

CHALMERS



Konceptframtagning för 2D-laserskärare

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammen Elektroingenjör och Maskiningenjör

Alexander Häggner

Sebastian Forssén

Institutionen för signaler och system
Avdelningen för reglerteknik, automation och mekatronik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2013

Förord

Följande rapport är en beskrivning av examensarbetet utfört åt Stjernberg Automation och omfattar totalt 15 högskolepoäng. Manne Stenberg har varit examinator åt projektet och Morgan Osbeck har varit handledare.

Ett stort tack vill vi ge till samtliga på Stjernberg Automation som gav oss möjligheten till att utföra detta projekt. Ett extra stort tack går till Gunilla Larsson som har varit vår kontaktperson på företaget och behövt stå ut med oss under de gångna veckorna. Vi skulle också vilja tacka Per Ekner på FANUC för hjälp och rekommendationer och information.

Ett tack skickas också till Morgan Osbeck för det teoretiska kunnandet om beräkningar för olika motorer som han delat med sig av.

Alexander Häggner

Sebastian Forssén

Göteborg 2013-02-26

Sammanfattning

Syftet med följande rapport är att undersöka möjligheten att konstruera laserskärare utifrån ett antal förbestämda krav om hastighet, acceleration och precision. För att göra detta undersöks olika lösningsmöjligheter samt de olika ingående komponenterna som behövs. Rapporten innefattar även en undersökning om olika material som skulle kunna vara väl lämpade till konstruktionen, samt teoretiska beräkningar för krafter och moment som krävs för acceleration utgående från en referensprodukt. Utöver det så presenteras även program skrivna för att enkelt utföra beräkning av kvadratisk medelvärde på kraft och vridmoment beroende på den förflyttade massan för att snabbt kunna utföra nya beräkningar om så önskas. Som resultat presenteras ett antal olika möjliga konceptlösningar som vägs mot varandra med hjälp av en urvalsmatris för att slutligen komma fram till den mest lämpliga lösningen.

Summary

The purpose of the following report is to examine the possibility of constructing a laser cutter from a number of predetermined requirements for speed, acceleration and precision. To do this a number of possible solutions are explored as well as the components needed for each possible solution. The report also includes a survey of different materials that could be well suited to the design, and theoretical calculations of the forces and torque required for acceleration, based on a reference product. Programs were also constructed in Matlab to easily perform calculations of the RMS value of power and torque depending on the load. The programs were written in such a way that they could quickly be changed depending on the variables. As a final result, a number of different possible conceptual solutions were conceived that were weighed against each other using a selection matrix to finally arrive at the most appropriate solution.

Innehållsförteckning

1. Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	1
1.4 Precisering av frågeställning	1
2. Metod	2
3. Tidsplan	2
4. Teknisk Bakgrund	3
5. Grundkoncept	5
6. Koncept för vidare undersökning	9
7. Metodik för val av motorer	9
8. Materialval	11
9. Teoretiska beräkningar	14
9.1 Rörelse utförd med linjärmotor	14
9.2 Rörelse utförd med kulskriv	14
9.3 Beräkning av kvadratisk medelvärde	15
10. Koncept XY-bord med linjärmotorer	20
10.1 Linjärmotoralternativ FANUC	20
10.2 Linjärmotoralternativ Bosch Rexroth	21
10.3 Areakrav	21
10.4 Linjär encoder	22
10.5 Servoförstärkare och styrsystem	22
10.6 Skenstyrning	22
11. Koncept XY-bord med kulskrivar	24
11.1 Konceptalternativ, Bosch Rexroth	24
11.2 Areakrav	25
11.3 Linjär Encoder	26
11.4 Servoförstärkare och styrning	26
11.5 Skenstyrning	26
12. Länkarmsrobot	27
12.1 Analys av robotkoncept	27

12.1.1 Fördelar	27
12.1.2 Nackdelar.....	28
13. Icke fungerande koncept.....	28
14. Interface	28
15. Slutgiltigt urval.....	29
15.1 Pughs matris	29
16. Resultat.....	31
17. Slutsats	31
Referenser	I
Bilagor.....	II
Bilaga 1: Matlabprogram för kulskruv.....	II
Bilaga 2: Matlabprogram för linjärmotor	VI
Bilaga 3: Pughs matris	IX
Bilaga 4: Referensprodukt med mått.	X

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Stjernberg Automation AB (SA) tillverkar maskiner för industrin och framför allt maskiner för någon form av laserbearbetning, till exempel skärande bearbetning, märkning, svetsning och liknande. Idag köper företaget in vissa maskiner av underleverantörer, vilket gör att man blir beroende av deras leveransförmåga och service och därför vill SA skaffa sig kompetens att själv bygga maskiner som man levererar till kund.

1.2 Syfte

Arbetet syftar till att ta fram idéer till ett antal koncept för en snabb och noggrann laserskärningsmaskin som arbetar i ett 2D-plan för att skära ut detaljer ur en plåt. Genom en löpande urvalsprocess hittas det bästa konceptet och komponenter för att konstruera detta. Koncepten ska vara grundade på användandet av produkter som finns tillgängliga på marknaden.

1.3 Avgränsningar

I detta arbete avses enbart att ta fram ett realistiskt koncept, det ska inte resultera i en färdig maskin. Konstruktion av fästen, höljen och liknande kommer inte att behandlas. Ekonomiska aspekter kommer enbart tas hänsyn till vid materialundersökning.

1.4 Precisering av frågeställning

Frågor som ska besvaras av detta arbete är:

- Vilket eller vilka material kan axlarna vara av för att klara kraven på acceleration?
- Vilka motorer och drivsystem kan leverera önskad acceleration och precision?
- Hur ska positionen av verktyget mätas för att kompensera för mekaniska fel?
- Hur ska kommunikationen mellan ingående komponenter och SA:s egna operatörssystem lösas?

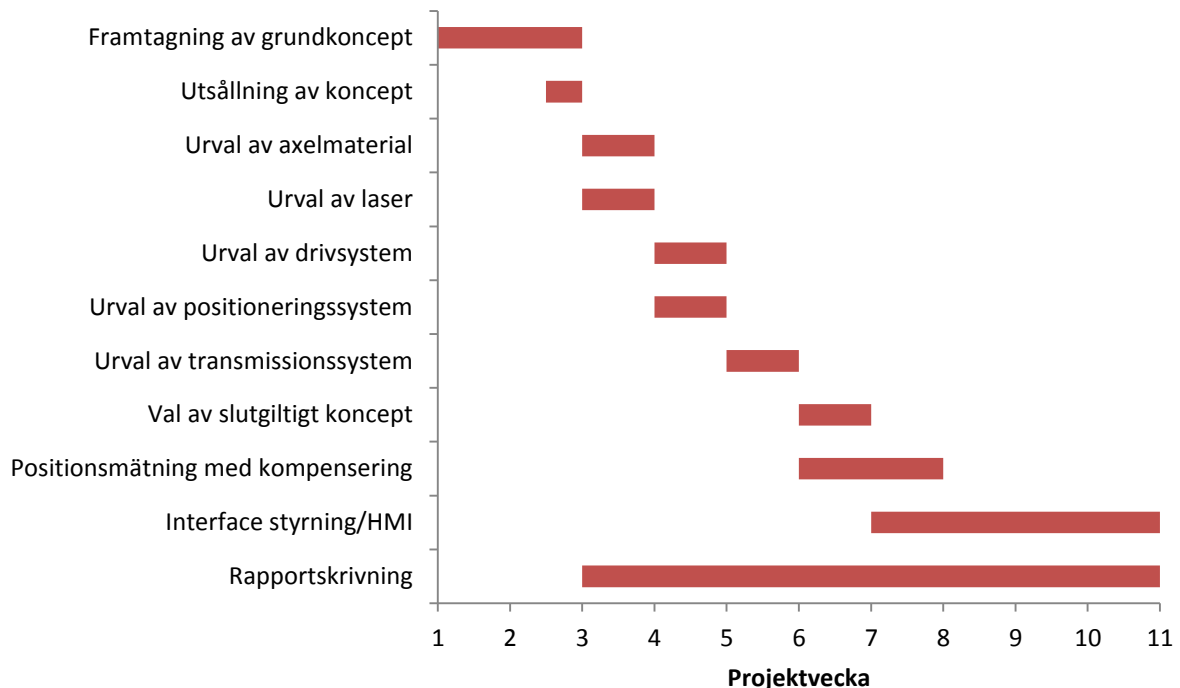
Kravspecifikationen från SA säger vidare att maskinen ska uppfylla följande villkor:

- Ha en acceleration/retardation som är minst $7g$ ($7 * 9,82m/s^2$)
- Hålla en mekanisk tolerans på $\pm 0,02$ mm
- Hålla en så jämn hastighet som möjligt efter acceleration
- Ha ett arbetsområde på minst $650 * 650$ mm
- Ha en mjukvara som kan kompensera för eventuella mekaniska fel, t.ex. glapp i motorer.
- Ha ett enkelt interface mellan axelstyrning och ett HMI (Human Machine Interface)

2. Metod

I starten av projektet tas ett antal olika koncept fram. Dessa presenteras för företaget, som sedan hjälper till att välja ut två eller tre grundkoncept som arbetet kan fortsätta på. Då väljs lämpliga material, drivsystem m.m. ut. Urval kommer att ske med viktade urvalsmatriser, exempelvis Pughs matris. Materialdatabaser kommer att användas för att sälla bland möjliga materialval till axlarna. Efter att ingående komponenter till de första grundkoncepten valts väljs det koncept som framstår som mest lämpligt i samråd med företaget. Då vidtar utveckling av system för positionsmätning samt mjukvara för interface mellan ingående komponenter.

3. Tidsplan



Figur 3.1: Projektets tidsplan

Under tio veckor med en arbetsinsats av 40 timmar per vecka kommer projektet, ämnat att hitta ett fungerande koncept till en 2D-laserskärare, att utföras. En elfte vecka planerades också in för att väga upp för oförutsedda problem såsom sjukdom eller liknande. Projektet utförs till stor del på Chalmers Tekniska Högskola där kunnig personal finns att tillfråga när så behövs.

Arbetsgången utfördes på följande sätt:

1. En kravspecifikation presenteras av STAB med bakgrund på varför de vill att uppdraget ska utföras likaså de problem som för tillfället finns. En sökning av internet utförs för att se vilka nuvarande lösningar som används. Ett besök i ett robot-labb utförs också för att se exempel på nuvarande lösningar på liknande maskiner.
2. Utifrån kravspecifikationen utförs brainstorming för att komma fram till potentiella lösningar av den maskin som önskas. I detta läge tas ännu ingen hänsyn till om förslagen är genomförbara eller om de kan leva upp till de krav som ställs.

3. Tillsammans med STAB väljs ett fåtal konceptidéer ut för vidare undersökning. Alternativ som med stor sannolikhet inte skulle uppnå de krav som ställs sållas direkt bort medan några möjliga och några högst sannolikt möjliga koncept väljs ut.
4. De utvalda koncepten undersöks mer noggrant med ingående komponenter som behövs i de olika alternativen. Beräkningar utförs också för att se om koncepten är genomförbara och fortfarande lever upp till de krav som ställs. Fortsatt sökning av internet sker men nu i mer riktad form mot de olika komponenterna som krävs.
5. Koncepten färdigställs och ett antal kriterier ställs upp för viktning genom användandet av Pughs matris. SA värderar kriterierna för att de sedan skulle kunna ställas mot varandra och få fram ett vinnande koncept. Till referensobjekt används en robot med likartad arbetsyssla.
6. Förutsättningar för att bygga ett interface mellan axlarnas styrsystem och maskinens HMI undersöks genom att undersöka kommunikationsmöjligheter i konceptens styrsystem.

4. Teknisk Bakgrund

Laser och Laseremitter

Laser är en förkortning som står för "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation". Genom stimulerad emission (en foton orsakar deexcitering hos en atom eller molekyl där ytterligare en foton med exakta egenskaper mot fotonen som orsakade deexciteringen deexciterar) skapas en ljusstråle som är både monokrom och koherent. På grund av dessa egenskaper så får en laser enbart en riktning och en stark intensitet. [1]

Kulskruv

En kulskruv fungerar precis som en vanlig mutter på en gängad stång. Skillnaden är dock att mellan mutter och gänga finns ett kullager som minskar friktionen och gör rörelse lättare. Med hjälp av en matar bana så hålls kulorna i rörelse inom systemet genom att kulor som åker ut bakom muttern transporteras in i fronten igen. Kulskruvar har generellt en hög verkningsgrad, omkring 90 %, och den låga friktionen gör också att ryck kan undvikas och en jämn gång kan uppnås. Muttern kan förspännas för att helt eliminera glappet mellan kulorna och skruvens gängor, men detta ställer högre krav på smörjning för att kompensera för det ökade slitaget. Kulskruvar är mycket känsliga för smuts och partiklar som kan hamna i skruvens gängor och orsaka slitage på kulorna i muttern. Borstar kan monteras på muttern för att ta bort smuts under gång, eller så kan hela skruven inneslutas i en bälg eller annat skyddande hölje för att se till att partiklar utifrån inte kan komma in i systemet.[2]

Servomotor

En servomotor är en elmotor, ofta en permanentmagnetiserad synkronmotor, men också i vissa tillfällen asynkron, kopplad till en läges sensor för att bestämma positionen i realtid. Positioneringen som läges sensorn anger används sedan som angivelse för hur motorn ska agera. Detta sätt att styra på kallas för closed loop.[3]

Linjärmotor

Linjärmotorn är enkelt sett en utrullad synkronmotor, det vill säga dess stator och rotor och blivit utrullade på så sätt att motorn skapar en linjär rörelse i stället för en roterande rörelse. Själva motorn kallas för primärpart och det som motorn löper längs kallas för sekundärpart. Eftersom

motorn driver sin last med hjälp av magnetiska fält så blir kraften som krävs för förflyttning enbart beroende på massan och accelerationen.[4]

Linjär encoder

Linjära encoders fungerar som en linjal för mätning av linjära rörelser. En sensor läser av en skala för att få ut den exakta rörelsen som utförts. Avläsningen i sig kan ske på ett antal olika metoder som bland annat innefattar optisk eller magnetiskt avläsning eller genom kapacitet och induktion. Fördelarna med de olika metoderna varierar då vissa är mer exakta i sina avläsningar och andra tål smutsigare miljöer där till exempel optisk avläsning skulle vara omöjligt. Upplösningen som kan erhållas varierar mellan några hundra mikrometer ner till nanometer. Med hjälp av den avlästa positionen går det därför att styra motorn, som encodern är kopplat till, med väldigt stor noggrannhet.

Märkmoment/märkkraft

Märkmoment anges för drift vid 25°C omgivningstemperatur och 200V, och står vanligen att finna i en motors datablad. Vridmomentet som en motor utövar står i direkt proportion till hur mycket ström motorn drar. Strömmen i sin tur står i kvadratisk proportion till effekten, vilken slutligen står i proportion till hur mycket motorn upphettas. Märkvärdet anger alltså hur mycket vridmoment/kraft en motor kontinuerligt kan avge utan att överhettas. Märkvärdet kan ibland höjas genom kraftigare nedkylning av motorn, till exempel med större kylflänsar, en fläkt på motorns axel eller vattenkylning.

RMS

”Root mean square” är det kvadratiske medelvärde som ofta används vid beräkningar på periodiskt varierande storheter, som till exempel vridmomentet en motor levererar. En arbetscykel för en motor har ofta perioder av kraftigt arbete följt av vänteperioder där inget arbete utförs och motorn kan kylas av. Genom att beräkna ett kvadratisk medelvärde på vridmomentet en motor levererar under hela dess arbetscykel erhålls ett slags mått på hur mycket motorn kommer att värmas upp under cykeln, jfr paragrafen märkmoment/märkkraft ovan. En motor kan därför väljas så att dess kvadratiske medelvärde ligger under märkvärde för vridmoment/kraft och blir då inte överhettad under en arbetscykel.

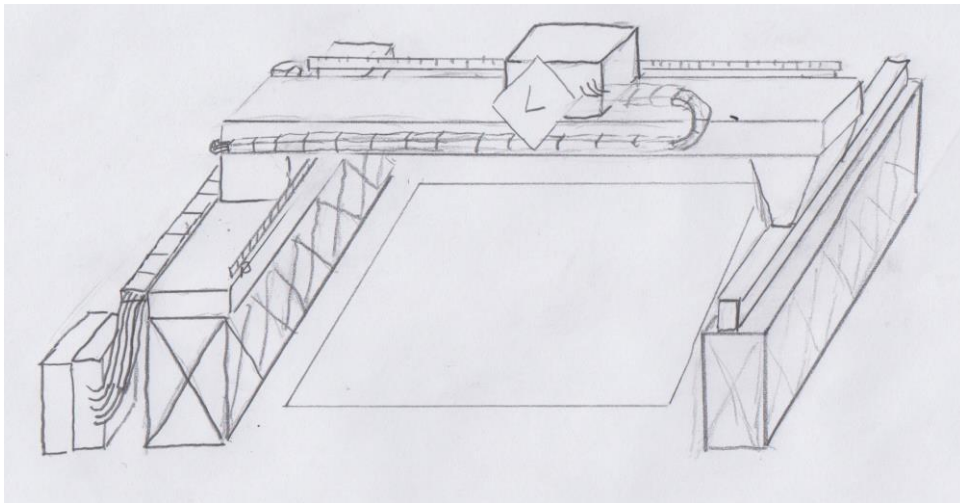
Pughs Matris

Pughs matris är en generell urvalsmetod som är bäst lämpad att användas för urval mellan färdiga idéer, koncept eller likande. Konzepten vägs på ett objektiva sätt med avseende på ett antal kriterier för att se vilket som uppfyller dem bäst. Kriterierna bestäms och får ett värde beroende på hur viktiga de anses vara, ett högt värde innebär att det är ett viktigt kriterium och ett lågt innebär att det inte är av lika stor vikt. Konzepten eller idéerna får sedan ett värde beroende på hur väl de anses klara av de uppställda kriterierna och de två värdena multiplieras sedan för att få fram en summa. Det alternativ som får högst betyg är det som kan anses vara den bäst lämpade lösningen.[5]

5. Grundkoncept

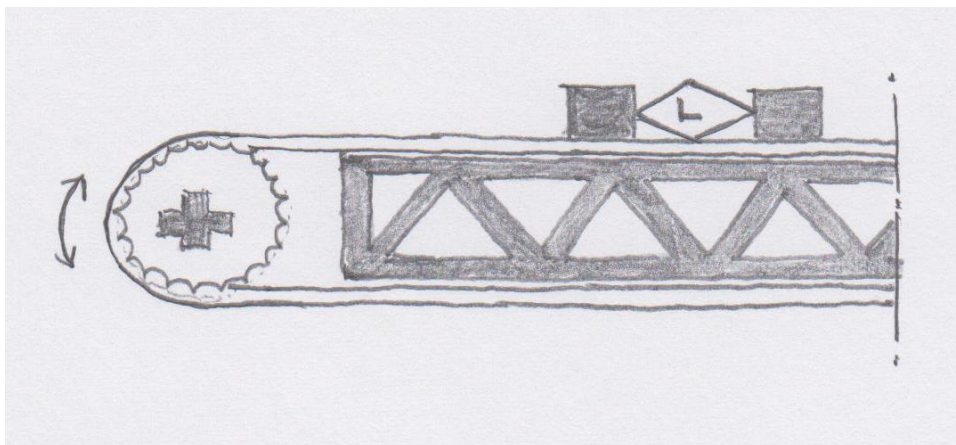
Efter brainstorming och faktainsamling om nuvarande metoder inom området togs ett antal grundkoncept fram. Dessa var på inget sätt beräkningsmässigt undersökta utan var enbart teoretiska idéer på hur problemet kunde lösas.

1. Med hjälp av kulskruv skulle roterande rörelse från en motor kunna göras om till linjär rörelse. Med två uppsättningar där den ena kulskruvan förllyttar den andra så skulle ett XY-bord skapas för att täcka hela arbetsområdet. Montering skulle kunna ske så att antingen arbetsstycket eller lasern förflyttades. Metoden skulle också kunna fungera med hjälp av linjärmotorer.



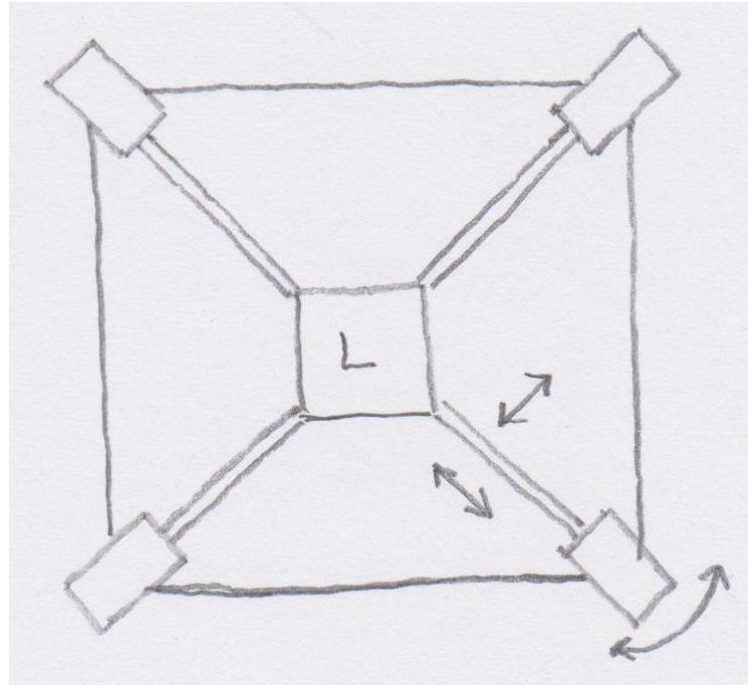
Figur 5.1: XY-bord med linjärmotorer eller kulskruv

2. Genom användandet av tandremstransmissioner monterade på liknande sätt som i grundkoncept ett skulle också ett XY-bord kunna skapas. Metoden skulle troligtvis bli mer beroende av materialval för en stödjande konstruktion för att hålla tandremmen spänd.



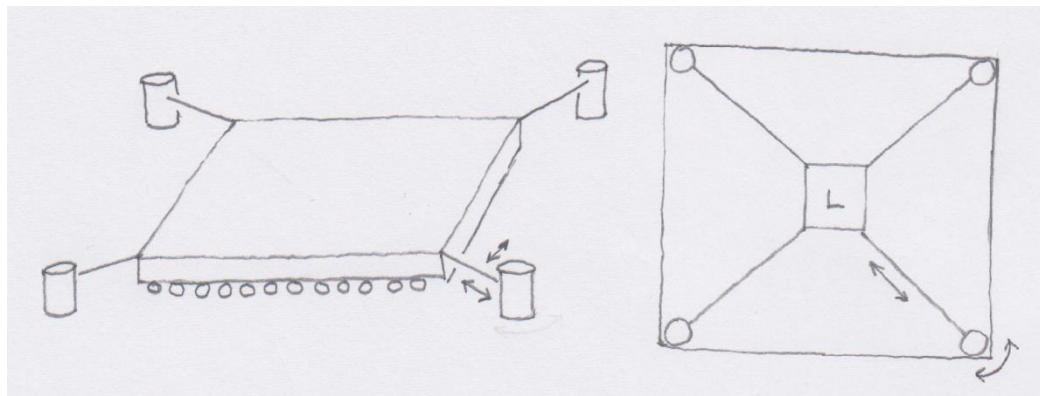
Figur 5.2: XY-bord med transportband och stödjande fackverk

3. Fyra rörliga kolvar skulle sköta positioneringen genom pneumatisk styrning. Metoden skulle, oberoende om vi valde att flytta lasern eller arbetsstycket, kräva extra mycket utrymme för kolvarna. Detta då de behöver en längd som är lika med dubbla diagonalen av arbetsstycket för att nå sina ändlägen.



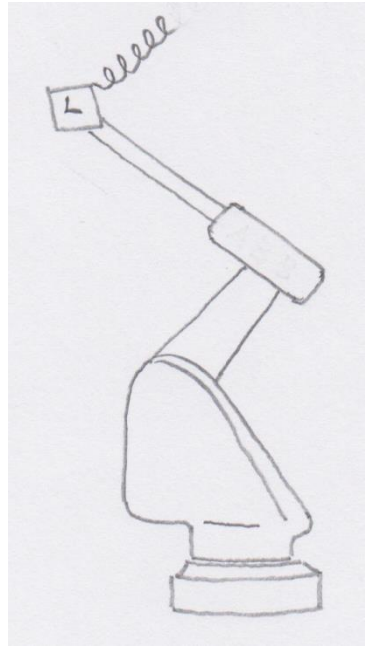
Figur 5.3: Styrning genom kolvar

4. För att spara utrymme från grundkoncept tre ersattes kolvarna med vajrar. Genom att antingen släppa ut eller rulla in vajrarna skulle varje önskvärd position kunna nås. Ett problem skulle troligtvis vara att vid användning till förflyttning av lasern skulle svajning troligtvis göra metoden oanvändbar, vilket innebär att den enbart skulle lämpa sig till förflyttning av arbetsbordet. En lösning på problemet skulle då vara att arbetsbordet förflyttades över en friktionsfri yta. Större yta skulle krävas men svajningen i Y-led skulle motverkas då lasern kunde vara fast monterad.



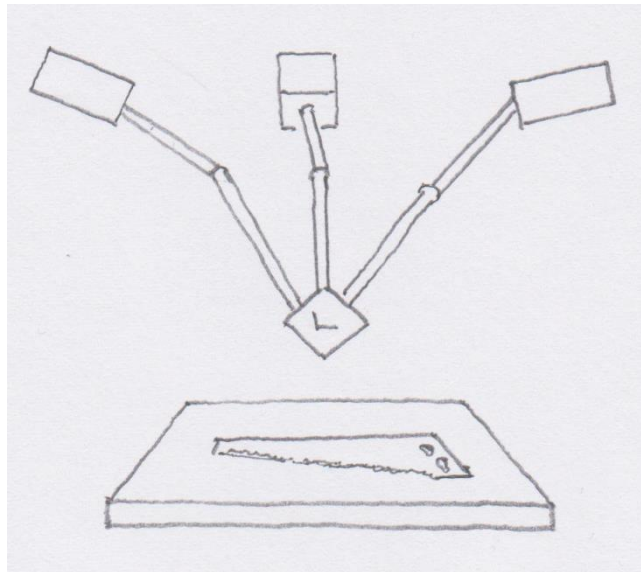
Figur 5.4: Styrning genom vajrar

5. Montering av lasern på en artikulerad robot, även ofta kallade för robotarmar, skulle medföra enkel programmerbar positionering för alla önskvärda positioner. Metoden är mer lämpad för arbete i tre dimensioner då denna typ av robot har tillräckligt många axlar för att klara av den typen av arbete. Den funkar däremot också även för arbete i ett plan.



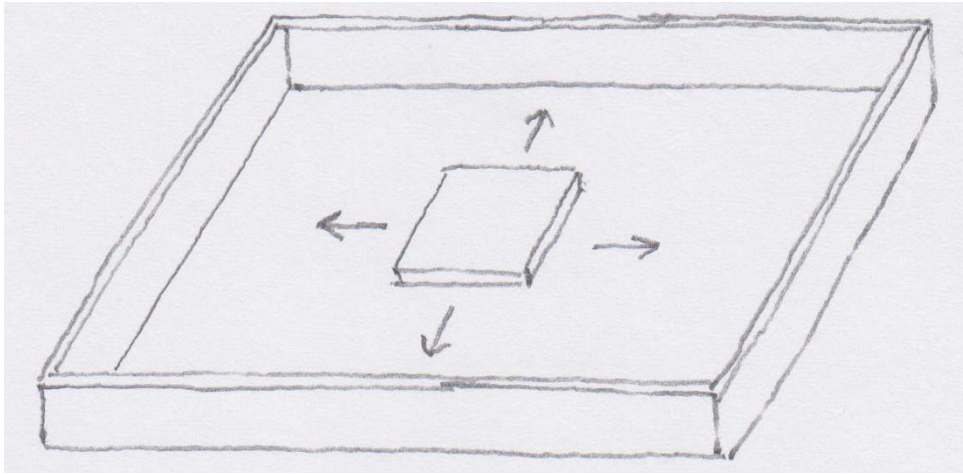
Figur 5.5: Länkarmsrobot

6. Användandet av en deltarobot till förflyttning av laseremittern skulle, liksom i grundkoncept fem, medföra en snabb och enkel metod för att komma åt alla önskvärda positioner.



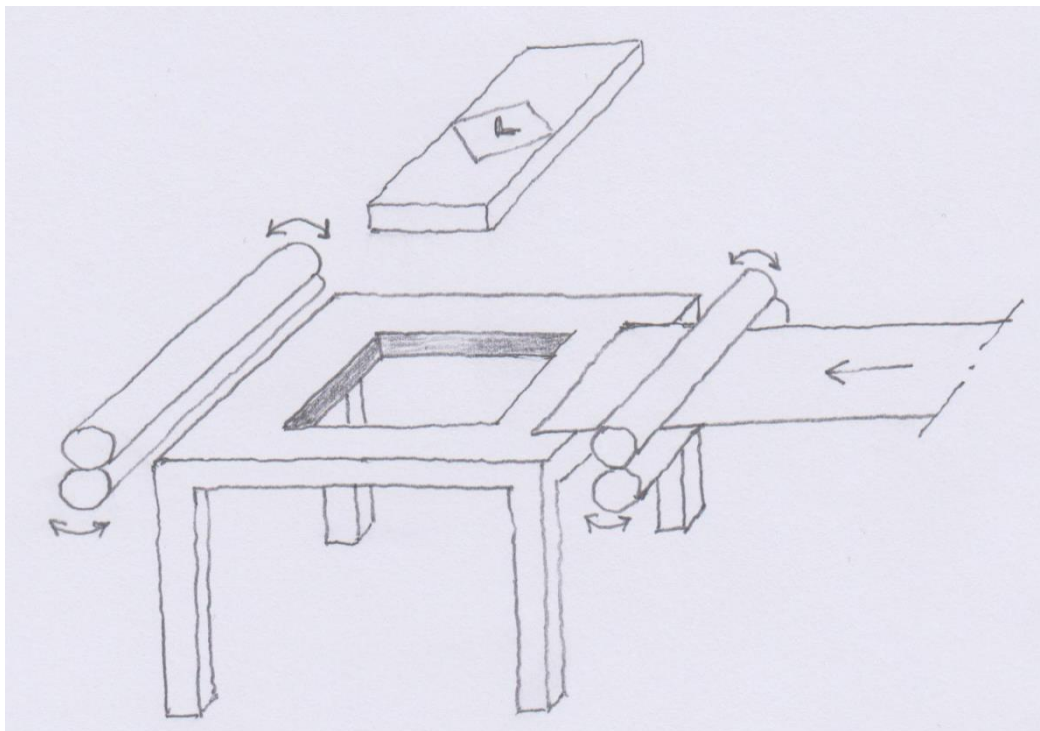
Figur 5.6: Deltarobot

7. Magnetstyrning av arbetsbordet. Metoden funkar på så sätt att bordet skulle med hjälp av magneter röra sig fritt i X- och Y-riktning inom ett bestämt arbetsområde. Lasern skulle vara fast monterad ovanför och bordet skulle få sköta positioneringen.



Figur 5.7: Magnetstyrt arbetsbord

8. Ett alternativ där materialet kan matas i både positiv och negativ X-riktning av styrvalsar. Positionering i Y-riktning skulle ske av en laser monterad på linjärmotor ovanför arbetsstycket. Metoden lämpar sig mer för massproducering eftersom valsarna kontinuerligt skulle kunna mata in material utan behov för plundring av maskin så länge de färdiga produkterna på något sätt faller ut.



Figur 5.8: Användning av valsar

6. Koncept för vidare undersökning

Efter samråd med SA bestämdes det att koncept för användandet av linjärmotorer samt kulskriv till ett XY-bord var de mest realistiska. Övriga koncept föll bort av olika anledningar. Användningen av transportband för drift till ett XY-bord i koncept 2 bedömdes vara för känslig för glapp i transmissionen. Att använda kolvar som i koncept 3 ovan skulle ta alltför mycket plats. Koncept 4 bedömdes inte kunna ha tillräcklig precision på grund av slack i vajrar. Koncept 8, med plåt från en rulle som matas fram av valsar, var inte aktuellt för den tilltänkta tillämpningen av maskinen. FANUC och Bosch Rexroth blev rekommenderade som leverantörer när det kom till val av motorer. Utöver undersökning av lösningarna med XY-bord skulle dessutom användandet av färdig robot studeras närmare, likaså användandet av magnetstyrt arbetsbord.

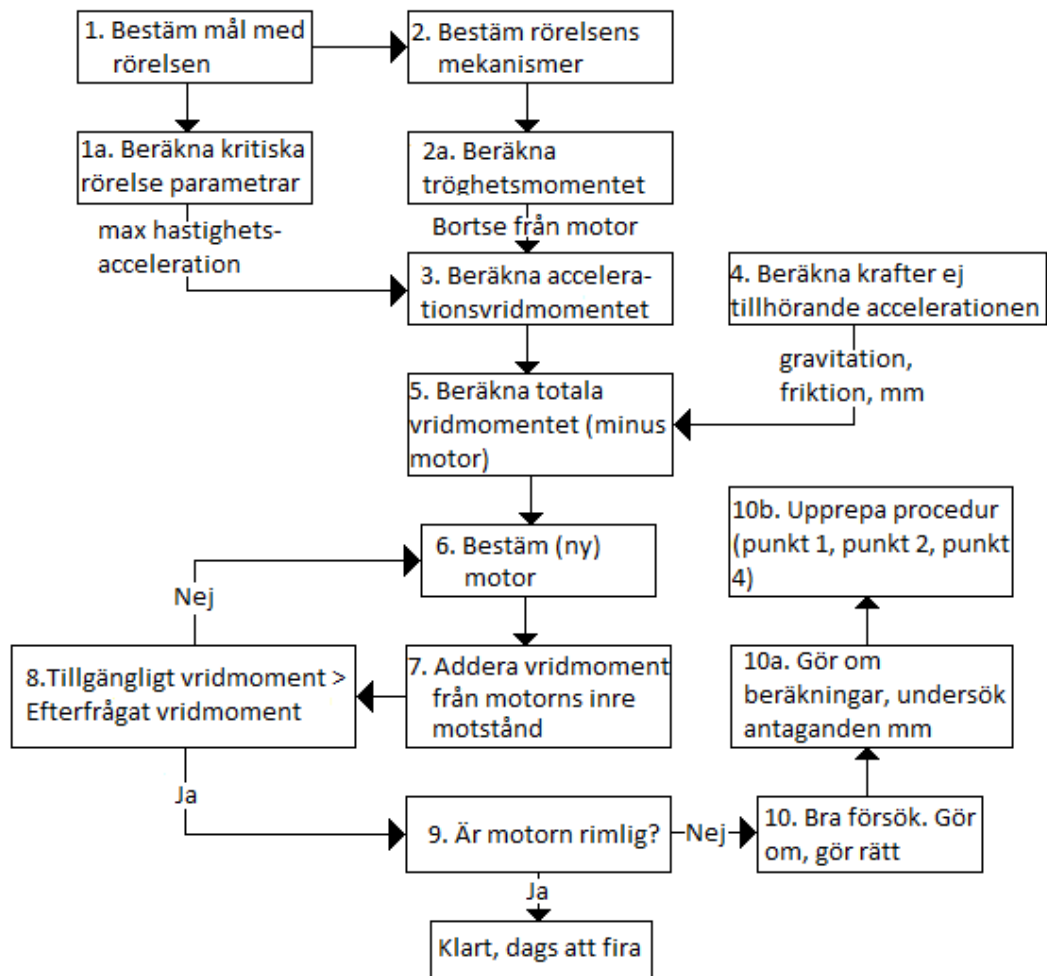
7. Metodik för val av motorer

Vid val av motorer för ett självgående system så finns det tre delar som måste tas med i beräkningarna och dessa tre är hjärnan, musklerna och lasten.[6] Hjärnan är det styrande organet som övervakar systemet och ser till att allt sker som det ska. Lasten, som innefattar allt som musklerna måste hålla i rörelse, bestäms utav applikationskraven och den som designar maskinen i fråga. Musklerna, det vill säga motorn, är det avgörande för systemet. Ett enkelt sätt att säga det på är att så länge motorn klarar av att tillföra de krafter som krävs så kommer systemet att fungera.

Att välja motorer är normalt en lång och svår process, så för att förenkla arbetet används oftast en metod baserad på smart motion cheat sheet (Figur 7.1)[6]. Smart motion cheat sheet är ett teoretiskt tillvägagångssätt som i de flesta fall ger en enkel och effektivt sätt att avgöra om motorer kan leva upp till de krav som ställs. Det går ut på att följa ett antal steg för att på ett systematiskt sätt arbeta sig genom de problem som ofta uppstår. Skulle ett problem stötas på som inte verkar vara möjligt att lösa säger metoden dessutom till vilket steg det är rekommenderat att återgå till. På så sätt kan det undvikas att hela processen behöver ombearbetas.

Nedan visas den metod som används i valet av motorer för de koncept som senare kommer redovisas. Texten samt den förklarande bilden använder båda vridmoment, men metodiken fungerar fortfarande att använda vid val av linjärmotorer.

1. Bestäm mål med rörelsen.
 - a. Beräkna kritiska rörelseparametrar (max hastighetsacceleration).
2. Bestäm mekanism för att åstadkomma rörelsen.
 - a. Beräkna motstånd på systemets rörliga komponenter (bortsett från motorn).
3. Beräkna accelerationsvridmomentet (enbart last och mekanism).
4. Beräkna krafter som inte tillhör accelerationskrafterna (friktion, gravitation mm.).
5. Beräkna totala vridmomentet (bortsett från motorn).
6. Bestäm (n_y) motor.
7. Lägg till vridmoment från motorns eget tröghetsmoment.
8. Är tillgängligt vridmoment större än efterfrågat vridmoment (om inte, gå tillbaka till punkt 6).
9. Verkar motorn rimligt dimensionerad? (om inte, gå till punkt 10, annars är valet klart).
10. Bra försök. Gör om, gör rätt.
 - a. Gör om beräkningar, undersök antaganden mm.
 - b. Upprepa procedur (punkt 1, punkt 2 och punkt 4).



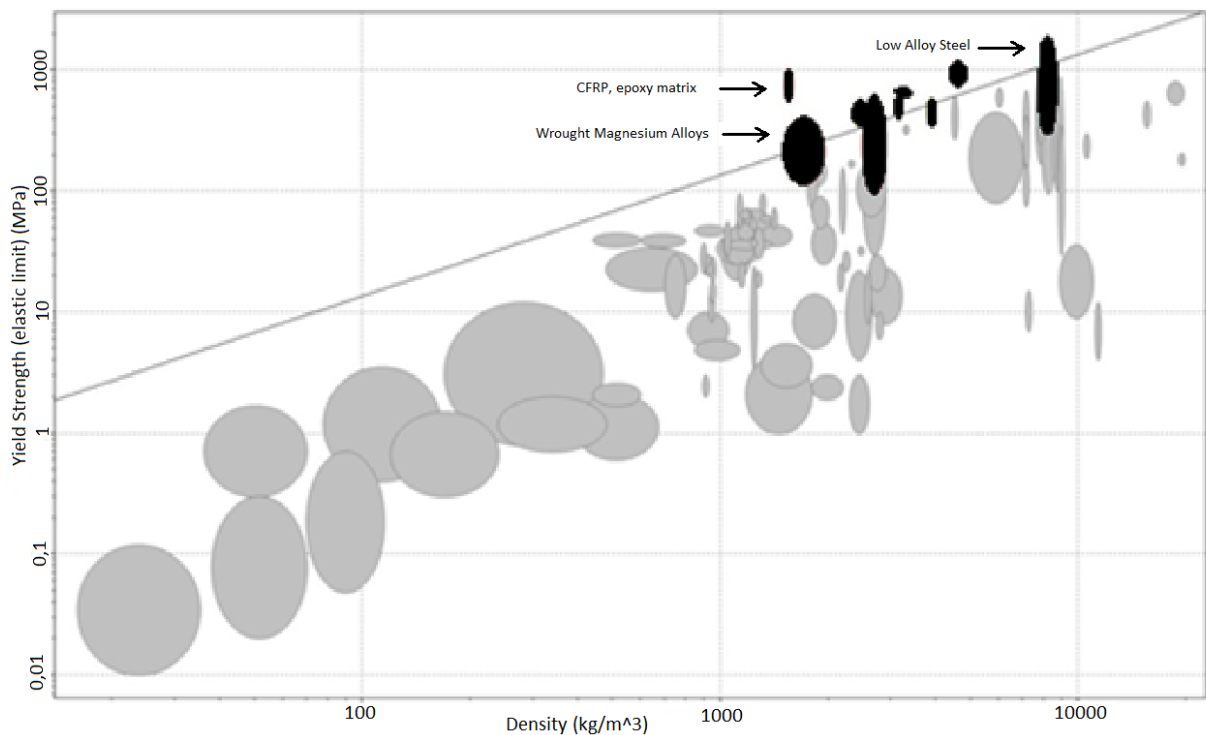
Figur 7.1: Smart motion cheat sheet

8. Materialval

För att hålla massan och därmed masströghetsmomentet som motorn skall accelerera så lågt som möjligt är det av vikt att göra konstruktion så lätt som möjligt utan att samtidigt riskera deformation i strukturen. För att hitta lämpliga material sätts densitet mot sträckgräns i ett diagram via CES Edupack, en databas om olika material samt deras egenskaper[7]. Densitet och sträckgräns vägs mot varandra eftersom densiteten starkt påverkar hur mycket den potentiella konstruktionen kommer väga, och sträckgränsen säger hur stor kraft konstruktionen kommer kunna påverkas av innan den deformeras. Genom att använda en linje i grafen kunde de ämnen med högst sträckgräns mot densitet väljas ut, det vill säga de ämnen som tål högst krafter beroende på sina egna densiteter. Linjens lutning bestämdes till 1 så att ett bra förhållande mellan sträckgräns och densitet erhöles, och K-värdet valdes senare för att sälla ut de material som ansågs ha för låg sträckgräns. Samtliga material som möter de kriterier som ställs upp kommer från grupperna metaller eller kompositier.

Material	Densitet [kg/m^3]	Sträckgräns [MPa]	Pris [sek/kg]
Age-hardening wrought Al-alloys	2500 - 2900	95 - 610	15,5 - 17,1
Alumina	3800 - 3980	350 - 588	120 - 181
Boron Carbide	2350 - 2550	350 - 560	397 - 590
CFRP, epoxy matrix (carbon fiber)	1500 - 1600	550 - 1050	265 - 292
High carbon steel	7800 - 7900	400 - 1160	5,02 - 5,52
Low alloy steel	7800 - 7900	400 - 1500	5,91 - 6,5
Nickel-based superalloys	7750 - 8650	300 - 1900	202 - 223
Silicon Carbide	3100 - 3210	400 - 610	95,9 - 137
Silicon Nitride	3100 - 3400	600 - 720	233 - 356
Titanium Alloys	4400 - 4800	750 - 1200	379 - 417
Wrought magnesium alloys	1500 - 1950	115 - 410	31,1 - 34,2

Tabell 8.1: Materialjämförelse



Figur 8.1: Materialval med CES EduPack där cirklarna symboliserar olika material.

Eftersom samtliga av de utvalda materialen kan uppnå kriterierna på hållfasthet som krävs så blir det därför missvisande att enbart betrakta priset per kilogram. Eftersom skillnaden på densiteten mellan vissa ämnen skiljer sig väldigt mycket så kommer en del ämnen få svårt att hävda sig. I stället gjordes en prisjämförelse där priset per kilogram, densiteten och sträckgränsen togs med i beräkningarna på följande sätt:

$$\frac{kr}{kg} * \frac{\rho}{\sigma} = \frac{kr * kg}{kg * m^3 * \sigma} = \frac{kr}{m^3 * \sigma} \quad (8.1)$$

Genom att ta med samtliga egenskaper kan en mer rättvis prisbild skapas i form av ett godhetstal, där ett lågt värde är att föredra. Dessa visas i tabell 8.2..

Material	Prisjämförelse $kr/(m^3 * \sigma)$
Low alloy steel	51
High carbon steel	53
Age-hardening wrought Al-alloys	125
Wrought magnesium alloys	215
CFRP, epoxy matrix (carbon fiber)	540
Silicon Carbide	728
Alumina	1248
Silicon Nitride	1450
Titanium Alloys	1526
Nickel-based superalloys	1584
Boron Carbide	2657

Tabell 8.2: Prisjämförelse mellan material

Här kan nu avläsas att vissa ämnen, som till exempel CFRP, får en mycket bättre prisbild än tidigare då det visades per kilogram.

Från de data som kommit fram kan tre olika material därigenom väljas ut. Först smidda magnesiumlegeringar till de delar som är i rörelse men inte har någon inverkan på konstruktionen och dess styvhet. CFRP är att rekommendera i stödjande konstruktion som är under rörelse eftersom det materialet har väldigt goda egenskaper när det kommer till sträckgräns i förhållande till densitet. Det sista materialet är låglegeringsstål för stödjande konstruktion som inte är i rörelse. Låglegeringsstål har väldigt hög sträckgräns och lågt pris, men p.g.a dess höga densitet blir den tung och bör undvikas i rörliga delar.

I de flesta koncept så kommer dock materialval inte bli av större vikt. I alternativen med linjärmotor och kulskriv så går materialet axlarna är gjorda av inte att påverka. För linjärmotorkonceptet så är det linjärmotorerna i sig som är axlarna, och för kulskrivkonceptet så kan materialet i skruvarna inte påverkas då de måste vara av materialet som tillverkaren använder. Materialet som används till kulskrivarna går dessutom inte att ändra på då de måste vara tillräckligt hårda för att inte förstöras av kulorna som löper i gängorna. Materialvalet kommer därför i större utsträckning enbart bli viktigt om en stödkonstruktion behövs och denna får en betydande vikt i jämförelse med motorernas och transmissionernas egen vikt.

9. Teoretiska beräkningar

Vid val av motorer för de koncept som undersöktes närmare genomfördes en ansenlig mängd beräkningar. Eftersom samtliga uträkningar följde samma metod så kommer uträkningarna i sig inte presenteras utan enbart de allmänna metoderna. Program skrevs i Matlab för att underlätta beräkningarna. De programmen kan hittas som bilaga 1 och 2.

9.1 Rörelse utförd med linjärmotor

För att dimensionera en linjärmotor och tillhörande komponenter måste kraften som motorn behöver kunna utverka på sin axel vara känd. Den totala kraften F kan delas upp enligt

$$F = F_{MOTOR} + F_{LAST} + F_f \quad (9.1)$$

där F_{MOTOR} är kraften som behövs för att accelerera motorns primärpart, F_{LAST} är kraften som krävs för att accelerera lasten och F_f är kraften som behövs för att övervinna friktionen. F_f blir väldigt liten i sammanhanget, eftersom motorns primärpart kommer att röra sig på glidlager som har väldigt låg friktionskoefficient ($<0,01$). Därför försummas denna faktor i beräkningarna. F_{MOTOR} och F_{LAST} beräknas enligt

$$F_{MOTOR} = m_{MOTOR} * a \quad (9.2)$$

$$F_{LAST} = m_{LAST} * a \quad (9.3)$$

där m_{MOTOR} är primärpartens egen massa och m_{LAST} är lastens massa. Detta kan förenklas vidare till

$$F = (m_{MOTOR} + m_{LAST}) * a \quad (9.4)$$

9.2 Rörelse utförd med kulskruv.

En kulskruv, eller kulmutterskruv, används för att omvandla ett roterande vridmoment till linjär rörelse. Principen är densamma som hos en vanlig mutter på en gängstång; när man vrider på skruven och muttern inte kan rotera så förflyttas muttern längs axeln. Skillnaden är att muttern på en kulskruv innehåller ett återförande kullager för kontakten med skruvens gängor, vilket ger en avsevärt lägre friktion och därmed en mycket högre verkningsgrad på linjär kraft ut mot vridmoment in till skruven. För att beräkna hur mycket vridmoment M som behövs för att accelerera och förflytta en last med massan m måste hela systemet med motor, skruv, lager och last tas i beaktande [2][8]. M kan därför delas upp som

$$M = M_{MOTOR} + M_{LAST} + M_{SKRUV} + M_f \quad (9.5)$$

där M_{MOTOR} = motorns egenbehov vid start, M_{SKRUV} = skruvens egenbehov vid start, M_{LAST} = lastens egenbehov vid start och M_f = vridmoment som behövs för att övervinna friktionen i lager i systemet. För att beräkna M_{SKRUV} , M_{MOTOR} och M_{LAST} måste först tröghetsmomenten J_{SKRUV} , J_{MOTOR} och J_{LAST} vara kända. J_{MOTOR} anges i motorns datablad. Skruvens tröghetsmoment J_{SKRUV} kan uppskattas som tröghetsmomentet för en cylinder och ges då av

$$J_{SKRUV} = \frac{\pi * l * d^4 * \rho}{32} \quad (9.6)$$

där l = skruvens längd, d = skruvens diameter och ρ är skruvens densitet.

Lastens massa ger upphov till ett tröghetsmoment J_{LAST} på skruven som beror av skruvens gängstigning h . Detta tröghetsmoment ges av

$$J_{LAST} = m * \left(\frac{h}{2\pi}\right)^2 \quad (9.7)$$

Nu kan de ingående vridmomenten beräknas.

$$M_{MOTOR} = \frac{J_{MOTOR} * \Delta n * 2\pi}{60 * t_s} \quad (9.8)$$

där t_s är starttiden och Δn är varvtalsändringen.

$$M_{LAST} = \frac{J_{LAST} * \Delta n * 2\pi}{60 * t_s * \eta} \quad (9.9)$$

där η är skruvens verkningsgrad.

$$M_{SKRUV} = \frac{J_{SKRUV} * \Delta n * 2\pi}{60 * t_s} \quad (9.10)$$

och

$$M_f = m * g * \mu * \frac{h}{2\pi} \quad (9.11)$$

där μ är friktionskoefficienten för lagret som kulmuttern och lasten glider på.

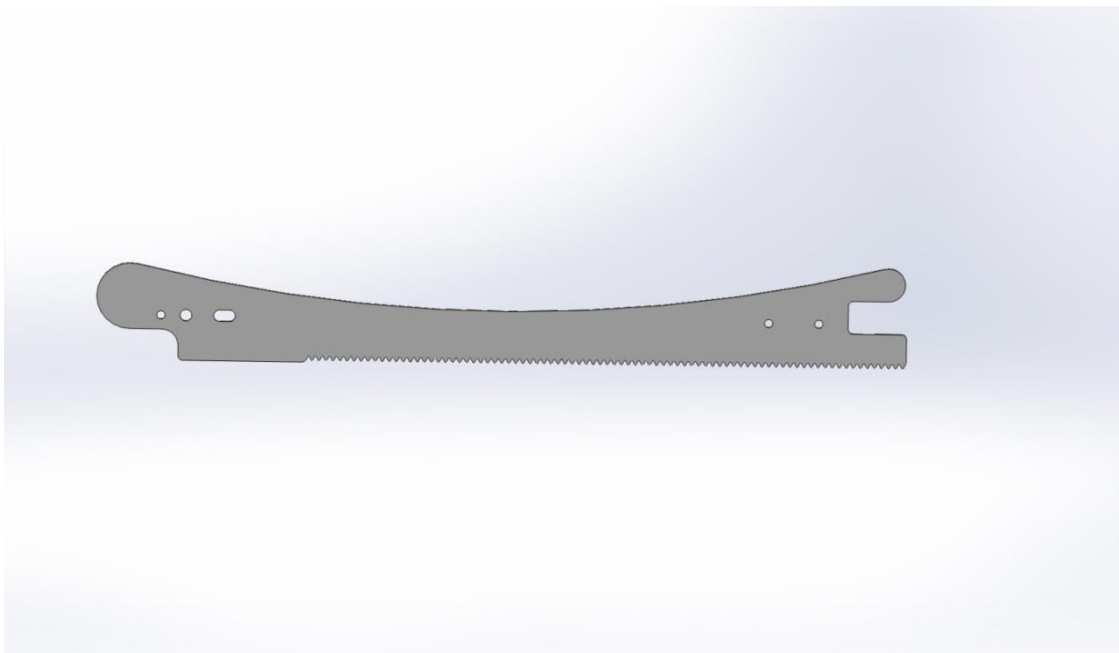
9.3 Beräkning av kvadratisk medelvärde

För att kunna välja rätt storlek på motorer till maskinen beräknades ett kvadratisk medelvärde (rms) på kraften respektive vridmomentet som behöver utvecklas under en cykel. Kraft, respektive vridmoment, står i direkt proportion till strömmen som går genom motorn. Strömmen står i sin tur i kvadratisk proportion till uppvärmningen av motorn. Eftersom en motor under en arbetscykel oftast inte arbetar kontinuerligt utan har perioder av vila hinner den kylas av under dessa delar av cykeln. En motor kan också utöva mer kraft eller vridmoment än vad dess märkvärde anger under en kort tid, förutsatt att den får möjlighet att kylas ned efteråt. Det kvadratiska medelvärdet används för att summera arbete och vila under en arbetscykel, och så länge rms-värdet är lägre än märkvridmoment resp. märkkraft blir motorn inte överhettad. Ett kvadratisk medelvärde för till exempel acceleration beräknas enligt

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{a_1^2 * t_1 + a_2^2 * t_2 + \dots + a_n^2 * t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} \quad (9.12)$$

där a_n är accelerationen under en tid t_n .

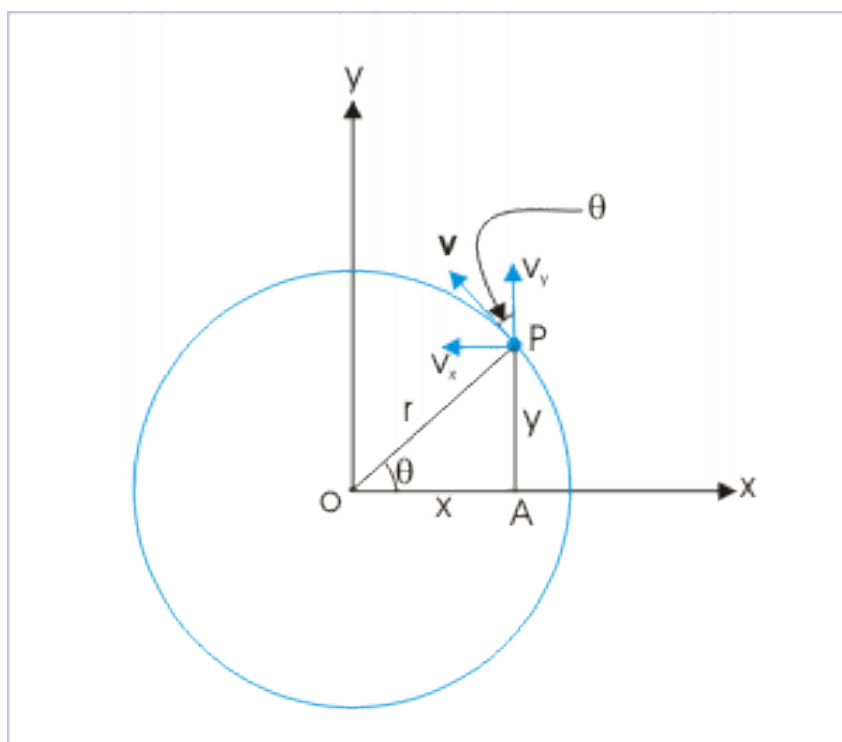
Utskärningen av en sågbladsliknande referensprodukt (Figur 9.1) utgör en produktcykel. Enligt kravspecifikationen ska maskinen kunna accelerera med minst $7g$ ($7 * 9,82 \text{ m/s}^2$) och därefter ska skärhuvudet hålla en konstant hastighet på 20 m/min , utom på "sågtänderna" där hastigheten istället ska vara 12 m/min .



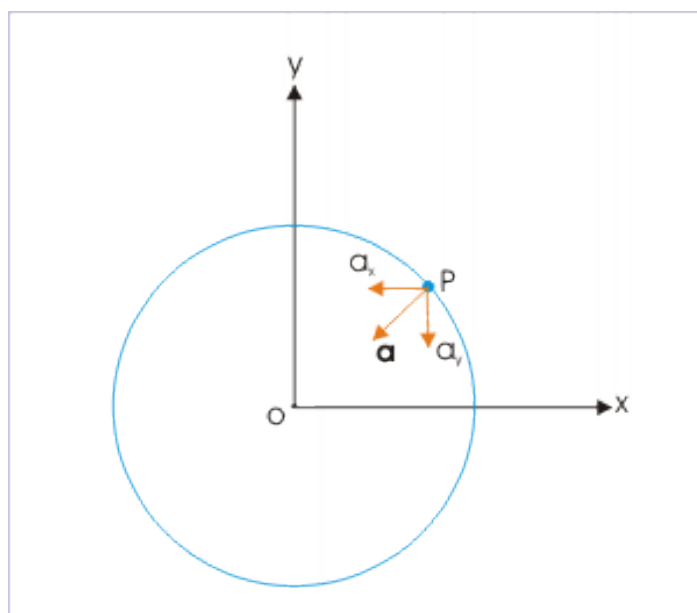
Figur 9.1: Sågbladsliknande referensprodukt

Referensprodukten innehåller enbart rundade hörn och raksträckor. Eftersom skärhuvudet ska hålla konstant hastighet vid bearbetning kan accelerationen och hastigheten för axlarna hittas med hjälp av formler för likformig cirkulär rörelse. Dessa förutsätter att hastighetsvektorn i varje punkt längs cirkeln är konstant och tangentiell mot cirkelns omkrets, se figur 9.2. Accelerationsvektorn är också konstant och riktad mot cirkelns mittpunkt, se figur 9.3. Positionen för en punkt längs en cirkelbåge ges då av $x = r * \cos\theta$ och $y = r * \sin\theta$, förutsatt att koordinatsystemet utgår från origo på cirkeln. Hastighetskomponenterna i X-led och Y-led ges av $v_x = -v \sin\theta$ och $v_y = v \cos\theta$. Slutligen ges accelerationen av $a_x = -\frac{v^2}{r} \cos\theta$ och $a_y = -\frac{v^2}{r} \sin\theta$ [9]. Eftersom formlerna för erforderligt vridmoment för en kulskruv bara kan hantera konstant acceleration delades cirkelbågen upp i många små delar, där accelerationen kan ses som konstant i varje del. Detta blir alltså en slags numerisk lösning av integralen

$$a = \int_0^P -\frac{v^2}{r} * \cos\theta \, d\theta \quad (9.13)$$



Figur 9.2: Hastighetsvektorer vid likformig cirkulär rörelse

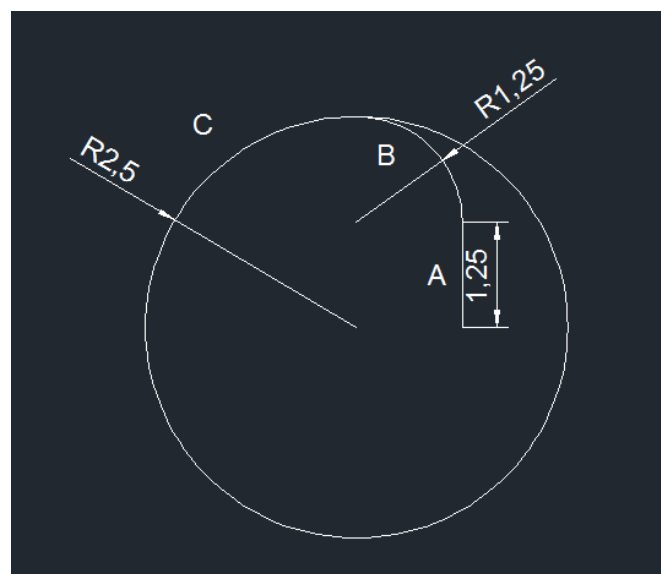


Figur 9.3: Accelerationsvektorer vid likformig cirkulär rörelse

Matlabprogram skrevs för att snabbt kunna beräkna kvadratiska medelvärden för kraft och vridmoment under olika villkor, framförallt vikt på den massa som ska flyttas och en eventuell kulskruvs tröghetsmoment. Dessa program är bifogade i bilaga 1 och 2. Mått togs fram ur den givna ritningen som grund för dessa beräkningar, se bilaga 4. Transportsträckor, dvs. förflyttning utan

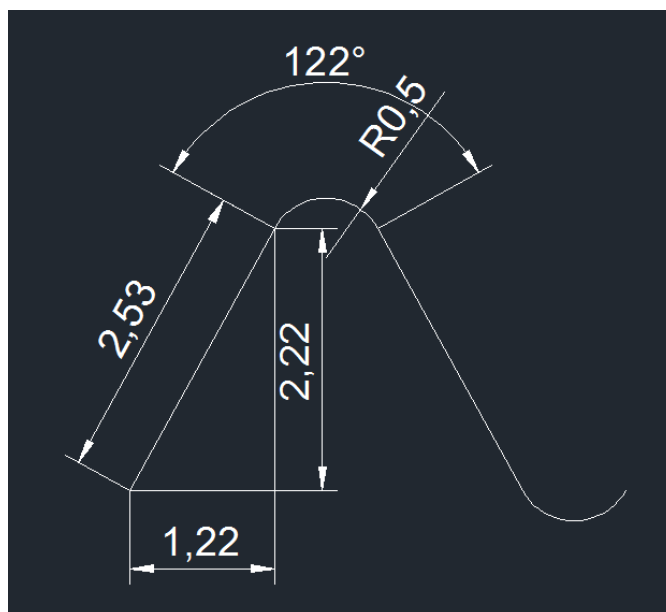
skärning mellan hålen i produkten och dess kant, är med i beräkningarna, däremot räknas inte förflyttningen av skärhuvudet till nästa produkt i plåten med.

För varje hål i ritningen finns en så kallad trepaneringsrörelse, se figur 9.4 Under denna rörelse startar lasern och accelererar längs raksträcken A upp till bearbetningshastighet, för att sedan följa den mindre cirkelbågen B till själva hålets kant C. Anledningen till en sådan rörelse är att man vill säkerställa att materialet längs hålets kant inte bränns eller förstörs under den långsamma förflyttningen vid starten av accelerationen. Samma rörelse är med i varje hål, eftersom beräkningarna förutsätter att när hålet är utskuret kommer lasern att vara på väg mot nästa hål med fart, och när den kommer fram dit behöver den bara accelereras i en ledd för att nå cirkelbågen B med rätt fart. Detta förenklar beräkningarna och bör vara en god approximation av verkligheten.



Figur 9.4: Skärhuvudets rörelse i 2,5mm hål.

En "sågtand" visas förstörd i figur 9.5, och totalt 85 stycken sådana tänder finns på produkten. Konstant hastighet av 0,2 m/s hålls längs den 2,53 mm långa raksträcken, vilket gör att rörelsen tar 12,65 ms. Matlabprogrammen summerar 170 stycken raksträckor och 170 stycken 122-graders krökningar för att beräkna det totala medelvärdet för "sågtänderna".



Figur 9.5: "Sågtand" med mått

Det visade sig att rörelser i ritningens Y-led har ett högre rms-värde än rörelser i X-led. Alla motorval baserar sig därför på att motorn arbetar i Y-led, eftersom det inte går att veta hur produkterna placeras på plåten i den färdiga maskinen.

10. Koncept XY-bord med linjärmotorer

Genom beräkning av kvadratisk medelvärde för olika laster som axlarna skulle förflytta kunde ett urval av motorer, med tillhörande komponenter, väljas fram. Tre alternativ valdes från motorerna som FANUC erbjöd samt ett alternativ från Bosch Rexroth.

10.1 Linjärmotoralternativ FANUC

Med hjälp av tidigare nämnda beräkningar togs alternativen i tabell 10.1 fram från de linjärmotorer FANUC erbjöd [10]:

	Axel	Motor	Kraft [N]	Massa [Kg]	Dimensioner [mm]	Kylning
Alternativ 1	X	LiS 3000 B2/2	1200/3000	12	297x200	Vatten
	Y	LiS 600 A1/4	200/600	1,5	133x71	Vatten
Alternativ 2	X	LiS 1500 B1/4	600/1500	8	297x130	Vatten
	Y	LiS 600 A1/4	200/600	1,5	133x71	Vatten
Alternativ 3	X	LiS 9000 C2/C	3600/9000	27	537x260	Vatten
	Y	LiS 900 A1/4	300/900	2,2	193x71	Vatten

Tabell 10.1: FANUC linjärmotorer

I ovanstående tabell motsvarar X-axeln den största motorn och är därför också den axel som utöver sin egen massa även kommer transportera Y-axeln. Lasten för x-axeln motsvarar därför massan för sin egen primärpart, y-axelns primär, samt sekundärpart, likaså all kabeldragning, optik och linjära encoders. Massan för pump till vattenkylning kan bortses från då pumpen kommer vara stationär. Vattenkylning ger därför enbart en mindre ökning till massan för slang och kabeldragning. Lasten för y-axeln är enbart massan för dess egen primärpart samt kabeldragning, optik och linjär encoder. Kraften på motorerna representeras på så sätt att första värdet är den kontinuerliga kraften och det andra är maximala kraften som motorn kan prestera.

För alternativ 1 så kan X- respektive Y-axeln transportera 35 respektive 7kg utan att överskrida 1045/2940N för x-axeln och 209/588N för y-axeln. Krafterna här avser även ett påslag av en faktor på 1,2 för att motverka framtida förslitningar samt väga upp för mindre motstånd, som till exempel friktion, vilka inte tas in i beräkningarna. Vattenkylning kommer vara ett krav för att accelerationerna i rörelsemönstret, som skapas från referensobjektet, ska kunna uppfyllas utan att överhettas motorn. Detta gäller för samtliga alternativ av både motorer från FANUC och Bosch. Den ökade potentiella kraften kommer dock med en risk. Skulle vattenkylningen gå sönder så kommer motorerna att brännas ut på väldigt kort tid.

Alternativ 2 klarar av att transportera en massa för de olika axlarna på 18 respektive 7kg. Krafterna för dessa laster blir då 537/1512N för x-axeln och 209/588N för y-axeln. Även här avser krafterna ett påslag på 20 % för att väga upp för andra faktorer.

Alternativ 3 avser att den ska kunna köras hur hårt som helst och fortfarande hålla sig under kurvan för den kontinuerliga kraften. Detta betyder att motorn kommer behöva vara avsevärt större än i tidigare exempel. Massan de olika axlarna kommer kunna förflytta motsvarar 45kg för x-axeln och 3.5kg för y-axeln. Krafterna för de axlarna med den lasten motsvarar 1112/3700N för x-axeln och 87/288N för y-axeln. Som tabell 6 anger ligger det maximala kraftbehovet för båda axlarna under de krafter som motorerna kontinuerligt kan producera.

10.2 Linjärmotoralternativ Bosch Rexroth

På samma tillvägagångsätt som för FANUC togs ett alternativ fram från Bosch Rexroth [11] [12].

	Axel	Motor	Kraft [N]	Massa [Kg]	Dimensioner [mm]	Kylning
Alternativ 1	X	MLP070B	550/2000	8,4	285x130	Vatten
	Y	MCP030D	105/420	0,7	247x24.7	Vatten

Tabell 10.2: Bosch linjärmotorer

Värdena i tabell 10.2 representeras på samma sätt som tidigare.

Den maximala massa de två axlarna kan transportera är 16 respektive 4kg. Krafterna som motorerna utsätts för under lasten blir då 544/1813N samt 99/330N. Liksom i de tidigare alternativen så har krafterna ett påslag för att väga upp för okända parametrar. Det som skiljer sig från detta alternativ och alternativ 2 från FANUC är uppbyggnaden av motorn på y-axeln. Konstruktionen Bosch Rexroth har valt är mer utdragen och orsakar därför att en längre sekundärpart krävs som primärparten kan förflytta sig på.

10.3 Areakrav

Vid beräkning av den yta som krävs för ett XY-bord med linjärmotorer så behöver man veta den önskade slaglängden, det vill säga den faktiska yta som arbetsbordet är, samt längden på linjärmotorerna. Längden på axlarna blir då:

$$2 * \text{längden av primärparten} + \text{slaglängden} \quad (10.1)$$

För de olika koncepten får vi då ett areakrav som motsvarar:

- FANUC alternativ 1: $A = (297 * 2 + 650) * (133 * 2 + 650) = 1.140m^2$
- FANUC alternativ 2: $A = (297 * 2 + 650) * (133 * 2 + 650) = 1.140m^2$
- FANUC alternativ 3: $A = (537 * 2 + 650) * (193 * 2 + 650) = 1.786m^2$
- Bosch Rexroth alternativ 1: $A = (285 * 2 + 650) * (247 * 2 + 650) = 1.396m^2$

Observera att de här areakraven är beräknade utan hänsyn till bälgar, som skyddar sekundärparten, eller liknande. På grund av det stora utbudet av olika typer av bälgar är det svårt att göra en exakt uppskattning av ökningen av arean som krävs då bälgarna får väljas ut efter hur maskinen kommer användas. Skulle miljön i maskinen dessutom anses tillräckligt ren så skulle tryckluft för rengöring potentiellt räcka. Ett mindre påslag på areakravet kommer däremot uppstå om skydd genom bälg önskas.

En mindre area är att föredra av flera olika anledningar. För det första så blir maskinen i sig mindre, men kortare sekundärparten kan också leda till en starkare konstruktion då vridmomentet som skapas vid axlarna blir mindre. Ett undantag till detta vore beroende på skillnad i konstruktionen av sekundärparten. De vridmoment som kommer skapas i de här fallen är däremot så små att de kan bortses från. En annan sak som kan vara värt att beakta är att med längre axlar kan det bli så att sekundärparten inte blir helt självbärande utan kan vara i behov av en stöttande konstruktion.

10.4 Linjär encoder

Vid val av encoder finns det inkrementell linjära encoders och absolut linjära encoders. För att encodern ska fungera på ett bra sätt bör den, enligt FANUC, väljas med tio gånger så hög upplösning som den efterfrågade noggrannheten, det vill säga encodern bör ha en upplösning på $\pm 0.002\text{mm}$. Då slaglängden som behövs är under fyra meter och upplösningen är tillräckligt hög på de encoders som FANUC och Bosch Rexroth rekommenderar till sina motorer så kan en absolut linjär encoder väljas. Fördelar med absoluta gentemot inkrementella encoders är att de kan kopplas direkt till servoförstärkaren och därigenom spara in kablar.

Från listan på rekommenderade encoders valdes LC 493F från HEIDENHAIN ut. Samtliga av de rekommenderade tillverkarna hade produkter som uppfyllde upplösningen som krävdes, därför skedde urvalet genom vilken tillverkare som hade störst utbud. Bland de som HEIDENHAIN erbjöd var LC 493F den minsta med en massa på 0,2kg för encodern och 0,5kg per meter räls. Eftersom en så liten massa som möjligt är eftersökt för att hålla lasterna som måste transporteras så låga som möjligt är LC 493F att föredra över övriga encoders. Diametern på kabeln som kopplas till servoförstärkaren varierar mellan 4,5 och 10mm beroende på om kabeln kräver skydd eller inte.

10.5 Servoförstärkare och styrsystem.

En förstärkare används ihop med ett styrsystem för att ge motorn rätt ström för att utföra en rörelse vid ett givet tillfälle under produktcykeln. Motorer från både FANUC och Bosch Rexroth har rekommenderade förstärkare från tillverkaren, dessa redovisas i tabell 10.3. Några skäl att välja andra förstärkare än dessa har inte påträffats, varför dessa valdes.

Motortillverkare	Motor	Förstärkare
FANUC	LiS 3000 B2/2	α iSV40
FANUC	LiS 600 A1/4	α iSV40
FANUC	LiS 1500 B1/4	α iSV40
FANUC	LiS 300 A1	α iSV20
FANUC	LiS 9000 C2/c	α iSV160
FANUC	LiS 900 A1/4	α iSV40
Bosch Rexroth	MLP 070 B	HCS01.1N-W0020
Bosch Rexroth	MCP 030 D	HCS01.1E-W013-A-02

Tabell 10.3: Servo förstärkare till linjärmotorer

Bosch Rexroths alternativ hör till produktserien Indradrive, som är integrerade förstärkare och styrsystem. Styrsystemen uppfyller kraven i specifikationen. För FANUC:s alternativ rekommenderar tillverkaren CNC-enheten Power Motion till samtliga alternativ.

Samtliga produkter som valts ut kan enbart hantera en axel. Anledningen bakom det valet är att det vid hög acceleration på båda axlarna samtidigt, kan bli för mycket för förstärkaren att hantera vilket skulle leda till att motorerna presterade sämre.

10.6 Skenstyrning

För att försäkra sig om att det vridande moment som skapas av lasten på X-axeln bör en stödjande konstruktion användas på motsatt sida av bordet. En lösning skulle vara att använda sig av en styrräls med låg friktion. Tillverkare av produkter för linjära rörelser har oftast ett antal olika alternativ av denna typ inom sitt produktsortiment. Ett exempel skulle vara miniatyrskenstyrningar (LLM) från SKF.

De, liksom linjärmotorer i sig, har tillräckligt låg friktion att de krafterna kan bortses från och enbart kraften som krävs vid acceleration blir av någon vikt.

Om däremot det tidigare nämnda vridande momentet anses vara tillräckligt litet skulle en styrräls helt kunna ignoreras och Y-axeln skulle få hänga fritt, även om det inte är att rekommendera. Linjärmotorer, samt skensyrningar, är normalt konstruerade så de kan klara av ganska stora vridmoment innan det blir någon märkbar påverkan. Vridmomentet beräknas enligt följande:

$$Vridmoment [Nm] = massa[Kg] * g [m/s^2] * hävarm[m] \quad (10.2)$$

Som exempel skulle en massa på 10kg och en hävarm på 1m motsvara 98,2Nm.

11. Koncept XY-bord med kulskruvar.

Precis som för linjärmotorer beräknas ett kvadratisk medelvärde samt ett maximumvärde för vridmomenten som servomotorerna måste kunna leverera. För kulmuttrar blir det lite mer svårberäknat eftersom medelvärdet kommer bero på fler olika variabler än för linjärmotorer. Det första som gjordes var att bestämma dimensionerna på kulmuttern i sig för att därifrån kunna bestämma den last som påverkar systemet. Följande dimensioner valdes:

- $l = 0,8m$
- $d = 0,02m$
- $h = 0,02m$
- $\rho = 7850 \frac{kg}{m^3}$
- $V = 0,0002152m^3$
- $m = 1,97kg$

Där l är längden, d är diametern, h är stigningen, ρ är densiteten, V är volymen och m är massan.

Varvtalet som motorn behöver uppnå för att nå rätt hastighet beror direkt på gängstigningen hos skruven. Med ökande stigning så kommer varvtalet att minska. En stigning på 0,002 meter skulle ge ett varvtal på 10000 rpm medan en stigning på 0,02m skulle ge ett varvtal på 1000 rpm. En planetväxellåda mellan motorn och skruven skulle kunna användas för att sänka varvtalet, men eftersom skruven redan agerar som en slags växellåda via stigningen bedömdes detta som onödigt. Ännu högre stigning hade kunnat användas för att minska det maximala varvtalet, och därigenom accelerationsbehovet för motorn, men då riskerar istället positioneringsnoggrannheten att bli lidande. Dessa dimensioner på skruven ansågs som en lämplig kompromiss. Genom kombinerande av tidigare visade beräkningar på moment för kulskruvar samt rms-värdet togs två alternativ fram från Bosch Rexroth. Det visade sig att det största bidraget till vridmomentsbehovet för systemet kom från motorns eget tröghetsmoment. Inget alternativ kunde hittas hos FANUC eftersom deras motorer hade ett allt för högt eget tröghetsmoment [13].

11.1 Konceptalternativ, Bosch Rexroth

De två alternativen från Bosch är följande[14]:

	Axel	Motor	Vridmoment [Nm]	rpm	Massa [Kg]	Tröghetsmoment [Kgm ²]
Alternativ 1	X	MSK043C-0600-NN	2,8/12.5	1000	3,6 (3,9)	0,00008
	Y	MSK043C-0600-NN	2,8/12.5	1000	3,6 (3,9)	0,00008
Alternativ 2	X	MSK050C-0600-NN	5,2/15	1000	5,4 (6,3)	0,00033
	Y	MSK043C-0600-NN	2,1/12.5	1000	3,6 (3,9)	0,00008

Tabell 11.1: Bosch servomotorer

Boschs broschyrer visar märkvridmoment för motorerna med hjälp av olika körningar och tillåtna temperaturökningar enligt en europeisk standard EN 60034-1. Körning S1 motsvarar här en konstant acceleration upp till maximalt varvtal och bör alltså kunna likställas med märkmoment. Data anges

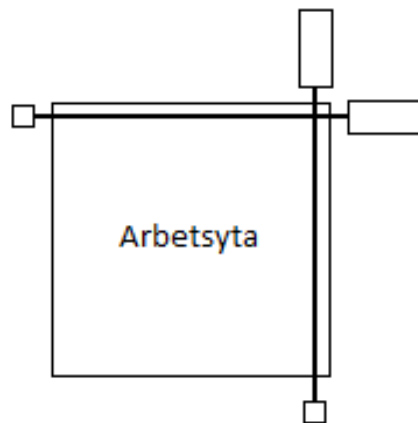
för 60k och 100k, vilket i princip är den temperaturökning i kelvin i motorns lindning som tillåts. Dessa motorer har alla valts utifrån att en temperaturökning på 100 kelvin tillåts.

Alternativ 1 använder sig av två likadana motorer. Massan de klarar att transportera under acceleration beräknas till 15kg medan den beräknade massan som max kommer behöva transporteras blir 8kg. Krafterna som kan levereras vid de behövliga 1000rpm klarar även ett påslag av samma grad som för linjärmotorerna.

Alternativ 2 använder en större motor till att driva den större lasten. En större motor innebär större vridmoment men också ett större eget tröghetsmoment i motorn. De två krafterna väger i alternativet ut varandra och ger ingen direkt vinning i kraft jämfört med alternativ 1. Fördelen är i stället att vid potentiella sammanbrott så är det oftast lättare att reparera större saker än små.

11.2 Areakrav

För att bestämma areakravet vid användning av kulskriv samman med servomotor behövs slaglängd, infästning samt dimensionerna på motorerna i fråga kännas till. En längd på kulskriven motsvarande 800mm anses vara godtyckligt för att motsvara den önskade slaglängden på 640mm samt för infästning i båda ändarna. På motorerna är det enbart längden som kommer påverka areakravet.



Figur 11.1: Beskrivning av areakrav

Längden på de två olika motorerna som används i koncepten är:

- MSK043C-0600-NN: 185,5mm
- MSK050C-0600-NN: 203mm

Vilket ger ett areakrav på motsvarande:

- Bosch alternativ 1: $A = (800mm + 185,5mm)^2 = 0,9712m^2$
- Bosch alternativ 2: $A = (800mm + 185,5mm) * (800mm + 203mm) = 0,9885m^2$

Kulskrivar är ytterst känsliga för smuts och damm, som kan hamna i gängorna på skruven och orsaka skada. En skyddande bälg blir därför ett måste för att behålla den mekaniska toleransen. Det finns ett så stort urval av bälgar att ett exakt påslag på areakravet blir svårt att bestämma. Det verkar också som om det enda avgörande för val av bälg är priset, som vanligen förhandlas fram vid inköp. Därför bortser detta arbete från urval av skyddsbälg.

11.3 Linjär Encoder

Servomotorer använder sig vanligen av en roterande encoder som standard. Men en sådan givare märker inte av eventuella glapp i kulskraven och resten av konstruktionen. En linjär encoder är därför att föredra även här, och kan väljas utifrån samma grunder som användes vid valet till linjärmotorkoncepten i kapitel 10.

11.4 Servoförstärkare och styrning

Precis som för linjärmotorerna så kommer servoförstärkare behövas för att reglera strömstyrkan till motorerna. För Bosch Rexroths servomotorer används samma integrerade servoförstärkare och CNC från Indradriveserien som till linjärmotorerna i kapitel 10. Följande förstärkare rekommenderas till respektive motor:

Motor	Förstärkare
MSK050C-0600	HCS01.1E-W0028-A-03-B-ET-EC-NN-NN-NN-FW
MSK043C-0600	HCS01.1E-W0028-A-03-B-ET-EC-NN-NN-NN-FW

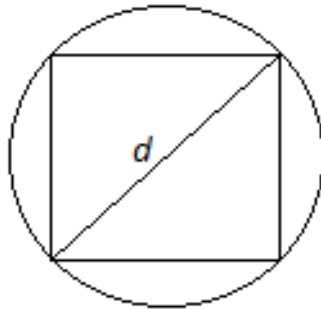
11.5 Skenstyrning

Även i fallet med kulskrav är det rekommenderat att använda någon form av skenstyrning på motsatt sida av vardera axeln. I fallet med kulskrav är det om möjligt ännu viktigare då infästningen för kulskraven också behöver förflyttas med axlarna. Infästningen och skenstyrningen i sig hjälper också till med att stötta upp och förhindra oönskade vridmoment.

12. Länkarmsrobot

Användandet av en robotarm, även kallad artikulerad robot, skulle ge en enkel lösning på problemet ställt av konceptkraven. Dock har den här typen av robot hittills haft problem med precision på grund av att de många roterande lederna och länkade segmenten. Genom en mer kompakt konstruktion går det nu däremot att bygga robotarmar med en noggrannhet av $\pm 0,02\text{mm}$ vilket efterfrågas i kravspecifikationen.

LR Mate tillhör den kompakta typen av robotarm och har en noggrannhet som lever upp till de krav som ställs. Den har däremot ett sfäriskt arbetsområde vilket innebär att arean den måste kunna arbeta inom motsvarar ett sfäriskt tvärsnitt som rymmer arbetsytan som efterfrågas. LR Mate har ett arbetsutrymme som gott täcker det önskade arbetsområdet.



Figur 12.1: Beskrivning av arbetsutrymme

$$d = \sqrt{640^2 + 640^2} \quad A = \frac{\pi d^2}{4} = 409600\text{mm}^2$$

Den faktiska volymen som roboten kommer kräva för att kunna arbeta är dock mycket större än vad minimumkravet på det sfäriska tvärsnittet visar.

För att väga upp för den extra kostnaden likaså det extra utrymme som roboten kräver i förhållande till ett XY-bord bör roboten också agera laddare/plundrare efter slutförd operation. Med en lastkapacitet på 7kg kan den klara av att lyfta en plåt på 1,0mm tjocklek och area motsvarande den efterfrågade arbetsytan (650*650 mm), och fortfarande ha lastkapacitet för både laser och tryckluft. Vid större plåttjocklek börjar roboten däremot förlora sin fördel att kunna agera som laddare/plundrare då den inte skulle orka bära både arbetsstycket och sina verktyg.

12.1 Analys av robotkoncept

Investerings av en redan färdig robot för utförande av arbetet är, som tidigare nämnt, en enkel och snabb lösning. Eftersom lösningen levereras färdig och beräkningar blir av mindre vikt är det i stället av mer intresse att väga fördelar mot nackdelar för att se om det är värt investeringen.

12.1.1 Fördelar

1. Enkel lösning. I stället för att själv bygga ihop ett fungerande koncept levereras det färdigt och behöver enbart köras in för att vara redo att användas.

2. Flexibilitet beroende på robottyp. Många robotar som finns på marknaden har fler axlar än ett vanligt XY-bord och kan därför utföra mer avancerade rörelser. Med fler axlar skulle till exempel 3D skärning också kunna vara en möjlighet.
3. Utföra flera operationer. Med fler axlar kommer som sagt mer rörelsefrihet. Den friheten i sammankoppling med en räckvidd som sträcker sig utanför arbetsområdet så skulle roboten, om dess lastkapacitet tillåter det, kunna agera som laddare/plundrare av maskinen efter utförd operation.

12.1.2 Nackdelar

1. Beroende. Med ett färdiglevererat koncept blir kunden beroende av leverantören. Om något skulle gå sönder kan det vara svårt att ha kompetens eller komponenter för att reparera skadan.
2. Utrymme. En robot kräver ofta mer spelrum än ett XY-bord. Detta eftersom robotar oftast rör sig i tre dimensioner även när de enbart arbetar i ett plan.
3. Svårt att påverka. Om egna preferenser skulle önskas till roboten är det inte alltid lika lätt att få det genomfört. En mindre kund får oftast finna sig i det utbudet som leverantören har.

13. Icke fungerande koncept

Genom användandet av en deltarobot skulle önskad acceleration likaså hastighet kunna mötas på ett enkelt sätt. Möjlighet till deltarobotar med räckvidd att klara av den arbetsyta som kravspecifikationen kräver finns också att tillgå. Något som däremot visade sig efter undersökning av utbudet på marknaden är att precisionen som behövs inte går att uppnå. Genom lätta axlar kan det uppstå väldigt höga accelerationer och hastigheter, men denna svaga konstruktion ger också allt för stora vibrationer och mekaniska fel för att kunna appliceras till det efterfrågade syftet.

Liksom för Delta roboten visade det sig ganska fort att användandet av magnetstyrt arbetsbord som lösningsmetod inte kunde leva upp till de krav som ställs. För att uppnå precision, maxhastighet samt önskad arbetsyta fanns det ett flertal tillverkare, men ingen kunde klara av en acceleration på 7g.

14. Interface

I kravspecifikationen efterfrågades "ett enkelt interface mellan styrning av axlar och HMI". Det visade sig dock vara svårt att konstruera ett färdigt interface utan att ha tillgång till hårdvaran, varför denna del av arbetet tyvärr har fått utgå. Det verkar dock finnas goda möjligheter att lösa kommunikation mellan HMI/PC och axlarnas styrenheter. FANUC:s CNC, Power Motion, kan använda sig av ett eget kommunikationsprotokoll kallat FSSB (FANUC Serial Servo Bus), baserat på optisk kommunikation via fiberkabel. De erbjuder instickskort samt färdiga dll-bibliotek till PC för att denna ska kunna kommunicera med axlarnas CNC. Möjlighet till vanlig ethernetanslutning finns också. Bosch Rexroths Indradrive använder sig av ethernetanslutning som standard, så det bör inte vara några bekymmer att lösa kommunikationen om detta alternativ används.

15. Slutgiltigt urval

För att på ett systematiskt sätt kunna göra en sista utsällning för att få fram det alternativ som bäst uppfyller de krav som ställs så används en urvalsmatris där de olika koncepten vägs mot varandra samt ett referensobjekt.

15.1 Pughs matris

För att på ett systematiskt och objektivt sätt kunna välja mellan flera olika koncept används oftast någon typ av urvalsmetod som till exempel Pughs matris. På grund av den generella natur som Pughs matris har så finns det ett flertal olika sätt att gå till väga.

Det vanligaste är att först ta fram ett antal alternativa koncept som sedan vägs mot varandra. Vägningen sker på så sätt att koncepten ställs mot ett antal kriterier som i sin tur har en viktning beroende på hur viktigt kriteriet i fråga anses vara. Kriterierna i sig är oftast någon typ av egenskap eller krav som önskas uppfyllas, som till exempel miljövänlighet, serviceförmåga eller pris. Om pris skulle anses vara ett väldigt viktigt kriterium så kommer det i sin tur också få en hög viktning. Vice versa så skulle pris få en väldigt låg viktning om priset skulle anses vara av sekundär natur. Normalt används också ett referensobjekt, det vill säga en nuvarande- eller konkurrerande lösningsmetod, för att se om de nya koncepten är bättre eller sämre än de nuvarande.

Följande kriterier är de som kommer användas vid vägningen av de olika koncepten innefattande linjärmotorer, kulskruvar samt länkarmsrobot:

- Pris
- Volym/areakrav
- Servicevänlighet (reservdelar, åtkomlighet, leveransförmåga mm.)
- Vikt (axlar, motorer mm.)
- Lastkapacitet
- Acceleration
- Precision
- Anpassningsbar (klarar flera olika arbeten)
- Support (hjälp från leverantören)
- Livstid
- Tid motorn varit i produktion (undvika barnsjukdomar, risk att sluta produceras)
- Miljöpåverkan (material, krav på smörjning, energibehov mm.)

Pughs Matris, resultat

De olika koncepttyperna samt kriterierna att döma efter skickades till SA för att företaget själva skulle få säga vad de tycker var viktigast i den slutgiltiga produkten. Resultatet utan viktning kan ses som Bilaga 3. För att på ett bättre sätt särskilja de olika alternativen gav SA även de olika kriterierna en viktning beroende på viktiga de ansågs vara:

	Viktning (1=mindre viktigt 5=mkt viktigt)
Volym/areakrav	3
Servicevänlig	3
Vikt	1
Extra lastkapacitet	3
Acceleration	5
Precision	5
Anpassningsbar	2
Support	4
Livstid	4
Tid utrustning varit i produktion	3
Miljöpåverkan	4
Pris	3

Tabell 15.1: Pughs Matris viktning

Med detta som grund kunde följande resultat tas fram:

	Viktning	LR mate (fanuc)	Kulskruv	Linjärmotor
Volym/areakrav	3	2	4	5
Servicevänlig	3	4	3	3
Vikt	1	3	3	3
Extra lastkapacitet	3	3	3	3
Acceleration	5	1	4	5
Precision	5	2	4	5
Anpassningsbar	2	4	3	2
Support	4	3	3	3
Livstid	4	4	3	3
Tid utrustning varit i produktion	3	4	3	3
Miljöpåverkan	4	3	3	3
Pris	3	4	3	3
Summering		39	39	39
Summa Viktning		117	133	144

Tabell 15.2: Pughs Matris resultat

Genom användandet av Pughs matris kunde konceptmetoden med användandet av linjärmotorer slutligen ses som det alternativt bäst anpassat till de kriterier som ställts.

16. Resultat

Sammantaget konstateras att det mest lämpliga alternativet som har funnits av detta arbete är ett XY-bord drivet av FANUCs linjärmotorer. LiS 600 A1/4 kan användas till den övre axeln på maskinen, medan den undre kan drivas av antingen LiS 3000 B2/2 eller LiS 1500 B1/4. Samtliga motorer kan lämpligen styras med FANUCs PowerMotion. Tillräcklig precision är möjlig med denna konfiguration. Till axlar och övrig konstruktion anses kolfiber, smidda magnesiumlegeringar eller låglegeringsstål vara lämpliga material baserat på materialegenskaper. Dock har inte någon färdig konstruktion tagits fram, så noggrannare undersökning av detta kan behövas i eventuell vidare utveckling av produkten. För positionsmätning av verktyget används linjärencodern LC 493F från HEIDENHAIN på båda axlarna. Mjukvaran i styrenheterna kan använda positionsvärdet från encodern för att kompensera för mekaniska fel. Vad gäller kommunikation så finns det möjligheter att kommunicera med HMI-enheten via ethernet, men något färdigt interface har inte kunnat tas fram eftersom det ännu inte finns någon hårdvara att testa den på.

17. Slutsats

De framtagna koncepten fungerar väl i teorin och har stora fördelar i framförallt bearbetningstid mot vad som för tillfället används. Samtliga mekaniska krav på kravspecifikationen har uppnåtts och även i vissa fall överträffats. Vad som fortfarande behövs är konstruktionsberäkningar på hållfasthet samt test på en färdig robot för att få ett konkret resultat. Något som däremot inte kunnat beröras fullt ut är skapandet av ett interface mellan axelstyrning och ett HMI. Detta kunde inte helt utföras då tillgång till komponenter och mjukvara saknades. I stället gjordes en teoretisk undersökning av hur ett sådant interface skulle kunna skapas.

Det finns förstås stora osäkerheter i ett arbete av det här slaget, i och med att ingenting har kunnat testas i praktiken. Uppskattningar har gjorts på vikter som kan behöva förflyttas för att kunna beräkna erforderliga krafter för acceleration, men hur mycket extra belastning som kan tillkomma på axlarna på grund av oförutsedda detaljer är svårt att beräkna. Vad gäller precisionskravet ställt från SA så anses det vara uppfyllt helt på grund av den upplösning på motorer och andra komponenter som tillverkarna har uppgett. Återigen så återstår det att se om detta verkligen blir möjligt i praktiken. Baserat på den här undersökningen så bör det dock finnas en grund för vidare utveckling av en fysisk produkt.

Referenser

1. Csele, Mark. *Fundamentals of Light Sources and Lasers*, Wiley. ISBN 0-471-47660-9 (2004).
2. Oberg, Erik; Jones, Franklin D.; Horton, Holbrook L.; Ryffel, Henry H. *Machinery's Handbook (28th Edition) & Guide to Machinery's Handbook*. Industrial Press. (2008)
3. Yasuhiko Dote, Sakan Kinoshita. *Brushless servomotors : fundamentals and applications* ISBN 0198593724 (1990)
4. Bronislaw Z . Tomczuk. *Linear Synchronous Motors Transportation and Automation Systems, Second Edition*. 978-1-4398-4221-8 (2011)
5. Coletta, Allan R. *The Lean 3P Advantage A Practitioner's Guide to the Production Preparation Process* ISBN 978-1-4398-7911-5 2012
6. *Smart Motion Cheat Sheet*, Electromate Industrial Sales (2013),
<http://www.electromate.com/technicalsupport/smartmotioncheatsheet.pdf>
7. Granta CES 2012 Edupack version 11.9.9 (Databas)
8. CRM system AB, *Hjälprea för planering av SERVODRIFT*
9. Sunil Kumar Singh, Uniform circular motion, <http://cnx.org/content/m13871/latest> (2009)
10. FANUC linear motor LiS series (2013), B-65382EN/04
11. Rexroth IndraDyn L Ironless Linear Motors MCL (upplaga 2), R911330592
12. Rexroth IndraDyn L Synchronous Linear Motors (upplaga 3), R911293635
13. FANUC AC servo motor α i series (2010), GFTE-528-EN/12
14. Rexroth IndraDyn S MSK Synchronous Motors (upplaga 9), R911296289

Bilagor

Bilaga 1: Matlabprogram för kulskruv

Skruvrms2

Skruvrms2 är huvudprogrammet för beräkning av vridmomentsmedelvärde för en kulskruvsaxel. Utvärden är rms-värde för X-led (Mxrms), rms-värde för Y-led (Myrms), total tid för produktcykeln (T) samt högsta värde på vridmomentet under produktcykeln (Mpeak). Funktionen kan ses som en samling av mått från ritningen som i tur och ordning sänds till underfunktionerna mutterskruv och skruvcirkel, där de flesta egentliga beräkningarna sker. Alla värden från underfunktionerna sparas i vektorerna Mx, My, T och Mpeak för summeras i slutet av funktionen.

```
function [Mxrms, Myrms, T, Mpeak] = skruvrms2
v = (1/3);
t = 0;
Mx = 0;
My = 0;
Mmax = 0;
%2,5mm hål
[Mx My t Mmax] = trepan(Mx, My, t, Mmax);
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi*2)], 0.0025, v);
%2,5mm hål
[Mx My t Mmax] = trepan(Mx, My, t, Mmax);
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi*2)], 0.0025, v);
%3,5mm hål
[Mx My t Mmax] = trepan(Mx, My, t, Mmax);
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi*2)], 0.0035, v);
%förlängt 3,5mm hål, "ellips"
[Mx(end+1) Mmax(end+1)] = mutterskruv((2*0.018), 0);
t = [t (2*0.018)];
My(end+1) = 0;
[Mx My t Mmax] = trepan(Mx, My, t, Mmax);
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi*2)], 0.0035, v);
%2,5mm hål
[Mx My t Mmax] = trepan(Mx, My, t, Mmax);
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi*2)], 0.0025, v);
%10 mm rundning, 90 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi/2)], 0.01, v);

%3 mm rundning, 90 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi/2)], 0.003, v);
%sågtänder
[Mx My t Mmax] = sagtandskruv(Mx, My, t, Mmax);
%3 mmm rundning 90 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi/2)], 0.003, v);
%3 mmm rundning 90 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)] = skruvcirkel([0:0.0001:(pi/2)], 0.003, v);
```



```

%3 mmm rundning 90 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)]=skruvcirkel([0:0.0001:(pi/2)],0.003,v);
%10mm rundning ca 194 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)]=skruvcirkel([0:0.0001:3.3929],0.01,v);
%Ryggen, ca 28 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)]=skruvcirkel([0:0.0001:0.4889],0.92096,v);
%20mm rundning ca 193 grader
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)]=skruvcirkel([0:0.0001:3.379],0.02,v);

%transportsträckor
ttpx=[.045 .060 .984 .090 .0615 .087 .2131 .057 .063 ];
ttpy=[.04368 .01782 .42];
[Mxtp,Mmax(end+1)]=mutterskriv(ttpx,0);
[Mytp,Mmax(end+1)]=mutterskriv(ttpy,0);
Mx=[Mx Mxtp];
My=[My Mytp];

Mpeak=max(Mmax);
Mxrms=sqrt(sum((Mx.^2).*[ttpx t])/sum([t ttpx]));
Myrms=sqrt(sum((My.^2).*[ttpy t])/sum([t ttpy]));
T=sum([t ttpx ttpy]);

```

end

Trepan

Trepan är en hjälpfunktion som lägger till värden för trepanering av varje hål, bara för att spara plats i huvudprogrammet Skruvrms2

```

function [Mx,My,t,Mmax]=trepan(Mx,My,t,Mmax)
%tar emot fyra vektorer och lämnar tillbaka samma vektorer med nya värden
%tillagda motsvarande 1.25mm startsträcka och en sväng med 1.25 mm radie
v=(1/3);
[Mx(end+1) Mmax(end+1)]=mutterskriv(0.0048,0);
[Mx(end+1) Mmax(end+1)]=mutterskriv(0.00135,0);
[My(end+1) Mmax(end+1)]=mutterskriv(0.0048,v);
[My(end+1) Mmax(end+1)]=mutterskriv(0.00135,0);
t=[t .0048 .00135];
[Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)]=skruvcirkel([0:0.0001:(pi/2)],0.00125,v);
end

```

Sågtandskriv

Sågtandskriv är också en hjälpfunktion som lägger till måtten för "sågtänderna" på produkten till ritningen.

```

function [Mx,My,t,Mmax]=sagtandskriv(Mx,My,t,Mmax)
%tar emot och lämnar vektorer. Lägger till 170 st "halvtänder", dvs en
%tandsida och en krökning.
v=0.2;

for n=1:170
    [Mx(end+1) My(end+1) t(end+1)
Mmax(end+1)]=skruvcirkel([0.5048:0.0001:2.6367],0.0005,v);

```

```

[Mx(end+1) Mmax(end+1)]=mutterskruv(.01265,0);
[My(end+1) Mmax(end+1)]=mutterskruv(.01265,0);
t=[t .01265];
%transporttid per tand är 12,65 ms
end

```

```
end
```

Skruvcirkel

Skruvcirkel tar in argument, radie och hastighet längs en cirkelbåge. Hastigheten i X-led och Y-led för varje punkt beräknas, och hastighetsdifferenserna samt tidsdifferenserna skickas till funktionen mutterskruv, där de var för sig beräknas som en linjär acceleration. Slutligen summeras dessa kvadratisk och skickas tillbaka till huvudfunktionen.

```
function [Mx,My,T,Mmax]=skruvcirkel(arg,r,v)
```

```

T = ((arg(end)-arg(1))*r)/v; %Periodtiden för cirkelbågen beräknas
dt = T/(numel(arg)); %tiden för ett vinkelsteg beräknas. numel är en
standardfunktion i matlab som säger hur många element som finns i en
vektor.
vx=diff(-v.*sin(arg)); %punkthastigheten är -vsin(arg).
%diff är en standardfunktion som beräknar differensen mellan elementen i en
vektor. Här ger den alltså hastighetskillnaden mellan ett element och
nästa.
vy=diff(v.*cos(arg));
[Mx1 Mxpeak]=mutterskruv(dt,vx);
[My1 Mypeak]=mutterskruv(dt,vy);
Mmax=max(Mxpeak,Mypeak);
Mx=sqrt(sum((Mx1.^2).*dt)/T);
My=sqrt(sum((My1.^2).*dt)/T);

end

```

Mutterskruv

Mutterskruv beräknar momentbehov för en acceleration enligt formlerna i kapitlet "Beräkningar av kulskruv". Formeln tar emot starttid och hastighetsskillnad för en acceleration. Den kan även ta emot hela vektorer av starttider och hastighetsskillnader och beräknar då dessa var för sig och lämnar resultaten i vektorn M. Mpeak är maxvärdet i vektorn M. I den här funktionen ligger också värden för massan som förflyttas, inre tröghetsmoment för motorn samt egenskaper för skruven.

```

function [M,Mpeak]=mutterskruv(ts,dv)
g=9.81;
p=7850; %densitet för stål

l=0.8; %längd skruv
d=0.02; %diameter skruv
h=.02; %gängstigning, m/varv
u=0.1; %friktionskoefficient
vg=0.9; %verkningsgrad
Jmotor=0.00033;
m=10;

```

```

n=(dv./h)*60; %varvtal i rpm
Mf=m*g*u*(h/(2*pi)); %friktionsmoment
Jskruv=(1/32)*pi.*l*p.*d.^4;
Mskruv=Jskruv*n*((2*pi)/60)*(1./ts);
Jlast=m*(h/(2*pi)).^2;
Ms=Jlast.*n*((2*pi)/60)*(1./ts)*(1/vg);
Mmotor=Jmotor.*n^2*(pi./ts)*(1/60);
Mlast=Ms+Mf+Mskruv;
%Jyttre=Jlast+Jskruv;
%Jforhallande=Jyttre/Jmotor
M=Mlast+Mmotor;
%Mmargin=M*1.20;
Mpeak=max(M);
end

```

Bilaga 2: Matlabprogram för linjärmotor

Linjarrms2

Linjarrms2 är motsvarigheten till skruvrms2 men för linjärmotor. Beräkningarna här blir enklare eftersom friktionen för linjärmotorernas lager är så låg att den kan försummas. Den här funktionen beräknar också bara ett kvadratisk medelvärde på accelerationen för varje axel, så svaret som returneras av funktionen kan multipliceras med massan som förflyttas för att få fram rms-värde på kraften som motorn behöver leverera ($F = m * a$). Underfunktionerna här levererar accelerationsvärdet förberett för kvadratisk medelvärde, dvs enligt formen $A^2 * t$, vilket gör summeringen lite enklare i slutet.

```
function[Axrms,Ayrms,T,Apeak]=linjarrms2
v=(1/3);
%startvärdet på t är tiderna för transportsträckor utan acceleration i
%ritningen
t=[.045 .060 .984 .090 .0615 .087 .04368 .2131 .01782 .057 .063 .42];
Ax=zeros(size(t));
Ay=zeros(size(t));
Amax=[0];
%2,5mm hål
[Ax Ay t Amax]=trepanering(Ax,Ay,t,Amax);
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi*2)],0.0025,v);
%2,5mm hål
[Ax Ay t Amax]=trepanering(Ax,Ay,t,Amax);
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi*2)],0.0025,v);
%3,5mm hål
[Ax Ay t Amax]=trepanering(Ax,Ay,t,Amax);
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi*2)],0.0035,v);
%förlängt 3,5mm hål, "ellips"
Ax=[Ax 0 0];
Ay=[Ay 0 0];
t=[t 0.018 0.018];
[Ax Ay t Amax]=trepanering(Ax,Ay,t,Amax);
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi*2)],0.0035,v);
%2,5mm hål
[Ax Ay t Amax]=trepanering(Ax,Ay,t,Amax);
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi*2)],0.0025,v);
%10 mm rundning, 90 grader
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi/2)],0.01,v);

%3 mmm rundning, 90 grader
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi/2)],0.003,v);
%sågtänder
[Ax Ay t Amax]=sagtand(Ax,Ay,t,Amax);
%3 mmm rundning 90 grader
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi/2)],0.003,v);
%3 mmm rundning 90 grader
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi/2)],0.003,v);
%3 mmm rundning 90 grader
```

```

[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi/2)],0.003,v);
%10mm rundning ca 194 grader
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:3.3929],0.01,v);
%Ryggen, ca 28 grader
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:0.4889],0.92096,v);
%20mm rundning ca 193 grader
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:3.379],0.02,v);

```

```

Apeak=max(Amax);
Axrms=sqrt(sum(Ax)/sum(t));
Ayrms=sqrt(sum(Ay)/sum(t));
T=sum(t);
end

```

Trepanering

Motsvarigheten till trepan i beräkningarna för mutterskraven ovan.

```

function[Ax,Ay,t,Amax]=trepanering(Ax,Ay,t,Amax)
%tar emot fyra vektorer och lämnar tillbaka samma vektorer med nya värden
%tillagda motsvarande 1.25mm startsträcka och en sväng med 1.25 mm radie
v=(1/3);
Ax=[Ax 0 0];
Ay=[Ay (68.67^2)*.0048 0];
t=[t .0048 .00135];
[Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0:0.0001:(pi/2)],0.00125,v);
end

```

Sagtand

Motsvarigheten till funktionen sagtandskrav i beräkningarna för mutterskraven ovan.

```

function[Ax,Ay,t,Amax]=sagtand(Ax,Ay,t,Amax)
%tar emot och lämnar vektorer. Läger till 170 st "halvtänder", dvs en
%tandsida och en krökning.
v=0.2;

```

```

for n=1:170
    [Ax(end+1) Ay(end+1) t(end+1)
Amax(end+1)]=cirkelrms([0.5048:0.0001:2.6367],0.0005,v);
    Ax=[Ax 0];
    Ay=[Ay 0];
    t=[t .01265];
    %transporttid per tand är 12,65 ms
end

```

```
end
```

Cirkelrms

Cirkelrms är förstas motsvarigheten till skruvrms i kulskruvsprogrammet.

```
function[Ax,Ay,T,Amax]=cirkelrms(arg,r,v)
```

```

%tar emot argument arg och radie r för en cirkelbåge samt hastigheten v
längs
%cirkelbågen. Argumentet bör vara en vektor med många värden.

T = ((arg(end)-arg(1))*r)/v; %Periodtiden för cirkelbågen beräknas
dt = T/(numel(arg)); %tiden för ett vinkelsteg beräknas.
ax = -((v^2)/r).*cos(arg); %ax och ay innehåller accelerationen för varje
punkt på cirkelbågen
ay = -((v^2)/r).*sin(arg);
xmax=max(ax); %maxvärde på accelerationen skickas också ut
ymax=max(ay);
Amax=max(ymax,xmax);
Ax = sum((ax.^2).*dt); %utvärdet är förberett för kvadratisk medelvärde.
Ay = sum((ay.^2).*dt);
end

```

Bilaga 3: Pughs matris

	LR mate (fanuc)	Kulskruv	Linjärmotor
Volym/areakrav	2 går inte att göra till större maskin	4 går att göra större men har begränsning (egensvängning, varvtal)	5 (finns ingen direkt begränsning, möjligtvis mätskalor)
Servicevänlig	4 krånglar sällan, lätt att flytta, lång leveranstid vid utbyte	3 kräver underhåll, känslig för smuts, lång leveranstid och blir slitage	3 kräver underhåll, känslig för smuts, lång leveranstid och blir slitage
Vikt (spelar inte oss ngn roll)	3	3	3
Extra lastkapacitet (alla kan behöva höjdhållning z-led)	3	3	3
Acceleration	1 kass enligt våra tester med fanuc	4 rätt ok enlra beräkningar beroende av stigning, last och tröghetsmomentet	5 bra enl beräkningar, direktdrift
Precision	2 ligger på gränsen till att inte klara kravet, tolerans kopplad till tre dimensioner (x,y,z)	4 slitage=mekaniskt glapp	5 inget mekaniskt glapp
Anpassningsbar	4 kan användas till mer än ett område	3	2 går inte att återanvända i samma utsträckning
Support (lika hos alla leverantörer)	3	3	3
Livstid	4 (kräver inte samma underhåll)	3	3
Tid utrustning varit i produktion	4 funnit länge, färdigt system	3 kräver montering och ny konstruktion	3 kräver montering och ny konstruktion
Miljöpåverkan (vi TROR att det är rätt lika i el och återvinning)	3	3	3
Pris (tror vi)	4	3	3
Summering	39	39	39

Bilaga 4: Referensprodukt med mått.

