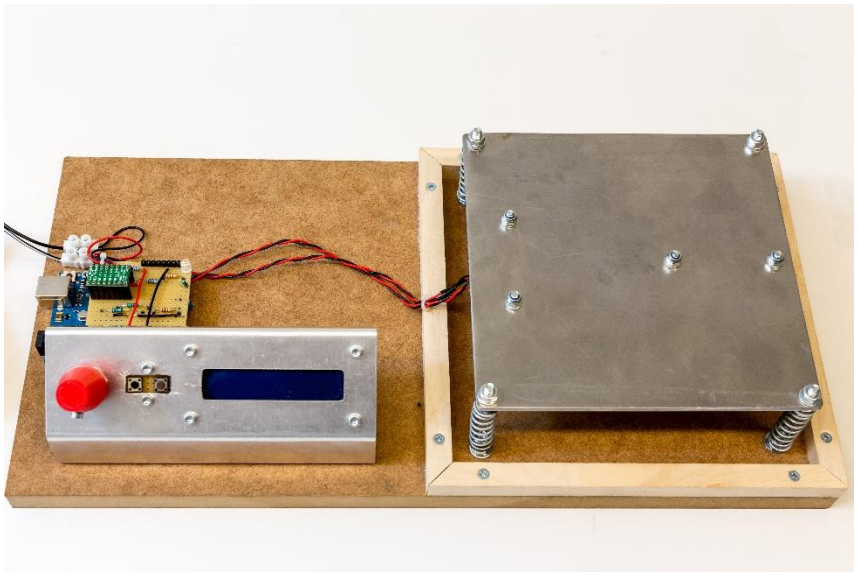
Programmeringen av testmiljön utfördes i programmeringsmiljön Arduino™ IDE, som är ett "open source" program. Med hjälp av en potentiometer, motorstyrning och enkel kod med PWM-styrning kunde motorernas hastighet regleras.

4.2.1.11 Utveckling av testmiljö

Mjukvaran till testmiljön utvecklades för att innehålla förprogrammerade tester där motorerna reglerades olika beroende på programval. Ett exempel på program som försökte utvecklas var införandet av störningar under mätning. Detta utfördes genom att en av motorerna startades och stängdes av enligt ett visst schema medan den andra motorn kördes på ett givet varvtal under hela mätningen.

4.2.2 Resultat testmiljö

På den färdiga testmiljön kunde vibrationer upp till 200 Hz mätas och därmed uppfylldes alla krav som var satta i kravspecifikationen. Några av de mest relevanta önskemål som möjlighet för utveckling, lätt användning, enkel transport och storlek uppfylldes också. För mer ingående förklaring av testmiljöns uppbyggnad se Figur 7.



Figur 7. Färdigställd testmiljö

Regleringen av testmiljön sker genom inställning av olika varvtal, vilket ger olika frekvenser. Högre varvtal, ω, innebar högre frekvens, f, och tvärtom för lägre varvtal, se formeln nedan:

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

Prototypen består liksom referenslösningen av en vibrationsyta med vibrationsmotorer samt en huvudplattform vilket allt är monterat på. Detta kan hänföras till rangordningen av delsystemen och den funktionella modellen som gjordes i konceptarbetet. Produktutvecklingsmetodiken har därigenom visat sig ge bra resultat.

Projektet begränsades i viss mån av de komponenter som fanns tillgängliga i prototyplabbet. De fjädrar som användes för att montera vibrationsytan från huvudplattformen är exempel på detta. Trots det begränsade utbudet av komponenter erhölls dock lovande resultat.

Vid vidareutvecklingen av mjukvaran till testmiljön (för att kunna köra förprogrammerade sekvenser) uppstod oväntade problem. Programmet låstes oförutsägbart samt kraschade, vilket medförde instabilt program. Efter att ha ägnat problemet åtskilliga timmar övergavs därför idén och det första programmet, med manuell styrning, användes under resten av projektet.

4.2.3 Reflektion testmiljö

Testmiljön var till stor användning under projektet och uppfyllde sin funktion trots att många problem tillstötte vid utvecklingen av mjukvaran. Då utvecklingsmiljön inte rapporterade några kompileringsfel eller andra misstag med koden blev felsökningen komplicerad och tidsödande. Vid programmeringen av sekvenserna hos testmiljön uppstod problem som inte hade kunnat förutses och som troligtvis hade flera av varandra oberoende orsaker. Tänkbara felkällor kan vara otillräcklig strömförsörjning, defekter i motorstyrningen samt att motorerna inte är kopplade över en diod eller kondensator. Det sistnämnda kan potentiellt medföra störningar i övrig elektronik.

Vid datainsamling för tester på testmiljön uppstod stora insabilitetsproblem för .NET Gadgeteer plattformen. Dessa skulle kunna förklaras av ekektriska störningar, vibrationernas stora amblitud eller andra egenskaper. En förändring som skulle kunna utföras i framtiden är att montera vibrationsplåten med skruvförband istället för fjädrar, vilket borde medföra minskad vibrationsamplitud. En annan förändring skulle kunna vara att undersöka om testmiljöns elektronik eller motorer ger elektriska störningar, och om det kan undvikas.

Det valdes att inte gå vidare med utvecklingen av testmiljön efter steg 1 då stora instabilitetsproblem uppvisades vid mätning på denna men framförallt eftersom det genom företagskontakt gavs möjlighet att genomföra de tester som var nödvändiga för datainsamling och verifiering. Testerna som kunde utföras på IFMs demonstrationsrigg medförde att utvecklingen kunde ske mot att identifiera olika typer av lagerskador. Därmed kunde ett nytt område täckas in vilket är mycket aktuellt inom industrin.

4.3 Hårdvara för datainsamling

Här beskrivs den hårdvara som användes i första steget av projektet samt resultat och reflektion kring detta. Hårdvaran baseras på plattformen .NET Gadgeteer, vilken beskrivs i 2.1.1.

4.3.1 Genomförande av hårdvara för datainsamling

För datainsamling i användes hårdvara som ingår i .NET Gadgeteer plattformen [7]. Det huvudkort som erbjuder en 400 MHz 32-bit ARM 9 processor, 92 MB RAM tillgängligt för användaren och 18 portar kompatibla med .NET Gadgeteer standarden. I Tabell 2 kan produktnamn för den hårdvara som användes avläsas.

Tabell 2. Benämning och produktnamn

Benämning:	**Produktnamn:**
Huvudkort	GHI Electronics FEZ Raptor [30]
Accelerometer (modul)	GHI Electronics Accel G248 Module [31]
USB (modul)	GHI Electronics USB Client SP Module [32]
Batteripack (modul)	GHI Electronics UC Battery 4xAA Module [33]
SD-kortläsare (modul)	GHI Electronics SD Card Module [34]
LCD-display (modul)	GHI Electronics Character Display Module [35]

Till kortet kopplades en accelerometermodul på vilken kretsen MMA8453Q från Freescale Semiconductor, Inc används [22] [23]. Accelerometerkretsen är av typen mikroelektromekanisk sensor, se avsnitt 2.3.1. För anslutning till PC användes inledningsvis en USB modul, detta för programmering och debugging av huvudkortets mjukvara, USB modulen ersattes senare med en batteripacks modul vilket utöver möjlighet till anslutning via USB också ger möjlighet för strömförsörjning via AA batterier. Möjlighet till lagring av data ges av en modul med SD-kortläsare. För visning av information en modul med bakrundsbelyst LCD-display på 16X2 tecken samt den styrbara lysdioden på huvudkortet.

För anslutning av modulerna till huvudkortet användes för plattformen avsedda 10-pins flatkablar [36].

4.3.2 Resultat av hårdvara för datainsamling

Hårdvaran har i detta steg den funktionalitet som behövs för att utveckla och testa mjukvara för inhämtning och lagring av accelerationsdata. Hårdvaran ger även möjlighet för interaktion i form av knappar samt medger presentation av information med lysdiod samt bakgrundsbelyst LCD-display med 16X2 tecken.

Skrivhastigheten skiljer sig avsevärt mellan olika SD-kort, kortets hastighet anslutet till PC har inget direkt samband med de hastigheter som fås anslutet till plattformen.

Bytet av strömkälla gav ökad stabilitet utan krav på extern strömkälla men också möjlighet att ansluta extern strömkälla om så önskas.

4.3.3 Reflektion av hårdvara för datainsamling

USB-modulen byttes ut då det visade sig att strömförsörjningen via denna inte var tillräcklig vilket orsakade instabilitetsproblem samt att mobiliteten påverkades negativt då strömförsörjningen krävde att en USB-kabel var ansluten till en kraftkälla. För att ge stabil strömförsörjning men också ökad mobilitet användes istället en batteripacks modul vilket gav möjlighet till drift via fyra AA-batterier. Om den instabilitet som observerats innan bytet orsakat försämrad kvalitet på data eller andra problem har inte undersökts då batteripacksmodulen i fortsättningen använts.

4.4 Mjukvara för datainsamling

Inledningsvis lades fokus på att från accelerometern inhämta mätdata och lagra den på ett sätt som möjliggjorde att den kunde studeras och att arbetet med analysen kunde starta. Tillgång till mätdata var i detta skede prioriterat över mätdatans kvalitet, detta då tillgång till mätdata i detta skede var viktigare än dess kvalitét för att kunna gå vidare med övriga delar av projektet.

4.4.1 Genomförande av mjukvara för datainsamling

Mätdata för acceleration i x-, y- och z-led inhämtades från accelerometern och sparades i minnet tillsammans med tidpunkten sedan start av hårdvaran samt tidpunkten sedan mätningens start. Under en mätning utfördes ett förutbestämt antal inhämtningar av data från accelerometern med ett förutbestämt intervall, mätningen startas med en av knapparna på huvudkortet.

Då mätdata kunde inhämtas och lagras övergick fokus på att minska tiden mellan inhämtning av accelerationsdata samt att minska variationerna av denna tid och att lösa de problem med att spara fler än cirka 6000 mätningar i minnet som visat sig uppstå vid tester. Problemen med att spara fler än cirka 6000 datapunkter visade sig bero på en begränsning i hårdvaruplattformens mjukvara som inte tillåter objekt i minnet större än cirka 700 KB [37]. Detta löstes genom att dela upp den data som sparas i minnet i objekt med en storlek under denna gräns.

För att underlätta felsökning och ge information om mätningarnas status användes här den styrbara lysdiod på huvudkortet som fanns tillgänglig samt den LCD-display som kopplats till huvudkortet för debugging och status information.

4.4.2 Resultat av mjukvara för datainsamling

Då det förutbestämda antalet mätningar utförts sparades dessa på SD-kort i form av en csv-fil med sex kolumner och samma antal mätningar som utförda inhämtningar av data. Den data som sparades i kolumnerna var tidpunkt sedan start av hårdvaran, tid sedan start av mätningen samt tid sedan föregående inhämtning av accelerationsdata, acceleration i x- y- samt z-led. Varje rad i filen innehåller den data som hör samman med en inhämtning av data och ordnades kronologiskt uppifrån.

Filerna sorteras genom att filer för de mätningar som gjorts sedan hårdvaran startats sparas tillsammans i den mapp under roten på SD-kortet med det högsta numret. Om mätningen är den första sedan start skapas en ny mapp med nästa heltalsnummer sett till den mapp med högst nummer som redan finns. Detta för att lättare kunna särskilja olika mätningar. Filerna namnges med den tidpunkt sedan start tills det att mätningen påbörjats vars data sparats i filen.

Skrivning till SD-kortet har visat sig vara mycket långsammare än förväntat sett till filstorlek och skrivhastighet för SD-kort kopplat till PC, tester och analys av mätdata påvisar att accelerometerns mätområde (± 2G) är otillräckligt för många av de mätningar som genomförts.

Tiden mellan datainhämtning benämns även som sampeltid och är cirka 1,19 millisekunder, detta ger en sampelfrekvens på cirka 840 Hz. Samplingsfrekvensen beräknas:

$$f_{sampel} = \frac{1}{sampeltid}$$

Hur sampelfrekvensen påverkar analysen kan ses i avsnitt 4.6.2.

4.4.3 Reflektion av mjukvara för datainsamling

Kolumnerna med tidsdata användes främst för att studera om och hur förändringar av mjukvaran och andra faktorer inverkade på insamlingen av accelerationsdata och visade sig vara en viktig indikation på framgångsrik optimering samt felkällor.

Under utveckling och tester av mjukvaran i detta steg har det varit stora problem med instabilitet, omstarter, förlorad kontakt med den dator huvudkortet kopplats till och ett stort antal oberäkneliga och till synes slumpmässiga fel. En stor mängd av dessa problem visade sig bero på otillräcklig strömförsörjning, se 4.3.

Den sampelhastighet som uppnåtts måste anses som bra då det kortaste intervallet som kan sättas för den timer som styr datainhämtningen är 1 millisekund, därtill tillkommer bland annat tiden det tar för accelerometer modulen att svara med mätdata.

4.5 Inledande analys

Analysmetoden genomfördes genom att iterativt gå mellan utveckling och verifierande tester. Här kommer de delområden som utvecklades i första delen av projektet att presenteras. För varje delområde finns ett avsnitt och där presenteras genomförande, resultat och reflektion.

För att få kunskaper inom signalbehandling lästes kurslitteratur till signalbehandlingskurser och tekniska rapporter. Även hjälp-funktionen i MATLAB var nyttig för att förklara formler och tillämpningen av dem. Fokus var att förstå tillämpningen framför att förstå teorin.

Jämförelser mellan olika mätningar förenklades genom att skriva analysprogrammet så att flera mätningar kunde läsas in samtidigt och sedan visa resultaten sida vid sida.

4.5.1 Inledande tester

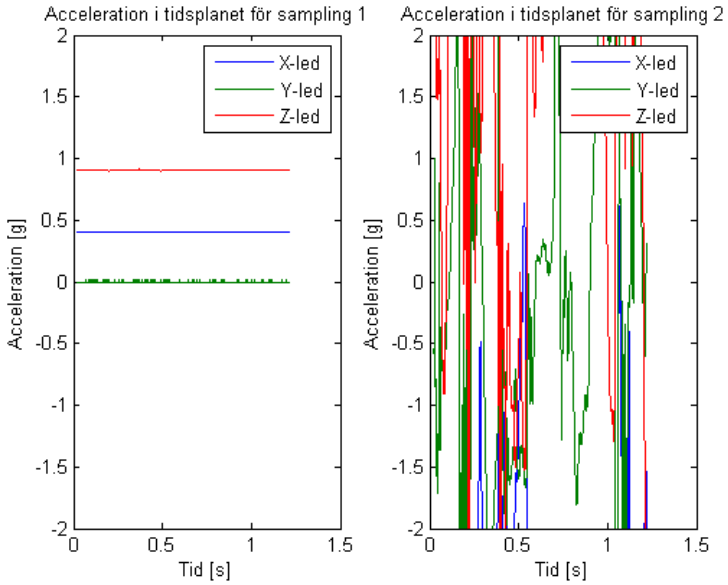
I början på projektet testades accelerometerns funktion eftersom accelerometerns prestanda och egenskaper från början var okända.

4.5.1.1 Genomförande inledande tester

För att kunna göra inledande tester och kontroll av grundläggande funktionalitet hos accelerometern fokuserades arbetet inledningsvis på att läsa data från ett SD-kort och visualisera dessa med en graf som visade acceleration mot tid i x-, y- och z-led.

4.5.1.2 Resultat inledande tester

I Figur 8 visas resultatet, accelerationen i tidsplanet för två olika mätningar. Mätning 1 är en mätning då accelerometern låg helt stilla och mätning 2 är då accelerometern skakats kraftigt.



Figur 8. Acceleration i tidplanet för två olika mätningar.

4.5.1.3 Reflektion kring inledande tester

Det visade sig att accelerometern inte bara visar skillnad i acceleration utan också mäter tyngdaccelerationen.

4.5.2 Frekvensanalys

För att studera vibrationerna omvandlas dessa för att presenteras i frekvensplanet.

4.5.2.1 Genomförande frekvensanalys

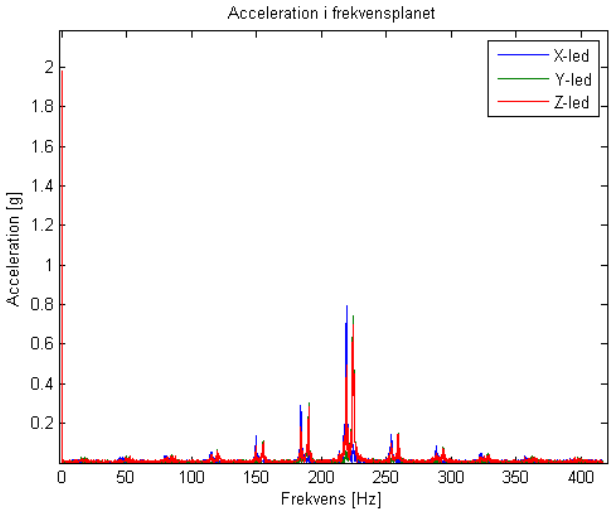
För att analysera frekvensinnehållet i vibrationerna implementerades FFT. Då många konstanta värden återfinns i vibrationsmätningen, sätts frekvenser nära 0 Hz till 0 G för att endast visa intressant data, då konstanta värden är ointressanta för analysen. Ett exempel på sådan ointressant konstant data är att z-led alltid varierar kring 1 G.

Den frekvens som högst kan uppmätas är halva samplingsfrekvensen, även kallad Nyquistfrekvensen [38]. Då sampelfrekvensen är cirka 840 Hz, se avsnitt 4.4.2, blir högsta möjliga frekvens att sampla och analysera cirka 420Hz.

4.5.2.2 Resultat frekvensanalys

De verifierande testerna visade förväntad frekvens för teoretisk indata men ständigt förskjutna frekvenser vid tester med accelerometer, se avsnitt 4.6.1 och 4.6.2.

Ett exempel på hur acceration i frekvenplanet kan se ut visas i Figur 9. Här kan också ses att accelerationen nära 0Hz är stor.



Figur 9. Acceleration i frekvensplanet.

4.5.2.3 Reflektion kring frekvensanalys

Senare i projektet kalibrerades analysmetoden för att ta hänsyn till förskjutningen, se avsnitt 5.5.2. Den stora toppen i amplitud vid 0Hz beror förmodligen på acceleration som inte har någon speciell frekvens. Ett exempel på en sådan accelerration är den konstanta tyngdkraftsaccelerationen.

4.5.3 Resultant

För att lättare kunna visualisera och hantera data summerades accelerationsvektorerna till en resultant.

4.5.3.1 Genomförande resultant

Resultant är en summering av vektorer, här är det de tre accelerations-vektorerna som summeras för att få fram en gemensam acceleration [39]. Då accelerationsvektorerna visar acceleration i ortogonala riktningar kan dessa summeras enligt:

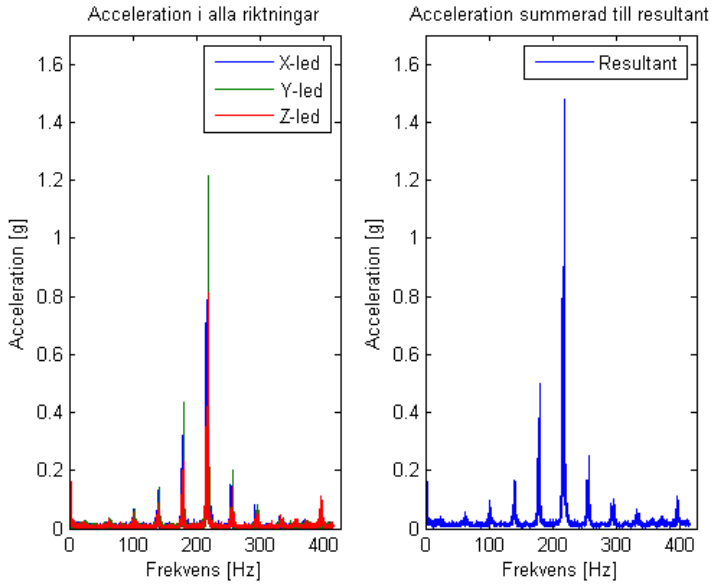
$$r = \sqrt{x^2 \times y^2 \times z^2}$$

Detta kan göras i tidsplanet eller i frekvensplanet. Dock förloras viss data om det görs redan i tidsplanet då negativa accelerationer blir positiva på grund av kvadreringen. Bäst resultat uppnåddes då resultanten beräknades i frekvensplanet genom att sammanfoga accelerationsamplituden för varje frekvens.

$$R = \sqrt{X^2_{accelerations\ amplitud} \times Y^2_{accelerations\ amplitud} \times Z^2_{accelerations\ amplitud}}$$

4.5.3.2 Resultat resultant

I Figur 10 syns skillnaden på att presentera data som acceleration i alla riktningar eller summera ihop accelerationen till en resultant. Mätningen utfördes på testmiljön och de båda graferna baserades på samma data.



Figur 10. Acceleration både i alla riktiningar och som en resultant.

4.5.3.3 Reflektion kring resultant

Även då resultanten summeras i frekvensplanet förloras viss information då endast längden på amplituden tas hänsyn till, ej i vilken riktning i rummet som acceleration sker. Det är dock enklare att hantera endast en accelerationsvektor och det visade sig genom tester att den information som fås av resultanten är tillräcklig för den tänkta tillämpningen.

4.5.4 Tidsvariationer

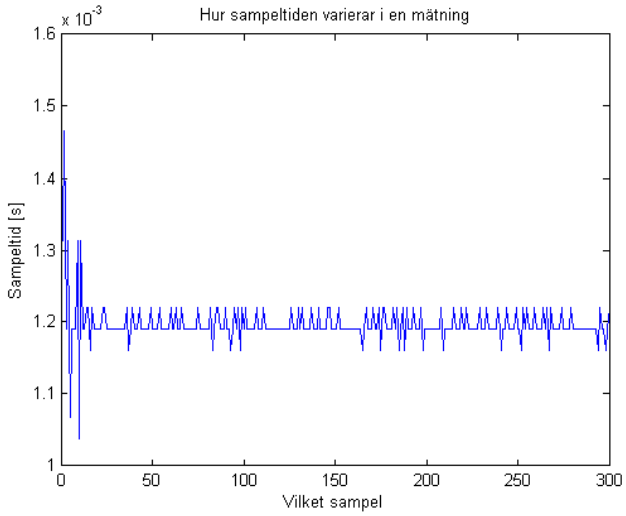
I detta avsnitt undersöks om samplingstiden är konstant eller varierar.

4.5.4.1 Genomförande tidsvariationer

Fouriertransformen bygger på datapunkter med konstant kort periodtid vilket insamlad data inte uppfyllde [40]. Detta upptäcktes genom tester där sampeltidsvektorn analyseras. Sampeltiden minimeras till ca 1,2 ms men variationer mellan både mätningar och sampeltid förekommer.

4.5.4.2 Resultat tidsvariationer

Ett exempel på tidsvariationerna visas i Figur 11.



Figur 11. Hur sampeltiden varierar i en mätning.

4.5.4.3 Reflektion kring tidsvariationer

Det är framförallt i början på varje mätning som sampeltiderna varierar mycket. Därför tas de 20 första datapunkterna bort i varje mätning för att inte riskera att dessa leder till fel. Resterande sampeltider antas efter kontroll av en mängd mätningar vara tillräckligt lika varandra för att inte bidra till några större fel i resultatet.

4.5.5 Begränsningar hos accelerometer

Accelerometern har begräsningar i både upplösning och mätintervall vilket ville undersökas närmare.

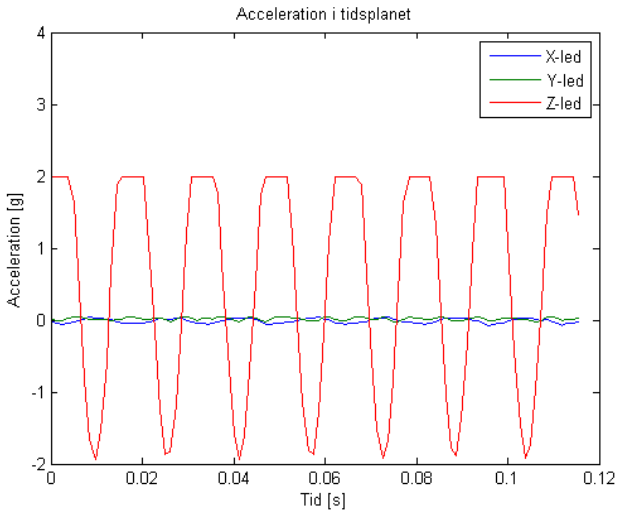
4.5.5.1 Genomförande accelerometer

Accelerometern kunde från början mäta acceleration i intervallet ± 2 G. Det är lägre acceleration än vad många vibrationer på maskiner ger, vilket blev ett problem vid tester. Dessutom upptäcktes det att då tyngdaccelerationen 1 G alltid uppmättes av accelerometern kunde endast en accelerations-amplitud på 1 G uppmätas utan att accelerometern skulle ge fullt utslag i gravitationsriktningen. Vid tester visade det sig att en maximal amplitud på 1 G var otillräckligt vid flera tillämpningar, det gjordes försök att kompensera för detta i analysmetoden men det visade sig vara omöjligt.

En annan felkälla som upptäcktes under arbetets gång är att accelerometerns upplösning är låg vilket också kan leda till problem för Fouriertransformen.

4.5.5.2 Resultat accelerometer

Hur resultatet blir då vibrationen avger högre acceleration än ± 2 G visas i Figur 12. Här syns tydligt att accelerometern visar 2 G då accelerationen egentligen är högre. Flera liknande resultat visas i avsnitt 4.6.2.



Figur 12. Acceleration i tidsplanet, uppmätt med begränsad accelerometer.

4.5.5.3 Reflektion kring accelerometer

Det kommer inte gå att kompensera för denna begränsning i analysen. Enda alternativet är att ändra insamlingen av data så att den kan hantera större accelerationer. Se mer om detta i avsnitt 5.2 och avsnitt 5.5.1.

4.6 Tester och validering

En mängd tester och mätningar genomfördes under projektet. Här beskrivs genomförande, resultat och reflektion för ett urval av testerna.

4.6.1 Teoretisk indata

För att validera analysmetoden användes matematiskt genererade insignaler.

4.6.1.1 Genomförande teoretisk indata

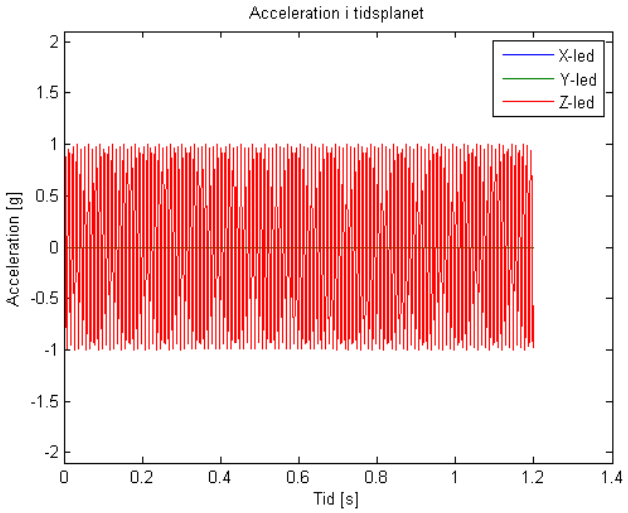
Insignalen genererades med hjälp av en sinusfunktion och en vektor t med tidpunkter med samma intervall som sampeltiden hårdvaran vanligtvis har. För att simulera enklast möjliga rörelse används endast acceleration i z-led. Acceleration i x-och y-led sätts då till 0 G vid alla tidpunkter.

$$x_{acceleration} = 0 \times t$$
$$y_{acceleration} = 0 \times t$$
$$z_{acceleration} = \sin(2\pi \times 100 \times t)$$

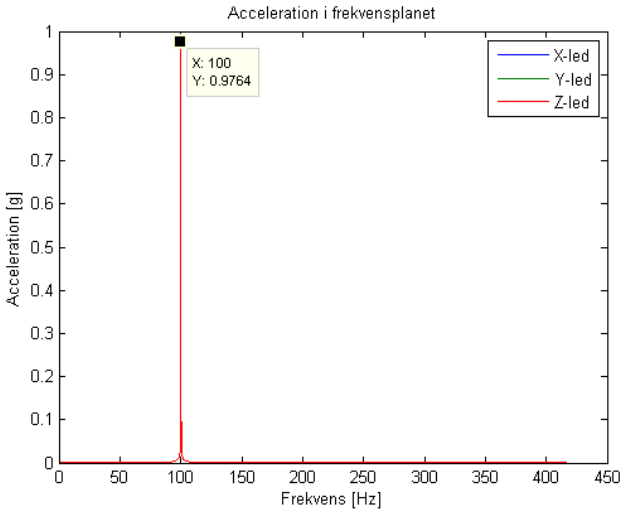
Tidsvektor och accelerationsvektorer sparades i en csv-fil för att presenteras på samma sätt som data från hårdvaran. Filen användes som indata till analysprogrammet för att resultatet skulle kunna jämföras med det teoretiskt förväntade resultatet för att validera analysmetoden. Flera liknande tester med matematisk indata utfördes.

4.6.1.2 Resultat teoretisk indata

I Figur 13 visas accelerationen i tidsplanet för en signal med frekvensen 100 Hz och i Figur 14 visas resultatet i frekvensplanet. I båda figurerna syns att endast acceleration i z-led förekommer och att denna har en amplitud på 1 G. I Figur 14 ses tydligt att endast frekvenser vid 100 Hz är representerade. Det finns inget brus eller andra störningar.



Figur 13. Acceleration i tidsplanet från teoretisk indata med 100Hz



Figur 14 Acceleration i frekvensplanet från teoretisk indata md 100Hz.

4.6.1.3 Reflektion kring teoretisk indata

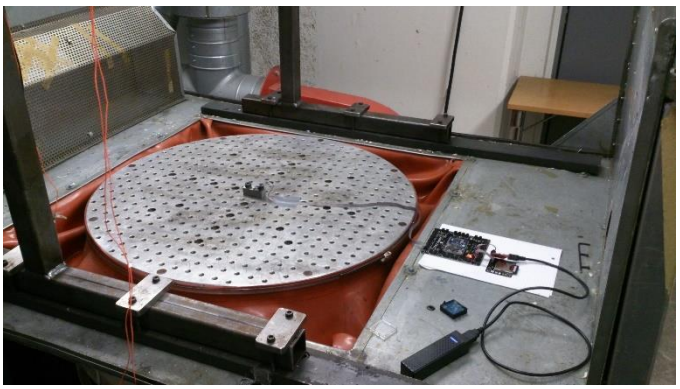
Resultatet visar förväntad amplitud och frekvens vilket verifierar analysmetoden.

4.6.2 Tester med kontrollerad indata från vibrator

För att validera en analysmetod krävs noggrant kontrollerad indata. Detta åstadkoms i projektet genom tester på en vibrator. Detta för att validera att accelerometer och hårdvara mäter, hanterar och sparar signaler på ett korrekt sätt. Med kontrollerad indata menas att med hög noggrannhet kunna generera de vibrationer man vill mäta på.

4.6.2.1 Genomförande kontrollerad indata

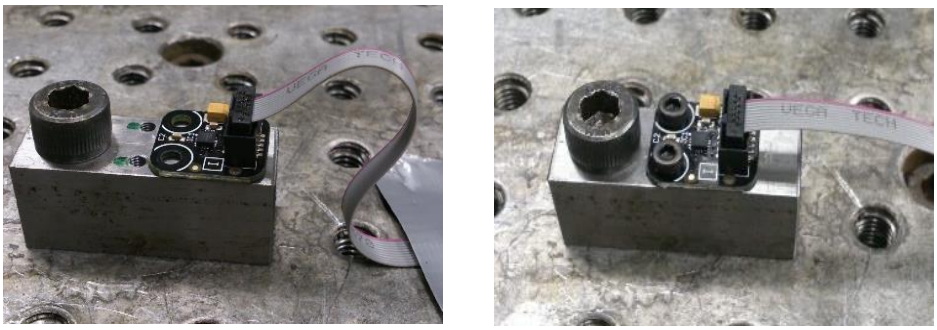
Testerna gjordes med en vibrator, också kallad elektro dynamisk shaker, från företaget Autotube. De använder denna vibrator för valideringstester inom hållfasthet för rör till fordonsindustrin vilket kräver hög noggrannhet. Vibratorn ställs in för att vibrera endast i en riktning och sedan görs mätningar med varierande frekvenser, G-krafter och olika infästningar hos accelerometern.



Figur 15. Mätning på vibrator.

Ett problem var att accelerometerns mätområde var begränsat, ± 2 G. Mätningar gjordes med olika acclerationsamplitud för att se hur resultatet påverkades av olika krafter samt av krafter som översteg accelerometers mätområde.

Redan i detta tidiga stadie testades det om infästningen av sensorn hade betydelse för resultatet. Här testades två olika typer av infästningar, en med vax och en då accelerometern skruvades fast, se Figur 16. För att resultatet skulle bli så jämförbart som möjligt fästes accelerometern på samma ställe vid båda mätningarna.



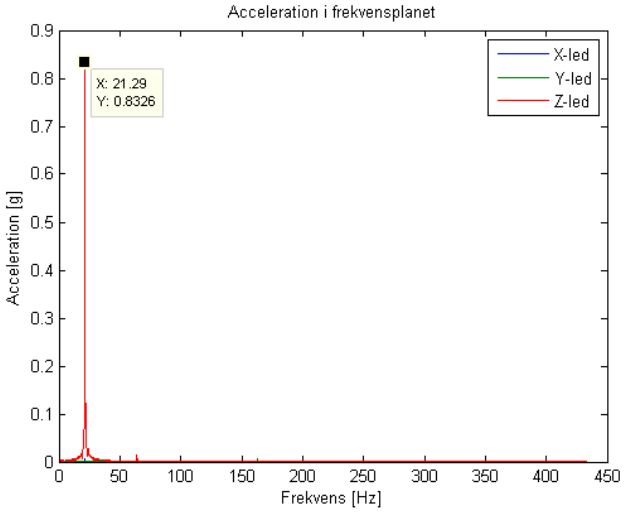
Figur 16. Till vänster, infästning med vax och till höger infästning med skruvar.

4.6.2.2 Resultat kontrollerad indata

Resultatet från mätningarna presenteras under respektive rubrik, olika frekvenser, olika G-krafter och olika infästning av accelerometern.

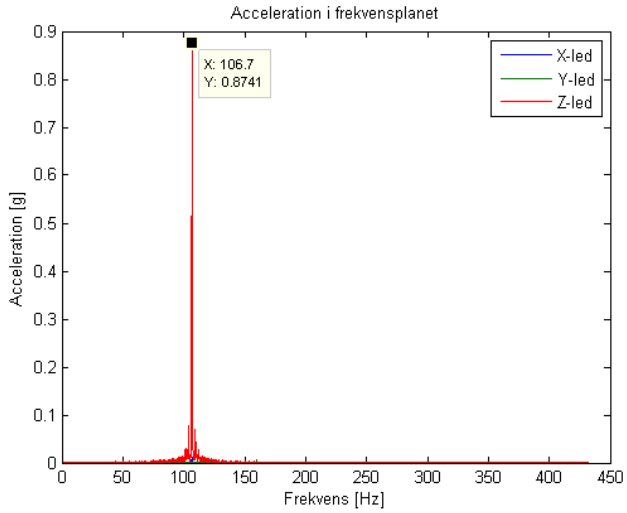
Olika frekvenser

En mätning gjordes med vibratorn inställd på att generera vibrationer med frekvensen 20 Hz och amplituden 1 G. Resultatet av mätningen visas i Figur 17 och visar frekvensen 21.29 Hz vilket är ett fel på 6.5 % jämfört med förväntad frekvens (20 Hz).

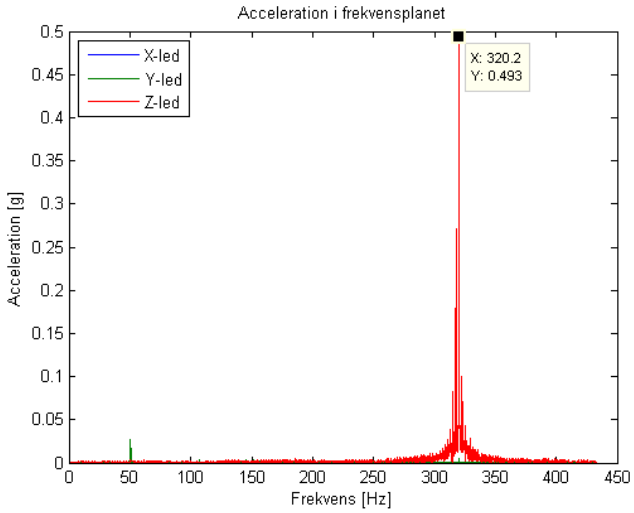


Figur 17. Acceleration i frekvensplanet från mätning av vibrationer med 20 Hz.

Andra mätningar visar liknande resultat. Figur 18 visar resultatet av en mätning som borde visat 100 Hz men istället visar frekvensanalysen 106.7 Hz vilket är ett fel på 6.7 % mot förväntad frekvens. Likaså visar mätningen på vibrationer med 300 Hz ett resultat på 320.2 Hz, se Figur 19, vilket är 6.73 % fel.

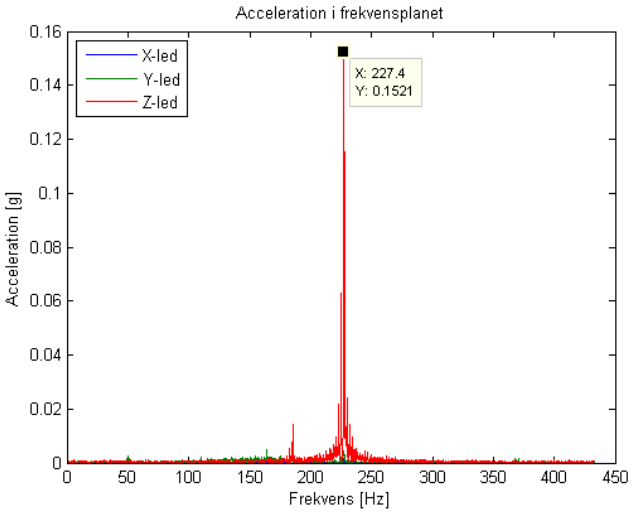


Figur 18. Acceleration i frekvensplanet från mätning av vibrationer med 100 Hz.



Figur 19. Acceleration i frekvensplanet från mätning av vibrationer med 300 Hz.

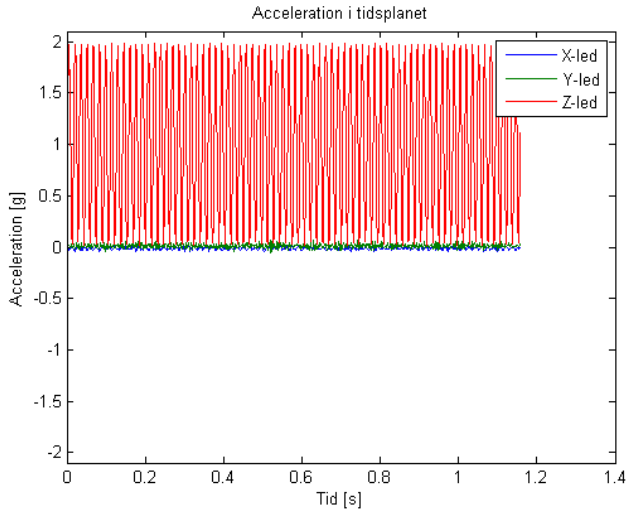
Ett test utfördes också på vibrationer med en frekvens över halva samplingsfrekvensen, även kallat Nyqvistfrekvensen [38]. I detta fall är samplingsfrekvensen 840 Hz vilket ger Nyquistfrekvensen 420 Hz. Nyquistfrekvensen är den maximala frekvens som kan lagras, om högre frekvenser finns närvarande kan aliaseffekter uppstå viket kan leda till vikningsdistorsion (vilket ungefär betyder förvridning) [41] [42] . I Figur 20 visas acceleration vid 227 Hz vilket är en aliaseffekt då vibrationen som mättes var på 600 Hz.



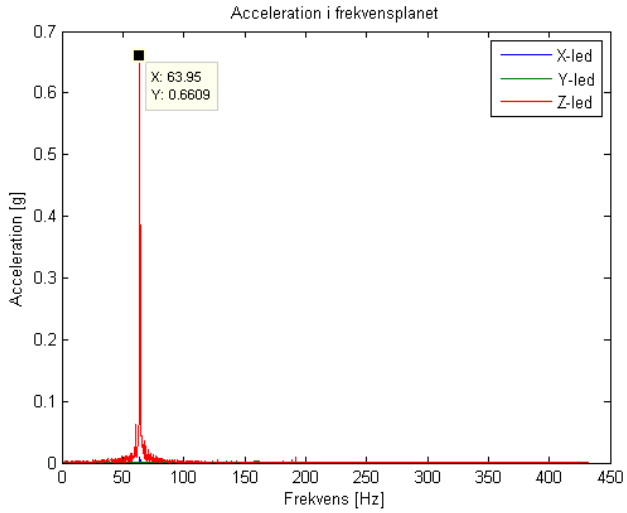
Figur 20. Acceleration i frekvensplanet från mätning av vibrationer med 600Hz.

Olika G-krafter

Mätningar visar att accelerometern visar 2 G då accelerationen i verkligheten överstiger 2 G. Första mätningen hade amplituden 1 G och resultatet visas i tidsplanet i Figur 21 och i frekvensplanet i Figur 22. Alla dessa mätningar gjordes med vibrationer med frekvensen 60 Hz för att kunna jämföras på ett bra sätt. Mätningen med amplituden 1 G ger ett mätfel på 6.58 % för frekvensen.

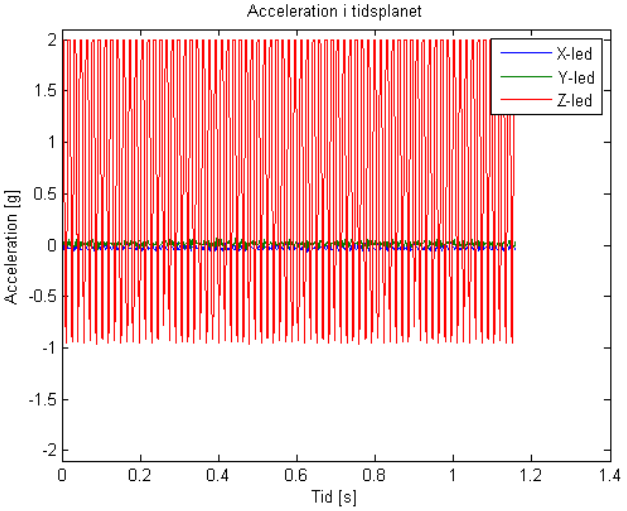


Figur 21. Acceleration i tidsplanet för mätning av vibration med 60 Hz och 1 G.

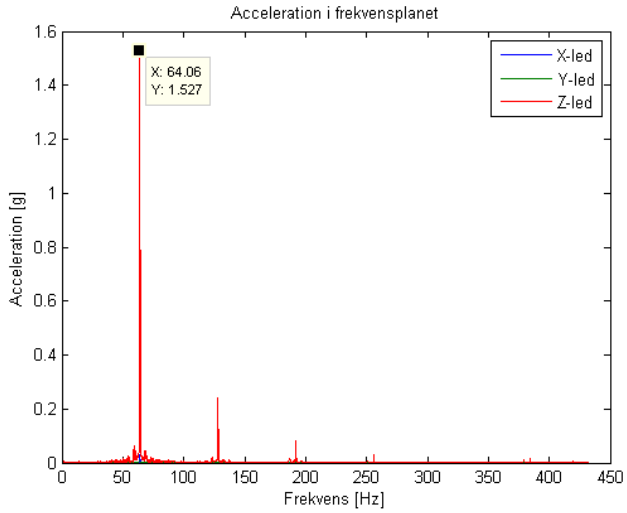


Figur 22. Acceleration i frekvensplanet för mätning av vibration med 60 Hz och 1 G.

I andra mätningen mättes vibrationer med amplituden 2 G. I Figur 23 syns tydligt att mätvärdena som mest kan anta 2 G. Accelerometern kan som mest visa 2 G vilket resulterar i att den övre amplituden bara blir 1 G då tyngdaccelerationen förskjuter mätningen till att variera kring 1 G. Resultatet i frekvensplanet visas i Figur 24, här både att frekvensen har ett större fel, nu 64.06 Hz vilket är 6.77 % fel, samt att övertoner av frekvensen återfinns i grafen.

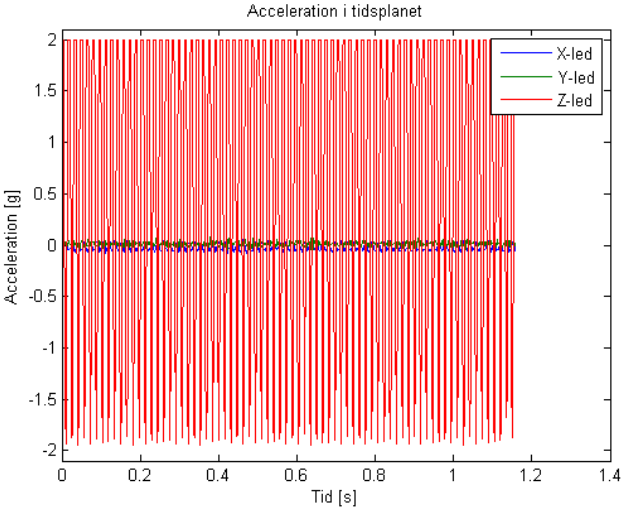


Figur 23. Acceleration i tidsplanet för mätning av vibration med 60 Hz och 2 G.

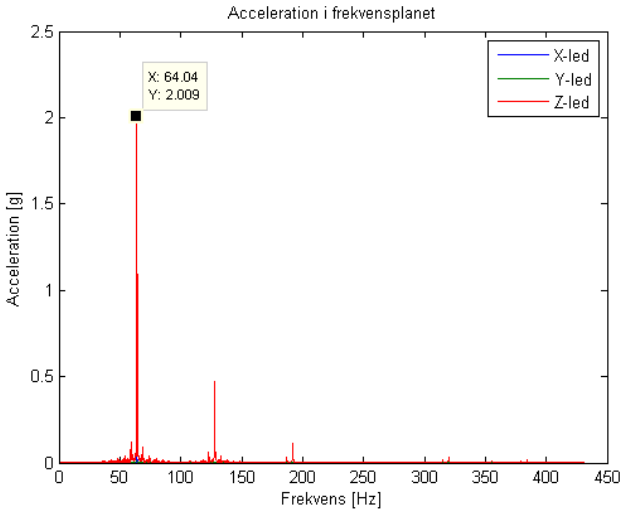


Figur 24. Acceleration i frekvensplanet för mätning av vibration med 60 Hz och 2 G.

Dessa fel blir ännu tydligare då amplituden ökar till 3 G. Då vibrationerna fortfarande svänger kring 1 G blir begränsningen till max 2 G ett ännu större problem, se Figur 25 för acceleration i tidsplanet. I Figur 26 ses ännu tydligare övertoner än tidigare. Tester med kraftigare acceleration än 3 G genomfördes inte då resultatet redan visar på stora begränsningar hos accelerometern samt att det vid denna tidpunkt i projektet var oklart om accelerometern kunde ta skada vid kraftigare accelerationer.



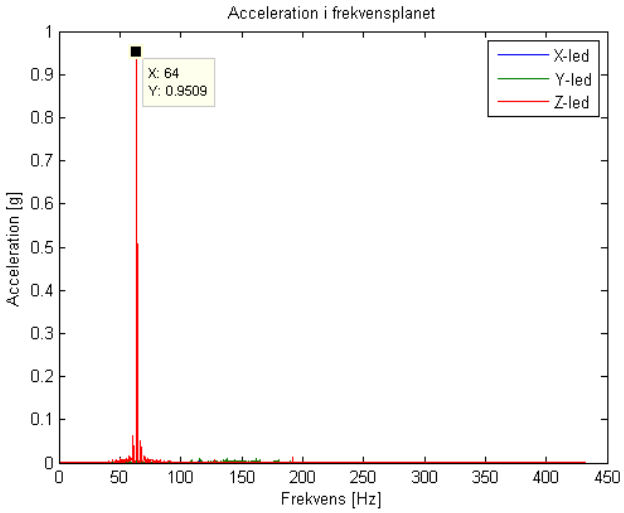
Figur 25. Acceleration i tidsplanet för mätning av vibration med 60 Hz och 3 G.



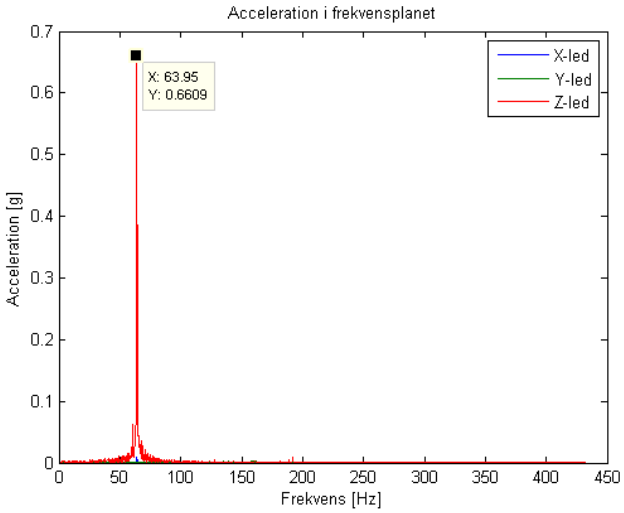
Figur 26. Acceleration i frekvensplanet för mätning av vibration med 60 Hz och 3 G.

Olika infästningar

Resultatet för infästningen med vax visas i Figur 27 och resultatet för infästningen med skruvar visas i Figur 28.



Figur 27. Mätning av vibration med 60Hz och 1 g och infästning med vax.



Figur 28. Mätning av vibration med 60Hz och 1 g och infästning med skruvar.

4.6.2.3 Reflektion kring kontrollerad indata

Här presenteras reflektioner under varje tests rubrik.

Olika frekvenser

Om mätningen över Nyquistfrekvensen bortses från hade alla mätningar ett frekvensfel på 6.5 – 6.7 %. Då teoretisk indata inte ger något fel samt att felet är så pass konstant antas det bero på felaktigheter i mätningen, framförallt dålig upplösning på accelerometern och oklarheter kring den verkliga samplingstiden. För att detta fel inte ska påverka möjligheten att hitta exempelvis specifika lagerfel kalibreras analysprogrammet för att hantera dessa felaktigheter, se avsnitt 5.5.2.

Slutsatser som kan dras av mätningen över Nyquistfrekvensen är att bara för att man ser en frekvens i analysen så måste inte det betyda att just den frekvensen faktiskt är närvarande i verkligheten, det kan bara vara en vikningseffekt av en mycket högre frekvens som inte hårdvaran kan uppfatta.

Olika G-krafter

Det snäva mätintervallet hos accelerometern är en kraftig begränsning för vilka vibrationer det är lämpligt att mäta på. Accelerationsamplituden översteg mätintervallet i tidsplanet och det bildas övertoner i frekvensplanet. Förmodligen skulle större accelerationsamplitud ge större övertoner vilket kan göra att det är svårt att se vilken frekvens som är grundfrekvensen vilket kan skapa stora problem vid frekvensanalys.

Olika infästningar

Frekvensen för de båda infästningarna är i princip densamma och de små variationerna antas bara bero på mätosäkerhet (vilket kan vara ± 2.5 % enligt datablad [23]).

Noterbart är dock att även amplituden varierar mellan de olika infästningarna, vax som intuitivt antas vara en mindre ”korrekt” infästningsmetod visar ett resultat närmare det förväntade 1 G än vad den skruvade infästningen gör. Vad detta beror på är inte känt. Då vax visar sig ge tillförlitliga resualtat och dessutom är mer lättanvänt och flexibelt än fastskruvning kommer vax användas i resterande mätningar.

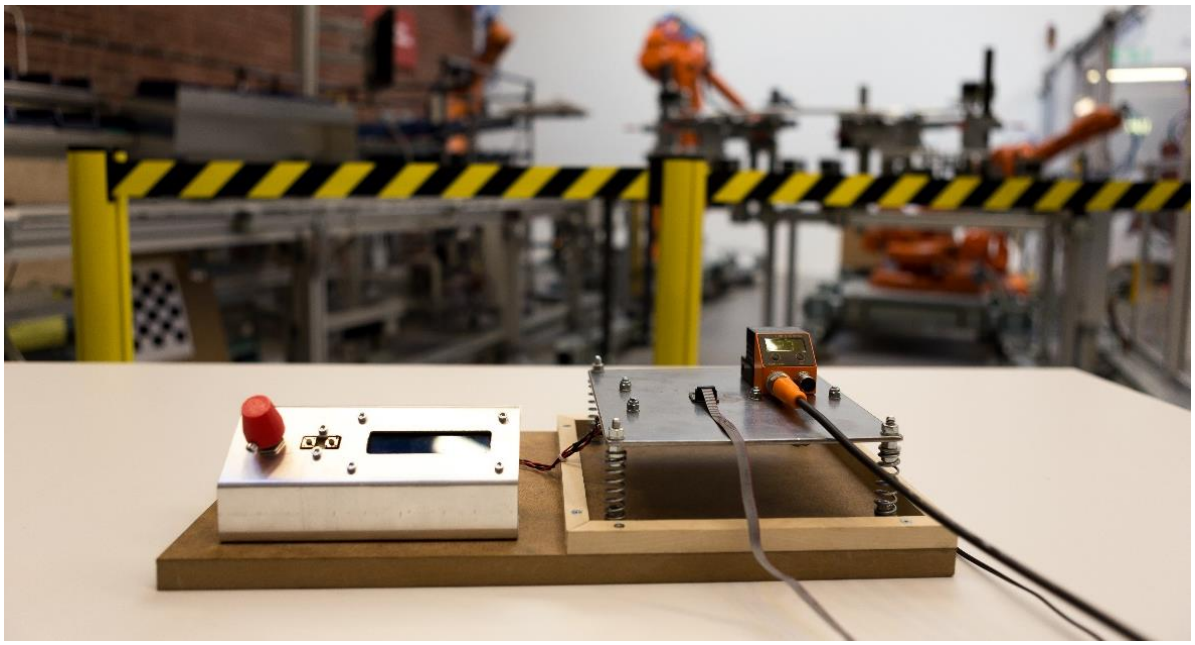
4.6.3 Tester på testmiljö

En testmiljö konstruerades för att kunna mäta på vibrationer utan att ha tillgång till maskiner. Genomförande, resultat och reflektion från mätningarna presenteras nedan.

4.6.3.1 Genomförande tester på testmiljö

Mätningar genomfördes genom att accelerometern monterades på stålplattan och motorerna genererade vibrationer. Testerna gjordes för att kunna framförallt undersöka hur olika förändringar i mjukvaran för datainsamling påverkade sampeltid, mätintervall och skrivtid till SD-kort.

Tester gjordes också med mätutrustning från IFM monterat på stålplattan för att verifiera hastighetsberäkningar, se Figur 29.

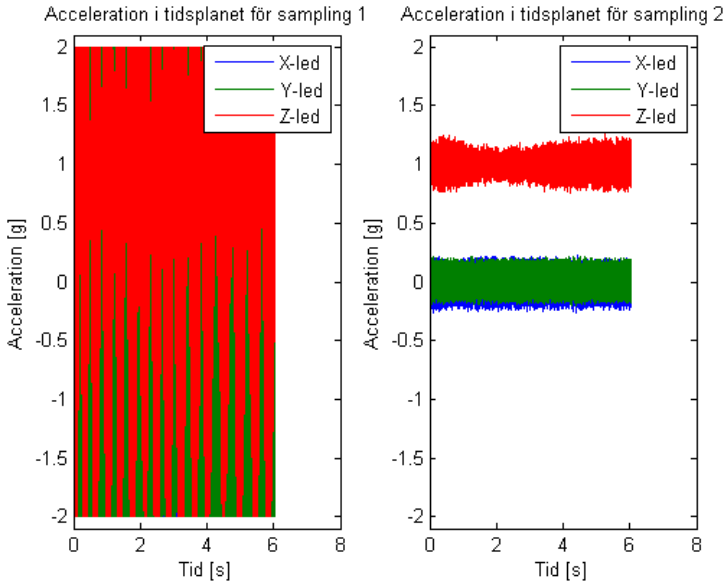


Figur 29. Tester på testmiljö.

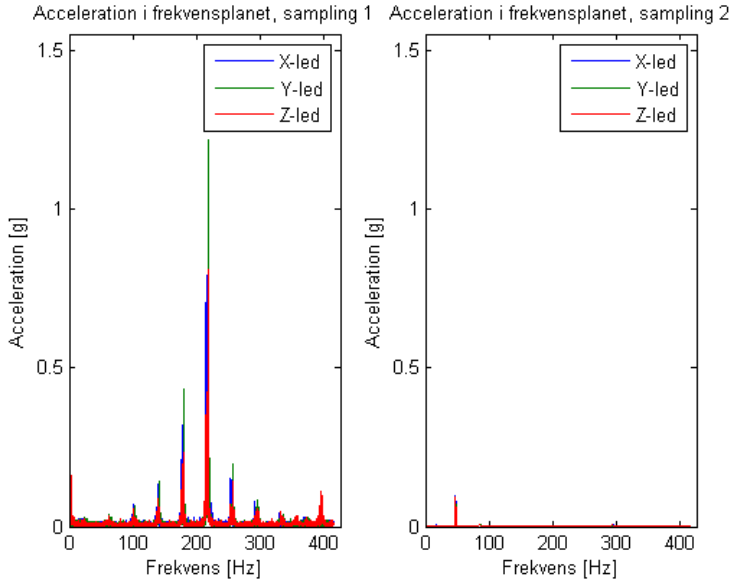
4.6.3.2 Resultat tester på testmiljö

Då vibrationerna som testmiljön avger är kraftiga (med höga G-krafter) har det varit ett bra sätt att analysera hur amplituden överstiger mätintervallet och se hur svårtolkat resultatet blir, för lösningen på detta problem se avsnitt 5.4 och 5.5.1. Figur 30 och Figur 31 visar resultatet från två mätningar som gjordes med olika hastigheter på testmiljön. Sampling 1 var med testmiljön på maximal hastighet och sampling 2 på låg hastighet.

Vid mätning på testmiljön har stora instabilitetsproblem hos hårdvaran som används för datainsamling upplevts, hårdvaran har inte kunnat startas, låst sig och uppvisat slumpmässigt och oförutsägbart beteende.



Figur 30. Acceleration i tidsplanet för två mätningar på testmiljön.



Figur 31. Acceleration i frekvensplanet för två mätningar på testmiljön

4.6.3.3 Reflektion kring tester på testmiljö

Testmiljön har använts i stor utsträckning för att avgöra om små förändringar i sampelprogram ger förändrade resultat och för att kunna utvärdera påverkan av G-krafter och olika frekvenser. Tack vare testmiljön var det möjligt att få snabb återkoppling på förändringar i mjukvaran för datainsamling vilket även påskyndade utvecklingen av mjukvaran.

5 Steg 2 – Vidareutveckling och fortsatta tester

Under steg 2 i utvecklingen låg fokus på utförande av tester på andra mätobjekt än testmiljön. Områden som ingick var befintliga maskiner som svarv, samt maskiner på företag. Därmed erhölls mer data för analys och utveckling av analysmetoder. Metodiken var densamma som i steg 1.

5.1 Företagskontakt 2

Under steg 2 utökades företagskontakten till att även omfatta företag med maskiner i produktion som var lämpliga att genomföra tester med prototypen på samt att säkerställa vilka lagerdata som vanligtvis förmedlas till kund från tillverkaren.

5.1.1 Genomförande Företagskontakt 2

I steg två av projektet upprätthölls kontakten med IFM Electronics och utöver dessa kontaktades SCA samt Schaeffler Group. Tanken med detta var att få möjlighet att testa hårdvaran i praktiken samt att få belägg för att fler än en tillverkare av kullager tillhandahåller de lagerdata som är nödvändiga för analysen.

5.1.1.1 SCA

På Lilla Edets bruk i Lilla Edet tillverkar SCA mjukpapper under varumärkena Edet, Edet Torky och Tork. Anläggningen har ca 400 anställda och producerar ungefär 100 000 ton papper årligen [43].

5.1.1.2 Schaeffler

Schaefflerkoncernen är en global underleverantör till fordonstillverkare såväl som övrig industri. Koncernen är en av Europas största familjeägda företag och levererar bland annat rull- och glidlagerlösningar för mängder av industriella tillämpningar. Till koncernen hör varumärkena INA, FAG och LUK [44].

5.1.1.3 Intervju 1 – Björn Lenér, IFM Electronics

Hos IFM Electronics intervjuades Björn Lenér, Product Marketing Director och Deputy MD, som fick svara på frågor angående deras produkter, vanliga kundkrav samt vibrationsmätning i allmänhet. Något som Björn var särskilt tydlig med var att det var viktigt att veta vad syftet med mätningen är, varför vill företaget mäta och vad företaget hoppas se eller åstadkomma efter mätningen. IFM erbjuder produkter som, var för sig eller tillsammans, möjliggör mätning av totalvibration mätt i mm/s, flöden av till exempel vatten eller luft, detektering av partiklar i olja samt lagerskador.

Björn kunde även bekräfta att det är viktigt att mäta nära den punkt man är intresserad av. Då det enligt Björn var svårt att med säkerhet upptäcka en lagerskada på ett avstånd längre än 25 cm från inlagringen även om denna var förbunden med motorer i storleken 30-40 kW. Han påtalade även ett annat användningsområde för vibrationsmätning, det då man har den omvända situationen att vibrationer ska finnas i processen. Exempel på detta är vid blästring då vibrationerna drastiskt minskar eller upphör när blästringssanden tar slut eller för vissa matarbord i industrin som normalt ska vibrera.

Vidare framgick, i enlighet med vad som konstaterats tidigare i projektet, att tekniken i sig är gammal men att IFM ser hur högindustrialiserade länder behöver den här typen av system för att öka utnyttjandegraden hos maskinerna och göra mer jobb med en mindre personalstyrka. En fördel med IFM:s system var enligt Björn att de jämfört med sina konkurrenter hade en lägre implementeringskostnad då dessa i större utsträckning lade sina kostnader i mjukvaran än vad IFM gjorde. IFM:s kunder är ungefär jämnt fördelade mellan slutkund och maskinbyggare.

En särskilt uppskattad funktion hos IFM:s produkter är självtestfunktionaliteten. Eftersom mätarna kan sitta monterade i flera år utan att ett fel rapporterats är det viktigt att veta att detta inte beror på att mätaren själv fallerat. Andra vanliga kundkrav handlar ofta om att utrustningen ska vara enkel att installera och använda, ha möjlighet att integreras med överordnade övervakningssystem samt att det

erbjuds goda möjligheter till support och service. Prisnivån var inte heller oviktig, dock framkom inte vad kunderna vanligtvis var beredda att betala respektive vad som ansågs vara prisvärt.

Avslutningsvis konstaterade Björn att de kunder som väl anammar tekniken är mycket nöjda och gärna använder produkterna för att få ut mer information från sin maskinpark än vad som var tänkt från början. Svårigheten ligger alltså till stor del i att få kunden att vilja tillämpa vibrationsmätning, eftersom det kräver tid och engagemang från deras sida.

5.1.1.4 Intervju 2 – Andreas Lood, Schaeffler Group

Hos Schaeffler Group intervjuades Andreas Lood som svarade på frågor angående deras produkter för vibrationsmätning samt marknaden för dessa i allmänhet. Schaeffler tillverkar, som tidigare nämnts, komponenter framförallt till fordonsindustrin men har även kunder inom övrig industri. Inom området konditionsbaserat underhåll erbjuder de tre system varav två riktar sig mot större processindustri som stålverk och pappers- eller massabruk. Den produkt som var av mest intresse för projektet demonstrerades genom att Andreas kopplade upp sig mot den SmartCheck som fanns installerad vid FAG:s fabrik i Tyskland och genom mjukvaran kunde ta fram mätdata så väl som få uppdateringar av dessa i realtid samt ändra larmnivåer.

Tanken med produkten är att kunna erbjuda små- och medelstora företag en enkelt insteg till ”Industri 4.0”, där SmartCheck kan användas för att driva maskinparken optimalt. Andreas förklarade vidare att ett annat användningsområde för SmartCheck var ombord på större fraktfartyg, där möjligheten att låta FAG övervaka och analysera mätdata gjorde att de kunde ge redarna rekommendationer på hur lång driftstid de kunde förvänta sig av sitt maskineri. På så sätt var det i sin tur möjligt för dessa att i förväg planera in underhållsstopp, där fartyget kanske måste tas in torrdocka eller liknande. Detta tillvägagångssätt är själva grundtaken med konditionsbaserat underhåll.

5.1.2 Resultat Företagskontakt 2

I steg 2 av projektet ledde företagskontakten till möjlighet att validera om analysmetoden kunde detektera inner- och ytterringsskada genom två besök hos IFM för tester på deras demorigg samt möjlighet att testa prototypen i industrin genom att mäta på en omrullningsmaskin hos SCA Lilla Edet. Genom kontakten med Schaeffler Group var det möjligt att verifiera att de och andra lagertillverkare kan tillhandahålla de lagerdata som krävs för analysen, mötet med dem innebar också idéer till det framtida arbetet med prototypen.

5.1.3 Reflektion kring Företagskontakt 2

Det andra besöket hos IFM gav möjlighet att validera analys- och mätmetoder och resultatet av dessa var mycket lovande. Det avslutande testet hos SCA var en mycket givande bekräftelse på det arbete som lagts ner. Sammantaget har kontakten med IFM Electronics och SCA haft stor betydelse för projektets genomförande. Mötet med Schaeffler gav god insikt i den konkurrens som finns på marknaden, och deras produkt är i många avseenden vad projektet haft som målbild. Huvudsyftet med att kontakta Schaeffler Group var dock att verifiera tillhandahållandet av lagerdata, därför togs kontakten såpass sent i arbetet att de uppslag demonstrationen av SmartCheck gav inte kunde implementeras utan fick lämnas som förslag till framtida arbete.

5.2 Hårdvara för datainsamling

Det som är gjort i detta steg är endast tillägg till den hårdvara som används i steg 1, se avsnitt 4.3.

5.2.1 Genomförande för datainsamling

Tre stycken moduler för sammankoppling av fler än en flatkabel till accelerometer har lagts till för möjliggöra ökat avstånd mellan mätpunkt och övrig elekronik. Två knapp-moduler har också lagts till för montering så de kan användas då huvudkortet är monterat i inkapslingen, se avsnitt 5.3. För sammankoppling av de tillagda modulerna har för plattformen avsedda 10-pins flatkablar använts [36]. I Tabell 3 kan produktnamn för den hårdvara som användts avläsas.

Tabell 3: Benämning och produktnamn

Benämning:	**Produktnamn:**
Sammankoppling (modul)	GHI Electronics Extender Module [45]
Knapp (modul)	GHI Electronics Button Module [46]

5.2.2 Resultat för datainsamling
Accelerometern kan nu placeras på ett större avstånd från huvudkortet och övrig hårdvara för datainsamling, interaktion kan nu också ske då huvudkortet sitter monterat i inkapslingen, se avsnitt 5.3.

5.2.3 Reflektion för datainsamling
De förändringar som skett för hårdvaran i detta steg är de tillägg som gjorts för montering i inkapslingen, 5.3, samt för att möjliggöra montering av accelerometer modulen på ett längre avstånd från huvudkortet övrig hårdvara. Detta då det vid tester funnits behov av att kunna placera accelerometern på ett större avstånd från övrig elektronik. Då kabellängden avsevärt förlängts skulle det kunna innebära större risk för störningar, detta har inte upplevts och därför heller inte undersökts närmare.

5.3 Inkapsling
Eftersom hårdvaruplattformen i sitt grundutförande inte är skyddad mot varken vatten eller damm och dessutom otymplig att transportera på grund av de många anslutna modulerna behövdes skydd mot yttre fysisk påverkan samt något som förenklade transport och installation. I detta avsnitt behandlas konceptgenerering av sådan inkapsling.

5.3.1 Genomförande Inkapsling
För att säkerställa inkapslingens kvalitet och nytta för kund användes metodik från Värdemodellen, vilket ska borga för att inkapslingen uppfyller de krav som den tänkta kunden och projektet ställer.

5.3.1.1 Funktionell kravspecifikation
Att formulera funktioner för en produkt är viktigt för att uppfylla behov och krav från brukare och på så sätt ge en tillförlitlig produkt, som är relevant i samspelet mellan konsumenterna och deras omgivning. Samtidigt som kundvärdet ökar med en produkts funktionalitet så är detta ett viktigt steg i produktutvecklingsmetoden, för mer information om funktionerna, se bilaga F.

5.3.1.2 Krav på inkapslingen
Inkapslingen ska skydda hårdvaran från damm och väta samtidigt som den måste vara smidig nog för att medge montering nära mätpunkten. Vanliga krav på inkapsling av vibrationsmätare är således damm- och vattentäthet samt beständighet mot slag och stötar, se avsnitt 2.4.

En rad krav och önskemål ställdes på inkapslingen, dessa presenteras i Tabell 4. I korthet handlar det om att underlätta transport av hårdvaran samt ge någon form av skydd för hårdvaran när mätningar görs utanför PSL. Samtidigt behöver det vara möjligt att sätta i och ta ur SD-kort för att kunna analysera mätdata samt byta batterier vid behov.

Tabell 4: Kravspecifikation på inkapslingen

Kriterie	Målvärde	Krav/Önskemål	Verifieringsmetod
1. Funktion			
1.1 Skydda hårdvaran från vatten och smuts		K	Uppskattning
1.2 Tillåta enkel åtkomst till SD-kort och batteri-modul		K	Utformning/Design
1.3 Hålla god ordning på de olika modulerna		Ö5	Motorstyrning
1.4 Göra hårdvaran enkel att ta med till tester		Ö4	Motorstyrning
2. Prestanda			
2.1 IP-klass	IP-44	Ö5	Mätning
2.2 IP-klass	IP-56	Ö4	Design
3. Material			
3.1 Kunna vistas under längre perioder i industriella miljöer		K	Materialdata
4. Design			
4.1 Ska passa in i miljön		Ö3	Uppskattning
5. Användning			
5.1 Avtagbart lock	20 s	K	Test
5.2 Låg ljudnivå		Ö3	Mätning
6. Modularisering			
5.1 Enkel att reparera/utveckla		Ö3	Design

5.3.1.3 Kända koncept

De produkter som studerats har alla designats på ett sätt som gör dem damm- och vattentäta, därmed har de ingen extra inkapsling. Då projektets hårdvara inte designats för den användning som nu tänkts, behövs därför extra skydd. Utöver att skydda mikrokontrollern och själva mäthårdvaran kan det även vara intressant att skärma kablarna för att undvika att onödigt mätbrus induceras. Vid besöket på IFM visades en vibrationsmätare som var helt inkapslad i syrafast rostfritt stål och som dessutom hade skärmade kablar. En sådan lösning är inte möjlig att genomföra inom ramarna för projektet då tidsåtgången skulle bli för hög.

5.3.1.4 Referenslösning

Som referenslösning valdes en kopplingslåda designad för och tillverkad med en 3D-printer, då det gav möjlighet till optimal placering och åtkomst av hårdvaran. Detta koncept medgav stor frihet till skapande av önskad design såväl som funktion.

5.3.1.5 Konceptgenering

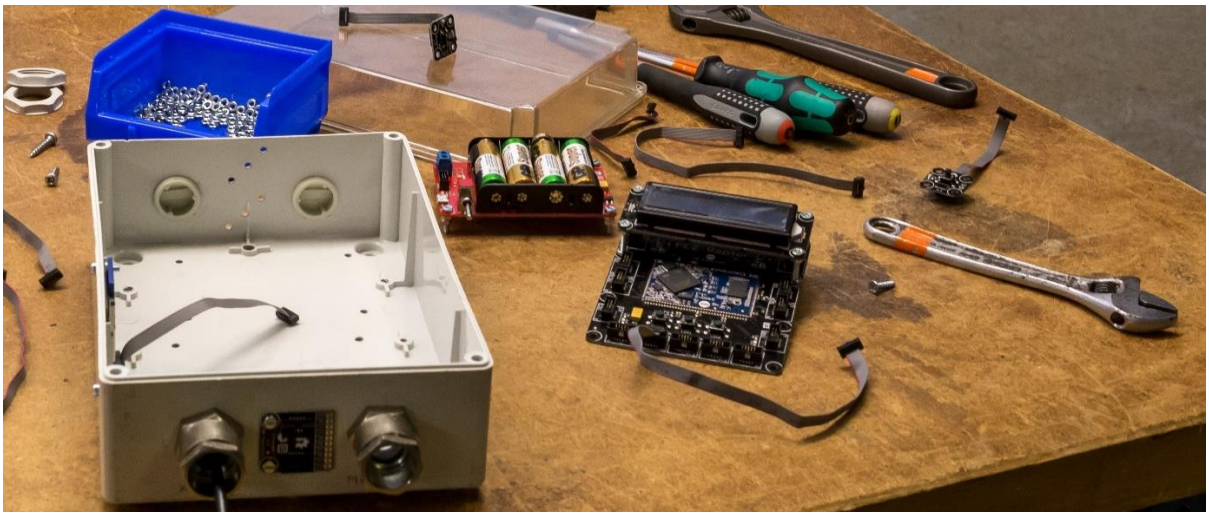
Vid konceptgenereringen av inkapslingen användes samma metodik som för testmiljön. Konceptval gjordes genom att jämföra koncepten med referenslösningen och sedan sätta det koncept med bäst resultat som referens för en andra iteration av jämförelser. För utförligare beskrivning av koncepten, se bilaga G.

5.3.1.6 Valt koncept

Det valda konceptet blev en icke IP-klassad låda, detta då det bedömdes att åverkan från montering och eventuell kabeldragning skulle omintetgöra den IP-klassning som en IP-klassad låda har och då vore en IP-klassning onödig både praktiskt och ekonomiskt, då dessa lådor tenderar att vara dyrare än en otätad dito. Referenslösningen valdes inte då projektet inte hade resurser till att genomföra konstruktion och tillverkning av denna. För mer information kring konceptvalet se bilaga H.

5.3.1.7 Montering av hårdvara i inkapslingen

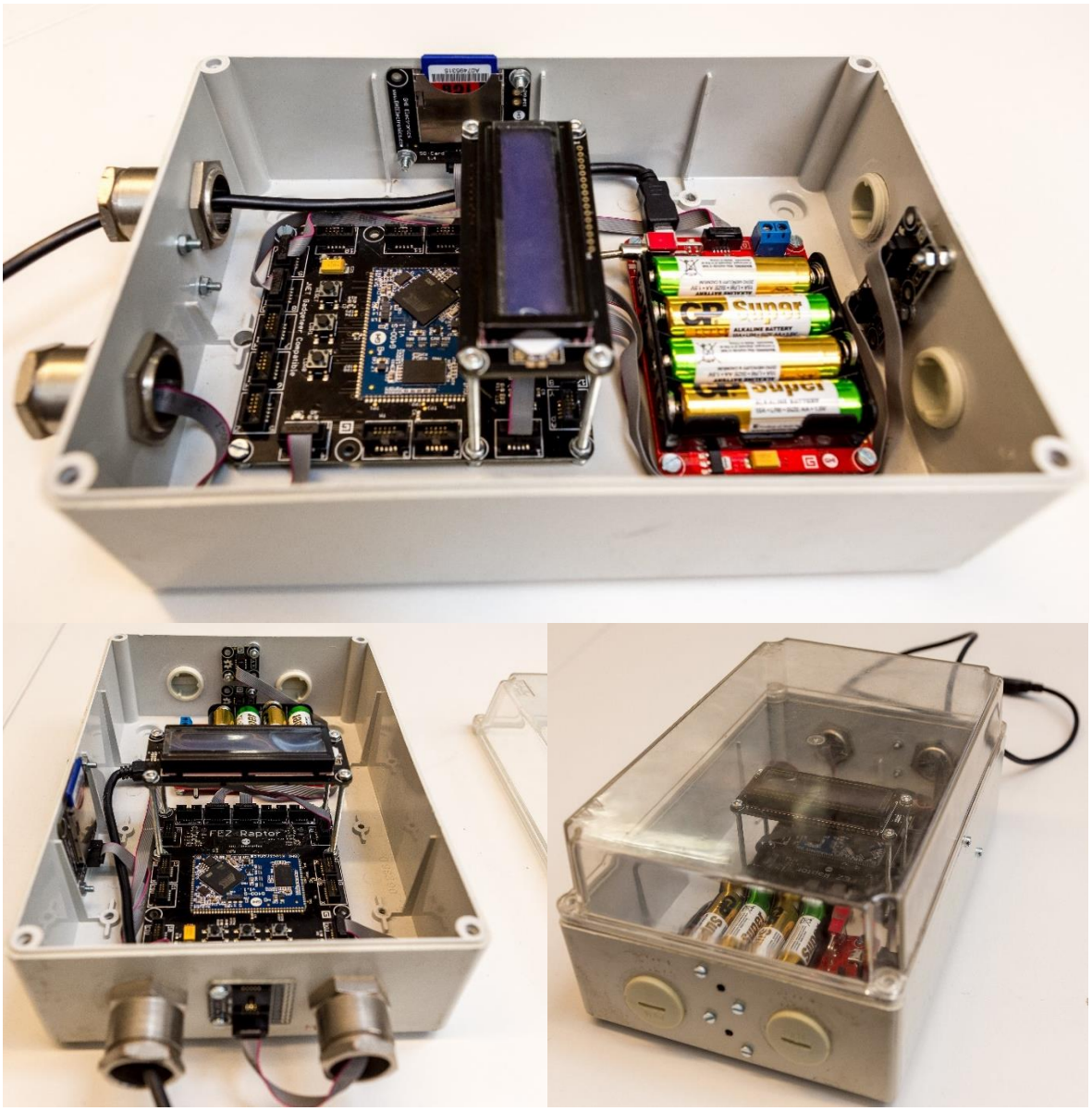
När konceptvalet gjorts lokaliserades en låda som motsvarade det valda konceptet och som hårdvaran sedemera monterades i. I Figur 32 ses lådan innan montering. I bortre kanten av lådan syns hål för montering av knappar, dessa programmeras sedan för att styra samplingen utan att direkt åtkomst till huvudkortet behövs. På hitsidan lådan syns utgång för USB-kabel samt genomföring för anslutning av förlängningssladd via ”Extender Module”, se avsnitt 5.2, till accelerometer. Hårdvaran efter montering i inkapslingen kan ses i Figur 33**.**



Figur 32: Till vänster i bild syns undre halvan av lådan i vilken hårdvaran ska monteras

5.3.2 Resultat Inkapsling

Då det inte bedömdes vara av kritisk vikt för genomförandet av projektet uppfyller inte den inkapsling som gjordes önskemålen om IP-klassning. Dock ger den ändå ett visst skydd mot damm och stänk. Inkapslingen medger tillgång till minneskort, byte av batterier samt möjliggör montering av sensorn nära det lager vilket mätningen ska utföras på. Inkappslingen underlättar även transport av mäthårdvaran och skyddar mot yttre fysisk åverkan.



Figur 33: Hårdvaran monterad i inkapsling, med och utan lock.

5.3.3 Reflektion Inkapsling

Till en färdig produkt behövs inkapsling som uppfyller IP-certifiering, den lösning som projektet använder skyddar mot stänk och till viss del mot damm men är inte tillräcklig för permanent installation. IP-certifiering behöver dessutom utföras av ett testinstitut och var alltså inget som officiellt kunde genomföras av projektgruppen, att certifieringen överhuvudtaget nämns är på grund av att de liknande produkter som listas i avsnitt 2.4 är certifierade enligt detta och certifieringen då rimligtvis är av stort intresse för kund. Att just den här lådan valdes berodde på att den sedan tidigare fanns tillgänglig för projektet på Chalmers.

5.4 Mjukvara för datainsamling

I denna fas av mjukvaruutvecklingen har störst fokus legat på förbättring av mätdatans kvalitét och att utveckla den funktionalitet som skapats i första fasen. Detta då mätdatans kvalitét är av högsta betydelse för analys samt att tillagd funktionalitet bygger på den funktionalitet som skapats i första steget. Några av de allra största svagheterna efter den första fasen är den långsamma skrivningen av data till SD-kort och stora instabilitetsproblem vid skrivningen, samt att accelerometerns mätområde (± 2 G) vid tester och analys visat sig otillräcklig.

5.4.1 Genomförande av mjukvara för datainsamling

För att minska tiden för skrivning till SD-kortet har två av tidskolumnerna som tidigare skrevs tagits bort, den återstående är tiden sedan mätningens start.

En stor mängd förändringar och tester av koden för skrivning har gjorts för att förbättra stabiliteten och hastigheten för skrivning till SD-kort.

I drivrutinen för accelerometer-modulen har funktionalitet för att byta mellan mätintervallen ± 2 G, ± 4 G och ± 8 G lagts till samt möjlighet att utläsa det intervall som är inställt. För att åstadkomma detta läses och skrivs data direkt till kretsens register.

Funktionalitet har även lagts till i denna fas och en stor mängd förändringar och förbättringar har gjorts för att bättre tillgodose de behov som visats vid tester och analys av insamlad data. För att möjliggöra mätning över en längre tid utan krav på interaktion vid varje mätning har funktionalitet lagts till för att göra en serie mätningar, i ett förutbestämt intervall och antal.

5.4.2 Resultat av mjukvara för datainsamling

Detta resulterade i en minskning av tiden för skrivning med cirka 30 %. Resterande förändringar av koden för skrivning har avsevärt förbättrat stabiliteten och i stort sett eliminerat de problem som fanns med tillförlitligheten för detta i första fasen. Inga dramatiska förbättringar gällande hastigheten för skrivning har kunnat uppnås. I bilaga J kan ett exempel ses på det format den lagrade datan får i CSV filen.

Relevant information visas nu med lysdioden på huvudkortet samt den LCD-display som kopplats in. Funktionalitet för knapparna på huvudkortet har blivit betydligt mer robust och motsvarande funktionalitet har lagts till för de två knappmoduler som används vid montering i inkapslingen av hårdvaran, se avsnitt 5.3.

Funktionalitet för att utföra en serie mätningar har skapats, lagring av data för mätningar gjorda i serie sker på motsvarande sätt som enskilda mätningar, vilket beskrivs i avsnitt 4.4. Det som skiljer är att varje serie grupperas i egen mapp med samma namn som den första mätningen i serien.

5.4.3 Reflektion av mjukvara för datainsamling

Den kvarvarande tidskolumnen kan vid behov tillsammans med filnamnet som innehåller tiden sedan hårdvarans start användas för att räkna ut det som fanns i de två kolumner som tagits bort. Även den resterande tidskolumnen skulle kunnat tas bort då analys skulle kunna göras utan den, för att kunna identifiera fel vid mätning har den lämnats kvar, det som här främst avses är avvikelser i tid mellan inhämtning av data.

Problemet med accelerometerns otillräckliga mätområde på ± 2 G har avsevärt förbättrats då drivrutinen för denna skrivits om. Den krets som används på accelerometern (MMA8453Q från Freescale Semiconductor, Inc) har via studier av dess datablad visat sig ha stöd för mätning upp till ± 8 G [22] [23]. Den negativa påverkan detta har är att mätdatas upplösning försämras lika mycket som mätområdet ökas, vid ± 8 G är upplösningen därmed endast ¼ av den då mätområdet ställs till ± 2 G.

En stor mängd tid, arbete och tester har lagts ner på att identifiera de problem som visat sig vid mätning på den konstruerade testmiljön, se avsnitt 4.2. Dessa problem är i form av att start inte kan ske då accelerometern monterats på testmiljön och denna vibrerar. Huvudkortet tappar även ofta kontakten om den kopplas till en dator och mjukvaran låser sig, detta nästan enbart då accelerometern monterats på testmiljön och denna vibrerar. Funktionalitet för knappar och annat orelaterat till accelerometern startas och beter sig också oberäneligt beroende på vilken port acceleromern ansluts till vid dessa tester. Detta har inte kunnat reproduceras då test genomförts på andra maskiner, inte heller har det kunnat fastställas om det är ett hård- eller mjukvaruproblem. Om det är vibrationerna i sig själv, elektriska störningar eller något annat är även det okänt.

5.5 Vidareutveckling av analysmetod

I andra delen av utvecklingen för analysen var fokus på att utifrån resultat från tester utveckla analysmetoden för att visa tydligare information och på så sätt eventuellt kunna upptäcka andra typer av fel. För att beskriva analysmetoden delas den in i delområden. Varje delområde har en egen rubrik och där presenteras genomförande, resultat och reflektion.

5.5.1 Accelerometer med större mätintervall

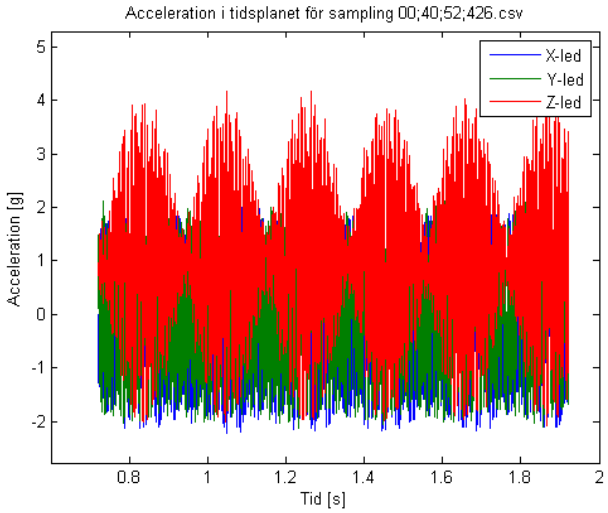
Då det tidigare visat sig att mätintervallet var en stor begränsning, se avsnitt 4.5.5 ökades accelerometerns mätintervall genom omskrivning av drivrutinen, se avsnitt 5.4.

5.5.1.1 Genomförande accelerometer med större mätintervall

Accelerometerns drivrutiner skrevs om till att klara att mäta i intervallet ± 8 G vilket underlättade fortsatta mätningar betydligt eftersom all data nu kunde tas hänsyn till, jämfört med tidigare då amplituden översteg mätintervallet.

5.5.1.2 Resultat accelerometer med större mätintervall

I Figur 34 visas en mätningen på testmiljön när accelerometern klarar av att mäta ± 8 G. Här syns tydligt att accelerationsamplituden för z-led är 3 G.



Figur 34. Mätning med accelerometer med större mätintervall.

5.5.1.3 Reflektion kring accelerometer med större mätintervall

Med intervallet ± 8 G ses inga direkta begränsningar i mätintervallet då få vibrationer är så kraftiga i de tester som utförts. Dock samplar accelerometern med samma antal diskreta punkter som förut vilket gör att upplösningen minskar betydligt då mätintervallet ökar vilket istället blir en begränsning, se avsnitt 5.4.

5.5.2 Kalibrering för frekvensfel

Vid mätningar med accelerometern fås ständiga fel i frekvensinnehåll, se avsnitt 4.6.2, vilket behöver kalibreras för.

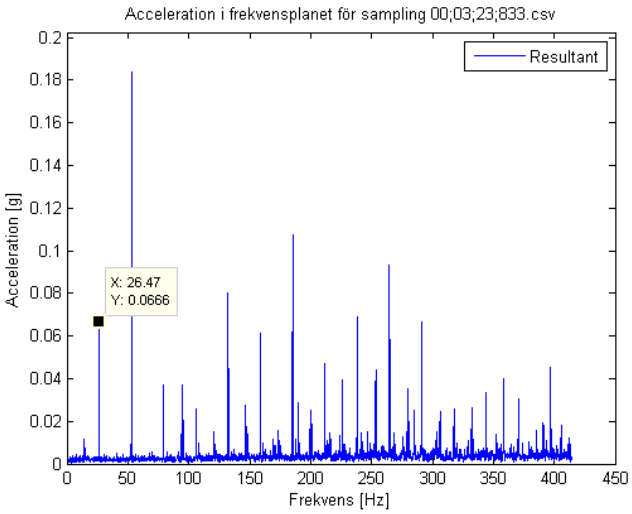
5.5.2.1 Genomförande kalibrering för frekvensfel

Då mätningar med teoretisk indata visade rätt amplitud medan mätningar med kontrollerad indata visade konstant fel med ca 6,5 % skedde en kalibrering. Då hårdvaran inte kan kalibreras gjordes kalibreringen av frekvensfelet i analysen. Detta genom att frekvensen vid ett visst varvtal beräknades och sedan mutipliceras frekvenserna med felprocenten för att uppnå rätt frekvens.

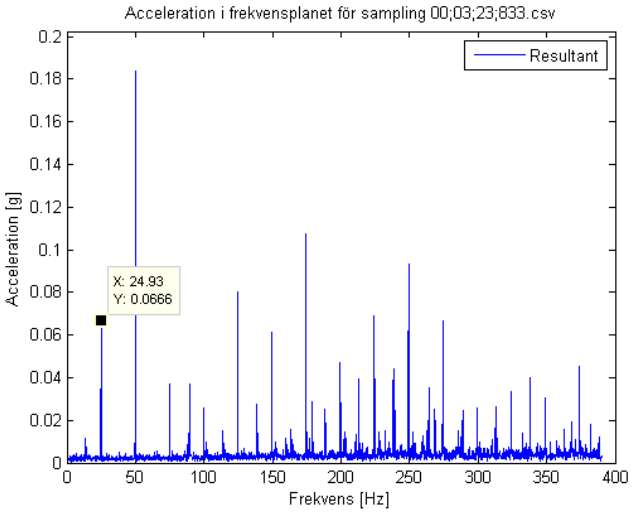
Mätning på maskin med varvtal 1496 rpm bör ge topp vid: $\frac{1496}{60} = 24.93\ Hz$

5.5.2.2 Resultat kalibrering för frekvensfel

I första grafen, Figur 35, ses ett fel mot förväntad frekvens på 6,18 %. Analysprogrammet kalibreras mot felet och resultatet visas i nästa graf, Figur 36, där felet är 0 %.



Figur 35. Före kalibrering



Figur 36. Efter kalibrering.

5.5.2.3 Reflektion kalibrering för frekvensfel

Detta var en nödvändig åtgärd för att senare kunna studera felfrekvenser vid lagerfel. Om man endast är intresserad av att studera genomsnittliga amplituder i frekvensplanet hade denna kalibrering inte behövt göras då felet var förhållandevis litet.

5.5.3 Hastighet och amplitud

För att kunna analysera även hastighet och amplitud fick beräkningar göras. Att kunna beräkna detta är av intresse för att vid framtida arbete med produkten kunna uppfylla ISO 10816, vilken i huvudsak behandlar vibrationer som ”vibrationsmagnitud” med enheten mm/s.

5.5.3.1 Genomförande hastighet och amplitud

Alla rörelser kan beskrivas som en summering av många sinusfunktioner. Här används följande beteckningar:

y = Vibrationens amplitud [m] , v = Hastighet [m/s] , a = Acceleration [m/s^2]

A = Amplitud hos vågrörelsen [m], ω = Vinkelhastighet [rad/s]

t = Tid [s] , f = Frekvens [Hz] , φ = Fasförskjutning [rad]

För att förenkla förklaringen av resonemanget används bara en sinsuvåg:

$$y(t) = A\sin(\omega t + \varphi) = A\sin(2\pi f t + \varphi)$$

Derivatan av en stäcka är hastigheten:

$$v(t) = \frac{dy(t)}{dt} = 2\pi f A\sin(2\pi f t + \varphi) = 2\pi f\, y(t)$$

Andraderivatan av en sträcka är accelerationen:

$$a(t) = \frac{dy(t)^2}{d^2 t} = (2\pi f)^2 A\sin(2\pi f t + \varphi) = (2\pi f)^2\, y(t)$$

För att omvandla acceleration till hastighet och acceleration används alltså:

$$v(t) = \frac{a(t)}{2\pi f} \quad , \quad y(t) = \frac{a(t)}{(2\pi f)^2}$$

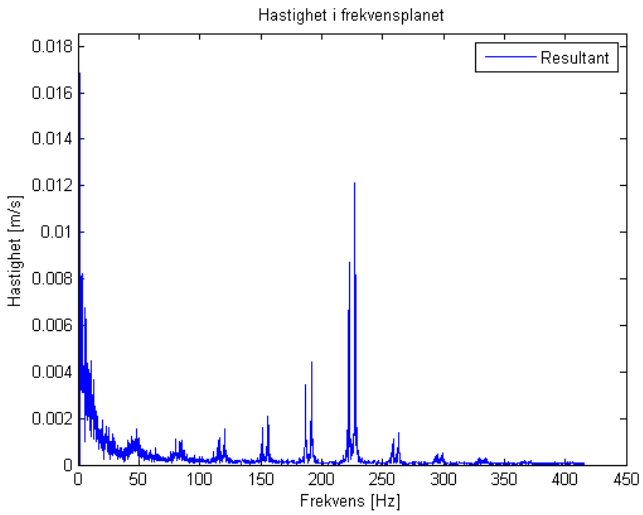
För att förenkla beräkningen görs detta i frekvensplanet istället, vilket ger samma resultat:

$$V = \frac{A}{2\pi f} \quad , \quad Y = \frac{A}{(2\pi f)^2}$$

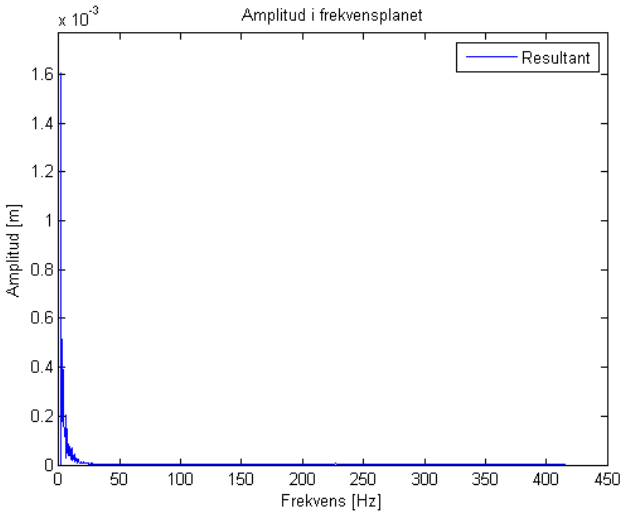
Där A nu är accelerationen i frekvensplanet.

5.5.3.2 Resultat hastighet och amplitud

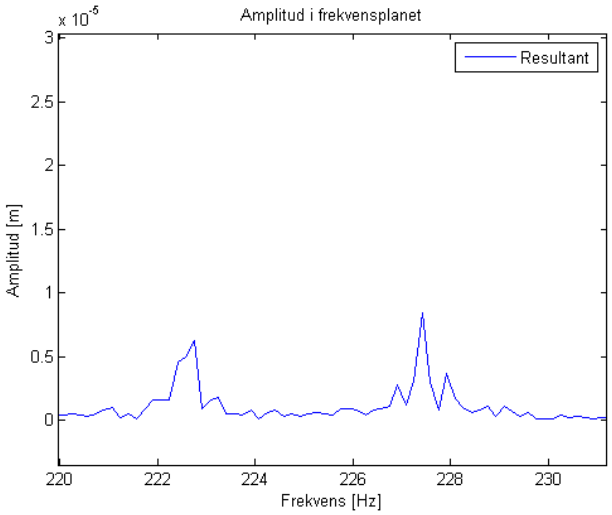
Figur 37 visar ett exempel på hur hastigheten för en vibration kan se ut. Figur 38 visar amplituden hos samma vibration, dock är amplituden så låg att den är svår att läsa av, i Figur 39 visas därför ett utsnitt kring de frekvenser som gav hög hastighet.



Figur 37. Hastighet i frekvensplanet.



Figur 38. Amplitud (sträcka) i frekvensplanet.



Figur 39. Amplitud (stäcka) i frekvensplanet, här med ett utsnitt från Figur 39 kring de intressant frekvenserna.

5.5.3.3 Reflektion kring hastighet och amplitud

Det kan i vissa fall vara intressant att titta på hastighet eller amplitud för en vibration, men oftast räcker det förmodligen med att studera accelerationen. Graferna för hastighet och amplitud beräknas genom att använda accelerationsdata så det är i grunden samma data som analyseras. ISO 10816 är relevant att uppfylla för den framtida produkten då standarden tycks användas som någon sorts minsta gemensamma nämnare bland vibrationsmätare. Dock är detta inget som krävs för att faktiskt upptäcka skador eller fel hos maskiner, se avsnitt 5.6.

5.5.4 Optimering av antal datapunkter

Med datapunkter menas det antalet mätningar som tas vid varje mätningssekvens.

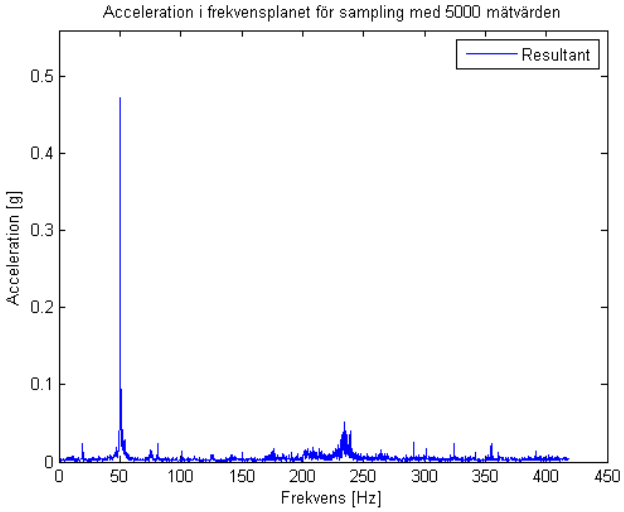
5.5.4.1 Genomförande optimering av antal datapunkter

Desto fler datapunkter en mätning har, desto noggrannare blir resultatet eftersom kortvariga störningar dämpas ut och noggrannheten på frekvenser blir bättre då mer data att analysera finns. Dock tar fler datapunkter längre tid att samla in och framförallt skriva till SD-kortet vilket leder till alltför långa tider mellan mätningarna.

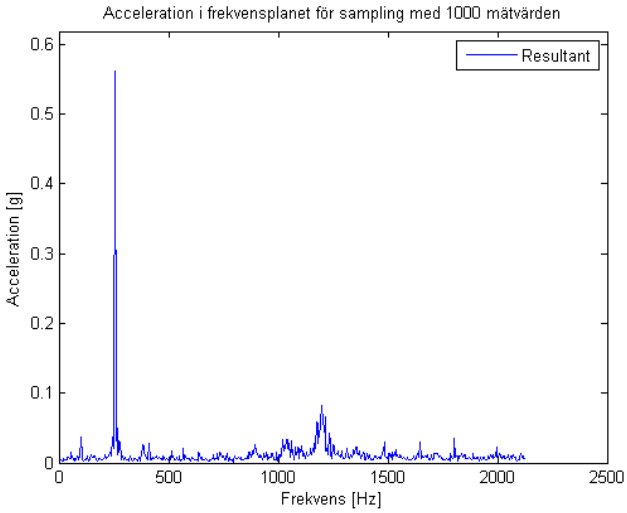
Detta har undersökts vidare genom att göra en lång mätning och analysera dess resultat. Därefter förkortas vektorn med datapunkter steg för steg och resultaten jämförs.

5.5.4.2 Resultat optimering av antal datapunkter

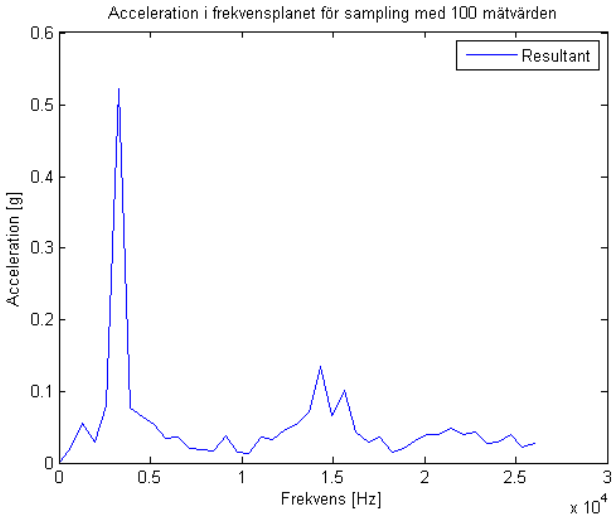
Allteftersom antalet datapunkter minskades, minskade också noggrannheten i resultatet. Noggrannheten var väldigt bra vid fler än 1000 datapunkter. Då under 1000 datapunkter användes minskade skillnaderna mellan brus och frekvenstoppar vilket kan försvåra avläsning något. Vid 100 eller färre datapunkter var det riktigt svårt att urskilja frekvenstoppar.



Figur 40. 5000 datapunkter.



Figur 41. 1000 datapunkter.



Figur 42. 100 datapunkter.

5.5.4.3 Reflektion kring optimering av antal datapunkter

Efter detta test valdes att sampla 3000-5000 datapunkter för att behålla en viss noggrannhet och ändå ha relativt kort skrivtid till SD-kortet.

5.5.5 Lageranalys

En vanlig metod för konditionsbaserat underhåll är att studera konditionen på lager

5.5.5.1 Genomförande av lageranalys

Vissa lagerskador avger speciella frekvenser som kan användas för att identifiera den specifika skadan. Ett fel på en ytterring avger en topp i acceleration varje gång en kula rullar förbi skadan, vilket kommer ge en ökning av en viss frekvens. På samma sätt kommer en skada på en innerring generera toppar med en viss frekvens varje gång en kula rullar förbi skadan.

För att hitta vilken typ av fel som ett lager har krävs information om lagret och dess tillstånd. Förklaringar av beteckningarna finns i Figur 43 och nedan:

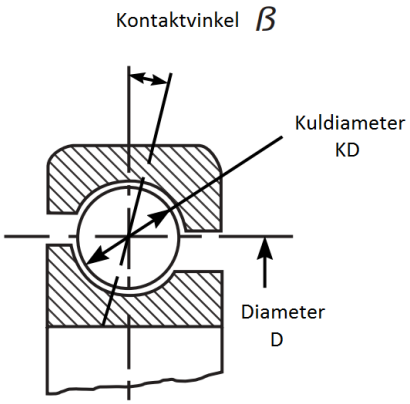
$n =$ antal kulor [st]

$f_r =$ relativ hastighet mellan inner- och ytterring $\left[\frac{\text{varv}}{\text{s}}\right]$

$KD =$ Kuldiameter [mm]

$D =$ Diameter (från mitten på kulorna) [mm]

$\beta =$ Kontakt vinkel [rad]



Figur 43. Lagerdata som behövs för berärkning av felfrekvenser.[3]

Om man har denna information kan man enkelt beräkna de så kallade felfrekvenserna för lagret. Dessa frekvenser är de frekvenser där en ökning av accelerationen indikerar på ett visst fel. Detta beräknas enligt [47]:

$$F_{ytterringsskada} = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{D} cos\beta\right)$$

$$F_{innerrringsskada} = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{D} cos\beta\right)$$

$$F_{kulskada} = \frac{PD}{BD} f_r \left(1 - \left(\frac{BD}{D} cos\beta\right)^2\right)$$

Vissa tillverkare av lager, bland annat SKF, Schaeffler och NSK, tillhandahåller onlineverktyg för att beräkna detta.

Då felen först inte syntes tydligt med denna analys testades olika metoder för att bearbeta data för att kunna visa felen. Då upplösningen både i amplitud och i frekvens är dålig kunde inte harmoniska frekvenser sorteras ut då dessa troligen inte skulle särskilja sig med felfrekvenserna som bara ger pikar, detta p.g.a. den dåliga upplösningen.

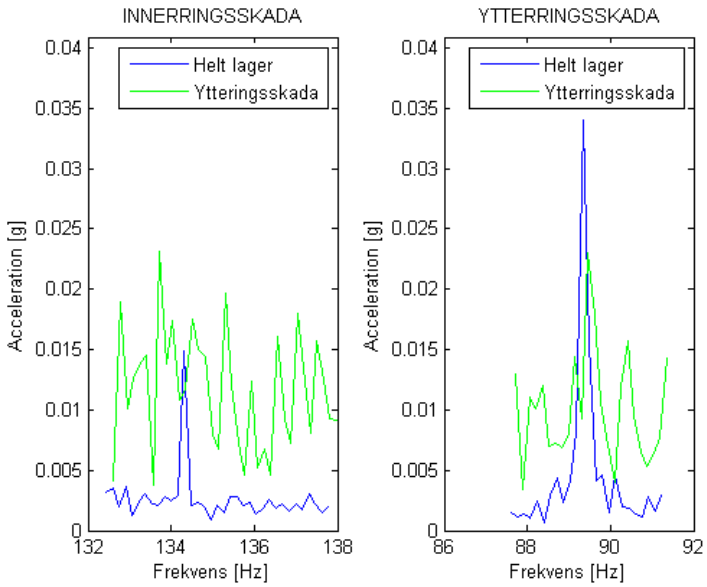
Lösningen blev att använda zero paddning samt att ta absolutbeloppet av accelerationen i tidsplanet. Zero padding kan på svenska kallas nollutfyllnad och är en metod där man förlänger indata med nollor och kan på så sätt ofta få högre frekvensupplösning [48].

5.5.5.2 Resultat av lageranalys

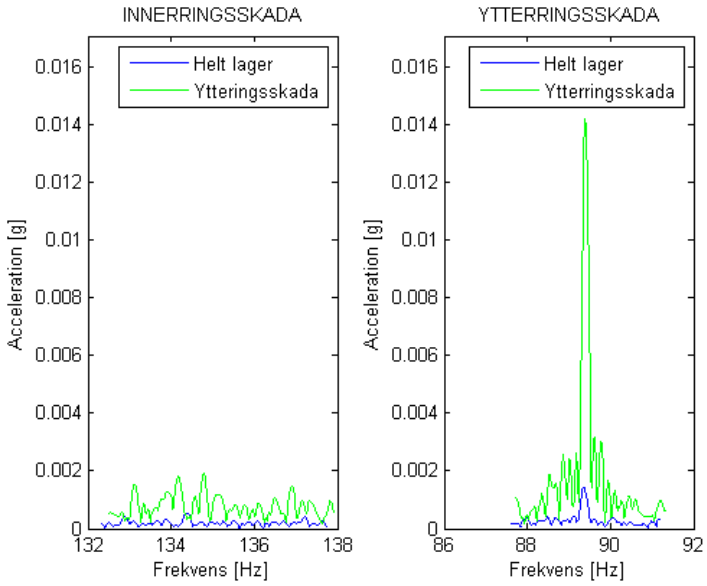
Att använda zero padding och att ta absolutbeloppet av accelerationen innan FFT användes visade sig göra det enkelt att urskilja fel. Graferna visar de utsnitt som är intressanta för innerring- respektive ytterringsskada. Syns frekvenstopp vid någon av dessa är det förmodligen fel på lagret, här visas mätningar på hela lager som blå, mätningar på lager med ytterringsskada som gröna och mätningar på lager med inngerringsskada som rosa.

Skillnaden före och efter införandet av zeropadding och absolutbelopp syns tydligt i Figur 44 som visar före och Figur 45 som visar efter. I Figur 44 ser det ut att kunna vara ytterringsskada på båda mätningarna men i Figur 45 syns det tydligt att den gröna mätningen är en mätning på en ytterringsskada (vilket det i verkligheten också är).

[3] Redigerad bild, ursprungligen från bksv [47]

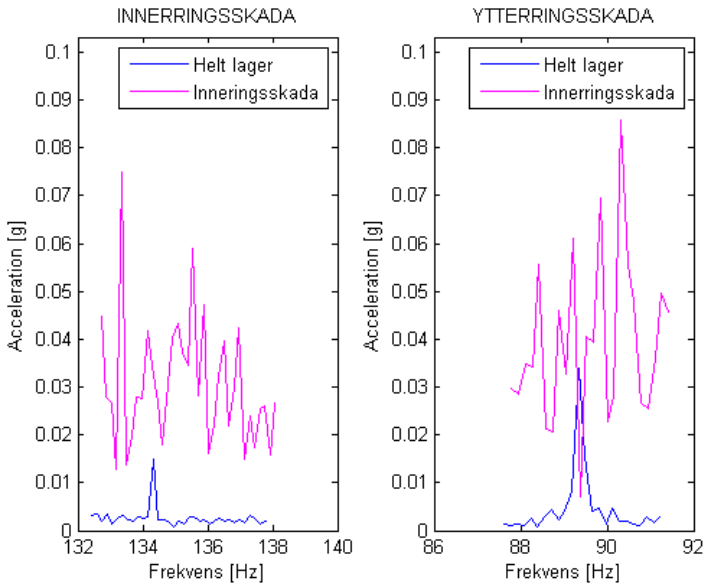


Figur 44. Mätning på helt lager och lager med ytterringsskada, ingen speciell analysmetod används.

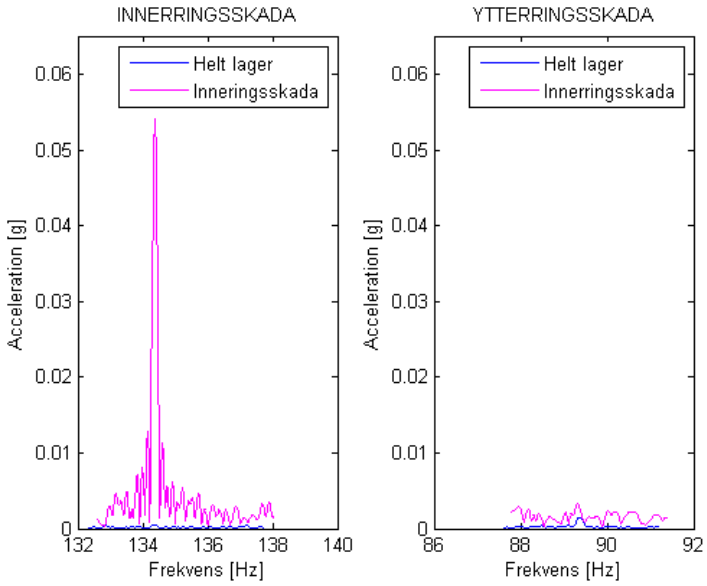


Figur 45. Mätning på helt lager och lager med ytterringsskada, zero padding och absolutbelopp används vid analys.

Samma skillnad visas också för mätning på helt lager och innerringsskada där innan zero padding och absolutbelopp, Figur 46, är svårt att urskilja vilket fel, men med analysmetoderna. I Figur 47, som är med användning av zeropadding och absolutbelopp, är det lätt att se att den rosa mätningen är en innerringsskada.



Figur 46. Mätning på helt lager och lager med innerringsskada, ingen speciell analysmetod används.

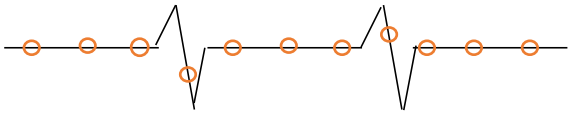


Figur 47. Mätning på helt lager och lager med innerringsskada, zero padding och absolutbelopp används vid analys.

5.5.5.3 Reflektion kring av lageranalys

Troligen beror behovet av att använda zero padding och absolutbelopp på begränsningarna hos hårdvaran. Zero padding är ett sätt att försöka öka frekvensupplösningen vilket behövdes i detta fall, att frekvensupplösningen är högre syns tydligt i resultatgraferna. Behovet av absolutbeloppen beror förmodligen på det långa samplingsintervallet vilket antas inte vara tillräckligt för att tillräckligt tydligt kunna uppfatta de korta pikar i acceleration som lagerskadan ger.

Nedan ses två förklaringsbilder, den översta symboliserar accelerationen från lagret (topparna symboliserar när kulan rullar över lagerfelet) i tidsplanet, nederst är det samma acceleration med absolutbelopp. Ringarna symboliserar ett exempel på hur samplingen kan vara då mätutrustningen inte klarar av att sampla speciellt ofta. Troligen gör användningen av absolutbelopp att det blir enklare för samplingen att träffa mer rätt och därför kan också FFTn lättare visa toppar i rätt frekvens. Om samplingen skulle varit oändligt bra, vara i princip som den svarta linjen, skulle förmodligen inte absolutbeloppet behöva användas.



Figur 48. Acceleration i tidsplanet vid lagerskada (svart) och samplade dataounkter (orange), utan absoultbelopp.

Figur 49. Acceleration i tidsplanet vid lagerskada (svart) och samplade dataounkter (orange), med absoultbelopp.

5.6 Tester och validering

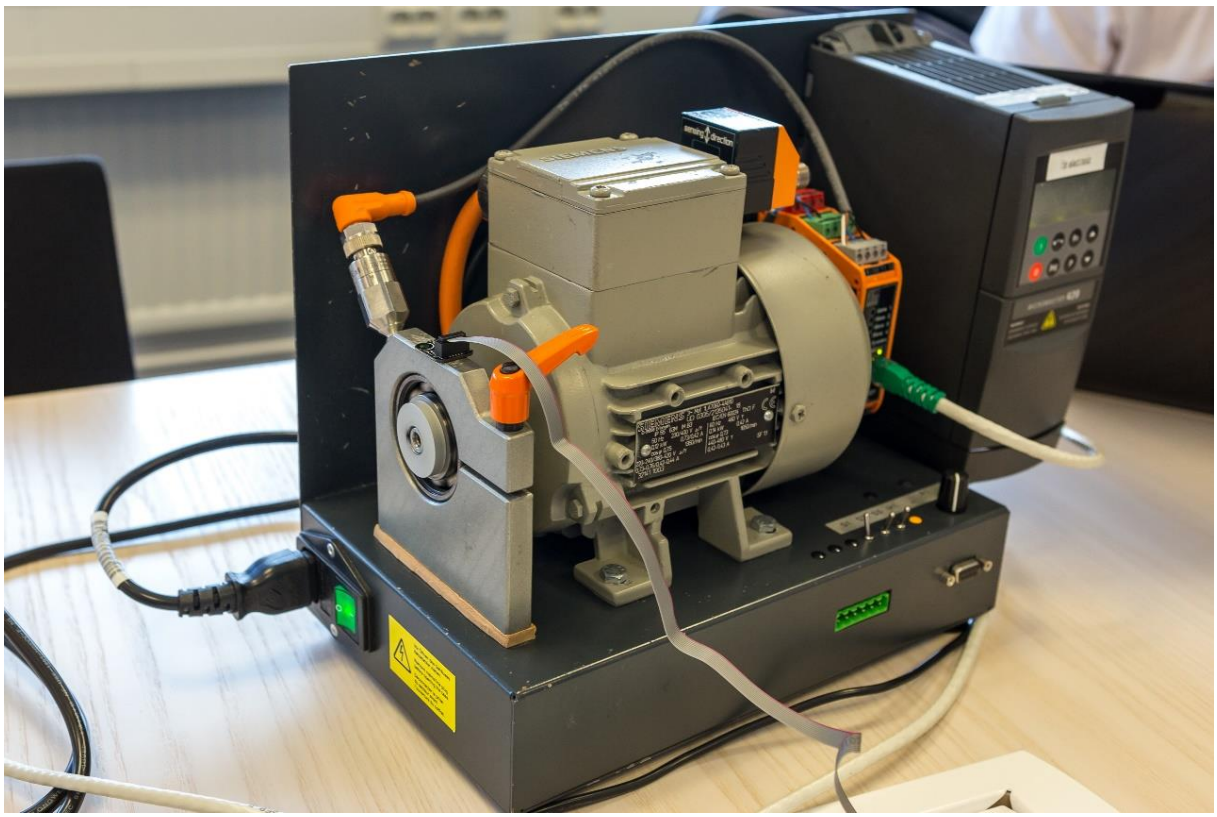
I steg 2 utfördes testerna på ett sätt som i högre grad motsvarade hur tester på företag skulle kunna utföras. Detta för att se om analysmetoden och hårdvaran faktiskt kunde upptäcka fel utanför en kontrollerad testmiljö.

5.6.1 Lagerskador

Lagerskador är ett vanligt fel på maskiner och olika skador kan ge upphov till ökningar vid olika frekvenser [24]. Därför valdes lagerskador som ett bra alternativ till att börja testa tillstånd som är mer likt vanliga maskiner.

5.6.1.1 Genomförande lagerskador

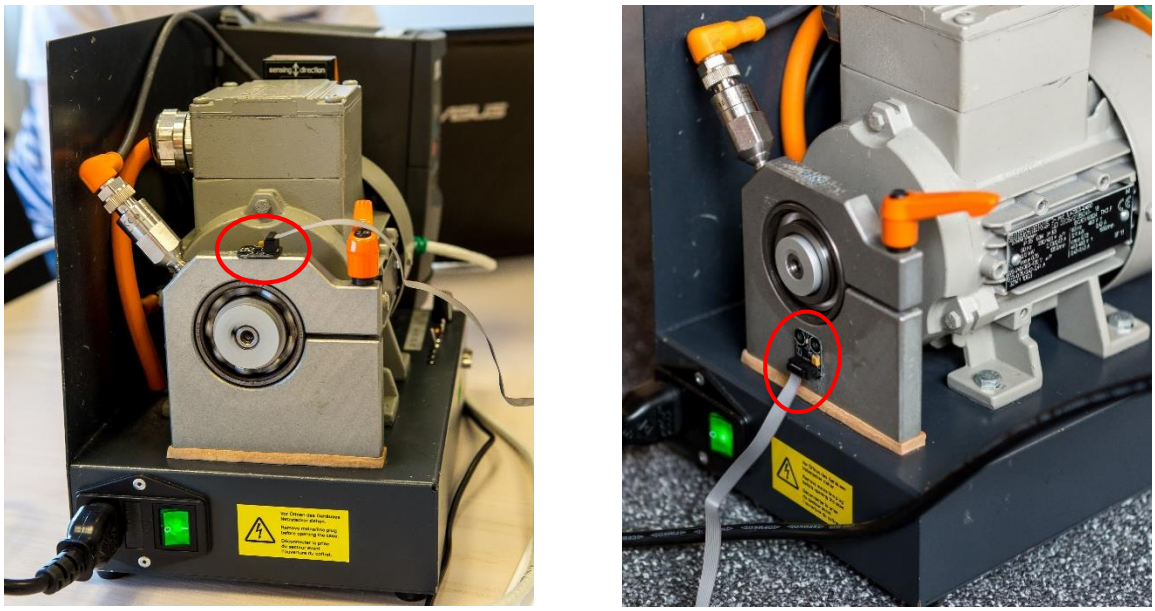
Tester för att mäta lagerskador gjordes med en demorigg på företaget IFM, se Figur 50. Demoriggen var konstruerad för montering av lager på en axel kopplad till en elmotor. Elmotorns varvtal gick att reglera och lager med inner- och ytterringsskada samt lager utan skada av samma modell kunde monteras. Testet utfördes genom att genomföra mätningar med de olika lagren, tre olika varvtal, olika accelerometrar och olika placeringar för accelerometrarna.



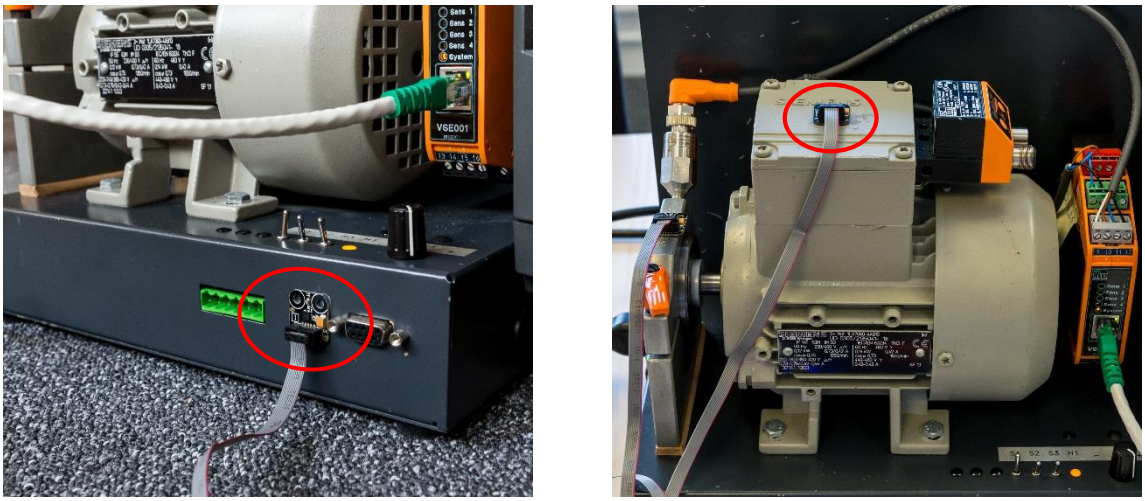
Figur 50. Demorigg för att mäta lagerskador.

Vid utförandet av testerna användes två accelerometrar av samma modell, ”Accel G248”. För att verifiera att dessa visar samma resultat gjordes mätningar med samma varvtal och fel samt samma placering av accelerometern, mätningarna utfördes både med accelerometer 1 och accelerometer 2.

I en maskin kan det vara svårt att placera en accelerometer varsomhelst. För att se hur stor påverkan placeringen på accelerometern hade på identifieringen av fel placerades accelerometern på fyra olika ställen. Dessa placeringar visas i Figur 52 och Figur 53.



Figur 51. Till vänster ses radiell placering och till höger ses axiell placering av accelerometer.



Figur 52. Till höger ses placering av accelerometer på kopplingslock och till vänster placering på fundament.

5.6.1.2 Resultat lagerskador

Här representeras de mätningar som gjordes på hela lager med blå linje, mätningar som utfördes på lager med ytterringsskada med grön linje och mätningar på lager med innerringsskada med rosa linje. Graferna visar inzoomningar kring den intressanta felfrekvensen, innerringsskada till vänster och ytterringsskada till höger. Om någon av dessa frekvenser påvisar hög acceleration beror det förmodligen på att lagret har den specifika skadan. Hur frekvenserna beräknas presenteras i avsnitt 5.5.5.

Högt varvtal

Högsta varvtalet för motorn var 1496 rpm. Detta ger frekvensen:

$$F_{motor} = \frac{1496}{60} = 24.93 \text{ Hz}$$

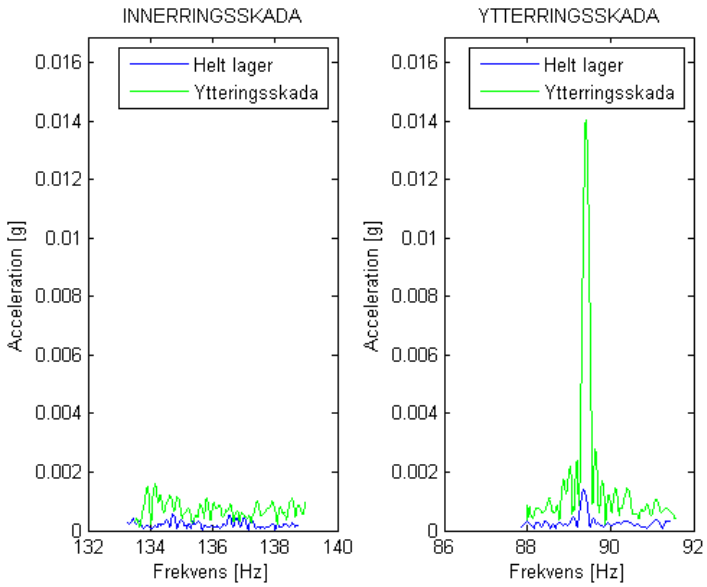
Datablad för det specifika lagret och varvtalet ger:

$$F_{ytterringsskada} = 89.386 \text{ Hz}$$

$$F_{innerrisngsskada} = 135.014 \text{ Hz}$$

Helt lager och ytterringsskada

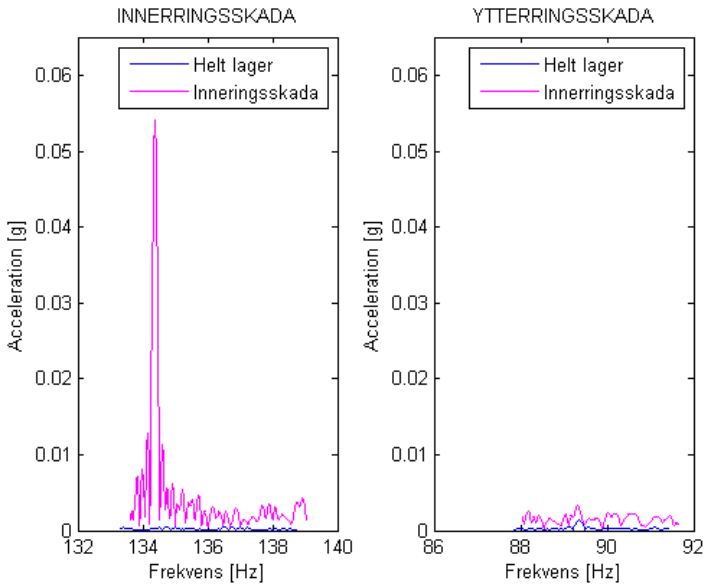
I Figur 53 visas de frekvenser som är intressanta för att diagnostisera fel. Både mätningen för helt lager och ytterringsskada visar låga accelerationer kring frekvensen för innerringsskada. Till höger syns en topp för den gröna mätningen, alltså mätningen med ytterringsskada visar hög acceleration vid frekvensen för ytterringsskada. Detta tyder på att den gröna mätningen är en mätning på ett lager med skada på ytterringen vilket det också är.



Figur 53. Resultat av mätning på helt lager och på lager med ytterringsskada, 1496 rpm.

Helt lager och innerringsskada

I Figur 54 visas en mätning på helt lager, blå linje, och en mätning på innerringskada, rosa linje. Den rosa linjen har en topp kring felfrekvensen för innerringsskada vilket tyder på en skada på innerringen, precis som sig bör. Blå linjen visar låg acceleration vid felfrekvenser för innerringsskada och ytterringsskada och antas därför inte ha några av dessa fel vilket också stämmer med verkligheten.



Figur 54. Resultat av mätning på helt lager och på lager med innerringsskada, 1496 rpm.

Medelvarvtal

Ett annat varvtal som testades var 850 rpm. Detta ger frekvensen:

$$F_{motor} = \frac{850}{60} = 14.1667 \text{ Hz}$$

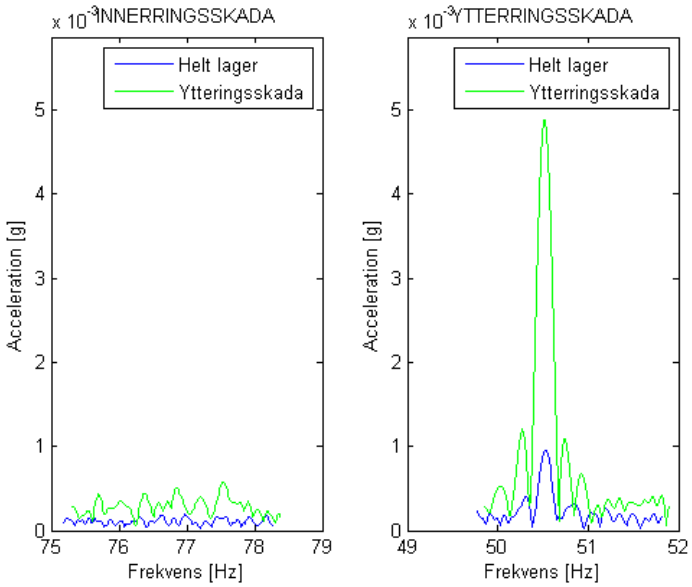
Datablad för det specifika lagret och varvtalet ger:

$$F_{ytterringsskada} = \ 50.788 \ \text{Hz}$$

$$F_{innerrisngsskada} = 76.712 \ \text{Hz}$$

Helt lager och ytterringsskada

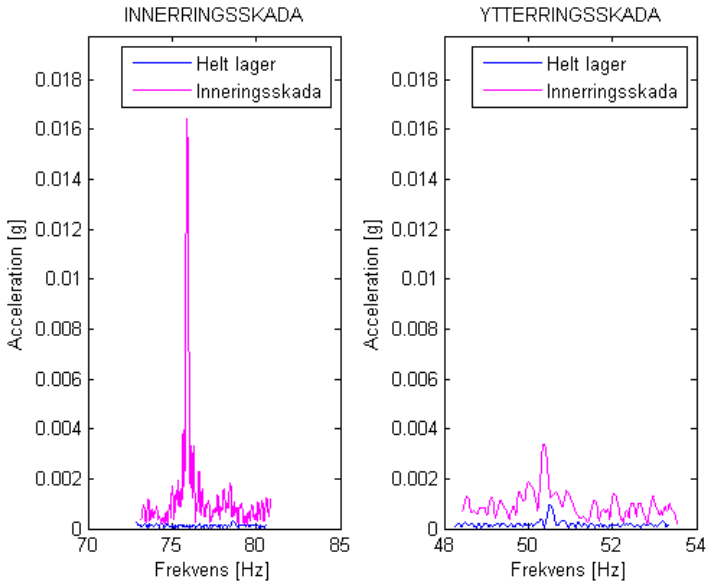
I Figur 55 syns tydligt att den gröna linjen troligtvis har en ytterringsskada vilket också stämmer med verkligheten. Dock syns också en liten pik för den blå linjen vid ytterringsskada men då den är väldigt liten antas lagret inte ha någon skada.



Figur 55. Resultat av mätning på helt lager och på lager med ytterringsskada, 850 rpm.

Helt lager och innerringsskada

En innerringsskada syns tydligt vid den rosa mätningen i Figur 56.



Figur 56. Resultat av mätning på helt lager och på lager med innerringsskada, 850 rpm.

Lågt varvtal

Lägsta varvtalet för motorn var 305 rpm. Detta ger frekvensen:

$$F_{motor} = \frac{305}{60} = 5.0833 \text{ Hz}$$

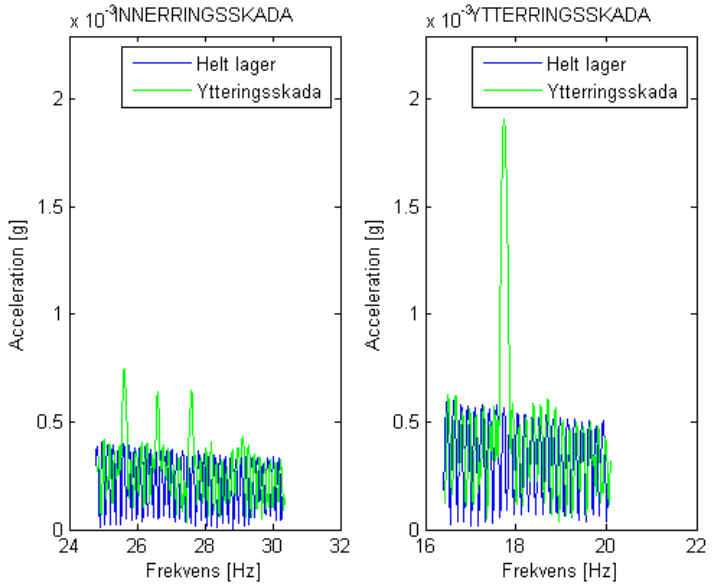
Datablad för det specifika lagret och varvtalet ger:

$$F_{ytterringsskada} = \ 18.224 \text{ Hz}$$

$$F_{innerrisngsskada} = 27.526 \ \text{Hz}$$

Helt lager och ytterringsskada

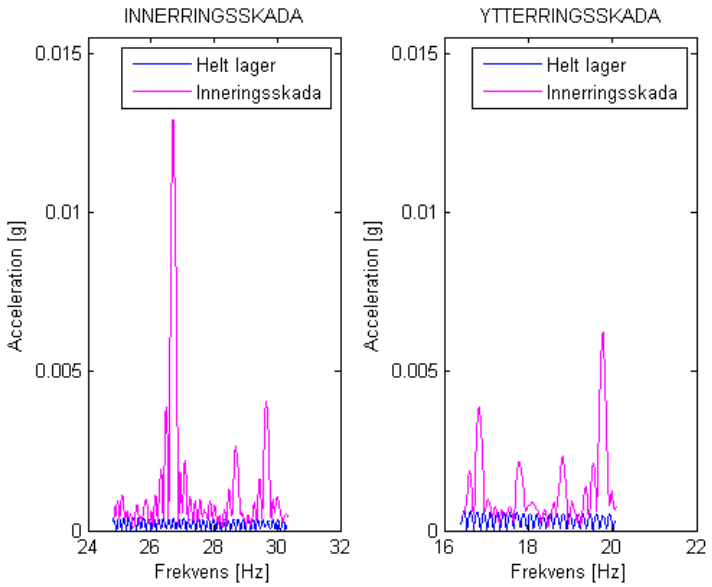
I Figur 57 ses att lagerfelet förmodligen är ytterringsskada, dock finns en del mindre pikar som möjligtvis kan tyda på innerringsskada men ytterringsskada är mer troligt då piken är högre och mer distinkt där.



Figur 57. Resultat av mätning på helt lager och på lager med ytterringsskada, 305 rpm.

Helt lager och innerringsskada

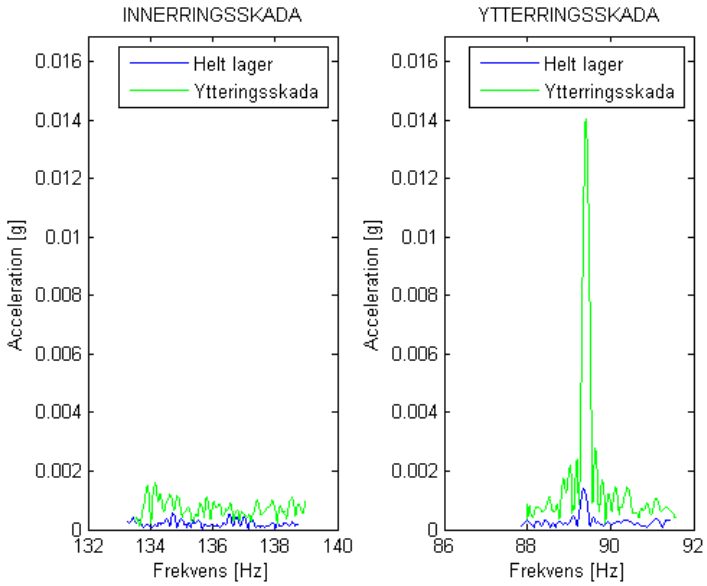
I Figur 58 ses att lagerfelet på en rosa mätningen förmodligen är innerringsskada, dock finns en del mindre pikar som också kan tyda på ytterringsskada.



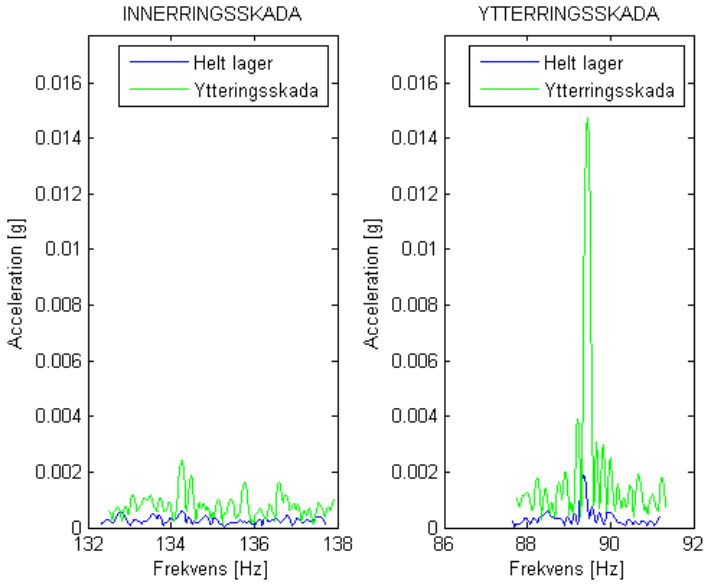
Figur 58. Resultat av mätning på helt lager och på lager med innerringsskada, 305 rpm.

Olika sensorer, samma placering

Resultatet som visas i Figur 59 och Figur 60 visar i princip samma resultat för de båda accelerometrarna. De små skillnader i brus som finns antas bero på små skillnader mellan mätningarna och skillnader i placering och inte på accelerometrarna.



Figur 59. Mätning med accelerometer 1.

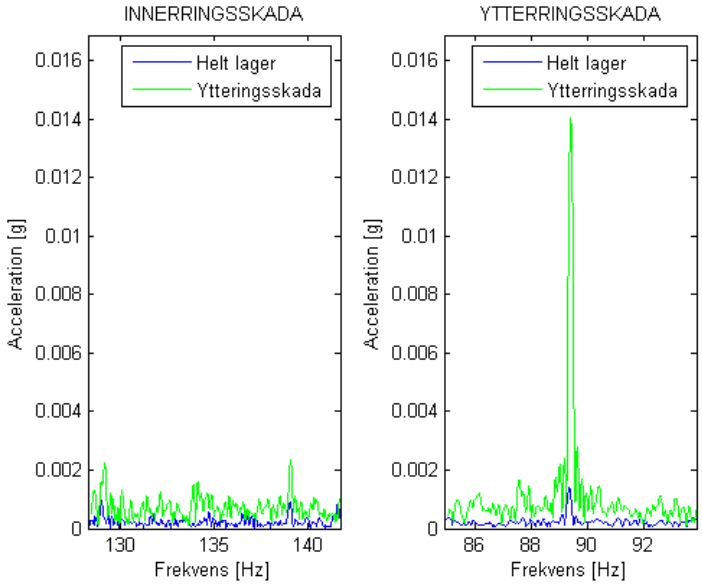


Figur 60. Mätning med accelerometer 2.

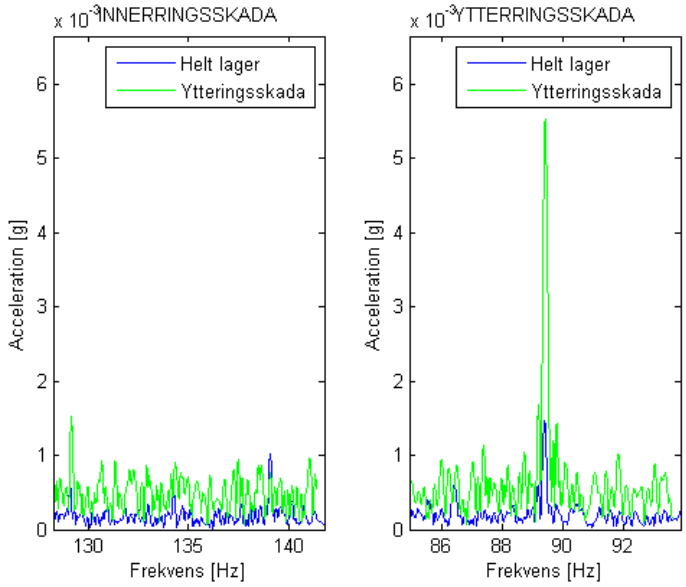
Olika placering av sensorer

Här kommer bara resultat från mätningar med högt varvtal, helt lager och ytterringsskada presenteras då ytterringsskador sedan tidigare visat sig avge mindre accelerationer än innerringsskador.

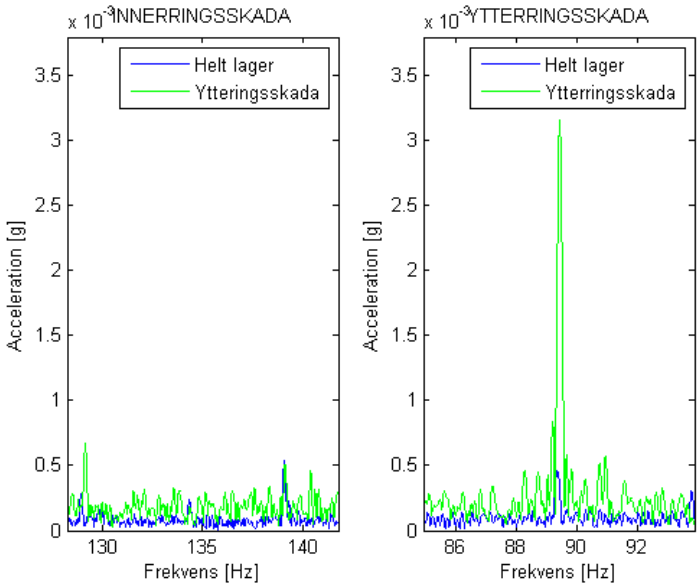
För alla placeringar syns att ytterringsskada är det mest troliga felet, se Figur 61, Figur 62, Figur 63 och Figur 64.



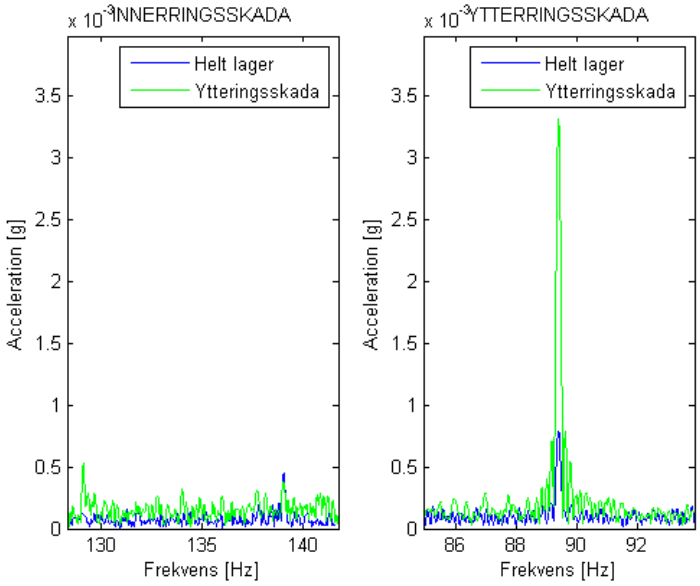
Figur 61. Mätning med accelerometer placerad radiellt



Figur 62. Mätning med accelerometer placerad axiellt.



Figur 63. Mätning med accelerometer placerad på kopplingslock.

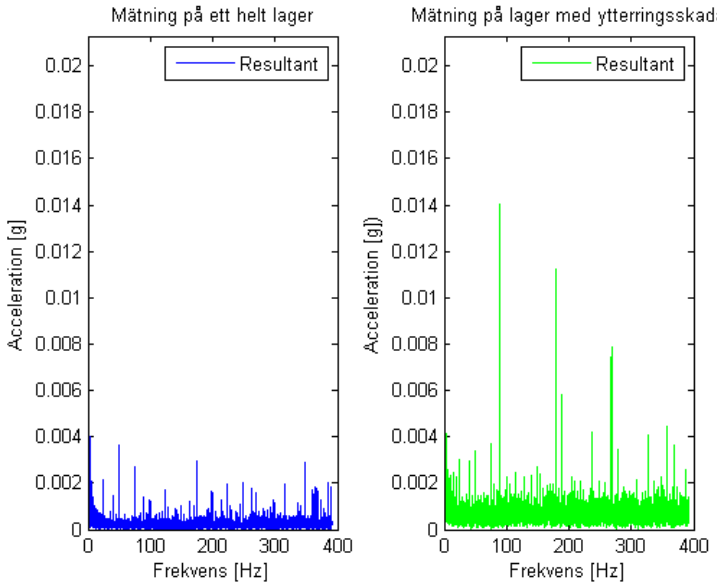


Figur 64. Mätning med accelerometer placerad på fundament.

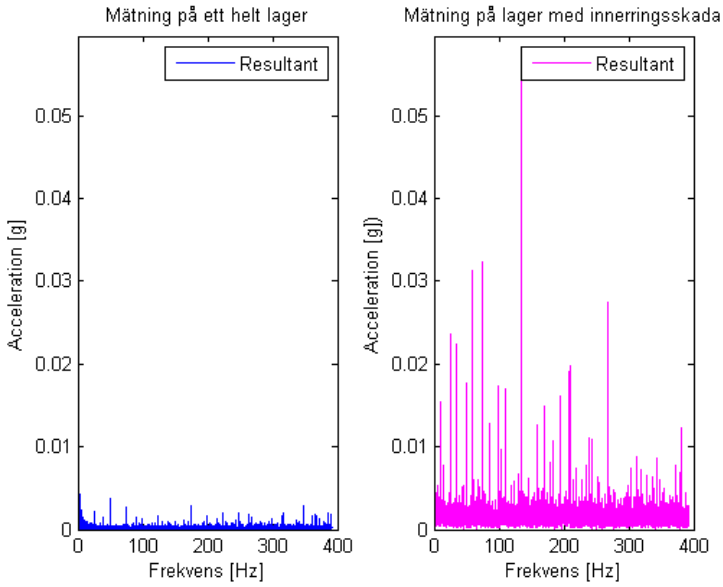
Acceleration

Tester gjordes också för att se om man med avsaknad av lagerdata, lagertyp eller varvtal ändå kan undersöka konditionen hos maskinen. Detta gjordes med samma demorigg som tidigare och med samma lager och frekvenser men här presenteras istället resultanten av accelerationen för alla frekvenser.

I Figur 65 och Figur 66 visas samma mätning som tidigare Figur 53 och Figur 54 men här visas accelerationen för alla frekvenser och inte bara inzoomningen kring de specifika skadefrekvenserna.



Figur 65. Acceleration för mätning av helt lager, blått, och av lager med ytterringsskada, grönt.



Figur 66. Acceleration för mätning av helt lager, blått, och av lager med innerringsskada, rosa.

Liknande resultat har erhållits för mätningar vid olika varvtal, vid användning av olika accelerometrar och vid olika placering på accelerometern.

5.6.1.3 Reflektion kring lagerskador

Reflektion kring testerna på lagerskador presenteras under respektive texts rubrik.

Olika varvtal

För alla varvtal som testades är det möjligt att urskilja både skillnaden på helt lager, ytterringsskada eller innerringsskada. Vid högt- och medelvarvtal är det lätt att se lagerfel. Det går att se typ av lagerfel vid lågt varvtal, men det är mycket otydligare än vid de högre varvtalen.

Olika sensorer, samma placering

Det syns inga tydliga skillnader mellan de olika accelerometrarna så dessa verkar vara helt likvärdiga.

Olika placering av accelerometer

Då accelerationsskillnaderna är små för alla alternativa placeringar (alla placeringar förutom radiell) kan störningar och andra felkällor ha större betydelse och försvåra avläsningen. Då resultatet är tydligast i mätningen med accelerometer placerat radiellt så rekommenderas detta i de fall då det är möjligt att placera accelerometern på detta sätt.

Acceleration

Det intressanta är att man med lätthet ser skillnader på accelerationen för mätningen på helt lager och mätningen på lager med skador. Detta är en viktig slutsats då lagerdata och varvtal kanske inte alltid finns tillgängligt och att man då med hjälp av accelerationen ändå kan se att det förmodligen är någon typ av fel på lagret.

Värt att notera kan vara att accelerationen är mycket högre för innerringsskadan än för ytterringsskadan.

5.6.2 Tester på maskiner

Målet var att mäta på maskiner för att se hur olika parametrar påverkar vibrationer samt om fel och skillnader kan ses.

5.6.2.1 Genomförande tester på maskiner

Mätningarna utfördes genom svarvning av olika typer av material (stål och nylon) med olika slitna skärverktyg (ett nytt och ett slitet) samt med olika skärdjup (1 mm och 2 mm). Mätningar utfördes bara under tiden verktyget bearbetade arbetsstycket, inga pauser eller omskär utfördes.

Figur 67. Svarv med nytt skärstål, arbetsstycke i stål.

Figur 68. Svarv med slitet skärstål, arbetsstycke i stål.

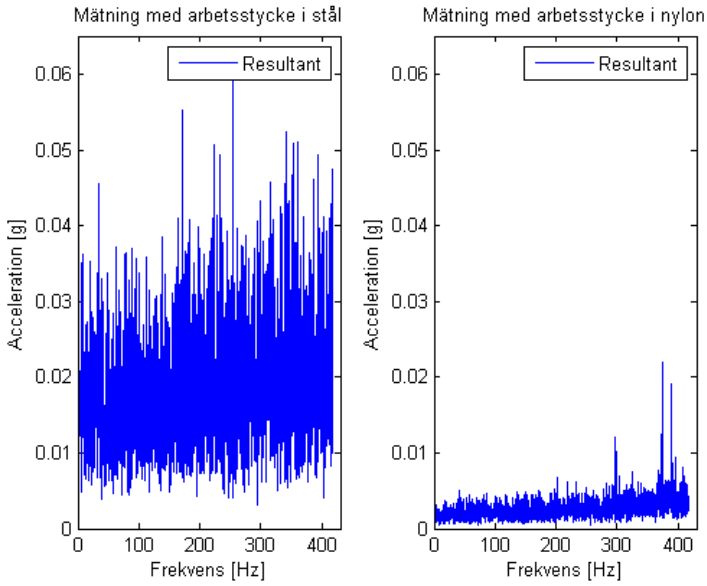
Figur 69. Svarv med nytt skärstål, arbetsstycke i nylon.

5.6.2.2 Resultat tester på maskiner

Resultatet från mätningarna visas under respektive rubrik.

Bearbetningsmaterial

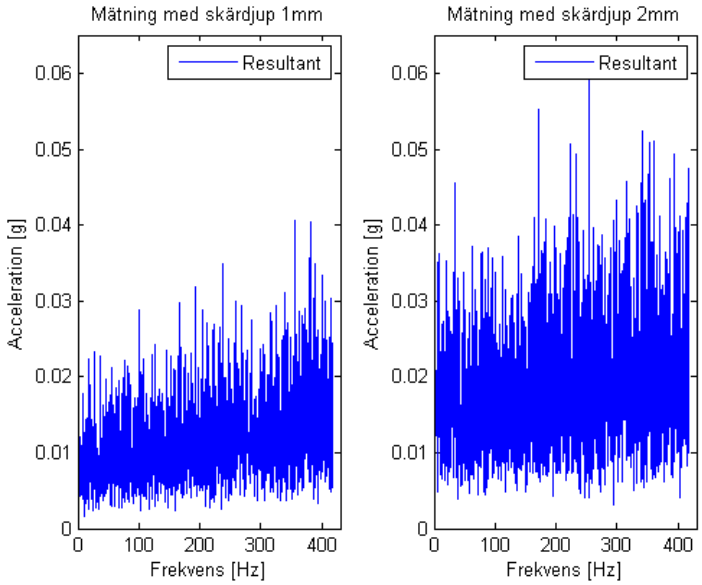
I Figur 70 ses stora skillnader i acceleration mellan bearbetning i ett arbetsstycke i stål och i nylon.



Figur 70. Arbetsstycke i olika material.

Skärdjup

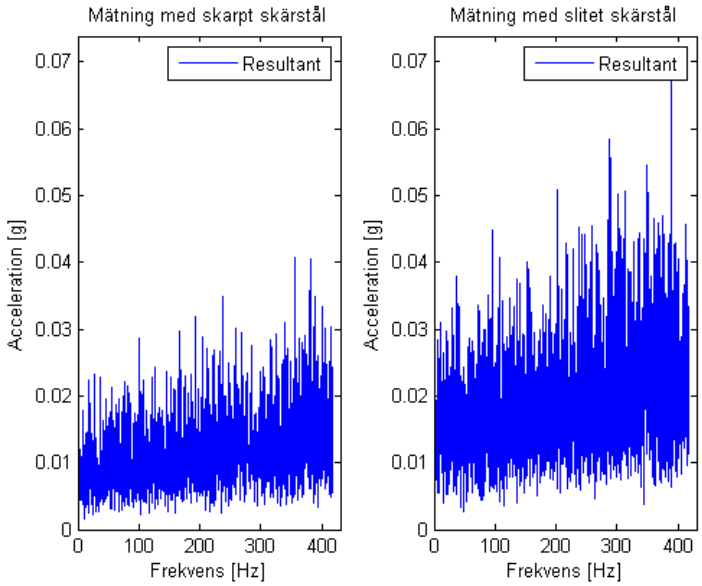
Figur 71 visar att accelerationen är större då skärdjupet är större, i detta fall visas skärdjup 1 mm och 2 mm.



Figur 71. Olika skärdjup.

Verktyg

Helt respektive slitet skärstål bör ge olika vibrationer och detta är också resultatet från mätningen, se Figur 72.



Figur 72. Olika slitna verktyg.

5.6.2.3 Reflektion kring tester på maskiner

Resultatet var precis som förväntat. Viktigaste resultatet var att det syns skillnad mellan skarpt och slitet skärstål vilket kan vara ett möjligt användningsområde för konditionsbaserat underhåll med underlag från vibrationsdata.

5.6.3 Test i industrin

För att testa om fel kunde hittas även utanför en kontrollerad testmiljö gjordes mätningar på en maskin i industrin.

5.6.3.1 Genomförande tester i industin

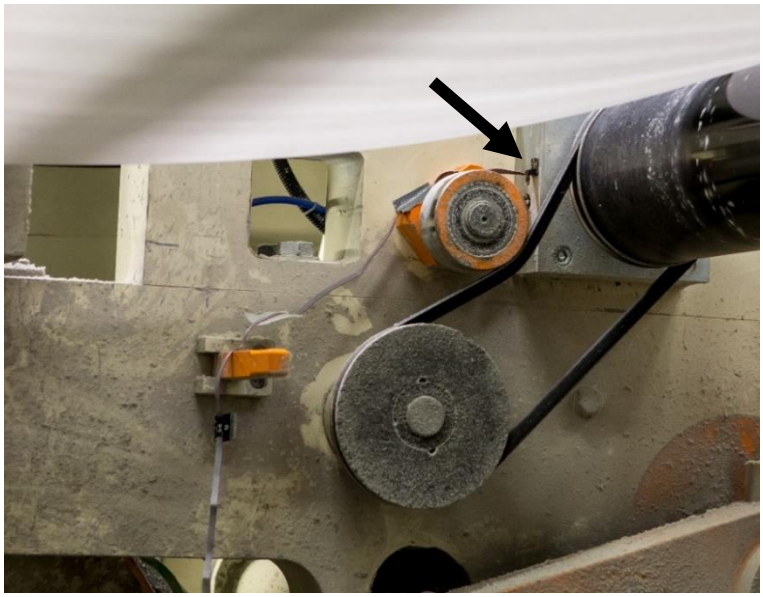
På SCA fanns möjlighet att testa på en omrullningsmaskin som från moderrullar (2 tons pappersrullar) sammanfogade, präglade och rullade toalettpapper. I maskinen fanns många valsar och remmar vilket var bra för att kunna mäta i en miljö med många störningar. Under mätningen var maskinen i bruk men på grund av problem i andra delar av maskinen gjordes många stopp och endast korta sekvenser med maskinen i full hastighet kunde mätas.

Företaget hade uppmärksammat ovanliga ljud från ett lager på en vals. Accelerometern monterades vid valsens ena ände nära lagrets position, se Figur 74, varefter en serie mätningar gjordes. Eftersom valsen är lagrad i bägge ändar upprepades sedan mätningen på andra ändan av valsen för att kunna jämföra de olika lagren, se Figur 75. Under besöket berättade de inte vilket lager de trodde var skadat, de ville först se analysen för att kunna jämföra om resultatet stämde överens med deras antaganden.

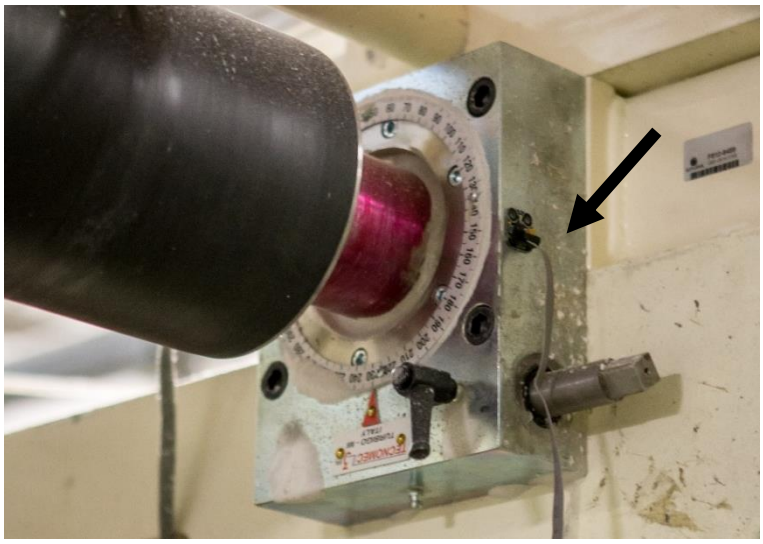
I Figur 73 pågår förberedelser inför att montera accelerometern i maskinen. Trots att bilden bara fångar en liten del av maskinen så syns det tydligt att maskinen är väldigt stor, det går att stå inuti den och pappret syns överst i bilden. När maskinen är igång färdas pappret med 400 m/min och rullas över den svarta mindre valsen överst i högra hörnet, det är denna vals som troligen har en lagerskada och som mätningen sker på. Figuren visar också miljön i pappersindustrin vilken är väldigt dammig, därför krävdes inkapsling av hårdvaran för att skydda den.

Hur monteringen skedde ses i Figur 74 och Figur 75. Målet vara att montera accelerometern så nära lagret som möjligt och med så lik placering som möjligt på de båda lagren för att kunna jämföra dem.

Figur 73. Förberedelser inför mätning på maskin i industri.



Figur 74. Pilen visar monteringen av accelerometern på vänstra lagret.

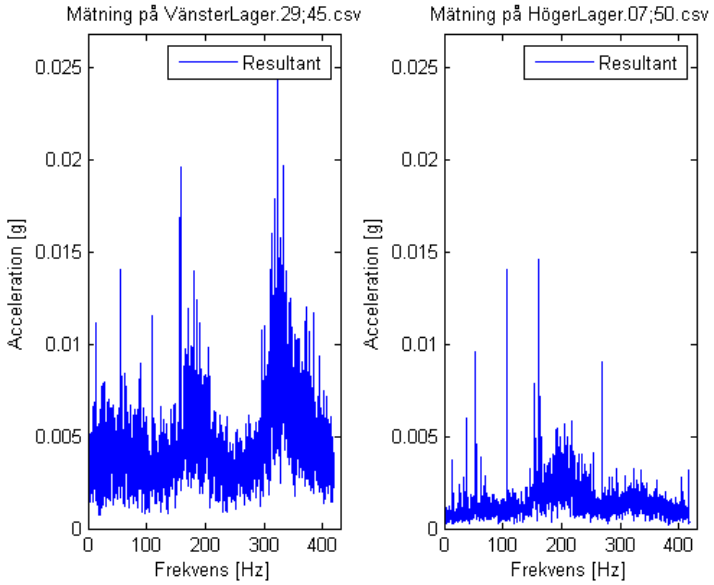


Figur 75. Pilen visar monteringen av accelerometern på högra lagret.

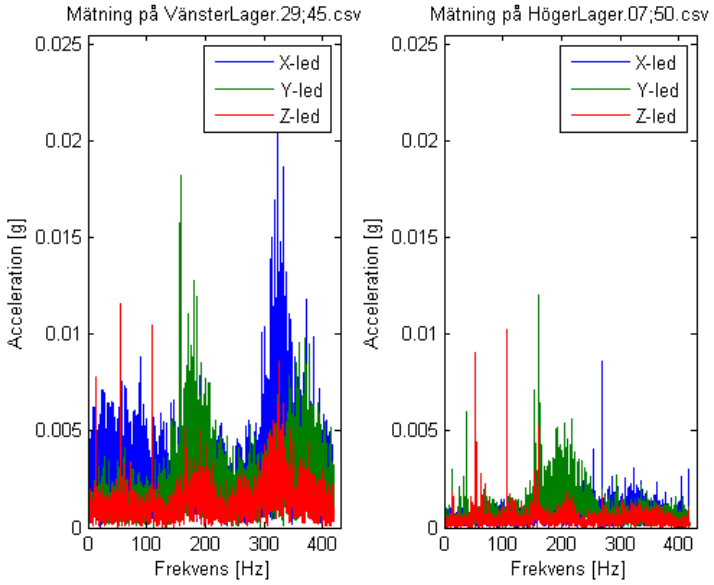
5.6.3.2 Resultat tester i industin

I Figur 76 ses resultatet i frekvensplanet presenterat som resultanten av accelerationen. Till vänster är accelerationen för det vänstra lagret och till höger är accelerationen för det högra lagret. Det är tydliga skillnader mellan accelerationerna för de båda lagren och det lager som genererar mest acceleration är förmodligen det som är skadat, vilket var det vänstra. Antagandet att det vänstra lagret var skadat, visade sig överensstämma med operatörernas observationer. Ungefär en vecka efter att mätningen gjordes så havererade maskinen på grund av fel i lagret.

Mätningar gjordes på lagren med ett intervall på ca 30 sekunder och dessa visar liknande resultat som de som hittills nämns. Resultatet från ytterligare mätningar finns i bilaga I.



Figur 76. Mätning på två lager i en maskin i industrin.



Figur 77. Mätning på två lager i en maskin i industrin.

5.6.3.3 Reflektion kring tester i industin

Resultatet visade sig stämma med operatörernas antaganden vilket är väldigt positivt. Dessutom havererarde maskinen på grund av lagret en vecka senare vilket bevisar att metoden verkligen kan förutsäga fel i förtid. Det bevisar att mätningen var tydlig nog och att analysmetoderna var anpassad till tillämpningen. Dock hade fler mätningar behövts göras på fler lager och valsar för att helt kunna validera funktionen.

Intressant är också resultatet i Figur 77, här visas exakt samma mätning som tidigare, men här visas accelerationen uppdelat i tre riktningar. Även här syns tydliga skillnader i acceleration mellan vänstra och högra lagret men noterbart är att just x-led tycks ha mycket större accelerationer vid det förmodade skadade lagret än vid det hela. Detta kan bero på att skadan i lagret genererar just vibrationer i x-led, men då skadan inte är känd kan inga exakta slutsatser dras.

6 Diskussion och slutsats

En prototyp har skapats som kan mäta acceleration hos vibrationer. Genom att samla in och analysera accelerationsdata har fel hos maskiner kunnat detekteras, bland annat lagerskador och slitna skärverktyg.

En testmiljö som uppfyller många av de målsättningar som funnits har framgångsrikt konstruerats och använts i utvecklingen av övriga områden. Det valdes att inte gå vidare med utvecklingen av testmiljön efter steg 1 då stora instabilitetsproblem uppvisades vid mätning på denna men framförallt eftersom möjlighet gavs genom företagskontakt att genomföra de tester som utveckling av testmiljön skulle syfta till.

Mätplattformen har framgångsrikt använts för att samla in den accelerationsdata som behövts för analys av de tester som utförts. De två största svagheter som upplevts för datainsamling är långa skrivtider av data samt begränsning när det gäller sampelhastighet. Begränsningen i sampelhastighet har medfört att frekvenser över cirka 420 Hz inte varit möjliga att mäta, kommersiella produkter arbetar ofta med frekvenser upp till 10000 Hz. De långa skrivtiderna av data har begränsat hur tätt inpå varandra mätningar kan göras samt längden på de mätningar som gjorts. Trots detta har den data som inhämtats varit av tillräckligt hög kvalité för analys.

Analysmetoderna har genom validering visat sig vara korrekta och alla maskinfel som tester utförts på har genom analys kunna detekteras. Analys av mätdata har genomgående utförts externt med matematisk programvara och inte på mätplattformen. Möjlighet att implementera analysen på mätplattformen ser ut att finnas, men tidsbrist har resulterat i att detta inte undersökts mer än ytligt. Syftet med projektet var att använda enkla analysmetoder och därför har inte utveckling mot mer komplicerade metoder skett då önskat resultat uppnåtts. Om fler tester hade visat svårigheter i att se skillnader i kondition hos maskiner hade det varit aktuellt att försöka förbättra analysmetoden genom filtrering eller användning av andra transformer. Analysmetoderna som använts är ganska enkla och borde gå att implementera på relativt enkel och billig hårdvara. Resultatet av analysen har varit över förväntan då fel har kunnat detekteras i alla mätningar.

Sammantaget har det genom lösning av uppgifterna visats att det med enkel hårdvara går att mäta vibrationer med tillräklig nogrannhet för att kunna avgöra en maskins behov av underhåll. De resultat som uppnåtts skulle vara möjliga att utveckla för att implementera konditionsbaserat underhåll.

6.1 Framtid

Ett naturligt första steg för framtida utveckling och arbete med projektet skulle vara att byta ut den hårdvara som i nuläget används för datainsamling. Hårdvaran som används i nuläget klarar inte att uppfylla de krav som ISO 10816 ställer på bland annat frekvensområde, motsvarande produkter som finns på marknaden idag upfyller generellt kraven för standarden.

För långvarig användning i industrin är damm- och vattentäthet ett krav, samtidigt behöver produkten göras kompakt för att medge montering även i begränsade utrymmen. Ytterliggare ett framtidsområde är att undvika störningar från annan elektronik, detta kan uppnås genom till exempel användning av skärmat kablage.

För enklare användning och snabbare återkoppling kan analys på hårdvaran för mätplattformen vara önskvärt i framtiden. Ett annat alternativ skulle kunna vara att sensorer mäter tillstånd och sänder informationen till en server som genomför analys från flera sensorer och maskiner samtidigt. Med dessa förbättringar kan också kontinuerliga mätningar bli aktuella. Identifiering av fel skulle kunna ske genom utveckling av mjukvaran, såsom att den lär sig ett referenstillstånd vid drift. Sedan kan automatisk anlays och jämförlse mellan referenstillstånd och nuvarande tillstånd ske där skillnader i frekvenser eller amplitud studeras. Framförallt kan förändringshastigheten vara av intresse då långsamma förändringar förmodligen beror på fel som inte behöver åtgärdas lika snabbt som hastiga förändringar. Optimalt vore

om skillnader, utöver normala variationer vid drift, resulterar i larm som uppmärksammar operatören om dessa. Dessa larm skulle kunna ske till PLC, GSM, internet eller det lokala nätverket.

Det skulle även vara intressant att utveckla analysen till att ta hänsyn till mer indata såsom vilka lager, kugghjul, remväxlar, bearbetningsmatierial samt varvtal som maskinen mätningen sker på har och utifrån det kunna detektera olika typer av fel. För att täcka in ett ännu större område skulle även andra tillstånd hos maskinen kunna mätas och analyseras såsom temperatur, ljud och partiklar i olja.

Då utvecklingen inom produktion fokuserar på automatisering och hög utnyttjandegrad är konditionsbaserat underhåll mycket lämpligt då det kan vara ett automatiskt system som kan kombineras med olika typer av befintlig utrustning. Konditionsbaserat underhåll syftar till att optimera både effektivitet och hållbarhet vilket är mycket aktuellt både nu och i framtiden. Projektet visar att det förmodligen går att implementera konditionsbaserat underhåll till en låg kostnad, vilket gör tekniken mer tillgänglig för fler företag och tillämpningar.

Projektet har överträffat de förväntningar som funnits vid start och visar tydligt att billig hårdvara samt enkla sensorer och analysmetoder kan användas för konditionsbaserat underhåll. Detta tydliggör att det finns stor potential för fortsatt utveckling och området kommer tveklöst växa sig större i framtiden.

7 Referenser

[1] Graham, Christen; Vadala, Erin; Warner Communications, "thomasnet.com," Advanced Technology Services, 27 Mars 2006. [Online]. Available: http://news.thomasnet.com/companystory/Downtime-costs-auto-industry-22k-minute-survey-481017. [Accessed 06 02 2015].

[2] H. Ahlmann, "www.ne.se," Nationalencyklopedin, [Online]. Available: http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/underh%C3%A5llsteknik. [Accessed 06 02 2015].

[3] A. K. Jardine, D. Lin and D. Banjevic, "A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance," *Mechanical Systems and Signal Processing,* vol. 20, no. 7, pp. 1483-1510, October, 2006.

[4] J. Teter, "Vibes Scope Machine Health," *Machine Design,* vol. 79, no. 16, pp. 74-76, 23 Aug 2007.

[5] H. P. Bloch and F. K. Geitner, Machinery Failure Analysis and Troubleshooting: Practical Machinery Management for Process Plants, Butterworth-Heinemann (an imprint of Elsevier), 2012.

[6] H. Meyer, Interviewee, *Engineer Technology Development - Swedish Match.* [Interview]. 04 02 2015.

[7] ".NET Gadgeteer," GHI Electronics, [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/technologies/gadgeteer. [Accessed 04 03 2015].

[8] "Microsoft Research .NET Gadgeteer," Microsoft, [Online]. Available: http://research.microsoft.com/en-us/projects/gadgeteer/. [Accessed 10 03 2015].

[9] "Microsoft .NET Gadgeteer CodePlex," Microsoft, [Online]. Available: http://gadgeteer.codeplex.com/. [Accessed 10 03 2015].

[10] "What is Arduino?," Arduino, [Online]. Available: http://www.arduino.cc/en/guide/introduction. [Accessed 10 03 2015].

[11] B. A. Ellis, "Condition Based Maintenance," *TJP,* pp. 1-5, 2008.

[12] R. K. Mobley, "Condition monitoring and the integrity of industrial systems," in *Condition based maintenance*, Chapman & Hall, 1998, pp. 35-53.

[13] "Vibrationsövervakning," SPM Instrument, [Online]. Available: http://www.spminstrument.se/Matteknik/Vibrationsovervakning/. [Accessed 06 03 2015].

[14] "Vibrationsövervakning av maskiner och anläggningar enligt ISO 10816," IFM, [Online]. Available: http://www.ifm.com/ifms/web/pmain/070_010_030.html. [Accessed 10 03 2015].

[15] "MG-4," SPM Instrument, [Online]. Available: http://www.spminstrument.se/Produkter-och-tjanster/Kontinuerlig-overvakning/MG-4/. [Accessed 10 03 2015].

[16] "SNL plummer block housings: Condition Monitoring," SKF, [Online]. Available: http://www.skf.com/group/products/bearings-units-housings/bearing-housings/split-plummer-block-housings-snl-2-3-5-and-6-series/condition-monitoring/index.html. [Accessed 10 03 2015].

[17] "SKF Microlog Series Product Catalogue," 02 December 2014. [Online]. Available: http://www.skf.com/binary/tcm:12-144316/CM-P1%2014285-3%20EN%20SKF%20Microlog%20Product%20Catalog_tcm_12-144316.pdf. [Accessed 10 03 2015].

[18] "ISO/TC 108/SC 2 - Measurement and evaluation of mechanical vibration and shock as applied to machines, vehicles and structures," International Organization for Standardization, [Online]. Available: http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_tc_browse.htm?commid=51472. [Accessed 06 03 2015].

[19] "Machinery Vibration Concepts," Tensor Systems, [Online]. Available: http://www.tensorsystems.com/concepts.html. [Accessed 10 03 2015].

[20] P. L. Walter, "Sound and Vibration Magazine," 01 2007. [Online]. Available: http://www.sandv.com/downloads/0701walt.pdf. [Accessed 03 2015].

[21] The MEMS and Nanotechnology Exchange, "MEMS Beginner's guide," The MEMS and Nanotechnology Exchange, [Online]. Available: The MEMS and Nanotechnology Exchange. [Accessed 2015].

[22] I. Freescale Semiconductor, "MMA8453Q," 7 2 2012. [Online]. Available: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/app_note/AN4076.pdf?fasp=1. [Accessed 01 05 2015].

[23] I. Freescale Semiconductor, "MMA8453Q," 26 11 2014. [Online]. Available: http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MMA8453Q.pdf?fasp=1. [Accessed 01 05 2015].

[24] B. Lenér, Interviewee, *Product Marketing Director, Deputy MD, IFM Electronics.* [Interview]. 27 03 2015.

[25] Lutron Electronic, "Ocean Controls," [Online]. Available: https://oceancontrols.com.au/datasheet/lut/lut020_VB-8201HA.pdf. [Accessed 05 2015].

[26] P. Lindstedt and J. Burenius, The Value Model: How to Master Product Development and Create Unrivalled Customer Value, Nimba AB, 2003.

[27] Microsoft, "Visual Studio," 2015. [Online]. Available: https://www.visualstudio.com/. [Accessed 2015].

[28] Microsoft, "C#," 2015. [Online]. Available: https://msdn.microsoft.com/en-us/library/kx37x362.aspx. [Accessed 2015].

[29] C. V. Products, "luftvibrator.dk," [Online]. Available: http://luftvibrator.dk/uploads/images/Vibratorer/Vibrationsmaskiner/pdf/vibrationsborde.pdf. [Accessed 12 05 2015].

[30] G. E. LLC, "Fez Raptor," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/499. [Accessed 01 05 2015].

[31] G. E. LLC, "Accel G248 Module," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/442. [Accessed 01 05 2015].

[32] G. E. LLC, "USB Client SP Module," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/330. [Accessed 01 05 2015].

[33] G. E. LLC, "UC Battery 4xAA Module," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/394. [Accessed 01 05 2015].

[34] G. E. LLC, "SD Card Module," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/271. [Accessed 01 05 2015].

[35] G. E. LLC, "Character Display Module," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/395. [Accessed 01 05 2015].

[36] G. E. LLC, "Gadgeteer Assorted Cables," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/310. [Accessed 01 05 2015].

[37] G. E. LLC, "Large Memory Objects & Bitmaps," GHI Electronics LLC, [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/docs/58/large-memory-objects-and-bitmaps. [Accessed 1 5 2015].

[38] B. Wittenmark, "Nationalencyklopedien, Nyqvist-frekvens," [Online]. Available: http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/nyquist-frekvens. [Accessed 13 05 2015].

[39] T. Eriksson, "Nationalencyklopedin, resultant," [Online]. Available: http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/resultant. [Accessed 14 05 2015].

[40] Y. Domar, "Nationalencykolpedin, Fourieranalys," [Online]. Available: http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/fourieranalys. [Accessed 14 05 2015].

[41] G. Lindgren, "Natioalencyklopedin, aliaseffekten," [Online]. Available: http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/aliaseffekten. [Accessed 13 05 2015].

[42] J. Liljencrants, "Nationalencyklopedien, distorsion," [Online]. Available: http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/distorsion. [Accessed 13 05 2015].

[43] P. Kebke, Interviewee, *Process Engineer, SCA Hygiene Products.* [Interview]. 06 05 2015.

[44] A. Lood, Interviewee, *Schaeffler Group.* [Interview]. 14 05 2015.

[45] G. E. LLC, "Extender Module," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/273. [Accessed 01 05 2015].

[46] G. E. LLC, "Button Module," 2015. [Online]. Available: https://www.ghielectronics.com/catalog/product/274. [Accessed 01 05 2015].

[47] H. Konstrain-Hansen, "Brüel & Kjær," [Online]. Available: http://www.bksv.com/doc/bo0501.pdf. [Accessed 14 05 2015].

[48] "MathWorks," [Online]. Available: http://se.mathworks.com/help/signal/ug/amplitude-estimation-and-zero-padding.html. [Accessed 14 05 2015].

[49] M. H. Lim and M. S. Leong, "Detection of Early Faults in Rotating Machinery Based on Wavelet Analysis," *Advances in Mechanical Engineering,* vol. 2013, no. Article ID 625863, p. 8 Pages, 2013.

[50] E. B. Halim, M. A. A. Shoukat Choudhury, S. L. Shah and M. J. Zuo, "Fault Detection of Rotating Macinhery from Bicoherence Analysis of Vibration Data," [Online]. Available: http://www.eche.ualberta.ca/~slshah/uploads/Download/paper3.pdf. [Accessed 06 02 2015].

[51] "Faktorer som påverkar vibrationer," Sandvik Coromant, [Online]. Available: http://www.sandvik.coromant.com/sv-se/knowledge/technologies/silent-tools/turning/factors_that_influence_vibration/pages/default.aspx. [Accessed 04 03 2015].

[52] ".NET Micro Framework," Microsoft Open Technologies, Inc., [Online]. Available: http://www.netmf.com/get-started/. [Accessed 04 03 2015].

[53] "Vibrationsmätare Elma VT8204," Elma Instruments, [Online]. Available: http://www.elma-instruments.se/_se/Produkter/Lists;120/Drift-&-Service/p/5706445230303?shop.product.id=5706445230303. [Accessed 06 03 2015].

Bilaga A – Funktionell kravspecifikation testmiljö

Att formulera funktioner för en produkt är viktigt för att uppfylla behov och krav samt att ge en tillförlitlig produkt. Därmed är detta ett tidigt steg i produktutvecklingsmodellen. De viktigaste funktionerna har i det här stadiet tagits med och övriga funktioner som uppkom senare i utvecklingen har tagits med i kravspecifikationen.

Huvudfunktioner

Huvudfunktionerna är de viktigaste funktionerna att uppfylla då detta är ett krav att uppfylla för att uppnå produktens funktionalitet. Vilket medför att detta är direkt kopplat till kundvärdet för produkten i kombination med att hänsyn till priset har tagits.

- Testmiljöns huvudfunktion är att på ett enkelt och smidigt sätt kunna implementeras och användas för att avge realistiska vibrationer.

Tilläggsfunktioner

För att utöka kundvärdet är tilläggsfunktioner viktiga att produkten innehar i kombination med huvudfunktionen. Dessa tilläggsfunktioner är relevanta för att uppnå en konkurrenskraftig produkt:

- Testmiljön har låg ljudnivå
- Enkel implementering av störningar
- Olika program kan ställas in för olika typer av reglering.
- Enkel utveckling

Oönskade funktioner

Oönskade funktioner är de funktioner som behöver elimineras då dessa inte resulterar i ett ökat kundvärde. De funktioner som i nuläget kan ses som oönskade funktioner

- Motorerna stör ut annan elektronik
- Testmiljö avger ej realistiska vibrationer
- Testmiljö är ej möjlig att reglera inom det satta intervallet

Stödjande funktioner

Dessa funktioner är kopplade till huvudfunktionen och anses vara funktioner som bidrar till att den uppfylls. De funktioner som kan bidra till att huvudfunktionen uppfylls anses vara:

- Storleken på testmiljön är rimlig för utveckling och användning
- Vibrationsmotorerna medför reglering inom rätt intervall
- Ljudnivå och vikt uppfyller önskemålen

Bilaga B – Referenslösning

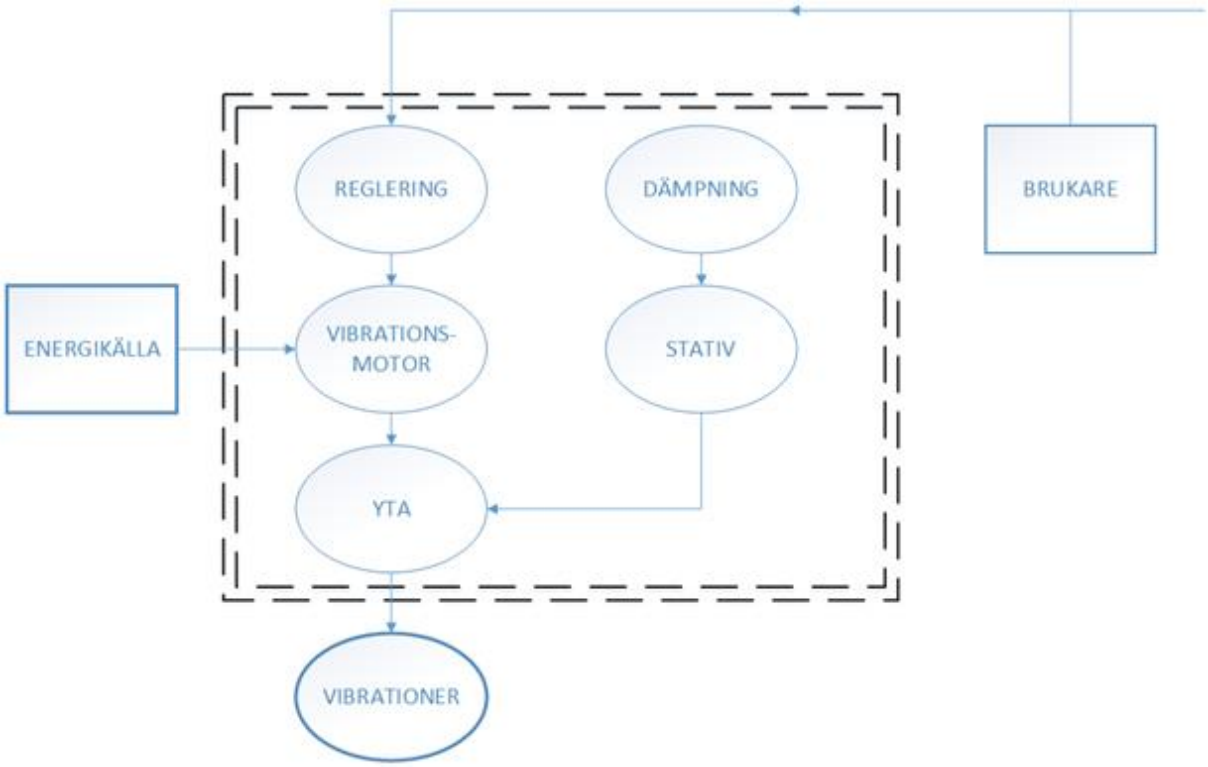
Referenslösningen delades in i olika delsystem som utfördes genom skapande av ett funktionellt diagram. Vilket är ett steg i produktutvecklingsmetoden för att kunna analysera och jämföra de framtagna koncepten från konceptgenereringen med referenslösningen. Se tabell 1.

Tabell 1: Delsystem för referenslösning(funktionellt diagram)

Källa till information	Referens tagit ifrån	Delsystem
Metal-Supply	Manuell reglering av vibrationer	Reglering
Metal-Supply	Eleffekt styr motorer i kombination med reglering	Energikälla
Metal-Supply	Motor som vibrerar på bordet	Vibrationsmotor
Metal-Supply Analys	Vibrationsmotorerna medför att någon sorts yta vibrerar	Yta
Metal-Supply	Stativ som förgrenar hela konstruktionen	Stativ
Metal-Supply	För att ej leda bort vibrationer används dämpning	Dämpning

Funktionell modell

Den funktionella modellen är en metod för att beskriva referenslösningens funktion, därmed kan en tydligare inblick fås hur de olika delsystemen påverkar funktionen. Vilket gör det enklare att analysera vad som kan förbättras och effektiviseras, se Figur 1.



Figur 1: Referenslösning delsystem

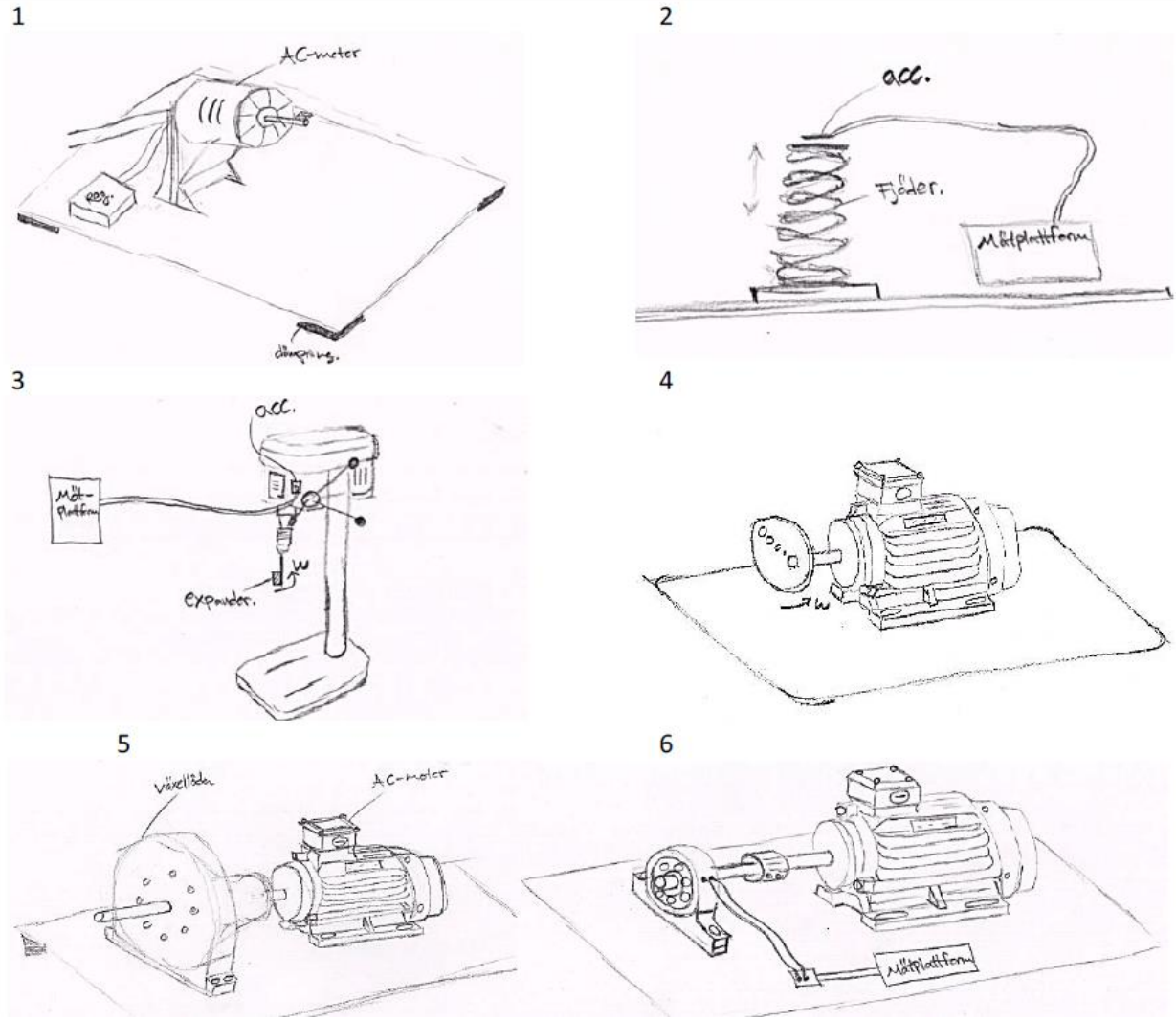
Rangordning av delsystemen

Delsystemens rangordning utvärderades utifrån hur väl den funktionella kravspecifikationen uppfylldes. Det vill säga till vilken grad huvudfunktionen och tilläggsfunktionerna uppfylldes genom olika lösningar på de olika delsystemen. Vilket medförde att det var möjligt att kunna kartlägga vad som var ett bra/sämre delsystem för skapande av vibrationer. Se tabell 2.

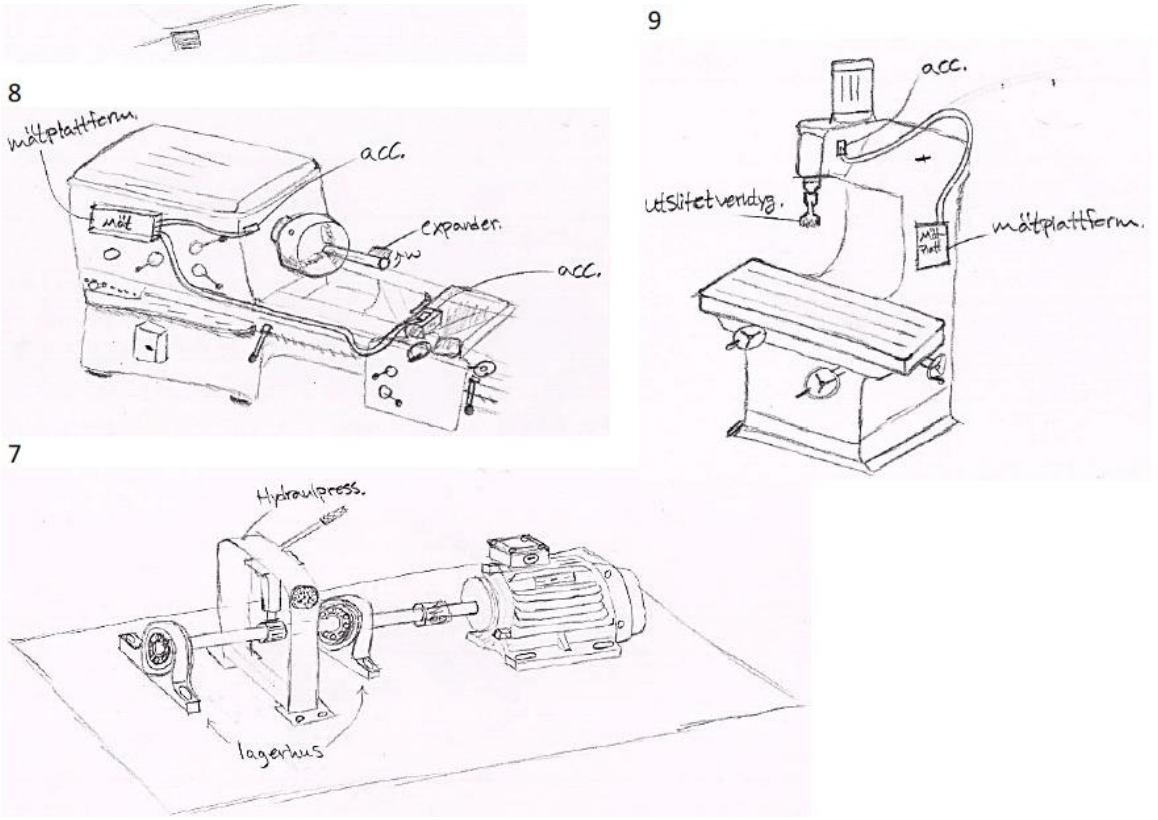
Tabell 2. Rangordning av delsystem referenslösning

Rang	Delsystem
1	Vibrationsmotor
2	Reglering
3	Energikälla
4	Yta
5	Stativ
6	Dämpning

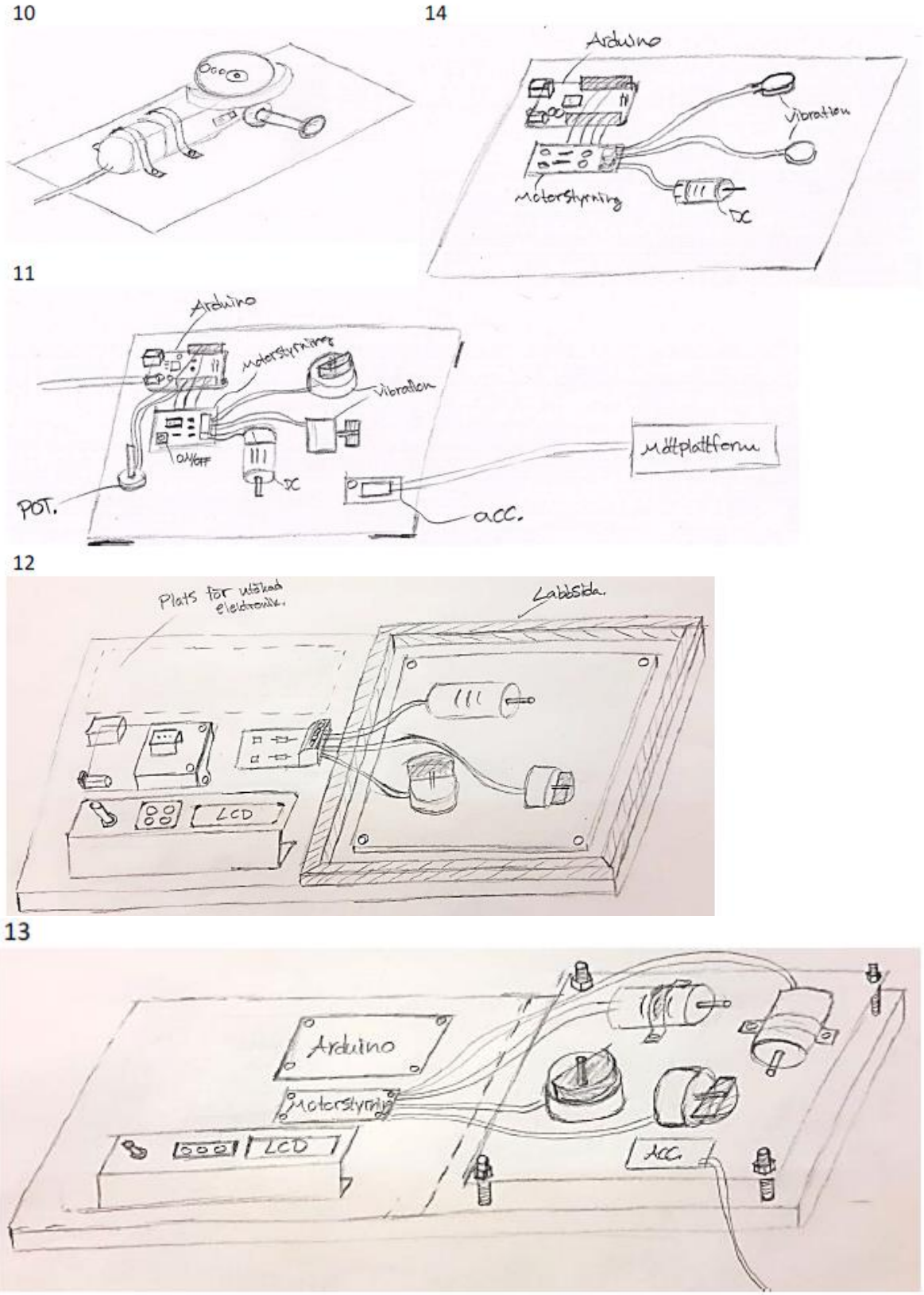
Bilaga C – Testmiljö Konceptgenerering



Figur 3: Testmiljö koncept 1-6



Figur 4: Testmiljö koncept 7-9



Figur 5: Testmiljö koncept 10-14

Koncept 1
Konceptet består av en plattform som dämpas med hjälp av mjuka kuddar i hörnen. Vibrationer skapas genom att en AC-motor roterar. Olika tyngder kan monteras på axeln för AC-motorn så att obalans skapas och på så sätt bildas annorlunda vibrationer. Accelerometern monteras på plattformen och mäter plattformens vibrationer som skapas av motorn. Se Figur 3.

Fördelar med konceptet är att det är ett enkelt koncept och lätt att bygga. Dock kan AC-motorer vara svårare att reglera på ett enkelt sätt i förhållande till DC motorer. Därmed lämpar sig tvåläges reglering, på och av. Alltså behövs avbrott för att kunna montera en annan excentrisk vikt för att skapa vibrationsförändringar. Svaga kontinuerliga förändringar ses som i princip omöjliga att åstadkomma med detta koncept.

Koncept 2
En väldigt simpel testmiljö är koncept 2 som visas i Figur 3. Det är en fjäder som skapar svängningar och dessa mäts genom att en accelerometern monteras i änden på fjädern.

Detta är ett väldigt simpelt och billigt koncept som är lätt att bygga. Svängningar är förmodligen väldigt annorlunda i både frekvens och amplitud jämfört med vibrationer som skapas i maskiner på grund av fel. Det antas vara svårt att få kontinuerliga mätningar eftersom svängningarna antas klinga av snabbt.

Koncept 3
En pelarborrmaskin är huvudkomponenten i koncept 3 som visas i Figur 3. På pelarborrmaskinen monteras olika vikter på i chucken och med hjälp av dessa skapas obalans vilket resulterar i olika vibrationer.

Fördelarna med detta koncept är att det grundas på redan befintliga maskiner. Det är lätt att mäta under långa perioder av kontinuerlig drift och möjlighet finns för att välja olika verktyg för att se hur verktygens kondition påverkar vibrationer. Styrningen behöver inte göras externt eftersom en pelarborrmaskin brukar ha olika inställningar för inställning av varvtal. Dock kan inte ett excentriskt verktyg monteras på utan att maskinen stoppas och beroende på maskin så kan varvtalet vara tvunget att ändas i stora steg vilket hindrar långsamma förändringar i vibrationer. En annan nackdel är att det är en stor maskin vilket gör att alla mätningar måste ske vid maskinens ursprungsplats då den inte är portabel.

Koncept 4
Koncept 4 består av en större AC-motor än vid koncept 1. Huvudfunktionen är att man ska kunna montera en skiva som har flera olika möjligheter för montering av vikter som resulterar i olika vibrationer. Samma sak gäller här att maskinen måste stoppas för denna förändring, däremot är denna motor mer lämplig då motorn kan regleras mellan olika varvtal. Nackdelar är att denna motor är mycket tung och är inte lämplig att transportera mellan olika platser samt att den avger hög ljudnivå vilket inte är en ergonomisk testmiljö att jobba kring. Se Figur 3.

Koncept 5
Det här konceptet består av en liknande AC-motor som för koncept 4 men tanken här är att den ska driva en växellåda för att kunna få lite mer verkliga mätvärden. I kombination med att skulle kunna vara möjligt att göra inställningar på växellådan så att det skapas annorlunda vibrationer, för att kunna detektera förändring i analysen. Detta blir också ett koncept som blir stationärt och mycket dyrt att implementera och bygga. Se Figur 3.

Koncept 6
Konceptet är tänkt att med en vanlig AC-motor kunna driva en simpel kullagerrigg. Vilken ger möjlighet till montering av olika slitna kullager för utförande av lageranalys. Se Figur 3.

Koncept 7
Det här konceptet är en större stationär anordning med en AC-motor som ska driva kullagerriggen som har två lagerhus för möjligheten att byta kullager enkelt. Sedan är en hydraulpress monterad som ska

motsvara en anbringad kraft på axeln för att förkorta livslängden på lagrena. Tanken är även att genom beräkningar beräkna livslängden vid viss pålagd kraft och utföra mätning på plattformen. För att ungefär kunna veta när lagrena går sönder och på så sätt få en bra analys. Se Figur 4.

Koncept 8

Det här konceptet är en befintlig maskin, svarv, som det är tänkt att utföra kontinuerliga mätningar på i kombination med att svarvning sker med slitna/nya verktyg för att se ifall detta är möjligt att detektera. Konceptet liknar konceptet med pelarborrmaskinen och eventuellt finns det möjlighet att få utföra tester på Chalmers maskiner. Då detta ses som en bra miljö att testa på under steg 2 i utvecklingen då testerna är tänkta att utföras på mer befintliga maskiner. Se Figur 4.

Koncept 9

Det här konceptet är ytterligare en testmiljö på en befintlig maskin, fräs, som det är tänkt att utföra mätningar på samma sätt som de andra befintliga maskinerna. Det som kan ses lite annorlunda här är att det är verktyget som roterar istället för arbetsstycket som vid svarven vilket kan medföra större vibrationer vid fräsning med ett utslitet verktyg. Därför är det intressant att utföra tester på alla dessa maskiner. Se Figur 4.

Koncept 10

Det här konceptet är en vinkelslip som är fastmonterad på en plattform och i detta fall är det en kapskiva som är obalanserad och har hål som kan användas för att montera olika vikter. Problemet är att ljudnivån är mycket hög samt att maskinen vibrerar mycket vid normala tillstånd som kan medföra mycket störningar. Sedan är det på denna och de andra maskinerna (AC-motor koncepten) med obalanserade vikter farligt att vistas nära då mycket kan gå fel vid vibrationer. Vilket eventuellt kan resultera i att maskinerna havererar och detaljer förs iväg med hög hastighet. Se Figur 5.

Koncept 11

För att få en kompakt testmiljö som är smidig att transportera har detta koncept genererats. Konceptet bygger på en microkontroller som med lämplig motorstyrning kan driva ett antal motorer. DC motorer med kontinuerlig rotation och DC motorer med obalanserade vikter som ska generera större vibrationer som är tänkta att representera fel i en maskin. Tanken är att mjukvaran ska utvecklas eftersom då det viktigaste är att först och främst kunna uppfylla huvudfunktionen med att generera vibrationer. Se Figur 5.

Koncept 12

För att få en större möjlighet till utveckling än vid koncept 11 har detta koncept genererats där både mjukvaran, elektronik delen och vibrationsdelen ska kunna ändras och utvecklas. Detta för att kunna utveckla vibrationsdelen separat genom att kunna variera montering av plåten, genom fast montering, montering med fjädrar eller ingen montering alls. Med anledning av att inte begränsa möjligheterna från början. Elektronikdelen monteras separat då dessa är känsliga för vibrationer och även den delen ska vara enkel att kunna utveckla. En manöver panel ska monteras för enkel styrning manuellt av testmiljön samt ha en LCD för att kunna se olika tillstånd på motorerna. Se Figur 5.

Koncept 13

Utvecklat koncept av koncept 11 med en avdelning för elektronik och en för vibrationer. Plattformen sitter nu fastskruvad som en subdel till hela plattformen eftersom elektroniken är känslig för vibrationer så har dessa separerats. Ytan har även ökats för att få plats med mer komponenter så att det blir enkelt att montera ytterligare komponenter efter nya behov. Detta för att inte begränsa möjligheten för utvecklig från början genom otillräcklig storlek på plattformen. Se Figur 5.

Koncept 14

Detta är en variant av koncept 11 med en basplattform med microkontroller och skillnaden här är att använda andra små platta vibrationsmotorer istället för större DC motorer med excentriska vikter. Tanken är att få svagare vibrationer som kan vara svårare att detektera. Se Figur 5.

Bilaga D – Konceptval testmiljö

Pugh matris 1

I första matrisen (Tabell 3) valdes vibrationsbordet som referens eftersom detta är ett känt koncept som ansågs vara den optimala lösningen på problemet.

Tabell 3: Pugh-matris 1

Pugh matris

Koncept	Steg 1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Kriterium	X														
Avge realistiska vibrationer	X	0	-	+	-	-	+	+	+	+	-	0	0	0	0
Reglerbar testplattform	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Reglerbara motorer	X	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+
Långsamma förändringar	X	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+
Införning av störningar	X	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Tillräckligt stor för utveckling	X	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-
Lättvindig transport	X	+	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Möjlig för utökning av sensorer	X	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	-
Billig att konstruera	X	-	+	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+
Enkel att bygga	X	+	+	-	+	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Förmåga att leda vibrationer	X	-	-	+	-	-	+	+	+	+	-	-	-	-	-
Lätt att använda	X	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Låg ljudnivå	X	+	+	+	+	-	+	+	-	-	-	+	+	+	+
Enkel att reparera/utveckla	X	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Summa + :		5	6	5	4	3	8	7	4	4	3	9	12	11	9
Summa - :		7	8	9	10	11	6	7	10	10	11	4	1	2	4
Totalt:		**-3**	**-2**	**-4**	**-6**	**-8**	**2**	**0**	**-6**	**-6**	**-8**	**5**	**11**	**9**	**5**

Vinnaren i första utvärderingen blev koncept 12, vilken ställdes som referens i nästa matris (Tabell 4) för att säkerställa att inget annat koncept var bättre.

Pugh matris 2

Tabell 4. Pugh-matris 2

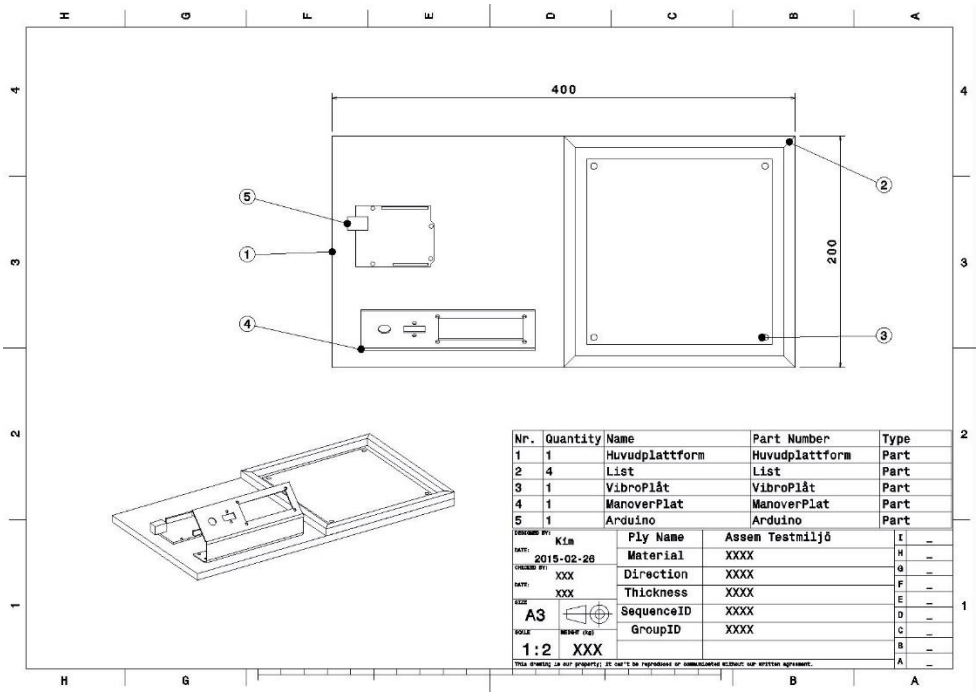
Pugh matris

Koncept	12	1	2	4	5	6	7	10	11	13	14
Kriterium	X										
Avge realistiska vibrationer	X	-	-	0	0	0	0	-	0	0	0
Reglerbar testplattform	X	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Reglerbara motorer	X	-	-	-	-	-	-	-	0	0	0
Långsamma förändringar	X	-	-	-	-	+	+	-	0	0	0
Införning av störningar	X	-	-	-	+	+	-	-	0	0	0
Tillräckligt stor för utveckling	X	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Lättvindig transport	X	+	-	-	-	-	-	-	+	0	+
Möjlig för utökning av sensorer	X	-	-	-	-	-	-	-	-	0	-
Billig att konstruera	X	-	+	-	-	-	-	-	0	0	0
Enkel att bygga	X	+	+	-	-	-	-	+	0	0	0
Förmåga att leda vibrationer	X	-	-	+	+	+	+	-	-	0	-
Lätt att använda	X	-	+	-	-	-	-	-	0	0	0
Låg ljudnivå	X	-	+	-	-	-	-	-	0	0	0
Enkel att reparera/utveckla	X	-	+	-	-	-	-	-	-	0	-
Summa + :		2	5	1	2	4	2	1	1	0	1
Summa - :		12	9	12	10	9	11	13	4	1	4
Totalt:		**-10**	**-4**	**-11**	**-8**	**-5**	**-8**	**-12**	**-3**	**-1**	**-3**

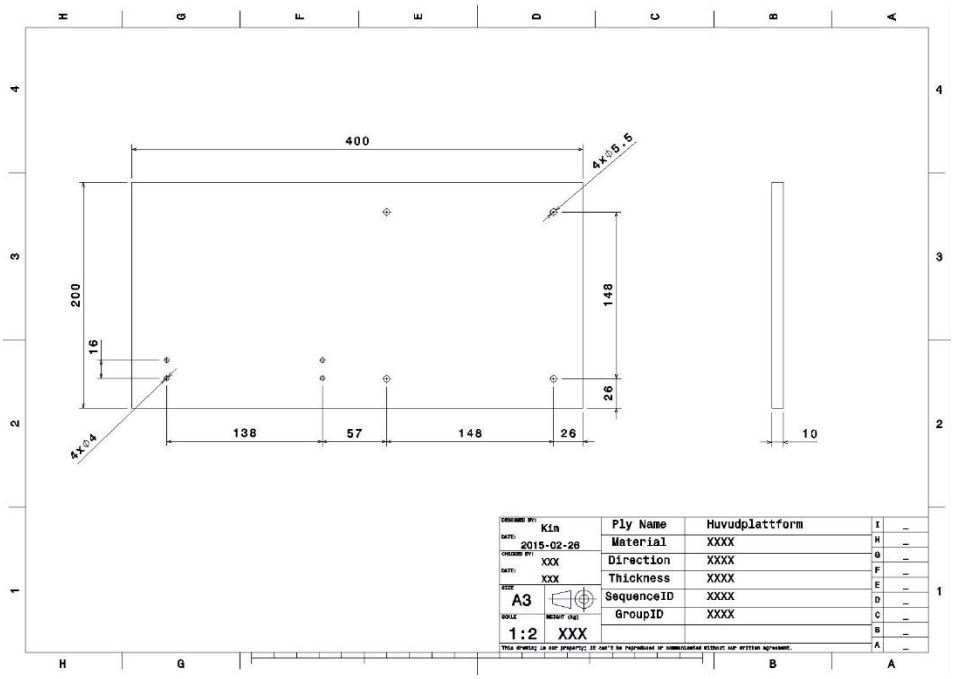
Resultatet blev återigen koncept 12 och som därmed blev det valda konceptet.

Bilaga E - Ritningar på testmiljö

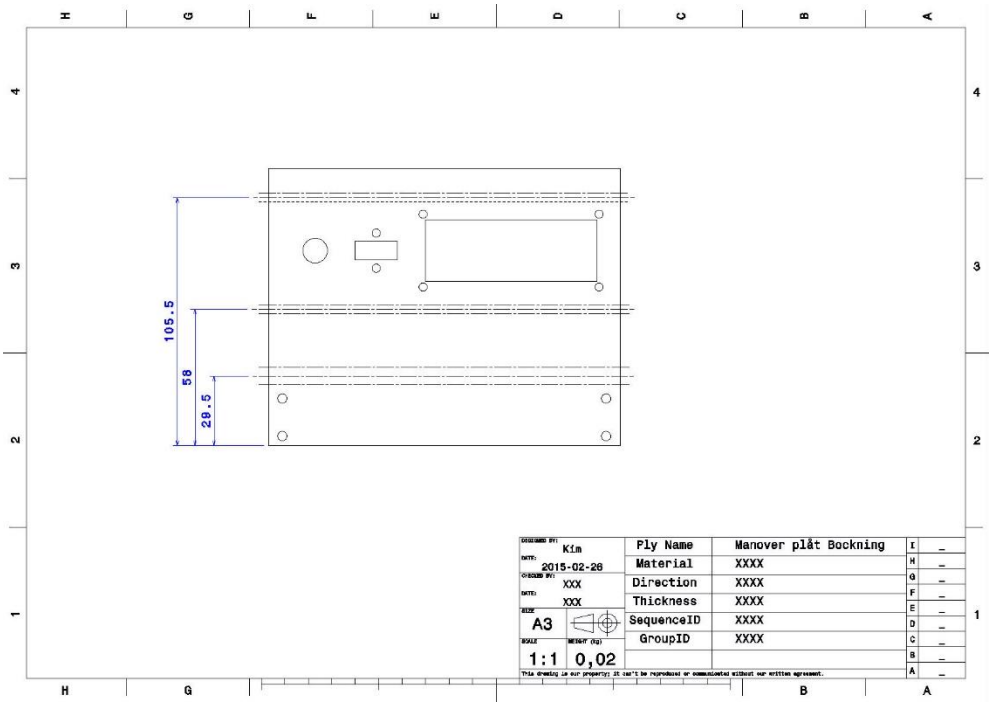
De ritningarna som skapades för tillverkningen var sammanställning (Figur 8), Huvudplattform (Figur 9), Manöverpanel (Figur 10), Vibrationsplåt (Figur 11) och lister (Figur 12).



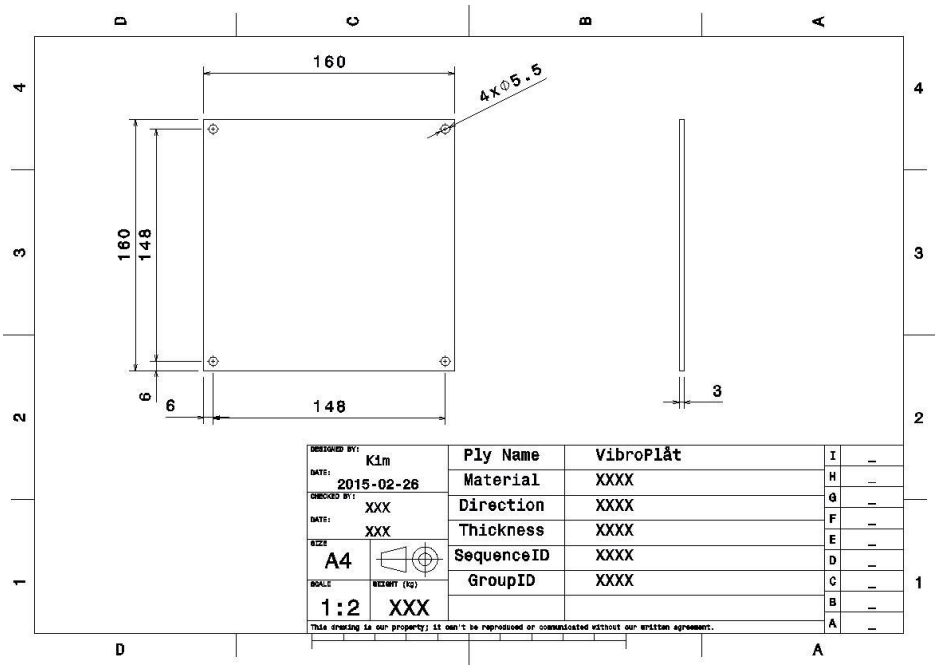
Figur 8: Sammanställning Testmiljö



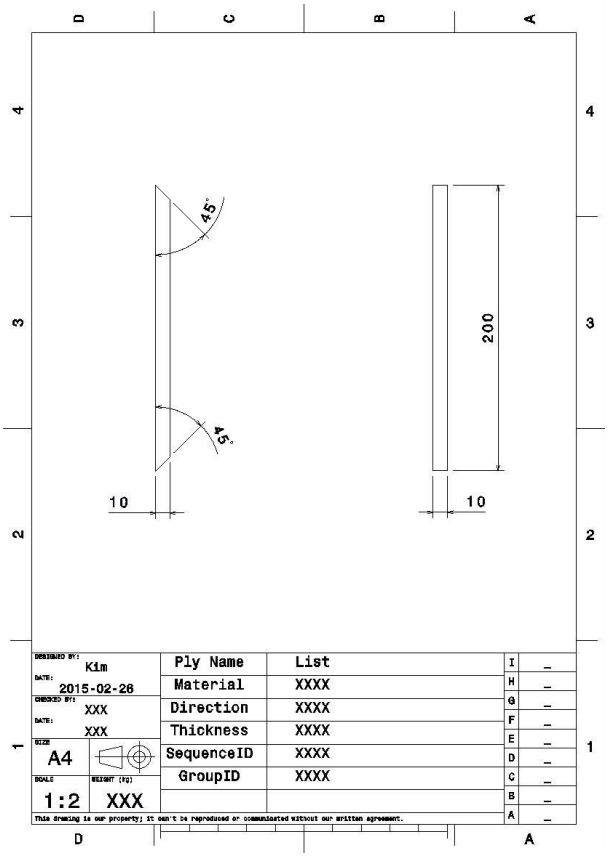
Figur 9: Huvudplattform Testmiljö



Figur 10: Manöverpanel Testmiljö



Figur 11: Vibrationsplåt Testmiljö



Figur 12: Lister Testmiljö

Bilaga F - Funktionell kravspecifikation inkapsling

Huvudfunktioner

Huvudfunktionerna är de viktigaste funktionerna att uppfylla då dessa är krav för att uppnå full funktionalitet, vilket medför att dessa är direkt kopplade till kundvärdet för produkten.

- Inkapslingens huvudfunktion är att skydda hårdvaran från miljön som kan förekomma vid olika områden inom industrin där produkten är tänkt att implementeras.

Tilläggsfunktioner

För att öka kundvärdet är det viktigt med tilläggsfunktioner i kombination med huvudfunktionen. Detta kan leda till att fler väljer denna produkt istället för konkurrenterna då tilläggsfunktioner kan vara funktioner som kunder är villiga att betala mer för.

Dessa tilläggsfunktioner är relevanta för att uppnå en konkurrenskraftig produkt:

- Testad mot olika standarder för att klara olika krav och önskemål, (IP klassning)
- Minimal vikt och enkel metod för montering
- Passar in i produktionens miljö med avseende på design

Oönskade funktioner

Oönskade funktioner är de funktioner som behöver elimineras då dessa inte resulterar i ett ökat kundvärde. De funktioner som kan ses som oönskade funktioner:

- Inkapslingen klarar ej alla typer av miljöer
- Svårt att implementera och använda hårdvaran vid utveckling
- Svårt att demontera och använda inkapslad hårdvara

Stödjande funktioner

Dessa funktioner är kopplade till huvudfunktionerna och anses vara funktioner som bidrar till att de uppfylls. De funktioner som kan bidra till att huvudfunktionen uppfylls anses vara:

- Materialvalen klarar den specifika miljön
- Enkel design som är lätt att implementera

Bilaga G - Konceptgenerering Inkapsling

Koncept 1 - Kapsla in allt i epoxy

För att skydda alla komponenter gjuts komponenterna in i epoxy. Detta ger ett både hållfast och tätt skydd. Dock blir montering av nya komponenter och utbyte av komponenter omöjligt. Epoxy får inte hanteras i prototyplabbet vilket kan ge svårigheter att genomföra detta koncept.

Koncept 2 - Skyddande plastpåse

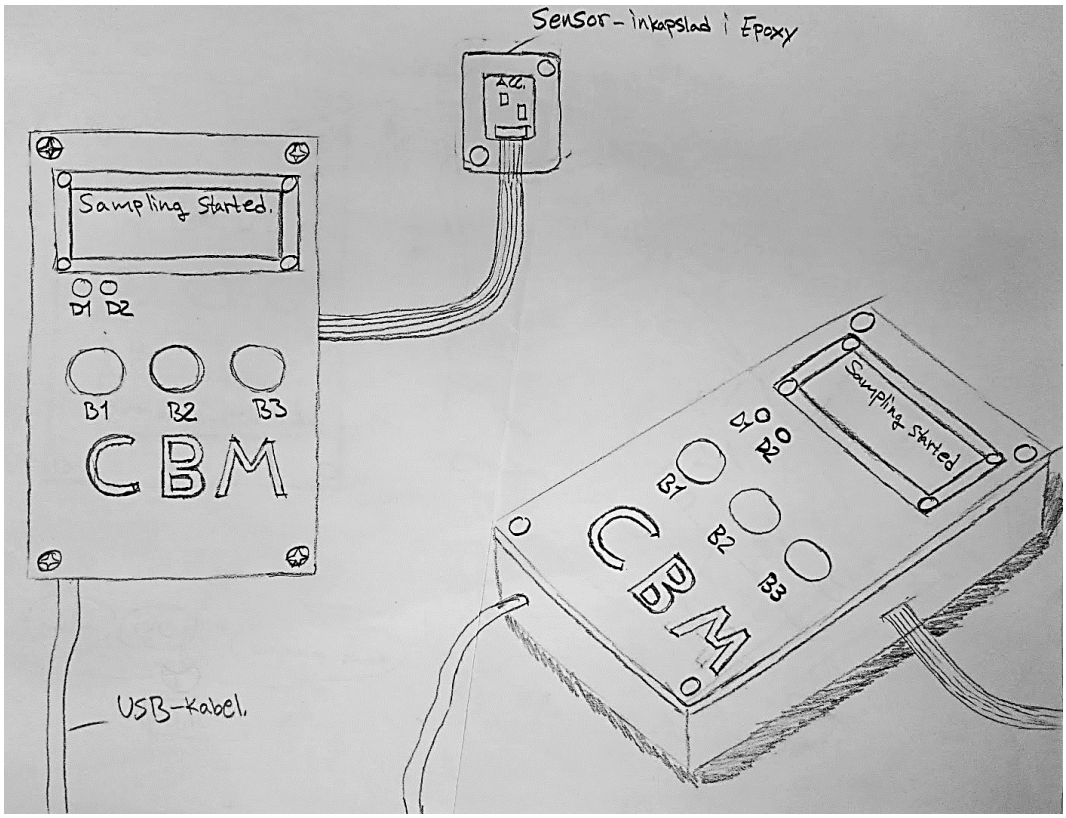
För att kunna se alla komponenter och displayer och ändå kunna använda t.ex. knappar och samtidigt skydda hårdvaran från damm och vattenstänk kan alla komponenter läggas i en försluten plastpåse. Dock kommer komponenterna inte att vara fastmonterade och kan då skadas om de stöter i varandra. Problem kan också uppkomma om det blir hål eller repor i plastpåsen.

Koncept 3 - Matlåda med genomskinligt lock

Hårdvaran placeras i en matlåda eller liknande. Matlådor är damm och till viss del fukttåliga men har ingen IP-klass. Detta är en funktionell och billig metod med blir inte lätt att montera på en maskin och ser inte speciellt professionell ut. Det genomskinliga locket gör att display kan ses utan att behöva göra hål i lådan. Dock kan hål behöva göras för sladdar och knappar.

Koncept 4 - 3D-printa en egendesignad låda

Med hjälp av en 3D-printer ges stora möjligheter att designa en form som är anpassad specifikt till hårdvaran. Material som finns tillgängliga för 3D-print på Chalmers är PLA och ABS. Detta kan ge ett bra resultat och en optimerad volymåtgång för inkapslingen men kräver också tid och kunskap för att genomföra på ett bra sätt, se Figur 13. Med detta finns ingen möjlighet att få IP-klassning.



Figur 13: 3D-Printad inkapsling

Koncept 5 - IP-klassad låda (utan hål)

Användning av en IP-klassad låda skulle garantera damm och vattentålighet om hårdvaran kunde placeras inuti den. Då måste lådan kunna monteras direkt på den vibrerade maskinen med hjälp av magneter eller skruvar. Dock kan det vara svårt att mäta vibrationer genom lådan och funktionalitet som

knappar och LCD kan inte användas. Risken är att mätningarna tappar noggrannhet då sensorn är placerad längre ifrån vibrationskällan vilket gör analysen sämre.

Koncept 6 - IP-klassad låda (med hål)

För att behålla noggrannhet och då funktionalitet kommer vissa komponenter behöva vara på utsidan såsom knappar och sensor. Då kommer hål behöva göras men tätas dessa på ett bra sätt, med exempelvis. Silikon, kan beständigheten till viss del bevaras även om inte IP-klassningen för inkapslingen finns kvar.

Bilaga H - Konceptval inkapsling

Pugh-matris 1

Koncept:	**X**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Kriterium	**X**						
Skydda hårdvaran från vatten och smuts	X	+	-	0	0	+	+
Tillåta enkel åtkomst till SD-kort och batteri-modul	X	-	0	0	0	0	0
Hålla god ordning på de olika modulerna	X	-	-	0	0	+	+
Göra hårdvaran enkel att ta med till tester	X	-	0	0	0	0	0
"Tät", IP-klassad	X	+	-	-	0	+	0
Materialet tål längre vistelser i industriella miljöer	X	+	-	-	0	+	+
Design sådan att inkapslingen passar in i miljön	X	-	-	-	0	+	+
Åtkomst till komponenter möjlig efter montering/öppningsbar	X	-	0	+	0	+	+
Låg ljudnivå	X	+	0	0	0	0	0
Enkel att reparera/utveckla	X	-	+	-	0	-	0
Tidsåtgång för tillverkning	X	+	+	+	0	+	+
Medger möjlighet att montera sensor på annat ställe än microkontroller	X	+	0	-	0	-	+
Summa + :		6	2	1	0	7	7
Summa - :		6	5	5	0	2	0
Totalt:		**0**	**-3**	**-4**	**0**	**5**	**7**

I matrisen syns att koncept 5 och 6 var de bästa jämfört med referenslösningen, allra bäst var koncept 6 vilket valdes som referens varpå processen itererades.

Pugh-matris 2

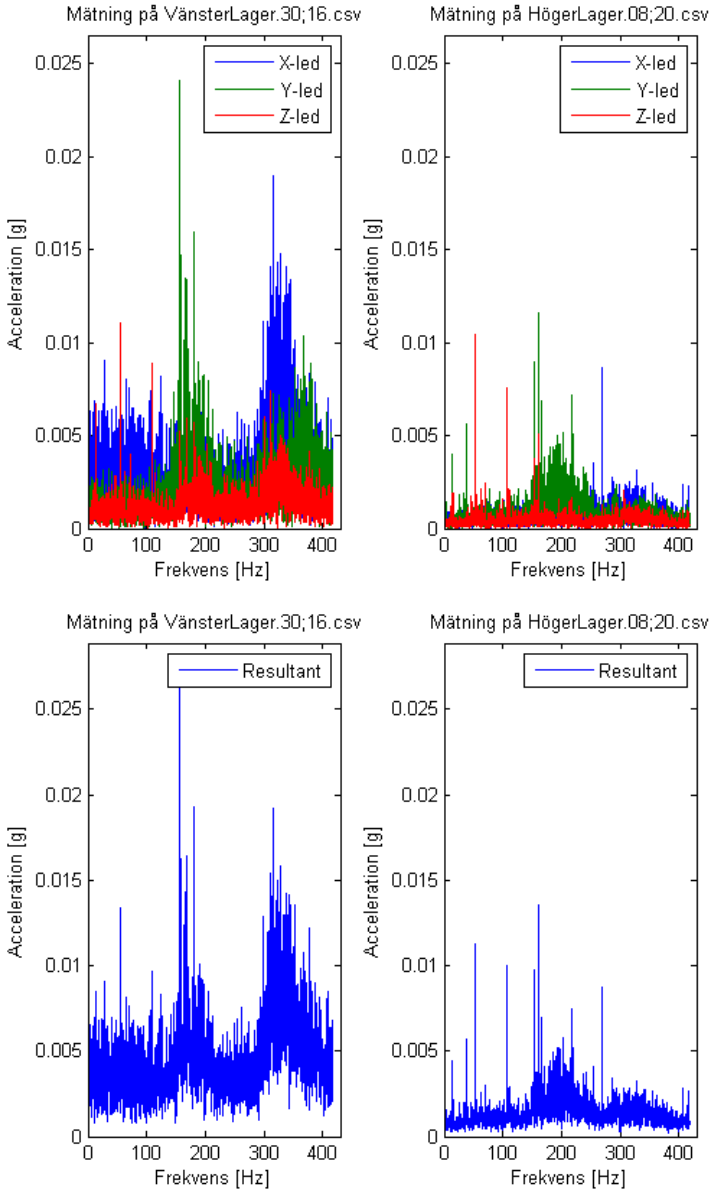
Koncept	**X**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Kriterium	**X**						
Skydda hårdvaran från vatten och smuts	X	+	-	0	0	0	0
Tillåta enkel åtkomst till SD-kort och batteri-modul	X	-	0	0	0	0	0
Hålla god ordning på de olika modulerna	X	-	-	0	0	0	0
Göra hårdvaran enkel att ta med till tester	X	-	0	0	0	0	0
"Tät", IP-klassad	X	0	-	0	0	+	0
Materialet tål längre vistelser i industriella miljöer	X	0	-	-	0	0	0
Design sådan att inkapslingen passar in i miljön	X	-	-	-	0	0	0
Åtkomst till komponenter möjlig efter montering/öppningsbar	X	-	0	0	0	0	0
Låg ljudnivå	X	0	0	0	0	0	0
Enkel att reparera/utveckla	X	-	+	-	-	0	0
Tidsåtgång för tillverkning	X	0	+	0	-	0	0
Medger möjlighet att montera sensor på annat ställe än microkontroller	X	0	0	0	0	-	0
Summa + :		1	2	0	0	1	0
Summa - :		6	5	3	2	1	0
Totalt:		**-5**	**-3**	**-3**	**-2**	**0**	**0**

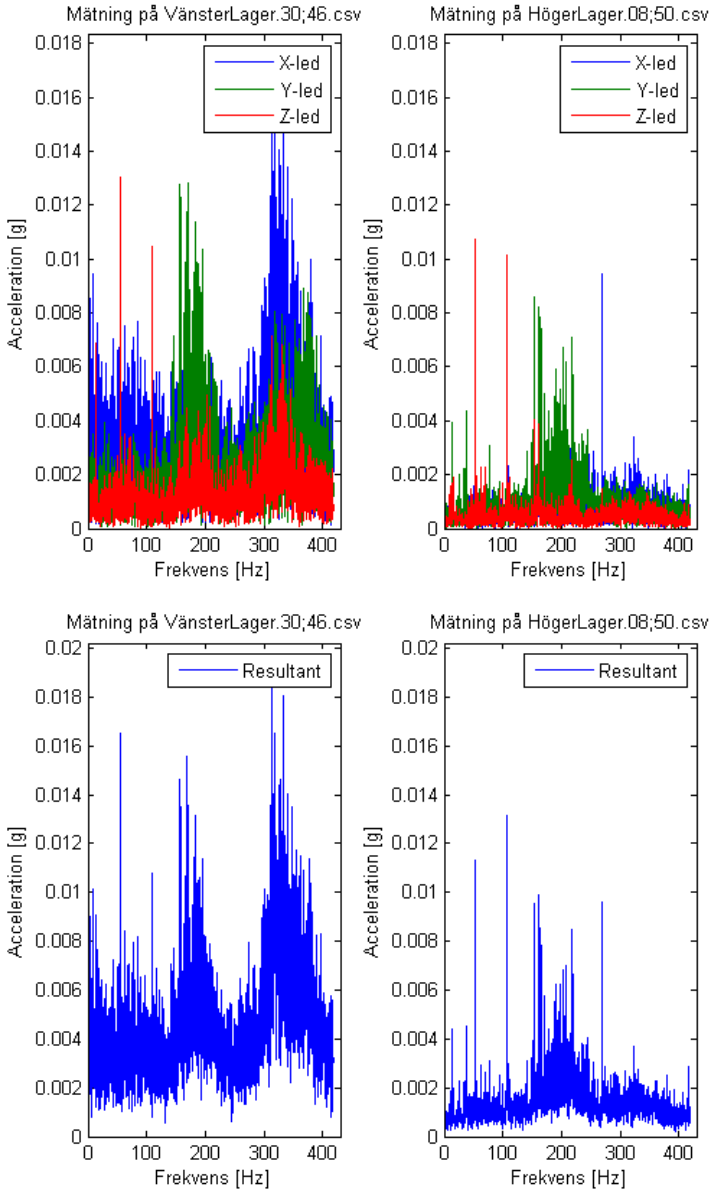
Med koncept 6 som referens befinns koncept 5 vara det enda som klarar är lika bra. Koncept 6 valdes att gå vidare med enligt motiveringen i avsnitt 5.3.

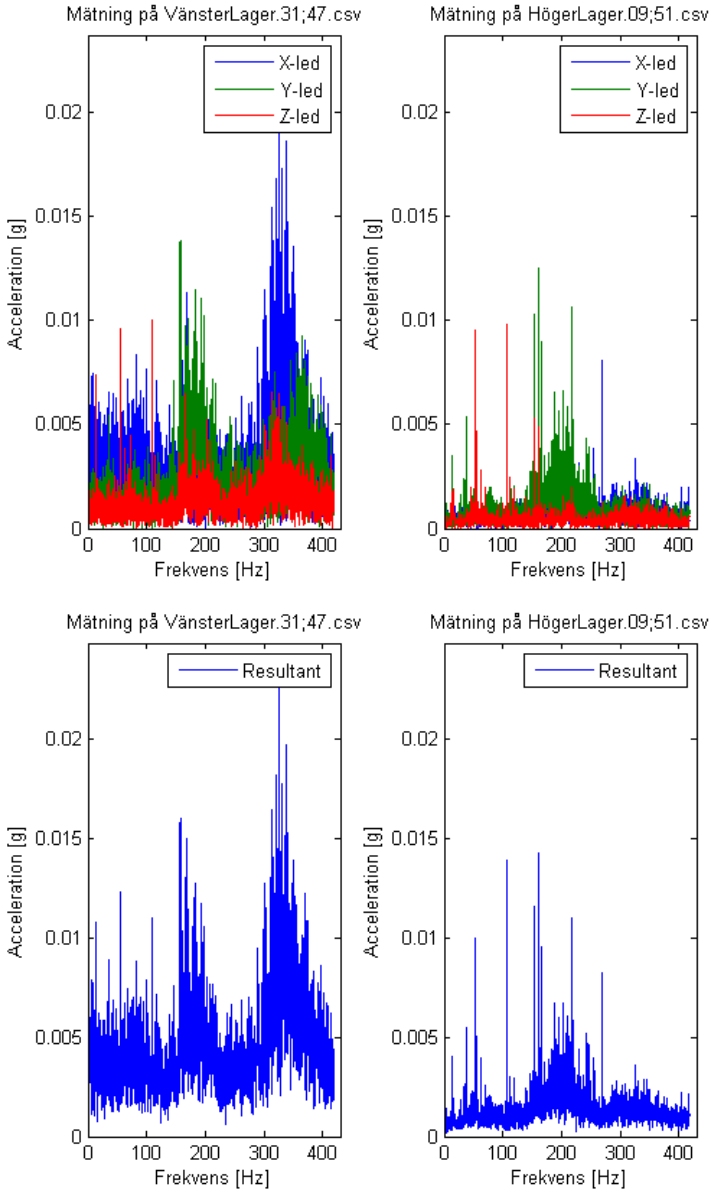
Bilaga I – Mätningar i industri

Här presenteras ytterligare resultat från mätning på SCA.

På varje sida presenteras först resultatet från en mätning i acceleration i alla riktningar och sedan visas en bild med accelerationen summerat till en resultant.




Mätning på VänsterLager.30;46.csv
Mätning på HögerLager.08;50.csv
X-led
Y-led
Z-led
Resultant
Acceleration [g]
Frekvens [Hz]
0
0.002
0.004
0.006
0.008
0.01
0.012
0.014
0.016
0.018
0.02
0
100
200
300
400



Alla grafer är ganska lika vilket tyder på att resultatet inte var en tillfällighet.

Bilaga J – CSV fil

Här är exempel på hur datan från accelerometern kan se ut i CSV filen innan analys sker.

Formatet är: Tid sedan mätningens start;Acceleration i x-led; Acceleration i y-led; Acceleration i z-led

0;-0.00390625;0.001953125;0.123046875

0.0013125999999999999;-0.005859375;0.001953125;0.123046875

0.0027777000000000001;-0.00390625;0;0.123046875

0.0039680000000000002;-0.00390625;0;0.123046875

0.0052805999999999999;-0.00390625;0.001953125;0.123046875

0.0063184000000000001;-0.00390625;0.00390625;0.123046875

0.0075392999999999996;-0.00390625;0.00390625;0.125

0.0087297;-0.00390625;0.001953125;0.123046875

0.0099200999999999994;-0.00390625;0.00390625;0.123046875

0.011232600000000001;-0.005859375;-0.001953125;0.123046875

0.0123009;-0.00390625;0.00390625;0.123046875

0.013613399999999999;-0.001953125;0.001953125;0.123046875

0.0148039;-0.001953125;0;0.123046875

0.0161163;-0.00390625;0.001953125;0.123046875

0.017154099999999999;-0.00390625;0.001953125;0.123046875

0.0184666;-0.00390625;0;0.123046875

0.019657000000000001;-0.00390625;0.001953125;0.123046875

0.020877900000000001;-0.00390625;0.001953125;0.123046875

0.022190499999999998;-0.00390625;0;0.123046875

0.0232587;-0.00390625;0.001953125;0.123046875