

Utveckling och utvärdering av en funktionssäker pulsgivare

Konkretisering och vidareutveckling av en patenterad
lösning vilken ämnas detektera låsta lager

Kim Bojnell

2023-06-04

Handledare, Leine & Linde: Anders Åkerberg & Richard Arnstein

Handledare, Mälardalens Universitet: Kristian Sandström

Examinator: Sten Grahn

Abstract

An emerging industrial automation has led to higher demands required for construction of encoders to ensure functionality of automated processes. The main purpose of the encoder is to provide data which indicates the condition of a drive system. If the encoder is found to be defective, there is a risk of causing a critical discontinuity in the drive system increasing the risk of causing a dangerous situation. For rotary inductive encoders, ball bearing failure is the main reason for encoder failure. Since the effectiveness of a lubricant decreases over time, continued operation of the encoder will lead to wear increasing frictional torque in the ball bearings. The bearings will eventually lose their ability to rotate resulting in blocked bearings. This thesis has been executed at the request of Leine & Linde with the aim of concretising and further developing a patented conceptual solution initiated by the company. A solution that aims to mechanically register lost rotational ability of the ball bearings in a rotary inductive encoder. As a result, maintenance or replacement of defective ball bearings can be scheduled upon indication of wear rather than after a malfunction has occurred contributing to increased functional safety. This has led to formulation of two research questions:

RQ1 How can a mechanical solution be designed to enable the detection of blocked bearings in a rotary inductive encoder and thereby increase the functional safety of a control system?

RQ2 Which aspects should be taken into account when designing industrial rotary encoders with inductive measurement technique on which the functional safety increases?

This study includes two sub-studies which were executed within a period of 20 weeks: 1) theoretical study; 2) empirical study. The theoretical sub-study is based on a literature study of published research articles as well as relevant company documents in *functional safety, operational monitoring and control* as well as *flexible and robust constructions*. The empirical study consists of a case study which is based on an exploratory iterative product development process which, after evaluating a patented solution, examined six alternative solutions with regard to established requirements. Empirical data has primarily been collected through Computer-Aided Design (CAD), empirical test observations of 3D-printed functional prototypes as well as a Computer Numerical Control (CNC) produced functional prototype. Additionally, failure effect analyses (FMEA) were executed. All sub-results have been verified through discussions with relevant actors at the case company.

The result of the study has showed a working function including a spring force which, integrated in the case company's general product architecture, enables an extended distance of 1.5 mm between rotor and stator in case of blocked bearings. The given distance variation, within an inductive encoder, is assumed to produce deviating electromagnetic values which can be registered by connected software. However, functional performance depends on external circumstances where a correct installation and application is assumed. An analysis of theoretical and empirical studies has shown seven factors which are seen to affect functional safety: 1) product architecture; 2) product structure; 3) risk assessment; 4) material & geometry requirements; 5) maintenance & redundancy; 6) product variability; 7) spring application. An essential conclusion of executed study refer to mechanical springs which may be incompatible with functional safety constructions due to risk of fatigue failure. Thus, it is recommended to further investigate whether a solution without a spring is possible.

Sammanfattnings

Med en framväxande industriautomation ställs allt högre krav vid konstruktion av pulsgivare i syfte att säkerställa funktionaliteten hos automatiserade processer. Pulsgivarens huvudsakliga syfte är att tillhandahålla data vilka påvisar tillståndet hos ett drivsystem. I det fall då pulsgivaren ses vara defekt riskeras ett kritiskt avbrott hos drivsystemet att förorsakas, vilket medför ökad risk för uppkomst av en farlig situation. För roterande induktiva pulsgivare ses kullagerfel vara den främsta anledningen till att haveri uppstår. Då effektiviteten av ett smörjningsmedel avtar med tiden ses fortsatt drift leda till slitage och ökat friktionsmoment i kullagren vilka till slut förlorar rotationsförmågan och låses. Denna avhandling har utförts på uppdrag av Leine & Linde med målsättningen att konkretisera och vidareutveckla en patenterad konceptuell lösning framtagen av företaget. En lösning som syftar till att mekaniskt registrera förlorad rotationsförmåga hos kullagren i en roterande induktiv pulsgivare. Således ses underhåll eller byte av kullager kunna planeras in redan vid indikation på slitage istället för vid defekt funktion, vilket bidrar till ökad funktionssäkerhet. Detta har lett till formulering av två forskningsfrågor:

F1 Hur kan en mekanisk lösning konstrueras för att möjliggöra detektering av låsta lager hos en roterande induktiv pulsgivare och därmed öka funktionssäkerheten för ett styrsystem?

F2 Vilka aspekter bör beaktas vid konstruktion av industriella roterande pulsgivare med induktiv mätteknik på vilken funktionssäkerheten ses öka?

Studien omfattar två delstudier vilka utförts inom en tidsperiod på 20 veckor: 1) teoretisk studie; 2) empirisk studie. Den teoretiska delstudien baseras på en litteraturstudie av publicerade forskningsartiklar liksom relevanta företagsdokument inom *funktionssäkerhet, driftövervakning och styrning* samt *flexibla och robusta konstruktioner*. Den empiriska studien utgörs av en fallstudie vilken baseras på en utforskande iterativ produktutvecklingsprocess vilken efter utvärdering av en patenterad lösning undersökt sex alternativa lösningar med hänsyn till upprättade kravspecifikationer. Empiriska data har primärt samlats in genom Computer-Aided Design (CAD), empiriska testobservationer av 3D-printade funktionsprototyper liksom en CNC-framtagen (Computer Numerical Control) funktionsprototyp samt utförande av feleffektsanalyser (FMEA). Samtliga delresultat har verifierats genom diskussioner med berörda aktörer på fallföretaget.

Resultatet av studien har påvisat en fungerande funktion vilken integrerat i fallföretagets generella produktarkitektur ses, med applicerad fjäderkraft, möjliggöra ett utökat avstånd på 1,5 mm mellan rotor och stator vid låsta lager. Given avståndsförändring antas, med en induktiv mätteknik, åstadkomma avvikande elektromagnetiska värden vilka kan registreras av sammankopplad programvara. Funktionell prestanda ses dock vara beroende av yttre omständigheter varpå en korrekt installation och användning förutsetts. En analys av teoretisk och empirisk studie har påvisat sju faktorer vilka ses inverka på funktionssäkerheten: 1) produktarkitektur; 2) produktstruktur; 3) riskutvärdering; 4) material- & geometrikrav; 5) underhåll & redundans; 6) produktvariabilitet; 7) fjädertillämpning. En väsentlig slutsats som påvisats under studien är att mekaniska fjädrar generellt ses inkompatibla med funktionssäkra konstruktioner i och med risk för utmattningsfel. Således rekommenderas att vidare studier undersöker huruvida en lösning utan en fjäderkraft ses möjlig.

Nyckelord: **Pulsgivare;** **Mekanisk konstruktion;** **Driftsäkerhet;** **Funktionssäkerhet;** **Tillståndsövervakning;** **Feleffektsanalys;** **Underhåll;** **Produktutveckling.**

Förord

Följande uppsats avslutar fem års studier på civilingenjörsprogrammet i produktion och produktdesign, med inriktning produktdesign, på Mälardalens Universitet (MDU). Arbetet har utförts i samarbete med Leine & Linde och har givit mig värdefulla insikter och lärdomar. Framförallt värdesätter jag att fått möjligheten att utforska ett verkligt problem och dess utmaningar. Det har givit mig förståelse för min besuttna kompetens liksom betydande kunskap för ett framtidslämpligt arbetsliv.

Inledningsvis vill jag tacka Anders Åkerberg för att ha givit mig möjligheten att avlägga denna uppsats i samarbete med Leine & Linde. Samarbetet har givit ömsesidigt utbyte där företaget med stor mån anpassat sig efter avhandlingens ramar. Jag vill även tillägna ett stort tack till Richard Arnstein som med stort engagemang och välvilja stöttat mig under utvecklingsprocessen liksom med sin erfarenhet och kunskap bidragit med ansenliga insikter och infallsvinklar. Ett särskilt tack till Richard för att ha möjliggjort för frikostig prototyp tillverkning. Ett tack tillägnas även till övriga medarbetare som delgett betydande information, vilket bidragit till fortskridning av studien. Dessutom tillägnas ett tack till hela utvecklingsavdelningen för att ha bidragit till en mycket trivsam arbetsmiljö där pauser gladeligen ägnats åt intressanta och lärorika diskussioner.

Slutligen vill jag tacka Kristian Sandström, handledare från MDU, för att ha bistått med akademisk rådgivning liksom intressanta synpunkter vilka bidragit till uppsatsens innehåll och struktur. Jag vill även ta tillfället i akt att uttrycka tacksamhet till övriga lärare som givit mig framstående kunskap genom åren liksom kurskamrater och vänner som gjort min studietid på MDU minnesvärd. Ingen nämnd, ingen glömd!



Kim Bojnell

Eskilstuna, Maj 2023

Innehåll

1 Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.2 Problemformulering	3
1.3 Syfte och mål	3
1.4 Relaterad forskning.....	4
1.4.1 Antagande sats	5
1.5 Direktiv och avgränsningar.....	5
1.6 Avhandlingens struktur	6
2 Ansats och metod.....	7
2.1 Forskningsprocessen	7
2.1.1 Teoretisk studie	9
2.1.2 Empirisk studie	11
2.2 Forskningskvalitet	20
2.2.1 Validitet.....	20
2.2.2 Reliabilitet	21
3 Teoretisk studie	22
3.1 Funktionssäkerhet.....	22
3.1.1 Tillståndsbaserat underhåll.....	25
3.2 Princip för ett styrsystem	26
3.3 Driftövervakning och styrning	27
3.3.1 Pulsgivarens funktion och yttre krafter.....	27
3.3.2 Olika typer av pulsgivare	31
3.3.3 Principer för mätteknik	33
3.4 Flexibla fjäderbelastade konstruktioner.....	36
3.5 Robusta konstruktioner	38
3.6 Funktionssäkerhet korrelerat givarkonstruktion	41
4 Empirisk studie	44
4.1 Definiering.....	44
4.2 Konceptutveckling	48
4.2.1 Iteration noll: Utvärdering av grundkoncept	48
4.2.2 Iteration ett: Framtagning av koncept A	51

4.2.3 Iteration två: Framtagning av koncept B	52
4.2.4 Iteration tre: Framtagning av koncept C	54
4.2.5 Iteration fyra: Framtagning av koncept D	55
4.2.6 Iteration fem: Framtagning av koncept E	56
4.2.7 Iteration sex: Framtagning av koncept F	57
4.3 Konceptsållning	60
4.3.1 Konceptval	62
4.4 Vidareutveckling	64
4.5 Detaljutveckling	66
4.5.1 Materialval	69
4.5.2 Dimensionering av fjäderkraft	71
4.6 Konceptutvärdering	72
4.6.1 Reell utvärdering av funktionalitet	72
4.6.2 Teoretisk utvärdering av tolerans mot yttre krafter	75
5 Resultat	79
5.1 Presentation av slutkoncept	79
5.2 Målvärden	81
6 Analys	83
6.1 Återkoppling till forskningsfrågor	83
6.2 Analys av framtagen konstruktion	87
6.3 Analys av tillämpad utvecklingsprocess	89
6.4 Avstämning av syfte och mål	90
7 Slutsats och diskussion	91
7.1 Studiens forskningsbidrag	91
7.2 Förslag till framtida forskning	92
7.3 Rekommendationer till företaget	94
Referenser	95
Appendix	

Figurer

Figur 1: Huvudkontor för Leine & Linde beläget i Strängnäs, Sverige. Källa: Leine & Linde, 2021a.	2
Figur 2: Illustration av tillämpad forskningsprocess. Inspirerad av Bhattacherjee (2012).	8
Figur 3: Illustration av forskningsprocessens huvudaktiviteter vilka utförs iterativt. Inspirerad av Säfsten et al. (2020).	8
Figur 4: Visualisering av tillämpad utvecklingsprocess. (Lewick et al., 2020; Ulrich & Eppinger, 2014; Kalapkian & Schimd, 2008))	12
Figur 5: Illustration av processen för FDM-baserad respektive SLS-baserad 3D-printningsteknik. Inspirerad av Kudelski et al. (2017).	16
Figur 6: Illustration av processen för CNC-bearbetning. Inspirerad av Thompson (2007).	18
Figur 7: Visualisering av ett traditionellt styrsystem. Inspirerad av Leine & Linde (u.å.).	26
Figur 8: Applikation av pulsgivare vid automatiserad materialhantering. Inspirerad av Bexar (2016).	28
Figur 9: Visualisering av glidning mellan två ytor på vilken (a) illustrerar tillståndet före slitage och (b) efter slitage. Inspirerad av Kalapkian & Schmid (2008).	30
Figur 10: Visualisering av en inkrementell kodskiva för en roterande pulsgivare. Källa: Leine & Linde (2017).	31
Figur 11: Illustration av fyrkantsvågor inklusive beteckningar. Inspirerad av Leine & Linde (2017).	32
Figur 12: Visualisering av en absolut kodskiva för en roterande pulsgivare. Källa: Leine & Linde (2017).	32
Figur 13: Illustration av en optisk pulsgivare. Visualiserad produktarkitektur är baserad på Leine & Lindes befintliga produktutbud.	33
Figur 14: Visualisering av fotoelektrisk skanningsprincip. Inspirerad av Leine & Linde (2017).	34
Figur 15: Illustration av en permanentmagnetisk pulsgivare. Visualiserad produktarkitektur är baserad på Leine & Lindes befintliga produktutbud.	35
Figur 16: Illustration av en induktiv pulsgivare. Visualiserad produktarkitektur är baserad på Leine & Lindes befintliga produktutbud.	35
Figur 17: Illustration av komponenter liksom mekanisk funktion hos en fjädrande tryckskruv (eng. spring plunger).	37
Figur 18: Visualisering av en konventionell spiralfjäder (vänster) och en vågfjäder (höger) i förhållande till varandra.	37
Figur 19: Illustration av dimensionell tolerans. Inspirerad av Kalapkian & Schmid (2008)	39
Figur 20: Illustration av produktutformning vilken underlättar positionering vid montering. Inspirerad av Kalapkian & Schmid (2008)	40
Figur 21: Visualisering av konceptuell lösning, vars syfte är att detektera låsta lager i roterande induktiva pulsgivare, patenterad av Mats Gustafsson för Leine & Linde.	45
Figur 22: Illustration av huruvida förväntad rörelse sker i endera axelkopplingen (vänster) eller av den egentliga givaren (höger).	47
Figur 23: Illustration av axiella och radiella krafter vilka påverkar pulsgivaren då den utsätts för ett vridmoment.	47
Figur 24: Presentation av grundkonceptet vilken visualiseras med renderade CAD-bilder och fysisk prototyp.	49
Figur 25: Visualisering av utformad dal, inklusive stigvinkel, vilken ämnas positionera respektive stift.	49
Figur 26: Friläggning av ett stift vilken ämnas befina sig mitt på det lutande planet.	50
Figur 27: Visualisering av tre 3D-printade (FDM) lagerhus med en vinkel på 25°, 30° respektive 35°.	51

Figur 28: Visualisering av koncept A inklusive 3D-printad prototyp.....	51
Figur 29: Visualisering av sinusfunktionen $f(x)=0,75 \cdot \sin(3t)$	
i både tvådimensionellt och tredimensionellt utförande.....	52
Figur 30: Visualisering av koncept B inklusive exploderad vy, genomskärning och närbilder.....	52
Figur 31: Presentation av 3D-printad (SLS) version av koncept B där läge 1 och 2 visualiseras huruvida konceptet medför en translationsriktning vilken ses vara felriktad.....	53
Figur 32: Visualisering av modifierad version av koncept B inklusive närbild, genomskärning, exploderad vy och fysisk prototyp (FDM).	53
Figur 33: Visualisering av koncept C inklusive exploderad vy, genomskärning och närbild.	54
Figur 34: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept C.	55
Figur 35: Visualisering av koncept D inklusive närbilder, genomskärning och exploderad vy.....	55
Figur 36: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept D.	56
Figur 37: Visualisering av koncept E inklusive närbild, genomskärning och exploderad vy.....	56
Figur 38: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept E.....	57
Figur 39: Visualisering av koncept F inklusive närbilder, genomskärning och exploderad vy.....	58
Figur 40: Illustration av läge 1 och 2 inklusive friläggning.	58
Figur 41: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept F.	59
Figur 42: Visualisering av koncept F vilken har vidareutvecklats.	65
Figur 43: Modifiering av vidareutvecklat koncept.....	66
Figur 44: Detaljutveckling av valt koncept.	67
Figur 45: Illustration av en kvadratisk utformning på stiftet vilken ses, från vänster till höger, förflyttas ned i en välvning.	67
Figur 46: Illustration av en avrundad sinusutformning på stiftet vilken ses, från vänster till höger, förflyttas ned i en välvning.	67
Figur 47: Presentation av en 3D-printad (SLS) prototyp vilken ämnas bekräfta en fungerande funktion hos detaljutvecklat koncept.....	68
Figur 48: Presentation av modifierat givarhus (övre och undre del).	69
Figur 49: Materialegenskapen värmceledningsförmåga jämförs mot hårdhet.	69
Figur 50: Materialegenskapen densitet jämförs mot hårdhet.	70
Figur 51: Materialets pris jämförs mot materialegenskapen hårdhet.	70
Figur 52: Friläggning av slutkoncept.....	71
Figur 53: Visualisering av förberedd testmodell.	73
Figur 54: Visualisering av stiftmodifikation.	73
Figur 55: Presentation av tillverkad prototyp i aluminium (EN AW-6026 T6).....	74
Figur 56: Illustration av korrigering.	74
Figur 57: Illustration av huruvida vibration, i axiellt led, inverkar på en axelgivare respektive hålaxelgivare.	76
Figur 58: Illustration av huruvida vibration, i radiellt led, inverkar på en axelgivare respektive hålaxelgivare.	77
Figur 59: Illustration av huruvida axiell last motsätts av en fjäderkraft.	77
Figur 60: Illustration av huruvida radiell last relateras till vridmomentet.....	78
Figur 61: Exploderad vy av slutkoncept där undre givarhus, packning, lagerhus, vågbricka, övre givarhus, axel och lagerpaket, rotor, stator och kåpa ses från vänster till höger.....	79
Figur 62: Presentation av en renderad bild (vänster) samt visualisering av prototyp i exploderad vy (höger).....	80
Figur 63: Visualisering av den avståndsförändring som erhålls av slutkonceptet.....	80
Figur 64: Presentation av de sju aspekter vilka ses relevanta att beakta vid utformning av funktionssäkra konstruktioner.....	85
Figur 65: Visualisering av en styrande instruerande utformning.	93

Tabeller

Tabell 1: Presentation av ytterligare avgränsningar.....	5
Tabell 2: Jämförelse mellan olika utvecklingsprocesser. (Lewrick et al., 2020; Ulrich & Eppinger, 2014; Kalpakjian & Schmid, 2008)	12
Tabell 3: Sammanställning av ett urval av säkerhetsprinciperna vilka beaktas i EN ISO 13849-2:2012.	23
Tabell 4: Fördelar med ett traditionellt styrsystem (inklusive pulsgivare). Källa: Leine & Linde (u.å).....	27
Tabell 5: Utförlig beskrivning av orsaker till lagerhaverier. Källa: SKF (2020) varav bilder är inspirerade.	29
Tabell 6: Sammanställning av vanliga övervakningstekniker för maskiner med induktivt drivsystem. Källa: (Bhavsar & Patel, 2013).....	43
Tabell 7: Sammanställning av upprättad uppdragsbeskrivning.....	45
Tabell 8: Sammanställning av definierade kravspecifikationer.....	46
Tabell 9: Presentation av Pughs konceptvalsmatris vilken utvärderar respektive koncept utifrån ett antal kriterier.....	60
Tabell 10: Sammanställning av utförd FMEA för koncept D.....	62
Tabell 11: Sammanställning av utförd FMEA för koncept F.....	62
Tabell 12: Presentation av utvärderade värden vilka relateras till tidigare definierade målvärden.....	81

Förkortningar

ABS	Acrylonitrile	ISO	International Standards Organization
AM	Amplitudmodelering	MDU	Mälardalens Universitet
AT	Additiv Tillverkning	NC	Numerical Control
CAD	Computer Aided Design	PA12	Polyamid
CNC	Computer Numerical Control	PFD	Probability of Failure on Demand
3D	Tredimensionell	PLA	Polyactide
DFA	Design For Assembly	ppr	Pulser per varv
DFM	Design For Manufacturing	PS	Polystyren
DFMA	Design For Manufacturing Assembly	R&D	Research & Development
FDM	Fused Deposition Modeling	rpm	Revolutions per minute
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis	SIS	Svenska Institutet för Standarder
FSI	Functional Safety Integrated	SLS	Selective Laser Sintering
FTA	Fault Tree Analysis	STEP	Standard for The Exchange of Product data
IDT	Akademin för Innovation, Design och Teknik	STL	Stereo Lithography
IEC	International Electrotechnical Commission	SW	SolidWorks

1

Introduktion

Detta kapitel introducerar läsaren till forskningsområdet och ger en kort bakgrund till fallföretaget. Vidare presenteras problemet som studien behandlar där två forskningsfrågor formuleras. Kapitlet presenterar också studiens syfte och mål för att vidare presentera de direktiv och avgränsningar som gäller för studien. Avslutningsvis presenteras en sektion vilken beskriver avhandlingens struktur.

1.1 Bakgrund

I tusentals år har människan skapat saker. Till en början tillverkades produkter för hand baserat på egen önskemål. Med tiden har mer komplexa tekniker utvecklats för att hjälpa människor att skapa mer avancerade produkter vilka tillfredsställer våra behov. Efter industriella revolutionen kom mekanik och elektrisk energi att börja användas mer frekvent vilket resulterade i effektivare tillverkningsprocesser. Vidare kom handbearbetade verk att ersättas med massproducerade produkter. Från slutet av 1900-talet till idag har automation dominaterat den industriella domänen. Genom att koppla upp industriella applikationer till reläer, tryckknappar och mekaniska positionssensorer kan enkla logiska rörelsesekvenser genereras vilka kan styra motorer och ställdon utan mänsklig tillställning. Med tillkomsten av datorer och tillståndsenheter har dessa kontrollsysteem blivit mindre, mer flexibla och billigare att implementera och modifiera. Däremot kräver automatiserade system välutvecklade underhållstekniker för att säkerställa funktion då plötsliga produktionsstop, på grund av systemfel, direkt resulterar i förlorad produktion och därmed förlorade intäkter. (Lamb, 2013)

Att skapa automatiserade processer kräver data från sensorer och kontrollsysteem liksom pulsgivare, vilka tillhandahåller tillförlitliga data om komponenter, processer och maskiner i produktionsflödet (Lamb, 2013). Särskilt pulsgivare är användningsbara för noggrann och säker positionsbestämning genom att den mäter varvtal, hastighet och acceleration hos ett maskineri. Vidare skickas insamlade data från pulsgivare till maskinens kontrollsysteem via ett visst kommunikationsgränsnitt för att ge en sammanställning av vinklar, positioner och längder (SICK AG, 2023). Det finns två typer av pulsgivare vilka mäter, antingen roterande eller linjära, rörelser utifrån olika mättekniker med varierande upplösning: 1) inkrementella pulsgivare; 2) absoluta pulsgivare. De vanligaste mätteknikerna för pulsgivare behandlar endera optik eller magnetism där val av mätteknik baseras på huruvilda kraven för noggrannhet och robusthet, prioriteras (SICK AG, 2023). Magnetisk mätteknik ses förekomma i två varianter där tekniken endera baseras på permanetmagneter eller elektromagnetisk induktion (Leine & Linde, 2017).

En komponent som har stor betydelse för roterande pulsgivares funktion, oavsett givartyp och mätteknik, är kullager. Enligt SKF Group (2018) är kullager kostnadseffektiva, utbytbara och standardiserade maskinelement som stödjer och styr roterande maskinkomponenter, så som axlar och hjul. Genom att kullager medför hög precision och låg friktion möjliggörs höga rotationshastigheter samtidigt som buller, värme, energiförbrukning och slitage av maskineriet reduceras (SKF Group, 2018). Kullager är således nödvändiga mekaniska komponenter för roterande maskinerier och förekommer i stor utsträckning i industriella applikationer så som elektriska maskiner och precisionsinstrument (Yu et al., 2018). Däremot utsätts industriella applikationer ständigt för olika miljöer och omständigheter, innefattande extrema omgivningstemperaturer, varierande belastningsförhållanden, hög fuktighet och överbelastning, som frekvent orsakar systemfel (Khan et al., 2022). Den omgivande miljön påverkar livslängden hos kullagren, vilken vidare påverkar livslängden hos det övriga systemet (mekanisk utrustning) (Yu et al., 2018). Enligt Khan et al. (2022) anses kullagerfel därför vara den främsta orsaken till att systemfel uppstår. Khan et al. (2022) menar att 30 – 40 % av felet i roterande elektriska maskiner beror av kullagerfel. Yu et al. (2018) talar även om att slitagebrott i regel uppstår före utmattningsbrott, vid drift av lager. Vidare förklarar Yu et al. (2018) att slitage ofta beror på bristfällig smörjning vilket resulterar i progressiv skada på lagerkomponenterna. Det vill säga att effektiviteten hos smörjningsmedlet minskar med tiden, vilket leder till ett ökat friktionsmoment i lagren vilka så småningom förlorar rotationsförmågan och låses (Yu et al., 2018).



Figur 1: Huvudkontor för Leine & Linde beläget i Strängnäs, Sverige. Källa: Leine & Linde, 2021a.

Leine & Linde, ett dotterbolag till Heidenhain-gruppen, är en ledande tillverkare av puls- och positionsgivare för industriell automation. Företaget grundades 1967 och är belägna i Strängnäs, Sverige, där merparten av denna studie genomförs, se figur 1. Utöver huvudkontoret i Strängnäs är företaget globalt närvarande på samtliga kontinenter och arbetar, genom lokala kontor, i nära samarbete med kunder (Leine & Linde, 2021a). Företagets produkter är kända för sin robusthet, prestanda och pålitlighet vilka ofta blir det självklara valet inom tung industri och krävande miljöer (Leine & Linde, u.å.-a). Pålitlighet är av stor betydelse för företaget då ett oplanerat driftstopp orsakad av en defekt pulsgivare kan leda till allvarliga konsekvenser. Av denna anledning utvecklar Leine & Linde idag en särskild givarserie, "Functional Safety Integrated" (FSI), vilken ämnas reducera antalet risker för givarhaverier som kan orsaka personskada och/eller oväntade driftstopp i produktionen (Leine & Linde, u.å.-b). Idag bedöms pulsgivarens livstid, delvis, på kullagrets livstid varpå Leine & Lindes pulsgivare i dagsläget har en drifttid på ca 50 000 timmar vid ett varvtal på 1500 rpm (Leine & Linde, 2017). För att säkerställa givarens funktionalitet har Leine & Linde utvecklat och patenterat en konceptuell lösning för en roterande induktiv pulsgivare där målsättningen är att identifiera förlorad rotationsförmåga hos lagren.

1.2 Problemformulering

I takt med industriautomationens framväxt ställs allt högre krav på pulsgivare som används inom funktionssäkra industriella applikationer i krävande miljöer. I roterande pulsgivare är det främst kullagren som begränsar givarens livslängd vilka bestämmer det underhåll eller de bytesintervall som erfordras. Genom att utveckla en inbyggd mekanisk lösning, som syftar till att identifiera fel i pulsgivarens mest kritiska komponent, kan farliga fel förebyggas då givaren är sammankopplad med fabrikens/maskinens övervakningssystem. Med en sådan lösning ses pulsgivare kunna bidra med förbättrad funktionssäkerhet i och med tre tillkomna fördelar: 1) stabil och säker installation; 2) hög prestanda, pålitlighet och robusthet; 3) enkel installation och integration med säkerhetssystemet (Leine & Linde, 2021b). Pulsgivare med hög hållbarhet och tillförlitlighet ses därför lämpliga som komponenter i ett funktionssäkert styrsystem där säkerhet betyder att maskiner utför önskad funktion liksom uppnår kraven för personsäkerhet och riskreduktion. Däremot handlar säkerhet även om att identifiera fel i konstruktionen för att på så sätt kunna undvika onödiga driftstopp. Med förbättrad funktionssäkerhet hos pulsgivarna ges med andra ord en hög prestanda liksom en hög drifttillgänglighet (Leine & Linde, 2021b). Tillståndsövervakning av kullager ses därför vara en förutsättning för tillståndsbaserat underhåll, vilket reducerar riskerna att pulsgivaren förorsakar kritiska avbrott. Utifrån detta har två forskningsfrågor formulerats:

F1 Hur kan en mekanisk lösning konstrueras för att möjliggöra detektering av låsta lager hos en roterande induktiv pulsgivare och därmed öka funktionssäkerheten för ett styrsystem?

F2 Vilka aspekter bör beaktas vid konstruktion av industriella roterande pulsgivare med induktiv mätteknik på vilken funktionssäkerheten ses öka?

1.3 Syfte och mål

Denna studie syftar till att utvärdera, vidareutveckla och realisera ett koncept som Leine & Linde patenterat. Den grundläggande idén med konceptet är att mekaniskt skapa ett avstånd mellan givarens rotor och stator då lagren låses. Rotorns huvudfunktion är att mäta axelns positionsförändring på vilken statorns uppgift är att registrera och kommunicera mädata genom en sammankopplad mjukvara. När lagren låses på vilken tillåten momentlast överskrids ämnas således ett ökat avstånd registreras och kommuniceras. Detta för att skapa en konstruktion som med hjälp av fallföretagets existerande skanningsteknik ska detektera förlorad rotationsförmåga hos konstruktionens lagerkomponenter. På så sätt fås en insikt om när lagren behöver bytas. Målsättningen med konstruktionen är därför att öka tillgängligheten och tillförlitligheten hos ett styrsystem. För att mäta hur väl studien uppnår sitt syfte har två mål formulerats:

M1 Konstruera och framställa en fysisk modell av en mekanisk lösning som syftar till att identifiera och påvisa systemfel hos en pulsgivare genom att skapa axiellt avstånd, på 1-1,5 mm, mellan rotor och stator vid ett överstiget friktionsmoment (5 Nm) på kullager.

M2 Identifiera och utföra testmetoder för att utvärdera konceptets funktionalitet och därmed bidrag till systemets ökade funktionssäkerhet. Således ämnas dess prestanda i en kritisk miljö utvärderas för att bedöma dess duglighet då egenvängning, vibrationer (300 m/s^2) samt konceptets förmåga att motstå axiell (100 N) respektive radiell (125 N) last beaktas.

1.4 Relaterad forskning

Enligt Schlicksbier (2009) blir säkerhet en allt viktigare aspekt att beakta vid maskinkonstruktion. Detta har blivit uppenbart i lagstiftning och skärpta säkerhetskrav i nationella och internationella standarder utformade för att skydda mänskor, materiella tillgångar och miljön. Målet med funktionssäkerhet ses vara att minimera, helst eliminera, riskerna som kan uppstå under drift av maskiner där system för säker positionsmätning är en förutsättning (Schlicksbier, 2009). Enligt Ding et al. (2022) är prognostiska tillståndskontroller en framväxande disciplin som stöder implementeringen av förebyggande underhåll för komplexa produktionssystem. Ding et al. (2022) menar att ett effektivt underhållssystem förväntas upptäcka och isolera begynnande fel hos komponenter eller delsystem tidigt. Kullager, som en av de viktigaste stödkomponenterna i roterande maskinerier, har direkt påverkan på maskinens tillförlitlighet. I miljöer som innefattar hög temperatur, hastighet och belastning ses maskin- och kullagerfel vanligen förekomma (Ding et al., 2022). Således har feldetektering av kullager en betydande roll i underhållsarbetet varpå det finns två typer av feldetekteringssystem: 1) Signal-analysbaserad; 2) Maskininlärningsbaserad (Ding et al., 2022). Signal-analysbaserad är en väletablerad metod som genom analys av vibrationssignaler ger feldiagnostisk information på ett effektivt sätt (Kumar et al., 2020).

Tidigare studier fokuserar däremot mer på automatiserade programmerbara diagnostiseringssystem där tillståndsklassificering sker genom maskininlärningsbaserade tillvägagångssätt inklusive artificiella intelligentsystem. Maskininlärning har under de senaste åren blivit det självklara valet för tillståndsövervakning av produktionssystem i och med dess framgångsrika resultat (Sun et al., 2021). Enligt Sun et al. (2021) etablerar maskininlärning en neural modell, genom att simulera den mänskliga hjärnan, vilken har en självlärande förmåga att upptäcka samband vid bearbetning av massiva mängder data. Aljemely et al. (2021) lät olika typer av kullager överbelastas för att maskininlärningsprogrammet skulle få lära sig känna igen olika lagerfel. Sådana studier bidrar till en bättre diagnostisk funktion hos sensorer. Generellt fokuserar således tidigare studier i huvudsak på analys och diagnostisering av sensorfel hellre än analys och implementering av mekaniska lösningar för att uppnå en ökad funktionssäkerhet.

Amin et al. (2021), liksom många andra, undersöker hur lagerfel inom produktionssystem kan detekteras med hjälp av intelligenta underhållssystem. Ett system som använder maskininlärning för att analysera data som samlats in genom puls- och positionsgivare. Exempelvis har SKF (2013) lanserat en intelligent lagerteknik vilken är en trådlös teknik som integreras i lagren, vilket möjliggör för att lagren kontinuerligt ska kunna kommunicera drifttillstånd med hjälp av internt drivna sensorer och elektronik. En sådan sensorteknik möjliggör mätning av kritiska parametrar så som temperatur, vibrationer, hastighet, varvtal och belastning (SKF, 2013). Däremot är det få studier som undersöker de fall då ett lagerfel sker i själva givaren liksom alternativa mekaniska lösningar i hårdvarustrukturen för att detektera lagerfel utan extra sensorer (Amin et al., 2021).

Å andra sidan har Chen et al. (2022) i samband med framtagning av en hårdvarustruktur för ett säkerhetsrelaterat system påvisat att tillförlitligheten för en positionsgivare kan förbättras genom att etablera en redundant sensorstruktur. En struktur där ytterligare en eller flera sensorer adderas. Dock, behöver fördelen med redundans vägas mot den kostnad och det installationsutrymme som ökas (Chen et al., 2022). Bourogaoui et al. (2016) uppmärksammar även en viktig faktor som bör beaktas vid konstruktion av givare, vilken berör excentricitet, som ett mekaniskt fel. Excentriciteten påverkar givarlagrens

funktionalitet och uppstår när rotorn i givaren monteras förskjuten från statorns mittlinje. Detta leder till att elektromagnetiska krafter från statorn belastar rotorn, där dessutom, ett luftutrymme bildas mellan rotorn och statorn vilket orsakar vibrationer (Bourogaoui et al., 2016).

1.4.1 Antagande sats

Sammanfattningsvis har tidigare studier visat att sensorstyrning är en förutsättning för ett effektivt underhållssystem. Däremot finns olika angreppssätt vilka ger olika nivåer av funktionssäkerhet för ett produktionssystem. Då tidigare studier ses fokusera på de programmerbara mjukvarusystemen ses brister i forskningen för mekanisk givarkonstruktion, varpå syftet är att säkerställa och/eller öka funktionssäkerheten. Även om en del betydande fysiska konstruktionsaspekter påvisas.

1.5 Direktiv och avgränsningar

Denna studie utgörs av en avhandling på masternivå vilken har utförts på direktiv av Mälardalens Universitet (MDU) inom akademien för Innovation, Design och Teknik (IDT). Studien utgörs sålunda av ett självständigt arbete på avancerad nivå, med vetenskaplig karaktär där adekvata produktutvecklingsmetoder nyttjas, vilken omfattas av 30 högskolepoäng (hp). Med andra ord motsvarar avhandlingen 20 veckors heltidsstudier varpå studien utförts mellan januari och juni 2023.

I studien ses fokus ligga på att vidareutveckla och påvisa en fungerande funktion för att förbättra funktionssäkerheten hellre än att optimera det redan framtagna konceptet. Således har studien avgränsats till att utveckla en konceptuell lösning som med hjälp av olika typer av prototyper testas och utvärderas. Dessutom avser studien enbart mekanisk konstruktion på vilken den elektroniska delen överläts till internavdelningen på fallföretaget. Insamling av empiriska data och nyttjande av identifierade verktyg och metoder genomförs baserat på möjlig tillgänglighet och låg kostnad. Ytterligare avgränsningar har sammanställts i tabell 1 nedan:

Tabell 1: Presentation av ytterligare avgränsningar.

Nr.	Kategori	Specifikation
1	Omfattning	<p>Beaktring av ett delsystem</p> <p>Anpassning efter fallföretagets 600-serie "Industrial"</p> <p>Vidareutveckling av patenterad lösning</p>
2	Koncepttestning	<p>Utvärdering av funktionalitet: Testning av funktionsprototyper i PLA, PA12 och aluminium (En AW-6026 T6) inklusive momentmätning.</p> <p>Utvärdering av hållfasthet: Utförande av mekaniska jämviktsberäkningar.</p>

1.6 Avhandlingens struktur

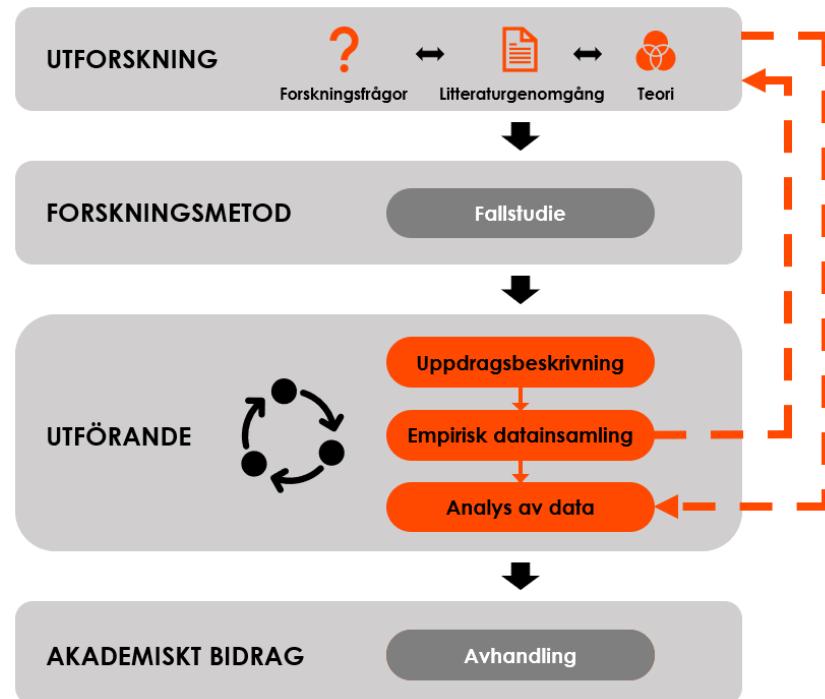
Rapporten inleds med kapitel två där studiens metodik beskrivs ingående på vilken ger läsaren förståelse över forskningsprocessen och använda produktutvecklingsverktyg. Vidare ges, i kapitel tre, en grundförståelse för funktionssäkerhet och relevanta standarder, och därtill även bakgrundsinformation om olika typer av pulsgivare och dess applikationsområden. Dessutom ges information om relevanta konstruktionsaspekter vilka involverar fjäderbelastade konstruktioner liksom designprinciper för utveckling av robusta konstruktioner. Slutligen avslutas kapitel tre med en sektion vilken presenterar mer ingående information om funktionssäkerhet korrelerat konstruktionsaspekter berörande utveckling av givare. Kapitel fyra redogör för den empiriska process som studien beaktat vilken syftar till framtagning och utvärdering av ett relevant koncept för en mekanisk lösning på vilken ämnas öka funktionssäkerheten hos en pulsgivare. Fortsättningsvis presenterar kapitel fem det slutliga resultatet som den empiriska processen lett fram till på vilken uppfyllda målvärden påvisas. Kapitel sex innefattar en analys av framtaget resultat där delvis forskningsfrågorna diskuteras och besvaras. Slutligen presenterar kapitel sju studiens slutsatser och forskningsbidrag liksom diskuterar förslag på framtida forskning.

2 Ansats och metod

Följande kapitel redogör för den forskningsmetod som studien präglats av där datainsamlings- och analysmetoder presenteras. Forskningsmetoden är uppdelad i en teoretisk och en empirisk studie som berör en litteraturgenomgång respektive empirisk undersökning. Kapitlet presenterar också de produktutvecklingsverktyg och metoder som nyttjats under studien. Avslutningsvis presenteras ett reflekterande avsnitt där studiens forskningskvalitet beaktas.

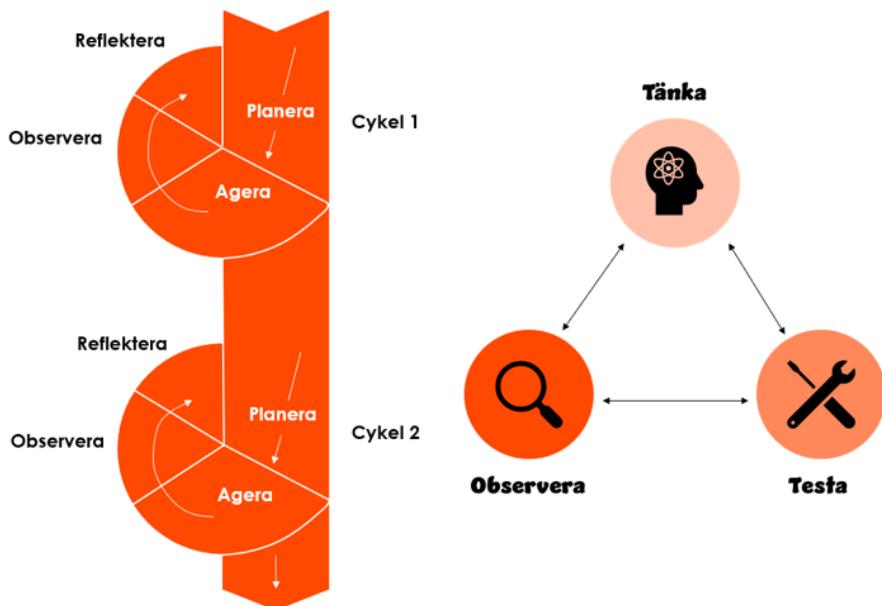
2.1 Forskningsprocessen

Studien har följt en generisk forskningsprocess av vetenskaplig kvalitativ karaktär vilken i grunden är en iterativ process bestående av tre faser: observation; rationalisering; och validering. Bhattacherjee (2012) beskriver observationsfasen som en fas där ett visst fenomen observeras, vilket kan innefatta evaluering av dokument. Rationaliseringfasen syftar till att ge förståelse för det observerade fenomenet genom att logiskt koppla samman olika delar för att på så sätt bilda en generaliseringbar teori. Slutligen testas skapad(e) teori(er) i valideringsfasen genom att använda vetenskapliga metoder, inklusive datainsamling och analys, vilken potentiellt modifierar eller kompletterar den begynnande teorin. Denna studie har följt en abduktiv forskningsprocess, vilket innebär att skribenten har utgått från ett deduktivt angreppssätt där teori utforskas och rationaliseras för att vidare valideras genom empiriska data (fallstudie). Ett abduktivt angreppssätt innebär att teori och empiri utforskas parallellt för att ge en större förståelse för både teoretiskt liksom empiriskt fenomen (Dubois & Gadde, 2002). Ett sådant angreppssätt är fördelaktigt då skribenten har svårt att få en fullständig förståelse för teori utan empiriska observationer. Dubois & Gadde (2002) menar att det finns två typer av data: passiv och aktiv data. Passiv data omfattar information som identifierats genom sökning, medan aktiv data identifieras genom möten och diskussioner vilka skulle riskeras att förbländas vid en eventuell sökning (Dubois & Gadde, 2002). Med andra ord har studien till en början utgått från utforskning av teori, vilken vidare har anpassats, kompletterats och fördjupats baserat på empiriska observationer. Figur 2, på s. 8, ger en schematisk illustration av forskningsprocessen där en rad aktiviteter skildras kategoriserade i två primära faser bestående av en teoretisk studie (utforskning) och en empirisk studie (utförande).



Figur 2: Illustration av tillämpad forskningsprocess. Inspirerad av Bhattacherjee (2012).

Förenklat kan processen beskrivas utifrån tre huvudsakliga delaktiviteter vilka illustreras i figur 3: 1) skapa en bild av problemet (observera); 2) analysera problemet och beakta potentiella lösningar (tänka); 3) studera huruvida lösningen fungerar (testa) (Säfsten et al., 2020). Delprocess 1) kan ses innehållas en litteraturgenomgång inom forskningsområdet, medan 2) och 3) kan ses korrelera med fallstudiens syfte. Enligt Säfsten et al. (2020) krävs ett systematiskt angreppssätt för att lösa ett problem vilken innefattar en iterativ process av praktiskt agerande i samband med kritiskt tänkande och reflekterande.



Figur 3: Illustration av forskningsprocessens huvudaktiviteter vilka utförs iterativt. Inspirerad av Säfsten et al. (2020).

2.1.1 Teoretisk studie

Den teoretiska studien syftar till att utforska forskningsområdet inklusive formulerade forskningsfrågor med målsättningen att, i första hand, kunna besvara F2; att identifiera faktorer som har betydelse för funktionssäkerheten hos konstruktionen. Denna delstudie baseras på en litteraturgenomgång där publicerad refereegranskad litteratur inom området evalueras. Genom att gå igenom befintlig litteratur, inklusive företagsdokument, böcker och vetenskapliga artiklar, fås ett tredelat budskap: 1) fördjupad förståelse för nuvarande kunskapsläge och teorier inom forskningsområdet; 2) identifikation av nyckelord, författare och artiklar inom området; 3) identifikation av kunskapsluckor inom området (Bhattacherjee, 2012). Således syftade litteraturgenomgången till att ge en bakgrundsförståelse för betydande begrepp, teorier och fokusområden för tidigare studier inom området, vilken hjälpte skribenten med den empiriska datainsamlingen liksom besvara forskningsfrågorna.

Litteraturgenomgång

Den process som utförts för tillämpad litteraturgenomgång baseras på de tio steg för en strukturerad litteraturgenomgång som presenteras av Säfsten et al. (2020): 1) specificera syfte med litteraturgenomgång; 2) identifiera lämpliga nyckelord; 3) formulera kriterier för inkludering och exkludering av litteratur; 4) välja sökvertyg och databaser; 5) formulera sökstrategi och genomföra sökningar; 6) översiktlig genomgång av identifierad litteratur; 7) fördjupad genomgång av identifierad litteratur; 8) extrahera data och summera; 9) analysera innehåll; 10) presentera resultatet.

Principiellt har litteraturgenomgången beaktat samtliga steg. Däremot har respektive steg bearbetats i enlighet med en kritisk tolkningsgranskning (eng. critical interpretive review), vilken är en icke-systematisk granskingsstrategi. Denna typ av granskning syftar till att utveckla ny kunskap genom att samla in och betona nyckelidéerna identifierade i existerande litteratur hellre än att noga gå igenom varje relevant artikel. Med ”nyckelidéer” menas de idéer som ses ha störst betydelse för givna forskningsfrågor (McDougall, 2015). En icke-systematisk granskingsstrategi är i grunden en flexibel och organisk process där aktiviteter, inklusive frågeformulering, sökning, urval, dataextraktion, analys och sammanställning, görs iterativt. Exempelvis inleds studien med att formulera en initial forskningsfråga vilken ses förfinas och specificeras utifrån sökresultaten. McDougall (2015) menar att kritisk tolkningsgranskning även granskar litteraturen ur ett helhetsperspektiv och inte enbart analyserar enskilda studier. Fördelen med en sådan typ av granskning är att befintlig litteratur kan studeras inom flera olika områden utan att all litteratur inom respektive område behöver granskas i detalj (McDougall, 2015).

Inledningsvis formulerades syftet med litteraturgenomgången, vilken kan beskrivas som utforskning av befintlig kunskap inom givarkonstruktion, sensorfunktion och nyttan med utökad funktionssäkerhet. Detta för att vidare ge en förståelse kring forskningsområdet och kunna kartlägga möjliga metoder som skulle kunna användas i utvecklingsarbetet av en mekanisk lösning för detektering av låsta lager. Genom att kombinera nyckelord baserat på studiens syfte, mål, och forskningsfrågor formulerades initiala sökord. Under processens gång har ytterligare relevanta sökord identifierats vilka inspirerats av redan påträffade artiklars innehåll och nyckelord. På nästkommande sida följer ett antal nyckelord vilka, i relevanta kombinationer tillsammans med motsvarande synonymer, har använts vid sökning av relevant litteratur där både svenska och engelska termer har behandlats.

Pulsgivare; Användning; Encoder; Application; Encoder function; Functional Safety; FMEA; FTA; Standards; Bearing Fault; Fault diagnosis; Rolling Bearing life-span; Tillståndsbaserat underhåll; Signal-analysis; Construction; Spring-system; Spring plunger; Torsion spring; Robust konstruktion; Hole structure; Mechanical engineering materials; DFA; DFM.

Identifiering av relevant litteratur har skett genom användning av ett flertal sökmotorer och databaser så som Google Scholar, ABI/Inform, Science Direct, Springer Link, IEEE Xplore och MDPI. Dessutom har universitetsbiblioteket nyttjats för uppsökning av relevant litteratur. Samtliga artiklar som använts är refereegranskade (eng. peer reviewed), vilket stärker källornas trovärdighet och därmed studiens validitet (Säfsten et al., 2020). De artiklar som identifierats genom Google Scholar har kontrollerats att dem är refereegranskade med hjälp av Ulrichsweb via MDU. Val av relevant litteratur har även baserats på publikationsår där två nivåer fastställdes: 1) önskvärd nivå; 2) godtagbar nivå. Den önskvärda nivån inkluderar artiklar som är publicerade efter år 2010, medan en godtagbar nivå även inkluderar artiklar som är publicerade runt och efter år 2000. Denna uppdelning gjordes då studien behandlar forskningsområden med varierande uppdateringsfrekvens. Studien undersöker både mekaniska konstruktionsaspekter, som beaktar kullager och konstruktionsfjädrar, liksom mer föränderliga områden som berör krav och standarder för maskinkonstruktion och funktionssäkerhet.

Examinering av artiklar har utförts utifrån två delar innefattande en översiktlig genomgång och en fördjupad genomgång. Under den översiktliga genomgången undersöktes abstract, titel och nyckelord i syfte att utvärdera huruvida sökresultaten sågs relevanta för studiens forskningsfrågor. Vartefter skribenten gavs ökad förståelse för ämnet och terminologin kunde mer specifika nyckelord formuleras. Dessutom ögnades referenslistan igenom på de mest relevanta artiklarna, i enlighet med snöbollstechniken (Säfsten et al., 2020), vilket syftade till att erhålla en bredare eller mer specifik kunskap inom området. Den mest framstående fördelen med metoden är att den på ett relativt enkelt sätt kan identifiera flera relevanta studier som annars skulle riskera att förbises (Wohlin, 2014). Under den andra delen fördjupades skribenten i artiklarna vilka lästes i sin helhet för att utvärdera huruvida dem borde inkluderas i studien eller inte (Säfsten et al., 2020). Således granskades artiklarna utifrån huruvida dess bidrag sågs relevant för aktuell studie. Under den fördjupade övergången noterades nyckelpunkter för varje artikel, berörande innehållet, vilka användes för att skapa en översikt över kvalificerade artiklar. Dessa noteringar gav en tydlig överblick över insamlade data vilka kunde användas för att strukturera och kategorisera teoriavsnittet. I kapitel tre (s. 22-43) presenteras en syntes av extraherade data vilken indirekt utgör en del av det slutgiltiga konceptet.

Analys

Insamlade data har vidare tolkats och analyserats tematiskt i syfte att dra slutsatser vilka bidrar till svar på forskningsfrågorna. Cruzes & Dybå (2011) beskriver tematisk analys som en kvalitativ analysmetod, vilken ses lämplig då insamlade data är av typen kvalitativ, som ämnas söka efter teman eller mönster. Processen för tematisk analys involverar två primära steg: 1) kodning av insamlade data; 2) kategorisering av koder i beskrivande och analytiska teman. Kodning och kategorisering genomförs för att underlätta förståelse och kunna skapa en översiktlig bild av insamlade data. Resultatet av en tematisk analys presenteras ofta med hjälp av illustrativa grafiska figurer vilka summerar de huvudsakliga teman som tagits fram (Cruzes & Dybå, 2011). För aktuell studie utgick analysen av insamlade data ifrån forskningsfrågorna med avsikt att säkerställa besvarandet. Den egentliga analysen genomfördes i samband med analysen av fallstudien i syfte att utpeka paralleller mellan teori och empiri.

2.1.2 Empirisk studie

Den empiriska studien utgjordes av en fallstudie där syftet var att validera och utveckla en redan patenterad lösning för en funktionssäker roterande pulsgivare. Fallstudier syftar till att ge en fördjupad kunskap för en viss situation eller ett fenomen. Enligt Säfsten et al. (2020) är fallstudiemetoden särskilt fördelaktig då mer eller mindre utforskade områden ämnas studeras då metoden i grunden är explorativ. Säfsten et al. (2020) påpekar också att metoden är särskilt lämplig för att besvara forskningsfrågor som ämnas söka svar på *varför-, hur- och vad*-frågor. Aktuell fallstudie baserades på en enfallsstudie då syftet med den empiriska studien var att undersöka ett fall på djupet; undersökning av huruvida en mekanisk lösning kan utvecklas för att möjliggöra tillståndsövervakning av kullager. Fallstudien utgjordes av en holistisk studie där enbart en analysenhet (vad som ämnas utforskas) studerades (Säfsten et al., 2020). Analysenheten är således tydligt kopplad till studiens syfte och forskningsfrågor, primärt F1, och baserades på testning av funktionen hos en mekanisk lösning.

Fallstudien har genomförts tillsammans med Leine & Linde som efterfrågat en vidareutvecklad och utvärderad lösning till den redan befintliga (patenterade) lösningen. Utvecklingen av den efterfrågade lösningen har genomförts utifrån en produktutvecklingsprocess som involverat praktiska moment så som konceptutveckling, prototypframtagning, testning och mekaniska jämviktsberäkningar. Skribenten gavs fullständig transparens med fallföretaget där företagets R&D (Research & Development) kontinuerligt rådfrågades. Eftersom de praktiska momenten utfördes i samråd med Leine & Linde anpassades konstruktionen till företagets 600-serie vid namn "Industrial" (Leine & Linde, 2017).

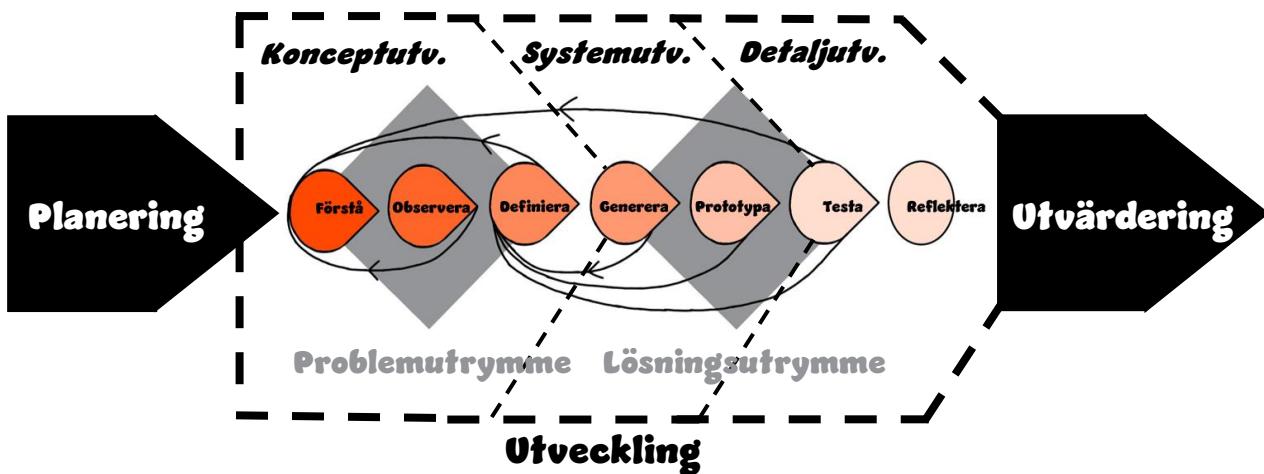
Produktutvecklingsprocessen

Studien har följt en anpassad produktutvecklingsprocess där processens faser anpassats efter fallstudien. Anpassad produktutvecklingsprocess har tagits fram genom att kombinera två olika processer som föreslås av Lewrick et al. (2020) respektive Ulrich & Eppinger (2014) vilka ses jämförbara med processen föreslagen av Kalapkjian & Schmid (2008). De föreslagna produktutvecklingsprocesserna, som presenteras i tabell 2 på s. 12, kan tillsyns ses innehålla många likheter i utformningen men ses lägga mer tyngd på olika aktiviteter. Processen föreslagen av Lewrick et al. (2020) ses vara en agil Design-Thinking-process, medan Ulrichs och Eppingers process är av en mer traditionell Stage-Gate-karaktär. Cooper (2016) beskriver traditionella Stage-Gate-modeller som "plandrivna," medan agila modeller beskrivs som "planera och utveckla allt eftersom." Den främsta skillnaden mellan den agila modellen och stage-gate-modellen ses vara deras olika angrepssätt där Stage-Gate utgörs av ett omfattande idé-till-lansering-system, vilket involverar en makroplaneringsprocess. Medan en agil modell utgörs av en trial-and-error-process där utvecklingsprocessen sker periodvis (iterationer) och involverar kontinuerlig prototyp tillverkning och testning. Agila modeller innehåller således en mikroplaneringsprocess där varje delresultat ses bedömas och diskuteras med kunden och/eller andra aktörer som ses kunna bidra med värdefull feedback för fortsatt utveckling. Kalapkjian & Schmid (2008) beskriver produktutvecklingsprocessen utifrån både ett agilt och ett stage-gate-perspektiv där processen utgår från tydligt formulerade specifikationer vilka baseras på marknadsbehov. Vidare itereras flera koncept fram där det mest lovande konceptet utvecklas på detaljnivå. Därefter utförs en pilotproduktion innan produkten tillverkas för försäljning. En hybridmodell ses därför fördelaktig för aktuell studie då studien ämnas kartlägga möjliga lösningar inom ett relativt utforskat område där de två olika angrepssätten ses komplettera varandra (Cooper, 2016; Ulrich & Eppinger, 2014; Kalapkjian & Schmid, 2008).

Tabell 2: Jämförelse mellan olika utvecklingsprocesser. (Lewrick et al., 2020; Ulrich & Eppinger, 2014; Kalapkian & Schmid, 2008)

Lewrick et al. (2020)	Ulrich & Eppinger (2014)	Kalapkian & Schmid (2008)
FAS1 Förstå	FAS0 Planering	FAS1 Utforska marknadsbehov
FAS2 Observera	FAS1 Konceptutveckling	FAS2 Specifikation
FAS3 Definiera	FAS2 Utveckling på systemnivå	FAS3 Konceptdesign
FAS4 Konceptgenerera	FAS3 Detaljutveckling	FAS4 Design på detaljnivå
FAS5 Prototypa	FAS4 Testning och vidareutveckling	FAS5 Tillverkning
FAS6 Testa	FAS5 Produktionsupptakt	FAS6 Försäljning
FAS7 Reflektera		

Cooper (2016) menar att agila processer och Stage-Gate-modeller med fördel kan kombineras till en hybridmodell; agila metoder kan enkelt integreras i den traditionella produktutvecklingsprocessen. Den framtagna produktutvecklingsprocessen för aktuell studie visualiseras i figur 4 och består av tre huvudsakliga faser som i grunden baseras på Ulrich och Eppingers process: planering; utveckling; och utvärdering av slutligt koncept. Medan den agila Design-Thinking-processen har integrerats i utvecklingsfaserna för att underlätta och effektivisera det dagliga utvecklingsarbetet.



Figur 4: Visualisering av tillämpad utvecklingsprocess. (Lewrick et al., 2020; Ulrich & Eppinger, 2014; Kalapkian & Schmid, 2008)

I enlighet med Cooper (2016) ses en sådan hybridmodell fördelaktig för denna studie då den möjliggör för en effektivare planering som uppdateras kontinuerligt, vilken baseras på tidig feedback från kunden (fallföretagets R&D). Given feedback har stor betydelse för uppfyllande av specificerade produktkrav som kunden ställt. Detta då långsiktiga planeringar ofta ignoreras. Dessutom ses en förbättrad kundfeedback fås då agila processer söker kontinuerlig feedback ansikte-mot-ansikte under hela utvecklingsprocessen hellre än genom skrivna dokument. Detta minskar risken för missförstånd samt ger en ökad motivation hos utvecklaren som ses få kontroll (Cooper, 2016). Sammanfattningsvis ses agila metoder ge Stage-Gate-modellen verktyg för mikroplanering liksom kontroll över dagligt arbete och rapportering. Följande presenteras huruvida de tre huvudsakliga faserna utförts.

Planering

Till att börja med planerades studien genom att formalisera en struktur för processen och upprätta en uppdragsbeskrivning (Ulrich & Eppinger, 2014). Således sågs målet med planeringsfasen att säkerställa att studiens huvudsakliga aktiviteter utfördes på ett tidseffektivt sätt. För att visualisera studiens aktiviteter inklusive avstämningar upprättades ett Gantt-schema. En stor del av planeringsfasen utgjordes av att ge skribenten en förståelse för pulsgivare som fenomen och vikten av funktionssäkra pulsgivare. Den upprättade uppdragsbeskrivningen sågs sammanfatta planeringsfasen i och med att ramarna för fallstudien tydliggjordes. Detta då uppdragsbeskrivningen ses presentera en övergripande produktbeskrivning, förde med förväntad lösning samt antaganden och begränsningar (Ulrich & Eppinger, 2014).

Utveckling

Utvecklingsprocessen inleddes med att en första iteration initierades där skribenten gavs förståelse för den patenterade lösningen genom att definiera dess huvudsakliga egenskaper. Således upprättades kravspecifikationer som konstruktionen behövde erhålla för att vara applicerbar i Leine & Lindes pulsgivare för krävande miljöer. Specifikationerna tilldelades marginella målvärden vilka viktades utefter dess betydelse i enlighet med vad Ulrich & Eppinger (2014) förespråkar. Vidare utvärderades lösningen med hjälp av Computer Aided Design (CAD) och 3D-printning med avsikt att demonstrera konceptet samt skapa övertygelse om konceptets funktionalitet. Kalapkjian & Schmid (2008) menar att produktutveckling bör involvera både materiella och immateriella prototyper vilka används vid utvärdering av olika koncept och dess egenskaper. I samråd med fallföretagets R&D diskuterades resultatet på vilken förbättringsförslag och nya idéer genererades fram. Med detta som bakgrund påbörjades en ytterligare iteration där en alternativ lösning utvecklades med hjälp av enkla skisser, CAD-modellering och 3D-printning. Framtagning av koncept har skett med interna förutsättningar som grund, men har även inspirerats från externt identifierade metoder vilka delvis syftar till att skapa flexibilitet hos konstruktionen. Detta ses påvisas i kapitel fyra (s. 44-78). På samma sätt påbörjades nya iterationer där ytterligare alternativa koncept, i inkorrekt skala, utvecklades med målsättningen att finna en relevant och fungerande funktion.

Utvecklingsarbetet har därmed innehållt en process där respektive koncept utvecklats och utvärderats i enskilda iterationer på vilken koncepttestning har skett kontinuerligt. Varje delresultat har vidare diskuterats med fallföretagets R&D för att på så vis bestämma nästa steg i processen på vilken nya iterationer påbörjas och avslutas. Kontinuerlig testning ses vara fördelaktigt vid utveckling av relativt outforskade områden då varje testresultat påvisar potentiella förbättringar vilka vidare beaktas vid fortsatt utveckling. Mintzberg et al. (2008) redogör för olika ledningsstrategier på vilken en kan beskrivas utifrån en lärande modell där strategier formuleras baserat på mönster från det förflutna. Genom att, som

utvecklingsledare, vara öppen och ständigt överväga olika möjligheter kan utvecklingsprocessen lättare anpassas till förändrade yttre omständigheter liksom nya insikter och lärdomar (Mintzberg et al., 2008). Utörd utvecklingsprocess har därför omfattat en evolutionär utvecklingsprocess med en mer organisk struktur där olika koncept tas fram löpande baserat på testresultaten, vilket kan liknas vid en flod som ändrar riktning då hinder ses förekomma i dess nuvarande väg. Gustavsson (2020) påvisar även betydelsen av en agil testdriven utvecklingsprocess där funktionalitet testas löpande och helst etappvis. Detta då varje förändring riskerar medföra att tidigare funktioner, vilka sågs fungera, inte fungerar längre (Gustavsson, 2020). Däremot kan ett agilt och organiskt arbetssätt till skillnad från ett mer strukturerat och systematiskt angreppssätt, där ett tiotal initiala koncept inledningsvis utforskas på skissnivå för att vidare sällas, vidareutvecklas och testas, ses mindre fördelaktigt då alternativa lösningar riskeras förbli oupptäckta. Å andra sidan kan en organisk struktur ses mer effektiv då kontinuerlig koncepttestning medför att konceptets funktionalitet och förbättringspotential påvisas tidigt i utvecklingsfasen. Dessutom tillåts skribenten, utvecklingsledaren, ges ökad kunskap i takt med utvecklingen av respektive iteration. För denna studie sågs detta fördelaktigt då skribenten inledningsvis hade begränsad kunskap inom området, vilket även ses relativt outforskat. Med andra ord ses ett mer systematiskt angreppsätt kräva en större förkunskap för att kunna identifiera flera lovande koncept i början av utvecklingsfasen.

Vidare tillämpades Pughs konceptvalsmatris vilken beskrivs av Ulrich & Eppinger (2014) och syftar till att ge en mer objektiv och övergripande utvärdering av koncepten. Genom användning av matrisen viktas designkriterier utifrån sin betydelse vilka ställs mot ett referenskoncept, vilket i detta fall ses vara den patenterade lösning som studien har som utgångspunkt. Dessutom genomfördes en mer noggrannare utvärdering av koncepten för att bedöma vilka koncept som sågs mest tillämpbara. Med hjälp av ”Failure Mode and Effects Analysis” (FMEA) kan rotorsakerna bakom ett koncepts exkludering analyseras och motiveras, vilken har använts för att ge en djupare förståelse för framtagna koncept.

Utvecklingsprocessen avslutades med att valt koncept vidareutvecklades liksom utvecklades på detaljnivå på vilken konceptet dimensionerades för att möjliggöra tillverkning liksom kompatibilitet med fallföretagets 600-serie. Inledningsvis identifierades och analyserades möjliga material med hjälp av materialdatabasen Granta EduPack vilka bedömdes relevanta utifrån fallföretagets förutsättningar. Vidare modellerades konceptet i CAD, i korrekt skala, vilken visualiseras i sin rätta kontext inklusive kullagerpaket, axel, rotor och stator. Detta för att kontrollera tillverknings- och monteringsaspekter i enlighet med Design For Manufacturing Assembly (DFMA). Därefter skapades en slutlig version av konceptet med hjälp av SLS-printning för att bekräfta dess potentiella kompatibilitet med befintligt produktutbud.

Utvärdering av slutligt koncept

Under den sista fasen utvärderades den slutgiltiga konceptuella lösningen för att påvisa dess potential. Utvärderingen utgjordes av två delar vilka beaktar teoretiska beräkningar liksom fysisk testning av en CNC-framtagen (Computer Numerical Control) prototyp i aluminium (EN AW-6026 T6). De teoretiska beräkningarna utfördes i syfte att påvisa storleken på ansatt fjäderkraft vilken ses relevant för att åstadkomma ett vridmoment på 5 Nm. Dessutom utfördes beräkningar för att påvisa konstruktionens förväntade egenfrekvens och förmåga att motstå vibrationer och laster vilka bestäms av förutbestämda kravspecifikationer. Den fysiska testningen utfördes i syfte att ge mer realistiska mätvärden vilka kunde jämföras mot utförda beräkningar. De fysiska testerna utgjordes av momenttester vilka utfördes med fallföretagets resurser.

Verktyg och metoder för produktutveckling

Utförd produktutvecklingsprocess har beaktat ett flertal verktyg och metoder som ses vanliga inom produktutveckling. Följande beskrivs dessa verktyg och metoder mer utförligt samt huruvida dem integrerats i denna studie.

Prototypverktyg

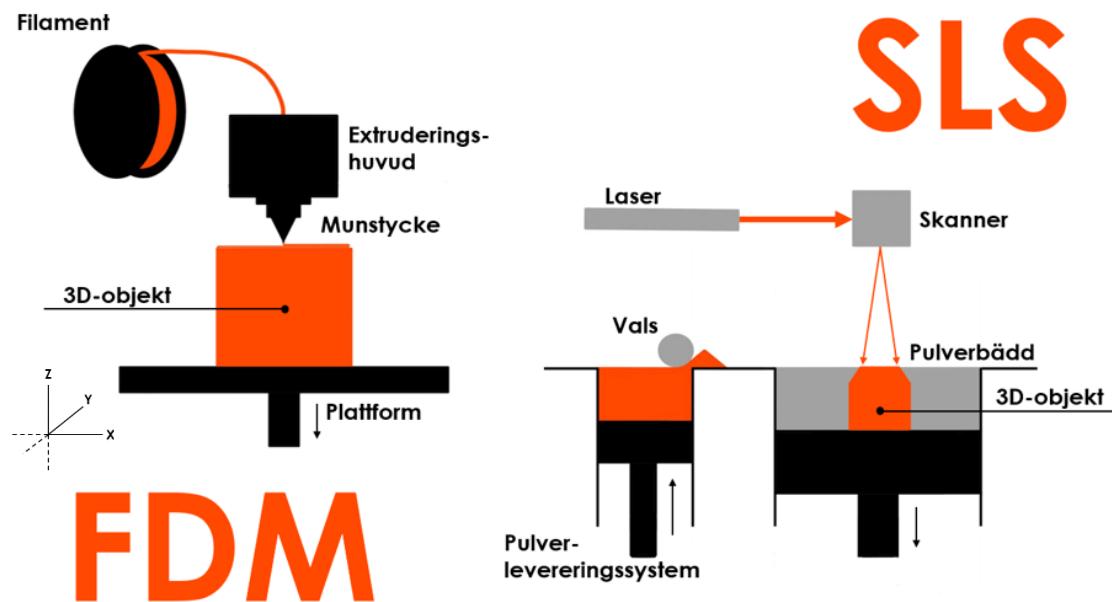
Att skapa en prototyp, vilken ses vara en approximativ fullskalig modell av den slutliga produkten, har traditionellt involverat flexibla tillverkningsprocesser så som manuella bearbetningsmetoder vilka delvis innehåller svarvning, borrhning, fräsning och sågning (Kalpakjian & Schmid, 2008; Ulrich & Eppinger, 2014). Användning av ett flertal olika verktyg och maskiner resulterar i att prototypen inte färdigställs förrän efter ett antal veckor eller månader. Idag framställs prototyper betydligt snabbare, bara efter några timmar, i och med att solida fysiska modeller kan tillverkas direkt från en tredimensionell CAD-ritning. Computer-Aided-Design (CAD) involverar användning av datorprogram, vilka möjliggör för utformning av geometriska modeller av produkter och komponenter, och associeras med interaktiv datorgrafik även kallat CAD-system (Kalpakjian & Schmid, 2008). Vid användning av ett CAD-system kan ett objekt grafiskt konceptualiseras och utvärderas på vilken designalternativ eller modifikationer av en särskild design utvecklas för att möta specifika designkrav (Kalpakjian & Schmid, 2008). Idag finns CAD-system vilka baseras på olika programvaror så som CATIA, CREO och SolidWorks (SW). För att underlättा samarbeten under utvecklingsprocessen har ett STEP-format (Standard for The Exchange of Product Data) utvecklats av organisationen för Internationella Standarder vilken syftar till att överföra geometrisk data mellan olika CAD-program (Kalpakjian & Schmid, 2008). Skribenten har under aktuell studie nyttjat SW vilken är ett CAD-program utvecklat av Dassault Systems. Programvaran erbjuder mjukvaruverktyg vilka tillåter modellering, sammanställning och simulering av geometriska objekt. SW gentemot andra CAD-program ses vara mycket användarvänlig i och med ett enkelt och tydligt visuellt gränssnitt (SolidWorks, 2023). För att underlättा samarbete mellan skribenten och fallföretaget, vilka är kunniga inom skilda CAD-system, har STEP-formatet beaktats vid delning av filer.

På samma sätt som STEP-formatet används för att överföra data mellan olika CAD-system kan modelldata översättas till ett STL-format (Stereo Lithography). Däremot används STL-formatet främst för att exportera geometrisk data vilken används för datorintegrerad prototyp tillverkning (Kalpakjian & Schmid, 2008). Prototyper klassificeras vanligtvis utifrån två dimensioner på vilken endera en fysisk eller en analytisk modell avses (Ulrich & Eppinger, 2014). Fysiska prototyper, utgörs av materiella produkter som efterliknar den slutliga produkten, vilka används för att snabbt testa en idé eller validera funktionaliteten hos produkten. Medan analytiska prototyper representerar produkten i ett icke-materiellt tillstånd: matematiskt eller visuellt (Ulrich & Eppinger, 2014). Aktuell studie har omfattat analytiska prototyper i form av beräkningar och renderingar av datorbaserade 3D-modeller på vilken intressanta aspekter utvärderats och analyserats. Studien har även involverat fysiska prototyper vilka tagits fram med hjälp av datordriven hård- och mjukvara utifrån två typer av tillverkningsmetoder: additiv tillverkning och subtraktiv tillverkning.

Additiv tillverkning

Additiv tillverkning (AT), även kallat 3D-printning, möjliggör för tillverkning av fysiska objekt med hjälp av en lager-för-lager-teknik. Idag är det en vanligt förekommande teknik inom industrier som berör konstruktion och produktutveckling då prototyper relativt enkelt, snabbt och billigt kan skapas. I kontrast till konventionella tillverkningsmetoder så som gjutning och subtraktiva tillverkningsmetoder medför AT reducerad miljöpåverkan, inget behov av gjutformar och reducerat materialspill. Dessutom möjliggörs tillverkning av relativt komplexa geometrier. (Kudelski et al., 2017; Kalpakjian & Schmid, 2008; Thompson, 2007)

Idag är den mest använda 3D-printningstekniken FDM-baserad (Fused Deposition Modeling) då det finns ett stort antal företag som tillverkar kostnadseffektiva 3D-skrivare (Kudelski et al., 2017). FDM skapar 3D-modeller genom att smälta och extrudera ett termoplastiskt filament, ofta polyacrylate (PLA) eller acrylonitrile (ABS), genom ett munstycke vilken förflyttas i x- och y-led över en plattform (Kudelski et al., 2017; Kluska et al., 2018; Kalpakjian & Schmid, 2008). Sålunda ritas ett tvärsnitt av objektet upp på plattformen vilket representerar ett lager. Det tunna lagret av plast svalnar och stelnar vilket direkt binder ihop lagret till redan utritade lager. Vartefter lagren ritats upp sänks plattformen 0,1-0,6 mm beroende på filamentbredden vilken styrs av munstycket (Kudelski et al., 2017). En annan 3D-printningsteknik baseras på ”Selective Laser Sintering” (SLS) vilken är en process som skapar 3D-modeller genom att ett lager av pulveriserat material, ofta av polyamid (PA12) eller polystyren (PS), rullas ut på en förparerad pulverbädd (Kudelski et al., 2017; Kluska et al., 2018; Kalpakjian & Schmid, 2008; Thompson, 2007). Vidare lasersintras objektets tvärsnitt och plattformen sänks 0,1-0,2 mm på vilken processen upprepas. Figur 5 illustrerar processen för respektive 3D-printningsteknik.



Figur 5: Illustration av processen för FDM-baserad respektive SLS-baserad 3D-printningsteknik.
Inspirerad av Kudelski et al. (2017).

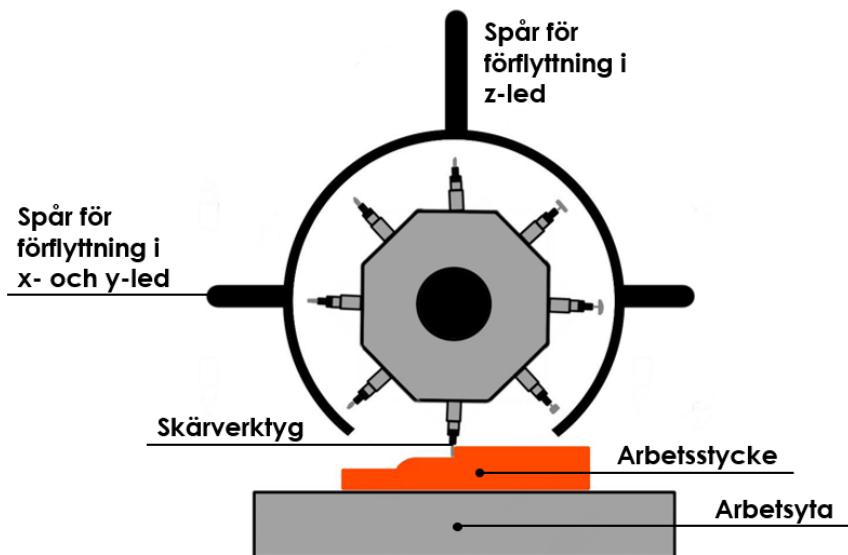
Den främsta fördelen med SLS gentemot FDM är att metoden producerar objekt med högre upplösning och noggrannhet i och med lasertekniken. Upplösningen för FDM beror i huvudsak på munstyckets storlek, vilket avgör lagerhöjden, och precision vid förflyttning. SLS möjliggör också för tillverkning av mer komplexa geometrier utan ett betydande behov av stödmaterial vilket FDM kräver. Däremot ses FDM tillverka objekt till lägre kostnad i och med lägre verktygskostnad. (Kudelski et al., 2017)

Aktuell studie har nyttjat både FDM-baserad och SLS-baserad 3D-printningsteknik vilka kan ses lämpliga i olika stadium av utvecklingsprocessen. FDM ses lämplig för initial koncepttestning av funktionella liksom dimensionella egenskaper där snäva toleranser inte ses vara betydande; tankar och idéer ges en första utvärdering vilken beaktar funktion och storlek. Studien har involverat hantering av en typ av FDM-skrivare, tillgänglig på MDU, med benämningen Ultimaker 2+ vilken använder PLA som filament. En sådan 3D-skrivare förutsätter en sexstegsprocess för att skapa en modell: 1) CAD-modellering; 2) Konvertering till STL-format; 3) Överföring till och inställning av skrivare; 4) Utskrift av modell; 5) Avlägsning av modell från plattformen; 6) Efterbearbetning och/eller montering av sub-komponenter.

När FDM-tillverkade modeller ses påvisa ett mindre oanvändbart resultat ses SLS vara lämplig för vidare tester. Sålunda kan koncept som kräver högre toleranser, exempelvis för spelutrymme mellan rörliga delar, testas. Aktuell studie har således även utvärderat SLS-tillverkade modeller i PA12 vilka beställts från Prototool AB i Jönköping.

Subtraktiv tillverkning

En vanlig subtraktiv tillverkningsmetod involverar Numerical Control (NC). NC-bearbetning består av datorstyrda fräsnings- och svarvningsprocesser vilken, till skillnad från 3D-printning, innebär att material tas bort i syfte att skapa önskad produkt (Ulrich & Eppinger, 2014). Genom att manuellt införa kodade instruktioner till NC-maskinen kontrolleras dess enskilda maskinkomponenters rörelser. Systemet tolkar automatiskt inkommande data vilka konverteras till utgående signaler. De utgående signalerna kontrollerar, i sin tur, olika maskinkomponenter vilka hanterar verktygsbyten eller förflyttning av verktyget i x-, y- eller z-led. NC-maskiner kan således beskrivas som en trestegsprocess: 1) Datainmatning; 2) Databearbetning; 3) Datautmatning (Kalpakjian & Schmid, 2008; Thompson, 2007). Till att börja med registreras och lagras numerisk information i datorminnet för att vidare bearbetas. Denna information översätts sedan till pulskommandon vilka sänds till servomotorer som vidare styr övriga maskinkomponenter. System innehållande Computer Numerical Control (CNC) hanterar datainmatning med hjälp av ett datorbaserat system där instruktioner direkt kontrolleras, steg-för-steg, av en lokal datormjkvara (Kalpakjian & Schmid, 2008; Thompson, 2007). CNC-bearbetning ses vara en mycket flexibel metod i och med automatiska verktygsbyten, multipla arbetsaxlar och programmerbar kontroll (Ulrich & Eppinger, 2014). För att producera en komponent krävs en maskinoperatör som inledningsvis programmerar rörelsebanan för valda skärverktyg. Vidare kan programmerad data användas för att tillverka multipla delar mer effektivt (Ulrich & Eppinger, 2014). Figur 6, på s. 18, illustrerar processen för CNC-bearbetning.



Figur 6: Illustration av processen för CNC-bearbetning. Inspirerad av Thompson (2007).

Aktuell studie har nyttjat CNC-bearbetning för tillverkning av en slutlig version av utvecklat koncept, i aluminium, vilken används för att utvärdera konceptets funktionalitet, då verkligt material beaktas, liksom för att ge en bedömning av den fjäderkraft som krävs för att uppnå avsedd funktion. Den främsta fördelen med CNC-bearbetning, gentemot konventionella metoder vilka baseras på maskinstyrning liksom 3D-printning, är dess goda förmåga att snabbt tillverka prototyper, i metall, med komplexa former vilka kräver hög dimensionsnoggrannhet och ytfinhet (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Design For Manufacturing Assembly (DFMA)

”Design for Manufacturing Assembly” (DFMA) är en designprincip vilken kombinerar ”Design for Manufacturing” (DFM) och ”Design for Assembly” (DFA). DFMA ämnas således ge riktlinjer för tillverkningsprocessen med hänsyn till monteringsaspekter. Designprincipen ses fördelaktig då den hjälper utvecklaren att ta fram produkter vilka innehåller färre komponenter, reducerad monteringstid och reducerad tillverkningstid på vilken reducerar slutlig produktkostnad. Utförande av DFMA bör därför beakta ett antal generella, men fundamentala, designaspekter. Dessa designaspekter kan summeras i tolv huvudsakliga frågeställningar vilka, till viss grad, har reflekterats över under den empiriska processen: 1) kan produkten förenklas på vilken antalet komponenter reduceras utan att avsedd funktion och prestanda påverkas negativt; 2) har miljömässiga aspekter övervägts med hänsyn till formgivning, materialval och val av tillverkningsmetod; 3) har alla alternativa lösningar undersökts; 4) kan överflödiga funktioner, eller några komponenter, elimineras eller kombineras med andra funktioner; 5) har en modulär design övervägts till vilken möjliggör anpassning till liknande produkter inom produktfamiljen och underlättar installation och underhåll av produkten; 6) kan produkten göras mindre och lättare; 7) är specificerade dimensionstoleranser och ytfinhet överdrivet snäva; 8) verkar produkten vara svår och/eller tidskrävande att montera, demontera, underhålla och återvinna; 9) har delmontage övervägts; 10) har användning av fästelement, mängd och variation, minimerats; 11) finns komponenterna kommersiellt tillgängliga; 12) är produkten säker för dess avsedda applikation. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

DFMA har för aktuell studie tagits i beaktning för att säkerställa att utvecklat koncept uppnår en relativt hög kvalitet. Kvalitet kan definieras, enligt Kalpakjian & Schmid (2008), som huruvida tillverkare är styrd av målet att utveckla tillfredsställande produkter för sina kunder (Kalpakjian & Schmid, 2008). Kalpakjian & Schmid (2008) beskriver att en produkt med hög kvalitet innefattar hög tillförlitlighet, utför avsedda funktioner väl och säkert, har ett tillfredsställande utseende och är relativt billiga, uppgraderbara, tillgängliga vid behov samt är robusta under avsedd livslängd. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

Konceptsållning

Konceptsållning är en snabb och ungefärlig utvärderingsmetod vilken är avsedd att ta fram några få lämpliga och genomförbara konceptalternativ. Processen utförs oftast i två etapper där konceptsållningen inledningsvis utförs för att utvärdera initiala grundidéer i förhållande till ett referenskoncept med hjälp av en *sållningsmatris*. Sålunda kan utvärderingen i detta skede vara missvisande i och med avsaknad av detaljerade kvantitativa jämförelser. Med detta i åtanke används ett ungefärligt betygssystem för att kunna eliminera några alternativ vilka ses mindre relevanta. Konceptsållning baseras på en metod utvecklad av Stuart Pugh på 1980-talet vilken kallas för Pughs konceptvalsmatris där syftet är att sälla bort ett antal koncept samt förbättra koncepten. Således kan ett meningsfullt och objektivt konceptval göras. Metoden inleds med att lista upp betydande kriterier vilka vidare ges en bedömning för respektive konceptalternativ, i förhållande till ett referenskoncept. För aktuell studie ses betydande kriterier delvis identifieras under koncepttestning, vilken involverar fallföretagets R&D, samt att givet referenskoncept utgörs av den patenterade lösningen, vilken ses som utgångspunkt för studien. Vidare ges respektive koncept ett relativt betyg ”bättre än” (+), ”likvärdig med” (0) och ”sämre än” (-) för att påvisa konceptets relevans gentemot referenskonceptet. Efter att alla koncept är betygsatta rangordnas koncepten genom att summa antalet ”bättre än”, ”likvärdig med” och ”sämre än” för att vidare beräkna ett slutbetyg genom att subtrahera antalet ”sämre än” från ”bättre än”. Vidare bör resultaten kontrolleras om dem ses rimliga på vilken olika sätt att kombinera och förbättra vissa koncept övervägas. Slutligen bestäms vilket/vilka koncept som ses mest lämpliga. Konceptet eller koncepten väljs sedan för vidareutveckling och ytterligare analys. (Ulrich & Eppinger, 2014)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) är en riskanalysmetod vilken utvecklades på 1960-talet inom flygindustrin där tillförlitlighets- och säkerhetsproblem beaktas. Metoden utvecklades i syfte att identifiera potentiella fel tillstånd för att vidare kunna implementera korrigerande åtgärder vilka förhindrar dem från att hända. Sålunda kan FMEA ses som en proaktiv rotorsaksanalys vilken tillämpas regelbundet redan i tidigt stadium av produktutvecklingsprocessen med målsättningen att minimera effekterna av potentiella fel tillstånd (Koomsap & Charoenchokdilok, 2018). Detta kan förklaras av, vad Carlson (2012) kallar ”the factor of 10 rule”, vilken beskriver att kostnaderna för att identifiera och åtgärda problem ökar med tiden. Det vill säga för varje fas i produktutvecklingsprocessen som utförs ökar kostnaderna med faktor 10. FMEA ses stödja förbättringsarbete av produkter genom att: underlätta urval av det mest lämpliga konceptet; säkerställa att konstruktionen är säker, robust och tillförlitlig; stödja strömlinjeformad utveckling där problem förutses innan dem uppstår; förbättra effektiviteten av testning för att säkerställa att inga problem når kunden; säkerställa att tillverkningsprocessen är stabil under kontroll; och säkerställa att utrustningen drivs säkert och kostnadseffektivt (Carlson, 2012). Utförandet av en FMEA sker med hjälp av ett strukturerat och formaliserat team-baserat angreppssätt på vilken involverar en uppsättning

aktiviteter vilka inkluderar: förståelse av potentiella feltillstånd; utvärdering av dess effekter; och rekommendation av korrektiva åtgärder. För att säkerställa att betydande aspekter bedöms korrekt liksom relevanta feltillstånd beaktas krävs deltagande av personer vilka bidrar med varierande kunskap och erfarenheter (Koomsap & Charoenchokdilok, 2018). Carlson (2012) menar att ingen har alla svar, men genom att dela kunskap och erfarenheter kan svaren upptäckas tillsammans.

För aktuell studie har utförande av FMEA skett i samråd med relevanta aktörer på fallföretaget på vilken aspekter så som funktionsfel (avsaknad av funktion), feltillstånd (orsak) och konsekvens av funktionsfel identifieras och diskuteras (Moubray, 1997). Utförd FMEA har identifierat potentiella funktionsfel inklusive komponenter på vilken respektive fel har givits ett värde, 1-10, vilken representerar dess allvarlighetsgrad. Allvarlighetsgraden har vidare multiplicerats med ett värde, 1-10, vilken representerar hur ofta funktionsfelet bedöms förekomma. Vidare föreslås relevanta åtgärder. Studien har tillämpat FMEA i syfte att ge en ytterligare analys av valda koncept vilken kompletterar Pughs konceptvalsmatris.

Materialval

Ansys Granta EduPack är ett program som erbjuder resurser vilka stödjer lärande för olika material däribland en databas vilken innehåller omfattande information om material och tillverkningsprocesser. Dessutom erbjuds visualiseringar av materialvalsverktyg vilka presenterar olika material och materialgrupper med hjälp av grafer som anpassas efter individuella behov (Ansys, Inc, 2023). Dessa grafer påvisar hur respektive material och dess egenskaper korreleras till andra material inom samma eller annan kategori. Således görs programmet ytterst lämpligt vid utforskning av relevanta material då många material ses utvärderas samtidigt i relation till varandra med hjälp av ett visuellt verktyg. EduPack är uppdelat i tre nivåer vilket medför att en lämplig nivå av information görs tillgänglig i takt med studentens framsteg (Ansys, Inc, 2023). EduPack har nyttjats för aktuell studie i syfte att ge en objektiv bedömning av relevant material för valt koncept.

2.2 Forskningskvalitet

Forskningskvaliteten ges en bedömning genom att studiens validitet och reliabilitet diskuteras för både den teoretiska liksom den empiriska studien.

2.2.1 Validitet

Enligt Säfsten et al. (2020) beskrivs validitet som huruvida en studie mäter det som avses. Validitet kan ses utifrån ett internt och ett externt perspektiv. Intern validitet redogör för exkludering av alternativa lösningar och förslag vilket möjliggör för skribenten att dra slutsatser gällande hur något verkligen är. Extern validitet beskriver huruvida studiens resultat kan vara giltigt för andra aktörer i andra situationer. Det vill säga huruvida studiens resultat ses kunna generaliseras på liknande områden (Säfsten et al., 2020).

Den teoretiska studien har delvis involverat en icke systematisk litteraturgenomgång vilket innebär att enbart ett urval av den totala mängden vetenskaplig litteratur inom forskningsområdet studerats. Detta innebär att studien involverar en del individuella bedömningar vid val av litteratur, vilket kan riskera partiskhet (McDougall, 2015). Däremot inkluderades primärt referee granskade artiklar vilket stärker litteraturens kvalitet och trovärdighet. Ett sätt att stärka validiteten är att involvera triangulering i studien.

Triangulering innebär att olika typer av informationskällor studeras, exempelvis vetenskapliga artiklar, böcker och företagsdokument (Guion et al., 2011). Dessutom ges en ökad validitet i och med användning av flera olika databaser vilket medför insamling av olika perspektiv (Guion et al., 2011). Således sågs snöbollstechniken fördelaktig för att stärka validiteten då tekniken utvidgade sökningarna i syfte att erhålla ett bredare sökområde utan att upprepa sökningarna (Wohlin, 2014). Detta gjorde att sökresultaten bekräftades i alternativa artiklar.

Triangulering har även nyttjats för att stärka validiteten hos fallstudien. Detta då triangulering även redogör för vikten av involvering av flera parter utöver skribenten. Således har samtliga delresultat diskuterats och analyserats tillsammans med fallföretagets R&D för verifikation (Guion et al., 2011). Dessutom har experter på MDU konsulterats, primärt angående huruvida komponenter kan designas för att underlätta för FDM-baserad 3D-printning. Studiens validitet har också stärkts genom att utförligt beskriva förutsättningarna som givits för att erhålla respektive delresultat.

2.2.2 Reliabilitet

Reliabilitet redogör för hur väl resultatet ses bli detsamma om studien utförs på nytt. Med andra ord innebär hög reliabilitet att studien kan utföras av andra och/eller i en annan tid utan påverkan på resultatet. Reliabilitet är därför beroende av fel som uppstår vid mätning, situationen där studien utförs samt personen som utför studien vilka påverkar resultatet. (Säfsten et al., 2020)

Reliabiliteten säkerställs i denna studie genom att genomförd metodik noterats och presenterats utförligt, vilket gör studien till viss nivå reproducerbar. För att synliggöra skribentens val och bedömningar har genomförd metodik presenterats på ett så transparent sätt som möjligt. Exempelvis genom att tillämpa en konceptvalsmatris och FMEA i fallstudien, vilka erhåller en objektiv utvärdering av framtagna koncept. Vad gäller litteraturgenomgången kan reliabiliteten ses stärkas genom att nyckelord som använts för att genomföra sökningarna presenteras.

3 Teoretisk studie

Följande kapitel ämnas ge en grundförståelse för pulsgivare som koncept där dess funktion i ett styrsystem och externa krafter som påverkar dess livslängd beaktas. Till att börja med inleds kapitlet med att presentera betydelsen av funktionssäkerhet för ett styrsystem och principen för ett vanligt förekommande styrsystem. Avslutningsvis redogörs för olika konstruktionsaspekter där bland annat termen funktionssäkerhet beskrivs i relation till konstruktion av givare.

3.1 Funktionssäkerhet

Den framgångsrika teknikutvecklingen som skett, i samhället, sedan 2000-talets början har påverkat industrierna liksom den övriga samhällsutvecklingen. Detta har resulterat i allt fler komplexa och automatiserade maskiner och produktionssystem. Med en fortsatt konstant växande teknikutveckling ses funktionssäkerhet få en allt större betydelse (Wilkening et al., 2019). Säkerhet innebär att direkta och/eller indirekta skador på människors hälsa undviks. Funktionssäkerhet definieras som ett system som sker under korrekt drift för att på så sätt upprätthålla säkerhet. Detta inkluderar identifiering av potentiellt mindre farliga förhållanden (Jeppesen et al., 2019).

Wilkening et al. (2019) menar att funktionssäkerhet reflekteras i både lagstiftning liksom nationella och internationella standarder på vilka relevanta standarder påvisas i appendix A. Två standarder som hanterar funktionssäkerhet benämns EN ISO 13849 och IEC 62061 där den förstnämnda fokuserar på maskinsäkerhet, medan den påföljande fokuserar på säkerhetsrelaterade krav för olika styrsystem (Wilkening et al., 2019). Den första tillhör standardfamiljen "International Standards Organization" (ISO), medan den andra tillhör "International Electrotechnical Commission" (IEC). ISO-standarder koncentreras generellt på material- och processkontroll, medan IEC-standarder koncentreras på tillverkning och testning. Standarden EN ISO 13849, i relation till funktionssäkerhet, syftar till att ge vägledning kring konstruktionsaspekter, vilket involverar integrering av säkerhetsrelaterade delar i ett styrsystem. Införande av skyddsanordningar, styrenheter eller effektstyrdon är exempel på när standarden har tillämpats menar Svenska Institutet för Standarder [SIS] (2016). Medan IEC 62061 beaktar funktionssäkerhet i relation till en särskild typ av styrsystem. Således syftar standarden till att specificera krav och rekommendationer för konstruktion, integration och validering av säkerhetsrelaterade elektriska, elektroniska och programmerbara styrsystem (SIS, 2021).

Standarden EN ISO 13849 utgörs av två delar där den första delen presenterar allmänna konstruktionsprinciper, medan den andra redogör för huruvida konstruktionsaspekter bör valideras utifrån ett funktionssäkert perspektiv. I den andra delen presenteras således ett flertal säkerhetsprinciper vilka delats in i två kategorier: 1) Fundamentalala principer; 2) Välbeprövade principer. Dessa principer ses ge vägledning under utvecklingsprocessen vilken syftar till framtagning av en funktionssäker konstruktion. Några av dessa principer har summerats och sammanställts i tabell 3 på vilken samtliga principer presenteras i appendix B. I huvudsak redogör standarden, inklusive uppvisade principer, för betydelsen av nyttjande av få komponenter på vilken funktioner är separerade från säkerhetsrelaterade funktioner liksom kan intas i olika lägen.

Tabell 3: Sammanställning av ett urval av säkerhetsprinciperna vilka beaktas i EN ISO 13849-2:2012.

	1	2	3	4	5	6
Fundamental		Val av lämpliga material & tillverkningsmetoder	De-energisations-principen	Förenkling	Uppdelning	Korrekt reaktionstid
Anmärkning	Val baseras på faktorer som spänning, hållfasthet, elasticitet, friktion, sättage, korrosion & temperatur	Då energi förses i syfte att sätta ett mekaniskt system i rörelse behöver systemet kunna sättas i säkert tillstånd genom att frigöra energi. Således bör olika tillstånd övervägas, ex. driftläge & underhållsläge.	Undvik överflödiga/onödiga komponenter i säkerhetsrelaterade system.	Separera säkerhetsrelaterade funktioner från andra funktioner.	Fjäderutmattnings, friktion, smörjning, temperatur, tröghet & toleranser bör betraktas.	
Välbeprövad	Säker position	Positiv mekanisk verkan	Överdimensionering	Multipla delar	Nyttjande av tryckfjäder	Komponenter med orienterat felläge
Anmärkning	Rörliga delar av komponenter/system hålls i säker position mekaniskt. Således krävs en kraft för att skapa rörelse där enbart friktion ej är tillräcklig.	Positiv mekanisk verkan uppnår då de rörliga komponenterna som krävs för att utföra säkerhetsfunktionen medför förflyttning av anslutna komponenter. Notera att en elektrisk avstängningsfunktion är att föredra framför en applicerad fjäderkraft.	Säkerhetsfaktorer är givna i standarder eller av god erfarenhet inom säkerhetsrelaterade applikationer.	Feleffekten kan reduceras genom att tillhandahålla flera delar vilka verkar parallellt. Således undviks uppkomst av ett farligt tillstånd då ett fel uppstår i en av flera delar.	Kräver aktsamt utvalda material & metoder, tillräcklig vägledning av fjädern, utrymme mellan varven är mindre än tråddiametern (obelastad fjäder) & tillräcklig kraft efter utmattningsbrott.	Givet felläge för en komponent är känt i förväg vilken alltid är samma.

En ytterligare standard som hanterar funktionssäkerhet oberoende av specifikt område eller applikation är IEC 61508. Genom att säkerställa att en maskin eller ett system fungerar korrekt krävs en sensorenhet som kontrollerar funktionsrelaterade delar kontinuerligt. Vid eventuella fel bör kontrollenheten således säkerställa att maskinen eller systemet sätts i säkert tillstånd för att undvika olyckor (Wilkening et al., 2019). Enligt IEC 61508 bör säkerhetsrelaterade system designas på ett sätt som möjliggör detektering av sensorfel. Chen et al. (2022) menar att detta bland annat inkluderar införande av redundanta tillförlitlighetskretsar i hårdvara vilka reducerar antalet slumpmässiga fel som ses uppstå för en hårdvara. Dessutom inkluderas införande av diagnostiska teststrategier med hög diagnostisk förmåga i programvara, vilket medför effektiv övervakning av farliga fel. Vid ett eventuellt fel kan således ett säkerhetsrelaterat system snabbt och effektivt upptäcka faran och vidta åtgärder för att undvika faran (Chen et al., 2022).

Baćík et al. (2020) påvisar att det finns ett antal säkerhetskrav som bör beaktas vid konstruktion av säkerhetsrelaterade system vilka inkluderar både passiv och aktiv maskinsäkerhet. För att säkerställa passiv maskinsäkerhet ses externa delar införas för att omfamna och skydda det huvudsakliga systemet. Medan

aktiv maskinsäkerhet säkerställs genom att införa elektriska enheter, så som pulsgivare och laserskanners, vilka nyttjas för övervakning av området framför och bakom maskineriet (säkerhetszonen) (Bačík et al., 2020).

Nya standarder så som IEC 61508 ställer krav på att uppnådd funktionssäkerhet ska kvantifieras. För att mäta nivån av uppnådd funktionssäkerhet för en maskin eller ett system används ett mätsystem som innehåller en säkerhetsnivå (eng. Safety Integrity Level), vilket även reflekteras i EN ISO13849 och IEC 62061. Nivån för uppnådd säkerhetsintegritet adresseras genom två målvärden: 1) då en sensor i ett drivsystem fallerar kan systemet lokalisera och isolera felet för att säkerställa att systemet har fortsatt full drivkapacitet; 2) då ett fel uppstår i en av två sensorer kan systemet stanna tills åtgärder vidtagits. Dessa målvärden beaktas ofta i relation till varandra och kan ses utifrån två synsätt som presenteras nedan (Smith & Simpson, 2004).

Kvantitativt synsätt

Frekvensen av uppstådda maskin/systemfel förutsägs och jämförs med acceptabla riskmål. Om målvärden inte tillfredsställs anpassas designen tills målvärden är uppnådda. Exempelvis genom att tillhandahålla mer redundans. (Smith & Simpson, 2004)

Kvalitativt synsätt

Genom att tillämpa olika försvars- och designdiscipliner, baserat på allvarsgraden av givet acceptabelt riskmål, görs ett försök att minimera förekomsterna av olika systemfel (Exempelvis mjukvarufel). (Smith & Simpson, 2004)

För att uppnå dessa två målvärden används riktlinjer och analystekniker för att utreda potentiella risker. Befintliga analystekniker kan användas för att optimera processer, antingen med ett kvantitativt fokus eller ett kvalitativt fokus (Cristea & Constantinescu, 2017). En kvalitativ analys syftar till att identifiera felorsaker för att vidare kunna förebygga de potentiella felet. Medan en kvantitativ analys syftar till att kvantifiera effektnivån för varje potentiell risk (Cristea & Constantinescu, 2017). Med andra ord baseras kvalitativa analystekniker på analytikers erfarenhet vilken används för att jämföra och klassificera säkerhetsnivån. Medan kvantitativa analystekniker baseras på beräkningsresultat som tas fram genom matematiska modeller. Vanliga tekniker som används för kvalitativa och kvantitativa analyser är ”Failure Mode and Effect Analysis” (FMEA) respektive ”Fault Tree Analysis” (FTA) (Rouvroye & van den Bliek, 2002).

FMEA är en induktiv bottom-up-metod som identifierar feltillstånd, effekter och orsaker hos tekniska system. Med bottom-up menas att analysen inleds med att identifiera möjliga komponentfel och examinera vilka konsekvenser de kan medföra på en högre nivå (Cristea & Constantinescu, 2017). Utförande av analysen inkluderar en skalenlig bedömningsmall vilken används för att ge en uppskattning av allvarsgraden för den effekt som ges av ett visst feltillstånd. Detta för att vidare kunna göra en prioriteringslista för huruvida åtgärder ska sättas in. Vid FMEA-analyser involveras ofta flera personer med olika bakgrund (exempelvis konstruktion, mjukvara, produktion och underhåll) vilket ökar sannolikheten att samtliga fel identifieras och examineras korrekt. Även om FMEA ses resultera i kvantitativa värden, så som riskprioriteringar, ses metoden kvalitativ i sin natur då inget kvantitativt resultat

ges för identifierad "Probability of Failure on Demand" (PFD) (Cristea & Constantinescu, 2017). PFD kan beskrivas som sannolikheten att den säkerhetsfunktion som initierats, av processen som den ämnas skydda, inte utförs (Rouvroye & van den Bliek, 2002).

FTA är en deduktiv metod som används för att systematiskt bedöma processens kvalitet utifrån ett top-down-perspektiv. Med top-down menas att analysen inleds med att identifiera och evaluera potentiella riskscenarion vilka kan komma att påverka enskilda komponenter (Cristea & Constantinescu, 2017). FTA är, till skillnad från FMEA, en grafisk metod som kartlägger hur eventuella fel propagerar genom systemet; hur ett komponentfel kan leda till systemfel. Däremot leder inte alla komponentfel till systemfel i och med redundans och underhållsteknik. Syftet med FTA är således att undersöka huruvida systemdesignen medför en tillräckligt pålitlig process genom att grafiskt rita upp potentiella scenarion, vilka kan leda till oväntade konsekvenser. FTA används primärt för kvantitativa analyser men kan i vissa fall även ses lämplig för kvalitativa analyser. Den främsta fördelen med FTA är att metoden är begränsad till att enbart identifiera scenarion i processen som kan leda till specifika processfel. Då metoden baseras på Boolean-logiska diagram är den största nackdelen att den enbart påvisar två tillstånd: 1) fungerande tillstånd; 2) fel tillstånd. En ytterligare nackdel är att det ofta krävs en tillförlitlighetsspecialist med djup kunskap om processen. (Ruijters & Stoelinga, 2015)

Både FMEA och FTA är tidskrävande metoder vilken är anledningen till att metoderna ofta utförs i en kombination där FMEA guidas av FTA. Ett sådant angreppssätt inleds med att potentiella scenarion för de huvudsakliga systemfelen definieras. Fortsättningsvis skapas ett träd av de fel (eng. fault tree) som ett visst system, som helhet, ses innehå. Slutligen analyseras varje scenario med hjälp av FMEA för att identifiera underliggande fel tillstånd för varje komponent (Cristea & Constantinescu, 2017). Alternativt ses metoderna utföras i omgångar då FMEA ofta ses lämplig för analyser under tidiga livscykelfaser såsom designfasen. Medan FTA ses mer lämplig för senare livscykelfaser där en systemstruktur är mer eller mindre färdig och behöver en slutlig utvärdering (Rouvroye & van den Bliek, 2002).

3.1.1 Tillståndsbaserat underhåll

Funktionssäkerhet kan ses som en grundläggande del i att höja produktiviteten inom industrin då tillgängligheten på produktionsanläggningarna höjs. En bidragande faktor till ökad tillgänglighet beror på hur underhållet utförs eller inte utförs (Bengtsson, 2006). Tillförlitligheten hos enskilda komponenter är betydande vilka avgör systemets tillförlitlighet. Således är förmågan att förutspå tillförlitligheten hos enskilda komponenter mycket viktig inom teknisk design. Genom att implementera tekniker såsom FMEA och FTA kan potentiella fel tillstånd inom ett system identifieras och examineras, vilket bidrar till ett effektivare underhållsarbete (Cristea & Constantinescu, 2017).

Svensk standard (SS-EN 13306, 2001) definierar underhåll som:

Underhåll

"Kombination av alla tekniska administrativa och ledningens åtgärder under en enhets livstid avsedda att vidmakthålla den i, eller återställa den till, ett sådant tillstånd att den kan utföra krävd funktion" (Bengtsson, 2006, s. 2).

Likaledes definieras tillståndsbaserat underhåll som:

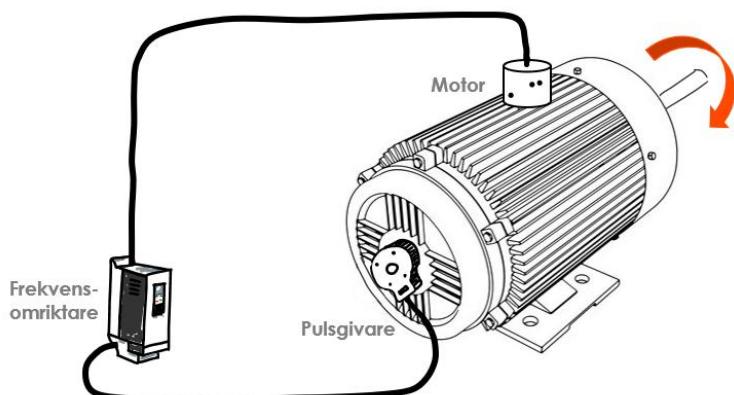
Tillståndsbaserat underhåll

"Förebyggande underhåll som består av kontroll och övervakning av en enhets tillstånd avseende dess funktion och egenskaper, samt därav föranledda åtgärder" (Bengtsson, 2006, s. 2).

Bengtsson (2006) menar att tillståndsbaserat underhåll kan beskrivas som en strategi för att utföra förebyggande underhåll mer effektivt. Det tillståndsbaserade underhållet inkluderar två typer av tillståndskontroller: 1) Objektiv mätning av tillståndsdata; 2) Subjektiv kontroll av systemets/anläggningens tillstånd. Vanligtvis implementeras en kombination av 1) och 2). Vidare behandlas och analyseras insamlade data vilka jämförs med normala målvärden för att kunna ställa en prognos. Genom dessa analyser kan underhållsstopp och beställningar för erforderliga verktyg/reservdelar planeras bättre och mer effektivt. Dessutom kan den mer erfärlige underhållsteknikern meddelas i tid varpå underhållsstoppet kan flyttas utanför planerad produktionstid. För att summera ses ett väl fungerande tillståndsbaserat underhåll möjliggöra identifikation av begynnande fel vilket reducerar antalet haverier. Detta, i sin tur, ökar tillgängligheten av produktionssystemet och säkerställer funktionssäkerheten.

3.2 Princip för ett styrsystem

Traditionellt sett utgörs ett styrsystem av en motor (drivsystemet), en pulsgivare och en frekvensomriktare där pulsgivarens syfte är att sammanlänka motorn och frekvensomriktaren, se figur 7. Den typ av motor som ofta används i samband med en frekvensomriktare är asynkronmotorn (Berglund & Rohlén, 2017). Genom att pulsgivaren monteras direkt på den roterande motoraxeln kan motoraxelns verkliga hastighet eller position mätas. Den mätdata som fångas upp av pulsgivaren skickas kontinuerligt till frekvensomriktaren som tolkar pulsgivarens signaler, vilka indikerar på motorns hastighet och position. Om motorn inte ses uppnå önskade målvärden beräknas och regleras frekvens och spänning av frekvensomriktaren. Genererad data skickas därefter till motorn vilka används för att styra hastigheten då motorns varvtal ställs in på önskat läge (Leine & Linde, u.å.-a). Dessutom kan motorns position, per varv, följas upp för att koordinera materialflödet i en fabrik mer effektivt. Således kan verklig position jämföras med önskat målvärde för att därefter kunna korrigera skillnaden (Tonde, 2012).



Figur 7: Visualisering av ett traditionellt styrsystem. Inspirerad av Leine & Linde (u.å.).

Fördelarna som möjliggörs med ett sådant styrsystem har sammanstälts i tabell 4. I korthet kan nämnas att den huvudsakliga nyttan som ges av styrsystemet är att en motors hastighet kan kontrolleras samt koordineras med övriga motorer i en industrilina (Leine & Linde, u.å.-a).

Tabell 4: Fördelar med ett traditionellt styrsystem (inklusive pulsgivare). Källa: Leine & Linde (u.å.).

Kategori	Fördelar	Kommentar
Mätning	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Noggrann hastighetsmätning. 	Gäller även vid låga axelhastigheter.
Kontroll	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hastighetsändring vid accelerationer sker under kontrollerade förhållanden. 	
Anpassning	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Justering av avvikeler ▪ Anpassning av varvtal efter driftbehov. 	I syfte att bibehålla konstant hastighet.
Optimering	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimering av moment & varvtal. 	Möjliggörs genom att minska motorns energiförbrukning.

3.3 Driftövervakning och styrning

Som påvisats tidigare i kapitlet innefattar pulsgivare sensorer vilka används för att övervaka och styra ett driftsystem för att upprätthålla en hög prestanda och stabilitet. En sensor definieras ofta som en enhet som mottar och resonderar på en signal eller stimulus, där stimulus ofta hänvisas till den kvantitet, egenskap eller tillstånd som mottas och omvandlas till en elektrisk signal. Med elektrisk signal menas att en signal kan kanaliseras, förstärkas och modifieras av elektroniska apparater. (Fraden, 2016)

3.3.1 Pulsgivarens funktion och yttrre krafter

Genom sensorer genereras digitala signaler som återkoppling från mekaniska rörelser, vilket påvisar att pulsgivarens funktion är att översätta mekanisk rörelse till elektriska signaler (Bexar, 2016). Således ses pulsgivaren beakta både den mekaniska och elektriska världen, vilket påverkar konstruktionen i och med att en vitt skild kravbild förutsätts. För att tillfredsställa den elektriska världen bör pulsgivaren erbjuda hög tillförlitlighet, precision och noggrannhet. Medan den mekaniska världen också kräver att den ska motstå höga krafter, vibrationer och extrema temperaturer. Kvalitet och hållfasthet ses därför vara avgörande faktorer för pulsgivarens funktion och livslängd (Leine & Linde, u.å.-a).

Pulsgivare förekommer i en mängd olika användningsområden där automatiserade processer är centrala, exempelvis för att styra hastigheten hos elektriska motorer inom pappers- och stålindustrin, robotstyrningar, kranar samt optimering av rotorbladens position i vindkraftverk. Dessutom används pulsgivare för ett flertal olika typer av mät-, test- och inspektionssystem för att mäta olika avstånd och

positionering (Leine & Linde, 2017). Pulsgivare används mestadels för mätning vid roterande rörelser i kombination med drev, axlar och mäthjul. Däremot finns även pulsgivare som mäter linjära rörelser vilka ofta används i samband med kranfordon (Bexar, 2016). Ett konkret exempel där roterande pulsgivare ofta används illustreras i figur 8, nedan, och berör materialhantering. Med hjälp av en pulsgivare kan processen automatiseras där materialflödet koordineras och kontrolleras utan direkt kontakt med mänskliga faktorer.

1 Drivsystem

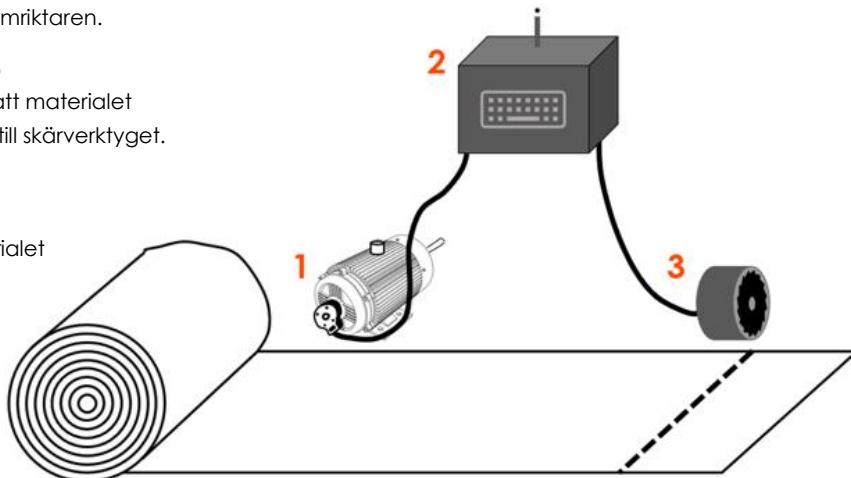
Materialets rörelse registreras av pulsgivaren genom ett mäthjul som är placerad under materialet. Givaren sänder därefter pulser till frekvensomriktaren.

2 Frekvensomriktare

Mottagna pulser indikerar att materialet förflyttats. En signal skickas till skärverktyget.

3 Skärverktyg

Signalen mottas och materialet skärs till önskad längd



Figur 8: Applikation av pulsgivare vid automatiserad materialhantering. Inspirerad av Bexar (2016).

Eftersom pulsgivare ofta används för motorer inom industriella applikationer med mycket påfrestande miljöer ställs höga krav vid konstruktion av pulsgivare. Sådana miljöer innehåller vanligen extrema temperaturer, fukt, kontamination, mekaniska krafter och vibrationer (Leine & Linde, u.å.-a). För att säkerställa att givaren är funktionsduglig under lång tid ställs därför krav på dess tålighet mot omgivningens krafter. Utöver de miljömässiga parametrarna beror en pulsgivares livslängd också på axellagrets kondition och den belastning som axeln utsätts för, vilket bland annat inkluderar last, hastighet och punktlast (Leine & Linde, 2017). Med andra ord havererar pulsgivare oftast på grund av lagerhaverier. Varje lager har en beräknad livslängd som förbestäms, men studier påvisar att inte alla lager uppnår den förväntade brukbarhetstiden (SKF, 2020). Förtida lagerhaverier orsakas vanligen av felaktig montering (16 % av alla lagerfel); bristfällig smörjning (36 %); kontamination (14 %); och utmattning (34 %). Tabell 5, på s. 29, ger en ytterligare beskrivning av nämnda orsaker (SKF, 2020).

Tabell 5: Utförlig beskrivning av orsaker till lagerhaverier. Källa: SKF (2020) varav bilder är inspirerade.

Nr.	Orsak	Visualisering	Beroendefaktor
1	Felaktig montering		Beror ofta på att underhållspersonal inte har kunskap om vilka monteringsverktyg och metoder som ska användas.
2	Bristföllig smörjning		Den främsta orsaken till lagerhaverier beror på avsaknad av smörjning, användning av fel smörjmedel och/eller användning av fel mängd smörjmedel.
3	Kontamination		Kullager är precisionsberoende komponenter som inte fungerar effektivt vid föroreningsproblem.
4	Utmattning		Då maskiner överbelastas, ges felaktigt underhåll eller på andra sett försummas riskeras plötsliga och oväntade lagerhaverier att ske.

För att säkerställa att lagren uppnår den förväntade brukbarhetstiden, och på så sätt minimera skador och kostnader till följd av förtida lagerhaverier, bör rätt underhållsrutiner tillämpas likväl som rätt verktyg bör användas. Det är också av vikt att lagrets tillstånd, under drift, kontrolleras genom grundläggande tillståndskontroll. Således kan plötsliga och oväntade driftstopp undvikas likväl som det tillståndsbaserade underhållet förstärks. (SKF, 2020)

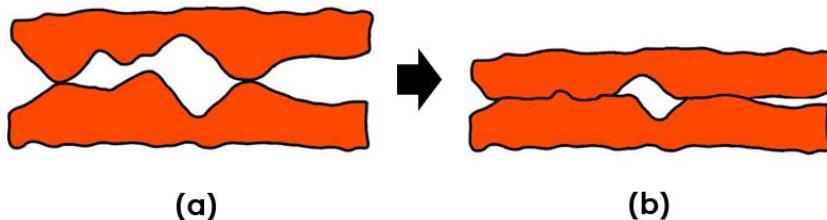
Tribologi

Tribologi är vetenskapen om ytor vilka interagerar med varandra. Således involverar termen friktion, slitage och smörjning. Friktion definieras som motståndet mot relativ glidning mellan två kroppar, vilka är i kontakt, under normal belastning på vilken leder till plastisk deformation (Kalpakjian & Schmid, 2008). Friktionskoefficienten, μ , som ges av glidning relateras till förhållandet mellan en normalkraft (N), vilken är vinkelrät mot kontaktpunkten, och en tangentiel kraft (F), vilken appliceras för att möjliggöra glidning (Kalpakjian & Schmid, 2008). Förhållandet kan således beskrivas med följande formel, på vilken även kan beskrivas som ett förhållande mellan ren styrka (τ) och normalspänning (σ):

$$\mu = \frac{F}{N} = \frac{\tau}{\sigma} \quad (a)$$

På så sätt ses ett materials styrka, och därmed hårdhet, som den mest betydande faktorn vilken avgör friktionens storlek. I det fall då glidning ges mellan två kroppar där den ena kroppen utgörs av ett mjukare material fås något som kallas adhesiv nötning eller glidslitage. Detta innebär att det mjukare materialet ges ett spår i och med att det kräver mindre energi att ge efter för den friktionskraft som ges (Kalpakjian &

Schmid, 2008). Fenomenet kallas ofta för smetning. Kontamination är en ytterligare aspekt som påverkar friktionsspänningarna då friktion ges av glidning mellan två kroppar. Sålunda ses smörjning ofta förekomma vid glidning då det reducerar friktionskoefficienten och därmed minskar risken för slitage. Slitage är således ett fenomen som kan definieras som progressiv förlust eller oönskad avlägsning av material från en yta (Kalpakjian & Schmid, 2008). Kalpakjian & Schmid (2008) menar att slitage generellt resulterar i förändrad yttopografin, se figur 9, men kan även resultera i allvarliga ytskador. Däremot, under kontrollerade förhållanden, kan slitage ses som en utjämnings- eller poleringsprocess (Kalpakjian & Schmid, 2008).



Figur 9: Visualisering av glidning mellan två ytor på vilken (a) illustrerar tillståndet före slitage och (b) efter slitage. Inspirerad av Kalpakjian & Schmid (2008).

Lagerhaverier ses vara starkt kopplade till slitage, vilket kan ses vara en följd av bristfällig smörjning och utmattning (Qiu et al., 2017). Qiu et al. (2017) redogör för primärt fem faktorer som ses påskynda utmattningsslitaget av kullager: överbelastning; glidhastighet; materialets hårdhet; yttemperatur; och vibrationer. Då den totala lasten på ett lager uppnår ett kritiskt värde riskeras spänningar och sprickor att uppkomma. När lasten uppnår minst en tredjedel av materialets hårdhet förväntas slitaget att förvärras markant. En ytterligare aspekt angående materialets hårdhet är att ett för hårt material kan ses sprött, även om härdning generellt medför förbättrad hållfasthet. Detta resulterar i att slitaget kommer accelerera. Även friktionskraften mellan två kontaktytor ses innehålla en betydande inverkan på slitaget då glidning av två material ger skjuvspänningar vilka riskerar att bilda sprickor i materialet (Qiu et al., 2017). Dessutom kan en ökning av temperaturen leda till minskad hårdhet hos materialet liksom försämrad funktion hos smörjmedlet. Slutligen riskerar vibrationer (även små vibrationer på 0,05 – 0,25 mm) att skaka loss fästelement vilket resulterar i oxidation och eventuellt korrosion av öppna ytor (Qiu et al., 2017).

Berglund & Rohlén (2017) uppmärksammar även asynkronmotorns påverkan på kullagrens livslängd. I asynkronmotorns stator skapas en rotationsrörelse av strömmar, vilka interagerar med rotorns magnetfält genom att de kraftproducerande strömmarna induceras i rotorn. Vidare överförs dessa strömmar till givarens kullager då givaren är monterad på rotoraxeln, vilket medför slitage på lagerkomponenterna (Berglund & Rohlén, 2017).

3.3.2 Olika typer av pulsgivare

Det förekommer två huvudtyper av pulsgivare: inkrementell pulsgivare och absolut pulsgivare.

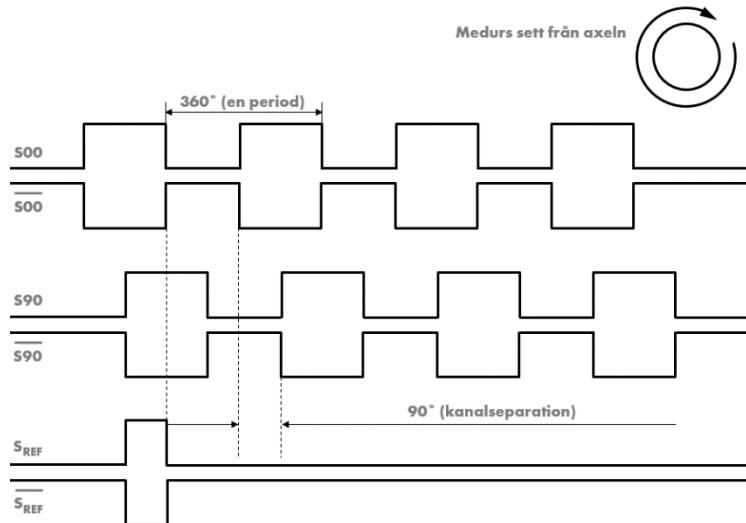
Inkrementell pulsgivare

En inkrementell pulsgivare genererar en serie pulser vartefter den rör sig längs en linjär eller roterande bana. Dessa pulser kan användas för att mäta hastighet eller bestämma positionen relativt en referenspunkt (nollpunkt) då den kopplas till ett styrsystem. De signaler som genereras från en inkrementell pulsgivare utgörs vanligtvis av elektriska fyrkantsvågor med en frekvens som beror av rotationshastigheten på pulsgivaraxeln (Leine & Linde, 2017). Den inkrementella pulsgivaren består delvis av en kodskiva, se figur 10, som innehåller ett regelbundet streckmönster med lika många streck som givaren ger ut pulser på ett varv. Vid rotation eller linjär rörelse detekteras mönstret av sensorer inuti givaren och sänder ut signaler.



Figur 10: Visualisering av en inkrementell kodskiva för en roterande pulsgivare. Källa: Leine & Linde (2017).

En inkrementell pulsgivare innehåller tre sensorer där två nyttjas för att detektera pulser och en för att övervaka referenspunkten. Signalerna som mottas betecknas oftast som $S00$, $S90$ och S_{ref} där $S90$ är fasförskjuten 90 elektriska grader efter $S00$ då rotation sker medurs, se figur 11 på s. 32 för visualisering. Detta möjliggör identifikation av rotationsriktningen (Leine & Linde, 2017). En annan variant av utsignal är sinusvågor som för varje position på vågen ger en unik amplitud. Denna variant nyttjas ofta i applikationer där utslag önskas ge på mycket små rörelser (Leine & Linde, u.å.-a).



Figur 11: Illustration av fyrkantsvågor inklusive beteckningar. Inspirerad av Leine & Linde (2017).

Absolut pulsgivare

Absoluta pulsgivare genererar pulser som indikerar en absolut position vid positionsändring längs en linjär eller roterande bana. En av de största fördelarna med absoluta pulsgivare gentemot inkrementella är att givaren även kan identifiera sin position vid strömvabrott, även då rörelse skett under avbrottet. Eftersom ett absolut värde genereras i takt med att pulsgivaren roterar (för en roterande pulsgivare), krävs ingen detektering av referenspunkter. Istället genereras en unik kod för varje vinkelposition. Koden baseras ofta på en binär kod eller graykod, vilket indikerar en mer specifik position. Således ses kodskivan, se figur 12, för absoluta pulsgivare innehåller ett mer komplext och specifikt mönster gentemot inkrementella pulsgivare. (Leine & Linde, 2017)



Figur 12: Visualisering av en absolut kodskiva för en roterande pulsgivare. Källa: Leine & Linde (2017).

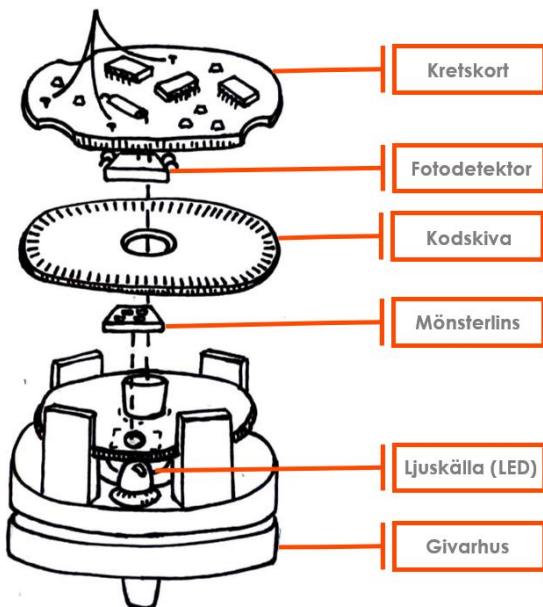
Upplösningen för en absolut pulsgivare beräknas till 2^n där n är antalet bitar (unika positioner per varv). För envarviga pulsgivare upprepas pulsvärdet för varje varv. Detta innebär att när pulsgivaren räknat igenom det totala antalet bitar, exempelvis 0 – 255 för en 8-bitars, börjar den om på noll igen. Genom att använda en växellåda kan pulsgivaren särskilja på olika varv. Detta medför att en pulsgivare med en intern växellåda även kan ses som absolut för uppemot 16 000 varv istället för enbart ett varv. (Leine & Linde, 2017)

3.3.3 Principer för mätteknik

Utöver de två olika angreppssätt för hur en pulsgivare genererar utsignaler (inkrementellt och absolut) finns även olika sensor tekniker för mätning av dessa utsignaler. Dessa påträffas ofta i industrin för pulsgivare och utgörs av optiska och magnetiska tekniker.

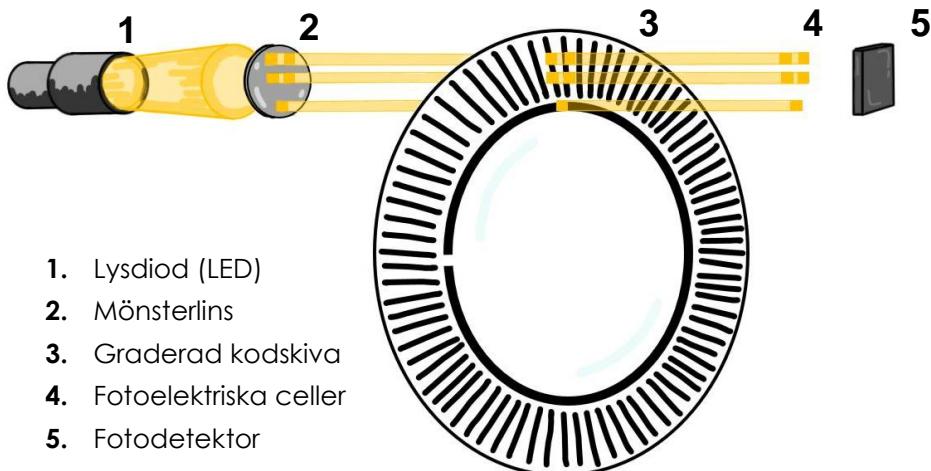
Optik

Optiska inkrementella pulsgivare ses vara den mest använda typen av pulsgivare då den ger snabbast och noggrannast återkoppling från mekaniska rörelser gentemot magnetiska tekniker. Den optiska sensor tekniken ses ge en upplösning på upp till 10 000 unika pulser per varv (ppr) till skillnad från den magnetiska sensor tekniken som ger en upplösning på uppemot 5000 ppr. Bara 5000 ppr ses motsvara en maximal vinkel på $0,01^\circ$ för varje pulssteg (vid förändring av axeln). Dessutom är tekniken okänslig för magnetism, vilket är fördelaktigt då magnetism kan störa ut vissa elektroniska kretsar (Leine & Linde, 2017). En optisk pulsgivares inre består i huvudsak av sex komponenter, ett givarhus, en ljuskälla, en mönsterlins, en kodskiva, en fotodetektor och ett kretskort, vilka illustreras i figur 13.



Figur 13: Illustration av en optisk pulsgivare. Visualisering produktarkitektur är baserad på Leine & Lindes befintliga produktutbud.

Principen för en optisk pulsgivare baseras på en fotoelektrisk skanningsprincip, se figur 14 på s. 34. Detta innebär att de inkrementalpulser som skapas i en pulsgivare skapas genom att en lysdiod sänder ut en ljussignal vilken projiceras genom en mönsterlins på en graderad kodskiva. På andra sidan kodskivan sitter en fotodetektor som läser av de inkommande fotoelektriska cellerna (fotodiодerna) som ges av det projicerade mönstret. På så sätt konverteras optisk ljusintensitet till spänning. (Yuan et al., 2019)



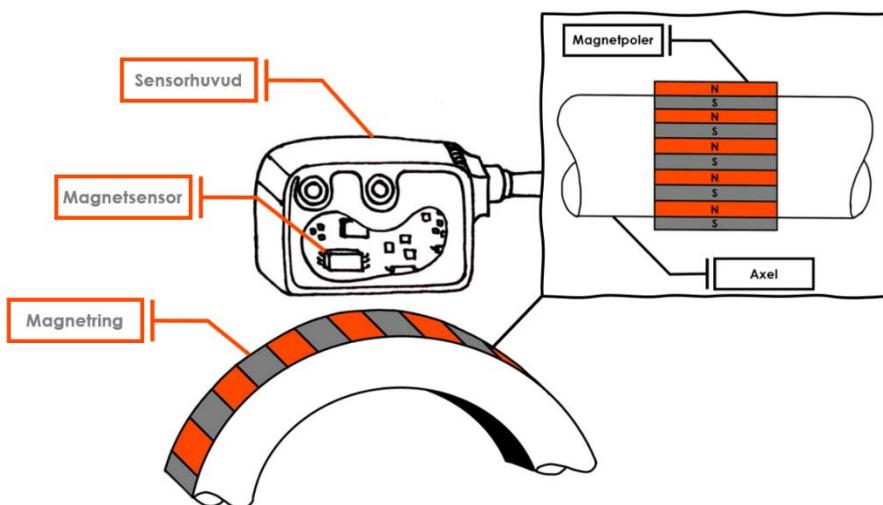
Figur 14: Visualisering av fotoelektrisk skanningsprincip. Inspirerad av Leine & Linde (2017).

Både mönsterlinsen och kodskivan ses vara genomskinliga för att ljuset ska kunna släppas igenom. Således består dessa komponenter ofta av glas, vilket medför att optiska pulsgivare ses vara mycket mer känsliga för kontamination och vibrationer än magnetiska pulsgivare. Dessutom medför skiftande fuktighet och temperatur att kondens bildas på kodskivan vilket resulterar i mätfel. Som nämnt i föregående avsnitt 3.3.2 *Olika typer av pulsgivare* ses kodskivan vara graderad med mörka ränder som inte släpper igenom något ljus. Eftersom kodskivan roterar med pulsgivaraxeln kan ljus släppas igenom när mönsterlinsen och kodskivan är i linje med varandra. Detta då mönsterlinsen fördelar och riktar ljuset mot kodskivan, vilket medför att varje fotodioid enbart ger en puls per varv. På så vis ges en utsignal från fotodioiderna i form av sinusliknande vågor som konverteras till fyrkantsvågor genom en fotodetektor. (Leine & Linde, 2017)

Magnetism

Till skillnad från optiska pulsgivare ses magnetiska pulsgivare vara mindre kostsamma att producera i och med en enklare produktarkitektur. Dessutom ses dem vara mer robusta då magnetiska komponenter innehåller högre tolerans mot extrema temperaturer, kontamination och vibrationer (Peng & Chang, 2021). Däremot ger de inte lika snabb och noggrann återkoppling som optiska pulsgivare (Leine & Linde, 2017).

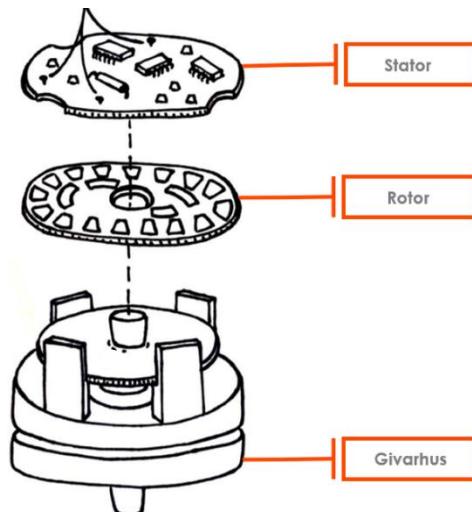
Principen för magnetism kan liknas vid elektricitet då två elektriskt laddade stavar har lika och olika ändar liksom en magnet har två motsatta ändar. Dessa ändar kallas nord- (N) och sydpol (S) där lika ändar repellerar och olika attraherar (Fräden, 2016). Då en magnetisk pol placeras i närheten av en metallstav kommer området att uppleva en kraft som enbart existerar då magnetpolen befinner sig i området. Detta förändrade område kallas för ett magnetfält. Magnetism ses ha en koppling till huruvida atomer är arrangerade, vilket innebär att magnetfältet har en fördefinierad riktning från nord- till sydpol (Fräden, 2016). En typisk magnetisk pulsgivare, visualiseras i figur 15 på s. 35, är en inkrementell ringpulsgivare som består av ett sensorhuvud och ett permanentmagnetiskt medium som uppvisar magnetfältets polaritetsmönster.



Figur 15: Illustration av en permanentmagnetisk pulsgivare. Visualisering produktarkitektur är baserad på Leine & Lindes befintliga produktutbud.

I sensorhuvudet sitter en magnetoresistiv sensor som syftar till att identifiera digitala signaler för att detektera rörelse relativt det underliggande magnetiska mediet (Peng & Chang, 2021). Den främsta fördelen med en sådan typ av pulsgivare är att den kan anpassas till en mängd olika axelstorlekar i och med ett externt sensorhuvud. Dock, kan ett externt sensorhuvud ge komplikationer i form av mätningsavvikelse. Då sensorhuvudet ständigt måste vara placerad i linje med magnetpolerna kan avvikelse fås på grund av större vibrationer eller monteringsfel (Peng & Chang, 2021).

Enligt Paredes et al. (2021) kan magnetfält även skapas av induktiva element på samma sätt som permanentmagneter. En sådan pulsgivare baseras på elektromagnetism och är ofta av typen absolut vilken ses ha en likvärdig uppbyggnad som optiska pulsgivare, se figur 16, fast med färre komponenter. Således ses de främsta fördelarna med induktiva pulsgivare innehållta en enklare monteringsprocess och robusthet inklusive tolerans mot större vibrationer (Paredes et al., 2021). Kodskivan (rotorn) för en induktiv roterande pulsgivare innehållar, liksom optiska pulsgivare, en cirkulär kedja av mönsterspår. I kontrast till optiska pulsgivare består dessa mönsterspår av ett metalliskt material, koppar eller aluminium, vilket möjliggör ledning. Då rotorn är i relativ rörelse gentemot de känsliga element hos mottagarkomponenten (statoren) transitteras en amplitudmodulerad (AM) signal som innehåller information om givarens position, hastighet och rörelseriktning (Paredes et al., 2021).



Figur 16: Illustration av en induktiv pulsgivare. Visualisering produktarkitektur är baserad på Leine & Lindes befintliga produktutbud.

3.4 Flexibla fjäderbelastade konstruktioner

Enligt Kobelev (2021) är mekaniska fjädrar vanliga maskinelement, vars huvudsakliga syfte är att tillhandahålla effektivitet och flexibilitet till en konstruktion, vilka används i ett brett urval av applikationer. Med förmågan att kunna deformera under belastning och återgå till ursprunglig form under avlastning används fjädrar ofta för att hantera chock (stötimpulser) och vibrationer då den kinetiska energin avleds. Kalpakjian & Schmid (2008) förklrar att fjädrar, liksom kugghjul, kammar och axlar, frekvent utsätts av cykliska eller periodiska laster på vilken leder till att komponenten fallerar vid en spänningsnivå lägre än nivån för vilka fel skulle inträffa under statisk belastning. Detta fenomen är känt som utmattningsfel och ansvarar för majoriteten av antalet fel hos mekaniska komponenter. Således utförs regelbundet olika utmattningstest vilka testar varierande spänningstillstånd så som vridning eller en kombination av drag och tryck. Utmattningsstyrkan för metaller har sålunda visats relatera till materialets brottgräns (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Det finns olika typer av fjädrar anpassade för olika situationer där den vanligaste ses vara spiralformad. Sådana fjädrar lagrar energi antingen genom tryck eller drag. Spiralfjädrar formas genom att metalltråd viras runt en spole och beroende på tätheten mellan varven får olika styvhetsgrad (Kobelev, 2021). Den kraft som krävs för att pressa ihop eller dra ut fjädern kan beräknas genom följande formel (Hooke's lag) vilken beskriver relationen mellan kraft och deflektion och gäller för alla linjära fjädrar (Collins et al., 2010):

$$F = k \cdot x \quad [N] \quad (b)$$

Där k kallas fjäderkonstant vilken beskriver fjäderns styvhetsgrad och x [mm] beskriver den totala längden som fjädern pressats ihop eller dragits ut. Kraften kan även beskrivas med hjälp av Newtons andra lag vilken examinerar de accelerationskrafter som påverkar det dynamiska systemet (Collins et al., 2010):

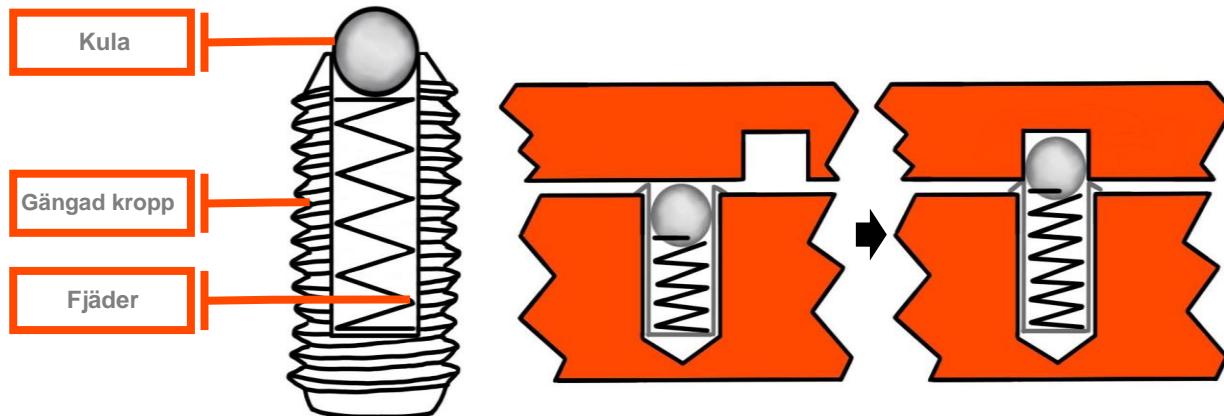
$$F = ma = \frac{W}{g} \cdot a \quad [N] \quad (c)$$

Där m beskriver fjäderns massa [kg] och a beskriver systemets acceleration [m/s^2]. Kraften kan även uttryckas i variabler av g vilken beskriver jordens gravitation [$9,82 m/s^2$] och W vilken beskriver systemets vikt i newton (Collins et al., 2010). Då en fjäderbelastad konstruktion ska konstrueras är de ingående delarnas egenfrekvens även av betydelse. Den frekvens som ett material eller komponent oscillerar då liten, om ingen, energi ges kallas egenfrekvens och kan beskrivas med följande formel (Berglund & Rohlén, 2017):

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [Hz] \quad (d)$$

Där k är fjäderkonstanten och m är den totala massan av de enskilda komponenterna i systemet. Egenfrekvensen bör bestämmas för att säkerställa att de oscillerande krafterna som utsätter konstruktionen inte sammanfaller med egenfrekvensen. Om dessa sammanfaller sätts konstruktionen lättare i självsvängning då det krävs en lägre kraft (Berglund & Rohlén, 2017).

Spiralformade fjädrar används vanligtvis för dämpning av olika konstruktionstyper. De används också som delelement i mekaniska komponenter så som fjädrande tryckskruvar (eng. spring plungers). Dessa används för att kontrollera en rörelse genom att försätta konstruktionen antingen i ett ”öppet” eller ”stängt” läge. En sådan applikation består, förutom en fjäder, också av en kula och en gängad kropp. Mekanismen, illustrerad i figur 17, kan beskrivas som att en kontaktkraft pressar ned kulan i den gängade kroppen varpå den komprimerade fjädern tillåter förflyttning av kulan då hela systemet sätts i rörelse. Vidare försätts kulan i ett annat läge gentemot utgångspositionen då kulan placeras i en välvning. Denna mekanism integreras enkelt i olika konstruktioner där komponenter önskas positioneras och låsas under kontrollerade förhållanden. (Cai et al., 2015)



Figur 17: Illustration av komponenter liksom mekanisk funktion hos en fjädrande tryckskruv (eng. spring plunger).

En annan typ av fjäder kallas vågfjädrar vilka har potential att ersätta den konventionella spiralfjädern. Detta då vågfjädern kan medföra likvärdig kraft och deflektion, men till hälften av utrymmet. Kshirsagar (2019) påvisar att konstruktionens storlek, inklusive samtliga delsystem, kan reduceras med uppemot 50 % då vågfjäderns längd ses lägre än konventionella spiralfjädrar men innehåller likvärdig fjäderkonstant. Detta medför också en reducerad vikt och råmaterialkostnad för varje producerad fjäder. Figur 18 visualiseringar respektive fjädertyp för att ge en tydligare bild av vad Kshirsagar (2019) menar.



Figur 18: Visualisering av en konventionell spiralfjäder (vänster) och en vågfjäder (höger) i förhållande till varandra.

3.5 Robusta konstruktioner

En robust konstruktion kan definieras som en konstruktion som fungerar, som avsett, trots variationer i dess miljö vilka inte ger idealiska förhållanden (Ulrich & Eppinger, 2014; Kalpakjian & Schmid, 2008). Exempelvis kan en sådan miljö innefatta variationer i tillverkningsprocessen eller i olika driftsituationer vilka kallas *störningar* och involverar faktorer som är svåra eller omöjliga att kontrollera (Ulrich & Eppinger, 2014; Kalpakjian & Schmid, 2008). Sådana faktorer inkluderar (a) variationer i omgivande temperatur och fuktighet, (b) slumpmässiga och oväntade vibrationer, (c) dimensions- och ytvariationer och (d) utförande av olika operatörer och maskiner vid olika tidpunkt under dagen eller på olika dagar (Kalpakjian & Schmid, 2008). Kalapkjian & Schmid (2008) påvisar hur materialegenskaperna styvhet och elasticitet generellt ökas med ökad temperatur. Temperaturen påverkar också hårdheten hos metaller på vilken materialet ges lägre hårdhet med ökad temperatur. Okontrollerade vibrationer, vilka utsätter konstruktioner och maskinkomponenter, resulterar i för tidigt slitage vilket förkortar produktens livslängd. Vibrationer kan också skapa större skador, vilka påverkar funktionaliteten och ytjämnheten, liksom oljud skapas (Kalapkjian & Schmid, 2008). Därigenom kan robust konstruktion även beskrivas som den produktutvecklingsaktivitet vilken ämnas förbättra önskad prestanda hos konstruktionen, samtidigt som effekterna av störningarna minimeras (Ulrich & Eppinger, 2014).

För att säkerställa en konstruktions robusthet ses strukturen vara en betydande faktor att beakta vid utformning. Exempelvis ses en konstruktion vilken verkar i en vibrationsrik eller en högbelastande miljö kräva noga undersökning av huruvida eventuella hål i strukturen påverkar konstruktionen negativt på vilken hålen bedöms vara nödvändiga eller inte. Detta då en hålstruktur generellt medför försvagningar i konstruktionen. Wang et al. (2021), Toubal et al. (2005) och Chauhan & Sharma (2015) påvisar, utifrån olika perspektiv, huruvida relativt stora spänningskoncentrationer skapas kring hål. Studierna har berört tester för att påvisa given tes där olika material har beaktats för respektive studie. Således ses en hålstruktur medföra försvagningar, i olika grad, oavsett material. Wang et al. (2021) påvisar hur en ytstärkande process kan reducera spänningskoncentrationerna kring ett flertal cirkulära hål i ett nickel-legerat material och därmed reducera risken för sprickbildning. Toubal et al. (2005) undersöker uppstådda spänningskoncentrationer kring cirkulära hål i ett kompositmaterial. Utifrån undersökningen konstaterar Toubal et al. (2005) att stora spänningskoncentrationer ges kring hålen då kompositmaterial är ett anisotropiskt material, vilket inte är lika styvt som ett isotropiskt. Chauhan & Sharma (2015) utvärderar huruvida hålgeometrin har betydelse för uppstådda spänningskoncentrationer. Detta genom att undersöka hål med rektangulär geometri vilka är vridna olika många grader. Chauhan & Sharma (2015) konstaterar efter utförd empirisk undersökning att faktorer så som materialegenskaper, hålgeometri, ytstorlek, tjocklek och belastningsförhållanden har alla betydande inverkan på spänningkoncentrationerna kring rektangulära hål.

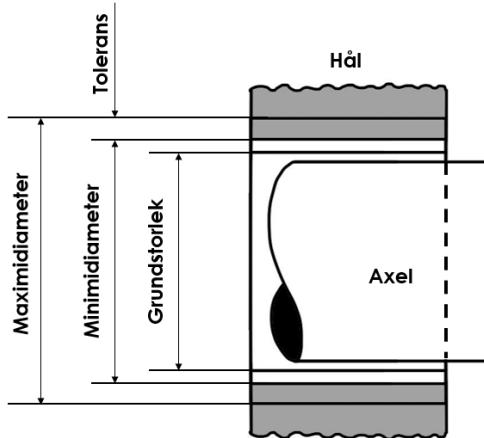
Vid utformning av robusta produkter finns ett par designprinciper vilka bör beaktas oavsett fas i produktutvecklingsprocessen. Dessa principer utgörs av DFM och DFA vilka ses användbara i tidig konceptutveckling liksom vid val av tillverkningsmetoder (Kalpakjian & Schmid, 2008). DFM utgörs av en tillverkningsanpassad metod vilken är av universell betydelse och handlar om att minimera tillverkningskostnader, samtidigt som en hög produktkvalitet erhålls, på vilken bidrar till ekonomisk framgång (Ulrich & Eppinger, 2014). DFM bör påbörjas redan i tidig konceptutvecklingsfas när kravspecifikationer upprättas. Vidare görs trade-offs mellan önskade produktegenskaper vilka är

avgörande för den slutliga kostnadsbedömningen. DFM-metoden beaktar kostnader för komponenter (standardkomponenter eller unika delar), montering (arbetskraft och utrustning) och produktionssupport (Ulrich & Eppinger, 2014). Efter att individuella delar har tillverkats ska dem monteras. Monteringsfasen har stor betydelse för tillverkningsprocessen som helhet vilken kräver beaktning av huruvida delar enkelt, snabbt och kostnadseffektivt kan monteras ihop. Men också huruvida demontering hanteras på effektivt sätt för att underlätta underhåll och återvinnning. Sålunda ses DFA vara betydande för tillverkningsprocessen liksom för DFM (Ulrich & Eppinger, 2014).

Baserat på analyser av monteringsprocesser har ett flertal riktlinjer för DFA utvecklats vilka beskrivs nedan (Kalpakjian & Schmid, 2008):

1 Antalet komponenter liksom komponentvarianter i en konstruktion bör minimeras och flera funktioner bör integreras i en enskild komponent. Dessutom bör delmontage, vilka verkar som moduler, övervägas. (Kalpakjian & Schmid, 2008)

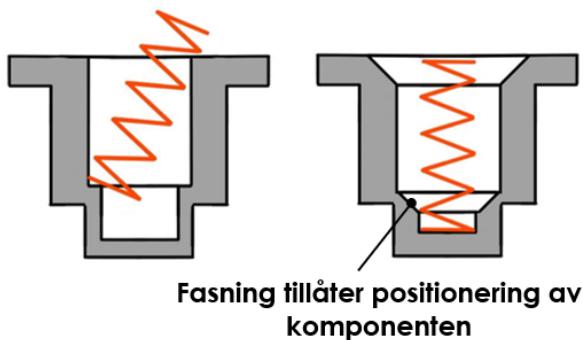
2 Komponenter bör innehåga hög grad av symmetri (exempelvis rund eller kvadratisk form), alternativt innehåga en hög grad av asymmetri (exempelvis oval eller rektangulär form). Detta elimineras risken för felmontering då de inte är beroende av en specifik position, inriktning eller justering. Dessutom bör komponenter designas för enkel montering i andra komponenter. Således är toleranser oundvikligt, dels för att det inte är möjligt att tillverka två komponenter som har exakt samma dimensioner, dels för att det inte är möjligt att montera två komponenter om dem har exakt samma dimensioner. Dimensionell tolerans definieras således som tillåten eller acceptabel variation i dimensioner (höjd, bredd, djup, diameter, vinklar). Som illustreras i figur 19 krävs ett visst spelutrymme då en axel ska monteras i ett hål, vilket är tillräckligt stort för att axeln ska gå in men tillräckligt litet för att undvika glapp. (Kalpakjian & Schmid, 2008)



Figur 19: Illustration av dimensionell tolerans. Inspirerad av Kalapkjian & Schmid (2008)

3 Komponenter bör kunna monteras utan större hinder eller utan någon märkning som riktlinje (Kalpakjian & Schmid, 2008).

- 4** Konstruktionen bör helst undvika behovet av fästelement så som bultar, muttrar och skruvar. Om fästelement inte kan undvikas bör de minimeras och placeras på ett sätt som underlättar montering. (Kalpakjian & Schmid, 2008)
- 5** Framtagning av komponenter bör beakta faktorer så som storlek, form, vikt, flexibilitet, slipande egenskaper och eventuell problematik med andra komponenter (Kalpakjian & Schmid, 2008).
- 6** Vid montering bör inte delmontaget kunna vändas för att komponenter ska kunna föras in i en viss riktning vilken tar fördel av exempelvis gravitationen (Kalpakjian & Schmid, 2008).
- 7** Produkter bör designas så att inga fysiska hinder uppstår vid montering. Exempelvis bör skarpa hörn ersättas med fasningar eller avrundningar, se figur 20. (Kalpakjian & Schmid, 2008)



Figur 20: Illustration av produktutformning vilken underlättar positionering vid montering. Inspirerad av Kalpakjian & Schmid (2008)

- 8** Komponenter som tillsynes ser likadana ut, men skiljer sig, bör färgkodas (Kalpakjian & Schmid, 2008).

Vid utvärdering av effektiviteten hos en monteringsprocess bedöms varje komponent i ett montage med hänsyn till funktioner som kan påverka monteringen. Dessutom görs en bedömning av uppskattad totaltid för montering av hela produkten. Monteringseffektiviteten ges av nedanstående formel, vilken presenteras av Kalpakjian & Schmid (2008), där N_t avser antalet komponenter och t_{tot} avser total monteringstid i sekunder.

$$\nu = \frac{N_t}{t_{tot}} \quad [s] \quad (e)$$

3.6 Funktionssäkerhet korrelerat givarkonstruktion

Vid mekanisk konstruktion bör funktionssäkerhet beaktas kontinuerligt genom hela produktutvecklingsprocessen för att uppnå en robust konstruktion; potentiella risker och åtgärder bör identifieras tidigt i designfasen för att senare re-examineras, exempelvis med hjälp av proaktiva analysstekniker så som FMEA och FTA. Kazanzides (2009) påvisar två säkerhetsaspekter som bör beaktas vid konstruktion av industriella applikationer där den första berör huruvida ett system är felsäkert eller feltolerant. Ett felsäkert system tillåter fel att uppkomma så länge systemet sätts i ett säkert tillstånd då felet uppstår. Medan ett feltolerant system måste fortsätta att fungera även då felet uppstår. Den andra säkerhetsaspekten beaktar den nivå för felets allvarsgrad som kan tolereras innan en säkerhetsåtgärd initieras, vilket ses viktigt då många fel inte kan upptäckas förrän ett specificerat tröskelvärde överskrids. Således krävs ett kommunicerande kontrollsysteem som ger återkoppling när detta värde har överskridits. Med andra ord ges en återkoppling när en avvikelse mellan önskat värde och uppmätt värde uppstår (Kazanzides, 2009).

Kazanzides (2009) påvisar betydelsen av att konstruera en säkerhetsanpassad design och har därför utvecklat tre metoder som kan användas för att säkerställa kontrollsysteems funktionalitet: 1) Redundant pulsgivare med mjukvarukontroll; 2) Mjukvarukontroll för spårningsfel; 3) Vakthund för att stänga av strömmen.

- 1** Syftet med användning av en redundant pulsgivare är att uppmätt resultat kan jämföras mellan de två givarna. Om programvaran upptäcker ett mjukvaru- eller komponentfel i den ena kan den koppla från den från systemet utan att initiera ett driftstopp. På så sätt ges ett feltolerant system. (Kazanzides, 2009)
- 2** Mjukvarukontroll för spårningsfel säkerställer att avvikelsen mellan uppmätt och önskat resultat återfinns inom ett specificerat intervall (tröskelvärde). Annars initierar programvaran ett driftstopp av systemet. På så sätt ges ett felsäkert system. (Kazanzides, 2009)
- 3** Vakthundsprincipen är en väletablerad metod som skyddar mot uppkomna processor- och mjukvarufel. Generellt, är det en extern härvaruenhet som säkerställer att mjukvaran fungerar som utlovat, annars kopplas systemet ifrån drivsystemet vilket initierar ett driftstopp. Kazanzides (2009) påpekar att ett system aldrig kan vara fullt redundant om inte individuella komponentfel kan detekteras. Detta eftersom ett fel i en givare medför att systemet fortsätter att köra varpå nästa gång ett fel uppstår ses givaren som ett singelkanalsystem, vilken riskerar att försätta systemet i en mycket allvarligare situation (Kazanzides, 2009).

Moubray (1997) menar att vakthundsprincipen kan tillgodoses genom automatiska skyddsanordningar på vilken elimineras eller reduceras uppkomna fel. Sådana anordningar syftar till att (1) uppmärksamma abnormala förhållanden genom varnande ljus- och/eller ljudsignaler vilka påvisar uppkomna fel, (2) initiera driftstopp av systemet vid felläge, (3) eliminera eller avhjälpa abnormala förhållanden vilka annars riskerar att orsaka mer allvarliga skador, (4) ersätta en funktion som har fallerat såsom redundanta komponenter eller (5) förhindra farliga situationer att inträffa (Moubray, 1997).

Under designfasen görs ofta kontinuerliga bedömningar av konstruktionens tillförlitlighet vilka normalt baseras på tester och/eller tidigare erfarenheter. Säkerhet ses korrelera med tillförlitlighet då säkerhetsnivån för en konstruktion ses öka med ökad tillförlitlighet. Tillförlitlighet kan beskrivas som förmågan att utföra en funktion under given tidsperiod och givna förhållanden. Medan säkerhet evaluerar effekten av ett potentiellt fel och beaktar sannolikheten att felet sker. Efinger et al. (2022) understryker tillförlitlighetens beroendefaktorer som styrka/styvhetsgrad, utmattning, livslängd och redundans. Exempelvis kan en säkerhetsmarginal adderas till designen varpå en ökad mängd material krävs, vilket förbättrar konstruktionens hållfasthet och förmåga att motstå utmattning. På samma sätt som underhåll och redundans förlänger konstruktionens livslängd. Under designfasen är det till synes viktigt att evaluera tillförlitligheten hos konstruktioner. Det gäller allra minst kullagerkonstruktioner vilka inkluderar mekaniska komponenter med en livslängd som är kortare än livslängden för den etablerade konstruktionen. Detta riskerar att leda till uppkomna fel tillstånd vilka avbryter den funktion som förväntas utföras. Således ses sensorer och intelligenta kontrollsysteem ytterst betydande för att minska spänningar och deformationer hos konstruktionen. Genom tillståndsövervakning kan kritiska situationer detekteras, vilket underlättar och effektiviseras underhållsprocessen (Efinger et al., 2022).

Tillståndsövervakning är enligt Xu et al. (2022) en vanlig insats vilken ökar maskineriets tillgänglighet och prestanda, minskar följdriftiga skador, ökar maskinlivslängden, minskar reservdelslager samt minskar underhåll av haverier. Ett effektivt program för tillståndsövervakning innefattar ett system som varnar och förutser fel tillstånd i tidigt stadium (Xu et al., 2022). Bhavsar & Patel (2013) redogör för en rad olika övervakningstekniker som har utvecklats för elektriska induktiva roterande maskiner vilka beaktar olika maskinvariabler. Lagerfel gör sig ofta märkbara i form av ökad temperatur, hörbart ljud, minskad noggrannhet, höga vibrationer i maskinerna samt förändringar i statorströmmarna vilka medför excentricitet i luftspalten. Således finns, enligt Bhavsar & Patel (2013), sex tekniker som vanligen används för övervakning av kullager: 1) temperaturmätning; 2) bullermätning; 3) stötpuls- och vibrationsmätning; 4) mätning av elektromagnetiska avvikelse. Tabell 6, på s. 43, presenterar en sammanställning av dessa övervakningstekniker vilken även beskriver respektive teknik.

Tabell 6: Sammanställning av vanliga övervakningstekniker för maskiner med induktivt drivsystem. Källa:
(Bhavsar & Patel, 2013)

Övervakningsteknik		Beskrivning
1	Temperaturmätning	Utförs genom att mäta lokala temperaturförändringar hos maskineriet.
2	Bullermätning	På grund av en luftspalt orsakad av excentrisk avvikelse mellan rotor och stator skapas, delvis, vibrationer vilka medför buller. Genom att mäta och analysera bullernivån, avvikande från normalt tillstånd, kan fel detekteras. Dock, ger denna teknik låg noggrannhet på grund av buller från omgivande maskiner.
3	Stötpuls- och vibrationsmätning	Vibrationer i elektriska maskiner orsakas av endera magnetiska, mekaniska aerodynamiska krafter vilka skapar obalans i konstruktionen. Vibrationsmätning är mycket användbar för övervakning av induktiva motorer.
4	Mätning av elektromagnetiska avvikelser	Genom att mäta elektromagnetiska värden som avviker från normalt tillstånd kan maskinfel registreras varpå maskinens hälsotillstånd kan kontrolleras.

Den vanligast förekommande tekniken ses vara vibrationsbaserad vilken har fått stor industriell utbredning. Sådan övervakningsteknik är direkt kopplad till dynamiskt beteende hos maskinen där feldiagnosering sker genom att indirekta variabler för externa krafter jämförs. Exempelvis värden för tillverknings- och installationsavvikelser, belastnings- och hastighetssvängningar, smörjningstillstånd samt maskinfel jämförs med önskade värden. Nackdelen är att tekniken kräver extra sensorer för datainsamling. (Xu et al., 2022)

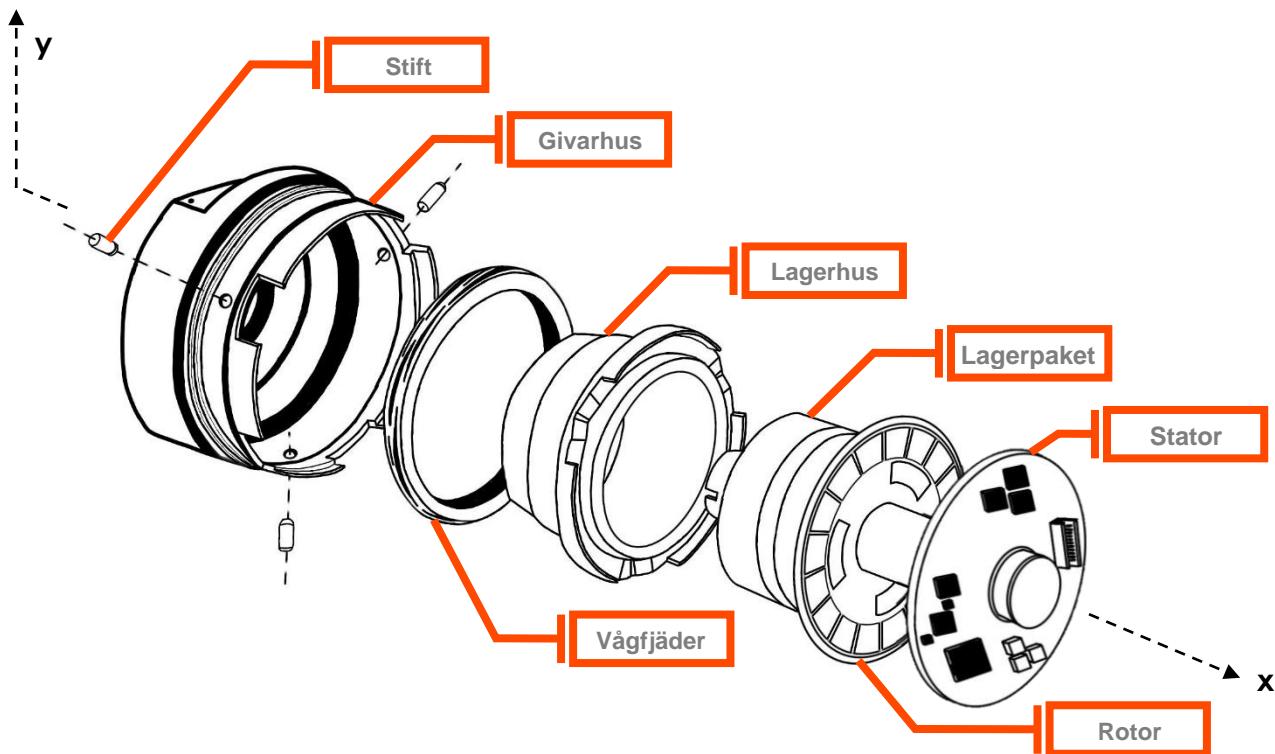
En ytterligare konstruktionsaspekt värd att tillägga berör det faktum att många tillverkare idag fokuserar på kundanpassade produkter då kunder ofta önskar produkter som passar deras individuella behov (Schulze et al., 2013). Men mekaniska konstruktioner och maskinelement behöver också anpassas efter specifika material- och geometrikrav för att uppfylla funktionell prestanda och motstå kontextspecifika laster, moment, miljöer och potentiella feltillstånd (Collins et al., 2010). För att tillfredsställa funktionella behov liksom kundbehov på ett lönsamt sätt inför många tillverkare variabilitet i sin produktion. Schulze (2013) definierar variabilitet som möjligheten att använda ett system eller en artefakt i olika kontexter genom att förändra eller anpassa vissa egenskaper. Fördelen med att utveckla nya produktvarianter gentemot att starta upp enskilda produktutvecklingsprojekt är att utvecklingstiden, generellt, reduceras samtidigt som kvaliteten förbättras. Däremot ges utmaningar som är korrelerade till funktionssäkerhet. Till att börja med tar varken FMEA eller FTA hänsyn till variabilitet. Dessutom kan återanvändning av funktionssäkra artefakter inom en ny kontext vara svåra att få godkända då de internationella säkerhetsstandarderna inte enbart berör själva artefakten utan även kontexten (Schulze et al., 2013).

4 Empirisk studie

Detta kapitel ger en utförlig beskrivning av den empiriska studie som genomförts, vilken har lett fram till det slutliga resultatet.

4.1 Definiering

Studien inleddes med att ge skribenten en djupare förståelse för det tidigare utvecklade och patenterade konceptet som studien har som utgångspunkt. Konceptet syftar till att möjliggöra en tillförlitlig och säker drift av roterande pulsgivare innefattande i huvudsak en rotor, stator, axel och ett lagerpaket med två kullager. På så vis uppnås en automatiserad och användarvänlig detektering av lagerfel hos pulsgivaren. Konceptet, illustrerad i figur 21 på s. 45, kan beskrivas utifrån två tillstånd: normaltillstånd och feltillstånd. Under normalt tillstånd ges ett visst avstånd, på ungefär 0,8 mm, mellan rotor och stator vilken är optimalt för att ge noggrann och tillförlitlig detektering av positionsförändringar hos axeln. Vid feltillstånd har lagren förlorat sin rotationsförmåga vilket medför ett ökat moment av kullagren, vilket i sin tur resulterar i att lagerhuset roterar med lagren. Med hjälp av en stiftfunktion ges en kraft från lagerhusets rotation vilken pressar ihop en fjäderenhets. Då stiften vilar i en dal läses lagerhusets position efter att fjäderenheten komprimerats. Det avstånd som skapas mellan rotorn och statorn ses ökas, gentemot normaltillståndet, till en nivå som innebär att detektering av positionsförändringar hos axeln avbryts. Således är avståndet mellan rotorn och statorn inte tillräckligt litet för att ge noggrann och tillförlitlig detektering av positionsförändringar hos axeln. Den programvara som ses kopplas ihop med denna lösning ämnas inkludera rutiner för att generera en alarmerande signal då detektering av axelns position avbryts. (Gustafsson, 2021)



Figur 21: Visualisering av konceptuell lösning, vars syfte är att detektera låsta lager i roterande induktiva pulsgivare, patenterad av Mats Gustafsson för Leine & Linde.

Vidare, efter att en förståelse av konceptet fåtts, formulerades en uppdragsbeskrivning vilken tydliggör de förväntningar som gavs från fallföretaget. Dessutom ämnas uppdragsbeskrivningen ge en ytterligare insikt i syftet med mekanisk utveckling av en funktionssäker pulsgivare. Uppdragsbeskrivningen presenteras nedan i tabell 7.

Tabell 7: Sammanställning av upprättad uppdragsbeskrivning.

Kategori	Beskrivning
Produktbeskrivning	Utveckla en mekanisk lösning som vid överstiget moment på kullager skapar axiell rörelse mellan rotor och stator.
Förslag på fördelar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Utökad funktionalitet i funktionssäkra pulsgivare med hjälp av tillståndsovervakning av kullager. ▪ Tillståndsbaserat underhåll; möjlighet att planera underhåll och därmed minska risker för oväntade kritiska haverier. ▪ Reducerade kostnader då underhåll i förebyggande syfte inte behöver utföras i samma utsträckning. ▪ Längre livslängd för komponenter som innehåller kullager.
Mål	Utvärdering och realisering av en patenterad lösning samt förslag på vidare studier.
Antaganden och begränsningar	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Enbart mekanisk lösning avses (elektronik beaktas ej) ▪ Enbart ett delsystem beaktas

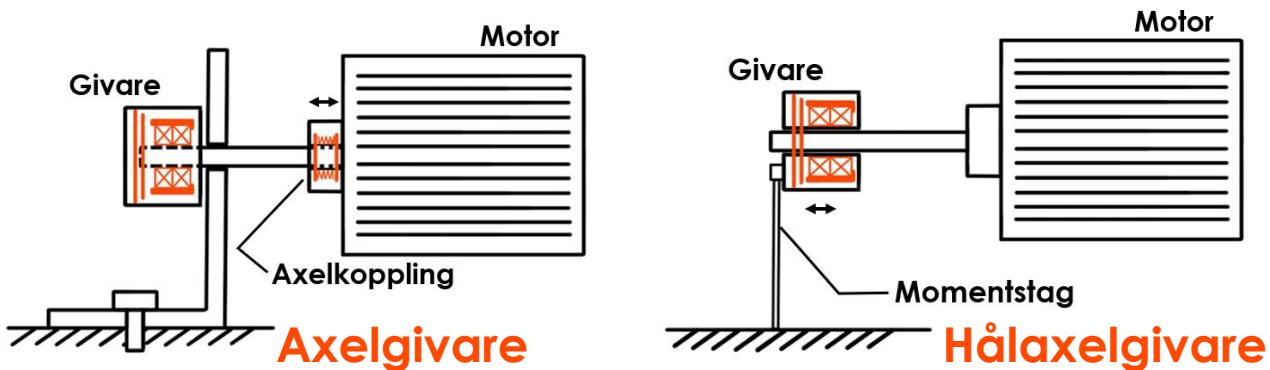
Utifrån uppdragsbeskrivningen specificerades i samråd med fallföretaget ett antal krav, se tabell 8, vars syfte var att utpeka studiens riktning för att försäkra att studiens resultat ses gynnsam för fallföretaget. Värt att notera är att dessa kravspecifikationer inte bedöms påverka generaliteten av resultatet då samtliga delresultat ses relevanta för att besvara forskningsfrågorna, särskilt F1 som berör konstruktion av mekanisk lösning, på en generell nivå. Respektive krav har värderats med antingen ett minimivärde, maximivärde eller ett intervall för att indikera önskat mål. Dessutom har kraven givits en prioriteringsfaktor (1-5) vilken påvisar vikten av respektive krav.

Tabell 8: Sammanställning av definierade kravspecifikationer.

Nr.	Egenskap	Prioritering	Enhet	Målvärd (A)
1	Givarhus; Diameter	Krav	mm	A = 58
	Kullager; Diameter	Krav	mm	A = 32
	Kullager; Höjd	Krav	mm	A = 10
2	Axel; Diameter	Krav	mm	A = 12
2	Utökat axiellt avstånd	Krav	mm	$1 \leq A \leq 1,5$
3	Maximalt vridmoment (M)	5	Nm	A = 5
4	Temperaturtolerans	5	°C	-40 < A < +100
5	Motstå axiell axellast (F_a)	3	N	A = 100
	Motstå radiell axellast (F_r)	3	N	A = 125
6	Tillåten egenfrekvens	4	Hz	$50 \leq A \leq 100$
7	Vibrationstolerans	3	m/s ²	A ≤ 300

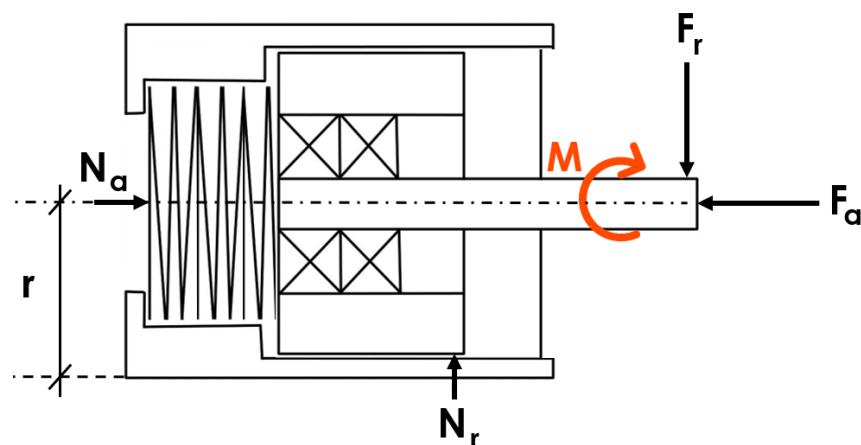
Inledningsvis specificerades dimensionskrav vilka omfattar mått på kullager, axel och givarhus. Specifika mått fastställdes med hänsyn till applikationsavgränsningen, det vill säga givarens applicerbarhet i fallföretagets 600-serie. Serien innefattar två givarvarianter vilka kallas axel- respektive hålaxelgivare. En axelgivare ses appliceras i ett hål försedd av kunden, medan en hålaxelgivare ses appliceras direkt på en axel försedd av kunden (Leine & Linde, u.å,-c). Oavsett givarvariant finns två vanliga typer för kopplingsmontage vilka benämns synkro- respektive klämkoppling. Synkrokoppling avser koppla ihop givare och axel med ett kilförband, medan klämkoppling avser nyttja så kallade lameller för att klämma ihop givare och axel (Leine & Linde, u.å,-c). Vidare specificerades krav innefattande den nivå till vilken utökat axiellt avstånd önskades uppnå, där 1-1,5 mm sågs lämpligt. I samråd med fallföretaget gavs ett

godtyckligt antagande av att ett tillägg på minst 1 mm får statorn, och därmed sensorn, att förlora kopplingen med rotorn. Däremot förutsätter kravet axiell förflyttning av endera axeln eller den egentliga givaren (rörelsen mottas av anslutet momentstag) vilka är två fall som studien ses beakta. Den mekaniska lösningen, vilken möjliggör förflyttning av rotorn, förutsätter därav två typer av inspänningssmetoder vilka ses bero på om givaren ses vara av typen axelgivare eller hålaxelgivare. Vid användning av en axelgivare ses givaren vara fast inspänd, medan vid användning av en hålaxelgivare ses axeln vara fast inspänd. Figur 22, nedan, illustrerar respektive fall på vilken den mekaniska lösningen ses förutsätta fri rörelse i endera axelkopplingen eller av anslutet momentstag.



Figur 22: Illustration av huruvida förväntad rörelse sker i endera axelkopplingen (vänster) eller av den egentliga givaren (höger).

Fortsättningsvis specificerades olika kriterium vilka relateras till konstruktionens tolerans mot yttre krafter, se figur 23 för illustration. Med andra ord specificerades huruvida givaren förutsätts tolerera varierande temperatur, laster och vibrationer, där konkreta värden fastställdes baserat på målvärden för fallföretagets befintliga produkter. I samråd med fallföretagets R&D gavs ett godtyckligt antagande för det maximala vridmoment (M), vilken anses behöva ansättas för att rotera axeln då lagren låses vid en temperatur på -40 °C, till 5 Nm. Antaget vridmoment tar hänsyn till kyla då det generellt krävs ett 30 % högre vridmoment i kyla än i varme (1,9 respektive 1,4 Nm vid låsta lager) enligt fallföretaget.



Figur 23: Illustration av axiella och radiella krafter vilka påverkar pulsdriften då den utsätts för ett vridmoment.

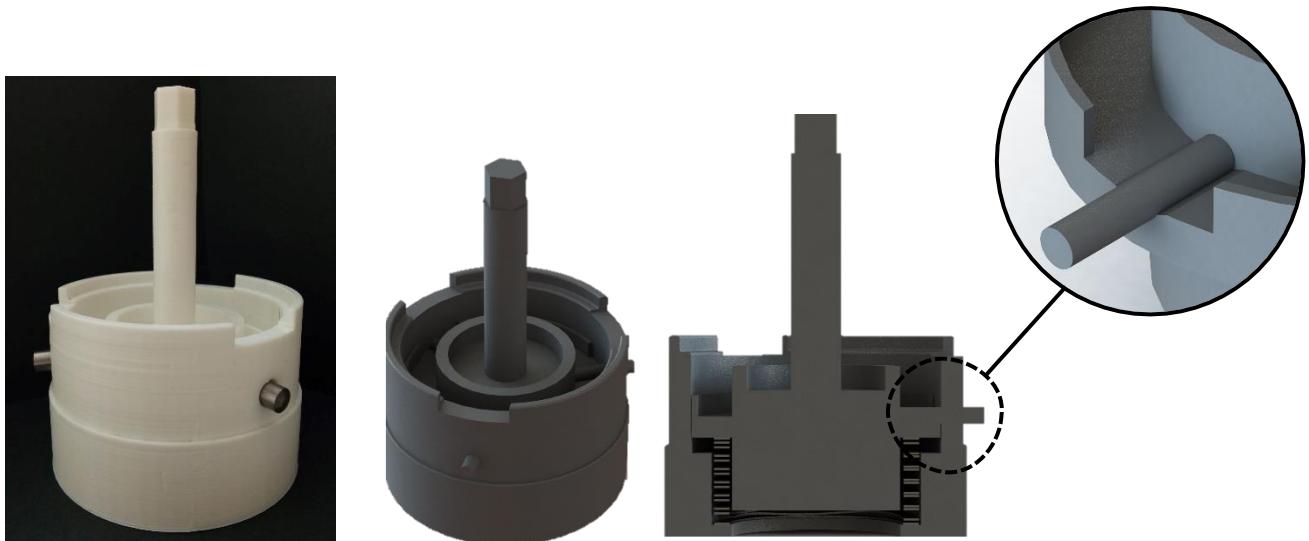
Då konstruktionen kan komma att belastas i endera axiell (F_a) eller radiell (F_r) riktning vilken har betydelse för ansatt vridmoment, och därmed funktionen hos den mekaniska lösning som ämnas tas fram, specificerades krav vilka beskriver maximalt tillåtna axellaster. Dessa värden baseras på de målvärden som gäller för fallföretagets befintliga produkter inom 600-serien och bör beaktas vid utvärdering av det slutligt framtagna konceptet. Som illustreras i figur 23, på s. 47, motsätts respektive axellast av en normalkraft som i axiell riktning utgörs av en fjäderkraft och i radiell riktning av en kontaktkraft vilka bör beaktas för att ge den slutliga utvärderingen en rättvis bild. Vidare specificerades krav vilka ger vägledning vid bedömning av godtycklig egenfrekvens och vibrationstålighet. I dagsläget appliceras fallföretagets givare på olika drivsystem vilka behandlar ett varvtal mellan 3000 och 6000 rpm (50-100 Hz). För att undvika oönskade svängningar, vilka ges av givarens egenfrekvens, bör egenfrekvensen inte vara detsamma som drivsystemets där en differens på minst 30 % ses önskvärt. I och med att fallföretagets givare ses appliceras i krävande miljöer bör konstruktionen vara mindre känslig för vibrationer. Med fallföretagets befintliga krav för 600-serien ses konstruktionen inte få utsättas för vibrationer vilka är större än 300 m/s^2 .

4.2 Konceptutveckling

Följande avsnitt behandlar den initiala utvecklingsfasen vilken har utförts i sex iterationer. Inledningsvis presenteras den första iterationen inklusive den process vilken beskriver huruvida utgångspunkten utvärderats. Vidare presenteras de påföljande iterationerna på vilka beskriver ytterligare konceptalternativ vilka har utvecklats med utförd utvärdering och givna kravspecifikationer som grund. Utförda iterationer beskrivs således i takt med utvecklingsprocessen vilka inkluderar detaljerade illustrationer och prototyper.

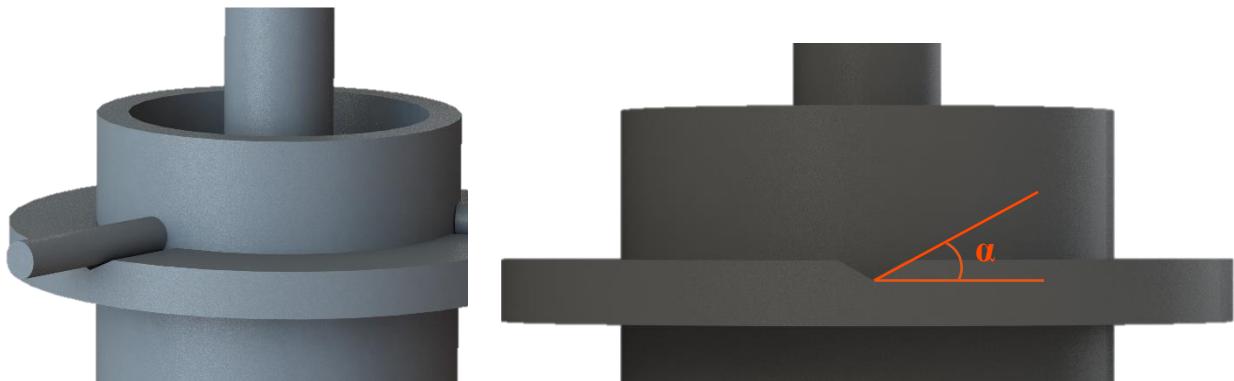
4.2.1 Iteration noll: Utvärdering av grundkoncept

Konceptutvecklingsfasen inleddes med att utvärdera den teoretiska, patenterade, lösningen vilken benämns som *grundkoncept*. Till att börja med modellerades konceptet i CAD, se figur 24 på s. 49, utifrån en skiss tillhandahållen av fallföretaget. Vidare skapades en prototyp av grundkonceptet där de huvudsakliga komponenterna tillverkades med hjälp av en FDM-baserad 3D-skrivare, medan fjäder och stift tillhandahölls av fallföretaget. Resultatet från prototypen diskuterades med fallföretagets R&D vilken påvisade brister i konstruktionen. Initialt gavs insikten att lagerhusets sidoytor potentiellt förhindrar stiftets rörelse vid överstiget moment på kullager. Detta då det ännu är okänt till vilken grad lagerhuset roterar; felet upptäcks och registreras varpå motorn stängs av, men avståndet motor förväntas fortsätta rotera ett antal varv innan den till slut stannar. Således riskeras överbelastning på övrig konstruktion då stiften når sidoytorna på vilken maskineriet vill fortsätta rotera. Grundkonceptet ses därför förutsätta nyttjande av en klämkoppling, då en axelgivare avses, vilken minskar påfrestningen på själva givaren då kopplingen ses vara det som brister först.



Figur 24: Presentation av grundkonceptet vilken visualiseras med renderade CAD-bilder och fysisk prototyp.

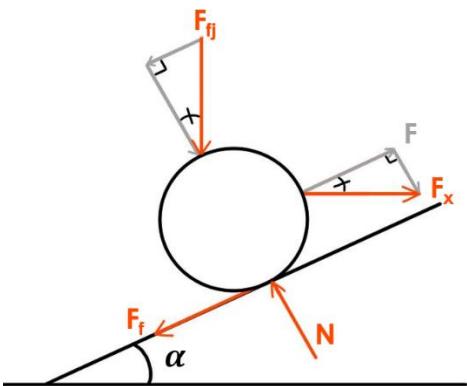
En ytterligare insikt som gavs berör huruvida konceptet anses ge tillräcklig stabilitet, i axiellt led, trots fjäderkomponenten. Eftersom stiften vilar på en fjädrande komponent riskerar dem att lämna sin position då vibrationer utsätter konstruktionen. För att ge en mer konkret bild av problematiken framställdes initiala beräkningar, vilka beaktar fjäderkonstanten och vinkeln, α , som stiften ämnas stiga uppför vilken visualiseras i figur 25.



Figur 25: Visualisering av utformad dal, inklusive stigvinkel, vilken ämnas positionera respektive stift.

Till att börja med omvandlades förväntat moment på 5 Nm till motsvarande kraftstorlek där lagerhusets maximala diameter mättes till 50 mm på vilken ger en radie, r , på 25 mm:

$$M = F \cdot r \Rightarrow F = \frac{M}{r} = \frac{5}{0,025} = 200 \text{ N}$$



Figur 26: Friläggning av ett stift vilken ämnas befina sig mitt på det lutande planet.

Fortsättningsvis ställdes en friläggning upp av situationen, se figur 26. Med hjälp av friläggningen gavs en formel vilken beräknar motsvarande kraft i momentets riktning (F_x) där α och fjäderkraften (F_{fj}) är beroendevariabler på vilken friktionskoefficienten uppskattas vara 0,2 då materialet förutsetts vara aluminium där ytfinhet enbart ges ett antagande:

$$F_x(\alpha) = \frac{F_{fj} \cdot \sin(\alpha) - \mu F_{fj} \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

Vidare uppskattades lämplig fjäderkraft vilken jämförs mot beräknad F_x för respektive stift, det vill säga en tredjedel av F . Detta påvisar att en fjäderkraft på 135, 180, 250 och 410 N krävs för att motstå ett moment på 5 Nm där en stigvinkel på 20°, 25°, 30° respektive 35° beaktas.

Grundkonceptet, som konceptuell lösning, medför att fjäderkomponenten kommer pressas ihop vartefter lagerhuset roterar på vilken får respektive stift att stiga uppför det lutande planet. Detta innebär att den kraft som krävs för att rotera lagerhuset kommer att ökas med rotationen. Således bör denna ökning kontrolleras och bedömas. Beräkning av förväntad ökning utgår från given vågfjäder vilken har en fjäderkonstant på 8,66 N/mm. Given fjäder har artikelnr CMS50-L5 vilken återfinns hos fjädertillverkaren SMALLEY. För att kontrollera förväntad ökning beräknas och jämförs fjäderkonstanten vid förspänt läge (x_{min}) respektive hoptryckt läge (x_{max}). Beräkningarna påvisar att en vinkel på 20°, 25°, 30° respektive 35°, där F_x för respektive vinkel beaktas, resulterar i en maximal hoptryckning på 47, 29, 21 respektive 16 mm krävs. Detta ger en förväntad ökning av fjäderkraften på 4-8 %. Däremot innebär påvisat resultat att en fjäder med högre fjäderkonstant krävs för att reducera den maximala hoptryckningen, vilket därmed medför en mer kompakt design. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix C.

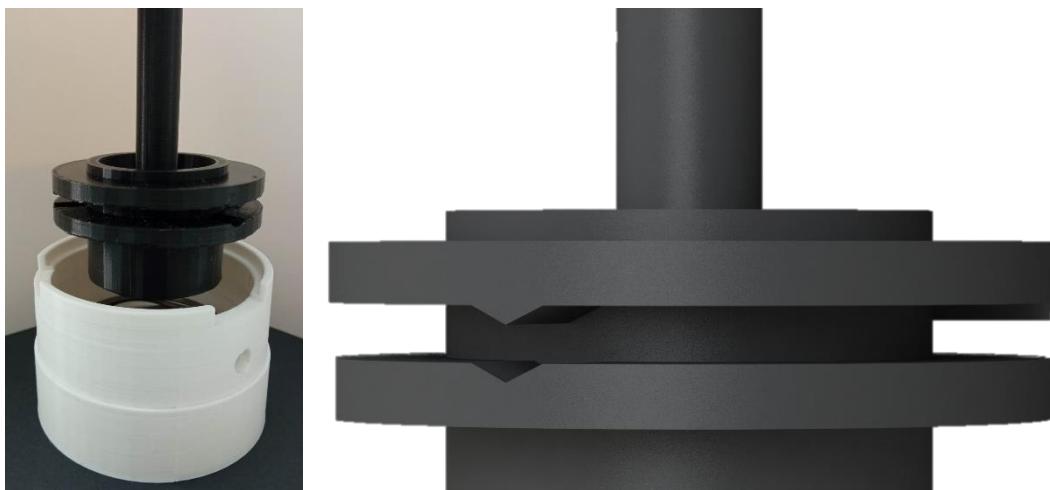
Sammanfattningsvis har beräkningarna påvisat att stiftet lättare glider fram på ett lutande plan än ett vågrätt. Det vill säga ju högre vinkel desto lägre fjäderkraft krävs förutsatt att inte vinkeln är 90°. Däremot har beräkningarna även visat att ju högre vinkel desto större skillnad ges mellan förspänd och maximalt komprimerad fjäder. Således ses en vinkel mellan 25° och 30° lämpligast då en fjäderkraft på 180-250 N krävs där fjäderkraften ökar med 5-7 % vartefter den trycks ihop. I samråd med fallföretagets R&D sågs detta som en godtycklig avvägning. Dessutom ses en högre vinkel medföra en mer distinkt registrering av försämrat lagertillstånd. Vidare utfördes fysiska tester av FDM-baserade prototyper, med hjälp av en momentmätare med respektive beräknad vinkel i beaktning (25°, 30°, 35°) vilka indikerade samma proportionella förhållande som beräkningarna. Använda prototyper kan ses i figur 27 på s. 51. Således ges slutsatsen att en vinkel på 25-30° ses kvalificerad för ändamålet då ett totalt vridmoment på 5 Nm vid överstiget moment på kullager förutsätts. Däremot ges fortfarande en risk för att stiften lämnar sin position vid en motsvarande kraft på lägre än 5 Nm vilken kan ges på grund av vibrationer.



Figur 27: Visualisering av tre 3D-printade (FDM) lagerhus med en vinkel på 25°, 30° respektive 35°.

4.2.2 Iteration ett: Framtagning av koncept A

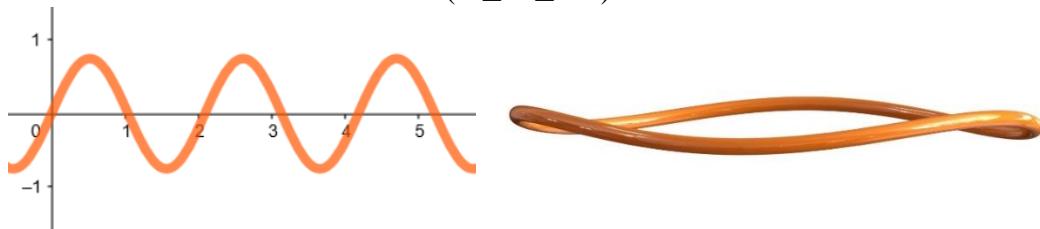
Baserat på resultatet från utvärderingen av grundkonceptet har *koncept A* utvecklats vilken innehåller grundkonceptet i sin helhet, men med ett modifierat lagerhus. Det modifierade lagerhuset, se figur 28, åmnas ge en ökad stabilitet i axiellt led i och med att stiften tillåts ändra läge innanför två flänsar till skillnad från grundkonceptet där stiften vilar på en fläns. Således ges ett styrande spår vilken medför en stabilare konstruktion då stiften inte tillåts lämna sin bana. Testning av en FDM-baserad modell, inklusive givarhus, lagerhus, fjäder och stift, bekräftade teorin på vilken marginellt spelutrymme styr stabiliteten. Det vill säga ju mindre marginal, mellan spårets bredd och stiftets diameter, desto mindre glapp och därmed stabilare konstruktion. Vid testning påvisades lagerhusets rörelsefrihet i axiellt led minimal genom att manuellt försöka förflytta lagerhuset i axiell riktning.



Figur 28: Visualisering av koncept A inklusive 3D-printad prototyp.

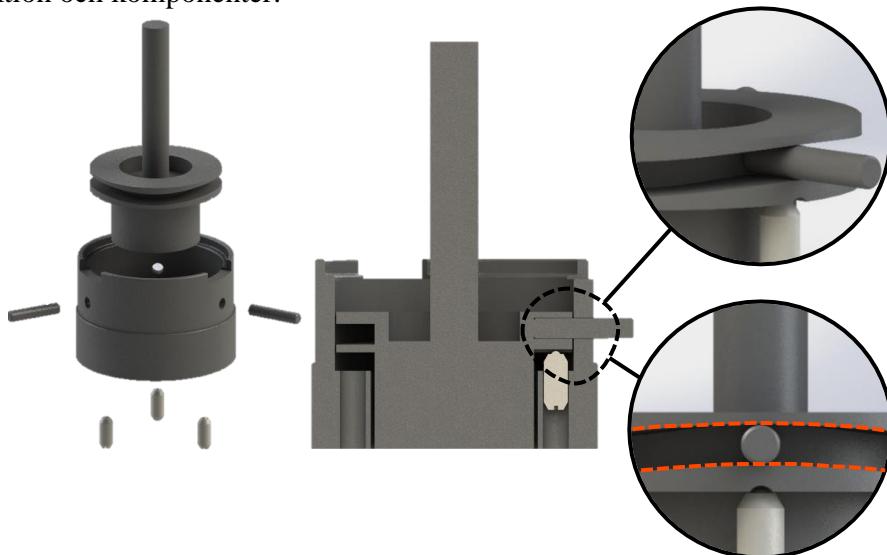
4.2.3 Iteration två: Framtagning av koncept B

Vidare utforskades ett nytt koncept, *koncept B*, på vilken implicerar en sinuskurva som huvudmotiv. I diskussion med fallföretagets R&D påvisades sinuskurvans potential då nyttjande av en sinusutformning tillåter stiften att förflyttas upp och ned vartefter lagerhuset roterar, samtidigt som en mjukare rörelse ges gentemot grundkonceptets dalutformning. Inledningsvis bygger konceptet vidare på *koncept A* där lagerhuset har givits ett styrande spår för applicerade stift. Däremot har en sinuskurva implementerats istället för de tidigare vinkelbaserade positionsmarkeringarna (dalar). Detta för att reducera fjäderkraften som krävs för att förflytta stiften uppför en eventuell lutning då en sinuskurva medför en mer slätt lutning. Genom att ansätta en sinuskurva med en amplitud på 0,75 mm ges en avståndsvariation mellan 0 och 1,5 mm mellan rotor och stator. Således ges vid felläge ett ökat avstånd på totalt 1,5 mm vilket jämförs med normaltillståndet på vilken innehåller ett avstånd på 0,8 mm. För att tydliggöra huruvida en sinuskurva appliceras i konceptet har figur 29 utformats vilken visualiseras sinusfunktionen $f(x) = 0,75 \cdot \sin(3t)$ både tvådimensionellt och tredimensionellt ($0 \leq t \leq 2\pi$).



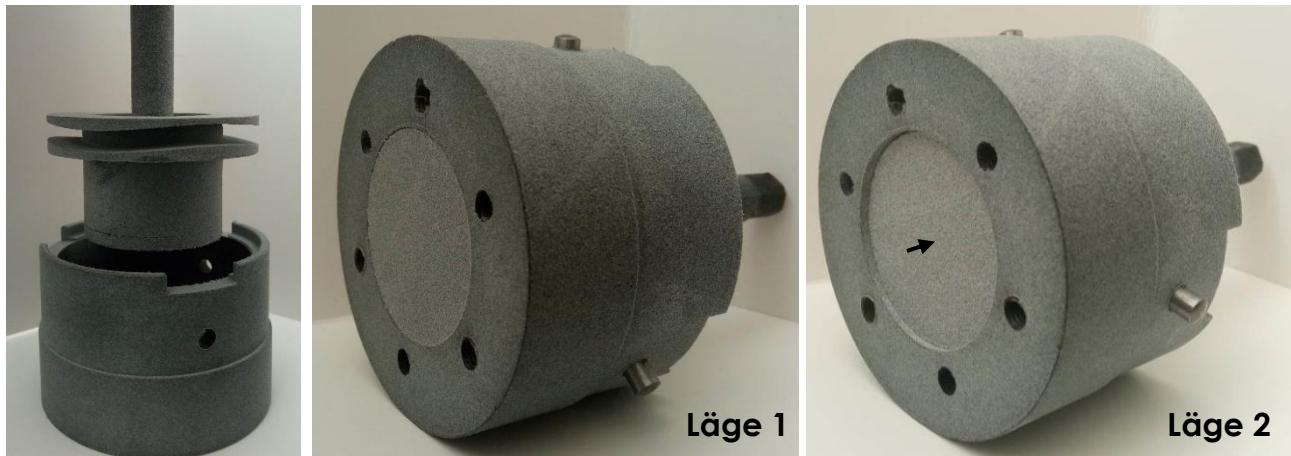
Figur 29: Visualisering av sinusfunktionen $f(x)=0,75 \cdot \sin(3t)$ i både tvådimensionellt och tredimensionell utförande.

Det sinusformade spåret ger således ett ökat axiellt avstånd. Däremot önskas även en mer distinkt registrering av när ett moment på 5 Nm är uppnått på vilken får lagerhuset att börja rotera och därmed skapa det axiella avståndet. Genom att låta tre fjädrande tryckskruvar, under normaltillstånd, vila i en välvning ges ett distinkt klick vid rotation då respektive tryckskruv lämnar välvningen. För att skapa ett jämnt tryck har tre tryckskruvar applicerats vilket medför att ett rotationsvarv innehåller tre halva sinusvarv. Genom att ersätta tidigare tillämpad vågfjäder med tryckskruvar och implementera en sinuskurva fås en stabilare lösning vilken har minimal rörelsefrihet i radierligt liksom axiellt led. I figur 30 visualiseras *koncept B* inklusive funktion och komponenter.



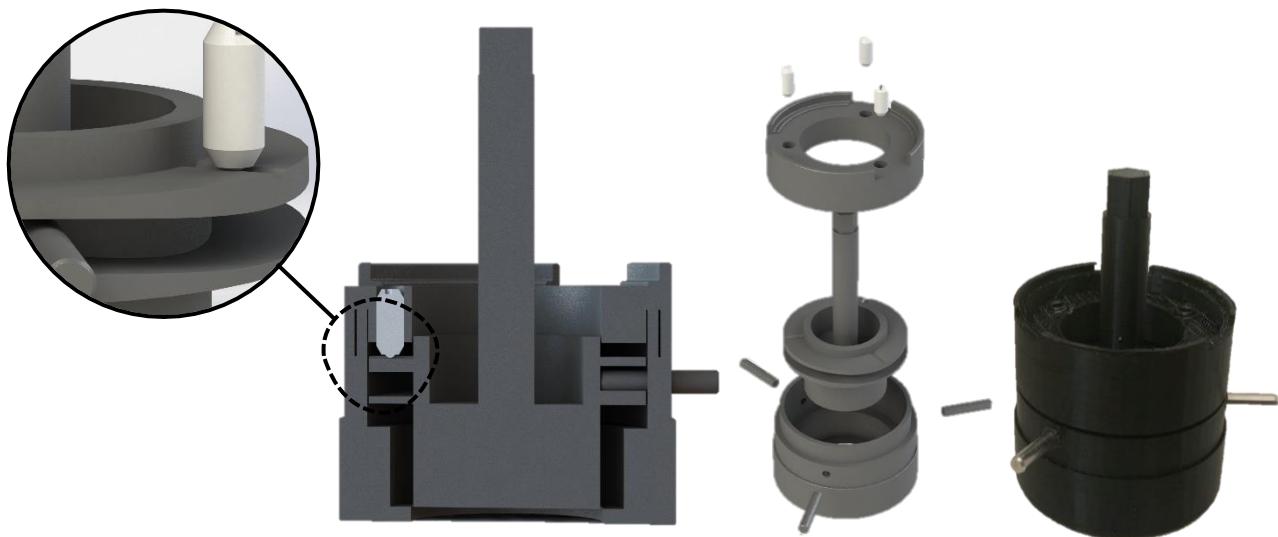
Figur 30: Visualisering av koncept B inklusive exploderad vy, genomskärning och

Testning av SLS-utskriven modell, vilken visualiseras i figur 31, bekräftade en fungerande funktion som i samråd med fallföretagets R&D ansågs lovande. Däremot sågs lagerhuset, inklusive axel och lagerpaket, translateras i fel riktning, det vill säga lagerhuset sågs translateras i riktning mot rotorn och inte ifrån.



Figur 31: Presentation av 3D-printad (SLS) version av koncept B där läge 1 och 2 visualisera huruvida konceptet medför en translationsriktning vilken ses vara felriktad.

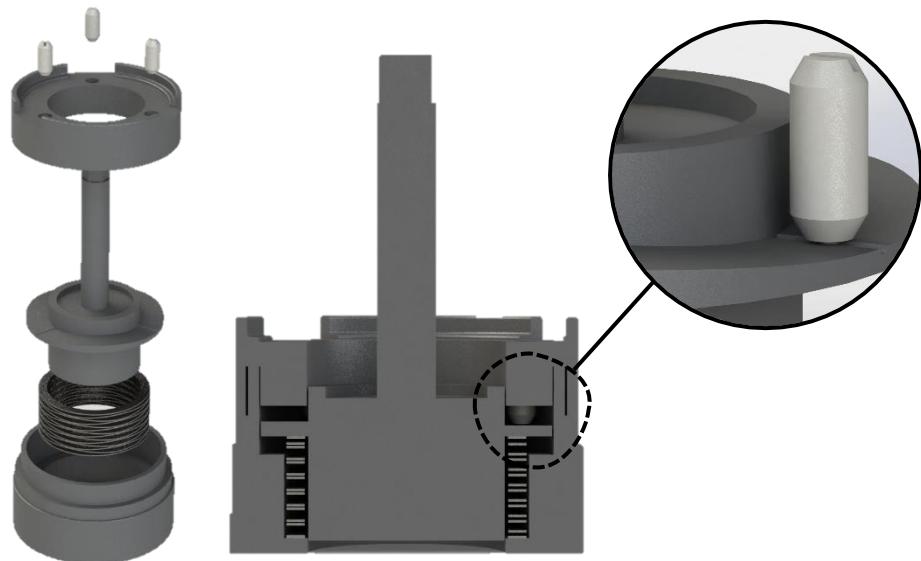
Vidare modifierades CAD-modellen där de fjädrande tryckskruvarna appliceras uppifrån med målsättningen att ändra lagerhusets translationsriktning. Figur 32 visualiseringar modifierad CAD-modell där givarhuset består av två delar vilka vidare ses monteras ihop genom limning eller ett klämförband (presspassning); en toppdel och en bottendel av givarhuset tillverkas och monteras ihop. Sålunda kan tryckskruvarna monteras ovanifrån istället för underifrån. Därefter tillverkades en prototyp, med en FDM-baserad 3D-printer, i syfte att bekräfta huruvida lagerhuset translateras i den riktning som avses. Testning påvisade att lagerhuset uppnår translation i önskad riktning.



Figur 32: Visualisering av modifierad version av koncept B inklusive närbild, genomskärning, exploderad vy och fysisk prototyp (FDM).

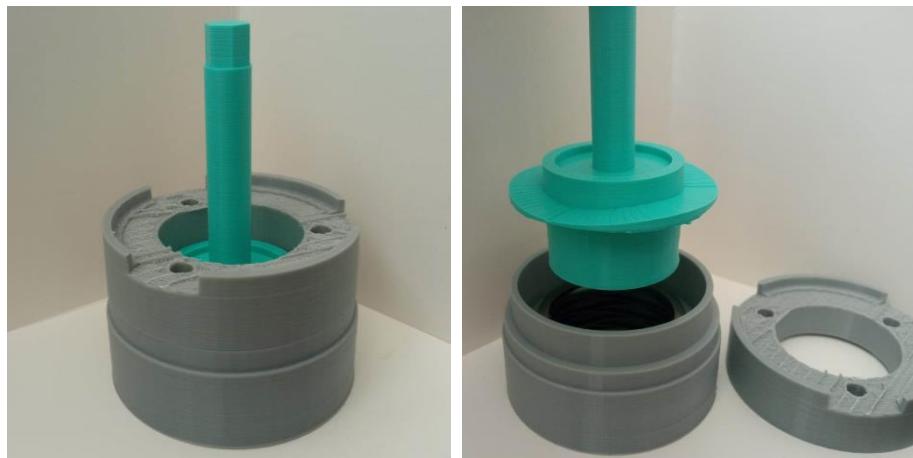
4.2.4 Iteration tre: Framtagning av koncept C

Påföljande iteration har utvecklats med syftet att undersöka huruvida sidostiften kan elimineras. Detta då diskussion med fallföretagets R&D har påvisat mindre negativa värden med en sådan lösning. Exempelvis har studier påvisat att stiften medför hål i strukturen vilket möjliggör för ökad kontaminationsrisk liksom försvagheter. Dessutom kräver stiften en större styryta, det vill säga en grövre väggtjocklek på vilken kan kontrollera stiften. Således ses givarens diameter att öka till öönskad bredd. I samråd med fallföretagets R&D beslutades att givaren hellre kan ökas på höjden än på bredden i och med att bredden har en mer avgörande roll vid applikation hos kund. Däremot önskas en så kompakt konstruktion som möjligt. Med andra ord strävar *Koncept C* efter att uppnå öönskad funktion, om att skapa ett axiellt avstånd mellan rotor och stator, men utan sidostift. Med *koncept B* som grund har *koncept C*, se figur 33, tagits fram vilken ersätter stiften genom ett tvådelat givarhus där tryckfjädrar kombineras med en vågfjäder. Vågfjädern låter tryckskruvarna pressa ned lagerhuset vartefter dem lämnar en välvning och följer den utformade sinuskurvan. Således skapas ett utökat avstånd mellan rotor och stator.



Figur 33: Visualisering av koncept C inklusive exploderad vy, genomskärning och närbild.

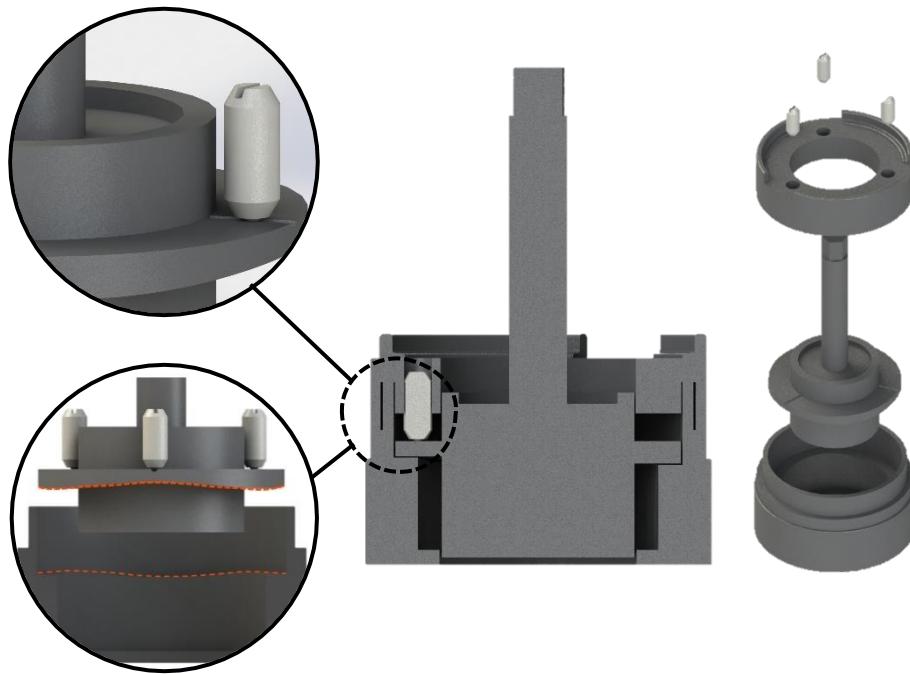
Testning av FDM-utskriven modell, vilken figur 34 på s. 55 visualiseras, påvisade en fungerande funktion men även instabilitet, i axiellt led, i och med att lagerhuset ämnas stabiliseras med en fjäderkraft om vardera sida (ovanifrån och underifrån). Det vill säga vid eventuella vibrationer kommer fjädern svänga, vilket påverkar den övriga konstruktionen negativt. Detta då inget styrande spår för applicerade tryckskruvar ges vilket påvisades fördelaktigt under iteration ett.



Figur 34: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept C.

4.2.5 Iteration fyra: Framtagning av koncept D

Den fjärde iterationen ämnades ta fram *koncept D* vilken undersöker huruvida *koncept C* kan ges ökad stabilitet då föregående iteration påvisade instabilitet i och med ett öppet och ostyrt spår. Genom att utforma givarhuset med en sinuskurva, likt *koncept B* och *C* kan både stiften och vågfjädern uteslutas vilket medför användning av färre komponenter liksom minskad flexibilitet i axiellt led, se figur 35 för visualisering. Till skillnad från tidigare koncept har en sinuskurva applicerats på undersidan av lagerhusets fläns varpå tryckskruvorna tillåts rotera längs en plan yta då dem lämnat respektive välvning, samtidigt som lagerhuset translateras nedåt. *Koncept D* medför således ökad stabilitet i och med ett styrande spår, likt *koncept A*, låg kontaminationsrisk samt en förenklad produktarkitektur och därmed enklare tillverningsprocess gentemot grundkonceptet.



Figur 35: Visualisering av koncept D inklusive närbilder, genomskärning och exploderad vy.

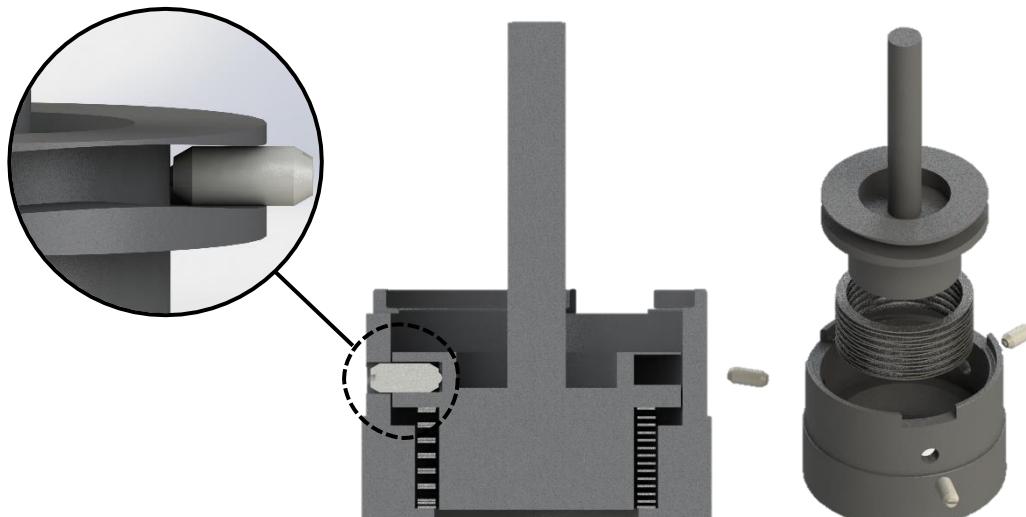
Testning av en FDM-baserad prototyp påvisade att ökad stabilitet i axiellt led (translationsledet), vilket antagits vid utformning av det teoretiska konceptet, även gavs i praktiskt utförande. Stabilitet ges i och med att den roterande rörelsen styrs av att det finns ett fast objekt över och under kulan som ses vara i rörelse. På ett liknande sätt ges stabilitet i radiellt led där stabiliteten enbart beror på marginellt spelutrymme, vilken styr till vilken grad lagerhuset tillåts förflyttas i avsett led. Visualisering av testad prototyp ges i figur 36.



Figur 36: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept D.

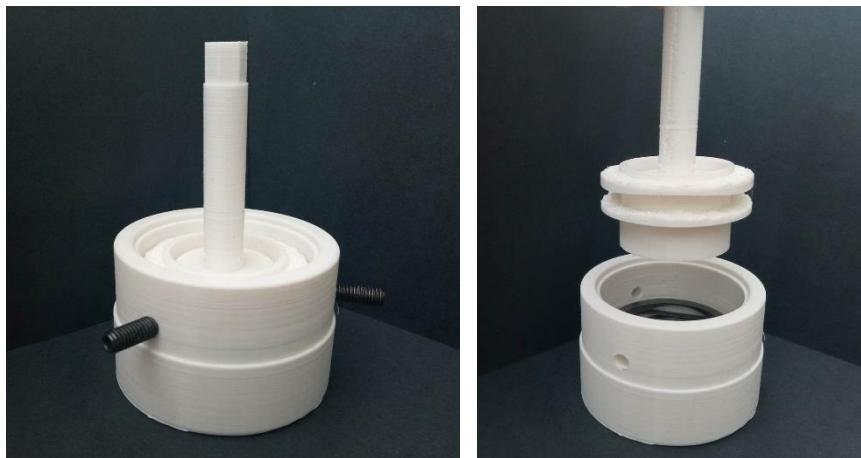
4.2.6 Iteration fem: Framtagning av koncept E

Även nästkommande iteration utvecklades med intentionen att vidare undersöka ett koncept där stiften elimineras från konstruktionen vilken, likt *koncept C* och *D*, bidrar positivt till DFMA-filosofin i och med att färre komponenter krävs. Ett ytterligare koncept togs fram med målsättningen att säkerställa att så få alternativa lösningar som möjligt förblir upptäckta. Således togs *koncept E* fram vilken nyttjar de fjädrande tryckskruvorna multifunktionellt. Det vill säga tryckskruvorna monteras från sidan vilka vilar i ett sinusformat styrande spår, se figur 37. Vid rotation av lagerhuset släpper tryckskruvens kula från en välvning, vilket medför ett klick, för att vidare pressa ned en vågfjäder och på så sätt skapa ett avstånd mellan rotor och stator. På så sätt möjliggör tryckskruvorna likvärdig funktion som stiften liksom möjliggör en klickfunktion. *Koncept E* kan således ses likvärdig med grundkonceptet, med avseende på funktion, produktarkitektur och tillverkningsprocess, däremot medför konceptet en mer distinkt registrering av skapad rörelse, likt *koncept B*, *C* och *D*, liksom en mer mjukare rörelse i och med en utdragen sinuskurva.



Figur 37: Visualisering av koncept E inklusive närbild, genomskärning och exploderad vy.

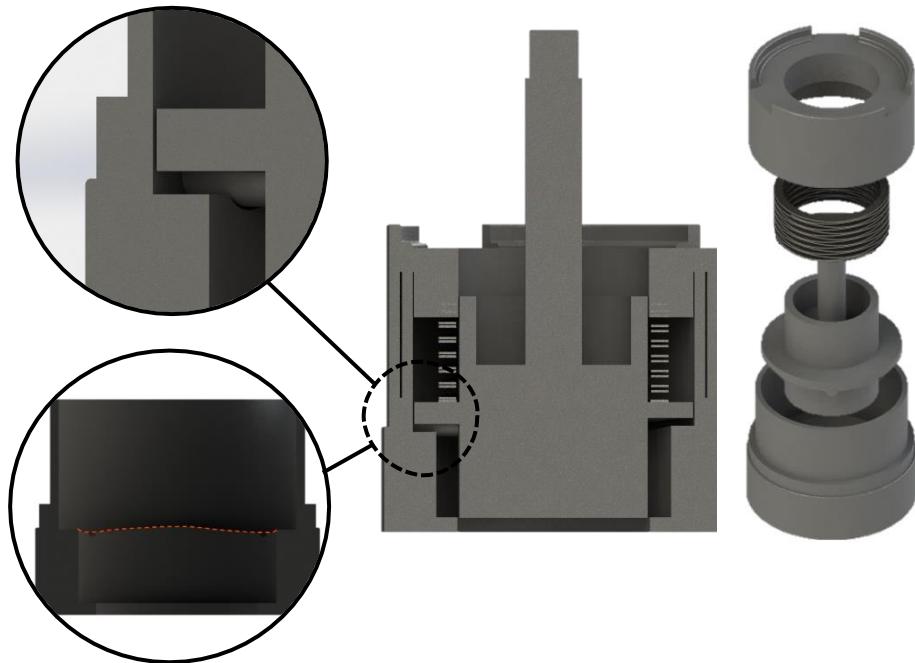
I och med att utformat koncept involverar ett styrande spår och tryckskruvar vilka agerar som stift ges likt *koncept A* ökad stabilitet gentemot grundkonceptet, vilket påvisades under testning av en FDM-baserad prototyp, se figur 38. Testningen påvisade även att tänkt funktion, vilken involverar en välvning och ett sinusformat spår, fungerar som förväntat. Däremot följer några mindre nackdelar med konceptet vilka dels, ses innehålla ökad diameter på givarhuset, dels ökad kontaminationsrisk. Eftersom tryckskruvorna monteras från sidan krävs en grövre väggtjocklek, det vill säga styryta krävs för optimal funktion, vilket även påvisades vara betydande faktor under iteration tre. I och med tryckskruvorna förutsätts en hålstruktur vilket medför ökad kontaminationsrisk liksom en försvagad produktstruktur.



Figur 38: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept E.

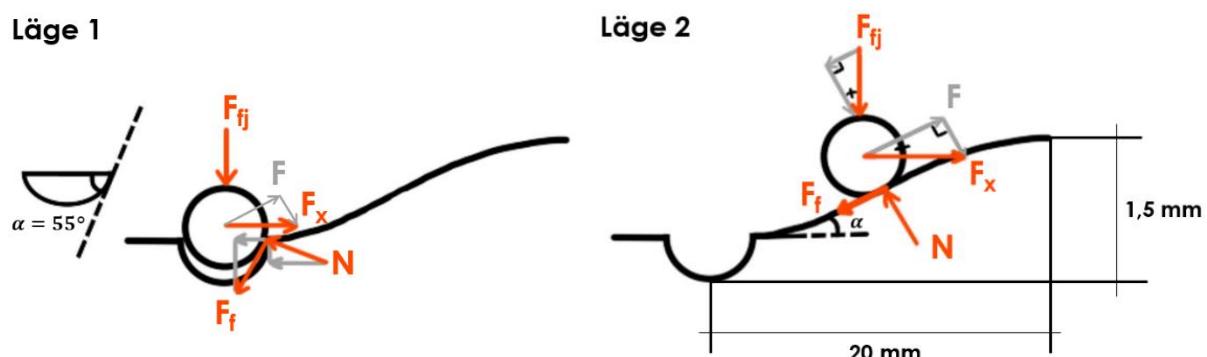
4.2.7 Iteration sex: Framtagning av koncept F

Tidigare iterationer har påvisat behovet av att placera fjäderkomponenten(er) ovanifrån med målsättningen att lagerhuset ska förflyttas nedåt. På så sätt möjliggörs förflyttning av rotorn i riktning bort från statorn på vilken givarens produktarkitektur ämnas vara likvärdig med fallföretagets befintliga produktserie. Med detta i åtanke påbörjades iteration sex vilken syftade till att undersöka huruvida ett utökat avstånd kan fås mellan rotor och stator utan nyttjande av vare sig stift eller fjädrande tryckskruvar. Således innehåller iteration sex framtagning av *koncept F* vilken innehåller en vågfjäder och integrerade stift. På så sätt reduceras antalet komponenter, vilket bidrar positivt till DFMA-filosofin, likväl som till minskad kontaminationsrisk. Detta då antalet hål, och därmed antalet potentiella kontaminationsingångar, minskar. Dessutom ses hål i strukturen medföra försvagningar i konstruktionen, vilket leder till högre spänningsskonzentrationer på vilken sprickor kan komma att initieras. *Koncept F*, vilken visualiseras i figur 39 på s. 58, påvisar ett flertal funktioner/egenskaper vilka identifierats fördelaktiga under tidigare iterationer. Till exempel har egenskaper vilka innehåller en sinuskurva, integrerade stift, tvådelat givarhus och en fjäderkomponent beaktats vid framtagning av konceptet. Genom att tre integrerade stift vilar i en välvning ses *koncept F*, vid rotation av lagerhuset, tillåta en avståndsförändring i axiellt led i och med en applicerad sinuskurva. En fjäderkomponent appliceras i syfte att säkerställa att rotation sker då förväntat vridmoment (5 Nm) uppstår.



Figur 39: Visualisering av koncept F inklusive närbilder, genomskärning och exploderad vy.

För att ge en initial bedömning av den fjäderkraft som utformat koncept förväntas kräva och huruvida den förhåller sig till grundkonceptet har beräkningar utförts. Beräkningarna har utförts för två lägen: 1) då integrerat stift befinner sig i välvningen; 2) då integrerat stift befinner sig i mitten på det lutande planet. Figur 40 illustrerar respektive läge.



Figur 40: Illustration av läge 1 och 2 inklusive friläggning.

Genom friläggning av det första läget gavs följande formel:

$$F_x = F_{fj}(\mu \cos(\alpha) - \sin(\alpha))$$

Med en vinkel på 55° , vilken inhämtats från CAD, och en friktion på 0,2 då aluminium förutsetts ges en förväntad fjäderkraft på 95 N vilken krävs för att integrerat stift ska lämna välvningen vid ett moment på 5 Nm.

I andra läget beräknas F_x med samma formel som gavs under iteration noll där vinkeln beräknades med hjälp av trigonometri på vilken följande formel gav en vinkel, α , på $4,3^\circ$:

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{motstående}}{\text{närliggande}} = \frac{1,5}{20}$$

Med en vinkel på $4,3^\circ$ och en friktion på 0,2 då aluminium förutsetts ges en förväntad fjäderkraft på 535 N vid ett moment på 5 Nm. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix D. Sammanfattningsvis har beräkningarna påvisat att respektive integrerat stift vilken vilar i en välvning kräver en lägre kraft för att frigöras från välvningen gentemot den kraft som krävs för att möjliggöra glidning på sträckan emellan två välvningar.

Vidare skapades en FDM-baserad prototyp vilken testades, se figur 41. Testning av prototypen resulterade i en fungerande funktion på vilken ett utökat avstånd på ungefär 1,5 mm skapades mellan rotorn och statorn. Däremot ges inledningsvis en förflyttning i riktning uppåt då integrerat stift frigörs från välvningen för att sedan fortsätta uppåt och vidare ned i nästa välvning. Med andra ord påvisades en fungerande funktion på vilken ges i ”fel” riktning. En alternativ lösning ses vara att skapa en design vilken förutsätter att rotor och stator monteras på andra sidan om lagerhuset. Detta ger dock en annan produktarkitektur gentemot fallföretagets befintliga produktutbud. En ytterligare nackdel är att de integrerade stiftens inte vilar i ett styrande spår då det enbart är en flexibel komponent (vågfjäder) som håller emot ovanifrån; integrerade stift styrs inte av två fasta objekt. Trots mindre brister i utförandet ses koncept F innehålla stor potential angående funktion och uppbyggnad. Konceptet ses skapa ett avstånd i axiell riktning utan onödiga hål i strukturen. Dessutom ses konceptet innehålla få komponenter som relativt enkelt kan monteras i varandra där monteringsmetoden ses vara klämförband (presspassning), vilket elimineras behovet av skruvar och därmed antalet komponenter. Med klämförband menas att två komponenter pressas samman. Detta medför i sin tur att monteringstiden reduceras.



Figur 41: Presentation av 3D-printad (FDM) version av koncept F.

4.3 Konceptsållning

Sammanfattningsvis har konceptutvecklingsfasen resulterat i sex olika koncept vilka har CAD-modellerats och testats med hjälp av 3D-printade funktionsprototyper. Följande avsnitt syftar till att utvärdera framtagna koncept gentemot grundkonceptet vilken beskrivs som ett referenskoncept (R). Således har Pughs konceptvalsmatris sammanställts i tabell 9 vilken syftar till att ge en objektiv överblick av koncepten.

Tabell 9: Presentation av Pughs konceptvalsmatris vilken utvärderar respektive koncept utifrån ett antal kriterier.

		Koncept						
Egenskap		A	B	C	D	E	F	R
1	Skapar axiellt avstånd från stator	0	0	0	0	0	0	0
2	Stabilitet	+ +	0	+ +	0	0	-	0
3	Okänslig för vibrationer i axiellt led	0	0	0	0	-	0	0
4	Okänslig för vibrationer i radiellt led	0	0	0	0	+	0	0
5	Ger distinkt registrering av lagertillstånd	0	+	+	+	+	+	0
6	Täthet (Låg kontaminationsrisk)	0	0	0	0	0	+	0
Enkel tillverkning	Antal komponenter	0	-	-	0	0	+	0
	Komplex geometri	-	-	0	0	-	-	0
Enkel montering	Antal komponenter	0	-	-	0	0	+	0
	Låg risk för felpassning	0	-	-	-	0	+	0
Antal (+)		1	2	1	2	2	5	0
Antal (0)		7	3	5	6	5	3	9
Antal (-)		1	4	3	1	2	1	0
Slutbetyg		0	-2	-2	1	0	4	0
Gå vidare?		✗	✗	✗	✓	✗	✓	

Vidare beskrivs huruvida respektive egenskap, vilka presenteras i matrisen, har bedömts:

- 1** Samtliga koncept A-F, liksom grundkonceptet, uppfyller den huvudsakliga målsättningen att skapa ett avstånd mellan rotor och stator då lagren läses.
- 2** I och med att koncept A, B, D och E innehåller ett styrande spår och/eller fjädrande tryckskruvar ses dem vara mindre känsliga för vibrationer i axiellt led gentemot grundkonceptet. Däremot baseras koncept C och F, likt grundkonceptet, på en vågfjäder vilket gör dem mer känsliga för vibrationer i axiellt led. Vad gäller känslighet för vibrationer i radiellt led är samtliga koncept förutom koncept E likvärdigt med grundkonceptet, det vill säga att det enbart är marginellt spelutrymme som avgör. I och med de fjädrande tryckskruvarna ses koncept E vara mer känsligt även om den innehåller godtycklig stabilitet.
- 3** I och med nyttjande av fjädrande tryckskruvar eller integrerade stift ses samtliga koncept förutom koncept A ge en mer distinkt registrering, av huruvida lagertillståndet ses försämrat, gentemot grundkonceptet.
- 4** Det är enbart koncept F som innehåller en sluten produktarkitektur vilket ses fördelaktigt utifrån ett kontaminationsperspektiv. Övriga koncept innehåller en hålstruktur vilket möjliggör för inträde av kontamination liksom ger försvagningar i strukturen.
- 5** Den femte egenskapen utvärderar huruvida respektive koncept ses relativt enkel att tillverka vid beaktning av antalet komponenter och komplexa geometrier. Koncept B och C ses inkludera fler huvudkomponenter än grundkonceptet, medan koncept A, D och E ses inkludera lika många. Koncept F ses inkludera ett minst antal komponenter. Koncept A, B, E och F ses innehålla mer komplexa geometrier än grundkonceptet vilket kan riskera att försvara tillverkningsprocessen. I och med att koncepten innehåller två styrande flänsar och/eller integrerade stift bör detta beaktas, utifrån tillverkningsperspektiv, vid eventuell vidareutveckling av koncepten.
- 6** Den sjätte egenskapen utvärderar huruvida respektive koncept ses relativt enkel att montera vid beaktning av antalet komponenter och risk för felpassning. Antalet komponenter för respektive koncept i förhållande till grundkonceptet presenterades i föregående paragraf. I och med nyttjande av ett flertal fjädrande tryckskruvar vilka i startläge ämnas vila i en välvning ses risken för felpassning vid montering öka för koncept B, C och D. Medan koncept F inte ses kunna monteras på ett annat sätt än det som förväntas då konceptet innehåller integrerade stift vilka ämnas vila i en större välvning vilken inte kan missas vid montering. Koncept A och E ses likvärdig med grundkonceptet i och med likvärdig produktarkitektur.

Avslutningsvis ges ett relativt betyg till respektive koncept vilka i förhållande till varandra indikerar att koncept D och F ses vara de mest lovande koncepten utifrån kriterierna. Detta då koncepten, enligt Pughs konceptvalsmaatris, givits ett betyg av positivt värde. Övriga koncept sållades bort med anledning av att dem givits endera ett nollvärde eller ett negativt värde.

4.3.1 Konceptval

Konceptsållningsfasen vilken utförts med hjälp av Pughs konceptvalsmatris resulterade i koncept D och F som återstående koncept. För att vidare utvärdera dessa koncept har en förenklad FMEA för respektive koncept utförts och sammanställts i tabell 10 och 11 nedan.

Tabell 10: Sammanställning av utförd FMEA för koncept D.

	Felkomponent	Felorsak	Effekt	Upptäckt	A	F	A·F	Å
1	Givarhus gentemot lagerhus	Montering	Montering försvaras då inga markeringar ges.	Test av funktionsprototyp	10	5	50	* ₁
2	Tryckskruvar	Montering	Svårt att montera tryckskruvar korrekt liksom spänna åt till likvärdig kraft.	Test av funktionsprototyp inklusive tryckskruvar	8	5	40	* ₂

A: Allvarlighetsgrad

Å: Åtgärd

F: Förekomst

*₁: Designmodifikation

*₂: Designmodifikation eller nyttjande av mätinstrument

Tabell 11: Sammanställning av utförd FMEA för koncept F.

	Felkomponent	Felorsak	Effekt	Upptäckt	A	F	A·F	Å
1	Givarhus	Spår	Önskad translationsriktning ges ej. Ett öppet spår ger dessutom vibrationskänslighet.	Test av funktionsprototyp	5	10	50	* ₁
2	Vågfjäder	Moment	Vridning av fjäder med öppet tvärsnitt kan orsaka låsning av lagerhus.	Test av funktionsprototyp inklusive fjäder	10	10	100	* ₂

A: Allvarlighetsgrad

Å: Åtgärd

F: Förekomst

*₁: Designmodifikation

*₂: Byte till en sluten enkelvarig vågfjäder (vågbricka)

Följande beskrivs ingående huruvida respektive koncept utvärderas:

KONCEPT D Vid utvärdering av koncept D identifierades två komponenter vilka kan ses medföra fel under montering. I och med att flänsen på lagerhuset och spåret i givarhuset har konstruerats med en sinuskurva vilka ämnas förhålla sig till varandra för att uppnå given funktion, om att skapa ett avstånd mellan rotor och stator, riskeras att funktionen inte uppnås i det fall då lagerhuset och givarhuset inte monteras korrekt i förhållande till varandra. Det vill säga konceptet medför ett relativt högt PFD; sannolikheten att initierad funktionssäker funktion inte uppnås är relativt stor. Således försvaras monteringsarbetet på vilken resultatet riskeras variera från order till order. För att minimera denna risk ses någon typ av markering behöva implementeras på givarhuset. Exempelvis en markering vilken vid korrekt montering sammanfaller i linje med välvningen vilken utformats på lagerhuset. Däremot menar Kalpakjian & Schmid (2008) att komponenter bör kunna monteras obehindrat utan någon märkning som riktlinje.

Vidare ses även tryckskruvorna medföra potentiella fel under montering. I och med att respektive tryckskruv ämnas monteras för att vila i en välvning ses en potentiell svårighet vid montering. Detta beaktar huruvida montören kan säkerställa att dessa sammanfaller. Dessutom ses varje tryckskruv monteras enskilt vilket medför svårighet i att kunna säkerställa att varje tryckskruv har spänts åt lika mycket. I det fall då dessa tryckskruvar inte ses vara spända till likvärdig nivå är det inte säkert att den huvudsakliga funktionen kommer uppnås som förväntat. Kalpakjian & Schmid (2008) menar att skruvar, generellt, bör undvikas i konstruktioner för att underlätta montering. En alternativ åtgärd för att lösa problemet skulle kunna vara att nyttja någon typ av mätinstrument vilken säkerställer att respektive tryckskruv har spänts åt med likvärdigt moment.

KONCEPT F Vid utvärdering av koncept F identifierades två komponenter vilka kan ses medföra funktionella fel. Till att börja med utvärderades givarhuset vilken med utformat design, av spåret för de integrerade stiften, medför att den huvudsakliga funktionen uppnås om än i fel riktning. Dessutom ses utformat spår inte medföra någon styrning vilket resulterar i att konceptet ses vara känslig för vibrationer. Således behöver koncept F designmodifieras för att säkerställa att huvudsaklig funktion uppnås som förväntat. För övrigt ses konceptet vara monteringsvänligt i och med nyttjande av få komponenter som enkelt monteras i varandra i en riktning (uppfirån och ned).

Vidare ses vågfjädern medföra ett säkerhetsrelaterat fel. Då fjädern ämnas pressas ihop av två ytor får friktion vilken, vid vridning av lagerhuset, medför vridning av fjädern då den har ett öppet tvärsnitt. Vridning av fjädern medför att fjädern, efter en viss grad, kommer knipa åt lagerhuset vilken ses låsas. Detta resulterar i att den huvudsakliga funktionen inte uppnås, vilket påvisar ett relativt högt PFD. Detta kan åtgärdas genom att byta ut vågfjädern till en sluten vågbricka vilken är en enkelvarvig vågfjäder. Dessutom ses konstruktioner vilka nyttjar fjädrar vara problematiska ur ett säkerhetsrelaterat perspektiv då fjädrar är mekaniska komponenter vilka, enligt Kalpakjian & Schmid (2008), är kända för att få utmattningsfel. Sålunda tillåts inte att den funktionssäkra funktionen är beroende av en fjäderkomponent då denne kan fallera vilket resulterar i att funktionen inte uppnås. Enligt standarden EN ISO 13849-2:2012 beskrivs huruvida säkerhetsrelaterade funktioner ska separeras från andra funktioner liksom betydelsen av en enkel konstruktion där överflödiga/onödiga komponenter i säkerhetsrelaterade system undviks. Detta kan åtgärdas genom användning av de-energisationsprincipen vilken beskrivs i EN ISO 13849-2:2012. Således beaktas de olika tillstånden, exempelvis startläge och felläge, vilka syftar till att sätta ett mekaniskt system

i säkert tillstånd genom att frigöra energi då energi försetts för att sätta systemet i rörelse. Med andra ord bör konceptet utformas på ett sätt som förutsätter en fjäderkraft i startläget, vilket därmed skapar en friktionskoppling. Påföljande läge, felläget, bör istället vara frigjord från friktionskopplingen för att den funktionssäkra funktionen inte ska vara beroende av fjäderns tillstånd.

Avslutningsvis väljs koncept F vilken i nästkommande avsnitt vidareutvecklas utifrån aspekter som identifierats vid utförandet av FMEA. Koncept F väljs framför D med anledning av att konceptet ses mer monteringsvänligt liksom ses innehålla låg kontaminationsrisk i och med en sluten produktarkitektur.

4.4 Vidareutveckling

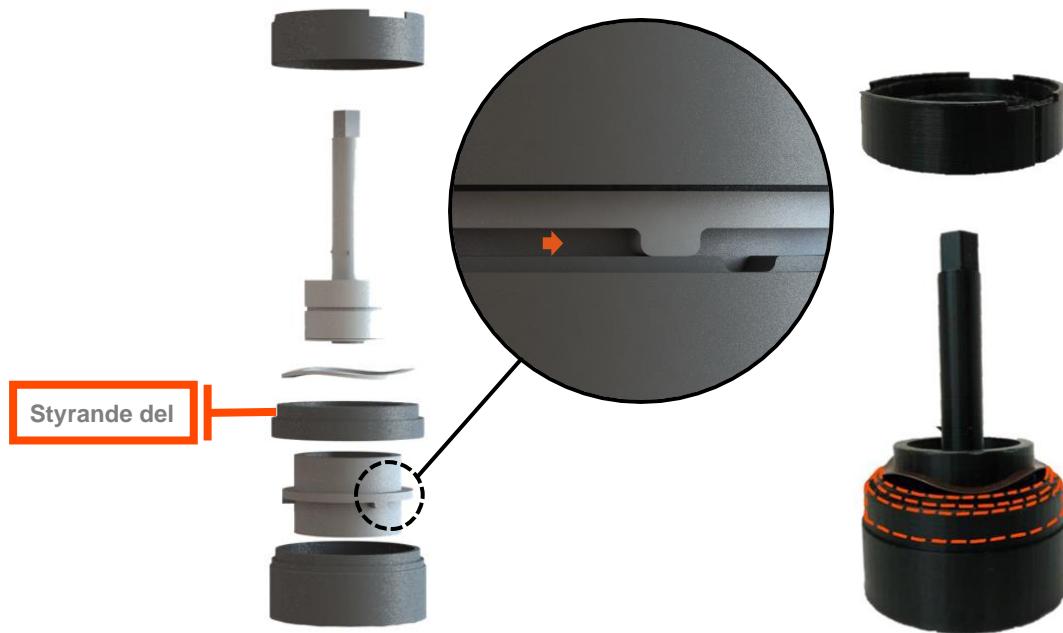
Följande avsnitt avser vidareutveckla koncept F med målsättningen att åstadkomma en fungerande liksom tillfredsställande lösning för fallföretaget. Dessutom ses konceptet utformas i korrekt skala, det vill säga utformning sker utifrån förutbestämda krav vilka innehåller dimensioner för lagerpaket och axel liksom maximal ytterdiameter.

Den främsta problematiken med koncept F innehåller avsaknad av styrning liksom risk för vridning av vågfjädern. Dessutom sågs problem vilken beaktar säkerhetsrelaterade aspekter. Framförallt sågs problem med att den huvudsakliga funktionen, att skapa ett avstånd mellan rotor och stator, riskeras att inte uppnås i det fall då fjädern har fallerat. Till att börja med diskuterades problematiken med koncept F tillsammans med relevanta aktörer på fallföretagets R&D på vilken resulterade i en lösning som innehåller en sluten vågbricka istället för en vågfjäder liksom en ytterligare komponent vilken syftar till att styra de integrerade stiftens. Byte till en vågbricka medför även en mer kompakt design vilket korrelerar med DFMA liksom fallföretagets önskan. Dessutom diskuterades huruvida translationsriktningen på lagerhuset skulle kunna omvändas. Detta resulterade i ett koncept vilken innebär att de integrerade stiftens, i startläget (normal drift), är i dikt med ett horisontellt plan för att vid felläge (låsta lager) förflyttas ned i en välvning med endera en fjäderkraft eller en tvingande funktion. Detta innebär även att det enbart är startläget som är beroende av fjädern, vilket medför att felläget registreras oavsett om en fjäderkraft ges eller inte. Dessutom ses friktionskraften kräva ett vridmoment på 5 Nm för att skapa rotation vilken minskar då felläge intas. Medan grundkonceptet ses öka motståndskraften vartefter lagerhuset roterar då fjädern pressas ihop. Däremot kan rotation av lagerhuset ses börja ske innan ett vridmoment på 5 Nm har åstadkommits då fjädern fallerat. I samråd med fallföretagets R&D sågs detta acceptabelt då funktionen ändå uppnås om än något tidigare. För att tydliggöra huruvida fjäderkraften inverkar på ansatt vridmoment ges följande resonemang vilken utgår från exemplifierande värden:

Inverkan på vridmomentet

En fjäderkraft på 500 N ansätts. Däremot fallerar fjädern vilket resulterar i en fjäderkraft vilken nödvändigtvis inte är noll, men lägre. Som ett exempel ses den återstående kraften vara 50 % av den ansatta vilket medför att det maximala vridmomentet blir 50 % lägre, det vill säga 2,5 Nm istället för 5 Nm. I och med en fallerad fjäder ges en lägre motståndskraft, i detta fall friktionskraft, vilket medför att rotation börjar ske tidigare än förväntat.

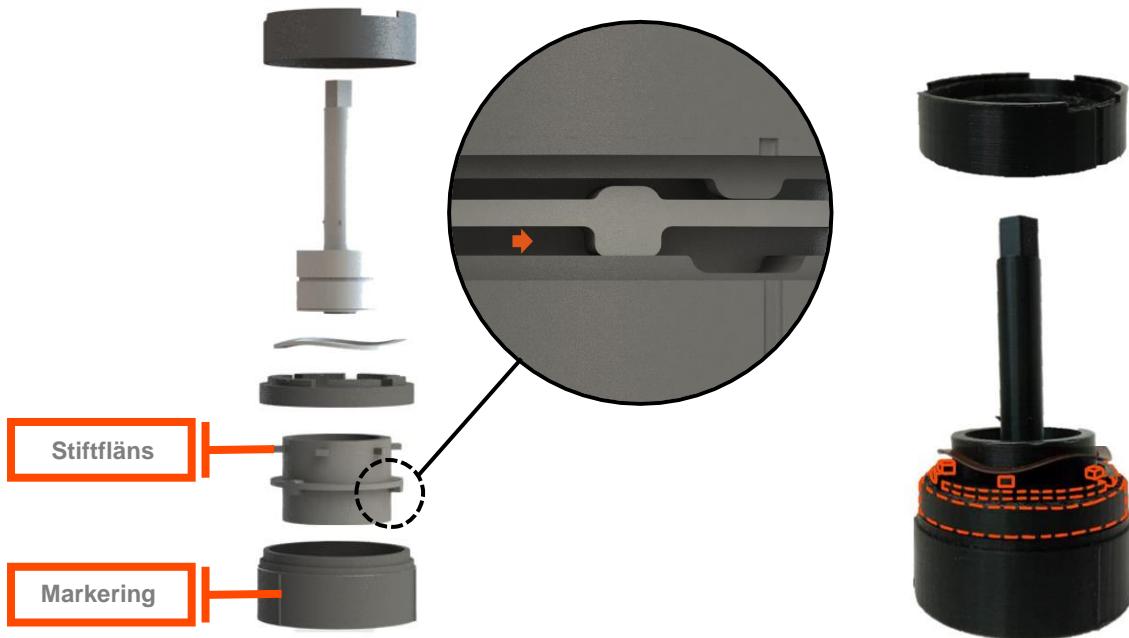
Vidare planerades huruvida lösningen skulle kunna verkställas i ett konkret koncept. Genom att addera en styrande komponent, vilken monteras innan vågbrickan, ges en stabilare lösning. Detta då lagerhuset inte kan förflyttas, mer än marginellt spelutrymme tillåter, i axiellt led. Angående de integrerade stiftens, liksom respektive välvning, har dessa modifierats genom att dem givits en mer kvadratisk form i syfte att potentiellt underlätta vid tillverkning. Däremot riskerar en sådan utformning att skada övrig konstruktion då lagren låses och lagerhuset börjar rotera. Stiften vilka, under rotation, förflyttas ned i motsvarande välvning ses i och med en kvadratisk utformning vara fast i sitt rådande läge, men en signal har registrerats då ett avstånd mellan rotor och stator skapats vilket stänger av drivsystemet. Däremot kan drivsystemet fortsätta att rotera några varv även efter att drivsystemet stängts av. På så sätt riskerar en kvadratisk utformning att skada övrig konstruktion. Detta diskuterades med fallföretagets R&D på vilken resulterade i slutsatsen att en kvadratisk utformning kan ses acceptabel då en signal redan är skickad vilket indikerar att givaren är defekt. Vidareutvecklat koncept, vilken visualiseras i figur 42, testades därefter med hjälp av en FDM-baserad funktionsprototyp.



Figur 42: Visualisering av koncept F vilken har vidareutvecklats.

Testning av vidareutvecklat koncept påvisade att den styrande komponenten separerar lagerhuset och fjäderkraften vilket medför att ingen fjäderkraft ges oavsett läge. Dessutom påvisades den funktionssäkra funktionen vara beroende av fjädern, det vill säga om fjädern fallerar riskeras funktionen att inte uppnås. Med testresultatet i beaktning modifierades lagerhuset och den styrande komponenten i syfte att åtgärda uppvisad problematik. Till att börja med adderas en ytterligare fläns på lagerhuset vilken ämnas koppla ihop lagerhuset med fjädern. För att möjliggöra montering av den styrande komponenten trots lagerhusmodifikationen ses flänsen på lagerhuset utformas i form av stift liksom den styrande komponenten utformas med hål för att komponenten ska kunna träs över flänsstiften. Vidare modifierades de integrerade stiftens på ett sätt som möjliggör förflyttning ned i respektive välvning även utan applicerad fjäderkraft. Sålunda utformades en mindre förhöjning ovanför tidigare utformat stift liksom en motsvarande förhöjning i den styrande komponenten. På så sätt ges en tvingande rörelse vilken förflyttar respektive stift ned i motsvarande välvning. I och med att fördjupningen (välvningen) och förhöjningen utformats på två olika

komponenter ses någon form av markering krävas för att säkerställa att dessa sammanfaller vid montering. Modifierat koncept, vilken visualiseras i figur 43, testades därefter med hjälp av en FDM-baserad funktionsprototyp.

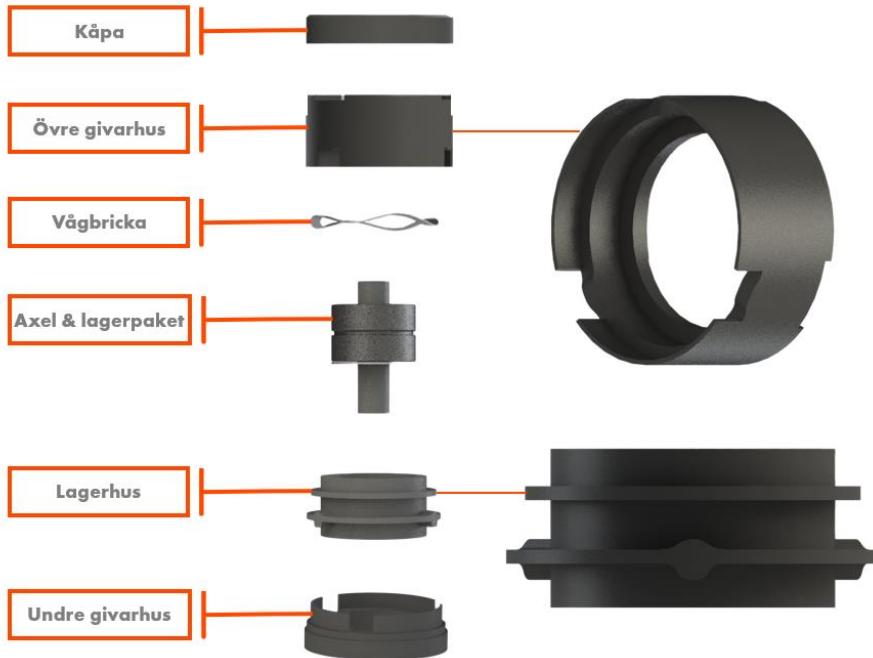


Figur 43: Modifiering av vidareutvecklat koncept.

Testning av modifierat koncept påvisade en fungerande funktion vilken skapar ett utökat avstånd på 1,5 mm mellan rotor och stator. Funktionen ses även uppnås oavsett om en fjäderkraft är tillgänglig eller inte då rotation av lagerhuset sker. Detta innebär att den säkerhetsrelaterade funktionen är separerad från andra funktioner liksom inte är beroende av en fjäder, vilket föreskrivs i standarden EN ISO 13849-2:2012. Testresultatet påvisade även huruvida den styrande komponenten godtyckligt tillåts träs över den adderade stiftflänsen, vilket innebär att en stabilare konstruktion ges samtidigt som lagerhuset är kopplat till en flexibel fjäderkomponent.

4.5 Detaljutveckling

Följande avsnitt redogör för utförd detaljutvecklingsfas vilken inledningsvis syftade till att förfina vidareutvecklat koncept där DFMA-aspekter liksom dimensionering för optimal funktion beaktades. Initialt reflekterades över huruvida konceptet sågs kunna förenklas, vilket Kalpakjian & Schmid (2008) menar möjliggör reducering av antalet komponenter förutsatt att dess funktion inte påverkas avsevärt negativt liksom att flera funktioner kan kombineras ihop. Således har konceptet modifierats på vilken den styrande komponenten och den övre delen av givarhuset har sammanfogats till en komponent. Dessutom sågs problematik med den utformade stiftflänsen utifrån ett tillverkningsperspektiv. Diskussion med fallföretagets R&D påvisade att flänsen bör utformas som en solid ring för att reducera antalet tillverkningssteg. Med detta i åtanke minskades diametern på flänsen, vilket medför att den övre delen av givarhuset, inklusive styrning, kan träs över utan större hinder. Figur 44, på s. 67, presenterar detaljutvecklat koncept inklusive komponentbenämningar.



Figur 44: Detaljutveckling av vält koncept.

Vidare specificerades detaljer för utformning av förhöjningen respektive fördjupningen, inklusive dimensioner, i syfte att möjliggöra en smidigare övergång från startläge till felläge. Detta då tidigare testning av en kvadratisk utformning, med avrundningar, påvisades medföra en mindre smidig och fölösam rörelse då de integrerade stiftens ska ned i respektive välvning liksom respektive stift har svårt att komma upp igen. Således gavs förhöjningen på lagerhuset liksom motsvarande förhöjning i det övre givarhuset en sinusliknande utformning på vilken en vinkel på 30° applicerades, vilket påvisades adekvat i iteration noll. Dessutom vidgades fördjupningen vilken även gavs vinklar för att underlätta stiftets uppgång. Detta då diskussion med fallföretagets R&D påvisade acceptans med en mer kvadratisk utformning, dock sågs det fördelaktigt om stiftet kan komma upp igen för att reducera risken för eventuell skada på övrig konstruktion. Angående det egentliga integrerade stiftet gavs den en mer rundad utformning för att efterlikna ett cylindriskt stift och därmed underlätta uppgång. I figur 45 och 46, nedan, illustreras de integrerade stiftens framdrift för en kvadratisk respektive en avrundad sinusutformning. Således påvisas en smidigare rörelse för en avrundad sinusutformning gentemot en kvadratisk utformning.



Figur 45: Illustration av en kvadratisk utformning på stiftet vilken ses, från vänster till höger, förflyttas ned i en välvning.



Figur 46: Illustration av en avrundad sinusutformning på stiftet vilken ses, från vänster till höger, förflyttas ned i en välvning.

Fortsättningsvis optimerades toleranser, det vill säga marginellt spelutrymme mellan rörliga komponenter specificerades till enbart tillräckligt (0,2 mm) för att möjliggöra rörelse på vilken hänsyn till SLS-printningstekniken sågs. Därefter tillverkades en SLS-baserad funktionsprototyp vilken användes för att testa funktion och stabilitet liksom ge en uppfattning av dess storlek. I figur 47 presenteras tillverkad prototyp på vilken testning påvisade en fungerande stabil lösning. Däremot uppmärksammades, av fallföretagets R&D, att konceptets öppna struktur, vilken omfattar det undre och övre givarhuset, skapar problematik vid montering då klämförband (presspassning) förutsetts. Således ses en öppen struktur innefatta försvagningar vilka ses ogynnsamma då komponenterna ska pressas mot varandra. Däremot sågs den öppna strukturen fördelaktig då testning av prototypen underlättades. Exempelvis gavs fri sikt för observation av det integrerade stiftet och dess rörelse ned i välvningen liksom den öppna strukturen underlättade montering av det övre givarhuset i och med en styrande instruerande utformning. Anledningen till att ett klämförband förutsetts som monteringsmetod istället för ett traditionellt skruvförband kan beskrivas utifrån ett DFMA-perspektiv. Kalpakjian & Schmid (2008) menar att skruvar bör reduceras eller elimineras från konstruktionen för att underlätta montering och därmed reducera monteringstiden. Dessutom ses ett klämförband medföra en högre täthet, det vill säga reducerad kontaminationsrisk ges i och med förekomsten av färre potentiella ingångar för kontamination.



Figur 47: Presentation av en 3D-printad (SLS) prototyp vilken ämnas bekräfta en fungerande funktion hos detaljutvecklat koncept.

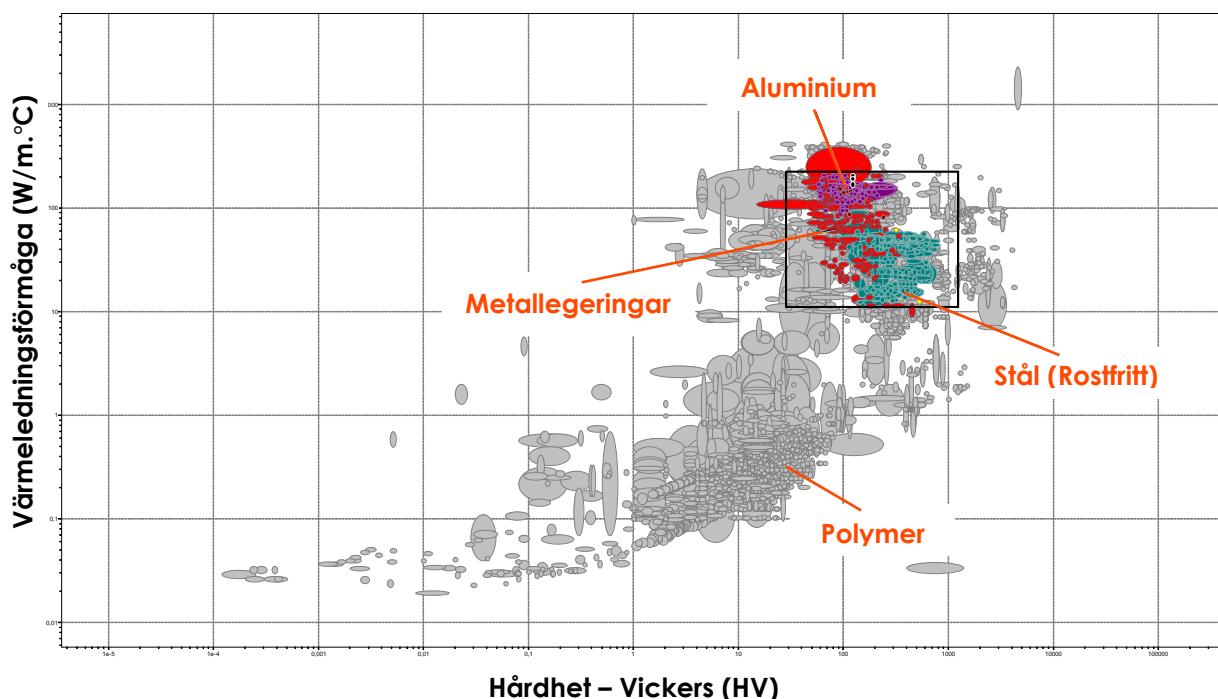
Vidare modifierades givarhusets undre och övre del med målsättningen att skapa gynnsamma förutsättningar för klämförbandet liksom skapa en design vilken möjliggör för tillverkning, särskilt CNC-bearbetning. Således elimineras den öppna strukturen på vilken det undre givarhuset utformats utan de tunna väggarna, se figur 48. Som kan ses i figur 48 har det övre givarhuset givits ett spår mellan den yttre väggen och den styrande förhöjningen, vilket tillåter fräsverktygets förflyttning längs den yttre väggen (insida) utan att skapa oönskade avrundningar.



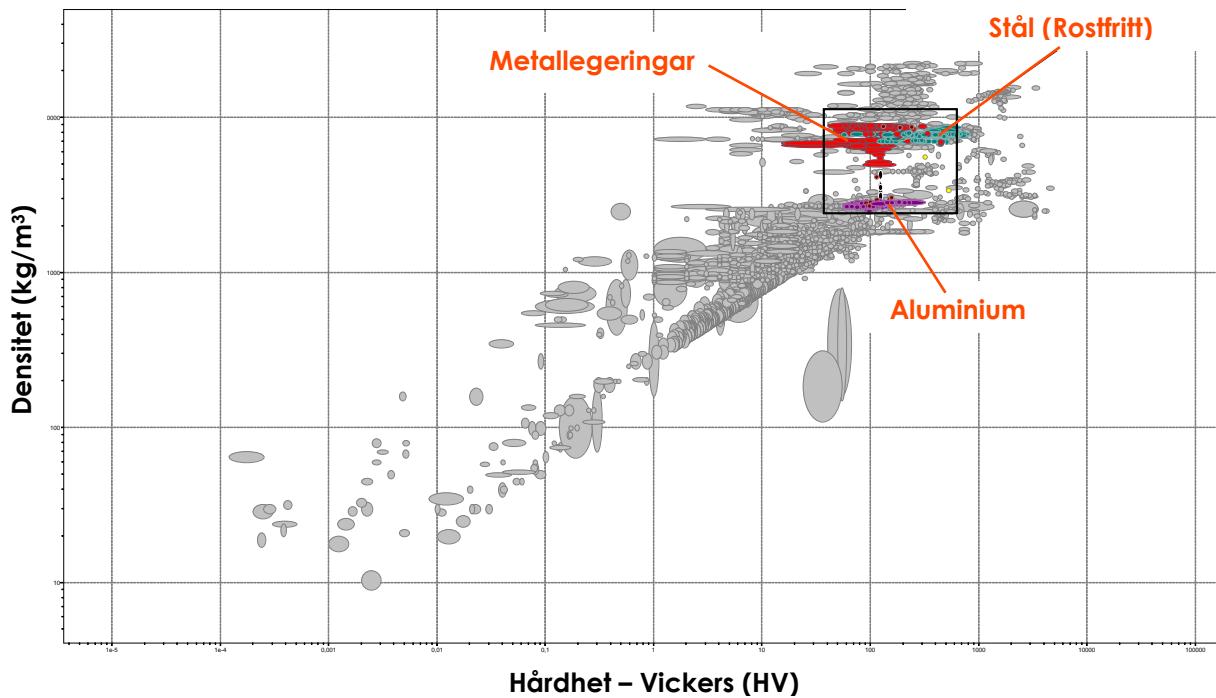
Figur 48: Presentation av modifierat givarhus (övre och undre del).

4.5.1 Materialval

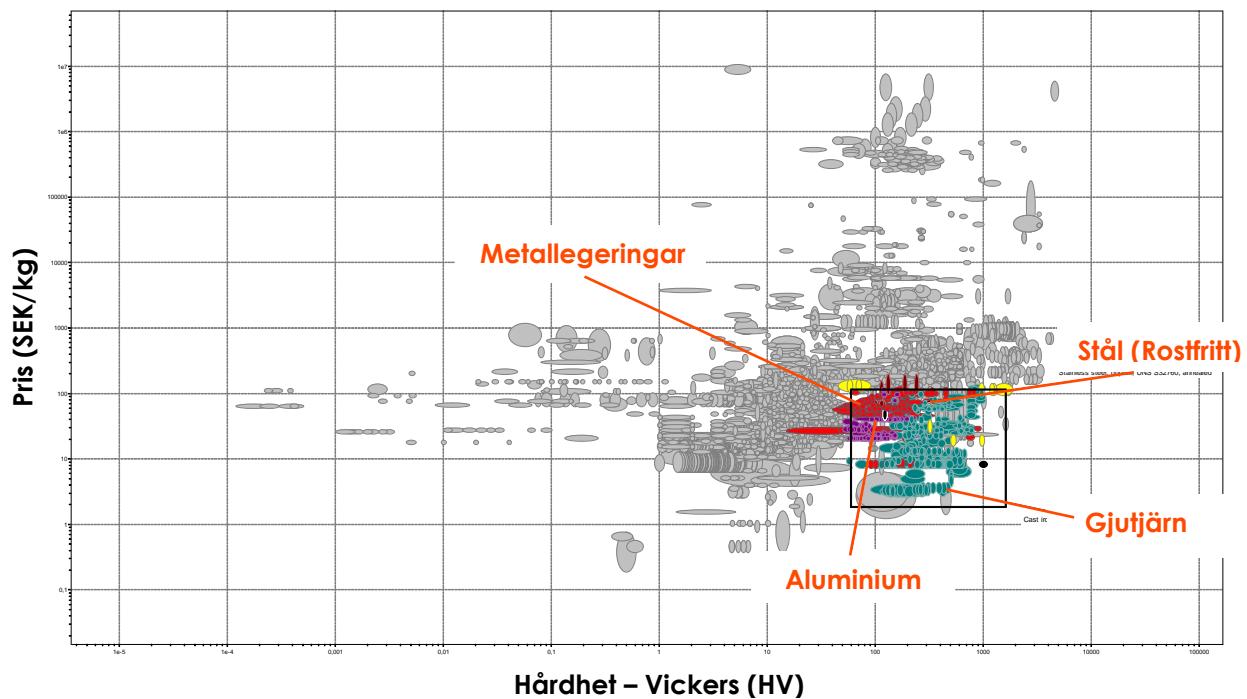
Utöver specifikation av komponenter och geometrier liksom huruvida komponenter ämnas monteras beaktar detaljutvecklingsfasen även val av material. Inledningsvis nyttjas Granta Edupack för att undersöka adekvata material där egenskaperna värmelägningsförmåga, densitet och pris jämförs mot hårdhet. I diskussion med fallföretagets R&D påvisades dessa egenskaper vara betydande för pulsgivarens funktion liksom förmåga att motstå yttre krafter. Värmelägningsförmågan ses mer som ett avgörande krav, medan densitet och pris ses som önskvärda parametrar. Detta då ju lägre densitet och pris desto lägre vikt och pris ges för den slutliga produkten, vilket ur fallföretagets perspektiv är önskvärt men inte ett krav. Medan en hög värmelägningsförmåga möjliggör avledning av värme från de roterande kullagren, vilket därmed har påverkan på pulsgivarens funktionalitet. Följande figurer, 49-51, presenterar utfallet från materialundersökningen.



Figur 49: Materialegenskapen värmelägningsförmåga jämförs mot hårdhet.



Figur 50: Materialegenskapen densitet jämförs mot hårdhet.



Figur 51: Materialets pris jämförs mot materialegenskapen hårdhet.

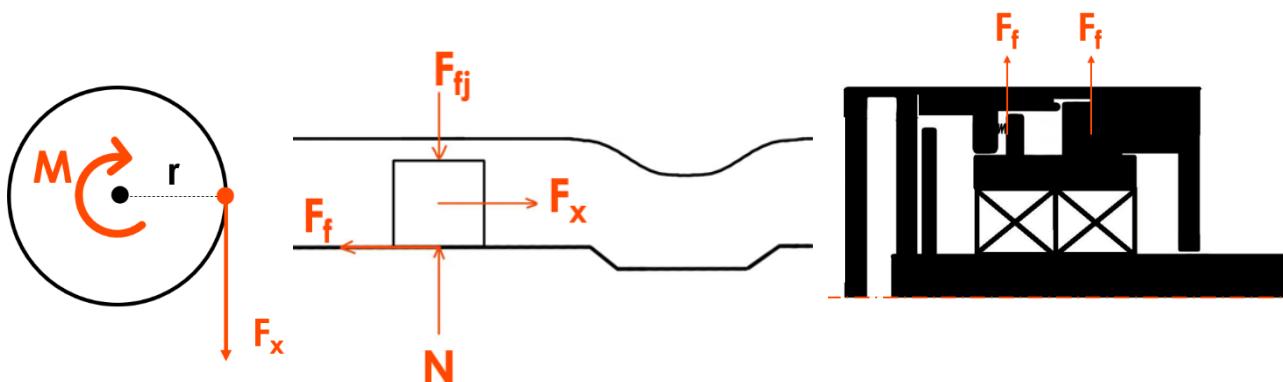
Baserat på utfallet från materialundersökningen kan konstateras att adekvata material ses vara olika varianter av rostfritt stål och aluminium. Fallföretaget använder idag endera rostfritt stål (4104) eller aluminium (EN AW-6026 T6) för befintligt produktutbud där aluminium används mer frekvent. Medan rostfritt stål enbart används i de fall då kunden kräver det, med undantag för axlar vilka alltid tillverkas i rostfritt stål då materialets utvidgningskoefficient kongruerar med kullagrets. Detta då rostfritt stål, till skillnad från aluminium, ses vara mer hållfast i och med en högre hårdhet, därmed ses det ha ett högre

inköpspris liksom vara svårare att bearbeta vilket ökar tillverkningskostnaden. Utöver kostnadsfaktorn har materialundersökningen även påvisat att aluminium är ett material med god värmeförståelse och innehåller en lägre densitet än rostfritt stål, vilket möjliggör för en så lätt slutprodukt som möjligt. Fallföretaget menar även att aluminium i många fall är mer kompatibelt med olika limtyper då dem flesta limtyper har svårighet att väta på rostfritt stål. Generellt, gör sig metaller, till skillnad från polymerer, fördömligt som konstruktionsmaterial i och med dess värmeförståelse liksom förmåga att kraftigt deformera utan att brott sker (Roesler et al., 2007). Roesler et al. (2007) menar att metaller, generellt, ses innehålla en högre styvhetsgrad än exempelvis polymerer då metallatomerna vanligtvis arrangeras i enlighet med en regelbunden kristallin ordning. Medan polymerer baseras på en oregelbunden anisotropisk struktur på vilken högre spänningar ges vid belastning (Roesler et al., 2007; Toubal et al., 2005).

Med utförd materialundersökning som underlag liksom synpunkter från fallföretagets R&D bedöms aluminium (EN AW-6026 T6) vara ett lämpligt material för, i detta stade, utvecklat koncept. Således ses givarhus (undre och övre del), lagerhus och kåpa rimligtvis tillverkas i aluminium, medan axeln tillverkas i rostfritt stål (4104).

4.5.2 Dimensionering av fjäderkraft

Detaljutvecklingsfasen har även syftat till att specificera lämplig fjäderkraft vilken strävar efter att möjliggöra önskad funktion om att skapa ett avstånd mellan rotor och statoren. Till att börja med frilades konceptet där konceptets huvudsakliga funktion beaktas, vilken kan ses i figur 52.



Figur 52: Friläggning av slutkoncept.

Vidare beräknades vridmomentets (5 Nm) motsvarande kraft, F_x , vilken påvisades vara ungefär 190 N då lagerhusets maximala diameter är 53 mm. Genom friläggning ges:

$$F_x = 2\mu \cdot F_{fj} \quad \text{där } \mu = 0,2$$

Då rotation av lagerhuset ses ge en friktionskraft dels vid avsedd funktion, dels vid vågbrickan ges en friktionskraft på 2μ . Med ovanstående ekvation beräknas den fjäderkraft som förväntas för att möjliggöra avsedd funktion till 472,5 N vid ett vridmoment på 5 Nm.

Med följande ekvation ges en bedömning av vilken fjäderkonstant, k , som motsvarar en fjäderkraft på 472,5 N:

$$k = \frac{F_{fj}}{x} \quad \text{där } x = 2 \text{ mm (Fjäderns maximala arbetslast)}$$

Således kan konstateras att konceptet kräver en fjäder vilken har en fjäderkonstant på ungefär 236 N/mm. Detta indikerar en ökning på drygt 70 % gentemot given fjäder (vågbricka) som beaktats tidigare vilken har en fjäderkonstant på 68 N/mm. Med andra ord ses en tre gånger starkare fjäder krävas för att möjliggöra avsedd funktion. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix E.

4.6 Konceptutvärdering

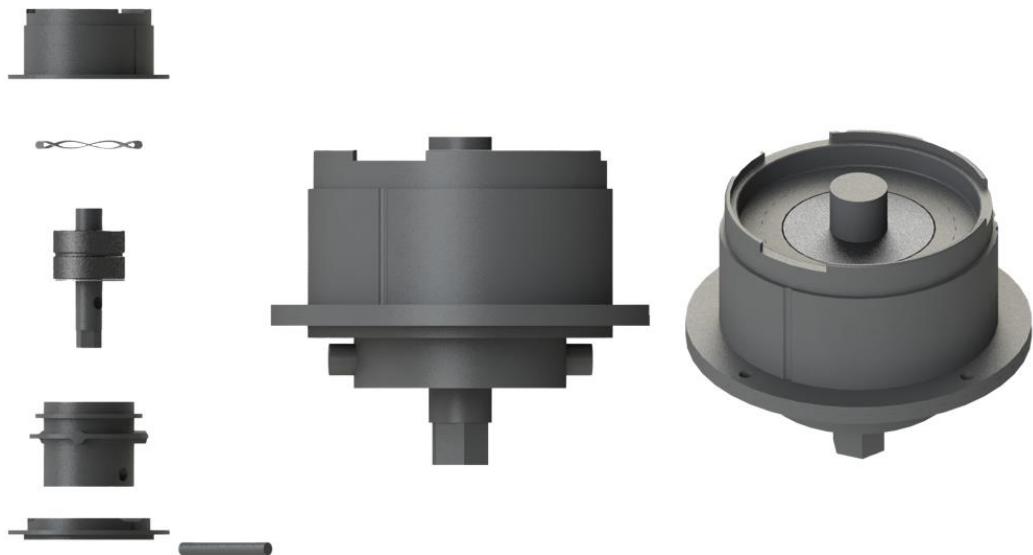
Följande avsnitt avser presentera den slutliga utvärderingen av framtaget koncept vilken beaktar två delar: 1) en reell utvärdering; 2) en teoretisk utvärdering. Den reella utvärderingen syftar till att ge en mer realistisk uppfattning av konceptets funktionalitet genom testning av en fysisk prototyp tillverkad i aluminium. Detta för att påvisa vilket vridmoment som förutsätts då given fjäderkraft appliceras. Målsättningen med utvärderingen, som helhet, var att identifiera huruvida konceptet ses som en godtycklig lösning på vilken förutbestämda krav beaktas. Den teoretiska utvärderingen syftade till att konkretisera konceptet genom beräkningar på vilken en uppskattning om dess egenfrekvens liksom tolerans mot vibrationer och laster ges. Sålunda ses den teoretiska utvärderingen beakta den konceptuella lösning som tagits fram på vilken konceptets tolerans mot yttre krafter ges en bedömning.

4.6.1 Reell utvärdering av funktionalitet

För att kunna utföra den reella utvärderingen på vilken fysiska tester ämnas utföras krävs viss förberedning inför tillverkning och testning av prototyp. Inledningsvis modifierades därför framtaget koncept i CAD i syfte att möjliggöra och underlätta tillverkning liksom testning av prototypen.

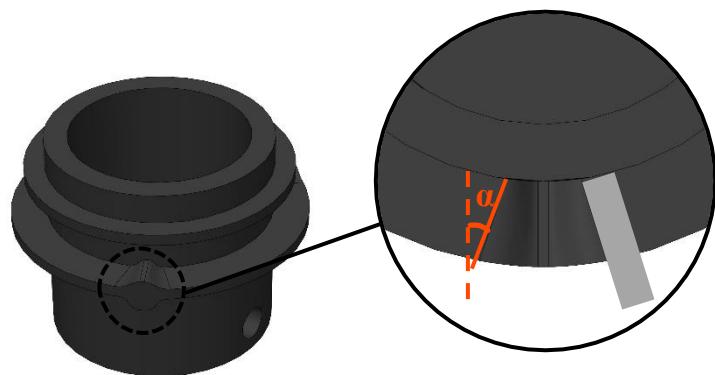
Förberedning för tillverkning och testning av prototyp

Vid förberedning av prototypen modifierades CAD-modellen av konceptet på vilken en fläns på det undre respektive det övre givarhuset adderades. Detta med syftet att möjliggöra testning av fullständigt koncept, inklusive fjäderkraft, samtidigt som modellen är demonterbar. Dessutom modifierades lagerhuset och axeln med målsättningen att sammanfoga dessa komponenter utan att använda en permanent lösning såsom limning. Detta för att simulera låsta lager. Således skapades ett hål i respektive komponent på vilken en ytterligare axel ämnas föras in genom de båda komponenterna. Konceptet modifierades även med hänsyn till given tillverkningsmetod vilken bestämde den toleransvidd som krävs för att möjliggöra rörelse mellan olika komponenter. Då CNC-bearbetning sågs vara en adekvat och tillgänglig tillverkningsmetod vilken ses skapa produkter med hög noggrannhet bedömdes marginellt spelutrymme, mellan rörliga delar, till generellt 0,05 mm. Detta förankrades även hos relevant aktör på fallföretaget. Modifierat koncept, vilken anpassats för testning, visualiseras i figur 53 på s. 73.



Figur 53: Visualisering av förberedd testmodell.

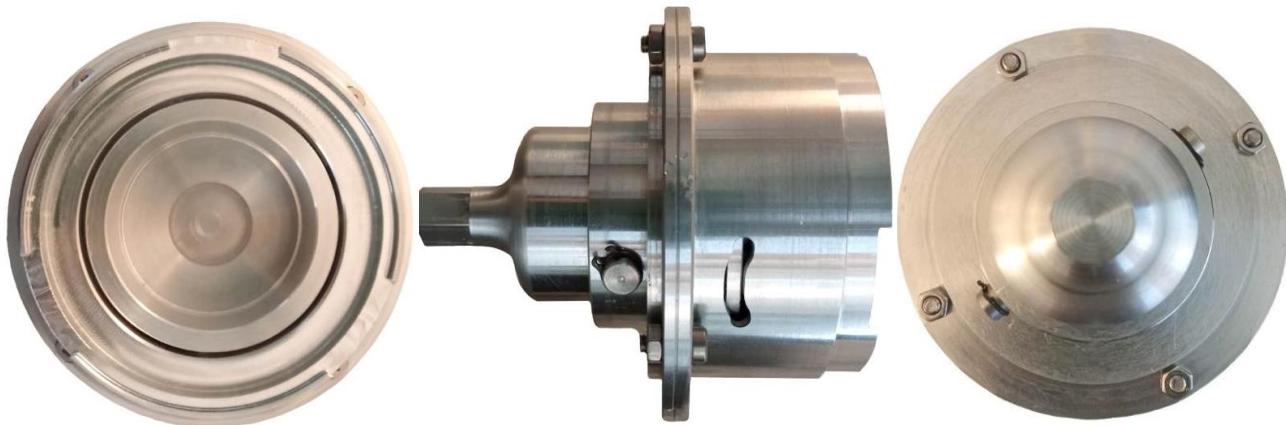
För att möjliggöra tillverkning av lagerhuset, med avseende på CNC-fräsning, påvisades nödvändiga modifieringar behöva tillämpas vilka beaktar utformning av de integrerade stiftens. Detta då tillverkning av avsedda stift förutsätter rotation av arbetsstycket, vilket medför att utformade stift ses behöva riktas in mot mitten för att korrelera med fräsvärtygets ($\varnothing 5$ mm) infallsvinkel, se figur 54. Således angavs en vinkel, α , på 15° . På samma sätt modifierades de integrerade stiftens undre del. Angående det undre och övre givarhuset gavs en motsvarande modifiering i syfte att skapa en matchning för att säkerställa att samtliga komponenter ses kunna samverka med varandra och därmed uppnå förväntad funktion.



Figur 54: Visualisering av stiftmodifikation.

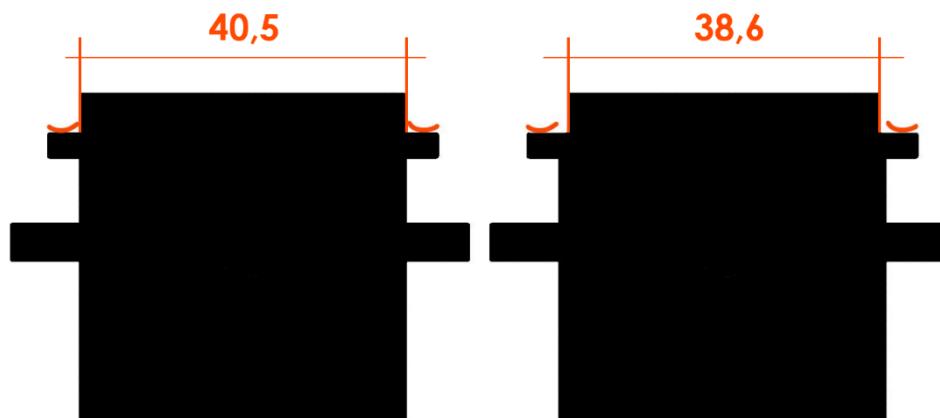
Tillverkning och testning av prototyp

Tillverkning av prototypen skedde med hjälp av interna resurser hos fallföretaget så som manuella och CNC-baserade svarvnings- och fräsningsprocesser. Tillverkad prototyp visualiseras i figur 55.



Figur 55: Presentation av tillverkad prototyp i aluminium (EN AW-6026 T6).

Inledningsvis utfördes en momentmätning av tillverkad prototyp med hjälp av momentmätaren Mecmesin. För testning av prototypen användes en öppen vågbricka med fjäderkonstanten 68 N/mm då denne sågs tillgänglig vid utförandet av testet. Mätningen påvisade ett vridmoment på uppemot 5 Nm då de integrerade stiftarna förflyttas ned i respektive upp ur utformade välvningar. Medan i välvningen, det vill säga konceptets felläge, påvisades ett obetydligt vridmoment på $0,5 \text{ Nm}$. Detta då konceptet i felläget inte förväntas ge någon större fjäderkraft. Dimensionering av fjäderkraft (teoretisk utvärdering) påvisade dock att det krävs en tre gånger starkare vågbricka för att åstadkomma 5 Nm . Vidare beaktades vågbrickans specifikationer på vilken gav en indikation på att vågbrickans fjädrande egenskap hindras av för lite marginellt spelutrymme mellan vågbrickan och lagerhuset. Dessutom ses given vågbricka vara öppen och inte sluten, vilket medför potentiell vridning av fjädern vilken därmed ses ge eventuell lösning runt lagerhuset. Vidare korrigerades detta, med hjälp av en svarvningsprocess, på vilken lagerhusets diameter minskades till $38,6 \text{ mm}$, ses figur 56 för illustration.



Figur 56: Illustration av korrigering.

Vidare utfördes en ny momentmätning vilken påvisade ett genomsnittligt vridmoment på 3,2 Nm. Därefter utfördes en kontrollberäkning av vilket moment som förväntas då given vågbricka, vilken medför en fjäderkraft, F_{fj} , på 130 N enligt upprättade specifikationer, beaktas. Följande beräkning redogör för förväntat vridmoment:

$$M = F_x \cdot r \quad \text{där} \quad r = 0,0265 \text{ mm} \quad , \quad F_x = F_{fj} \cdot 2\mu \quad , \quad \mu = 0,2$$

Således ges ett förväntat vridmoment på 1,4 Nm vilket innebär att utförd momentmätning ger ett vridmoment som är ungefär 55 % högre än förväntat. Detta kan potentiellt förklaras av att veriktig friktionskraft ses högre än beräknat, vilket beror på att prototypen har tillverkats i aluminium som är obehandlat och därmed mjukare än ett härdningsbehandlat. Exempelvis bör materialet anodiseras för att öka materialets hårdhet. Då två kontaktytor gnids mot varandra, där ett relativt mjukt material beaktas, kan smetning fås. Smetning är en effekt av adhesiv nötning (Kalpakjian & Schmid, 2008). Kalpakjian & Schmid (2008) menar att glidning mellan två komponenter resulterar i adhesiv nötning på vilken den svagare/mjukare komponenten ges ett spår då det kräver mindre energi. På grund av smetning får en större friktionskraft än beräknat vilket medför att ett högre vridmoment ges.

För att kontrollera sannolikheten att det är en ökad friktionskraft som är orsaken till uppmätt vridmoment utfördes en ytterligare momentmätning där prototypen givits smörjning vilken beaktar fettet LGHP2. På så sätt förväntas friktionskraften minska liksom förhindra smetning. Mätningen påvisade ett genomsnittligt vridmoment på 2,2 Nm vilket är ungefär 30 % lägre än uppmätt vridmoment utan smörjning. Således ges en indikation på att antagen orsak till tidigare uppmätt vridmoment är befogad. Däremot ses uppmätt vridmoment fortfarande avvika från beräknat vridmoment, vilket indikerar ett behov av vidare undersökningar för att identifiera en mer korrekt friktionskraft. Detta för att vidare kunna säkerställa korrekt utförda kontrollberäkningar.

4.6.2 Teoretisk utvärdering av tolerans mot yttre krafter

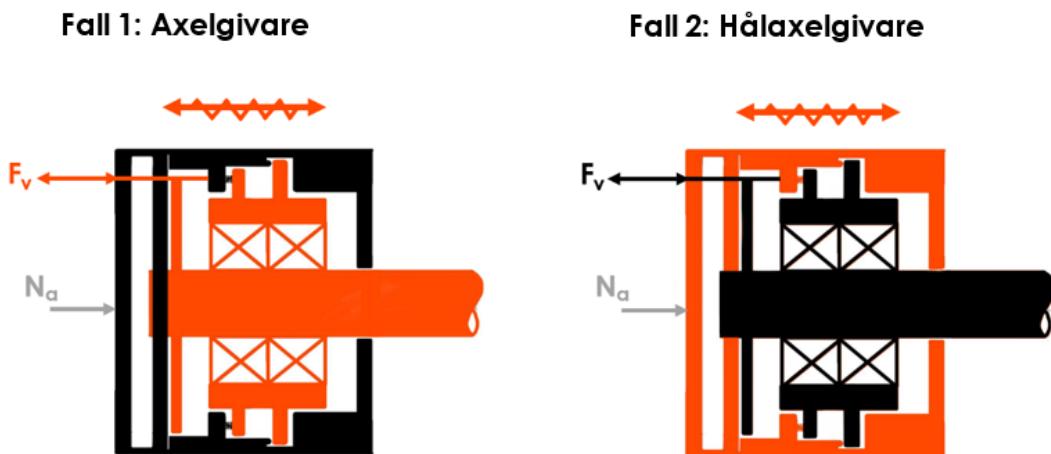
Inledningsvis beräknades konceptets egenfrekvens på vilken konceptets kritiska varvtal bedömdes. Egenfrekvensen beräknades med följande formel vilken beaktar axiellt led där ansatt fjäder inverkar:

$$f_{n1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Där k avser berörd fjäderkonstant och m avser den massa som inverkar på fjädern. I och med att det finns två typer av givare, axelgivare och hålaxelgivare, ses massan variera beroende på fall. Vid användning av en axelgivare ses givarhuset vara fast inspänd på vilken axeln, inklusive lagerpaket, lagerhus och rotor, tillåts förflyttas i axiellt led. Medan användning av en hålaxelgivare innebär att axeln är fast inspänd på vilken givarhus, inklusive stator och kåpa, tillåts förflyttas i axiellt led. För axelgivare ses således massan vara 0,170 kg, medan massan för hålaxelgivare ses vara 0,110 kg. Respektive massa har uppskattats och verifierats med hjälp av CAD där aluminiumlegeringen 6061-T6 liksom rostfritt stål 201 beaktats. Med en beräknad fjäderkonstant på 236,3 N/mm får en egenfrekvens på 0,59 Hz för axelgivare och 0,74 för hålaxelgivare. Detta motsvarar ett varvtal på ungefär 35,6 rpm respektive 44,3 rpm. Idag appliceras

fallföretagets givare för olika drivsystem vilka generellt behandlar ett varvtal från 3000 rpm till 6000 rpm. Således ses konceptet inte medföra någon större problematik med avseende på egenfrekvensen. Däremot bör kunder informeras om konceptets kritiska varvtal för att säkerställa att drivsystemets aktuella varvtal inte sammanfaller med konceptets egenfrekvens. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix F.1.

Vidare kontrollerades konceptets känslighet för vibrationer i axiellt liksom radiellt led. I axiellt led relateras en eventuell vibrationskraft, F_v , till ansatt fjäderkraft, N_a , vilken illustreras i figur 57, för axelgivare respektive hålaxelgivare.



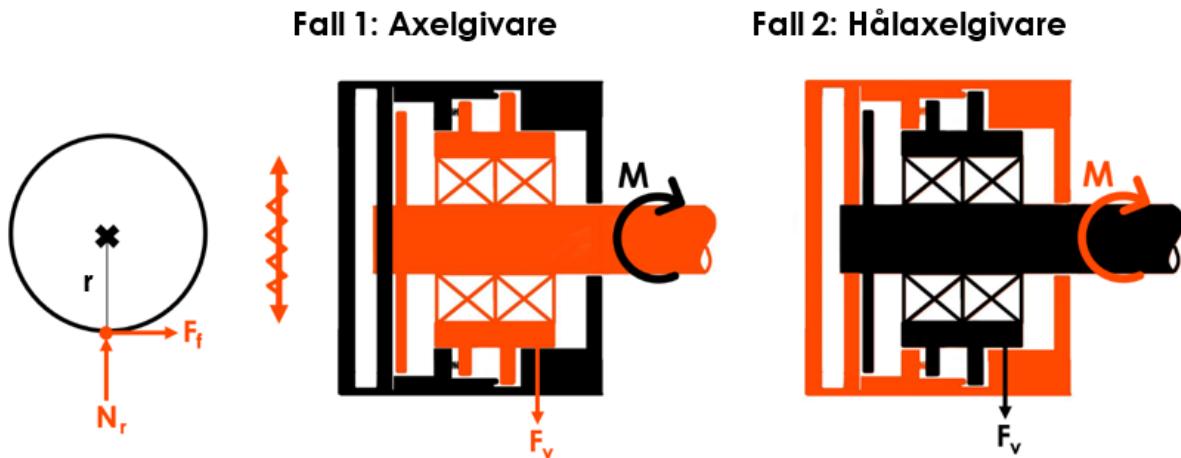
Figur 57: Illustration av huruvida vibration, i axiellt led, inverkar på en axelgivare respektive hålaxelgivare.

Vibrationskraften för respektive fall beräknas med följande formel:

$$F = m \cdot a$$

där a ses vara den maximala accelerationskraft som konstruktionen förutsätts tolerera vilken specificeras till 300 m/s^2 . Vibrationskraften för respektive fall resulterar därför i 51 N för fall 1 och 33 N för fall 2. Detta i jämförelse med teoretiskt ansatt fjäderkraft, vilken ses motsätta vibrationskraften, utgörs av $10,7\%$ respektive 7% av ansatt fjäderkraft. Sålunda ses fjäderkraften, vid vibration, vara $472,5 \text{ N} \pm 10,7\%$ för fall 1 och $472,5 \pm 7\%$ för fall 2. Däremot ses detta enbart vara aktuellt för läge 2 (felläge) då konceptet under läge 1 (normal drift) beror av en maximalt hopytryckt fjäder liksom en styrning. Således finns inget utrymme vilken tillåter svängningar. Detta påvisades även under fysisk testning. I läge 2 finns utrymme vilket tillåter svängningar på vilken vibrationer ses medföra en betydlig påverkan på konstruktionen. Dock, är syftet med läge 2 att registrera lagerfel vilket innebär att givaren i detta läge redan är defekt. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix F.2.

I radiellt led ses vibrationskraften inverka på ansatt vridmoment då kontaktytan mellan givarhuset och lagerhuset ses ge en ökad friktionskraft. Huruvida vibrationskraften relateras till momentet illustreras i figur 58.



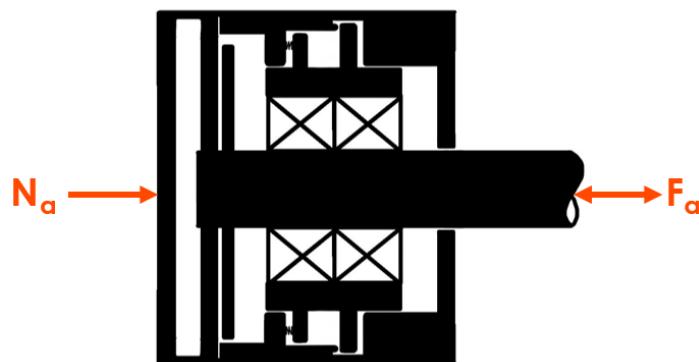
Figur 58: Illustration av huruvida vibration, i radiellt led, inverkar på en axelgivare respektive hålaxelgivare.

Vibrationskraften för respektive fall beräknas med följande formel:

$$F = m \cdot a \cdot \mu$$

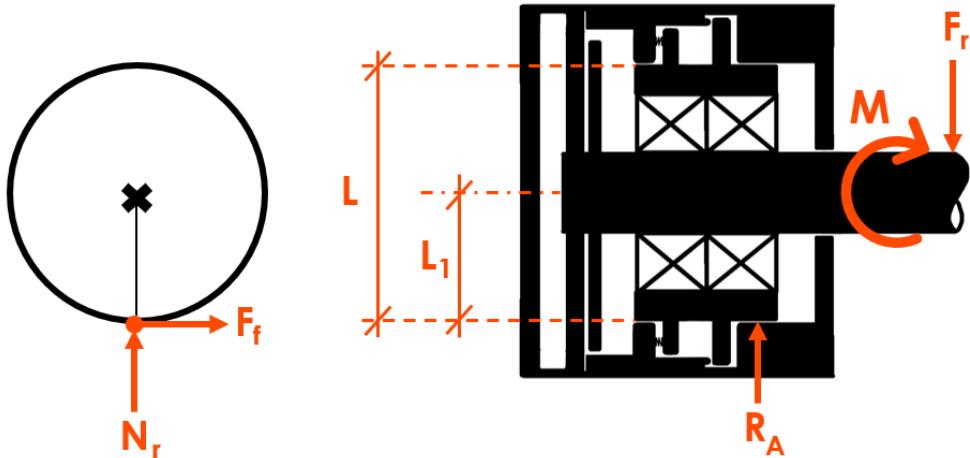
Där μ antas vara 0,2 för aluminium. Således får en vibrationskraft på 10,2 N för fall 1 och 6,6 N för fall 2. Detta resulterar i ett moment vilken beräknas till 0,21 Nm respektive 0,13 Nm då lagerhuset ses innehålla en diameter på 0,404 m. I jämförelse med förväntat vridmoment på 5 Nm ses detta medföra en ökning på 4,1 % respektive 2,6 %. Med andra ord ses ett trögare moment impliceras av vibrationskraften. Däremot kan andelen ses obetydlig och därmed försumbar. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix F.2.

Slutligen kontrollerades huruvida konceptet sågs tolerant mot eventuella laster i axiellt respektive radiellt led. I axiellt led ses en last, F_a , på maximalt ± 100 N inverka på konstruktionen i enlighet med specificerade krav. Denna kraft relateras till ansatt fjäderkraft, vilken illustreras i figur 59, på vilken F_a ses utgöra 21 % av teoretiskt framtagen fjäderkraft. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix F.3.



Figur 59: Illustration av huruvida axiell last motsätts av en fjäderkraft.

I radiellt led ses en last, F_r , på maximalt 125 N inverka på konstruktionen i enlighet med specificerade krav. Denna kraft relateras till ansatt vridmoment vilken illustreras i figur 60.



Figur 60: Illustration av huruvida radiell last relateras till vridmomentet.

Med hjälp av en jämviktsberäkning på vilken momentet formuleras i relation till övriga krafter får att reaktionsmomentet, R_A , kan beräknas med följande formel:

$$R_A = (F_r + F_f) \cdot L_1$$

Där friktionskraften beräknas med följande formel:

$$F_f = \mu \cdot N_r$$

Detta resulterar i ett vridmoment på 3 Nm då radiell last och glidning beaktas. I jämförelse med förväntat vridmoment på 5 Nm ses detta ge en avvikelse på 40 %. Sålunda bör konceptets tolerans mot axiell och radiell last utredas vidare för att säkerställa att belastning på givaren inte har alltför stor betydelse för dess funktionalitet. Samtliga beräkningar redogörs fullständigt i appendix F.3.

5 Resultat

Följande kapitel presenterar det slutliga konceptet vilken tagits fram iterativt under den empiriska studien som presenterades i föregående avsnitt.

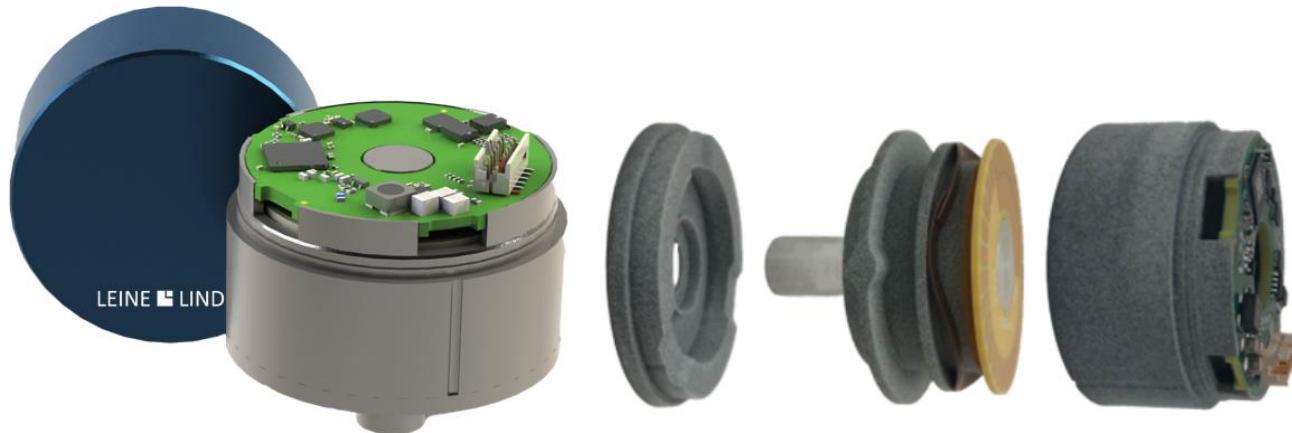
5.1 Presentation av slutkoncept

Framtaget koncept innefattar en grundläggande fungerande funktion vilken möjliggör för en avståndsförändring i axiellt led då ett vridmoment på 5 Nm uppnås. Detta genom att låta en ansatt fjäderkraft pressa ned tre integrerade stift i en motsvarande välvning. En sådan funktion möjliggör för ett tillståndsbaserat underhåll, vilket reducerar behovet av ett omfattande förebyggande underhåll vilket i sin tur medför reducerade kostnader liksom ökad tillgänglighet av konstruktionen. Figur 61 åskådliggör en renderad bild av framtaget koncept, i exploderat läge, vilken ämnas ge en uppfattning om konceptets uppbyggnad liksom utformning och materialval för respektive komponent. Dessutom ges en uppfattning om huruvida rotor och stator förhåller sig till varandra liksom till konceptet som helhet. I appendix G-J ges en mer utförlig redogörelse av utformat koncept på vilken de tre huvudsakliga komponenterna (undre och övre givarhus samt lagerhus) ges ritningsunderlag. Konceptet ses innehålla, i korrekt givarkontext, totalt 12 komponenter till skillnad från grundkonceptet vilken innehåller 14 komponenter. Således ses en minskning på 14,3 %. Framtaget koncept ses dessutom innehålla en sluten produktstruktur vilken reducerar kontaminationsrisken.



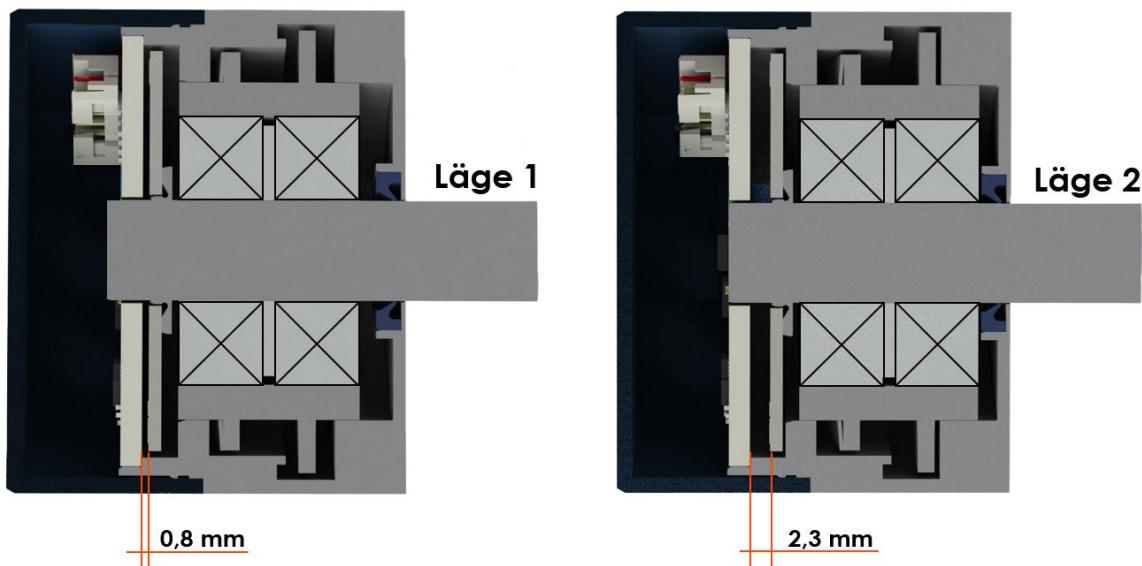
Figur 61: Exploderad vy av slutkoncept där undre givarhus, packning, lagerhus, vågbricka, övre givarhus, axel och lagerpaket, rotor, stator och kåpa ses från vänster till höger.

Vidare visualiseras i figur 62 en prototyp (SLS-printad) av det slutliga konceptet vilken har tagits fram i syfte att utvärdera huruvida framtagen mekanisk lösning ses kunna integreras i fallföretagets 600-serie. Sålunda har de tre huvudsakliga komponenterna modifierats för att efterlikna fallföretagets befintliga produktarkitektur på vilka har anpassats till givarens standardkomponenter: vågbricka, axel och lagerpaket samt rotor (kodskiva) och stator (kretskort).



Figur 62: Presentation av en renderad bild (vänster) samt visualisering av prototyp i exploderad vy (höger).

Sammanfattningsvis har studien syftat till att konkretisera en patenterad lösning genom att undersöka huruvida en mekanisk lösning kan uppnå ett utökat avstånd mellan rotor och stator, i en induktiv absolut pulsgivare, på vilken sänder en signal till sammankopplad programvara som registrerar avståndet. Registrerat avstånd indikerar att lagren i givaren har låsts vilka behöver bytas. Utifrån riktlinjer från fallföretaget har studien ämnats undersöka alternativa lösningar vilka ger ett utökat avstånd på 1-1,5 mm. Ett utökat avstånd på minst 1 mm ses resultera i att statorn förlorar kopplingen med rotorn och därmed samtliga positionsdata som givaren samlat in. Slutligt koncept har påvisats ge ett utökat avstånd på maximalt 1,5 mm mellan rotor och stator vilket visualiseras i figur 63.



Figur 63: Visualisering av den avståndsförändring som erhålls av slutkonceptet.

5.2 Målvärden

Nedanstående tabell 12 har sammanställts i syfte att presentera det slutliga konceptets uppmätta prestanda vilken givits från utförd konceptutvärdering. Sålunda presenteras både teoretiskt (tänkt) och verkligt (reellt) värde. Uppmätt prestanda jämförs med förutbestämda krav definierade av fallföretaget vilka baseras på krav som befintligt produktutbud strävar efter att uppnå, även om vissa krav ses ge en procentuell bedömning.

Tabell 12: Presentation av utvärderade värden vilka relateras till tidigare definierade målvärden .

Egenskap	Enhet	Målvärde (A)	Tänkt värde	Reellt värde
1 Maximalt yttermått	mm	A = 58	58	58
2 Utökat axiellt avstånd	mm	1 ≤ A ≤ 1,5	1,5	1,5
3 Vridmoment	Nm	A = 5	5	2,2
4 Fjäderkraft	N	-	472,5	130
5 Egenvängning	Hz	50 ≤ A ≤ 100	0,59*	0,74**
6 Axiell vibrationskänslighet	%	A ≥ ±10	1 ±0*	±0**
			2 ±10,7*	±7**
7 Radiell vibrationskänslighet	%	A ≥ 10	4,1*	2,6**
8 Axiell belastning	%	A ≥ 10	21	-
9 Radiell belastning	%	A ≥ 10	40	-

*Axelgivare

1 Under normal drift

**Hållaxelgivare

2 Vid felläge

Med dessa värden presenterade bedöms konceptets funktionalitet vara mindre beroende av temperaturvariationer ($-40^{\circ}\text{C} \leq A \leq +100^{\circ}\text{C}$) liksom vibrationer ($a = 300 \text{ m/s}^2$) då ett vridmoment på 5 Nm förutsetts likväld som en total fjäderkraft på 472,5 N beaktas. Vid bedömning av konceptets vibrationskänslighet bedöms konceptet vara mindre känsligt för vibrationer under normal drift, men större känslighet då felläge intas. Däremot ses konstruktionen i detta skede redan vara defekt. Angående radiellt led ses vibrationer medföra minimal inverkan oavsett givartyp. Vid bedömning av godtycklig kraftförändring har ett procentuellt mått givits vilken är mindre än 10 %. Detta ses godtyckligt i dagsläget, men vid eventuell implementering av konceptet krävs vidare undersökning för att säkerställa korrekt

bedömning. Likaledes bedöms konceptets förmåga att motstå axiell ($F_a = 100\text{ N}$) och radiell ($F_a = 125\text{ N}$) belastning. Utförd konceptutvärdering har påvisat att konceptet uppvisar en betydande inverkan vid eventuell belastning, särskilt i radiellt led, vilket bör beaktas vid eventuell implementering av konceptet.

Sammanfattningsvis har studien tagit fram en mekanisk lösning som givits en utformning vilken är mindre känslig för vibrationer, men uppvisar potentiell problematik vid större belastningsfall. Framtagen lösning ses möjliggöra ett utökat avstånd på 1,5 mm liksom vara dimensionellt kompatibel med fallföretagets 600-serie. Baserat på uppvisade mätvärden ses implementering av framtagen lösning vara mer fördelaktig för en hålaxelgivare, förutsatt att förväntad rörelse tillåts ske av momentstaget. Detta då uppvisade värden ses lägre gentemot axelgivare liksom förväntad avståndsförändring inte ses vara lika beroende av kontextspecifik teknikalitet.

6 Analys

Följande kapitel ämnas ge en analys av utförd studie och dess resultat på vilken formulerade forskningsfrågor besvaras. Dessutom analyseras slutresultatet av framtagen konstruktion och den process som beaktats vid framtagningen. Avslutningsvis påvisas huruvida studiens syfte och mål ses uppfyllda.

6.1 Återkoppling till forskningsfrågor

Denna studie gavs på uppdrag av Leine & Linde med målsättningen att konkretisera och vidareutveckla en tidigare patenterad lösning vilken ämnas detektera låsta lager hos en induktiv FSI-givare. Med detta i åtanke formulerades två forskningsfrågor.

F1 Hur kan en mekanisk lösning konstrueras för att möjliggöra detektering av låsta lager hos en roterande induktiv pulsgivare och därmed öka funktionssäkerheten för ett styrsystem?

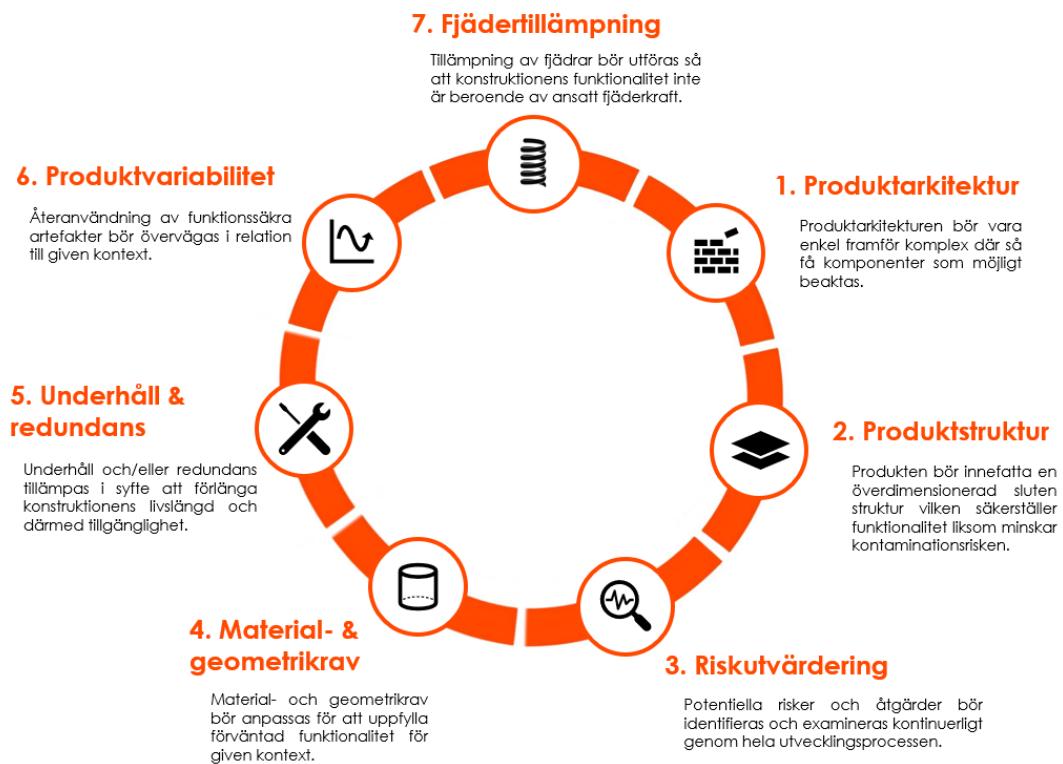
Bhavsar & Patel (2013) har påvisat olika övervakningstekniker vilka kan nyttjas för övervakning av aktuell prestanda hos kullager. Bhavsar & Patel (2013) menar att ett fel tillstånd hos kullager kan upptäckas genom att mäta elektromagnetiska värden vilka avviker från normalt tillstånd. I linje med vad Bhavsar & Patel (2013) beskriver gällande prestandaövervakning har denna studie ämnats undersöka huruvida förlorad rotationsförmåga hos kullager kan upptäckas med hjälp av en mekanisk lösning. En lösning vilken syftar till att fysiskt skapa ett utökat avstånd mellan datainsamlingsenheten (rotor), vars syfte är att samla in positionsdata, och avläsaren (stator). På så sätt fås avvikande elektromagnetiska värden, vilka i jämförelse med normala värden indikerar att ett fel uppstått, då en induktiv mätteknik avses. Detta beskrivs på en övergripande nivå i ett patent utformat av fallföretaget vilken denna studie har verifierat och vidareutvecklat. Studien har iterativt undersökt sex alternativa koncept, till den patenterade lösningen, genom tillverkning och testning av funktionsprototyper. Detta med målsättningen att identifiera en godtycklig fungerande funktion. De olika koncepten syftade således till att utvärdera huruvida en mekanisk lösning kan nyttjas för att möjliggöra detektering av förlorad rotationsförmåga hos kullager. Resultatet av studien har påvisat att en sådan lösning förutsätter en fjäderkraft vars syfte är att skapa en friktionskoppling vilken bestämmer det vridmoment som krävs för att möjliggöra registrering av ett avvikande elektromagnetiskt värde. Detta då ansatt vridmoment omvandlar en roterande rörelse till en linjär rörelse vilken ämnas förflytta rotorn från statorn. Med framtagen lösning fås, vad Kazanzides (2009) kallar, en säkerhetsanpassad design vilken säkerställer konstruktionens funktionalitet. Kazanzides (2009) och Moubray (1997) har båda påvisat flera metoder vilka kan användas för att ge en ökad funktionssäkerhet, bland annat påvisas vakthundsprincipen. Moubray (1997) menar att vakthundsprincipen kan tillgodoses

genom automatiska skyddsanordningar som syftar till att uppmärksamma abnormala förhållanden genom varnande signaler och initiering av driftstopp. På så sätt förhindras farliga situationer att uppstå. Enligt Kazanzides (2009) ses principen säkerställa funktionaliteten hos en mjukvara genom införande av en extern elektrisk hårdvaruenhet så som en pulsgivare. Framtagen mekanisk lösning kan ses beakta vakthundsprincipen vilken ses tillgodoses genom en inbyggd funktion i hårdvaran (pulsgivaren). Den inbyggda funktionen ses därefter sända en signal, med given skanningsteknik, till mjukvaran vilken registrerar uppstått feltillstånd. Således ses den mekaniska lösningen bidra till ökad funktionssäkerhet hos givaren på vilken ett kvalitativt angreppsätt ses beaktas. Ett kvalitativt angrepssätt, enligt Smith & Simpson (2004), tillämpar olika försvarsdiscipliner vilka syftar till att reducera förekomsterna av olika systemfel. Genom att implementera ett kvalitativt angrepssätt liksom välbeprövade analystekniker så som FMEA kan potentiella feltillstånd inom ett system identifieras och examineras, menar Cristea & Constantinescu (2017). Studien har därför integrerat feleffektsanalyser redan i tidigt konceptutvecklingsstadium i syfte att identifiera underliggande och potentiellt kritiska feltillstånd för till synes kritiska komponenter i ett koncept. En komponent som sågs medföra problematik, utifrån ett funktionssäkert perspektiv, påvisades vara fjädern. Kalpakjian & Schmid (2008) menar att mekaniska fjädrar frekvent utsätts för cykliska eller periodiska laster, vilket ofta resulterar i utmattningsfel. I ett försök att öka funktionssäkerheten beaktades ett flertal säkerhetsprinciper vilka redogörs i standarden EN ISO 13849-2:2012. Detta resulterade i att den funktionssäkra funktionen, vilken ämnas skapa ett avstånd mellan rotor och stator, separerades från ansatt fjäderkraft liksom en tvingande funktion adderades till konceptet. Med andra ord ses funktionen fungera optimalt då fjädern fungerar, men fungerar även godtyckligt då fjädern fallerat.

Sammanfattningsvis medför framtagen mekanisk lösning ett effektivare underhållsarbete vilken baseras på en tillståndsbaserad underhållsteknik där en enhets funktion och egenskaper övervakas och kontrolleras. Bengtsson (2006) menar att tillståndsbaserad underhållsteknik behandlar och analyserar insamlade tillståndsdata vilka jämförs med normala målvärden. Sålunda ses den framtagna lösningen möjliggöra identifikation av lagerfel på vilken lagren förlorat dess rotationsförmåga. Framtagen lösning ses alltså kunna detektera lagerfel innan en allvarlig skada ses ske, vilket därmed bidrar till ökad tillgänglighet av konstruktionen liksom säkerställer funktionssäkerheten. Genom att detektera fel i tid ses reducerade kostnader ges då en potentiellt mindre allvarlig konsekvens behöver hanteras. Således ses utvecklad lösning ge en produkt vilken säkerställer kvaliteteten av dess funktionella prestanda.

F2 Vilka aspekter bör beaktas vid konstruktion av industriella roterande pulsgivare med induktiv mätteknik på vilken funktionssäkerheten ses öka?

En konstruktion vilken klassificeras som funktionssäker anses även vara robust. En robust konstruktion definieras av Ulrich & Eppinger (2014) och Kalpakjian & Schmid (2008) som en konstruktion vilken fungerar trots icke idealiska förhållanden. Sådana förhållanden innefattar, enligt Kalpakjian & Schmid (2008), variationer i omgivande temperatur, slumpmässiga vibrationer liksom dimensions- och ytvariationer. För att säkerställa en konstruktions funktionalitet även då utmanande förhållanden råder bör standarder, vilka berör säkerhetsrelaterade krav, beaktas. Exempelvis redogör standarden EN ISO 13849-2:2012 för olika säkerhetsrelaterade designprinciper vilka syftar till att vägleda utvecklingsprocessen vilken initierats för att ta fram en funktionssäker konstruktion. Genomgång av relevanta standarder och säkerhetsprinciper liksom framtagning av empiriska delresultat har identifierat sju betydande aspekter vilka bör beaktas vid konstruktion av funktionssäkra givare. Dessa presenteras och beskrivs övergripande i figur 64 på s. 85.



Figur 64: Presentation av de sju aspekter vilka ses relevanta att beakta vid utformning av funktionssäkra konstruktioner.

Vidare redogörs innehördens av respektive aspekt:

- 1** En enkel produktarkitektur, vilket enligt Kalpakjian & Schmid (2008) går i linje med riktlinjer för DFM och DFA, har visats vara gynnsam utifrån ett funktionssäkert perspektiv. I enlighet med DFM och DFA liksom standardenliga säkerhetsprinciper bör antalet komponenter och komponentvariationer reduceras i säkerhetsrelaterade system. Ju fler komponenter desto mer komplex ses systemet vara på vilken antalet potentiella fel tillstånd ses öka. Dessutom redogörs i uppvisade säkerhetsprinciper för betydelsen av att beakta komponentrelationer, på vilken rörliga komponenter bör hållas mekaniskt i en säker position tills en viss kraft ansätts vilken skapar önskad rörelse.
- 2** Utförd empirisk process har påvisat en mindre nackdel med att tillämpa en hålstruktur hos konstruktionen. Framförallt ses en hålstruktur medföra försvagningar i konstruktionen på vilken inte ses gynnsamt då konstruktionen tillämpas i utmanande miljöer. Istället ses utformning av givare, i många fall, beakta överdimensionering vilket innebär att en säkerhetsmarginal adderas på vilken en ökad mängd material ges (Efinger et al., 2022). Detta ses vara en säkerhetsrelaterad designprincip som säkerställer funktionell prestanda. Dessutom ses kontaminationsrisken för en hålstruktur potentiellt högre än för en slutna struktur. Vid glidning mellan två kroppar ses kontamination påverka friktionsspänningarna vilket resulterar i att slitage påskyndas. Vid utformning av givare vilka ofta tillämpas i utmanande och kontaminerade miljöer ses därför en hålstruktur problematiskt utifrån ett funktionssäkert perspektiv.

- 3** Kazanzides (2009) menar att riskutvärderingar bör behandlas kontinuerligt genom hela utvecklingsprocessen för att säkerställa en hög funktionssäkerhet hos en konstruktion. Således bör potentiella risker identifieras tidigt i processen för att senare re-examineras. Detta kan exempelvis göras med hjälp av analysverktygen FMEA och/eller FTA. Med andra ord ses kontinuerliga bedömningar göras för att evaluera konstruktionens tillförlitlighet; bedömningar av konstruktionens förmåga att utföra en viss funktion under givna förhållanden görs vilka baseras på tester och tidigare erfarenheter. Genom att evaluera effekten av ett potentiellt fel liksom beakta sannolikheten att felet sker ses tillförlitligheten öka hos konstruktionen på vilken konstruktionen kan anses funktionssäker (Efinger et al., 2022).
- 4** Efinger et al. (2022) påvisar att konstruktionens tillförlitlighet delvis beror på materialets hårdhet/styvhet. En hög hårdhet/styvhet förbättrar konstruktionens hållfasthet och därmed motstånd mot utmattning liksom slitage. Qiu et al. (2017) menar att materialets hårdhet är avgörande vilken har stor påverkan på utmattningsslitaget. En hög hårdhet ger förbättrad hållfasthet vilket resulterar i ökad livslängd hos konstruktionen. Författarna påvisar även yttemperaturens inverkan på hårdheten där en ökad yttemperatur kan resultera i minskad hårdhet hos materialet. Dessutom påvisar Kalpakjian & Schmid (2008) betydelsen av dimensionering och fastställande av geometrier vilket kan ses gå i linje med riktlinjer för DFM och DFA. Utformningen av konstruktionen bör därför beakta och kontrollera val av geometrier för att förhindra monteringsfel vilka kan resultera i brister hos funktionell prestanda. Sålunda bör, enligt Collins et al. (2010), material- och geometrikrav anpassas efter specifika krav för att uppfylla förväntad funktionell prestanda liksom motstå kontextspecifika miljöer, inklusive laster, moment och vibrationer, i syfte att reducera antalet potentiella feltillstånd.
- 5** En konstruktions livslängd kan förlängas genom tillämpning av relevant underhåll och redundans på vilken säkerställer konstruktionens tillförlitlighet under en längre period. Detta, menar Efinger et al. (2022), är särskilt viktigt för konstruktioner vilka innehåller mekaniska komponenter så som kullager. Kullager är nämligen komponenter vilka generellt har kortare livslängd än den etablerade konstruktionen som helhet. För att säkerställa att förlorad funktion hos kullagret sker så sent som möjligt bör komponenten ges underhåll. Antingen ges ett förebyggande underhåll där komponenten smörjs för att förhindra förlorad rotationsförmåga. Alternativt tillämpas en tillståndsövervakad underhållsprocess där sensorer mäter komponentens tillstånd vilken med hjälp av en mjukvara kan kommunicera när underhåll eller byte av komponenter krävs (Efinger et al., 2022). Ett annat sätt att förlänga en konstruktions livslängd är att införa redundans. Detta, vid konstruktion av givare, menar Kazanzides (2009), innebär att konstruktionen innehåller två givare på vilken funktionell prestanda säkerställs även då ett fel i den ena givaren upptäcks.
- 6** Många tillverkningsföretag liksom Leine & Linde har och fortsätter införa variabilitet i sin produktion. Variabilitet innebär att ett befintligt system eller en artefakt anpassas för att tillämpas i andra kontexter. På så sätt kan specifika kundbehov tillfredsställas på ett mer lönsamt sätt då utvecklingstiden för att ta fram ytterligare produktvarianter reduceras. Däremot ges utmaningar med ett sådant angreppssätt vilka korrelerar till funktionssäkerhet. Schulze et al. (2013) menar att återanvändning av funktionssäkra artefakter inom en ny kontext kan vara svåra att få godkända. Detta då de internationella säkerhetsrelaterade standarderna berör kontexten lika fullt som den enskilda artefakten. Således bör detta tas i beaktning vid utformning av funktionssäkra

konstruktioner för att säkerställa att förväntad nivå av funktionssäkerhet uppnås. Särskilt då analysverktyg så som FMEA och FTA inte tar hänsyn till variabilitet.

7 Utförd empirisk process liksom genomgång av standarden EN ISO 13849-2:2012 har påvisat komplikationer med att nyttja mekaniska fjädrar i funktionssäkra konstruktioner. Detta då fjädrar är mekaniska komponenter vilka frekvent utsätts för utmattningsfel (Kalpakjian & Schmid, 2008). Således tillåts inte fjädern vara den avgörande komponenten vilken bestämmer huruvida förväntad funktionell prestanda uppnås eller inte. Med andra ord ska fjädern kunna ge tillräcklig kraft även efter utmattningsbrott. Alternativt bör säkerhetsrelaterade funktioner separeras från fjäderkomponenter, det vill säga göras oberoende av fjäderkrafter. Dessutom ses öppna fjäderkomponenter medföra eventuell låsning av axeln, vid vridning, vilket riskerar att avsedd funktion inte uppnås.

6.2 Analys av framtagnen konstruktion

Eftersom pulsgivare ofta tillämpas för motorer inom industriella applikationer ställs höga krav på givarens tolerans mot extrema temperaturer, fukt, kontamination, mekaniska krafter och vibrationer. Den främsta anledningen till att givaren havererar beror på lagerhaverier vilka ofta orsakas av slitage. Med detta i åtanke ses framtagnen konstruktion möjliggöra för förlängd livslängd hos en induktiv roterande pulsgivare. Genom att detektera när kullagren i givaren förlorat dess rotationsförmåga ges förutsättningar för att tillämpa ett tillståndsbaserat underhåll, vilket bidrar till förutsägelse av defekt funktion hos givaren innan en eventuellt farlig situation sker.

Vid utformning av given konstruktion har ett flertal DFMA-aspekter beaktats vilka påvisas av Kalpakjian & Schmid (2008). Till att börja med har antalet komponenter beaktats vilka har reducerats gentemot grundkonceptet. Exempelvis har de funktionella stiftens sammanfogats i en komponent: det övre givarhuset. Dessutom har utvecklingsarbetet undersökt huruvida designen kan göras mindre och lättare på vilken axiellt led har dimensionerats utan så mycket onödig utrymme som möjligt. Medan givarens ytterdiameter förutsattes vara 58 mm. En ytterligare aspekt som berör DFMA beaktar huruvida konstruktionen ses enkel att montera. Kalpakjian & Schmid (2008) menar att en konstruktion ska kunna monteras utan att markeringar ses nödvändigt. Denna studie har dock utvecklat en konstruktion som är beroende av en markering för att säkerställa korrekt montering då givarhuset består av två delar. Vid montering av det undre och det övre givarhuset krävs en markering för att säkerställa att utformad välvning och förhöjning sammanfaller. I det fall då dessa inte sammanfaller riskeras förväntad funktion att inte uppnås då respektive stift ses felplacerad gentemot välvningarnas placering. Utvecklingsarbetet har även tagit hänsyn till DFMA genom att beakta kommersiellt tillgängliga komponenter så som stift, vågfjädrar, tryckfjädrar och vågbrickor. Genom att undersöka ett flertal alternativa lösningar vilka ämnas skapa samma funktion ses mindre fördelaktiga lösningar kunna uteslutas på ett systematiskt sätt.

I enlighet med DFMA har utvecklingsarbetet även beaktat huruvida konstruktionen ses säkerställa uppfyllande av avsedd funktion. I standarden EN ISO 13849-2:2012 redogörs för huruvida en positiv mekanisk verkan uppnås då konstruktionens rörliga komponenter, vilka krävs för att utföra avsedd funktion, medför förflyttning av anslutna komponenter. En positiv mekanisk verkan ses kunna uppfyllas genom att applicera en fjäderkraft. Däremot rekommenderas i given standard en elektrisk funktion framför

att applicera en fjäderkraft då fjädrar medför risk för utmattningsbrott, vilket inte ses gynnsamt för funktionssäkra konstruktioner. En ytterligare aspekt vilken berör skapad rörelse ses medföra komplikationer beroende på om givaren är av typen axelgivare eller hålaxelgivare. Vid tillämpning av en axelgivare ses axeln, inklusive lagerpaket, att förflyttas i axiellt led vilket medför att avsedd funktion förutsätter att ansluten rörelse sker i axelkopplingen. Medan vid tillämpning av en hålaxelgivare ses den egentliga givaren förflyttas i axiellt led på vilken ansluten rörelse förutsetts ske av momentstaget. Således förutsätter framtagen konstruktion korrekt installation liksom korrekt användning för att säkerställa att avsedd funktion uppnås. Med andra ord ses konstruktionens funktionella prestanda bero av yttre omständigheter på vilken felaktiga belastningsvillkor kan förhindra att avsedd funktion uppnås. Följaktligen vilar ett stort ansvar på kunden där korrekt hantering av konstruktionen ses säkerställa avsedd funktion.

En notabel fördel med den slutligt framtagna konstruktionen är att den, till skillnad från tidigare framtagna koncept, inte omfattar någon hålstruktur. Oavsett om konstruktionen inkluderar stift eller fjädrande tryckskruvar fås en hålstruktur vilken medför en högre risk för kontamination liksom en förszagad konstruktion. En hålstruktur innebär att fler potentiella ingångar för kontamination ges liksom ger en lägre styvhet, vilket möjliggör för större töjningar vid belastning. Wang et al. (2021), Toubal et al. (2005) och Chauhan & Sharma (2015) menar att en hålstruktur medför ökade spänningskoncentrationer vilket potentiellt kan ge förödande konsekvenser om dem inte beaktas. Istället för att konstruktionen utsätts för jämnt fördelade spänningar fås specifika punktspänningar kring hålen vilket riskerar sprickbildning liksom brott. Genom att eliminera behovet av externa stift och/eller tryckskruvar ges en färre aspekt att beakta för att säkerställa att konstruktionen är tillräckligt tät och stark. Fördelen med att nyttja komponenter så som stift och tryckskruvar är dock att dem är kommersiellt tillgängliga, vilket gör de relativt lättillgängliga. Istället kräver framtagen konstruktion en anpassad design vilken kräver en ytterligare tillverkningsprocess så som fräsning. Således ses framtagen konstruktion vara mer tolerant mot yttre omständigheter, däremot ses en potentiell kostnadsökning i och med tillverkningsbehovet.

Vid val av material för framtagn konstruktion har triangulering beaktats. Således har tre källor beaktats för att ge en bedömning av relevant material vilka involverar Granta Edupack, fallföretagets erfarenheter och andra forskningsstudier. I och med att metaller, enligt Roesler et al. (2007) och Toubal et al. (2005), har en högre styvhet i och med sin isotropiska struktur likväl som fallföretaget i nuläget redan behandlar rostfritt stål och aluminium görs sådana metaller lämpliga för utvecklad lösning. Även om plast kan vara ett alternativ har materialgruppen uteslutits på grund av att kullager genererar värme, vilket kan påverka materialegenskaperna hos plasten som har relativt låg smältpunkt (Roesler et al, 2007). Till skillnad från plast har de flesta metaller relativt hög värmelämningsförmåga, vilket medför att genererad värme kan avledas från kullagren. Dessutom ämnas konstruktionen kunna verka i temperaturområden mellan -40 °C och 100 °C. Således ses plaster inte lika lämpliga som metaller med tanke på dess smältpunkt. I och med att aluminium, enligt materialdatabasen Granta Edupack, har en relativt hög värmelämningsförmåga liksom hög sträckgräns ses aluminium vara ett lämpligt material. Detta då konstruktionen förväntas motstå stora krafter under relativt kraftiga rotationsrörelser. Således ses genererad värme kunna avledas från kullagren liksom den höga sträckgränsen ses kunna stå emot större krafter.

För att verifiera funktionaliteten hos utformad mekanisk lösning har beräkningar utförts på vilken givit indikationer på den fjäderkraft liksom fjäderkonstant som krävs för att uppnå förväntad funktion. Då kullagren, vilka förlorat dess rotationsförmåga, antas sätta lagerhuset i rotation vid ett vridmoment på 5

Nm ses en fjäderkraft på 472,5 N krävas. Detta för att skapa den friktionskraft som motsvarar antaget vridmoment. Antagandet utgår från en lågtempererad omgivning då det krävs ett högre vridmoment för att åstadkomma rotation i kyla gentemot värme. Således indikeras en godtycklig tolerans mot temperaturvariationer hos framtagen konstruktion. För att utvärdera huruvida beräknad fjäderkraft ses realistisk utfördes tester av en prototyp i verkligt material (EN AW-6026 T6). Testresultatet påvisade ett 30 % högre vridmoment än beräknat. Däremot gavs under testning indikationer på att materialets hårdhet inte når upp till godtycklig nivå då testning beaktat ett material vilken inte är anodiserad. Således ges förmodligen adhesiv nötning vilket enligt Kalpakjian & Schmid (2008) innebär att glidning medför smetning mellan kontaktytorna på vilken en ökad friktionskraft ges. Följaktligen betonar Kalpakjian & Schmid (2008) betydelsen av materialets hårdhet vilken avgör friktionskraftens storlek. Dessutom beaktades en öppen vågbricka under testning. Således kan inte garanteras att fjädern inte vrider på vilken fjädern läses runt lagerhuset. Sålunda ges potentiellt en högre motståndskraft vilken direkt inverkar på vridmomentet. Med andra ord påvisar fysiskt testresultat att konstruktionen bör beakta en process vilken ökar hårdheten på materialet eller en smörjningsprocess. Nackdelen med smörjning är dock att effekten försämras över tid, vilket i detta fall ses ge problematik då avsedd funktion inte förväntas ske förrän givaren använts en längre tid (10-20 år). Trots detta påvisar testresultatet en fungerande godtycklig funktion vilken ämnas skapa en avståndsförändring i axiellt led. Testresultatet indikerar även att en fjäderkraft på 472,5 N ses godtyckligt för att uppnå avsedd funktion. Däremot krävs ytterligare tester, vilka beaktar anodiserat aluminium alternativt rostfritt stål, för att kunna ge en korrekt bedömning av adekvat fjäderkraft.

För att säkerställa att utformad konstruktion har dimensionerats i linje med förutbestämda krav för tillåtna yttre krafter har konstruktionen utvärderats teoretiskt. Den teoretiska utvärderingen avsåg kontrollera konstruktionens tolerans mot vibrationer liksom bedöma tillåtna laster och kritiskt varvtal, med avseende på en axelgivare respektive en hålaxelgivare. Utförd teoretisk utvärdering baseras på den teoretiskt framtagna fjäderkraften, vilket medför att beräknat resultat potentiellt ses skiljs från reellt framtaget resultat. Däremot gav beräknat resultat en indikation på att konstruktionen är mindre känslig för vibrationer i axiellt liksom radiellt led. Å andra sidan ses eventuell belastning på konstruktionen medföra problematik på vilken maximalt tillåtna laster behöver undersökas vidare. Angående det kritiska varvtalet ges en bedömning vilken uppgår till 35-40 rpm oavsett givartyp. Detta i relation till det varvtal som vanligen beaktas för fallföretagets givare ses avvika mer en godtyckligt, vilket ses fördelaktigt. Däremot bör det kritiska varvtalet beaktas för att säkerställa funktionell prestanda.

6.3 Analys av tillämpad utvecklingsprocess

Det utvecklingsarbete som studien har behandlat har utgått från en mycket iterativ och utforskande process. Med andra ord kan utvecklingsprocessen beskrivas som agil och testdriven vilken har utvecklats under processens gång i takt med framtagning av delresultat liksom anpassats efter nya insikter och lärdomar. Utvecklingsarbetet inleddes med att utvärdera det redan framtagna patentet, genom testning av en funktionsprototyp, för att på så sätt identifiera brister och möjligheter. Baserat på identifierade brister och möjligheter utvecklades ett nytt koncept vilken utvärderades varpå ett nytt koncept utvecklades baserat på dess brister och möjligheter. Fortsättningsvis utvecklades ytterligare alternativa koncept i samma anda tills ett godtyckligt fungerande koncept nåddes. Utvecklingsprocessen har kontinuerligt behandlat synpunkter från kunden (fallföretagets R&D) för att säkerställa en tillfredsställande funktionell prestanda. Således har varje vecka avslutats med ett avstämningmöte med fallföretagets R&D (handledare) vilken syftade till att

ge återkoppling om utfört arbete. Givna synpunkter behandlades för fortsatt utveckling. Dessutom upprättades, i samband med respektive avstämningssmöte, en preliminär checklista inför nästkommande vecka vilken har fungerat som ett hjälpmedel i att följa processen så noga som möjligt. Checklistan har upprättats i samråd med berörd aktör på fallföretagets R&D i syfte att säkerställa att relevanta aktiviteter liksom en realistisk preliminär tidsplanering beaktas. Lopande veckovisa planeringar har bidragit till ett mer flexibelt utvecklingsarbete vilken har tillåtits anpassas efter förändrade yttre omständigheter. På så sätt har nya insikter och lärdomar kunnat integreras i processen relativt obehindrat. Ett sådant utvecklingsarbete indikerar, i enlighet med Mintzberg et al. (2008) och Gustavsson (2020), på tillämpning av en effektiv utvecklingsprocess vilken ses växa fram evolutionärt i och med att funktionalitet testas lopande. Implementering av kontinuerlig testning medför att nya insikter och lärdomar fås på ett tämligen effektivt sätt vilket är fördelaktigt då relativt outforska områden undersöks. En alternativ utvecklingsprocess skulle kunna vara en mer rigid stage-gate-modell där utvecklingsarbetet sker linjärt. Detta kräver dock en mer långsiktig planering vilken ses vara svår att anpassa till förändrade omständigheter liksom nya insikter. Således tillåts inte utvecklingsledaren, i samma utsträckning, att lära sig vartefter nya insikter ges. Genom att tillämpa FMEA under utvecklingsarbetet har nya insikter givits på ett systematiskt och strukturerat sätt.

6.4 Avstämning av syfte och mål

Syftet med studien var att åstadkomma en mekanisk lösning vilken möjliggör för detektering av kullager vars rotationsförmåga är förlorad. Under fallstudien utvärderades en tidigare framtagen patenterad lösning liksom ett flertal alternativa lösningar varav ett av dem slutligen resulterade i en godtycklig fungerande lösning. Genom att framtagen lösning skapar ett utökat avstånd då ett överstigit friktionsmoment ges av kullagren kan förändrat avstånd registreras av sammankopplad mjukvara. Syftet med framtagen lösning var således att detektera när ett friktionsmoment har överstigit given nivå för fullt fungerande kullager hellre än att mäta ett specifikt friktionsmoment. Sålunda ses studiens syfte vara uppnått. Däremot har studien inte bekräftat huruvida framtagen lösning påvisar adekvata mätvärden för tolerans mot yttre omständigheter så som vibrationer och laster i praktiken. Studien har enbart påvisat teoretiska mätvärden vilka ger indikationer på lösningens tolerans. Följande påvisas huruvida tidigare formulerade mål anses vara uppfyllda:

M1 Konstruera och framställa en fysisk modell av en mekanisk lösning som syftar till att identifiera och påvisa systemfel hos en pulsgivare genom att skapa axiellt avstånd, på 1-1,5 mm, mellan rotor och stator vid överstigit friktionsmoment (5 Nm) på kullager.

Målet anses vara uppfyllt: Studien har genererat en konceptuell lösning vilken mekaniskt skapar ett utökat avstånd på 1,5 mm mellan rotor och stator vid ett överstigit friktionsmoment (5 Nm) på kullager.

M2 Identifiera och utföra testmetoder för att utvärdera konceptets funktionalitet och därmed bidrag till systemets ökade funktionssäkerhet. Således ämnas dess prestanda i en kritisk miljö utvärderas för att bedöma dess duglighet då egenvängning, vibrationer (300 m/s^2) samt konceptets förmåga att motstå axiell (100 N) respektive radiell (125 N) last beaktas.

Målet anses vara uppfyllt: Framtagen lösning har utvärderats, med hjälp av jämviktberäkningar, för att påvisa dess funktionalitet i en kritisk miljö inklusive vibrationer och laster. Däremot ses en vidare utvärdering kunna utföras, på vilken reella mätvärden påvisas vilka skulle bekräfta eller motbevisa det teoretiska utvärderingsresultatet.

7 Slutsats och diskussion

Följande kapitel ämnas summera studiens resultat på vilken studiens forskningsbidrag påvisas. Kapitlet diskuterar även kring förslag till framtida forskning liksom rekommendationer till företaget.

7.1 Studiens forskningsbidrag

Utförd studie har behandlat en iterativ utvecklingsprocess för att undersöka potentiella lösningar vilka mekaniskt ämnas skapa ett utökat avstånd mellan rotor och stator vid ett överstiget moment på kullager. Detta för att möjliggöra identifikation av förlorad rotationsförmåga hos kullagren. Studien har resulterat i framtagning av en grundläggande fungerande funktion, vilken har utvärderats och anpassats visuellt för kontroll av dess funktionalitet, tolerans mot yttre krafter och potentiella kompatibilitet med fallföretagets befintliga produktserie (600). Tidigare studier har nyttjats som fundament för utförd utvecklingsprocess på vilken processen givits stöd för att inkludera säkerhetsrelaterade krav och designprinciper liksom betydande designaspekter för en flexibel och robust konstruktion. Genom att beakta teori från tidigare studier har studien kunnat påvisa generella behov för att säkerställa och/eller stärka en konstruktions robusthet och därmed funktionssäkerhet. Således har en konstruktion kunnat utvecklas vilken uppfyller fallföretagets begäran om en funktion som mekaniskt skapar ett utökat avstånd, samtidigt som generella aspekter har kunnat identifieras vilka ses öka funktionssäkerheten för en givarkonstruktion.

Efter analys av empiriska undersökningar och tidigare studier kan konstateras att framtagning av en funktionssäker pulsgivare kräver beaktning av sju faktorer vilka kan beskrivas utifrån tre huvudsakliga begrepp: 1) enkelhet; 2) hållbarhet; 3) tillförlitlighet. Således måste pulsgivaren ges en enkel utformning vilken ses relativt enkel att tillverka liksom minimerar risken för felaktig montering. En komplex utformning ses innehålla fler komponenter och komponentrelationer vilka alla måste beaktas för att säkerställa en godtycklig funktionell prestanda. Då pulsgivare generellt appliceras för industriellt bruk måste konstruktionen tåla stora temperaturvariationer, vibrationer, laster och andra påfrestningar som kan uppstå vid användning. Slutligen måste pulsgivaren fungera tillförlitligt under olika driftförhållanden liksom vid olika hastigheter på motorerna. Således ses pulsgivaren ge en godtycklig funktionell prestanda oavsett kontextuella förhållanden. Sammanfattningsvis är det väsentligt att ha en helhetsbild av de faktorer

som påverkar pulsgivarens funktionssäkerhet för att kunna utveckla en enhet som uppfyller kraven för enkelhet, hållbarhet och tillförlitlighet.

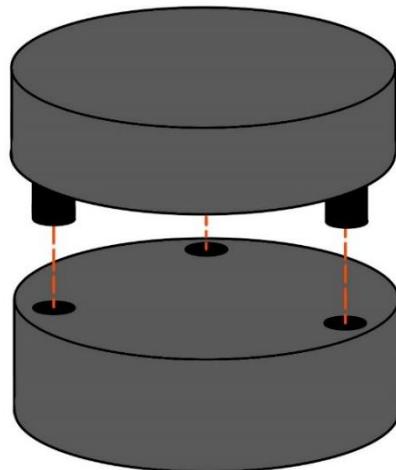
Aktuell studie har utgått från en befintlig patenterad lösning vilken utvärderats med målsättningen att konkretisera tänkt lösning. Det vill säga syftet med studien kan återges som utvärdering av en redan framtagen lösning vilken ämnas vidareutvecklas och verifieras för att säkerställa en fungerande funktion. Genom att undersöka ett flertal konceptuella lösningar har aktuell studie tagit fram en sluten och kompakt design vilken möjliggör registrering av låsta lager hos en induktiv pulsgivare. Framtagen design ses innehålla en enkel produktarkitektur vilken omfattar få komponenter vilka relativt enkelt monteras ihop då montering sker i en riktning. I och med en sluten konstruktion med en enkel produktarkitektur ses designen uppfylla kravet om tillförlitlighet respektive enkelhet. Studien har genom beräkningar och reella tester givit indikationer på en grundläggande fungerande funktion vilken kräver en fjäderkraft på 472,5 N. Dessutom har indikationer givits på konstruktionens tolerans mot ytter krafter vilka påvisat en låg känslighet för vibrationer om än större för eventuell belastning. Däremot krävs ytterligare reella tester för att säkerställa en korrekt bedömning. Sammanfattningsvis har aktuell studie, i sin helhet, bidragit till att öka kunskapsmassan inom konstruktionslösningar för funktionssäkra induktiva pulsgivare.

7.2 Förslag till framtida forskning

Under utförandet av studien har en del frågeställningar besvarats liksom en del har uppkommit. Till att börja med har utvecklingen av framtagen konstruktion givit en insikt om fjädrars inkompatibilitet i funktionssäkra konstruktioner. Detta då fjädrar frekvent utsätts för utmattningsfel vilket innebär att användning av en fjäder inte kan garantera att avsedd funktion uppnås. Däremot har framtagen konstruktion utformats med en tvingande funktion, vilket medför att avsedd funktion ses uppnås trots att fjädern fallerat om än något tidigare än förväntat. Således rekommenderas för vidare studier att undersöka huruvida en mekanisk lösning kan utvecklas vilken inte är beroende av en fjäderkraft, men ändå förväntas åstadkomma avsedd funktion vid ett specifikt vridmoment.

En ytterligare frågeställning som uppkommit berör kontextuella aspekter för utvecklad mekanisk lösning. Då fallföretaget tillverkar pulsgivare av typen axelgivare och hålaxelgivare bör eventuell implementering av lösningen beaktas utifrån respektive perspektiv. I nuläget ses framtagen lösning kunna implementeras relativt obehindrat i en hålaxelgivare på vilken avsedd funktion ses skapa en axiell rörelse som mottas av anslutet momentstag. Medan eventuell implementering av framtagen lösning i en axelgivare ses kräva vidare studier för att säkerställa att skapad axiell rörelse tillåts ske i ansatt axelkoppling vilken troligtvis bör vara en klämkoppling. Detta då förväntad rörelse ses, till skillnad från en hålaxelgivare, mottas av axeln inklusive rotor och lagerhus. För att möjliggöra för axeln att förflyttas i axiellt led ses kopplingen, vilken sammanfogar givaren med drivsystemet, behöva hantera skapad rörelse. Utifrån ett kontextuellt perspektiv ses därför implementering av framtagen lösning kräva vidare studier för att säkerställa att förväntad axiell rörelse tillåts ske av anslutet momentstag eller anslutnen axelkoppling. Detta då denna studie enbart beaktat ett delsystem. Alternativt skulle vidare studier kunna undersöka huruvida en mekanisk lösning kan utvecklas vilken sker helt internt i givaren. Således ses den mekaniska lösningen fungera oberoende av ytter omständigheter.

En avgörande aspekt för huruvida framtagen konstruktion ses säkerställa att avsedd funktion uppnås berör monteringsriktighet. Framtagen konstruktion ses bero av en markering för att säkerställa korrekt montering av givarhuset, vilket därmed säkerställer tillfredsställande av avsedd funktion. Således rekommenderas för vidare studier att undersöka huruvida designen kan utvecklas för att säkerställa tillfredsställande av avsedd funktion utan behov av en markering. Exempelvis skulle en styrande instruerande utformning kunna undersökas, se figur 65, där montering inte tillåts ske på något annat sätt än avsett.



Figur 65: Visualisering av en styrande instruerande utformning.

Utförandet av studien har beaktat teoretiska utvärderingsresultat på vilken framtagen lösning har givits en bedömning av dess tolerans mot ytter kraftar. För vidare studier rekommenderas att reella utvärderingstester utförs för att säkerställa att framtagen lösning bedöms korrekt. Framförallt bör maximalt tillåtna laster utvärderas ytterligare då teoretiskt utvärderingsresultat indikerade problematiska värden. Dessutom bör framtagen lösning testas med roterande kullager för att utvärdera huruvida eventuella vibrationer från kullagren inverkar på konstruktionen och därmed avsedd funktion. Slutligen bör konstruktionen utvärderas för att ge en bedömning av dess tolerans mot varierande temperaturer. Utförandet av studien har enbart givit underlag för att bedöma dess tolerans som godtyckligt då skribenten, i samråd med fallföretagets R&D, antagit att ett vridmoment på 5 Nm krävs för att uppnå en fungerande funktion i -40 °C. Antagandet baseras på kylegenskaper då det generellt krävs ett högre vridmoment för att skapa rotation i kyla gentemot värme. Således indikerar en beräknad fjäderkraft på 472,5 N att det krävs ett vridmoment på 5 Nm för att uppnå avsedd funktion, förutsatt att anodiserat aluminium beaktas. För att kontrollera antaget vridmoment liksom framtagen konstruktions tolerans mot temperaturvariationer krävs verkliga momenttester. Vidare studier av konceptets tolerans mot ytter omständigheter ses väsentligt då framtagen lösning inte förväntas ske förrän om 10-20 år då kullagren läses. Således förutsätts att konceptet kontrolleras för att säkerställa att avsedd funktion är intakt, tills den förväntas ske, på vilken glidning av de integrerade stiftens tillåts ske vid förlorad rotationsförmåga hos lagren.

Avslutningsvis rekommenderas att framtagen lösning kopplas samman med tänkt elektronik, inklusive programvara, för att utvärdera sensorns känslighet vilken styr registreringen av skapad avståndsförändring. Detta för att kontrollera att antaget värde på 1,5 mm är en tillräcklig ökning för att sensorn ska förlora kopplingen med insamlade mätdata liksom utvärdera avsedd funktion fullständigt. Slutligen kan tilläggas att en djupgående kostnadsanalys bör utföras för att utvärdera värdet av framtagen lösning liksom dess potential för en eventuell implementering. Det vill säga, i vilken utsträckning ges besparingar då detektering av fel upptäcks i tid gentemot de kostnader som följs av hantering av felets konsekvenser.

7.3 Rekommendationer till företaget

Utförd studie har resulterat i en konceptuell lösning vilken ses möjliggöra en fungerande funktion som ämnas registrera ett utökat avstånd mellan rotor och stator vid ett överstiget moment på kullager. Den mekaniska lösning vilken utvecklats för att utföra avsedd funktion har utformats för att kunna integreras i fallföretagets befintliga produktserie (600). Genom CAD-modellering och 3D-printning har lösningens kompatibilitet med fallföretagets befintliga produkter bekräftats. Således ses studien ha utvecklat en grundstruktur vilken fallföretaget enbart behöver anpassa efter specificerade krav för att säkerställa godtycklig implementering i befintligt produktutbud. Med andra ord ses beslut om geometrier, toleranser och maximalt tillåtna laster fastställas för att kunna utföra fullständiga beräkningar och därmed säkerställa att framtagen lösning ses korrekt dimensionerad. För att möjliggöra tillverkning bör även tillverkningstekniska aspekter tas i beaktning för eventuell produktionsförberedning. Dessutom ses montering av slutlig produkt innefatta klämförband på vilken beräkningar för korrekt dimensionerad presspassning bör utföras. Till sist kan tilläggas att en utförligare undersökning för vilken fjäderkraft som ses lämplig bör utföras på vilken ett flertal olika vågbrickor testas. Detta för att säkerställa att korrekt val av vågbricka görs innan slutlig tillverkning av produkten påbörjas.

Referenser

- Aljemely, A., Xuan, J., Long, X., Jawad, F., & Al-Azzawi, O.** (2021). Wise-local response convolutional neural network based on Naïve Bayes theorem for rotating machinery fault classification. *Applied Intelligence*, 51(10), 6932-6950. doi:10.1007/s10489-021-02252-2
- Amin, K., Mohammad, K., & Rezghi, M.** (2021). End-to-end CNN + LSTM deep learning approach for bearing fault diagnosis. *Applied Intelligence*, 51(2), 736-751. doi:10.1007/s10489-020-01859-1
- Ansys, Inc.** (2023). Ansys Granta EduPack. Hämtat från <https://www.ansys.com/products/materials/granta-edupack#tab1-1>
- Bačík, J., Tkáč, P., Hric, L., Alexovič, S., Kyslán, K., Olexa, R., & Perduková, D.** (2020). Phallower - The Universal Autonomous Mobile Robot for Industry and Civil Environments with COVID-19 Germicide Addon Meeting Safety Requirements. *Applied sciences*, 10(21), 1-16. <https://doi.org/10.3390/app10217682>
- Bengtsson, M.** (2006). *Tillståndsbaserat underhåll - underhållstrategins möjligheter på Stridsvagn 122*. Akademien för Innovation, Design och Teknik (IDT). Eskilstuna, Sverige: Mälardalens Högskola. <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A301892&dswid=-5503>
- Berglund, E., & Rohlén, F.** (2017). *Framtagning samt utvärdering av vridbordskoncept*. Göteborg, Sverige: Chalmers Tekniska Högskola. http://www.ipr.mdh.se/pdf_publications/1755.pdf
- Bexar, J.** (2016). *Driftövervakning vid rörlinje UNI-2*. Vaasa, Finland : Yrkeshögskolan Novia. https://www.thesesus.fi/bitstream/handle/10024/113749/Bexar_Joel.pdf?sequence=1
- Bhattacherjee, A.** (2012). *Social Science Research: Principles, Methods, and Practices* (2 uppl.). Florida, USA: Digital Commons . ISBN-13: 978-1475146127

- Bhavsar, R. C., & Patel, R. A.** (2013). Various techniques for Condition Monitoring of Three Phase Induction Motor - A Review. *International Journal of Engineering Inventions*, 3(4), 22-26. <https://tinyurl.se/6st>
- Bourogaoui, M., Ben Attia Sethom, H., & Slama Belkhodja, I.** (2016). Speed/position sensor fault tolerant control in adjustable speed drives - A review. *ISA Transactions*, 64, 269-284. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2016.05.003>
- Cai, Z., Xiang, J., & Wang, W.** (2015). A pinch-valve for centrifugal microfluidic platforms and its application in sequential valving operation and plasma extraction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 221, 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2015.06.034>
- Carlson, C.** (2012). Effective FMEAs: achieving safe, reliable, and economical products and processes using failure mode and effects analysis. *Quality and reliability engineering series*, 1-419. ISBN: 978-1-118-00743-3
- Chauhan, M. M., & Sharma, D. S.** (2015). Stresses in finite anisotropic plate weakened by rectangular hole. *International journal of mechanical sciences*, 101-102, 272-279. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.08.007>
- Chen, L., Fan, D., Zheng, J., & Xie, X.** (2022). Functional Safety Analysis and Design of Sensors in Robot Joint Drive System. *Machines*, 10(5), 1-20. <https://doi.org/10.3390/machines10050360>
- Collins, J. A., Busby, H. R., & Staab, G. H.** (2010). *Mechanical Design of Machine Elements and Machines: A Failure Prevention Perspective* (2 uppl.). Ohio, USA: John Wiley & Sons. ISBN-13: 978-0-470-41303-6
- Cooper, R. G.** (2016). Agile-Stage-Gate Hybrids: The Next Stage for Product Development. *Invited Article*, 21-29. <https://doi.org/10.1080/08956308.2016.1117317>
- Cristea, G., & Constantinescu, D.** (2017). A comparative critical study between FMEA and FTA risk analysis methods. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 252, 1-5. doi:10.1088/1757-899X/252/1/012046
- Cruzes , D. S., & Dybå, T.** (2011). Recommended Steps for Thematic Synthesis in Software engineering. *2011 International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement*, 275-284. doi:10.1109/ESEM.2011.36
- Ding, Y., Zhuang, J., Ding, P., & Jia, M.** (2022). Self-supervised pretraining via contrast learning for intelligent incipient fault detection of bearings. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 2-12. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108126>
- Dubois, A., & Gadde, L.-E.** (2002). Systematic combining: an abductive approach to case research. *Journal of Business Research*, 55, 553-560. doi: 10.1016/S0148-2963(00)00195-8

- Efinger, D., Osterdag, A., Dazer, M., Borschewski, D., Albrecht, S., & Bertsche, B.** (2022). Reliability as a Key Driver for a Sustainable Design of Adaptive Load-Bearing Structures. *Sustainability*, 14(2), 2-21. <https://doi.org/10.3390/su14020895>
- Fraden, J.** (2016). *Handbook of Modern Sensors: Physics, Design, and Applications* (5 uppl.). San Diego, USA: Fraden Corp. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19303-8>
- Guion, L. A., Diehl, D. C., & McDonald, D.** (2011). Triangulation: Establishing the Validity of Qualitative Studies. *FCS6014/FY394*, 1-3.
- Gustafsson, M.** (2021). Strängnäs, Sverige Patentnr US 2021/0270644 A1.
- Gustavsson, T.** (2020). *Agil projektledning* (4 uppl.). Sanoma Utbildning. ISBN: 9789152358368
- Jeppesen, B. P., Rajamani, M., & Smith, K. M.** (2019). Enhancing functional safety in FPGA-based motor drives. *The journal of Engineering*, 4580-4584. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8262>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R.** (2008). *Manufacturing Processes: For Engineering Materials* (5 uppl.). USA: Pearson Education, Inc. ISBN: 0-13 227271-7
- Kazanzides, P.** (2009). Safety Design for Medical Robots. 2009 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 7208-7211. doi:10.1109/IEMBS.2009.5335275.
- Khan, M. A., Asad, B., Kudelina, K., Vaimann, T., & Kallaste, A.** (2022). The Bearing Faults Detection Methods for Electrical Machines - The State of the Art. *Energies* 2023, 16(296), 1-54. <https://doi.org/10.3390/en16010296>
- Kluska, E., Gruda, P., & Majca-Nowak, N.** (2018). The Accuracy and the Printing Resolution Comparison of Different 3D Printing Technologies. *Transactions on Aerospace Research*, 2018(3), 69-86. <https://doi.org/10.2478/tar-2018-0023>
- Kobelev, V.** (2021). *Durability of Springs*. Attendorn, Tyskland: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59253-0>
- Koomsap, P., & Charoenchokdilok, T.** (2018). Improving risk assessment for customer-oriented FMEA. *Industrial Systems Engineering*, 29(13), 1563-1579. <https://doi.org/10.1080/14783363.2016.1274229>
- Kshirsagar, R. A., Gaonkar, S. S., Pandharpure, S. M., Desale, D., & Gorave, S. K.** (2019). Design and Analysis of Wave Spring. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*, 6(4), 530-534. <https://www.researchgate.net/publication/337985105>
- Kudelski, R., Cieslik, J., Kulpa, M., Dudek, P., Zagorski, K., & Rumin, R.** (2017). Comparison of Cost, Material and Time Usage in FDM and SLS 3D printing methods. *2017 XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*, 12-14. doi:10.1109/MEMSTECH.2017.7937521

- Kumar, H., Srinivasa, P., & Sriram, N.** (2020). Classification of rolling element bearing fault using singular value. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 26(2), 181-197.
<https://doi.org/10.1108/JQME-12-2016-0083>
- Lamb, F.** (2013). *Industrial Automation Hans-on* (1 uppl.). New York: McGraw-Hill Education.
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071816458>
- Leine & Linde.** (2017). *Encoder technology: Details & descriptions*. Strängnäs, Sverige: Leine & Linde.
Företagsdokument
- Leine & Linde.** (2021a). *En robust och pålitlig partner*. Hämtat från
<https://www.leinelinde.com/sv/kontakt/om-oss/>
- Leine & Linde.** (2021b). *Funktionssäkra givare*. Hämtat från
<https://www.leinelinde.com/sv/produkter/funktionssakerhet/>
- Leine & Linde.** (u.å.-c). *Robusta pulsgivare: För exakt hastighet och position*. Strängnäs: Leine & Linde. Artikelnummer: 802981-02. Företagsdokument
- Leine & Linde.** (u.å.-a). *Pulsgivare för motorer och drives*. Strängnäs, Sverige: Leine & Linde.
Företagsdokument
- Leine & Linde.** (u.å.-b). *Safety first: An input to achieve functional safety*. Strängnäs, Sverige: Leine & Linde. Företagsdokument
- Lewrick, M., Link, P., & Leifer, L.** (2020). *The Design Thinking Toolbox - A Guide to Mastering the Most Popular and Valuable Innovation Methods*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
ISBN: 9781119629191
- McDougall, R.** (2015). Reviewing literature in bioethics research: Increasing rigour in non-systematic reviews. *Bioethics*, 29(7), 523-528. doi:10.1111/bioe.12149
- Mintzberg, H., Ahlstrand, B., & Lampel, J.** (2008). *Strategy Safari: Your complete guide through the wilds of strategic management* (1 uppl.). Pearson Education Limited. ISBN: 9780273719588
- Moubray, J.** (1997). *Reliability-centered Maintenance* (2 uppl.). Butterworth-Heidenmann: Elsevier Ltd. ISBN: 978-0-7506-3358-1
- Paredes , F., Herrojo, C., & Martin, F.** (2021). Position Sensors for Industrial Applications Based on electromagnetic Encoders. *Sensors*, 21(8), 1-28. <https://doi.org/10.3390/s21082738>
- Peng, K.-Y., & Chang, J.-Y.** (2021). Effects of assembly errors on axial positioning accuracy for rotating machinery with magnetoresistance-based magnetic encoders. *Microsystem Technologies*, 27, 2507-2514. <https://doi.org/10.1007/s00542-020-05174-0>
- Qiu, M., Chen, L., Li, Y., & Yan, J.** (2017). *Bearing Tribology: Principles and Applications* (1 uppl.). (Berlin, Tyskland. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53097-9>

- Roesler, J., Harders, H., & Baeker, M.** (2007). *Mechanical Behaviour of Engineering Materials: Metals, Ceramics, Polymers and Composites*. Berlin, Tyskland: Springer. ISBN: 978-3-8351-0008-4
- Rouvroye, J., & van den Bliek, E.** (2002). Comparing safety analysis techniques. *Reliability Engineering and System Safety*, 75(3), 289-294. [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(01\)00116-8](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(01)00116-8)
- Ruijters, E., & Stoelinga, M.** (2015). Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools. *Computer science review*, 15-16, 29-62. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001>
- Schlicksbier, T.** (2009). Safe Position Measuring. *Control Engineering*, 56(8), 1-5. <http://ep.bib.mdh.se/login?url=https://www.proquest.com/trade-journals/safe-position-measuring/docview/200402581/se-2>
- Schulze, M., Mauersberger, J., & Beuche, D.** (2013). Functional safety and variability: can it be brought together? In *Proceedings of the 17th International Software Product Line Conference (SPLC '13)*, 236-243. <https://doi.org/10.1145/2491627.2491654>
- SICK AG.** (2023). Vad är en pulsgivare? Hämtat från sick.com: https://www.sick.com/fi/sv/oeverisks-och-anvaendning-av-pulsgivare-och-lutningssensorer/w/encoders-definition/?fbclid=IwAR0N8A10NA3WGVzHZakScl8_qXcDXkCioyr3h3-fYmDgqGmD3vdddA9O-WU
- Svenska Institutet för Standarder, SIS.** (2016). Svensk standard: SS-EN ISO 13849-1: 2016. Hämtat från <https://www.sis.se/produkter/miljo-och-halsoskydds-sakerhet/maskinsakerhet/sseniso1384912016/>
- Svenska Institutet för Standarder, SIS.** (2021). IEC standard: IEC 62061: 2021. Hämtat från <https://www.sis.se/produkter/elektroteknik-24c2329a/allmant/iec-620612021/>
- SKF.** (2013). SKF lanserar SKF Insight - en banbrytande intelligent lagerteknik. Hämtat från <https://news.cision.com/se/skf/r/skf-lanserar-skf-insight---en-banbrytande-intelligent-lagerteknik,c9396157>
- SKF.** (2020). SKF underhålls- och smörjprodukter; förlänger lagrets livslängd. SKF. Hämtat från https://www.skf.com/binaries/pub19/Images/0901d19680063bdb-03000_SV_tcm_19-163650.pdf
- SKF Group.** (2018). Rolling bearings. Hämtat från <https://www.skf.com/in/products/rolling-bearings>
- Smith, D. J., & Simpson, K. G.** (2004). *Functional Safety: A straightforward guide to applying IEC 61508 and related standards* (2 uppl.). London, Storbritannien. <https://doi.org/10.4324/9780080477923>
- SolidWorks.** (2023). Company Information. Hämtat från https://www.solidworks.com/sw/183_enu_html.htm

- Sun, Y., Tang, F., & Jin, Z.** (2021). Review on Vibration Signal Analysis of Rotating Machinery Based on Deep Learning. *Journal of Physics: Conference series*, 1820, 2-6. doi:10.1088/1742-6596/1820/1/012034
- Säfsten, K., Gustavsson, M., & Ehnsiö, R.** (2020). *Research methodology: for engineers and other problem-solvers* (1 uppl.). Lund, Sverige: Studentlitteratur AB.
- Thompson, R.** (2007). *Manufacturing Processes for Design Professionals*. Thames Hudson Ltd. ISBN: 9780500513750
- Tonde, J.** (2012). *Materialhantering till och från robot*. Trollhättan, Sverige: Högskolan Väst. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:559066/FULLTEXT01.pdf>
- Toubal, L., Karama, M., & Lorrain, B.** (2005). Stress concentration in a circular hole in composite plate. *Composite structures*, 68, 31-36. doi:10.1016/j.compstruct.2004.02.016
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D.** (2014). *Produktutveckling: Konstruktion och design* (1:1 Uppl.). Lund: Studentlitteratur AB. ISBN: 978-91-44-07421-4
- Wang, X., Xu, C., Chen, X., Hu, D., Hu, B., Hu, R., . . . Tang, Z.** (2021). Effect of cold expansion on high-temperature low-cycle fatigue performance of the nickel-based superalloy hole structure. *International Journal of Fatigue*, 151, 2-10. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106377>
- Wilkening, T., Krah, J. O., & Goergen, H.** (2019). Safety-Related Interfaces for Position Encoders - a Survey. *PCIM Europe 2019; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 1-8. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8767651>
- Wohlin, C.** (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE '14)*, 38, 1-10. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Xu, Y., Tang, X., Feng, G., Wang, D., Ashworth, C., Gu, F., & Ball, A. D.** (2022). Orthogonal On-Rotor Sensing Vibrationsfor Condition Monitoring of Rotating Machines. *Journal of Dynamics, Monitoring and diagnostics*, 1(1), 29-36. <https://doi.org/10.37965/jdmd.v2i2.47>
- Yu, G., Xia, W., Song, Z., Wu, R., Wang, S., & Yao, Y.** (2018). Wear-life analysis of deep groove ball bearings based on Archard wear theory. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(7), 3329-3336. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0635-5>
- Yuan, P., Huang, D., & Lei, Z.** (2019). An improved high-precision subdivision algorithm for single-track absolute encoder using machine vision techniques. *Measurement and Control*, 52(5-6), 675-686. <https://doi.org/10.1177/0020294019834967>

Appendix

Appendix A	Standarder	II
Appendix B	Summering av EN ISO 13849-2:2012	III
Appendix C	Matematisk utvärdering av grundkoncept	IV
Appendix D	Matematisk utvärdering av sinusutformning	VII
Appendix E	Dimensionering av fjäderkraft	IX
Appendix F	Teoretisk konceptutvärdering	XII
Appendix G	Sammanställningsritning av slutkoncept	XVIII
Appendix H	Detaljritning av undre givarhus	XIX
Appendix I	Detaljritning av lagerhus	XX
Appendix J	Detaljritning av övre givarhus	XXI

Appendix A – Standarder

EN ISO 13849-1:2015	Maskinsäkerhet – Säkerhetsrelaterade delar av styrsystem – Del 1: Allmänna konstruktionsprinciper
EN ISO 13849-2:2012	Maskinsäkerhet – Säkerhetsrelaterade delar av styrsystem – Del 2: Validering
EN 62061:2005	Maskinsäkerhet – Funktionssäkerhet hos elektriska, elektroniska och och programmerbara elektroniska säkerhetskritiska styrsystem
IEC 61508:2010	Maskinsäkerhet – Funktionssäkerhet hos elektriska, elektroniska och programmerbara elektroniska säkerhetskritiska styrsystem

Appendix B – Summering av EN ISO 13849-2:2012

Appendix B.1: Presentation av fundamentala och välbeprövade säkerhetsprinciper (1-7)

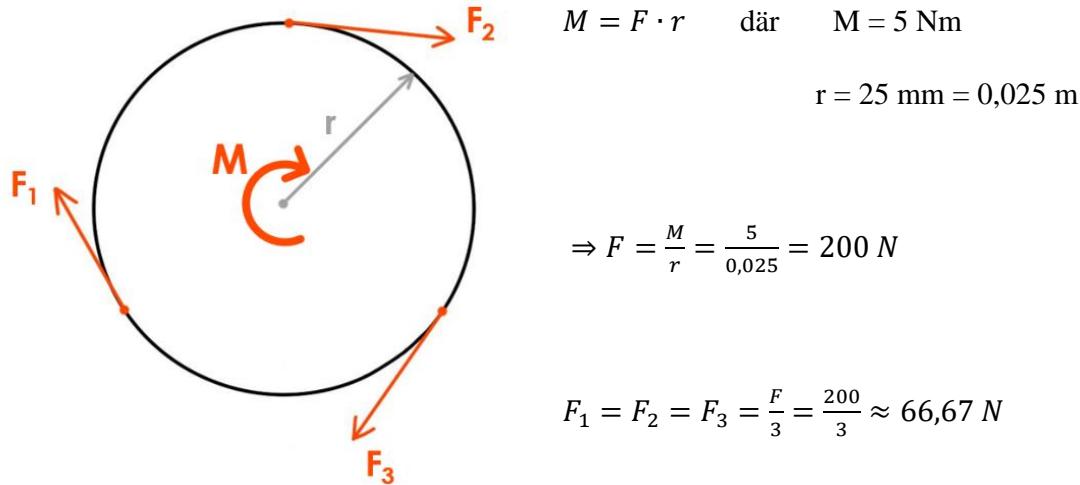
	1	2	3	4	5	6	7
Fundamental	Val av lämpliga material & tillverkningsmetoder	Korrekt dimensionering & formgivning	Korrekt val, kombination, arrangemang, montering och installation av komponenter	De-energisations-principen	Val av fästanordning	Begränsning av kraftgenerering & kraftöverföring	Begränsning av olika miljöparametrar
Anmärkning	Val baseras på faktorer som spänning, hållfasthet, elasticitet, friktion, slitage, korrosion & temperatur.	Där spänning, utmattring, ytjämnhet, toleranser & tillverkning betraktas.	Tillämpning av tillverkares applikationshänvisningar, ex. kataloger, installationsinstruktioner & produktspecifikationer liksom nyttjande av god ingenjörskonst.	Då energi förses i syfte att sätta ett mekaniskt system i rörelse behöver systemet kunna sättas i säker tillstånd genom att frigöra energi. Således bör olika tillstånd övervägas, ex. driftläge & underhållsläge. Notera att frigörelse av energi kan medföra faror varpå denna princip ej ska följas.	Vid ansättning av fästelement så som skruvar ska tillverkares applikationshänvisning beaktas där speciellt vridermomentets storlek bör kontrolleras.	Där exempelvis stift eller plattor används för att bryta kraftbegränsande kopplingar. Notera att denna princip ej ska följas då komponentens storlek är avgörande.	Där exempelvis temperatur, fuktighet & förening på installationsplatsen är betydande. Således ska tillverkares applikationshänvisningar beaktas.
Välbeprövad	Aktsamt urval av material & tillverkningsmetoder	Överdimensionering	Aktsamt val, kombination, arrangemang, montering och installation av komponenter	Säker position	Aktsamt val av fästanordning	Begränsning av kraftomfång	Begränsning av miljö-parametrar
Anmärkning	Val relateras till applikation.	Säkerhetsfaktorer är givna i standarder eller av god erfarenhet inom säkerhetsrelaterade applikationer.	-	Rörliga delar av komponenter/system hålls i säker position mekaniskt. Således krävs en kraft för att skapa rörelse där enbart friktion ej är att föredra.	Undvik att förlita enbart på friktion.	Nödvändig begränsning, för ex. kraftbegränsande kopplingar, bestäms vilka relateras till applikation & erfarenhet.	Nödvändig begränsning, för ex. temperatur, fuktighet, förening på installationsplatsen, bestäms på vilken tillverkares hänvisning betraktas.

Appendix B.2: Presentation av fundamentala och välbeprövade säkerhetsprinciper (8-14)

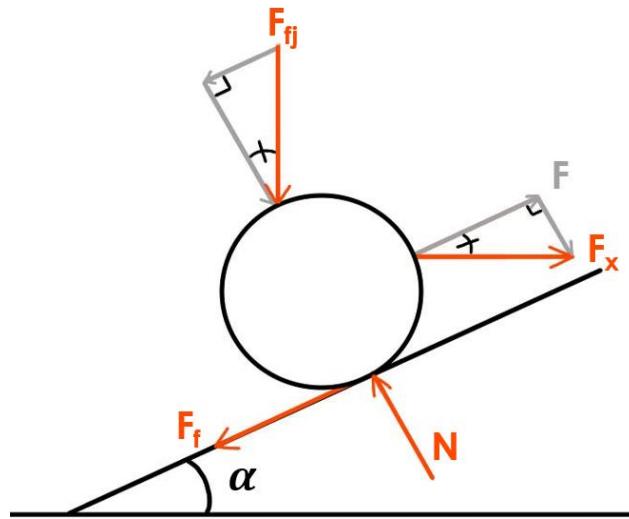
	8	9	10	11	12	13	14
Fundamental	Begränsning av hastighet	Korrekt reaktionstid	Skydd mot oväntad uppstart	Förenkling	Uppdelning	Korrekt smörjning	Förebygga inträde av vätska och damm
Anmärkning	Där hastighet, acceleration & deceleration & liknande parametrar vilka krävs för applikation betraktas.	Fjäderutmattring, friktion, smörjning, temperatur, tröghet & toleranser betraktas.	Oväntad uppstart liksom återställande av strömförsljning för olika tillstånd betraktas. Speciell utstrulling eller applikationer kan vara nödvändigt.	Undvik överflödiga/onödiga komponenter i säkerhetsrelaterade system.	Separera säkerhetsrelaterade funktioner från andra funktioner.	Behovet av smörjanordningar betraktas liksom info om smörjmedel och intervall för smörjning.	IP-rating betraktas
Välbeprövad	Begränsning av hastighet	Begränsning av reaktionstid	Ökad AV-kraft	Komponenter med orienterat felläge	Positiv mekanisk verkan	Nytjande av välbeprövad tryckfjäder	Multipla delar
Anmärkning	Nödvändig begränsning, för ex. övervakning av hastigheten & begränsad förflyttning, bestäms vilka relateras till applikation & erfarenhet.	Nödvändig begränsning, för ex. fjäderutmattring, friktion, smörjning, temperatur, acceleration, deceleration & toleranser, bestäms	En säker position uppnås genom en ökad AV-kraft i relation till PÅ-kraften.	Givet felläge för en komponent är könt i förväg vilken alltid är samma.	Positiv mekanisk verkan uppnås då de rörliga komponenterna som krävs för att utföra säkerhetsfunktionen medför förflyttning av anslutna komponenter.	Kräver av aktsamt utvalda material & metoder, tillräcklig vägledning av fjäder, utrymme mellan varven är mindre än tröddiametern (obelastad fjäder) & tillräcklig kraft efter utmatningsbrott.	Effekten kan reduceras genom att tillhandahålla flera delar vilka verkar parallellt. Således undvik uppkomst av ett farligt tillstånd då ett fel uppstår i en av flera delar.

Appendix C – Matematisk utvärdering av grundkoncept

Omvandling av moment till kraft (rotation av lagerhuset):



Beräkning av lämplig stigvinkel, α , för stiftens framdrift:



$$\rightarrow : (1) \quad F - F_{fj} \cdot \sin(\alpha) - F_f = 0 \quad \text{där} \quad F = F_x \cdot \cos(\alpha) \quad (2)$$

$$F_f = \mu \cdot N \quad \text{där} \quad N = F_{fj} \cdot \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$F_{fj} = ?$$

$$(2) \text{ och } (3) \text{ i (1)} \Rightarrow F_x \cdot \cos(\alpha) - F_{fj} \cdot \sin(\alpha) - \mu F_{fj} \cdot \cos(\alpha) = 0$$

$$\Rightarrow F_x(\alpha) = \frac{F_{fj} \cdot \sin(\alpha) - \mu F_{fj} \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

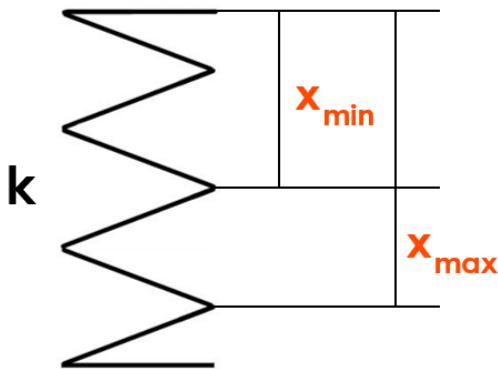
Anta $F_{fj} = 410 \text{ N}$ $\Rightarrow F_x(20) \approx 67,2 \text{ N} \approx \frac{F}{3}$

Anta $F_{fj} = 250 \text{ N}$ $\Rightarrow F_x(25) \approx 66,6 \text{ N} \approx \frac{F}{3}$

Anta $F_{fj} = 180 \text{ N}$ $\Rightarrow F_x(30) \approx 67,9 \text{ N} \approx \frac{F}{3}$

Anta $F_{fj} = 135 \text{ N}$ $\Rightarrow F_x(35) \approx 67,5 \text{ N} \approx \frac{F}{3}$

Kontroll av fjäderkonstantens, k , betydelse för stigvinkeln, α :



Fjäderkraften kommer att öka vartefter fjädern trycks ihop:

$$x_{\min} = \text{förspänning}$$

$$x_{\max} = \text{förspänning} + 1,5 \text{ mm}$$

Vid $\alpha = 20^\circ$ är $x_{\max} = 47 \text{ mm}$ då konstruktionen ses anpassas till given fjäder med $k = 8,66 \text{ N/mm}$:

$$F_{fj} = k \cdot x \Rightarrow x = \frac{F_{fj}}{k} = \frac{410}{8,66} \approx 47 \text{ mm} = x_{\max}$$

$$x_{\min} = x_{\max} - 1,5 \approx 45,5 \text{ mm} \Rightarrow k = \frac{F_{fj}}{x} = \frac{410}{45,5} = 9,01 \text{ N/mm}$$

$$\frac{x_{\max}}{x_{\min}} \Rightarrow 4\% \text{ ökning av fjäderkraften}$$

Vid $\alpha = 25^\circ$ är $x_{max} = 29$ mm då konstruktionen ses anpassas till given fjäder med $k = 8,66$ N/mm:

$$F_{fj} = k \cdot x \Rightarrow x = \frac{F_{fj}}{k} = \frac{250}{8,66} \approx 29 \text{ mm} = x_{max}$$

$$x_{min} = x_{max} - 1,5 \approx 27,5 \text{ mm} \Rightarrow k = \frac{F_{fj}}{x} = \frac{250}{27,5} \approx 9,1 \text{ N/mm}$$

$$\frac{x_{max}}{x_{min}} \Rightarrow 5\% \text{ ökning av fjäderkraften}$$

Vid $\alpha = 30^\circ$ är $x_{max} = 21$ mm då konstruktionen ses anpassas till given fjäder med $k = 8,66$ N/mm:

$$F_{fj} = k \cdot x \Rightarrow x = \frac{F_{fj}}{k} = \frac{180}{8,66} \approx 21 \text{ mm} = x_{max}$$

$$x_{min} = x_{max} - 1,5 \approx 19,5 \text{ mm} \Rightarrow k = \frac{F_{fj}}{x} = \frac{180}{19,5} = 9,23 \text{ N/mm}$$

$$\frac{x_{max}}{x_{min}} \Rightarrow 7\% \text{ ökning av fjäderkraften}$$

Vid $\alpha = 35^\circ$ är $x_{max} = 16$ mm då konstruktionen ses anpassas till given fjäder med $k = 8,66$ N/mm:

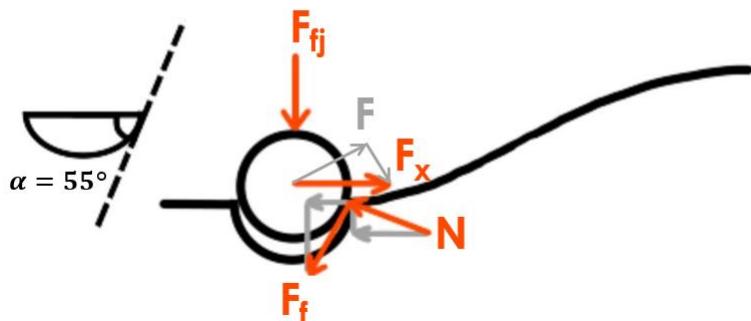
$$F_{fj} = k \cdot x \Rightarrow x = \frac{F_{fj}}{k} = \frac{135}{8,66} \approx 16 \text{ mm} = x_{max}$$

$$x_{min} = x_{max} - 1,5 \approx 14,5 \text{ mm} \Rightarrow k = \frac{F_{fj}}{x} = \frac{135}{14,5} = 9,31 \text{ N/mm}$$

$$\frac{x_{max}}{x_{min}} \Rightarrow 8\% \text{ ökning av fjäderkraften}$$

Appendix D – Matematisk utvärdering av sinusutformning

Läge 1



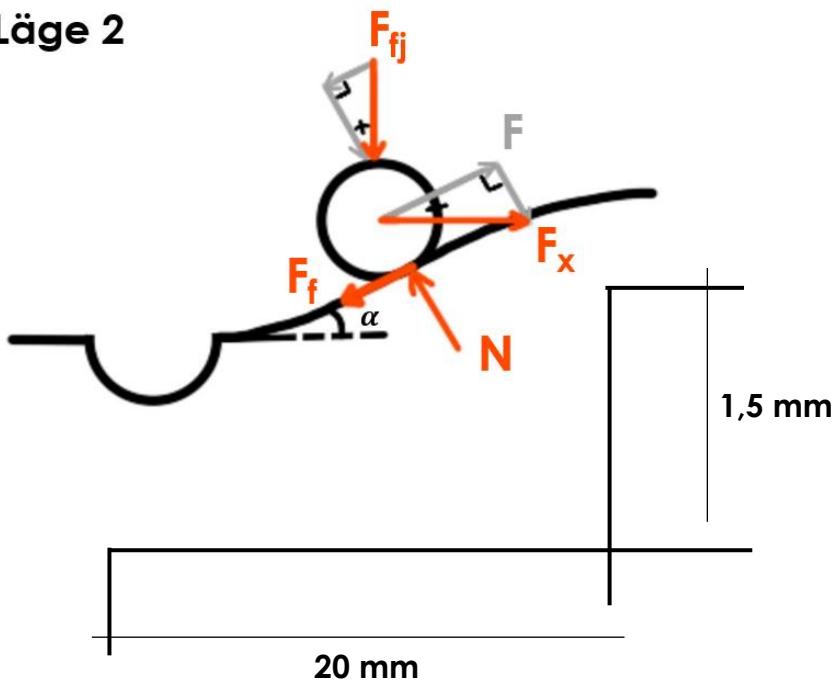
Tidigare beräkningar har påvisat:

$$F = M \cdot r \Rightarrow \frac{F}{3} = 66,667 \text{ N}$$

Beräkning av F_x vilken ämnas vara likvärdig med $\frac{F}{3}$:

$$\begin{aligned} \longrightarrow : F_x - F_f \cdot \cos(\alpha) - N \cdot \sin(\alpha) &= 0 && \text{där } F_f = \mu \cdot N && \text{där } \mu = 0,2 \text{ & } N = F_{fj} \\ \Rightarrow F_x - \mu F_{fj} \cdot \cos(\alpha) - F_{fj} \cdot \sin(\alpha) &= 0 \\ \Rightarrow F_x &= \mu F_{fj} \cdot \cos(\alpha) - F_{fj} \cdot \sin(\alpha) \\ \Rightarrow F_x &= F_{fj}(\mu \cos(\alpha) - \sin(\alpha)) \end{aligned}$$

Anta $F_{fj} = 95 \text{ N} \Rightarrow F_x = 95(0,2 \cos(55) - \sin(55)) = 66,9 \text{ N}$

Läge 2

Beräkning av vinkel, α :

$$\tan(\alpha) = \frac{\text{motstående}}{\text{närliggande}} = \frac{1,5}{20} \Rightarrow \alpha = \arctan\left(\frac{1,5}{20}\right) = 4,3^\circ$$

Beräkning av F_x vilken ämnas vara likvärdig med $\frac{F}{3}$:

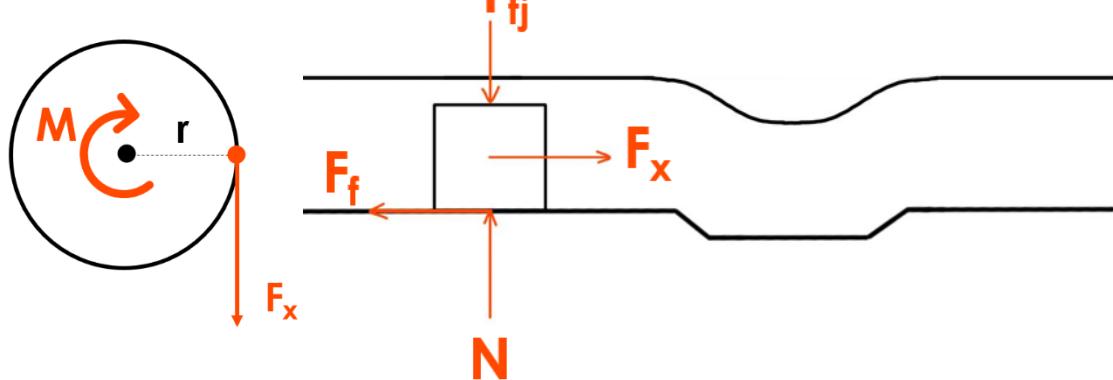
$$F_x = \frac{F_{fj} \cdot \sin(\alpha) - \mu F_{fj} \cdot \cos(\alpha)}{\cos(\alpha)}$$

Identifierad i tidigare beräkningar

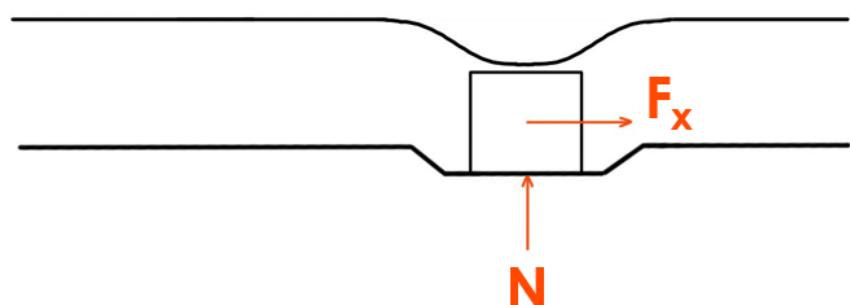
Anta $F_{fj} = 535 \text{ N} \quad \Rightarrow \quad F_x = 66,77 \text{ N}$

Appendix E – Dimensionering av fjäderkraft

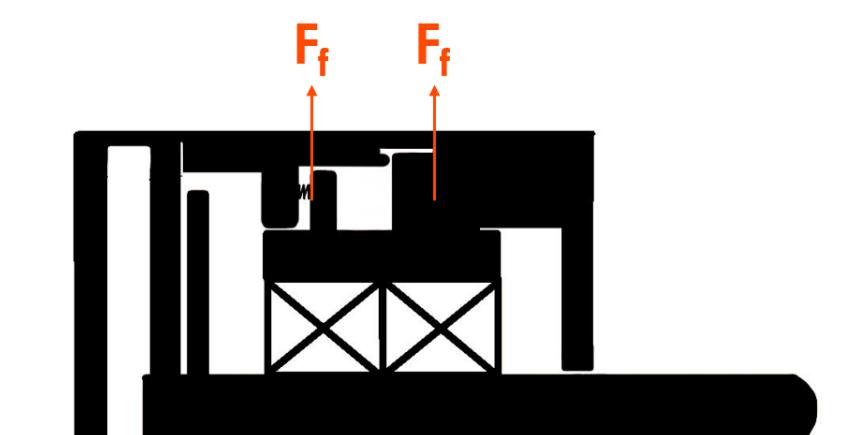
Läge 1 Friktionskoppling F_{fj}



Läge 2 Ej friktion



Friktionskrafter inom systemet



Läge 1: Bedömning av lämplig fjäderkonstant för att möjliggöra funktion

$$\rightarrow : F_x - F_f = 0 \quad \text{där} \quad F_f = 2\mu \cdot N, \quad N = F_{fj}$$

$$\Rightarrow F_x = 2\mu \cdot F_{fj} \quad \Rightarrow \quad F_{fj} = \frac{F_x}{2\mu} \quad \text{där} \quad \mu = 0,2$$

Beräkning av momentets motsvarande kraft:

$$M = F \cdot r \quad \text{där} \quad M = 5 \text{ Nm}, \quad r = \frac{53}{2} \text{ mm}$$

$$\Rightarrow F = \frac{M}{r} = \frac{5}{0,0265} \approx 189 \text{ N}$$

Beräkning av F_{fj} vid ett moment på 5 Nm:

$$F_{fj} = \frac{189}{0,4} = 472,5 \text{ N}$$

OBS! Beräkning av läge 2 ses ej vara betydande i och med att ingen eller en försumbar friktionskraft medges samt att funktionen redan uppfyllt sitt syfte: att registrera ett utökat avstånd mellan rotor och stator.

Bedömning av den fjäderkraft, F_{fj} , vilken krävs vid användning av given vågbricka:

Data för given vågbricka (SSB-0185-S17):

$$H (\text{fri höjd}) = 3,81 \text{ mm}$$

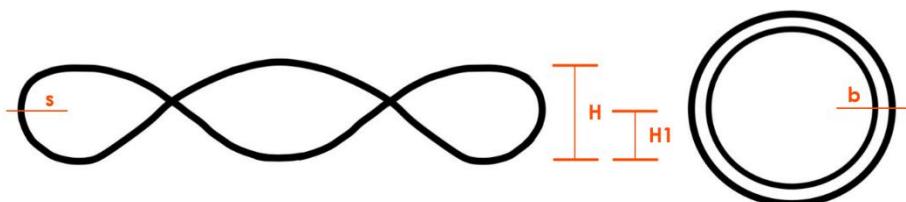
$$H1 (\text{hoptryckt}) = 1,98 \text{ mm}$$

$$b = 3,63 \text{ mm}$$

$$s = 0,46 \text{ mm}$$

$$k = 68 \text{ N/mm}$$

$$F_{fj} \approx 130 \text{ N}$$



Kontroll av aktuell fjäderkraft:

$$F_{fj} = k \cdot x \quad \text{där} \quad x = 1,98 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow F_{fj} = 68 \cdot 1,98 = 134,64 \text{ N} \approx 130 \text{ N} \neq 472,5 \text{ N}$$

Bedömning av den fjäderkonstant, k , vilken krävs för att möjliggöra funktion (vid $M = 5 \text{ Nm}$):

$$F_{fj} = k \cdot x \quad \text{där} \quad F_{fj} = 472,5 \text{ N} \quad , \quad x = 2 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow k = \frac{F_{fj}}{x} = \frac{472,5}{2} \approx 236,3 \text{ N/mm}$$

Slutsats: Beräknad fjäderkraft ses vara ungefär 3,5 gånger starkare gentemot given vågbricka.

Appendix F – Teoretisk konceptutvärdering

Appendix F.1: Kontroll av kritiskt varvtal

Utvärdering av axiellt led: Fjäderkraft beaktas

Bedömning av konceptets kritiska varvtal sker med hjälp av följande formel:

$$f_{n1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{Hz}] \quad \text{där } m \text{ varierar beroende på fall}$$

De två fall som bör beaktas berör huruvida givaren ses som en axelgivare eller en hålaxelgivare:

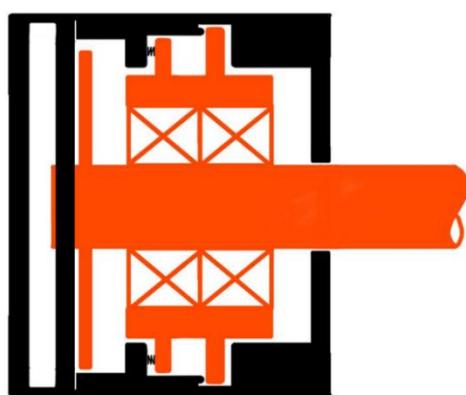
Fall 1: Axelgivare

Förutsättning: Inspänning av givarhus där axel, lagerpaket, lagerhus och rotor tillåts förflyttas i axiellt led.

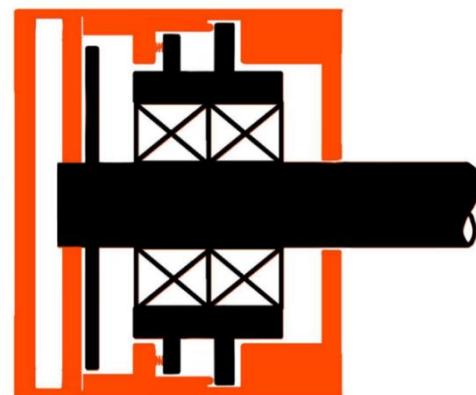
Fall 2: Hålaxelgivare

Förutsättning: Inspänning av axel, lagerpaket, lagerhus och rotor där givarhus, inklusive stator och kåpa, tillåts förflyttas i axiellt led.

Fall 1:



Fall 2:



Kritiskt varvtal för fall 1: $m = 0,170 \text{ kg}$, $k = 4,725 \text{ N/m}$

$$f_{n1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2,363}{0,170}} \approx 0,59 \text{ Hz} \quad \text{vilket motsvarar drygt } 35,6 \text{ rpm}$$

Kritiskt varvtal för fall 2: $m = 0,110 \text{ kg}$, $k = 4,725 \text{ N/m}$

$$f_{n1} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2,363}{0,110}} \approx 0,74 \text{ Hz} \quad \text{vilket motsvarar ungefär } 44,3 \text{ rpm}$$

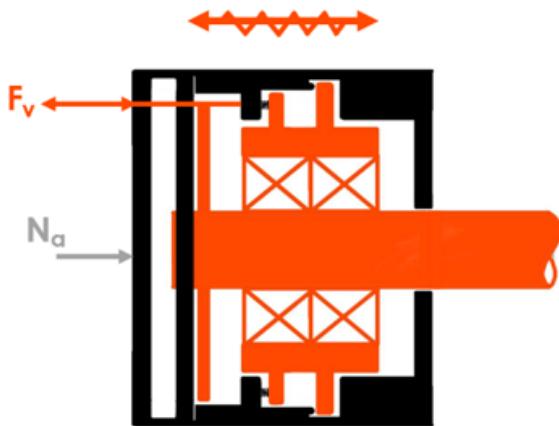
OBS! Respektive massa har verifierats med hjälp av CAD där aluminiumlegeringen 6061-T6 och rostfritt stål (201) har beaktats. Däremot har vikt för rotorn och statorn enbart gjorts en ungefärlig uppskattning. Uppskattning av lagerpaketets vikt har baserats på att ett kullager av dimensionen 32x12x10 generellt väger ungefär 40 g. Nedan presenteras massan för respektive komponent:

Givarhus (undre):	30 g
Lagerhus:	36 g
Kullager (x2):	80 g
Givarhus (övre):	40 g
Axel:	50 g
Rotor:	5 g
Stator:	10 g
Kåpa:	30 g

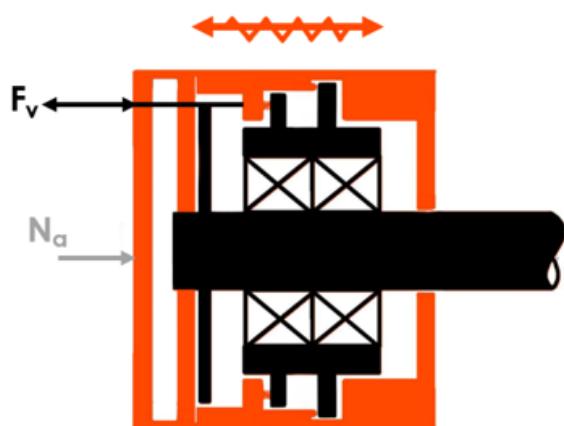
Appendix F.2: Kontroll av vibration

Utvärdering av axiellt led:

Fall 1:



Fall 2:



Bedömning av huruvida konceptet tolererar vibration sker med hjälp av formeln:

$$F = m \cdot a$$

Vibrationskraft för fall 1: $m = 0,170 \text{ kg}$, $a = 300 \text{ m/s}^2$

$$F_{v1} = 0,170 \cdot 300 = 51 \text{ N}$$

F_{v1} gentemot fjäderkraften, $N_a = F_{fj} = 472,5 \text{ N}$: $\frac{51}{472,5} \approx 10,7 \%$

Slutsats: Då konstruktionen utsätts för vibration ses fjäderkraften variera mellan 421,5 N och 523,5 N i läge 2 (felläge), medan i läge 1 (normal drift) ses vibration ej påverka då fjädern är maximalt hoptryckt.

Vibrationskraft för fall 2: $m = 0,110 \text{ kg}$, $a = 300 \text{ m/s}^2$

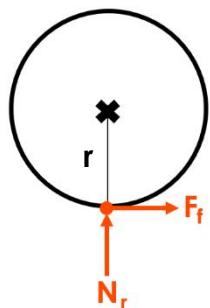
$$F_{v2} = 0,110 \cdot 300 = 33 \text{ N}$$

F_{v2} gentemot fjäderkraften, $N_a = F_{fj} = 472,5 \text{ N}$: $\frac{33}{472,5} \approx 7 \%$

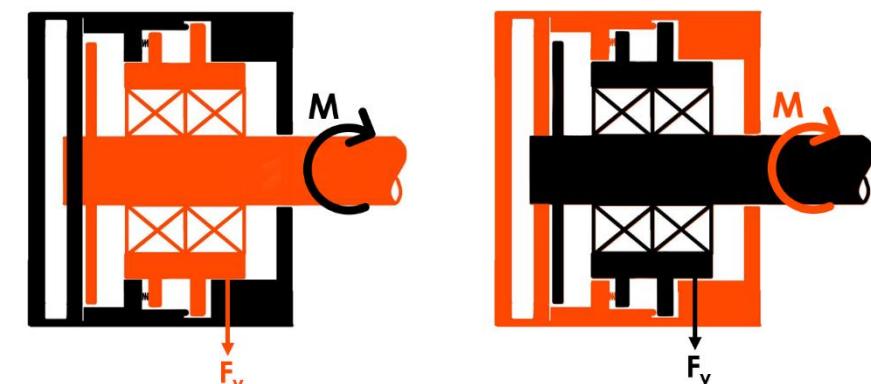
Slutsats: Då konstruktionen utsätts för vibration ses fjäderkraften variera mellan 439,5 N och 505,5 N i läge 2 (felläge), medan i läge 1 (normal drift) ses vibration ej påverka då fjädern är maximalt hopytryckt.

Utvärdering av radieellt led:

Fall 1:



Fall 2:



Bedömning av huruvida konceptet tolererar vibration sker med hjälp av formeln:

$$F = m \cdot a \cdot \mu$$

Vibrationskraft för fall 1: $m = 0,170 \text{ kg}$, $a = 300 \text{ m/s}^2$, $\mu = 0,2$

$$F_{v1} = 0,170 \cdot 300 \cdot 0,2 = 10,2 \text{ N}$$

Kontroll av moment: $r = 0,0202 \text{ m}$

$$M_{v1} = F_{v1} \cdot r = 10,2 \cdot 0,0202 \approx 0,21 \text{ Nm}$$

M_{v1} gentemot ansatt moment, $M = 5 \text{ Nm}$: $\frac{0,21}{5} \approx 4,1 \%$

Slutsats: Vid vibration ses momentet bli 4,1 % högre.

Vibrationskraft för fall 2: $m = 0,110 \text{ kg}$, $a = 300 \text{ m/s}^2$, $\mu = 0,2$

$$F_{v1} = 0,110 \cdot 300 \cdot 0,2 = 6,6 \text{ N}$$

Kontroll av moment: $r = 0,0202 \text{ m}$

$$M_{v1} = F_{v1} \cdot r = 6,6 \cdot 0,0202 \approx 0,13 \text{ Nm}$$

M_{v1} gentemot ansatt moment, $M = 5 \text{ Nm}$: $\frac{0,13}{5} \approx 2,6 \%$

Slutsats: Vid vibration ses momentet bli 2,6 % högre.

Appendix F.3: Kontroll av lastfall

Utvärdering av axiellt led:

Förutsättning: En axiell last, $F_a = \pm 100 \text{ N}$, inverkar på ansatt fjäderkraft, $F_{fj} = 945 \text{ N}$, vilken kongruerar till ett vridmoment på 5 Nm.

Bedömning av återstående fjäderkraft:

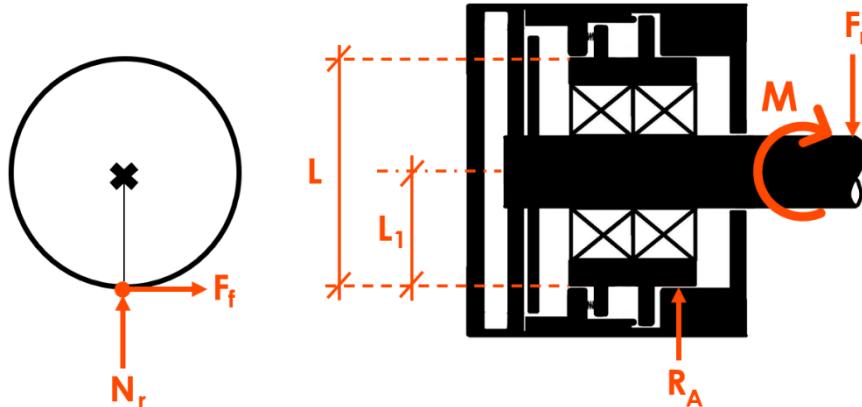
$$F_{fj} - F_a = 472,5 \pm 100 \text{ N}$$

F_{fj} gentemot ansatt fjäderkraft, F_{fj} : $\frac{100}{472,5} \approx 21 \%$

Slutsats: En axiell last på 100 N kan medföra problematik då kraften utgör 21 % av fjäderkraften. Då konstruktionen utsätts för en axiell tryckkraft fås således en högre motståndskraft vilken direkt påverkar det förväntade vridmomentet. Medan en axiell dragkraft medför en lägre motståndskraft. Det vill säga en axiell last, oavsett riktning, medför en lägre eller en högre fjäderkraft vilken påverkar vridmomentet. Således ses lagerhuset börja rotera endera tidigare eller senare än förväntat.

Utvärdering av radiellt led:

Förutsättning: En radiell last, $F_r = \pm 125 N$ ansätts.



Jämviktsberäkning:

$$\uparrow : R_A - F_r \cdot L_1 = 0 \quad (1)$$

$$\curvearrowright M_r : F_r \cdot L \cdot L_1 - R_A \cdot L = 0 \quad (2)$$

$$(2) \Rightarrow R_A = \frac{F_r \cdot L \cdot L_1}{L} = F_r \cdot L_1 \quad (3)$$

Bedömning av friktionskraft: $\mu = 0,2$, $N_r = F_r = 125 N$

$$F_f = \mu \cdot N_r = 0,2 \cdot 125 = 25 N$$

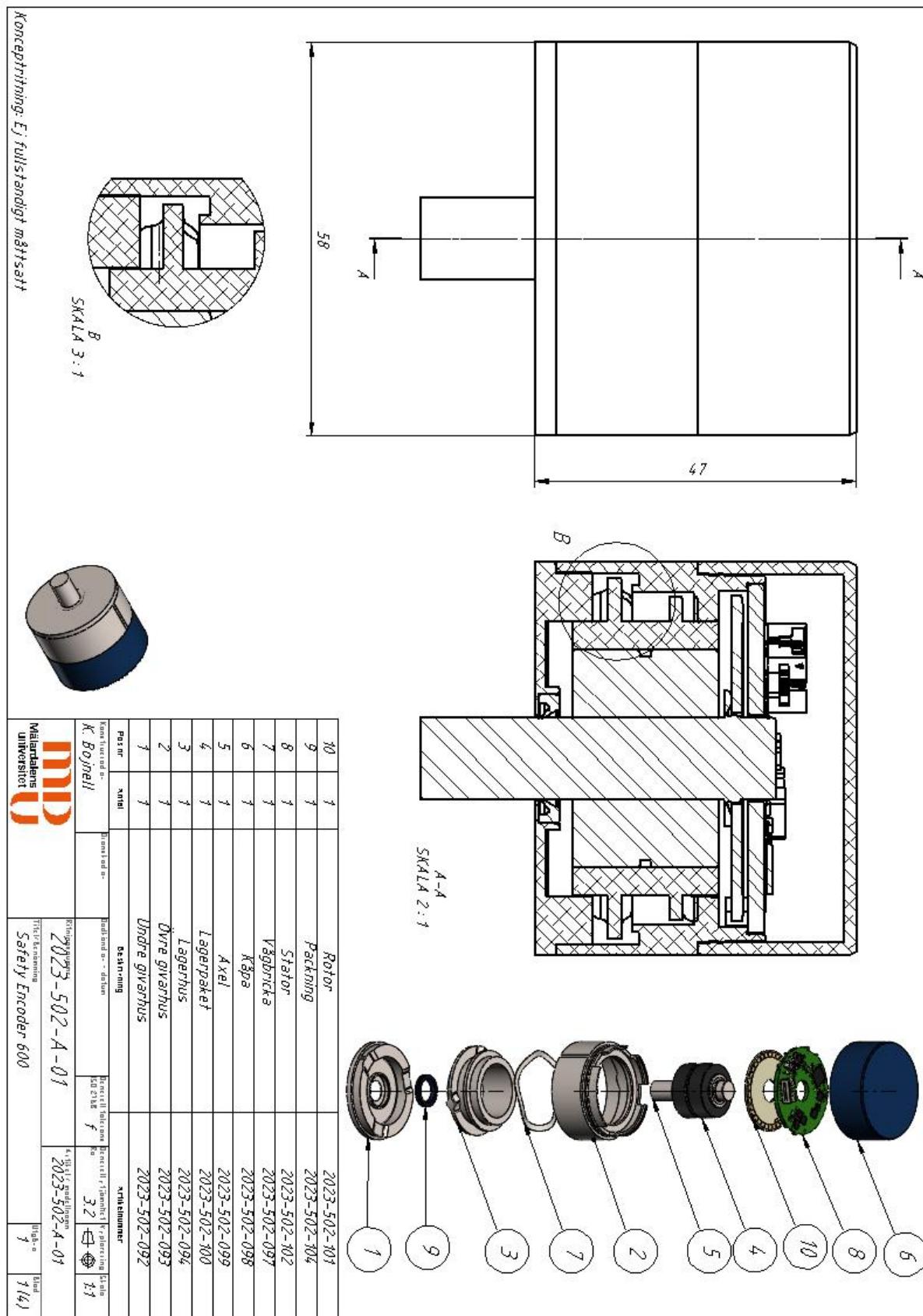
Beräkning av vridmoment vilken fås vid en radiell last och glidning: $L_1 = 0,0202 m$

$$(3) \Rightarrow R_A = (F_r + F_f) \cdot L_1 = (125 + 25) \cdot 0,0202 \approx 3 Nm$$

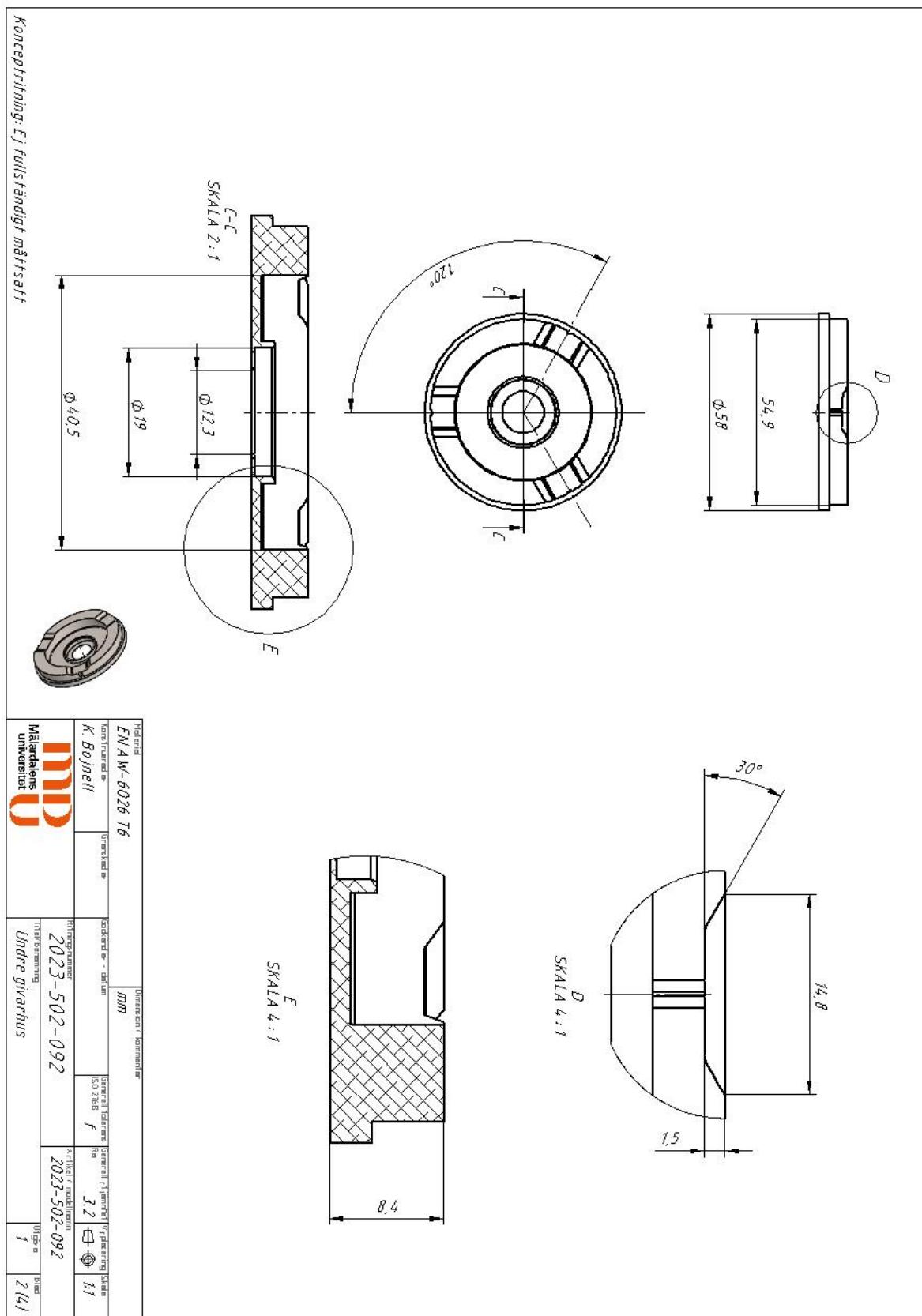
R_A gentemot ansatt moment, $M = 5 \text{ Nm}$: $\frac{3}{5} = 60\% \Rightarrow 40\% \text{ avvikelse}$

Slutsats: Då konstruktionen belastas med en radiell last ges ett vridmoment på 3 Nm. Detta innebär en avvikelse på 40 % gentemot det förväntade vridmomentet på 5 Nm.

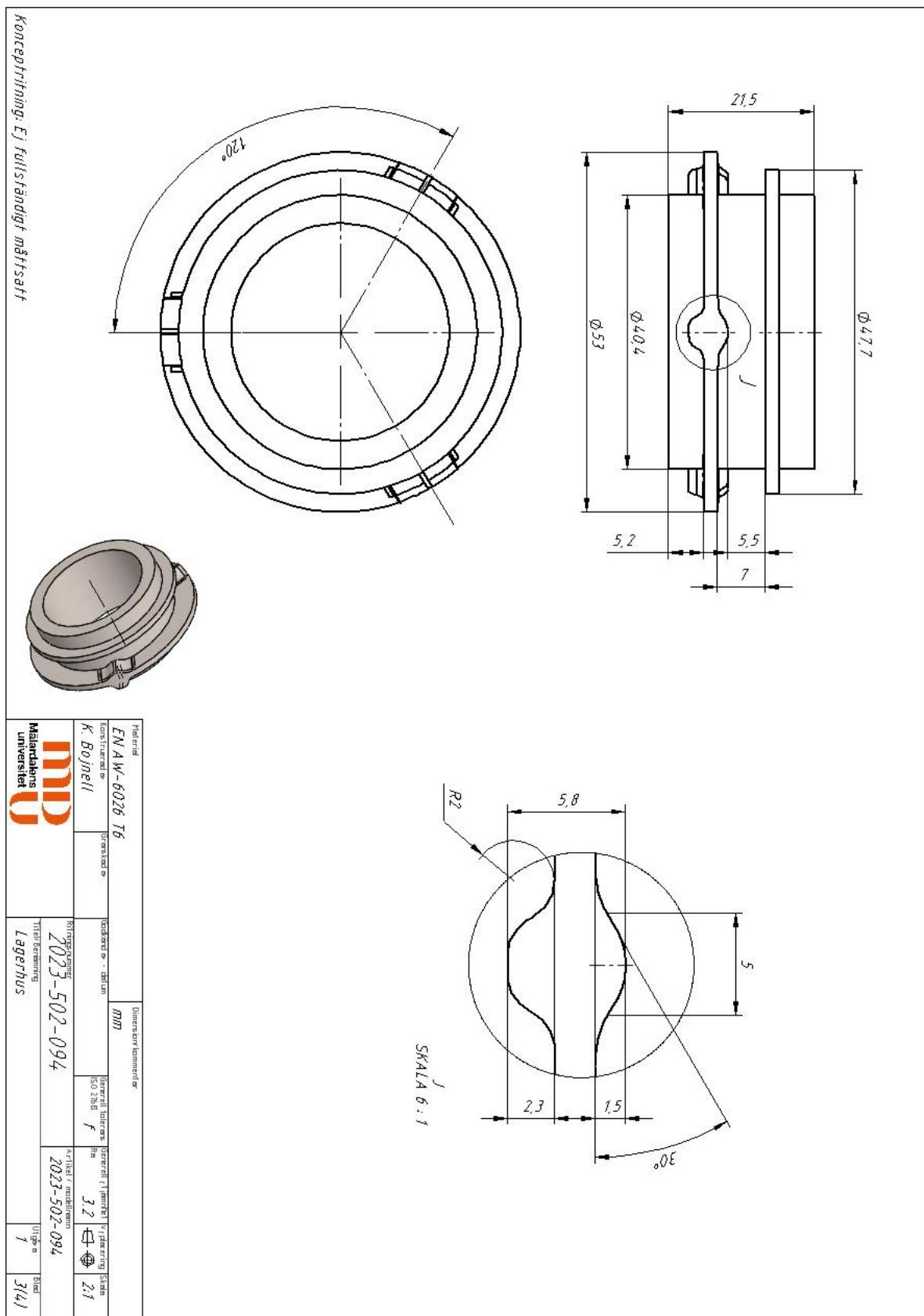
Appendix G – Sammanställningsritning av slutkoncept



Appendix H – Detaljritning av undre givarhus



Appendix I – Detaljritning av lagerhus



Appendix J – Detaljritning av övre givarhus

