

2012-05-28

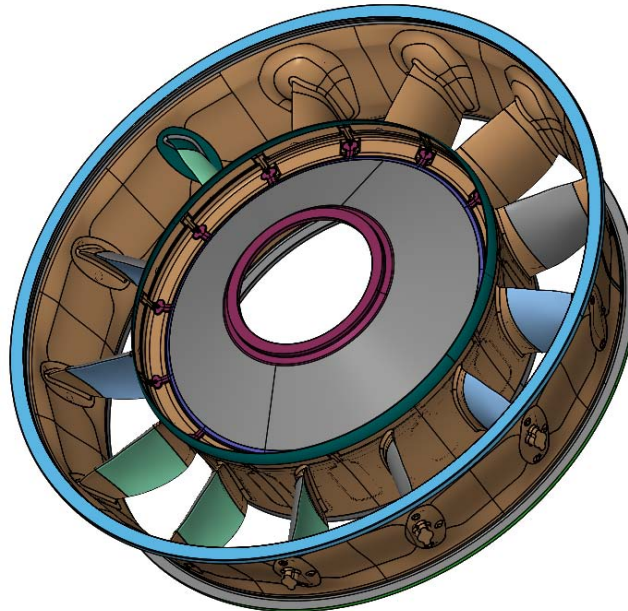


VOLVO AERO

Optimering av smidesgeometri för P-fläns på bakre turbinstativ (TEC)

Fredric Gustafsson

Jonatan Uldal



EXAMENSARBETE

Optimering av smidesgeometri för P-fläns på bakre turbinstativ (TEC)

Sammanfattning

Examensarbetet har utförts vid Volvo Aero Corporation i Trollhättan på avdelningen ”heta strukturer” där bakre motorfästet till flygplansmotorn GP7000 utvecklas. Rapporten avhandlar en studie av P-flänsen på bakre motorfästet. Syftet med arbetet var att undersöka vilka parametrar som påverkar flänsens rörelse under tillverkningsprocessen. Målet var att utreda möjligheten att införa ett slimmare flänssmide. För att hinna skapa ett konkret resultat avgränsades arbetet till att endast granska P-flänsen.

Flänsarna rör sig under tillverkningsprocessen. Genom att mäta avvikelser från punkter utsatta på nominell geometri i förhållande till skannad geometri efter påverkan av tillverkningsprocessen kunde rörelsen kartläggas. Utifrån kartläggningen skapades två förslag.

Det första förslaget baserades på en vinkling av flänsen. Förslaget skall kompensera lutningen som orsakas av TIG-svetsningen. Ett lyckat införande skulle eventuellt kunna innebära att en hel operation (grovsvarvning) skulle kunna avlägsnas. På grund av otillräcklig kunskap om huruvida lutningen skulle förändras efter införandet krävs analys av utfallet innan material kan reduceras.

Det andra förslaget baserades enbart på punktavvikelser. Avvikelseerna var normalfördelade vilket möjliggjorde statistiska beräkningar där fyra sigma (99,379%) i säkerhet användes för att skapa ett säkerhetsintervall för punkternas avvikelse. Resultatet från beräkningarna utgjorde underlaget för mängden överflödigt flänssmide som med säkerhet kunde reduceras vid inköp. Resultatet påvisar att cirka 10 % av inköpt flänssmide kan tas bort.

Författarna föreslår att Volvo Aero använder sig av förslag ett eftersom ett mer slimmare smide enklare kan införas på sikt. För framtida arbeten rekommenderas företaget att applicera tillvägagångssättet från rapporten till undersökning av de resterande flänssmiderna på GP 7000 TEC. Analysen utförd i rapporten kan även beaktas då nya smidesgeometrier till andra projekt skall utvecklas.

Datum:	2012-05-28
Författare:	Fredric Gustafsson, Jonatan Ulldal
Examinator:	Lars-Erik Svensson
Handledare:	Kjell Hurtig, Högskolan Väst
Program:	Maskiningenjör med inriktning mot logistik
Huvudområde:	Maskinteknik
Poäng:	15 högskolepoäng
Nyckelord:	Optimering, Six Sigma, Tillverkning, Fläns, Analys
Utgivare:	Högskolan Väst, Institutionen för ingenjörsvetenskap, 461 86 Trollhättan Tel: 0520-22 30 00 Fax: 0520-22 32 99 Web: www.hv.se
Utbildningsnivå:	Kandidatexamen

BACHELOR'S THESIS

Optimization in geometry for the forging of P-flange on the rear turbine frame

Summary

This thesis work has been performed at Volvo Aero Corporation in Trollhättan, at the department of “hot structures” involving aircraft engine GP7000. The purpose with the study was to investigate the possibility to reduce size of the forging of flanges on the rear turbine frame when purchasing. Thereto examine the parameters that affect the flanges motion during the manufacturing process. The goal was to provide Volvo Aero with foundation to later bring in slimmed forgings. In order to supply the company with a concrete result the report was limited into studying the P-flange.

During the manufacturing process the flanges moves. By measuring the deviation from calculated points on nominal geometry relative to scanned geometry after affecting operations, the motion could be mapped. From these studies two proposals for optimization was presented.

The first proposal is based on evening out the tilt caused from the TIG-welding operation. Purchasing tilted forgings would compensate the angle and make room for further savings. If the introduction became a success it could eventually mean that a whole operation (roughing) might be removed. Due to insufficient knowledge about whether the tilt would change as expected after introduction, it requires another analyze after implemented before material can be reduced.

The second proposal is based on reducing material solely on the point's motion. Calculating with four sigma safety (99,379%) on the movements gave information about how much excess material that could be reduced on the forgings. Considerations about whether decreased material would modify the movement pattern have been taken into account. The result shows that 10 % from the bought in forgings can be removed directly.

The authors suggest that Volvo Aero begin with the tilt-proposal as a first step in bringing in slimmed forgings. For future work the company could implement the approach taken on this report to the other flanges.

Date:	2012-05-28
Author:	Fredric Gustafsson, Jonatan Ulldal
Examiner:	Lars-Erik Svensson
Advisor:	Kjell Hurtig, University West
Programme:	Mechanical Engineering, Alignment: Logistics/Production
Main field of study:	Mechanical Engineering Education level: Bachelor examination
Credits:	15HP
Keywords:	Optimization, Six Sigma, Manufacturing, Flange, Analyze
Publisher:	University West, Department of Engineering Science, S-461 86 Trollhättan, SWEDEN Phone: + 46 520 22 30 00 Fax: + 46 520 22 32 99 Web: www.hv.se

Förord

Rapporten avhandlar ett examensarbete utfört på avdelningen ”heta strukturer” vid Volvo Aero i Trollhättan. Arbetet omfattar tio veckors arbete och är en avslutande kurs på 15 högskolepoäng för Högskolan Västs maskiningenjörsutbildning. Arbetet har fördelats lika. Båda har varit delaktiga i rapportens samtliga delar och examensarbetets alla arbetsmoment.

Alla bilder, diagram, figurer och tabeller i rapporten är godkända att använda från innehavaren. Om ingen referens är angiven så är det våra egna.

Mätdata, processkarta och bilder som visar flänsens rörelse har utelämnats på grund av sekretess. Värdena på diagrammen och kostnadsberäkningar har även strukits på Volvos önskan.

Vi vill tacka all berörd personal på Volvo Aero. Ett speciellt tack till Johan Lööf som har guidat oss genom projektet. Vidare vill vi tacka vår handledare på Högskolan Väst Kjell Hurtig.

Fredric Gustafsson

Jonatan Ulldal

Innehåll

Sammanfattning	ii
Summary.....	iii
Förord.....	iv
1 Inledning	1
1.1 Företagsbeskrivning	1
1.2 Bakgrund	2
1.3 Syfte/ mål.....	3
1.4 Avgränsningar	3
2 Tillvägagångssätt	4
3 Teori.....	5
3.1 Inconel 718.....	5
3.2 Värmebehandling.....	6
3.2.1 Utskiljningshärdning	6
3.3 Svetsning	7
3.3.1 TIG-svetsning	7
3.4 Six Sigma (6σ)	9
3.5 Matematisk statistik.....	11
3.5.1 Standardavvikelse	11
3.5.2 Konfidensintervall och normalfördelning.....	11
3.6 GOM-inspect	13
4 Processbeskrivning	14
5 Datainsamling/mätningar	15
5.1 Mätningar	15
5.2 Datalagring.....	16
6 Resultat.....	17
6.1 Förslag 1	17
6.2 Förslag 2	18
6.3 Processtabilitet.....	20
7 Analys/ Slutsatser.....	22
8 Framtida arbete.....	24
Källförteckning.....	25

Bilagor

- A. Bearbetningsstegen
- B. Fishbone diagram
- C. Koordinatberäkning för punkt 1
- D. Vinkel för sida 1 och 2

Nomenklatur

Superlegering – En legering som används vid mycket höga temperaturer.

Enfasigt tillstånd – Ett material bestående av en struktur.

Tvåfasigt tillstånd – Ett material bestående av två olika strukturer.

Dislokationer – Förskjutning från normalläge, t.ex. rubbning i kristallgitter.

Koherenta partiklar – Partiklar med en annan atomstorlek som passar in men stör kristallens atomanordning och på så vis skapar spänningar i materialet.

MIG- Metal Inert Gas, svetsmetod där ett skydd bestående av en inert gas, som argon används.

MAG- Metal Active Gas, svetsmetod där en skyddsgas som kan reagera med metallsmältan används, vanligtvis en blandning av argon och koldioxid.

MMA- Manuel Metal Arc, svetsmetod där en ljusbåge smälter elektroden som bildar ett skyddande slagg.

GOM Inspect – Analysprogram för visualisering och mätning av detaljers rörelse.

Fishbone diagram – Ett verktyg som används för att undersöka grundorsaken till att problem uppkommer.

Lean – Ett kvalitetsförbättringsprogram likt Six Sigma där fokus är på att minska slöserier och ständiga förbättringar.

TEC - Turbine Exhaust Case, engelsk förkortning för bakre motorfäste.

Konfidensintervall – Om ett försök inte kan bestämma svaret exakt kan istället två gränser, där svaret innesluts med en viss sannolikhet skapas.

Volvo Communicator – Kommunikationsprogram som används som chatt mellan anställda inom koncernen AB Volvo.

1 Inledning

Kraven på kvalitet och säkerhet är strikt satta för flygindustrin i förhållande till exempelvis bilindustrin. Orsaken till kraven är de allvarliga konsekvenserna fel under flygning kan innebära.

Tillverkningen av flygplansdelar är därför noggrant övervakad genom kontroller och mätningar så att de uppsatta säkerhetskraven uppnås. I en utsatt miljö är det viktigt att använda lämpligt material anpassat för de olika påfrestningarna, till exempel behöver bakre delen av motorn operera under hög värmepåverkan (ca 600-700°C). Samtidigt eftersträvas en så låg vikt som möjligt för att hålla nere bränsleförbrukningen och minska miljöpåverkan.

Flygmotorer är en produkt där samma modell ofta tillverkas under lång tid (~30år). Små förbättringsåtgärder i tillverkningen kan således innebära stora besparingar.

1.1 Företagsbeskrivning

Volvo Aero Corporation är ett dotterbolag till koncernen AB Volvo. Bolagets huvudkontor finns beläget i Trollhättan med totalt cirka 2900 anställda och omsättningen 2011 uppgick till 6,5 miljarder SEK [1]. Företaget utvecklar och tillverkar komponenter till flygplans- och raketmotorer. Därutöver är service och underhåll viktiga delar av verksamheten [2]. Volvo Aeros motorkomponenter återfinns numera i över 90 % av alla nya större civila flygplan [3].

Affärsfilosofin bygger på att ha ett nära samarbete med sina partners, med visionen att bli den bästa samarbetspartnern ("Best partner") [2].

De tre kärnvärden som organisationen grundas på är säkerhet, kvalitet och ansvar för miljön [4].

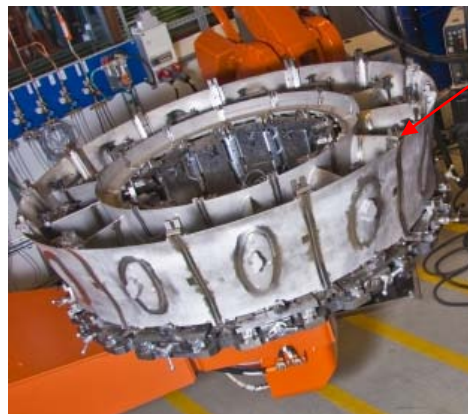
Examensarbetet vilket denna rapport avhandlar utfördes på avdelning 9612 där bakre motorfästet utvecklas på GP7000 motorn.

1.2 Bakgrund

Motorn GP7000 (se figur 1) sitter på flygplanet Airbus A380. Motorn tillverkas genom ett samarbete mellan flygmotortillverkarna General Electric och Pratt & Whitney kallat "Engine Alliance". Pratt & Whitney har gett Volvo Aero uppdraget att utveckla en av motorns komponenter, turbine exhaust case (TEC) (se figur 2). Komponenten har en höjd på ~0,4 meter med största diametern på cirka 1,8 meter och sitter på bakre delen av GP7000, efter förbränningskamrarna.



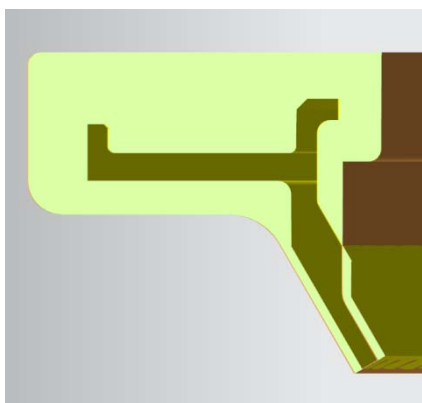
Figur 1. GP7000 motorn



Figur 2. Bakre motorfästet (TEC) på GP7000

Bakre motorfästet (TEC) tillverkas i fabriken genom bearbetning och hopsvetsning av inköpta delar. Företaget strävar efter att köpa in slimmade geometrier för att minska bearbetningstiden, materialkostnader och miljöpåverkan.

Idag överdimensioneras flänssmidernas storlek vid inköp (se figur 3) eftersom materialet rör sig under tillverkningsprocessen. Företaget vill undersöka hur flänsen rör sig och bedöma om geometrin av inköpta smiden kan optimeras.



Figur 3. Snitt av P-fläns, inköpt smide jämfört med färdigbearbetad geometri

1.3 Syfte/ mål

Syftet med examensarbetet är att undersöka vilka parametrar som påverkar P-flänsens rörelse i tillverkningsprocessen samt utreda möjligheterna att minska smidets storlek. Målet är att optimera P-flänssmidesgeometrin till bakre motorfästet på GP 7000 vid inköp.

1.4 Avgränsningar

I rapporten granskas endast P-flänsen, de övriga flänsarna (T-fläns yttre och inre, B-H-fläns) undersöks inte. Tillverkningsprocessen kommer enbart inspekteras från utgångspunkten att minska dimensionerna på inköpt P-flänssmide.

2 Tillvägagångssätt

Projektet inleddes med ett verkstadsbesök där tillverkningsprocessen för bakre motorfästet studerades. En processkarta samt en visuell ritning över avverkande operationer (se bilaga A) konstruerades. Detta för att få en uppfattning om var i processen P-flänsen kan tänkas röra sig och i vilka operationer material avverkas.

Genom brainstormingmöte med personal inom området utbyttes kunskap och erfarenheter angående frågeställningen ”Vad påverkar flänsens rörelse?”. Mötet sammanställdes med ett fishbone diagram (se bilaga B).

Litteraturstudier inom intressanta områden för projektet utfördes för att erhålla en djupare förståelse för frågeställningen. De intressanta ämnena sammanställdes under teoridelen. Information har främst hämtats från internet via elektroniska databaser som Scopus och Google Scholar. Kursböcker i tillverkningsteknik, kvalitet, materiallära samt matematisk statistik har också utnyttjats.

Detaljens rörelse undersöktes i det av företaget tillhandahållna analysprogrammet GOM-inspect. Skannade TEC’ar från Volvo Aeros mätkontroll efter svetsning och värmebehandling mättes mot nominell geometri i programmet. I Excel infördes mätningarna för noggrannare granskning. Resultatet och analysen bygger på dessa uppmätta avvikelser.

Hela arbetet är utfört enligt Six Sigmas DMAIC-cykel vilket kommer att beskrivas utförligare i teoridelen. I detta examensarbete har DMAI verkställts, Control kommer i ett senare skede genomföras av företaget.

Intervjuer och dialoger med anställda har pågått under hela cykeln genom muntliga konversationer, skriftliga mejl och Volvo Communicator.

3 Teori

Under detta avsnitt presenteras relevanta ämnen för rapporten. En fördjupad förståelse i ämnena är viktig för att kunna tolka resultatet och förstå analysen för arbetet. Avsnittet avhandlar Inconel 718, värmebehandling, svetsning, Six Sigma, matematisk statistik samt GOM-inspect.

3.1 Inconel 718

Inconel 718 är en nickelbaserad superlegering som patenterades för 50 år sedan [5]. Positiva egenskaper som kännetecknar materialet är:

- Hög hållfasthet (brottgräns på cirka 1450 N/mm²)
- Behåller god hållfasthet vid höga temperaturer (upp till ca 650° C)
- Svetsbart
- Bra korrosionsmotstånd

Inconel 718 utnyttjas följaktligen på delar som är utsatta för värmepåverkan. På grund av materialets egenskaper är Inconel 718 lämplig att använda för tillverkning av gasturbiner, raketmotorer, kärnreaktorer och flygmotorer [6].

Negativa egenskaper är densiteten (8,13g/cm³) samt bearbetningssvårigheter. Densiteten innebär en oönskad vikt i exempelvis flygmotorer där lätt vikt eftersträvas. Brottgränsen (cirka 1450 N/mm²) leder till försvårad bearbetning [6].

Inconel 718 består av grundämnena som visas i tabell 3.1.1.

Grundämne	Andel
Ni+Co	50-55%
Cr	17-21%
Fe	Balansera
Nb + Ta	4,75-5,5%
Mo	2,8-3,3%
Ti	0,65-1,15%
Al	0,2-0,8%

Tabell 3.1.1. Grundämnena i Inconel 718 [7]

3.2 Värmebehandling

Värmebehandling är ett samlingsnamn för olika värmeprocesser som tillämpas för att skapa egenskaper passandes för den aktuella användningen. Glödning, härdning, utskiljningshärdning och åldring är exempel på processer. Alla har olika utförande, men tre steg finns alltid med i en värmebehandling:

1. **Uppvärmning** – Då materialet värms upp till en önskad temperatur. Temperaturen beror på vilka egenskaper som söks.
2. **Hålla den önskade temperaturen en bestämd tid** – Då materialet värmts upp behövs tid för att kunna ta bort inre spänningar. Tiden beror på storlek, geometri, material samt vilka materialegenskaper som eftersträvas.
3. **Kylning av materialet** – Kylningen sker vanligtvis genom användning av vatten, olja eller luft. Kylhastigheten anpassas för att uppnå eftersträfvade materialegenskaper [7].

Värmebehandlingsmetoden som granskas närmare i denna rapport är utskiljningshärdning.

3.2.1 Utskiljningshärdning

Utskiljningshärdning är en värmebehandlingsteknik tillämpad för formbara legeringar. Metoden används för att skapa så effektiva hinder för dislokationsrörelser som möjligt och därmed öka sträckgränsen. En förutsättning för utförandet är att legeringen kan överföras i ett enfasigt tillstånd. Utskiljningshärdning utförs i en temperatur anpassad för det aktuella materialet, de temperaturer som presenteras i rapporten är baserade på Inconel 718 [7].

De tre steg som ingår i utskiljningshärdning är:

1. **Upplösningsbehandling** – En process där legeringen värms upp till ett enfasigt tillstånd (Ca 1000°C [8]).
2. **Snabbkylning** – Efter upplösningsbehandlingen kyls materialet snabbt ned. Materialet kommer till en början inneha en instabil övermättad enfasig status. I detta tillstånd börjar atomerna förflytta sig för att skapa ett stabilt tillstånd med två faser [7].
3. **Åldring** - Åldringsprocessen innebär att material åldras i en längre tid under en viss temperatur efter snabbkylningen. För Inconel 718 brukas temperaturer mellan 500-750°C [8]. Genom åldringen utvecklas koherenta partiklar. Vid utförandet skapas även en riklig kärnbildning med många små korn istället för få och stora. Genom koherenta partiklar och små korn motverkas dislokationsrörelser och därmed förbättras hållfastheten, vilket är målet med åldringen [7].

3.3 Svetsning

Svetsning handlar om att sammanbinda två eller flera metallstycken med varandra. Arbetsstyckena hettas upp med energi från exempelvis elektricitet, gasflamma, friktion eller högt tryck till sin smältpunkt för att sammanfogas. Den dominerande metoden idag är de elektriska då de bland annat är enkla att styra, vilket möjliggör hög automatiseringsgrad [9].

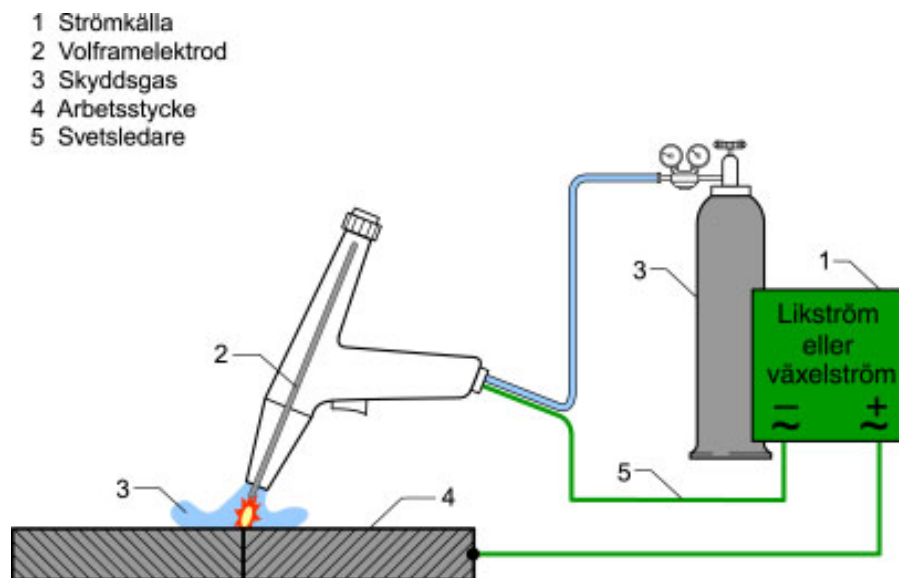
Sammanfogningen kan ske med eller utan tillsats av material. De vanligaste förekommande svetsmetoderna på fasta arbetsplatser är MIG-/MAG-, TIG- och MMA-svetsning [10].

I rapporten studeras TIG-svetsning närmare.

3.3.1 TIG-svetsning

TIG står för ”Tungsten Inert Gas” och är en svetsmetod som kan användas på alla svetsbara material. Metoden används oftast för svetsning av tunnare material med ett dimensionsområde som sträcker sig från 0,5-6mm [11].

Den nödvändiga värmen för TIG-svetsning erhålls genom en elektrisk ljusbåge mellan arbetsstycket och en icke smältande elektrod (tungsten). Ljusbågen som är fri från gnistor och stänk smälter grundmaterialet och eventuella tillsatsmaterial (se figur 4) [12].

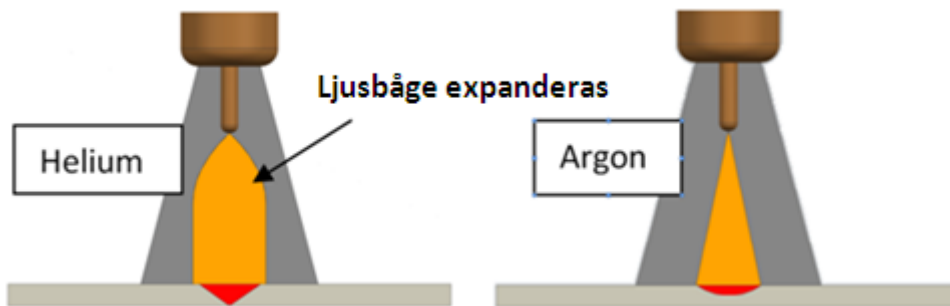


Figur 4. TIG-svetsning [12]

Svetsningen utförs i en atmosfär av inert gas som strömmar ut genom en gaskåpa vid elektroden. Gasen är viktig då dess uppgift är att ligga som ett skyddande filt

över arbetsstycket och hindra luften (syre, kväve och fuktighet) från att reagera med svetsmetallen. Utan skyddet reagerar den smälta metallen med omgivningen och producerar porositet (bubblor) vilket kraftigt minskar svetsförbandets styrka [13].

I TIG-svetsning används främst två skyddsgaser, argon och helium. Argon är en tyngre gas (1.5ggr tyngre än luft) medan helium är lättare (10ggr lättare än argon). Detta gör att argon lägger sig som en filt över svetsförband medan helium stiger fort. För att uppnå motsvarande skydd som argon krävs två till tre gånger högre flödes hastighet för helium, detta gör det kostsamt. Men med sin högre värmeledningsförmåga expanderas ljusbågen och mer yta värms upp, vilket leder till djupare fog (se figur 5). Helium är önskvärt på tjockt material och där höga svetshastigheter önskas. Vid tunnare material används argon.



Figur 5. Representation av påverkan på ljusbågen från helium respektive argon [13]

Likström eller växelström tillämpas för svetsmetoden. Växelström brukas på material med en svårsmält oxid såsom aluminium, då växelström har en god oxiduppbrytande effekt. Likström används på material utan svårsmält oxid, exempelvis kolstål, rostfritt och koppar [11].

TIG-svetsning tillämpas ofta där höga krav på kvalitet, precision och ytjämnhet ställs. Den lämpar sig väl för svårsvetsbara metaller som titan, kopparnickel och monel. Men det är i rostfria stål samt lättmetaller TIG-svetsning praktiseras mest [11].

3.4 Six Sigma (6σ)

Six Sigma-konceptet uppfanns på 80-talet och var då namnet på Motorolas förbättringsprogram. Metodiken ämnar göra företagets processer stabilare så att variationen i kvalitet och prestanda minskar.

Konceptet kom att bli ett världsledande tillvägagångssätt för reducering av variationer. Vid sekelskiftet hade flera stora företag likt American Express, Ford Motor och Nokia börjat införa Six Sigma.

Namnet kommer från matematiken där σ (sigma) är beteckningen på spridningsmättet standardavvikelse. Den genomgående målsättningen är att minska felen till 3,4 eller mindre per en miljon möjligheter (se tabell 3.4.1) [14].

Sigma	Defekter/miljon	% korrekt
6	3,4	99,9997
5	233	99,977
4	6210	99,379
3	66807	93,32
2	308538	69,1
1	691,462	30,9
0	993193	6,7

Tabell 3.4.1 Six Sigma – Felaktiga per en miljon möjligheter [15]

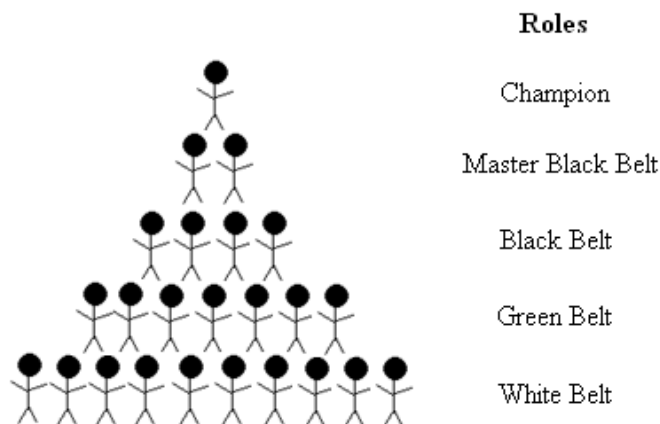
Six Sigma kan delas upp i olika delar:

En del av Six Sigma är projektarbetsutförandet vilket beskrivs enligt DMAIC cykeln (Define-Measure-Analyse-Improve-Control). Arbetet inleds med att definiera problemet. Därefter utförs mätningar där data samlas in och analyseras. När grundorsaken till problemet uppdagats åtgärdas det. Arbetet följs upp och kontrolleras för att undvika att samma problem återkommer. Genom arbetscykeln skapas ett standardiserat sätt att utföra projekt. Resultatet kan således lättare jämföras och appliceras på andra arbeten [14].

En annan del handlar om utbildning i statistik. Syftet är att anställda skall förstå och ta del av företagets statistik. Sammanlänkat med processkunskap ges anställda en bättre överblick och förståelse för företagets styrkor och svagheter. Kunskapen skall leda till skapande av långsiktiga lösningar.

Sista delen beskriver tillvägagångssättet då konceptet införs. Six Sigma är hierarkiskt uppbyggt, vid introduceringen utbildas därför personal i olika roller. I figur 6 visas den hierarkiska pyramiden. Champion arbetar heltid och har huvudansvaret för att utveckla personalen i förbättringsarbete. Under Champion

fördelas ansvaret ut ända ner till lägsta rankingen White Belt. På denna nivå handlar arbetet om införandet av Six Sigma i vardagen [14].



Figur 6. Six Sigma hierarkin beskriven i en pyramid

Six Sigma har skördat framgångar på marknaden eftersom den visar positivt resultat snabbt, i flera fall redan efter ett år. När företagen ser att konceptet fungerar kan implementeringen och det långsiktiga arbetet börja på allvar [14].

Konceptet har trots sin framgång fått utstå kritik. Joseph M. Juran som anses vara en guru inom kvalitetsutvecklingen ser ingenting nyskapande i Six sigma utan anser att det bara är ett nytt namn på en redan använd metod [16]. Brister i konceptet är svårigheter att förstå och applicera det statistiska systemet och skapa en jämn kunskapsnivå i de olika rollerna [17]. En annan brist är att vikten på olika fel och defekter klassas lika. En försenade leveranser skulle kunna vara ett vykort, men det skulle också kunna vara en direkt nödvändig detalj för att produktionen skall fungera.

I framtiden tror forskarna att förbättringsprogrammen på företagen kommer sammanföra det bästa från Six Sigma och Lean. Den största skillnaden idag mellan programmen är att Lean inte består av samma hierarki och låter anställda nära produktion ta ett större ansvar. Framtiden kommer förmodligen ha större fokus på miljön, därför kommer de redan existerande miljövinster i programmen lyftas fram. Forskare kallar det nya programmet "Green Lean Sigma" [18].

3.5 Matematisk statistik

För att motivera beslut behövs statistiskt underlag. Genom matematiska formler kan statistiken på ett tydligt sätt beskriva sannolikheten för att något skall inträffa. I detta avsnitt presenteras teori för de beräkningar resultatet är baserade på.

3.5.1 Standardavvikelse

Spridningsmättet standardavvikelse är ett mått på avvikelser från medelvärdet (\bar{x}). Ligger värdena (x) spridda långt ifrån medelvärdet så blir standardavvikelsens värde (σ_s) högt, ligger de samlade nära erhålls ett lågt värde. Standardavvikelse kan beskrivas genom kvadratroten ur variansen. Då avvikelser från medelvärdet kvadreras gör det formeln känslig för enstaka värden som ligger långt ifrån medel. I vissa fall kan dessa avvikande fall strykas för att ge en mer rättvis bild. Formlerna för framräkning av standardavvikelsen presenteras nedan [19].

Standardavvikelse:

$$\sigma_s = \sqrt{\text{Var}(X)} = \sqrt{n * \sigma}$$

Variansen:

$$\text{Var}(X) = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Medelvärde:

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}$$

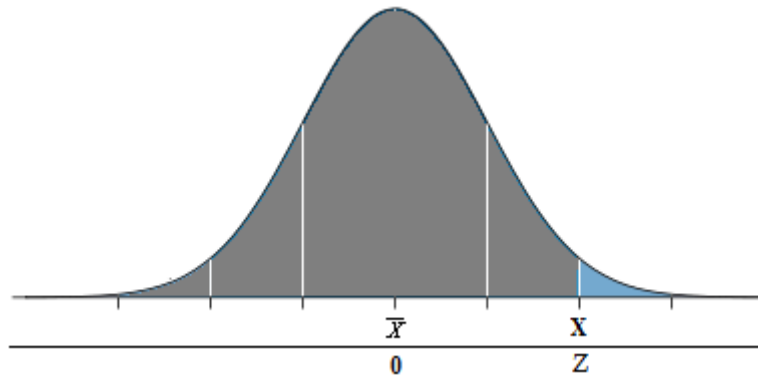
3.5.2 Konfidensintervall och normalfördelning

Då medelvärde på stora stickprov beräknas blir resultatet ungefär normalfördelat oavsett populationens fördelning. Stickprovets storlek bör överstiga 25-30 undersökningar för att den centrala gränsvärdessatsen skall gälla. När stickproven ökar blir fördelningen mer lik en normalfördelningskurva. Kurvan kan även skapas med en mindre stickprovsstorlek förutsatt att stickprovet visar på en normalfördelning.

På en normalfördelningskurva kan konfidensintervallet beräknas med den standardiserade normalfördelade variabeln Z. En normalfördelning kan omvandlas till en standardiserad normalfördelning genom variabeln (se figur 7). Z beskrivs som skillnaden mellan medelvärde och uppmätt värde dividerat med standardavvikelsen.

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

Då konfidensintervallets maxvärde (X) skall beräknas kan Z värde från tabell för normalfördelning användas. Tabellvärdet väljs baserat på hur stor del av normalfördelningskurvan man vill att konfidensintervallet skall täcka. Tillsammans med det framräknade medelvärdet (\bar{X}) och standaravvikelsen (σ) åkors därefter maxvärdet (X) fram. [19]



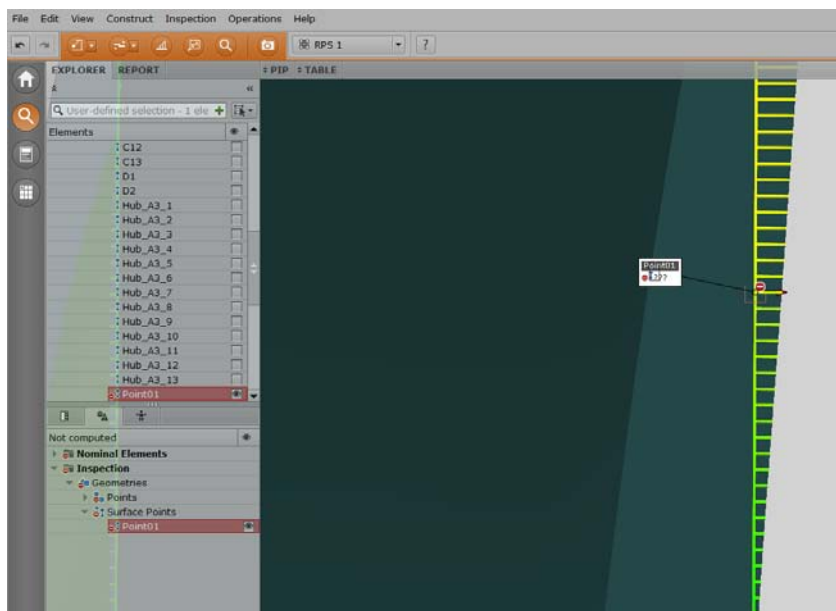
Figur 7. Omvandling från normalfördelning till standardiserad normalfördelning

3.6 GOM-inspect

GOM står för "Gesellschaft für Optische Messtechnik" och är ett optiskt mätprogram för tredimensionell koordinat- och deformationsmätning av komponenter. Mätssystemet bygger på digital bildbehandling där detaljen skannas in och jämförs mot ursprunglig cad-geometri. Programmet används i olika tillämpningar inklusive kvalitetssäkring, produktutveckling, material- och komponenttestning [20].

Genom att utnyttja olika färger för avvikelserna förenklar programmet den visuella tolkningen av rörelsen för användaren. Med hjälp av utsatta punkter och linjer kan skillnaden från nominell geometri mätas. Alla redskap för att kunna utföra en fullständig avvikelseanalys finns tillgängliga. Figur 8 visar hur ett snitts avvikelser kan visualiseras i GOM-inspect. Den solida vertikala linjen beskriver ursprunglig geometri, de horisontella linjerna beskriver avvikelserna mot den skannade detaljen. Ett värde skapas genom att placera ut en punkt på ursprunglig geometri och genom programmet mäta sträckan mot skannad geometri.

GOM-inspect anger en mätnoggrannhet på $\pm 0,025$ mm. Volvo Aero använder inte denna tolerans utan på grund av mätosäkerhetsförhållande tillämpas $\pm 0,25$ mm.



Figur 8. Snitt av skannad detalj i GOM-inspect

4 Processbeskrivning

Denna del är en beskrivning av tillverkningsprocessen av GP 7000 . Tillsamman med bilaga A skall avsnittet förmedla en grundläggande kunskap till läsaren angående var P-flänsen kan tänka påverkas i processen.

Den cirkulära TEC'n består av tretton hopsvetsade sektorer. Tillverkningsprocessen påbörjas genom frambearbetning av sektorerna utifrån inköpt material. De anpassas till varandra och punktsvetsas (häftas) samman. Genom TIG-svetsning länkas sektorerna ihop. Detaljen balanseras och anpassas mot P-flänsen, som i sin tur TIG-svetsas fast. Därefter planas yttersidorna (se bilaga A) av P-flänsen. Operationen utförs eftersom yttersidan fungerar som styrdiameter, medan ovansidan används för att skapa en plan yta att ligga på inför nästa operation. Följande operation är TIG-svetsning av T-flänsarna (inre & yttre) på motsvarande sida.

Då dessa steg verkställts genomförs värmebehandling följt av skanning och mätning av detaljen. Grovsvarning av flänsarna genomförs innan färdigbearbetad geometri för flänsarna finsvarvas fram. Hela detaljen blåstras innan slutkontrollen utförs.

TIG-svetsningen utförs genom robotsvetsning där tillsatsmaterial används, skyddsgasen är argon. Värmebehandlingen sker genom processen utskiljningshärdning vilket beskrivs mer ingående i teoridelen.

5 Datainsamling/mätningar

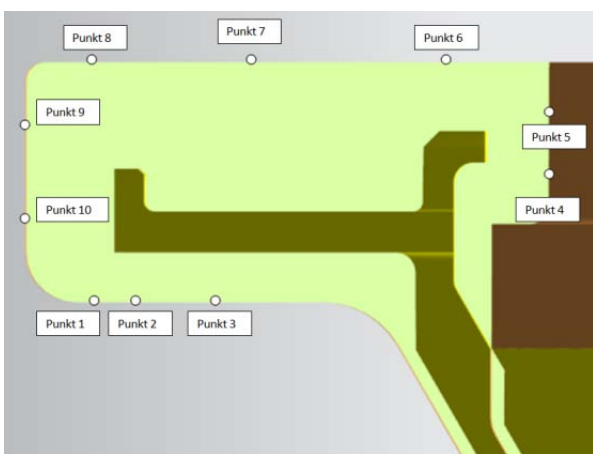
I detta avsnitt beskrivs hur mätningar och datainsamling utförts. Delen skall bilda en förståelse för hur resultatet framkommit. Avsnittet underlättar för framtida arbeten med liknande utförande.

5.1 Mätningar

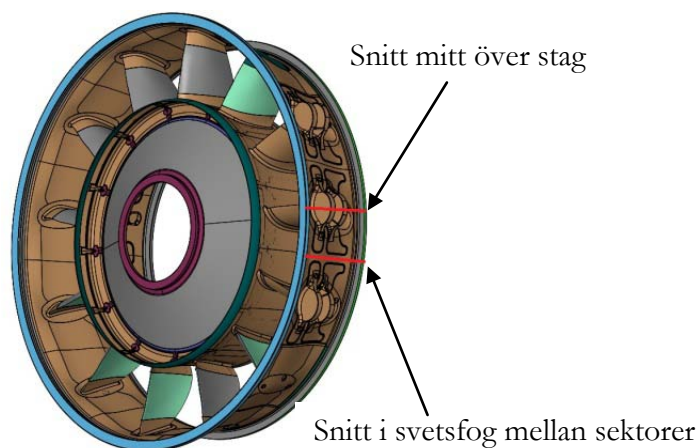
Mätdata har framtagits genom att mäta avvikelser från punkter utplacerade på nominell geometri i förhållande till inskannade TEC'ar formade av tillverkningsprocessen. Analysprogrammet GOM-inspect användes för uppgiften. Genom tio punkter per snitt och åtta snitt per detalj granskades tjugo detaljer (TEC'ar).

Punkterna är utsatta enligt figur 9. Genom att undvika placering av punkter vid radier skapades en korrekt rörelsebild och vinkelberäkningar mellan punkter kunde utföras. Punkterna i första snittet placerades ut för hand, i de resterande sju snitten användes vinkelberäkning för att behålla en standardiserad placering i alla snitt (Se bilaga C). Genom dessa beräkningar kunde punkter och snitt exporteras till andra detaljer på ett standardiserat sätt.

Snitten är symmetriskt fördelade, hälften över stagen och hälften över svetsfogen mellan sektorerna (se figur 10). Dessa placeringar användes eftersom de på förhand antogs beskriva detaljens extremavvikelser. Antagandet byggde på att svetsfogen mellan sektorerna hade störst påverkan på materialet, därför borde extremvärdena finnas så nära och så långt bort som möjligt.



Figur 9. Placering av punkter



Figur 10. Placering av snitt.

5.2 Datalagring

Punktavvikelser och längdmått från GOM-mätningarna lagrades i Excel. Mallen i tabell 5.2.1 har använts på varje detalj då värdena förts in. Innehållet i tabellen består av punktavvikelser från nominell geometri, avstånd mellan punkterna samt vinklar. Vinklarna beräknades genom att använda arctangens på höjderna mellan punkter dividerat på deras avstånd till varandra.

Assy 20										
Snitt\Punkt (mm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										

Dis 1-3	Dis 4-5	Dis 6-8	Dis 9-10	Vinkel 1-3(°)	Vinkel 4-5(°)	Vinkel 6-8(°)	Vinkel 9-10(°)
12,2227	4,87	27,7881	8,58	0	0	0	0
12,2202	4,87	27,7907	8,58	0	0	0	0
12,2153	4,87	27,7879	8,58	0	0	0	0
12,221	4,87	27,7911	8,58	0	0	0	0
12,221	4,87	27,7899	8,58	0	0	0	0
12,2202	4,87	27,7921	8,58	0	0	0	0
12,2153	4,87	27,7874	8,58	0	0	0	0
12,221	4,87	27,7911	8,58	0	0	0	0

Tabell 5.2.1 Mall för datalagring i Excel.

6 Resultat

För att tillgodose Volvo Aeros behov av en slimmad P-flänsgeometri har två nya förslag tagits fram. Första förslaget är baserat på en vinkling, det andra förslaget grundas på punktavvikelser. Syftet med arbetet var att förstå flänsrörelsen, därför har även karläggning av denna utförts. Förutom de nämnda resultaten kommer även processtabilitet och kostnadsbesparingar redovisas.

6.1 Förslag 1

Förslaget ett handlar om att kompensera flänsens vinkling. Detta förslag reducerar inget material utan kräver en till analys efter införandet innan material kan avverkas. Grundat på analysen skall smidet köpas in med en vinkel. Processutfallet kommer sedan att granskas i en ny analys och utifrån resultatet kan en ny slimmad flänsgeometri skapas.

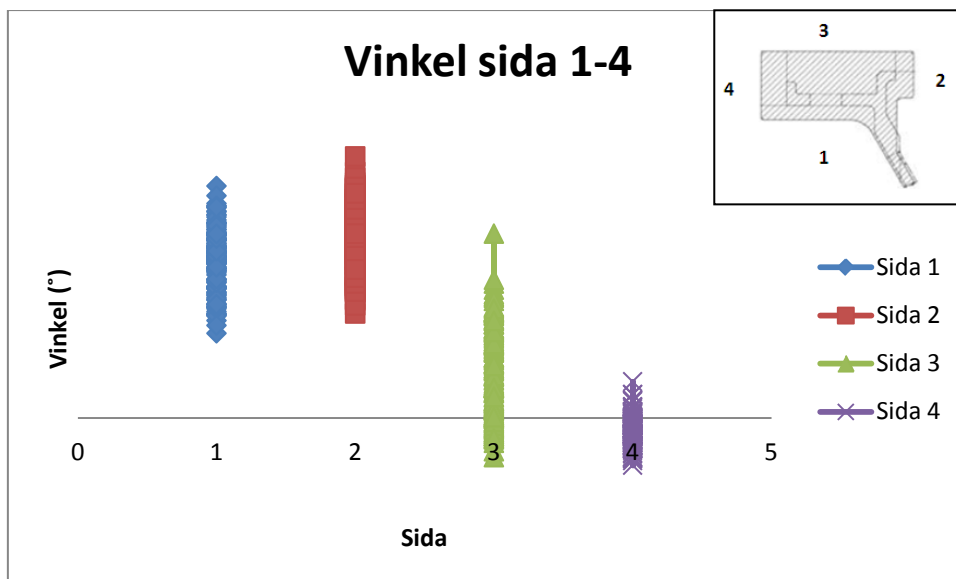
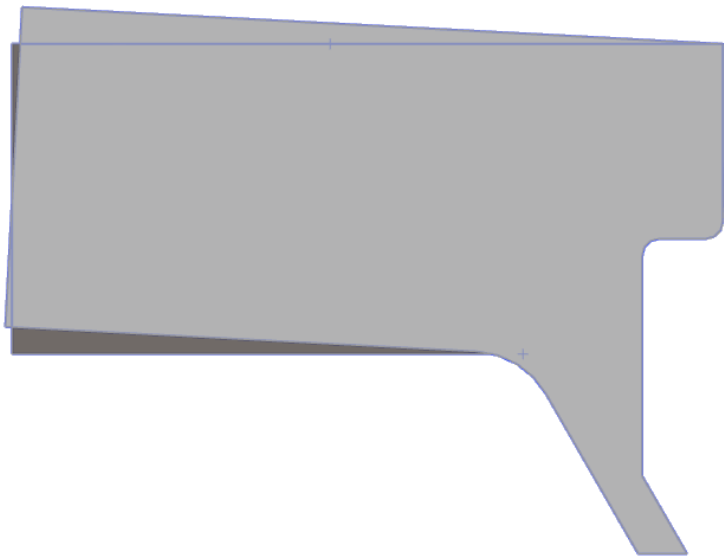


Diagram 6.1.1. Vinkel skapad genom processen för de fyra olika sidorna

Ur diagrammet kan utläsas att sidorna ett och två har störst vinkel. Båda sidorna är obearbetade innan analysen, alltså beskrivs både svetsningen och värmebehandlings påverkan. Sida tre ger ingen värdefull information eftersom sidan är delvis planad efter svetsning. Sida fyra som planas helt efter svetsningen (se bilaga A) och innan värmebehandlingen indikerar på väldigt liten vinkling. Detta resonemang visar på att TIG-svetsningen orsakar flänsens vinkel.

Den nya smidesgeometrin grundas på att kompensera medelvinklingen för sidorna ett och två. En symmetrisk vinkel på hela detaljen har skapats baserat på att vinkel ett och två är beroende av varandra (se bilaga D). I figur 11 jämförs förslaget på en vinklad flänsgeometri mot nuvarande.



Figur 11. Vinklat smide jämfört mot nuvarande smide

6.2 Förslag 2

Förslag två utgår från punkternas rörelser och ger ett konkret och säkerställt resultat på hur mycket material som kan avverkas direkt.

Diagram 6.2.1 visar på inom vilket spann punkterna rör sig mellan. I diagrammet kan tydligt ses att punktavvikelseernas medelvärde skiljer sig från varandra. En stor spridning för avvikelserna kan även avläsas. Linjerna visar gränserna som med fyra sigma i säkerhet (se tabell 3.4.1 i teoridelen) är framräknade.

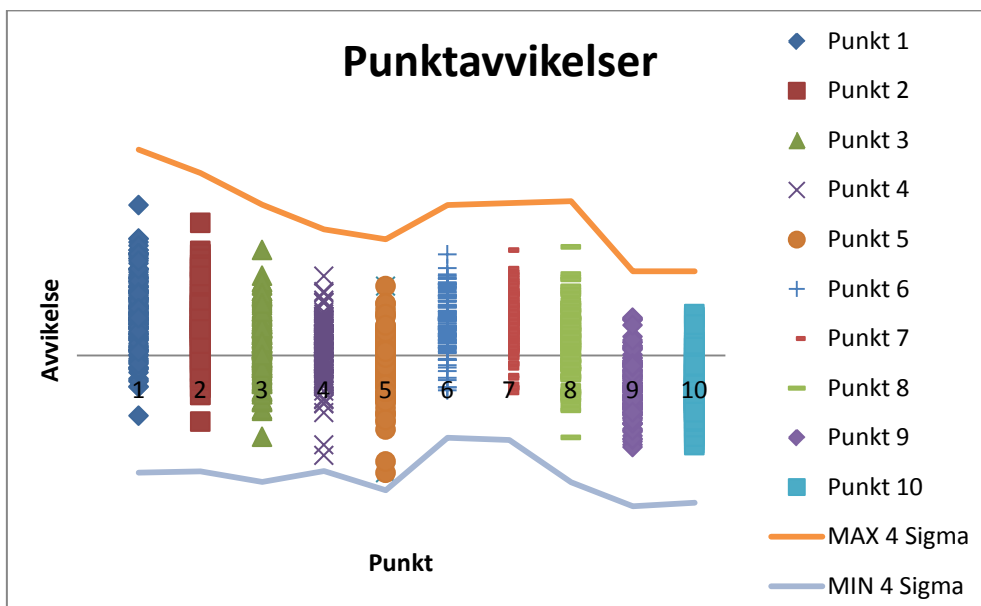
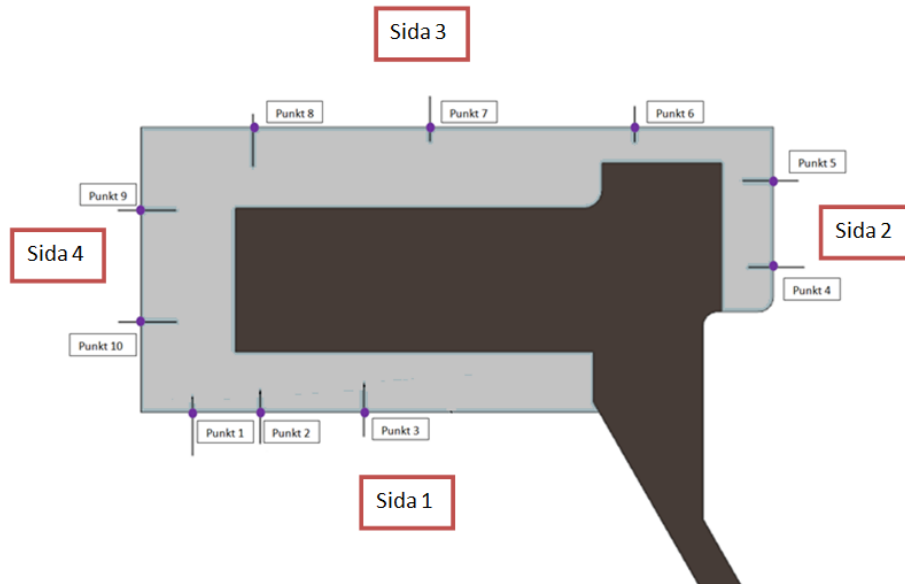


Diagram 6.2.1 Punkternas spridning och framräknat säkerhetsintervall (fyra sigma)

En CAD-modell skapades för att visualisera diagrammet och se hur mycket material som finns kvar mot geometrin efter grovbearbetning. Figur 12 visar flänsen rörelse samt var möjligheter till att minska geometrin finns.



Figur 12. Exempel på punkternas rörelse utifrån diagram och beräkningar i Excel

Baserad på punktavvikelse har en ny flänsgeometri räknats fram. Konfidensintervall med normalfördelning kunde räknas på varje punkt eftersom punktavvikelse bildade normalfördelningskurvor (se diagram 6.2.2). Intervallet räknades fram med fyra sigma i säkerhet. Formeln för uträkningen finns beskriven i teoridelen.

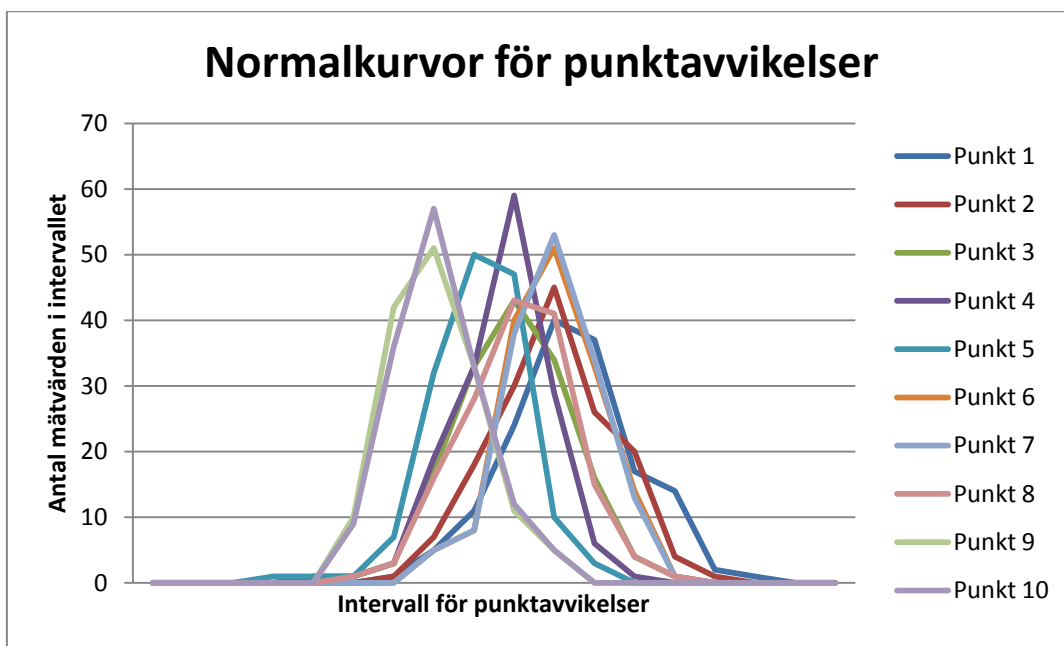


Diagram 6.2.2 Normalfördelningskurvor för punktavvikelse

Den nya smidesgeometrin presenteras i figur 13. Förutom det framräknade konfidensintervallet har hänsyn till toleransen för GOM-inspect på $\pm 0,25$ mm tagits genom att addera/subtrahera värdet på de framräknade gränserna.



Figur 13. Nominell geometri jämfört med ny geometri och grovsvärning

Bilden beskriver tre olika geometrier:

- Nominell geometri – Smidesstorleken för P-flänsen Volvo Aero köper in idag. (Röd+ Grå+ Mörk)
- Ny geometri – Lämplig Smidesstorlek framräknad på utförd analys. (Mörk+ Grå)
- Geometri efter grovsvärning – Inköpt smidesstorlek skall genom hela processen alltid vara större än denna. (Mörk)

6.3 Processtabilitet

Genom att beräkna standardavvikelsen kunde punktavvikelseernas spridning för varje analyserad detalj studeras. Spridningen ger en uppfattning om hur stabil processen är. Indikationer på att tillverkningsprocessen blir stabilare är om spridningen minskar alternativt är konstant för samtliga detaljer. I Diagram 6.3.1

är detaljerna placerade i en fallande ordning, det vill säga att först tillverkad detalj är till vänster och den senaste till höger. De utvecklingstendenser som söks i detta diagram är att spridningen minskar (grön) eller blir konstant (röd) för varje detalj.

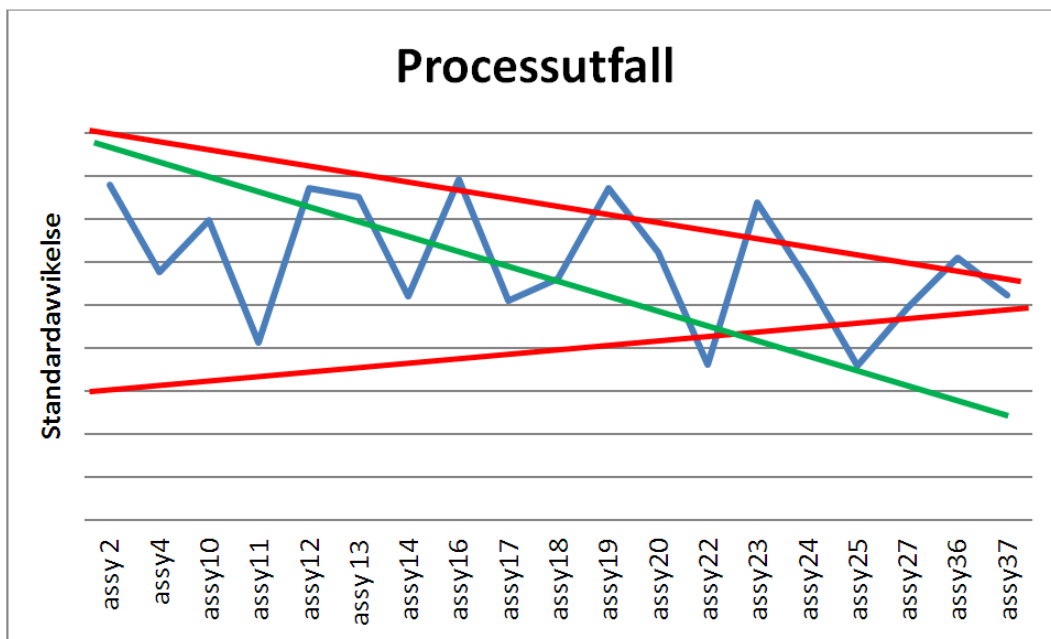


Diagram 6.3.1. *Undersökning för om processen blir stabilare med tiden*

Standardavvikelsen visar en stor variation mellan detaljerna. Generellt är det svårt att se att processen fått ett stabilare utfall.

7 Analys/ Slutsatser

Genom analys av punktavvikelser, utbyte av processkunskap samt egna iakttagelser har slutsatser för flänsens rörelse framtagits. I analysen användes mätprogrammet GOM-Inspect på Volvo Aeros önskemål. Innan undersökningen ansågs värmebehandling och svetsning som troliga faktorer för flänsens rörelse. Detta på grund av att de är de enda operationerna där detaljen utsätts för en så hög värme att betydande rörelse kan uppstå.

För att få fram information om flänsens rörelse analyserades vinklingen av sidorna samt punkternas avvikelser. Eftersom sista fyra planas helt innan värmebehandling och inte visar någon märkbar vinkling avfärdas lutningens uppkomst därifrån. De obearbetade sidorna ett och två visar på konstant vinkling och lutningen härleds därför till TIG-svetsningen. En förklaring kan vara att svetsfogen drar ihop sig under operationen och på så vis vinklar flänsen. Volvo Aero har sedan tidigare fastställt och kompenserat för att detaljen krymper i värmebehandlingen. Värmebehandlingen verkar krympa symmetriskt och har ingen direkt påverkan för vinklingen.

Från resultatet har även tillverkningsprocessens utveckling granskats. Stor variation i processutfallet beror troligen på att processen är nystartad och behöver tid för att bli stabil. Om en djupare granskning för varje TEC utförts och detaljer som inte är representativa för tillverkningsprocessen tagits bort skulle en rättvisare bild för processutfallet skapats. I en sådan undersökning förklaras förmodligen varför ett fåtal punktavvikelser hamnar nära fyra sigma gränsen i resultatet.

Analysen skulle från början baseras på tjugofem detaljer. Ett bortfall orsakades av att fem TEC'ar inte kunde analyseras i mätprogrammet. Om fler detaljer ingått i analysen hade ett mer korrekt konfidensintervall kunnat räknas fram och smidet fått en mer optimerad storlek.

Två förslag för optimering av P-flänsen har framförts till Volvo Aero. För att åtgärda vinklingen uppkom förslag på att köpa in tiltade flänssmidan. Genom den nya formen skulle deformationen som svetsningen orsakar kompenseras. Förslaget skulle möjliggöra mer reducering av material efter dess införande då vinkelns tyngdpunkt (medelvärde) blir närmare noll grader efter deformation från svetsning och värmepåverkan. Införandet kan ses som ett första steg mot optimerat flänssmide, där nästa steg blir att reducera material efter analys av utfallet. Utifrån den vinklade geometrin skulle en form likt den efter grovsvarvningensoperationen kunna införas. Om införandet lyckas finns möjligheten att en hel operation (grovsvävning) skulle kunna tas bort på längre sikt. Fler studier efter införandet krävs dock för att säkerställa att vinkeln har fått beräknad effekt och kompenserat deformationen från påverkande operationer.

Det framlades även förslag på en ny flänsgeometri baserat på punkternas rörelseintervall. Förslaget är baserat på beräkningar utifrån normalfördelningskurvor på de uppmätta punktavvikelserna. För att skapa ett mer slimmat smide har geometrin ”figursyfts” mot formen efter grovsvarvningen. Förslaget är säkerställt med fyra sigma och leder till snabba besparingar då material går att avverka direkt från flänssmidet. En negativ aspekt är att vid ytterligare förbättringar så behöver flänsens lutning åtgärdas vilket kan bli svårt att utföra utan att återgå till föregående geometri. Huruvida rörelsen ändras vid införandet av reducerat material går inte att fastställa utan efterföljande analyser. Marginalerna för de beräknade gränserna anses vara tillräckligt stor för att täcka denna förändring.

Vinklingsförslaget kombineras inte med förslaget att reducera material utifrån punktavvikelserna eftersom säkerhetsberäkningar med ändringar av två samverkande parametrar (punkter, vinklar) som båda tas hänsyn till inte ger bra underlag. Analysen av resultatet blir även svårtolkat om två förbättringsåtgärder utförs i ett steg. Om utfallet inte blir som beräknat så kan orsaken bli svårt att härleda till vinklingen eller reduceringen av material.

Det förslag som rekommenderas för Volvo Aero baseras på att detaljen är i uppstartningsfasen och kommer att produceras under lång tid. För att få ett så slimmat smide som möjligt behöver vinkeln som uppstår i svetsningen åtgärdas. Genomförs förslaget om att reducera materialet direkt kan det bli svårt att införa ett lutat smide utan att gå tillbaks till ursprunglig geometri. Vinklingsförslaget rekommenderas därför som första steg mot slimmat smide.

Kostnadsbesparingarna vid ett lyckat införande av förslag ett skulle bli betydligt större än för förslag två. Dels eftersom mer material kan reduceras, men störst besparing skulle erhållas om en operation kan elimineras i tillverkningen. Genom att eliminera en operation kan betydande besparingar i verktygsförslitning, maskinanvändning, operatörslöner och transporter göras. Dessutom kortas ledtiden betydligt vilket minskar kapitalbindning i tillverkningen och möjliggör snabbare leveranser till kund.

Genom ett slimmat smide minskas inte bara kostnaderna, flera miljövinster finns också. Med ett mindre smide behöver mindre material avverkas i tillverkningen, detta leder bland annat till mindre maskintid och mindre spill. Genom ett lättare smide minskas också miljöpåverkan när produkten transporteras från leverantören i Tyskland. Dessa miljövinster kan tyckas marginella när bara en detalj granskas, men då produktionen skall pågå i cirka 30 år minskas miljöpåverkan på lång sikt.

8 Framtida arbete

Då tillverkning av detaljen är i uppstartningsfasen finns markanta möjligheter för optimering att påverka processens lönsamhet på lång sikt. Analys av P-flänsen efter införandet av den nya geometrin tillsammans med de nyutvunna processkunskaperna skulle kunna slimma smidet än mer. Det tidigare presenterade förslaget om vinklade smiden kan vara en del av geometrin skapad av en andra analys.

Volvo Aero bör även överväga att analysera de resterande flänsarna på GP 7000 TEC. Tillvägagångssättet för analysen av P-flänsen kan appliceras på och underlätta granskningen av de andra.

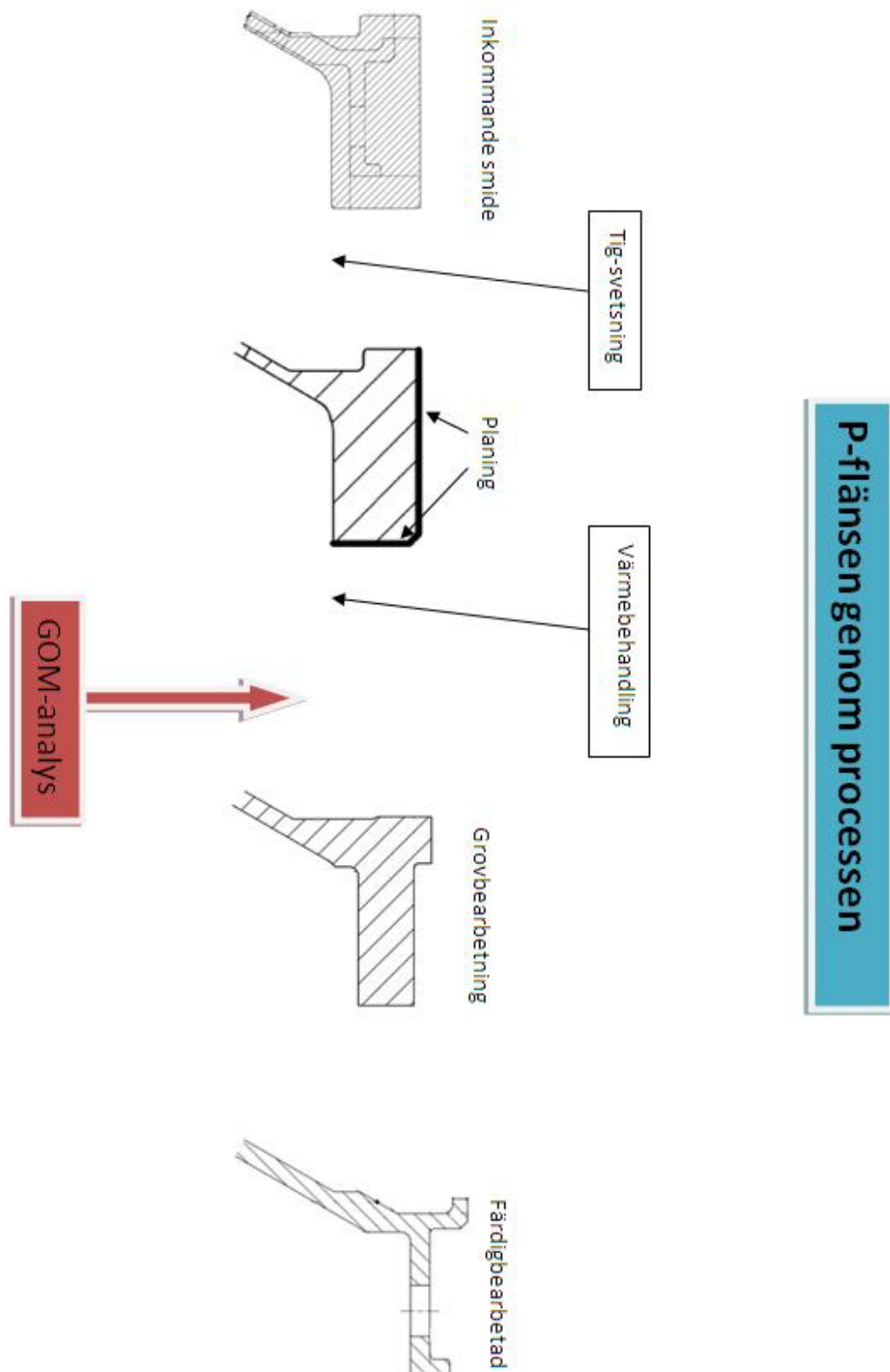
Volvo Aero är idag ett av de världsledande företagen inom utveckling och tillverkning av TEC'ar. Detta betyder att företaget med all sannolikhet kommer tilldelas flera projekt inom området i framtiden. Detta arbete tillsammans med andra kan användas som förstudier och på så vis utgöra en grund då smiden till nya TEC'ar utvecklas.

Källförteckning

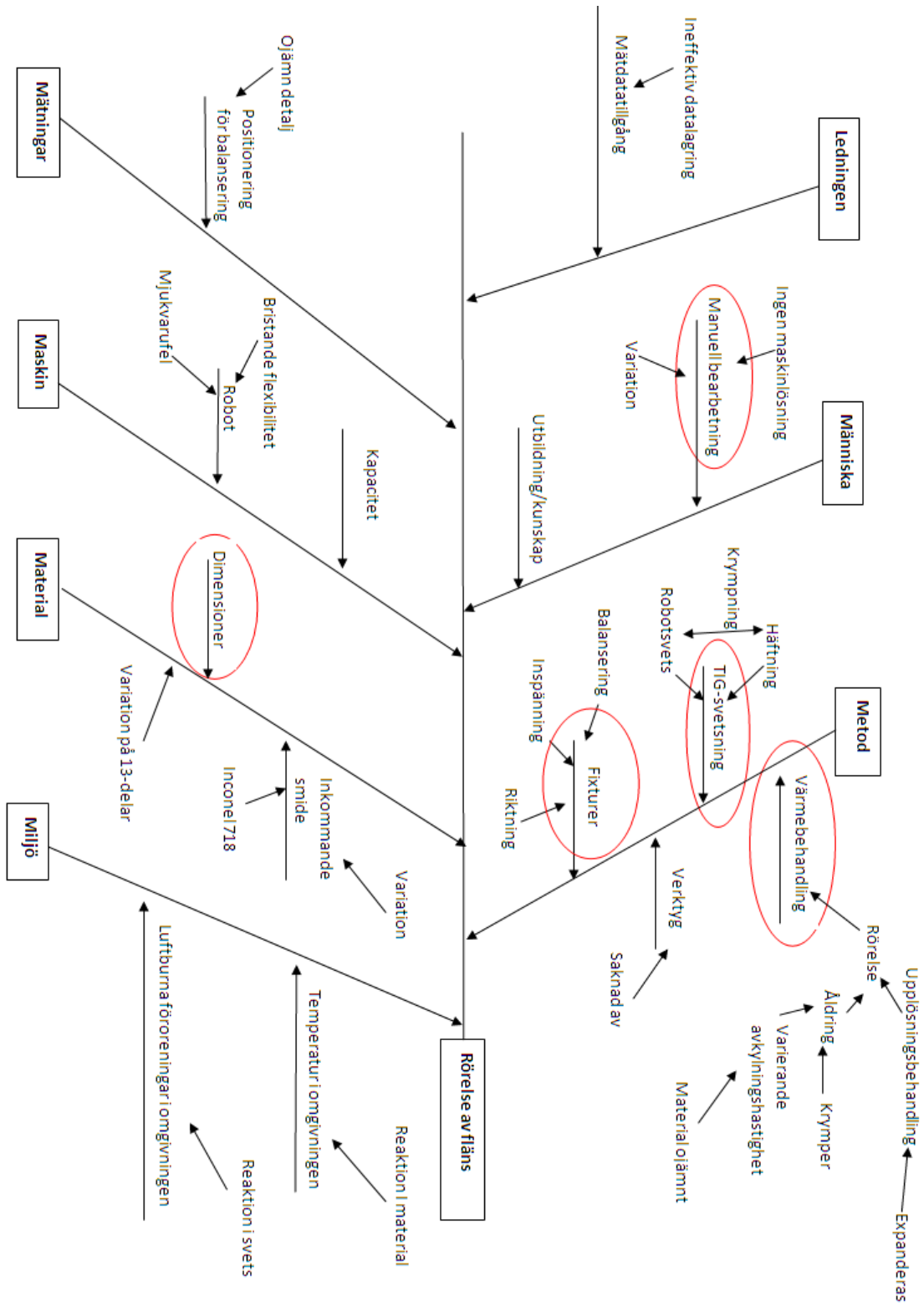
1. Volvo Aeros intranet (2012). *Key facts*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: http://violin.volvo.net/violinaero/corporate/en/org/about_volvo_aero/key_facts/Pages/key_facts.aspx [2012-04-25]
2. Volvo Aero. *Om Volvo Aero*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: <http://www.volvoaero.com/VOLVOAERO/SE/SV-SE/ABOUTUS/Pages/Our%20Company.aspx> [2012-03-27]
3. Volvo. Volvo Aero (2012) – *Förbättrad lönsamhet*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: <http://www3.volvo.com/investors/finrep/ar11/sv/aero/inledning.html> [2012-04-25]
4. Volvo Aero. *Våra kärnvärden*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: <http://www.volvoaero.com/VOLVOAERO/SE/SV-SE/ABOUTUS/CORPORATE%20VALUES/Pages/Corporate%20values.aspx> [2012-04-25]
5. Scopus (2010). *Casting superalloys for structural applications*. [Elektroniskt]. Tillgänglig via: <http://www.scopus.com> [2012-04-02]
6. Azom (2008). *Inconel 718 – Composition, Properties and Applications of Inconel 718 Nickel-Chromium Alloy by Alloy*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=4198> [2012-04-25]
7. Ullman, Erik (2008). *Materiallära*, s. 46-48. Utgåva 14. Liber
8. Azadian, Wei, Warren (2011). *Delta phase precipitation in Inconel718*. [Elektroniskt]. Malmö University. Tillgänglig: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.server.hv.se/science/article/pii/S1044580304001603> [2012-05-15]
9. Jarfors, Carlsson, Eliasson, Keife, Nicolescu, Rundqvist, Bejhem, Sandberg (2010). *Tillverkningsteknologi*, s. 410. Lund: Studentlitteratur
10. Svetsarätt. *Om svetsmetoder*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: <http://www.svetsaratt.se/node/219> [2012-04-24]
11. Svetskommissionen. *TIG-svetsning*. [Elektroniskt]. Svets. Tillgänglig: <http://www.svets.se/tekniskinfo/svetsning/metoder/tigsvetsning.4.ec944110677af1e8380009945.html> [2012-04-25]
12. Bohnart, Edward R (2002). *TIG handbook for GTAW gas tungsten arc welding*. [Elektroniskt]. Millerwelds. Chapter1. Tillgänglig:

- http://www.millerwelds.com/resources/TIGhandbook/pdf/TIGBook_Chpt1.pdf [2012-04-24]
13. Bohnart, Edward R (2002). *TIG handbook for GTAW gas tungsten arc welding*. [Elektroniskt]. Millerwelds. Chapter4. Tillgänglig: http://www.millerwelds.com/resources/TIGhandbook/pdf/TIGBook_Chpt4.pdf [2012-04-24]
 14. Bergman, Klefsjö (2010). *Quality- from Customer Needs to Customer Satisfaction*, s.567-580. Lund: Studentlitteratur AB.
 15. 6Six Sigma. *What is Six Sigma?* [Elektroniskt]. Tillgänglig: <http://6sixsigma.com/index.php/What-is-Six-Sigma.html> [2012-04-25]
 16. Paton, Scott M. *Juran: A Lifetime of Quality – An exclusive interview with a quality legend*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: http://www.qualitydigest.com/aug02/articles/01_article.shtml [2012-04-25]
 17. Nave, Dave (2002). *How To Compare Six Sigma, Lean and the Theory of Constraints*. [Elektroniskt], Karlin.sdsmt.edu. Tillgänglig: http://karlin.sdsmt.edu/OpStrat/Supplementary_Material/Six%20Sigma%20Lean%20and%20TOC.pdf [2012-04-24]
 18. Jiju, Anthony & Maneesh, Kumar (2011). *Lean Six Sigma: Research and Practise*. [Elektroniskt]. Marshallsuniversity.edu.gh. sid.42. Tillgänglig: <http://marshallsuniversity.edu.gh/marshallsuniversity/directory/gallery/ebooks/LEAN%20SIX%20SIGMA%20RESEARCH%20AND%20PRACTICE%20.pdf> [2012-05-03]
 19. Körner & Wahlgren (2006). *Statistisk dataanalys*, s. 80, 120. Upplaga 4. Studentlitteratur
 20. GOM-Optical Measuring Techniques (2012). *Metrology Systems*. [Elektroniskt]. Tillgänglig: <http://www.gom.com/metrology-systems.html>[2012-05-15]

A. Bearbetningsstegen



B. Fishbone diagram



C. Koordinatberäkning för punkt 1

- Givet:**
- X är konstant då punkten alltid befinner sig på samma höjd i denna ledd.
 - Vinkeln för snitten är placerad för att skapa 4 snitt på stagen och fyra snitt mellan sektorerna.
 - Radien är beräknad genom Pythagorassats från de egenplacerade punkterna i snitt 1

Beräkningar:

Snitt 1 = Egen placering

Snitt 2: $Y = ((\text{Radien punkt 1})^2 - (\text{Z-värde Snitt 2})^2)$

$Z = \text{SIN}(\text{vinkeln för snitt 2}) * \text{Radien punkt 1}$

Snitt 3: $Y = ((\text{Radien punkt 1})^2 - (\text{Z-värde Snitt 3})^2)$

$Z = \text{SIN}(\text{vinkeln för snitt 3}) * \text{Radien punkt 1}$

Beräkning upprepar sig för snitt fyra-åtta.

Tabellen nedan visar hur koordinatdata för punkt 1 till de olika snitten lagrades.

Punkt-uträkning				
Radien punkt 1	885,502			
X för punkt1	7363,9468			
Snitt 1			Snitt 5	
Y-värde	314		Z-Värde	-314,041
Z-värde	827,96		Y-Värde	-827,944
Snitt 2			Snitt 6	
Y-värde	784,0838		Z-Värde	-784,084
Z-värde	411,4928		Y-Värde	-411,493
Snitt 3			Snitt 7	
Y-värde	859,7743		Z-Värde	-859,774
Z-värde	-211,901		Y-Värde	211,9006
Snitt 4			Snitt 8	
Y-värde	503,0018		Z-Värde	-503,002
Z-värde	-728,768		Y-Värde	728,7681
Snitt	1	2	3	4
SIN(Vinkel)	0,935	0,4647	-0,2393	-0,823
Snitt	5	6	7	8
SIN(Vinkel)	-0,935	-0,4647	0,2393	0,823

D. Vinkel för sida 1 och 2

