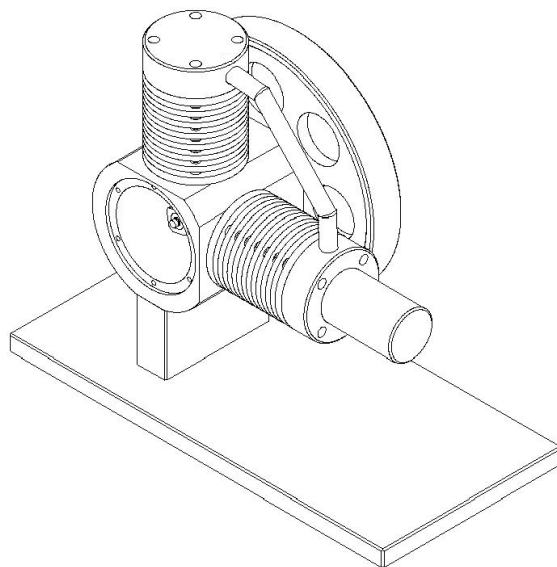




Konstruktion och tillverkning av stirlingmotor för utbildningssyfte

Kandidatarbete i Tillämpad Mekanik

CHRISTOFFER AHLSTRÖM

JAN ANDERSSON

JOACIM GILLBERG

JOHN JOHANNESSON

ROBIN NILSSON

LUDWIG THORSON

Institutionen för Tillämpad Mekanik
Avdelningen för Förbränning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013
Kandidatarbete 2013:05

KANDIDATARBETE I TILLÄMPAD MEKANIK

Konstruktion och tillverkning av stirlingmotor för
utbildningssyfte

CHRISTOFFER AHLSTRÖM
JAN ANDERSSON
JOACIM GILLBERG
JOHN JOHANNESSON
ROBIN NILSSON
LUDWIG THORSON

Institutionen för Tillämpad Mekanik
Avdelningen för Förbränning
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2013

Konstruktion och tillverkning av stirlingmotor för utbildningssyfte
CHRISTOFFER AHLSTRÖM
JAN ANDERSSON
JOACIM GILLBERG
JOHN JOHANNESSON
ROBIN NILSSON
LUDWIG THORSON

© CHRISTOFFER AHLSTRÖM, JAN ANDERSSON , JOACIM GILLBERG ,
JOHN JOHANNESSON , ROBIN NILSSON, LUDWIG THORSON, 2013

Kandidatarbete 2013:05
ISSN 1654-4676
Institutionen för Tillämpad Mekanik
Avdelningen för Förbränning
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: +46 (0)31-772 1000

Omslag:
Konceptbild av stirlingmotorn

Chalmers Reproservice
Göteborg, Sverige 2013

Konstruktion och tillverkning av stirlingmotor för utbildningssyfte
Kandidatarbete i Tillämpad Mekanik
CHRISTOFFER AHLSTRÖM
JAN ANDERSSON
JOACIM GILLBERG
JOHN JOHANNESSON
ROBIN NILSSON
LUDWIG THORSON
Institutionen för Tillämpad Mekanik
Avdelningen för Förbränning
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

I maskinsektionens prototyplaboratorium finns ett behov av övningsobjekt för teknologer som är intresserade av att lära sig verkstadens maskiner. Dagens utbud av övningsobjekt är begränsat till en liten tryckluftsmotor, och därför finns en efterfrågan av ett nytt övningsobjekt som ger teknologer med såväl kort som lång verkstadserfarenhet en utmaning i att förnya eller utveckla sina verkstadskunskaper.

Kandidatarbetet syftar i att konstruera och tillverka en fungerande stirlingmotor med hjälp av de verktyg och resurser som erbjuds i prototyplabbet. Detta skulle då ge underlag för ett koncept som kan användas dels i utbildningssyfte och dels för uppvisningar för att till exempel göra reklam för Maskinprogrammet.

Intresset av stirlingmotorer har på senare tid ökat då behovet av alternativa energikällor har blivit större. Eftersom ingen intern förbränning sker kan motorn drivas helt miljövänligt av exempelvis solenergi. Eftersom förhållandevis lite forskning och utveckling bedrivits på motortypen finns många potentiella förbättringsområden.

En färdig konstruktion med ritningar och tillverkningsinstruktioner har gjorts. För att kunna ha en stabilare grund för valet har en funktionsanalys och en termodynamisk analys gjorts. Konstruktionen har arbetats fram genom användning av 3D-modellering i programvaran Catia V5.

Nyckelord: Stirlingmotor, konstruktion, termodynamik, CNC, svarvning, fräsning, undervisning, design, prototyplabbet, förbränning, tillämpad mekanik, CAD, Chalmers, kandidatarbete, borrning, skruvning, modellering, analys, stirlingcykel, Schmidt-analys, carnotcykel, koncept, utbildning, kravspecifikation, tillverkning, ritningar, instruktioner.

ABSTRACT

The prototype lab of the mechanical engineering programme has a need for exercise objects for students who are interested in learning to use the machines of the workshop. Today's selection of exercise objects is limited to a small pneumatic motor. There is a demand for a new exercise object that provide students with both short and long engineering experience a challenge to develop current or new engineering skills.

The bachelor thesis aims to construct and manufacture a working Stirling engine using the tools and resources offered in the prototype lab. This would then provide a basis for a concept that can be used both as an educational purpose and also be used as a showcase for advertising the mechanical engineering programme.

The interest of Stirling engines have once again increased because of the demand for alternative energy sources has grown. Since the engine has no internal combustion it can be operated entirely eco-friendly by using for example solar energy. Since relatively little research and development regarding Stirling engines have been done there is a large potential for improvement.

Final construction drawings and manufacturing instructions have been made. In order to have a more stable basis for the selections a function and thermodynamic analysis were made. The concept has been developed using 3D modeling in Catia V5.

INNEHÅLL

Sammanfattning	i
Abstract	ii
Innehåll	iii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	2
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	3
1.4 Mål och problemformulering	3
1.5 Metodik	3
1.6 Rapportutformning	4
2 Teoretisk bakgrund	5
2.1 Stirlingmotorns uppbyggnad	5
2.1.1 Arbetskolv	5
2.1.2 Displacementkolv	5
2.1.3 Regenerator	5
2.1.4 Länkage	6
2.2 Stirlingmotorns grundkonfigurationer	6
2.2.1 Alfa	6
2.2.2 Beta	7
2.2.3 Gamma	7
2.3 Termodynamisk process	7
2.3.1 Carnotcykeln	7
2.3.2 Stirlingcykeln	8
3 Metodik	11
3.1 Problemförståelse	11
3.2 Framtagning av motor	11
3.3 Konstruktion av motor	12
3.4 Tillverkning av motor	12
3.5 Termodynamisk analys	12
3.5.1 Schmidt-analys	12
4 Genomförande	15
4.1 Problemförståelse	15
4.2 Framtagning av motor	15
4.2.1 Konceptgenerering och val	15
4.2.2 Prototyp	16
4.2.3 Utveckling av motorns komponenter	17
4.3 Konstruktion av motor	22
4.4 Tillverkning av motor	22

4.5	Termodynamisk analys	23
5	Resultat	25
5.1	Produktpresentation	25
5.2	Termodynamisk analys	26
6	Diskussion	29
7	Slutsats	31
	Referenser	32
A	Uppskattade delar	
B	Materialanskaffning	
C	Kravspecifikation	
D	Strukturschema	
E	Schmidt-analys	
F	Ritningar	
G	Instruktioner	

1 Inledning

Stirlingmotorn är en typ av värmemotor som använder temperaturskillnad för att omväxlande expandera och komprimera ett arbetsmedium i ett slutet system och därmed utvinna mekaniskt arbete. Stirlingmotorn kan indelas i tre olika grundutföranden: alfa, beta och gamma, som skiljer sig åt både gällande prestanda och komplexitet.

En motor av alfakonfiguration har två cylindrar, där den ena värms och den andra kyla. I cylindrarna rör sig kolvar, liknande de i en vanlig förbränningsmotor, som dels flyttar gasen mellan den varma och kalla delen av motorn och dels utvinnet arbetet ur gasens volymändring. En motor av betakonfiguration har endast en cylinder, och i denna löper både en arbetskolv och en displacementkolv, vars diameter är betydligt mindre än cylindern. Displacementkolven utvinnet inget arbete utan har till uppgift att flytta gasen mellan den varma och den kalla sidan av cylindern. Gammakonfigurationens cykel liknar betakonfigurationens, men har arbets- och displacementkolvarna i separata cylindrar, vilket förenklar konstruktionen men ger ett lägre kompressionsförhållande, och därmed lägre prestanda.

Stirlingmotorn uppfanns av Robert Stirling år 1816 och lanserades från början som ett effektivare och säkrare alternativ till ångmotorn. Den utvecklades av Robert Stirling och hans bror James Stirling fram till mitten av 1800-talet och lyckades delvis konkurrera med ångmotorn. Stirlingmotorns stora nackdel är dock att cykeln kräver en hög högsta temperatur för att fungera effektivt, vilket då satte mycket stora krav på den tidens material. Detta gjorde att pålitligheten blev lidande och i takt med att ångmotorerna blev bättre konkurrerades stirlingmotorn ut som drivkälla för industrin. Då den fortfarande var mer lättanvänd än en ångmotor användes den som drivkälla för mindre applikationer som till exempel pumpar fram till början av 1900-talet då den konkurrerades ut av el- och förbränningsmotorer. Den moderna utvecklingen av stirlingmotorn påbörjades av Philips på 1930-talet som utvecklade en stirlingdriven generator avsedd att ge ström till radioapparater i områden utan elektricitet. Generatoren blev ingen succé men företaget samlade på sig mycket kunskap om motortypen. Denna kunskap lade till stor del grunden för stirlingmotorns moderna utveckling (Darlington and Strong, 2005; Walker, 1980).

I och med behovet av att hitta nya alternativa energikällor att ersätta fossila bränslen har intresset för stirlingmotorn ökat igen. Då ingen intern förbränning sker kan motorn drivas av i princip vilken sorts bränsle som helst, oavsett om detta är fast, flytande eller gasformigt. Även bränslen som skulle vara skadliga för komponenterna i en motor med intern förbränning kan användas.

Alternativa energikällor kan vara till exempel geotermisk energi, spillvärme från industrin, värme från sopförbränning, kärnenergi eller solenergi. I solenergiapplikationer har stirlingmotorn den stora fördelen att den till skillnad från exempelvis ångturbiner inte kräver något vatten, vilket är en stor fördel om solkraftverket skall placeras i en öken eller något annat område med begränsad vattentillgång. Stirlingmotorn har även fördelar gentemot solceller då den inte kräver några ovanliga ämnen i sin tillverkning.

Den kommersiellt mest framgångsrika applikationen av stirlingmotorn är dock i kylanläggningar, där en stirlingmotor körs baklänges för att generera en tempera-

turskillnad. Dessa anläggningar kan ge temperaturer ner till 40-60 Kelvin.

Svenska Kockums tillverkar stirlingdrivna ubåtar som ett alternativ till kärnkraftsdrivna. Här är det framför allt stirlingmotorns tysta gång som efterfrågas.

Stirlingmotorn är även intressant ur ett akademiskt perspektiv då den ej studerats eller utvecklats i samma grad som exempelvis otto- eller dieselmotorn.

1.1 Bakgrund

Chalmers prototyplaboratorium, i fortsättningen kallad prototyplabbet, är en mekanisk verkstad som bedriver kurser för användning av både manuella verkstadsmaskiner och CNC-maskiner. CNC (computer numerical control) är automatisering av verktygsmaskiner, som datorstyrs med hjälp av förprogrammerade kommandon. I prototyplabbet finns tillgång till både manuella maskiner och CNC-maskiner. Exempel på möjliga operationer är fräsning, svarvning, borrar, kapning, klippning, pressning och svetsning.

I dagsläget erbjuder prototyplabbet endast ett övningsobjekt, en liten tryckluftsmotor, för intresserade teknologer. Nu finns en efterfrågan att öka utbudet med ett nytt övningsobjekt som ger teknologer med både kort och lång verkstadserfarenhet en utmaning i att utveckla såväl nya som befintliga verkstadskunskaper. Samtidigt är hållbar utveckling något som Chalmers gör stora satsningar på, därför är stirlingmotorn intressant som övningsobjekt.

Stirlingmotorn har även varit lågt prioriterad i termodynamiska kurser då den ansetts ha ett lågt kommersiellt värde. Många, exempelvis chalmester, har hört talas om stirlingmotorn men få kan redogöra för dess termodynamiska funktion. Ämnesområdet har därmed traditionellt varit begränsad och fått stå tillbaka för mer kommersiell förbränningsteknik som till exempel ottomotorn. Då stirlingmotorn i ett tidigt skede konkurrerades ut av ångmaskinen har dokumentation och akademisk litteratur kring stirlingmotorn varit begränsad jämfört med andra värmemotorer.

Anledningarna till att just stirlingmotorn valdes för projektet är flera. Dels är stirlingmotorn inte lika grundligt analyserad ur ett tekniskt eller akademiskt perspektiv som till exempel otto- eller dieselmotorn. Stirlingmotorn är även lämpad som uppvisningsmodell då den är tystgående, ren och lätt att starta och köra. Den är även ett bra exempel på en potentiellt förnyelsebar energikälla, då den kan drivas av till exempel solvärme.

1.2 Syfte

Detta projekt består av konstruktion, tillverkning och till viss del analys av en stirlingmotor.

Syftet med denna studie är att undersöka möjligheterna att konstruera och tillverka en fungerande stirlingmotor med de resurser och förutsättningar som erbjuds i prototyplabbet. Detta för att ta fram ett koncept som kan komplettera grundläggande verkstadsutbildning för teknologer vid Chalmers tekniska högskola. Den framtagna motorn skall även kunna användas för uppvisning då reklam skall göras för Chalmers eller Maskinprogrammet.

I syftet med studien ingår även att redogöra för stirlingmotorns tekniska utformning och teorin bakom dess funktion. Studien ska samla konkret kunskap om tillverkning av och teori om stirlingmotorn, då denna är begränsad och svår att finna i dagsläget.

Nivån på denna kunskap skall vara tillräckligt tydlig för en teknologstudent och studiens resultat skall också kunna fungera som en introduktion inom ämnet stirlingmotorer. Studien skall ge en bra bakgrund för vidareutveckling och optimering av motorn, både konstruktions- och tillverkningsmässigt och termodynamiskt.

1.3 Avgränsningar

Motorns komponenter skall vara väl synliga eftersom motorn skall illustrera stirlingcykeln; hur arbetet genereras och överförs, och även skapa intresse hos åskådaren. Det är därför viktigt att kunna studera motorns komponenter och rörliga delar. Motorn är inte avsedd för att klara av tyngre mekaniskt arbete, då motorns storlek och värmekälla kommer att anpassas för att uppfylla kraven för enkel förvaring och transport.

Vidare ska motorn kunna tillverkas i prototypplabbet, med dess begränsade resurser. Slutligen kommer projektet inte ta hänsyn till optimering av motorns termiska verkningsgrad eller effekt, då motorn, i första hand, ska kunna köras i uppvisnings syfte och inte på ett effektivt sätt producera nyttig energi. Detta gör att störst fokus kommer ligga på själva konstruerandet snarare än termodynamiska analyser och beräkningsmodeller. För att kunna bibehålla många lösningar har dessa avgränsningar gjorts.

1.4 Mål och problemformulering

Huvuduppgiften är att konstruera en stirlingmotor, med fullständiga ritningar och instruktioner för tillverkning, som skall vara tillräckligt simpel för att kunna serie-tillverkas i samband med verkstadsutbildning. Detta innebär att motorn ska ha ett minimum av ingående komponenter och tillverkningsoperationer, exempelvis fräsning eller svarvning. Tanken är också att motorn skall kunna tillverkas med hjälp av prototypplabbets maskinutbud. Stirlingmotorn skall vara pedagogiskt tilltalande och avancerad nog att skapa intresse hos bland annat blivande teknologer. Den ska även vara praktisk att använda och förvara, därmed skall motorns komponenter vara kompakt monterade och ha en begränsad storlek. Problemet är att lyckas balansera de motstridande kundkraven och vad som faktiskt är möjligt, för att slutligen uppnå en slutprodukt som uppfyller alla kraven. Tidigare dokumenterade arbeten har aldrig gjorts och därför finns det nu ett behov.

1.5 Metodik

Arbetet är i grova drag uppdelat i fem faser. I den första fasen genomfördes litteraturstudier för att samla grundläggande teori om stirlingmotorn. Kunden tillika

initiativtagarens krav och önskemål till projektet undersöktes. Dessa studier tillsammans med krav från projektbeskrivningen gav underlag till en kravspecifikation för projektet. I nästa fas var det framställning och utveckling av motorn som gjordes. I den tredje fasen skapades visuella modeller och ritningsunderlag som togs fram med hjälp av Catia V5, en mjukvara för tredimensionell datorstödd design (hädanefter kallat CAD). En tredimensionell skrivare användes under projektets gång till att skriva ut vissa komponenter för att testa motorns mekanik. Därefter sker tillverkningen av motorn med hjälp av ritningsunderlaget från tredje fasen. I den femte och sista fasen redogörs en termodynamisk analys med fokus på att jämföra det slutgiltiga konceptet med den termodynamiska teorin.

1.6 Rapportutformning

Kandidatarbetet består av sju kapitel. Det första kapitlet, inledning, innehåller problem, bakgrund, syfte, avgränsningar och mål. Kapitel två tar upp teorin bakom en stirlingmotor, medan metoder och genomförande behandlas i kapitel tre respektive fyra. Resultatet presenteras i kapitel fem, som delvis fungerar som underlag för diskussionen i kapitel sex. Slutligen presenteras i kapitel sju sammanfattade idéer och ledande konsekvenser, inklusive ytterligare framtida arbetsförslag.

2 Teoretisk bakgrund

I detta kapitel redogörs den teori som används för att för att analysera arbetet. Den teoretiska bakgrunden presenterar stirlingmotorns uppbyggnad och konfigurationer. Kapitlet beskriver även teorin bakom stirlingcykeln, vilket lägger grunden för analysen av motorn.

2.1 Stirlingmotorns uppbyggnad

Stirlingmotorn är uppbyggd av en rad olika komponenter. Några ingående delar som exempelvis värmecylinder, vars uppgift är att skapa ett högt tryck för att driva motorn; kylcylindrar, som snabbt skall kyla arbetsmediet för att den tidigare processen skall kunna upprepas; och vevhus, som skall fungera som motorns stomme. Detta är några elementära komponenter som inte behöver vidare introduktion. I kommande kapitel presenteras några kritiska delar för att skapa en djupare förståelse om stirlingmotorn.

2.1.1 Arbetskolv

Arbetskolven utvinnet arbetet ur arbetsgasens volymförändring, precis som hos en konventionell förbränningsmotor. Beta- och gammatypen har i sitt enklaste utförande en arbetskolv. Alfamotorn har däremot två arbetskolvar som även förflyttar arbetsgasen mellan motorns varma och kalla del.

2.1.2 Displacementkolv

Displacementkolven används för att förflytta arbetsgasen mellan den varma och den kalla delen av motorn. Endast beta- och gammakonfigurationen använder en displacementkolv, då alfa har två arbetskolvar och använder dessa för att förflytta gasen. Dock kan en av arbetskolvarna förlängas med en displacementdel och på så sätt flytta tätningen mot cylinderväggen till en kallare del av cylindern.

Displacementkolven skiljer sig från andra kolvtyper, detta på grund av dess stora volym (upp till två tredjedelar av cylindervolymen), och att den inte sluter tätt mot cylinderväggen utan är konstruerad för att låta arbetsgasen strömma förbi den. Den är ofta ihållig eller tillverkad i ett lätt material för att minimera massan (Darlington and Strong, 2005).

2.1.3 Regenerator

Regeneratoren fungerar som en intern värmeväxlare som används för att lagra värme mellan den varma och den kalla delen. Detta åstadkoms genom att kyla ner arbetsgasen vid passage från den varma till den kalla delen, för att sedan värma upp den igen då gasen strömmar tillbaka till den varma delen. Syftet är att värmen ska bibehållas inom systemet istället för att bytas ut av omgivningsgasen. Detta

skulle teoretiskt möjliggöra den termiska verkningsgraden att närma sig carnotcykelns termiska verkningsgrad. Den termiska verkningsgraden ökar på grund av den återvunna värmen som annars hade flödat irreversibelt genom systemet.

Regeneratoren ska ge tillräcklig värmeöverföringskapacitet för att kunna användas som en värmeväxlare utan att den skapar överflödigt dödvolym. Dessa två parametrar är motstridiga och måste vägas mot varandra för att uppnå maximal effektivitet.

En regenerator kan bestå av till exempel ett finmaskigt metallnät eller en tunn ihoprullad metallplåt, eller en mer komplex matris i metall eller ett keramiskt material.

Regeneratoren är en viktig komponent, och uppfanns av Robert Stirling själv, och brukar därför karaktärisera en ”riktig” stirlingmotor. Många lite mindre motorer har ingen extern regenerator utan använder materialet i kolvar, cylinderväggar och överföringskanaler för att genomföra en värmeväxling (Darlington and Strong, 2005).

2.1.4 Länkage

Länkaget har precis som hos konventionella förbränningsmotorer uppgiften att koppla ihop kolvarnas rörelse med en rotation hos vevaxeln. Eftersom stirlingcykeln kräver en fasförskjutning på cirka 90° mellan kolvarna måste länkaget vara konstruerat för detta. Ett speciellt länkage som kan användas till stirlingmotorer är Ross-Yoke-länkaget, som förutom att ge en korrekt fasförskjutning även minimerar vevstakarnas sidorörelser. Detta åstadkoms med hjälp av ett triangelformat ok vars ena hörn fästs vid vevaxeln. Vevstakarna fästs i de andra hörnen, och en infästning i mitten av vevaxelfästets motstående sida gör att triangeln kan röra sig rakt mot och rakt från vevaxeln, men inte i sidled. Detta gör att vevstakarnas infästningspunkter följer en bana som nästan är en rak linje, parallell med linjen som går genom triangelns infästning och vevaxelns centrum (Darlington and Strong, 2005).

2.2 Stirlingmotorns grundkonfigurationer

Som tidigare nämnts i inledningen kan stirlingmotorn tillverkas i tre olika konfigurationer där utformningen är olika. Detta påverkar motorns egenskaper exempelvis som effekt, verkningsgrad och möjlig värmekälla. I följande kapitel kommer utformningen och skillnaderna mellan dessa tre konfigurationer att redogöras för.

2.2.1 Alfa

Alfamotorn består av två täta kolvar i två separata cylindrar, där den ena cylindern är kall och den andra varm. Mellan cylindrarna finns en kanal som gör förflyttning av arbetsgasen möjlig. I kanalen finns det en regenerator som fungerar som en värmeväxlare.

En alfamotor har en hög effekt-volymkvot, men kräver tätning mellan en arbetskolva och cylinderväggen även på den varma sidan av motorn vilket kan leda till tekniska svårigheter. Problemet kan dock minskas genom att arbetskolven förlängs med en displacementdel och tätningsytan flyttas till en kallare del av cylindern (Darlington and Strong, 2005).

2.2.2 Beta

Betamotorn består utav endast en cylinder med båda kolvarna inuti. Den ena kolven har lös passning och utvinner ingen effekt från de expanderande gaserna. Istället fungerar den som en displacementskolv där den förflyttar gasen mellan den varma och kalla delen.

Eftersom båda kolvarna rör sig i samma cylinder och skall röra sig med 90° förskjutning blir länkaget hos en betamotor relativt komplext.

Betakonfigurationen använder oftast ingen extern regenerator, den kan istället vara inbyggd i cylinderväggen. Alternativt kan displacementkolven användas som en regenerator (Darlington and Strong, 2005).

2.2.3 Gamma

Gammamotorn liknar betamotorn men istället för att ha kolvarna i samma cylinder används två separata cylindrar. Mellan cylindrarna finns en kanal där gasen kan strömma mellan motorns varma och kalla del. Gammamotorn har ett lägre kompressionsförhållande än de andra konfigurationerna men är mekanisk enklare och kan lättare drivas av små skillnader i temperatur. Dessa anledningar gör konfigurationen vanlig bland modellmotorer (Darlington and Strong, 2005).

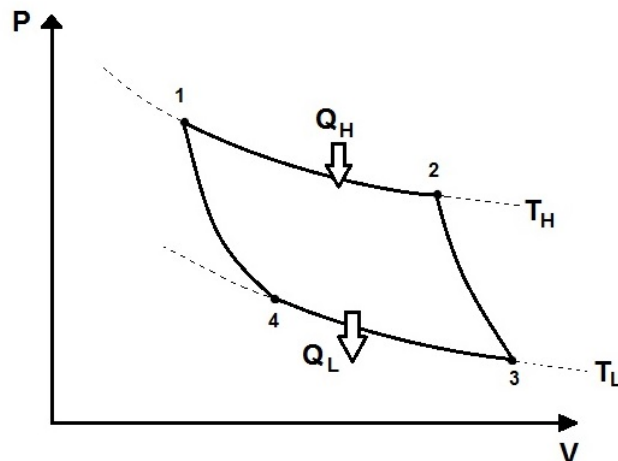
2.3 Termodynamisk process

För att förstå hur en stirlingmotor fungerar krävs insikt i dess termodynamiska förlopp. Stirlingmotorns arbetsprocess är nära besläktad med den ideala carnot-processen och därför kommer denna process att redogöras först. Därefter kommer stirlingmotorns process jämföras och förklaras med carnotprocessen.

2.3.1 Carnotcykeln

Stirlingmotorn är som tidigare nämnts en värmemotor. Värmemotorer arbetar i öppna eller slutna system där värmeöverföring sker till eller från ett arbetsmedium som genomgår en cykel. Ofta är detta arbetsmedium en fluid, alltså vätska eller gas (Cengel and Boles, 2012).

Carnotcykeln är den mest ideala termodynamiska cykeln en värmemotor kan prestera. Det är en teoretisk reversibel cykel framtagen år 1824 av den franske ingenjören Sadi Carnot. Likt alla värmemotorer är grundfunktionen att genom temperaturskillnader utvinna arbete som i sin tur kan bli konverterad till olika sorters energi. För carnotcykeln är processen reversibel, vilket är det som gör carnotcykeln till den teoretiskt mest effektiva cykeln inom termodynamiken (Cengel and Boles, 2012). Carnotcykeln består två isotermiska och två adiabatiska processer. I figur 2.1 nedan presenteras carnotcykeln i ett p - V -diagram följt av en beskrivning för varje process i cykeln.



Figur 2.1: p - V -diagram över carnotcykeln.

Reversibel isotermisk expansion

(Process 1-2) Konstant värme av hög temperatur tillförs utan förluster och arbetsmediet expanderar.

Isentropisk adiabatisk reversibel expansion

(Process 2-3) Arbete utvinns ur systemet då volymförändring sker genom att kolven rör sig ut ur cylindern. Kolv och cylinder antas vara termiskt isolerade. Ingen värmeöverföring sker men expansionen sänker värmets i arbetsmediet. Entropin hålls konstant.

Reversibel isotermisk kompression

(Process 3-4) Värmeöverföring från arbetsmediet sker samtidigt som omgivningen håller låg konstant temperatur. arbetsmediets volym minskar och komprimeras.

Isentropisk adiabatisk reversibel kompression

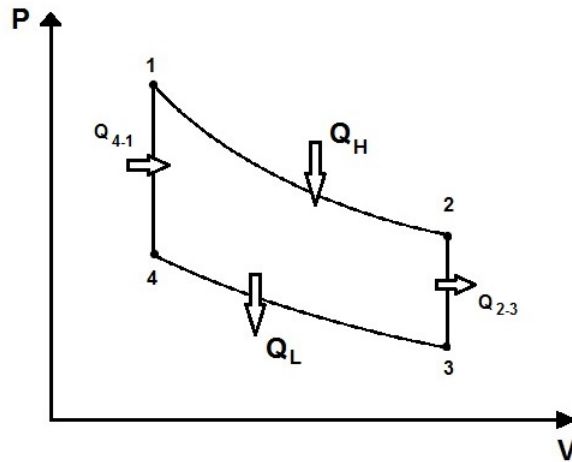
(Process 4-1) Arbete tillförs systemet av kolven som rör sig inåt i cylindern och arbetsmediets temperatur stiger adiabatiskt utan någon värmeöverföring. Entropin hålls konstant.

För att processerna ska vara reversibla krävs det att de sker kvasistatiskt. Det innebär att processerna genomförs oändligt långsamt så att ett jämviktstillstånd råder vid varje tillstånd under hela processen. Detta är inte möjligt att nå praktiskt utan ingår i det teoretiska förfarandet kring carnotcykeln.

2.3.2 Stirlingcykeln

I stirlingcykeln är de två isentropiska processerna från carnotcykeln ersatta med två isokora värmeöverföringsprocesser (Cengel and Boles, 2012). Det innebär att volymen

hålls konstant under dessa processer. Dessutom används en regenerator i förloppet för att öka verkningsgraden. Användning av regenerator skulle innebära att går värmes ut till termisk lagring av energin under en del av förloppet, och i en annan del av förloppet återgår värmes till arbetsmediet. Motsvarande processer i stirlingcykeln gentemot carnotcykeln ses i figur. 2.2.



Figur 2.2: p - V -diagram över stirlingcykeln.

Reversibel isotermisk expansion

(Process 1-2) Konstant isotermisk expansion då värme, Q_H , utifrån tillförs arbetsmediet. Kolven i värmecylindern börjar då utföra arbete.

Isentropisk adiabatisk reversibel expansion

(Process 2-3) Isokor värmeöverföring då värme, Q_{2-3} , leds ut från arbetsmediet och lagras i regeneratoren. Här rör sig båda kolvarna vilket då tillåter konstant volym under processen.

Reversibel isotermisk kompression

(Process 3-4) Konstant isotermisk kompression där värme, Q_L , från arbetsmediet förs bort. Här rör sig arbetskolven inåt och komprimerar arbetsmediet i arbetscylindern.

Isentropisk adiabatisk reversibel kompression

(Process 4-1) Isokor värmeöverföring där värme, Q_{4-1} , från regeneratoren återgår och värmer arbetsmediet igen. Båda kolvarna rör sig igen och arbetsmediet rör sig tillbaka till värmecylindern via regeneratoren.

3 Metodik

I detta kapitel beskrivs de metoder som används under processens gång för att nå en slutprodukt och analys. Processen delades in i fem faser: problemförståelse, framtagning av motor, konstruktion av motor, tillverkning av motor och termodynamisk analys.

3.1 Problemförståelse

För att kunna förstå de olika problemen och vilka tillvägagångssätt som skall användas, för att uppnå syftet och målen, behövdes en förstudie, kompetensutveckling, kartläggning av kundvärde och en kravspecifikation för att kunna lägga upp arbetet på ett bra sätt.

En kravspecifikation är en dokumentation vars syfte är att underlätta informationsflödet mellan tillverkare och kund. Detta dokument framställdes genom att båda parter diskuterade och definierade produktens krav och önskemål. Kraven i specifikationen kan delas in i funktionella och icke funktionella krav (kvalitetskrav). Detta är ett utmärkt verktyg vid framställning av en produkt.

Utöver teorin krävdes en praktisk utbildning för att kunna utvärdera tillverkningsprocessen som användes vid framtagning av slutprodukten. Detta genomfördes genom en grundläggande utbildning i CNC-teknik och verkstadsarbete, i samband med tillverkning av en liten tryckluftsmotor, "*Pysen*".

3.2 Framtagning av motor

För att ta fram ett bra koncept behövdes en stor mängd lösningar för varje komponent. Lösningar togs fram genom brainstorming, rådfrågning av experter inom relevanta områden och återanvändning av befintliga lösningar.

Under konceptgenereringen hölls en intensiv kommunikation med kunden för att skapa ett grundkoncept vilket följde kundens visioner och idéer angående design. Efter att konceptets utseende hade accepterats behövde ingående komponenters lösningar korsbefruktas och optimeras för att skapa det slutgiltiga konceptet. Under korsbefruktningen ställdes den befintliga lösningen mot de övriga lösningarna på olika sätt, med olika variabler i fokus. Sedan uppdaterades konceptet med den lösning som var överlägsen.

Parallellt med processen utnyttjades en 3D-skrivare, en maskin som producerar fysiska modeller av tredimensionella CAD-modeller. Till skillnad från traditionell bearbetning som skär bort material, bygger en 3D-skrivare upp modellen i en additiv process som vertikalt härdar konturerna lager för lager (Creative Tools, 2013).

Utgångspunkten vid materialvalet var att minimera antalet olika material för att underlätta materialanskaffningen, men även för att motorn skulle få enhetligt utseende. Eftersom motorn skall kunna användas som uppvisningsobjekt var det viktigt att materialet var korrosionståligt. Utöver detta skall transporten och förvaringen av motorn vara enkel. Därför var det viktigt att minimera vikten för respektive del.

3.3 Konstruktion av motor

CAD nyttjades vid konstruktionen av den slutgiltiga lösningen. Detta används för att underlätta modellering, modifiering, analysering och optimering av konceptet. I CAD modellerades konceptet för att skapa underlag för tillverkningen i form av exempelvis ritningar, grovplanering av tillverkningsmetod, samt att kunna presentera och få ett godkännande av kunden. Programmet ger även stöd för simulering av motorns dynamik för att kunna säkerställa att motorns rörliga delar inte löper risk för kollision eller är rörligt begränsade. Slutligen gav CAD, under tillverkningens gång, stöd till att finslipa modellen med mått, smådetaljer och maskinelement efter vad prototypplabbets resurser tillåter.

3.4 Tillverkning av motor

Det slutgiltiga målet var att åtta exemplar av stirlingmotorn skulle tillverkas med hjälp av resurserna i prototypplabbet, för att utvärdera dels att motorn kan tillverkas på en begränsad tid, av en person med begränsad erfarenhet av verkstaden, och dels att motorns prestanda är tillfredställande. Även saker som estetik, funktion och verkningsgrad utvärderades och det var enkelt att få feedback från kunden om resultatet uppfyllde de faktiska förväntningarna och kraven.

Innan kunden fick se den fysiska modellen skulle den först jämföras med kravspecifikationen. Detta för att säkerställa att inga kompromisser uppstått vid exempelvis tillverkningen. Problem som uppstod och moment som var svårhanterade och lättglömda under tillverkningen dokumenterades för att underlätta och ge extra stöd vid framtida tillverkning för andra teknologer.

3.5 Termodynamisk analys

Den termodynamiska analysen gjordes med syftet att ge ökad förståelse för stirlingcykeln inför design- och tillverkningsprocesserna, och för att kunna göra en grov analys av motorns prestanda. Den inkluderades i rapporten dels för att ge läsaren en grundläggande förståelse för stirlingcykeln, och därmed ett underlag för att förstå de designval som gjorts, och dels som stöd för eventuell vidareutveckling av motorn.

3.5.1 Schmidt-analys

Som verktyg för att analysera stirlingmotorn termodynamiskt och beräkna dess effekt genomfördes en Schmidt-analys. Schmidt-analysen härstammar utifrån en matematisk analys över stirlingmotorn utvecklad av Gustav Schmidt.

Enligt Senft (2007) är detta en ideal modell, men en modell som utmärkt speglar väsentliga komponenter av motorn, särskilt det grundläggande samspelet mellan mekaniskt begränsade rörelse av dess delar och den resulterande termodynamiska cykeln.

Denna metod utgår ifrån den ideala gaslagen, $pV = mRT$, och är baserad på isotherm kompression och expansion av ett arbetsmedium. Metoden är ett verktyg

för att ta fram ett p - V -diagram för motorns stirlingcykel samt beräkna dess effekt. Detta gjordes genom att beräkna momentanvolymen under en cykel och därefter dess momentantryck. Parametrar för beräkningen härleddes ur givna dimensioner för motorn, tidigare kända konstanter och rimliga antaganden kring motorns drift.

Då Schmidt-analysen behandlar en ideal process krävs även vissa grundläggande antaganden enligt Walker (1980).

- Regeneratorns (värmeväxlaren) process är ideal.
- Momentant tryck är lika genom hela motorn.
- Arbetsmediet följer den ideala gaslagen.
- Systemet är tätt och arbetsmediet massa är konstant.
- Volymvariationer sker i sinusform.
- Regeneratorns gastemperatur är genomsnittet av den expanderade och komprimerade gastemperaturen.
- Cylinderväggarnas och kolvarnas temperatur är konstant.
- Arbetsmediet temperatur är konstant i övrig dödvolym.
- Motorns varvtal hålls konstant.

Samtlig beräkning sker i MATLAB som är ett programmerbart beräkningsprogram. Kod med tillhörande lösningsföljd finns i appendix E.

För den färdiga motorn kan den tillförda energin mätas genom att det tillförda bränslet vägs och multipliceras med energivärdet. Om även motorns utförda arbete mäts kan verkningsgraden beräknas och jämföras med den ideala processen. Dessa mätningar kan sedan användas för att undersöka ändringen i prestanda vid eventuella förändringar av motorn.

4 Genomförande

I kapitlet redogörs tillvägagångssättet som används för att lösa problemet. Delkapitlen är inte nödvändigtvis i kronologisk ordning utan många moment har utförts parallellt eftersom många faser och moment överlappas med varandra.

4.1 Problemförståelse

Utifrån projektuppsdragsbeskrivningen och möte med kunden sammanställdes grundläggande krav och önskemål till en kravspecifikation. Analysering av verkstadens tillgångar gav flera krav på tillverkningsmöjligheten som anpassades för vissa komponenter. Möte med verkstadsansvariga medförde ytterligare krav angående tillverkning, men också material. Kundens krav och fokus ligger främst på att motorn ska fungera och att designen är intresseväckande och professionellt tilltalande. För hela kravspecifikationen se appendix C.

4.2 Framtagning av motor

Insamlingen av idéer, samt brainstorming av nya lösningar, berörde alla tre motorkonfigurationerna. Detta för att inte, i ett tidigt skede, bli fastlåsta vid en av konfigurationerna, innan en ingående granskning gjorts av respektive konfiguration. Detta moment genomfördes både individuellt och i grupp för att få en bred spridning.

Genererade idéer som ansågs relevanta sammanställdes i ett strukturschema. Ett trädiagram där alla relevanta lösningsförslag och material listades för varje ingående komponent i stirlingmotorn. För hela strukturschemat se appendix D.

4.2.1 Konceptgenerering och val

Eftersom det finns tre konfigurationer av stirlingmotorn och det blev kritiskt att välja en av dem för att smidigt kunna gå vidare i konceptframtagningen, detta främst för att de har relativt olika utseende. Här var det främst motorns utseende och antal komponenter som låg i fokus vid valet av motorkonfiguration.

Det beslöts att inte tillverka en betamotor då denna inte uppfyllde krav för utseende och mekanisk insikt, vilket alfa- och gammakonfigurationerna gjorde. För de resterande togs tre koncept fram med så många liknande delar som möjligt; en alfamotor, en gamma med Ross-Yoke och en gamma utan Ross-Yoke. I figur 4.1 nedan illustreras båda gammakoncepten.

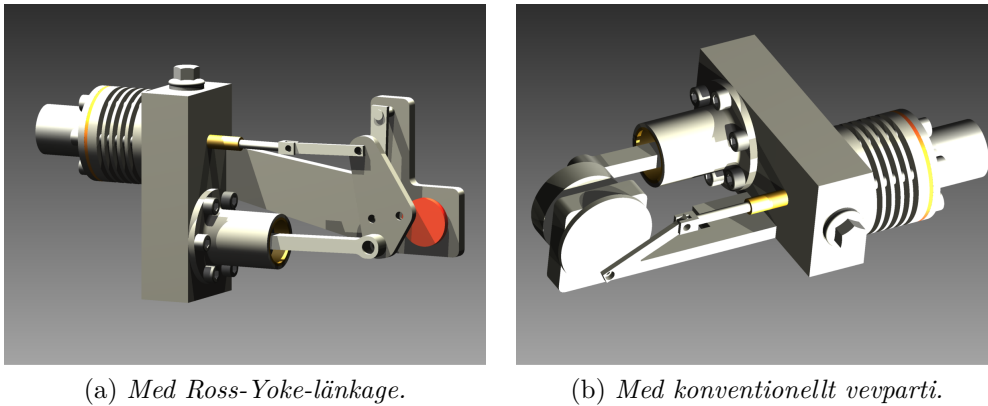
Ross-Yoke lösningen var väldigt estetiskt och mekaniskt tilltalande, dock krävs djupare kunskap inom området hos åskådaren för att kunna förstå hur ett Ross-Yoke-länkage fungerar. Konceptet hade även fler komponenter än de andra två och ansågs inte vara tillräckligt pedagogisk, vid uppvisning, för en blivande teknolog. De två resterande koncepten var både estetiskt och pedagogiskt tilltalande, men alfamotorn uppfyllde kravet bäst med avseende på att minimera antalet komponenter. Se tabell 4.1. För en mer detaljerad beskrivning se appendix A.

Tabell 4.1: Totalt uppskattat antal delar per koncept.

	Alpha	Gamma Ross-Yoke	Gamma
Totalt antal delar	25	31	28
Totalt olika delar	16	22	19

Samtidigt minskade tillverkningskomplexiteten på grund av att likadana lösningar kan återanvändas på olika ställen, exempelvis kan kylcylindern användas både på den varma och på den kalla sidan. Därmed valdes alfamotorn som den slutgiltiga motorkonfigurationen för vidare utveckling. En annan fördel med den valda konfigurationen är att den ger goda möjligheter för experiment med regenerators.

Vidare, tillsammans med kravspecifikation, strukturschemat och ytterligare konsultation med verkstadsansvariga, genererades nya lösningar för att optimera konceptet av den valda motorkonfigurationen mot en slutgiltig lösning. Därefter skapades en prototyp av tänkta lösningar för alfamotorn.

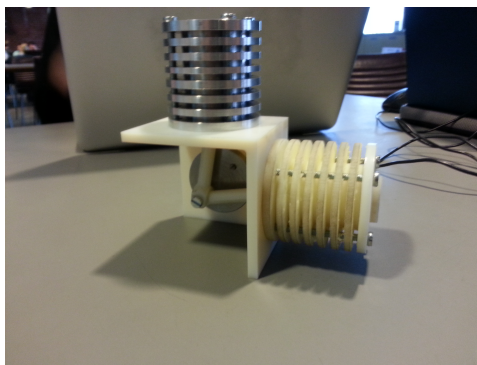


Figur 4.1: Illustration av gammakoncepten.

4.2.2 Prototyp

Parallellt med detta användes prototypplabbets 3D-skrivare för att tillverka en förenklad prototyp i plast för att få en känsla av konceptets storlek och nuvarande utformning, samt för att enklare kunna visualisera andra möjliga lösningar och utformningar för motorns olika komponenter. Detta hjälpmedel användes eftersom ett stort fokus har legat på motorns utseende och uppvisningsförmåga, och det är svårt att visualisera en bild utifrån en konceptuell produkt. I figur 4.2 nedan visas prototypen.

Efter att prototypen var tillverkad påbörjades arbetet med att ta fram mer detaljerade lösningar för komponenterna i motorn. Det bestämdes också att motorn, om möjligt, skulle innehålla så många olika maskinelement som möjligt för att visualisera flertalet lösningar. Dessa kan vara lager, klämförband, skruvförband eller kilförband som är bra exempel på olika maskinelement. Här tillkom ett önskemål om att försöka utforma en motor med så låg inre friktion och tröghetsmoment som möjligt. Detta för att motorn ska få en större chans att fungera och öka dess verkningsgrad i och med mindre friktionsförluster.



Figur 4.2: *Tillverkad prototyp.*

4.2.3 Utveckling av motorns komponenter

Som tidigare nämnts har syftet med motorn varit att den ska fungera som ett uppvisningsföremål och att den ska vara tillverkningsbar i prototyplabbet. Det har inneburit att fokus främst legat på dessa punkter då olika lösningar ställs mot varandra.

Nästa steg var att utveckla varje ingående del i den valda motorkonfigurationen. Komponenterna utvecklades tillsammans i en helhet och inte var för sig. Genomgående för framtagningen av de olika delarna är att de ska kunna tillverkas av personer som inte tidigare har verkstadserfarenheter. Komponenterna är även konstruerade för att minska antalet uppspänningar i maskinerna samtidigt som de kan fått en mer komplex geometri för att minska det totala antalet delar eller att dessas toleranser inte ska bli för stränga, vilket underlättar tillverkningen. Utöver detta har motorn konstruerats med modultänk för att underlätta utbyte av delar.

Med hjälp av CNC-maskiner skulle mer avancerade geometrier kunna tillverkas, dock ska inte motorn vara beroende av CNC-maskinerna. Tanken är att hela motorn ska kunna tillverkas i de manuella maskinerna men att alternativet finns att tillverka vissa delar, eller alla, i CNC-maskinerna. Detta ger också en stor möjlighet till vidareutveckling och att kunna få en egen prägel på motorn.

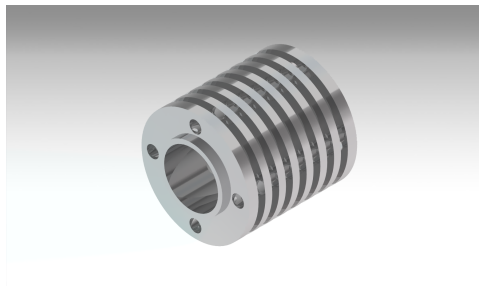
Då motorn är ett uppvisningsobjekt kommer den att hanteras med svettiga händer vilket medför stor risk för korrosion. Därför har materialet valts efter att kunna klara av en sådan miljö. Skulle vanligt stål användas måste det först ytbehandlas för att motverka korrosion.

Nedan redogörs för, varje komponent, olika lösningar och deras motiveringar till varför den blivit vald eller fallit bort.

Kylcylindrar

Här finns den del av cylindrarna som skall skapa en tätning mot kolvarna, vilket medför ett högt krav på både material, tolerans och ytjämnhet. Denna del ska även leda bort värme från både den varma och den kalla sidan. För att undvika att materialet i kolvarna och cylindrarna ändrar storlek, på grund av värme, måste rätt material och utformning väljas. Detta eftersom en för stor värmeutvidgning av cylindrarna i förhållande till kolvarna skulle ge en försämrad tätning. Därför valdes en konstruktion med integrerande kylflänsar och materialvalet föll på aluminium som har god värmeledningsförmåga. Problemet med aluminium vid bearbetning är

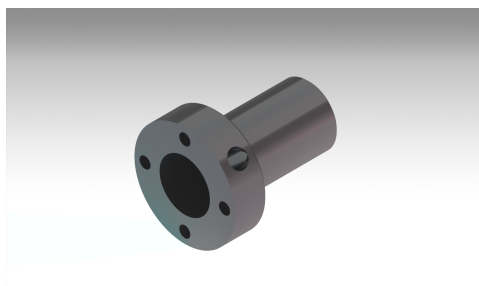
att det kan vara svårt att få en bra ytjämnhet. Därför valdes legeringen 7075 T6 då denna legering är höghållfast med mycket zink. Detta medför att materialet är lättare att få bra ytjämnhet vid bearbetning med tillgängliga verktyg och maskiner i prototypplabbet. Vi valde att konstruera kylflänsarna efter de stickstål som fanns nere i prototypplabbet för att underlätta tillverkning. Vid tillverkningen av första prototypen testades det att tillverka denna i olika dimensioner för att se hur utseendet påverkades och om materialåtgången kunde minimeras genom att välja en mindre diameter än vad som först hade planerats. Detta visade sig fungera mycket bra, dock fungerade det inte att använda skruvförbandet som styrningar, vilket först var tanken, för cylindrarna då skruvar inte har tillräckligt bra tolerans för att resultatet skulle vara accepterbart. Detta löstes genom att en styrning på cylindrarna som styr in i huset konstruerades. Därmed bibehölls önskad tolerans på förhållandet mellan vevmekanismen och cylindrarna.



Figur 4.3: *Kylcylinder.*

Värmecylinder

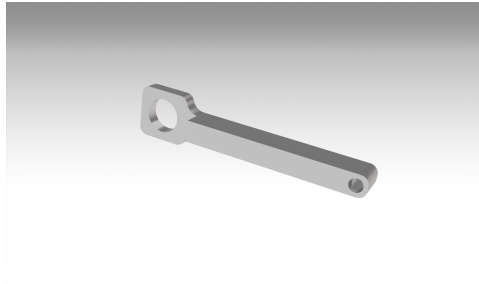
Värmecylindern kräver ett material som tål mycket värme. Därför valdes rostfritt stål, vilket även uppfyller kraven på korrosionsbeständighet och utseende. Den utformades med en mycket lös passning mot kolvens displacementdel, där arbetsgasen kan strömma fritt mellan cylinderväggen och denna del av kolven. Detta medför att det räcker gott och väl att skruvförbandet fixerar denna på plats, samt att infästningen till regeneratorröret kan placeras var som helst på värmecylindern.



Figur 4.4: *Värmecylinder.*

Vevarmar

Dessa konstruerades för att ha minimal vikt. För att minska friktionen i motorn är vevarmarna lagrade med kullager mot vevaxeln. För att hålla lagren på plats används en presspassning mellan lagrets yttering och hålet i vevarmen. Vevarmarna gjordes asymmetriska för att kolvarna skulle hamna i linje.



Figur 4.5: *Vevarm.*

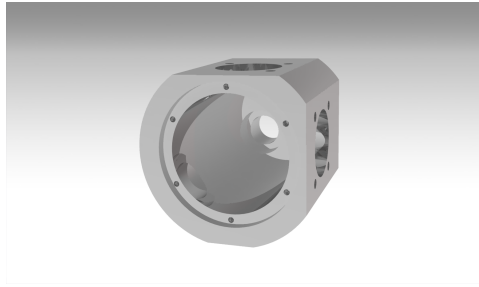
Vevaxel

Vevaxeln blev från början väldigt enkel och vartefter arbetet fortskred och de andra kringliggande delarna konstruerades kom denna att anpassas till dessa med bland annat kilspår och skruvförband för att fixera svänghjulet. Från början konstruerades axeln för att vevarmarna skulle fixeras och glida på en skruv men efter att prototypen hade konstruerats konstaterades att detta inte var en möjlig lösning, då skruvar inte har tillräcklig tolerans. Istället löstes problemet genom att presspassa in en silverstålsaxel i vevaxeln som vevarmarnas lager och distanser vilar på. Dessa låses i axiell led med en spärring då detta är en enkel och bra lösning. Beräkningar har även gjorts på hur en motvikt skulle utformas på vevaxeln, detta för att inte få för stora vibrationer på grund av obalans. Riktlinjen som användes, och delgavs utav Göran Brännare (Senior Lecturer, Produktutveckling), säger att cirka en tredjedel av vikten på vevarmarna ska vara motvikten. Det framkom vid beräkningen att en motvikt inte var nödvändig då det rör sig om en väldigt liten massa. Det skulle i princip räcka med att slipa lite på vevaxeln där infästningen av vevarmarna är för att uppnå detta krav. Tanken var från början att låta vevaxeln lagras av endast ett lager men efter djupare diskussion och överslagsräkning med Göran Brännare beslutades att lagra den i två lager istället, då de kan ta upp ett moment, vilket inte ett enkelt kullager skulle klarat. Det fanns även andra lösningar, med andra typer av lager, men dessa var väldigt dyra och valdes bort.

Vevhus

Vevhuset har ändrats mycket fram och tillbaka då olika lösningar på vevaxel, vevarmar och cylindrar har tagit form. Att tillverka det i ett stycke skulle ge motorn ett mer professionellt utseende men det sätter större krav på tillverkningen. Efter att prototypen tillverkats lades mer fokus på huset. Den första planen var att tillverka denna i flera delar för att kunna förenkla tillverkningen, men eftersom flera ytor är kopplade mot varandra och kräver stränga toleranser är tillverkning i ett stycke ändå

att föredra. Utgångsmaterialet var först tänkt att vara ett fyrkantigt stycke, men när formen på huset ändrades från kantigt till runt ändrades också utgångsmaterialet till en rund kuts. Anledningen till den runda formen var att huset enklare skulle kunna tillverkas med hjälp av svarvoperationer. Vevlagerlägena ändrades för att passa de verktyg som finns att tillgå i prototypplabbet. Samma sak gjordes med låsningen för vevaxeln och lagrena. Vevhuset är förberett för installation av en plexiglasskiva för att möjliggöra trycksättning av motorn. Detta behöver även kombineras med en tätning av vevaxelgenomföringen, med hjälp av till exempel en packbox eller tätade lager.



Figur 4.6: *Vevhus*.

Kolvar

Kolvarna var från början tänkta att tillverkas som på en förbränningsmotor med kolringar som tätningar. Detta övergavs på grund av svårigheten att tillverka kolringar och eftersom det inte används någon smörjning i motorn skulle detta inte vara en bra lösning på grund av stort mekaniskt slitage. Idén om att byta ut kolringarna mot någon form av o-ring undersöktes noggrant. Efter noga undersökningar förkastades denna idé, mest på grund av värmen och friktionen. Eftersom låg inre friktion är väldigt viktigt i en stirlingmotor undersöktes flera olika material med avseende på detta. I tabell 4.2 nedan finns en underlagstabell som togs fram.

Tabell 4.2: Friktionskoefficienter mellan material.

Material 1	Material 2	Torr statiskt	Torr glidning
Aluminium	Aluminium	1.05-1.35	1.4
Aluminium	Kolstål	0.61	0.47
Stål	Mässing	0.35	-
Stål	Aluminium brons	0.45	-
Stål	Grafit	0.1	-

I tabellen ses tydligt att grafit är ett lämpligt material att tillverka kolvar i, och dessutom är materialet självsmörjande vilket är en mycket önskvärd egenskap. I samråd med personalen i verkstaden beslutades att ha en "trappa" som tätning. Detta innebär att det tillförs ett antal spår i kolven (se appendix F). Tanken med lösningen är att för varje spår som arbetsmediet passerar sjunker trycket och då bevaras cylindrarnas inre tryck. Detta är en väldigt enkel lösning som är lätt att tillverka, vilket var ett tungt argument för lösningen. För att inte behöva göra en hel

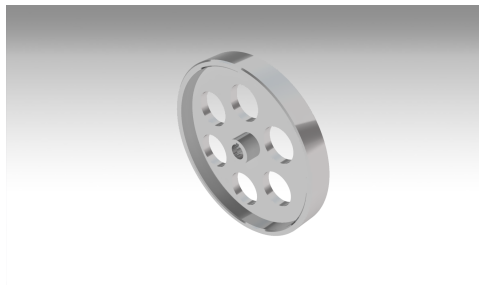
deplacementkolv i grafit konstruerades denna i flera delar (se appendix F). Detta gjorde det lättare att konstruera vevarmens infästning i kolven, på grund av att grafit är ett sprött material. Tanken var att vevarmsfästet skulle skruvas i den kalla kolven men efter praktiskt ha provat detta insågs att gängor i grafit är mycket sköra och inte är önskvärda i konstruktionen. Därför valdes det att inte ha någon from av skruvförband direkt i grafitkolvorna.

Regenerator

På grund av tidsbrist valdes det att inte påbörja arbetet med regeneratoren. Regeneratoren är en viktig del för att kunna få ut maximal effekt, vilket inte behövs då motorn ska byggas i uppvisningssyfte. Med detta valdes att endast ha ett rör som gasen kan strömma igenom. Eftersom röret är skruvat i cylindrarna medför detta att detta rör mycket lätt skulle kunna byta ut mot en dedikerad regenerator och även testa flera olika lösningar på denna.

Svänghjul

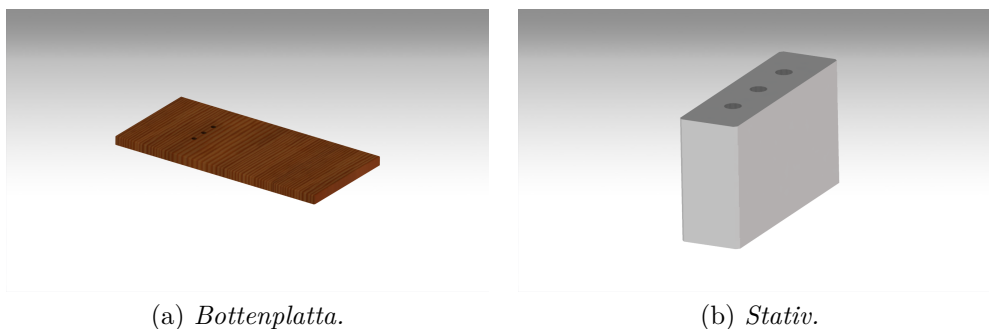
Här valdes en enkel och, i prototypplabbet, väl utprövad lösning. Den är en mycket simpel lösning som var tänkt att vidareutvecklas men kom att bli densamma ända till slutet. Det som ändrades under tiden var hur svänghjulet skulle monteras på axeln. Från början var tanken att den skulle monteras med en presspassning men längre in i detaljkonstruktionen av övriga motordelar framkom en lösning om att fixera svänghjulet med en kil och ett skruvförband. Detta var det som slutligen blev konceptet då det stämmer bra in på målet att använda flera olika maskinelement.



Figur 4.7: *Svänghjul.*

Stativ och botten

Det enda viktiga som måste beaktas är hur den genomgående hålbilden ska se ut, då den ska passa med vevhuset. Sedan är det fritt fram att designa stativet och botten efter eget tycke, vilket kan ge motorn en personlig design. Vi valde en enkel design för att spara tid och material.



Figur 4.8: *Bottenplatta och stativ.*

Värmekälla

Från början var det tänkt att tillverka en egen brännare med veke, där någon form av sprit används som bränsle. Detta slopades då fokus låg på motorn och tiden fanns inte till för att tillverka en. Vi valde att istället använda en brännare av den typ som används till spritkök.

4.3 Konstruktion av motor

Konstruktionsfasen inledes med att modellera upp det valda konceptet med hjälp av Catia V5. Efter att CAD-modellen var klar utvärderades konceptlösningarna. Innan utformningen av detaljer ägde rum gjordes en undersökning om andra konceptuella lösningar passade bättre gällande det befintliga konceptet genom konsultation med kunden och verkstadsansvariga.

4.4 Tillverkning av motor

CAD-modeller och ritningar framställdes för varje komponent. Verifieringen gjordes med hjälp av nära konsultation med verkstadsansvariga.

Sedan i tillverkningsfasen planerades materialanskaffningen. Planeringen började med att uppskatta den totala materialåtgången för en komplett motor, genom att studera ritningarna. Därefter adderades spillmaterial och material som går åt att spänna upp bitarna i bearbetningsmaskinerna. Sedan adderades ytterligare lite material för att vara på den säkra sidan. Slutligen multiplicerades materialåtgången med 10, säkerhetsfaktor på tre motorer, för att motverka tids- och materialbrist på grund av feltillverkning eller likande.

Slutligen innan produktionen av alla komponenter planerades hur och i vilken följd de olika komponenter skulle bearbetas. Under tillverkningen dokumenterades problem och andra viktiga saker att tänka på för kommande tillverkare, vilket kommer beskrivas i tillverkningsinstruktionerna.

4.5 Termodynamisk analys

Vid simulering av den termodynamiska processen genom en Schmidt-analys krävdes vissa parametrar och antaganden. Dessa var att motorns initiala trycksättning var densamma som atmosfärstrycket då det koncept som framarbetats är förberett men ej slutkonstruerat för att kunna trycksättas. Vidare antogs ett varvtal på 1000 varv per minut. Temperaturer i varm respektive kall del uppskattades till 300 respektive 60 °C. Dimensioner för volymer härleds ur befintliga dimensioner taget ur framställda ritningar. Luft antogs som arbetsmedium med gaskonstanten 287 J/(kgK).

5 Resultat

I följande kapitel presenteras resultaten av de syften och mål som nämndes i det inledande kapitlet i rapporten. Dessa resultat lägger även till grund för de efterkommande kapitlen, diskussion och slutsats.

5.1 Produktpresentation

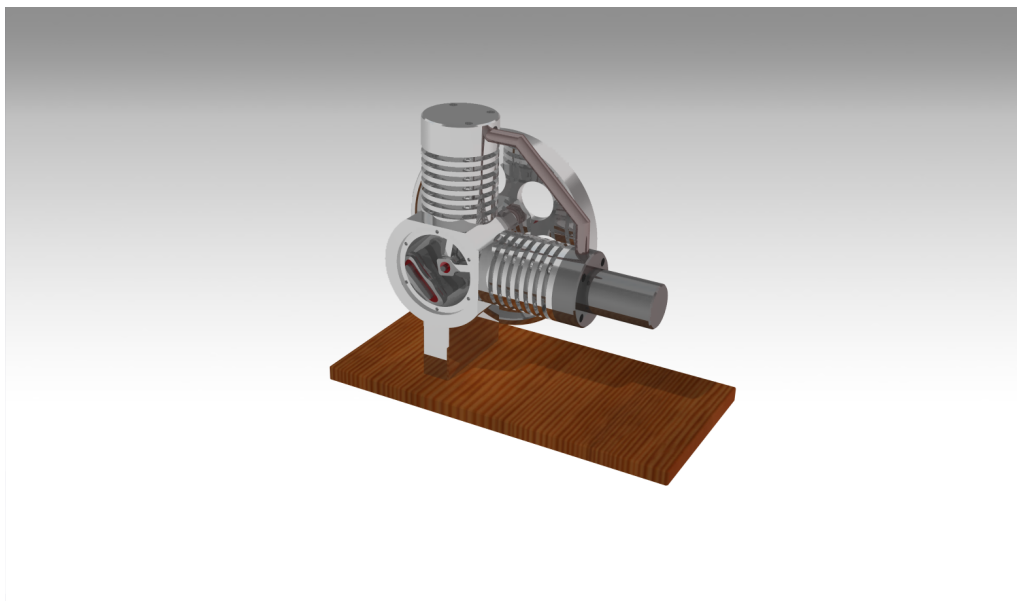
Resultatet av detta projekt är ett komplett underlag för tillverkning av en stirlingmotor av alfakonfiguration. Detta underlag innehåller ritningar och en arbetsbeskrivning. Underlaget är färdigställt för att kunna användas direkt i en tillverkningsfas utan ytterligare utformning och produktutveckling. Figur 5.1 och 5.2 visar CAD-modeller av slutgiltig motor.

Ritningarna har utformats i samråd med personalen i prototypplabbet. Utöver detta har även en lista med nödvändiga lager och fästelement sammanställts. Ritningarna finns i appendix F.

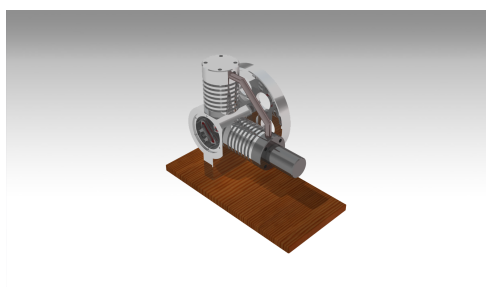
Som komplement till ritningarna togs även en uppsättning tillverkningsinstruktioner fram, som steg för steg beskriver tillverkningsprocessen av motorns komponenter. De innehåller även mer allmänna tillverkningsråd. Tillverkningsinstruktionerna finns i appendix G.

Merparten av alla komponenter till motorn är även tillverkade, vilket påvisar att ritningar med beskrivning kan användas som underlag.

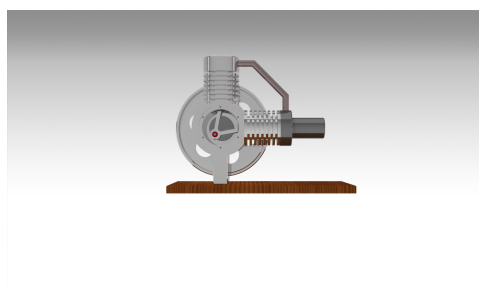
Grunden i motorn är ett cirkulärt vevhus i aluminium, med avfrästa sidor för cylindrarna och stativet. Cylindrarna är placerade i 90° vinkel mot varandra. Den kalla cylindern är riktad rakt upp och den varma cylindern är riktad åt sidan, parallellt med bottenplattan. Båda cylindrarna har ett parti med kylflänsar tillverkat i aluminium. Den kalla cylindern har ett enkelt topplock i aluminium, medan den varma cylindern har en förlängd värmedel i rostfritt stål. Mellan topplocket och värmedelen löper ett kopparrör som även fungerar som regenerator. Röret är infäst med rörkopplingar. Vevhuset har även lagerfästen för vevaxellagrarna. Vevaxeln är tillverkad i rostfritt stål och i den fästs vevarmarna till båda kolvarna i samma fästpunkt. Denna fästpunkt är en silverstålsaxel presspassad fast i vevaxeln. Vevarmarna är tillverkade i aluminium och dessa är kullagrade mot vevaxeln. Kolvarna är tillverkade i grafit och sitter fast i vevarmarna med ett vevarmsfäste som med en genomgående skruv fästs i kolven. Båda kolvarna har tätningsspår och kolven på den varma sidan är förlängd med en displacementdel i aluminium, som med hjälp av vevarmsfästet fästs genom kolven.



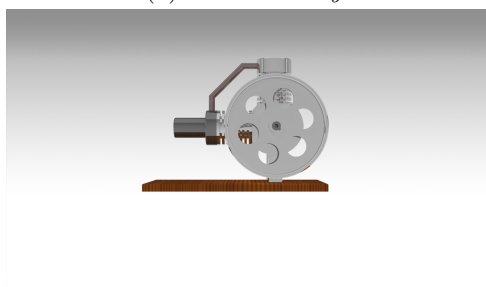
Figur 5.1: *Framställd stirlingmotor.*



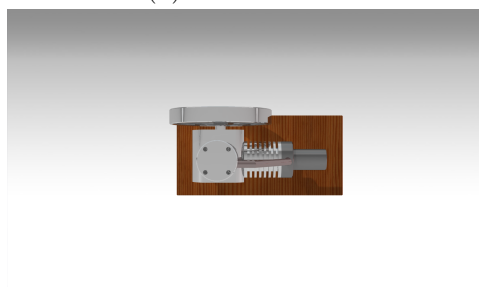
(a) *Isometrisk vy.*



(b) *Vänstersidan.*



(c) *Högersidan.*



(d) *Ovansidan.*

Figur 5.2: *Framställd stirlingmotor.*

5.2 Termodynamisk analys

Följande resultat är framtaget genom Schmidt-analys. Följande indata har använts vid analysen.

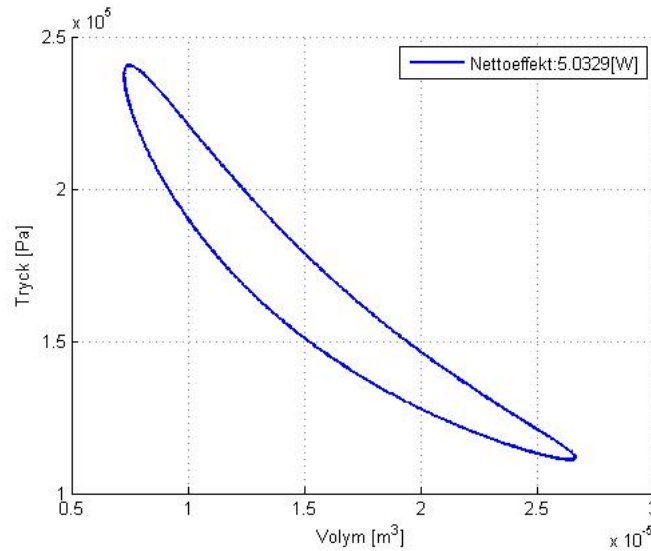
Resterande indata som volymer och slaglängder är baserade på konceptets dimensioner. I nedan ses resultatet från beräkningarna av en ideal Schmidt-analys med tidigare angivet indata.

Tabell 5.1: Indata som användes vid Schmidt-analysen.

Variabel	Beteckning	Indata
Initialt tryck	p_0	101300 [Pa]
Initialt temperatur	T_0	20 [°C]
Varvtal	n	1000 [rpm]
Gaskonstant, luft	R_{luft}	278 [J/kgK]

Tabell 5.2: Utdata från Schmidt-analysen.

Variabel	Beteckning	Utdata
Arbete per cykel	W	0.3020 [J]
Effekt	E	5.0329 [W]
Verkningsgrad	η	0.4188 [-]



Figur 5.3: p - V -diagram från analysen.

Diagrammet visar hur motorns tryck och hur arbetsmediets volym förändras sett över en cykel. Nettoarbetet med givna parametrar blev 0.3020 Joule per cykel (varv). Med ett givet varvtal på exempelvis 1000 varv per minut skulle då effekten bli 5.0329 Watt. Detta kan jämföras med wattuttaget ur en USB-port (version 1.1 och 2.0) som ligger på 2.5 Watt. Dock är detta under ideala förhållanden. Verkningsgraden beräknades genom att dividera nettoarbetet med arbetet för expansionen i motorns varma del. Verkningsgraden på denna numeriska modell blev 41.88 %.

6 Diskussion

Tidsplanen följdes bra till en början men övergången från konstruktion till tillverkning tog längre tid än planerat, vilket gjorde att tiden för tillverkningsfasen blev betydligt kortare än planerat. En oväntad minskning av tillgängliga verkstadstimmar i prototypplabbet bidrog även till detta. Vid konsultation med handledare ansågs vissa delar lämpliga att tillverka i CNC-maskinen för att tidsoptimera ett redan hårt pressat tidschema för tillverkningen. Detta beslut togs efter ett konceptmöte den 20 mars med cirka åtta veckor kvar till deadline. Cirka två veckor efter mötet var projektet i princip redo för att gå in i tillverkningsfasen. Projektet fortsatte i god tro kring detta beslut och inga indikationer gavs om att CNC-tillverkningen inte skulle kunna genomföras. Övriga komponenter tillverkades manuellt enligt planering och om brist i kommunikation eller andra faktorer fick tillverkningen i CNC-maskinerna att fallera går endast att sia om. Med en vecka kvar till deadline togs beslutet tillsammans med handledaren att en motor inte var möjlig att sammanställa innan slutrapporten skickades in för opponering.

Konceptfasen borde ha kortats ner och gjorts mer parallell med tillverkning, vilket hade gett mer tid för tillverkning. Detta hade troligtvis gett ett mindre förfinat koncept men hade varit försvarbart dels för att mer tid troligtvis hade gett en bättre slutprodukt (åtminstone en färdig motor), och dels för att konceptets grova drag ändå fastställdes tidigt i konceptfasen. Den resterande tiden användes till förfiningar vilket kunde ha gjorts mer parallellt med tillverkningen av motorn. En tydlig deadline för tillverkningsstart borde ha fastställts tidigt och saker som att beställa material och undersöka vilka delar som skulle tillverkas i vilka maskiner borde ha gjorts innan dess.

Hade tillverkningen startat tidigare skulle problemet med ej tillverkade delar och avsaknad av material antagligen inte uppstått. Tillverkningen av cylindrarna och vevhuset skulle kunna ha gjorts manuellt. På grund av att någon motor ej blivit fullständigt klar har varken några analyser eller kontroll av kravspecifikationen gjorts. Först och främst är analysen ej komplett då ingen jämförelse med slutprodukten har kunnat göras. Beräkningarna som gjorts i analysen är endast för ideala förhållanden vilket ger en väldigt skev bild av vår motor. Även om termoanalysen ligger till grund för konstruktionen vet vi inte hur mycket värme som kommer behövas för att få motorn att fungera.

Projektet har varit mycket svårt att greppa då det har varit så öppet. Kunden har varit mycket otydlig på vad denne faktiskt vill ha vilket har gjort det svårt att sammanställa en kravspecifikation. Här kan man tycka att det kan vara ett relativt litet problem som man kan beta av i början av projektet men kunden har lagt fram krav till en början som sedan blev önskemål och vise versa. Det har även kommit fram nya krav och önskemål under projektets gång vilket har försvårat vårt arbete.

En sak som har varit odefinierat från uppstarten har varit vilken sorts projekt vi har arbetat med. Eftersom målet var att tillverka en produkt och utöver det ha med ett teoretiskt avsnitt skapades tvetydighet angående hur projektet skulle genomföras. Vår rapportstruktur har därför blivit uppdelad och kan ses som lite osammanhängande. Något som skulle ha underlättat hade varit en bättre projektdefiniering.

Vår budget för materialinköp höll inte i slutändan. Detta mest för att de leverantörer vi har ringt och frågat om priser inte gett oss korrekta uppgifter. Det har både blivit dyrare och billigare än beräknat. Störst skillnad var det på rörkopplingarna från Ahlsell då dessa enligt en säljare på Ahlsell skulle kosta 20 kronor men i själva verket kostade cirka 150 kronor. Detta har lärt oss att man alltid ska be om en skriftlig offert som underlag till en budget och inte lita på vad leverantören säger över telefon.

Det har blivit en hel del förseningar i projektet med avseende på materialinköp och leveranser. Detta för att vi inte själva har haft möjlighet att beställa det som var nödvändigt till projektet eller kunnat hämta material som vi beställt. Detta har också varit bidragande orsaker till att motorn inte blev klar i tid. Även saker som vi velat beställa har inte funnits och vissa kompromisser har gjorts. Till exempel gick det inte att beställa vänstergängad skruv till svänghjulet. Detta är inget större problem då det finns lösningar men en vänstergängad skruv hade varit en mer ingenjörsmässigt korrekt lösning då skruven skulle låst fast av svänghjulets rörelse.

När vi har tagit fram våra tillverkningsbeskrivningar har vi haft som syfte att ge en lärande ledningshjälp istället för att i steg för steg exakt berätta hur teknologen ska gå till väga. Tanken är att teknologerna som bygger motorn ska få en djupare förståelse om hur det fungerar i en mekanisk verkstad och lära sig maskinerna, istället för att bara följa instruktioner på ett papper. Vi tror att om det steg för steg exakt beskrivs hur man gör ger inte detta någon djupare förståelse. Vi har istället försökt att ge ledande förslag och tips på lösningsgångar men refererar hela tiden till eget tänkande för att på så sätt, tror vi, uppnå en djupare inläring. Vi har i dessa instruktioner även försökt framhäva lösningar som gör att man kan spara så mycket material som möjligt då detta också är viktigt i ett miljöperspektiv, för en hållbar utveckling.

I början av projektet borde vi kommit överens om ett tydligt system för hur filer borde sparas. Detta hade gjort att mindre tid hade behövt läggas på att leta efter filer och att hitta den senaste versionen av den fil man vill arbeta med. Loggboken hölls någorlunda uppdaterad tills steget över till produktionsfasen skulle ske. Det tog då längre och längre tid mellan uppdateringar tills det inte uppdaterades alls. Detta har gjort det svårare för oss att i efterhand följa projektets arbetsgång.

Att vi lade tid i början på projektet till att tillverka tryckluftsmotorn "*Pysen*" gav fler i gruppen kunskap om hur olika delar kan tillverkas och hur maskinerna i prototypplabbet fungerar, och denna tidsåtgång känns därför motiverad.

Resultatet av analysen visade hur man kan påverka effekten av motorn genom att förändra vissa parametrar. Trycksätter man motorn ökar dess effekt väsentligt. Däcktrycket för en racercykel till exempel ligger generellt kring 7 bar. Med ett grundtryck på 7 bar i motorn (ca 700 000 Pascal) skulle nettoarbetet rent teoretiskt stiga upp till 2.0867 Joule per varv, vilket motsvarar en effekt på 34.7780 Watt.

Temperaturdifferensen mellan den varma och den kalla delen på motorn påverkar också motorns effekt, dock inte i samma utsträckning som grundtrycket. En större temperaturdifferens påverkar också verkningsgraden för motorn. Denna förändring är orimlig i verkligheten då modellen arbetar isotermiskt. Teoretiskt kan verkningsgrader nära 100 % nås vilket inte är rimligt hos en riktig motor. Då en färdig motor inte lyckades bli sammanställd föll analysen av dess funktion och verkningsgrad.

7 Slutsats

Utvecklingspotentialen för vår motor är väldigt stor, men beroende på vad som ska utveckla så kan fokus läggas på flera olika saker.

Är ökning av effektivitet och verkningsgrad det som ska utvecklas bör fokus läggas på trycksättning och val av annat arbetsmedie, till exempel helium, för bästa resultat.

Regeneratoren betyder mycket för verkningsgraden och skulle ge högre effekt om en dedikerad regenerator användes istället för ett rör. Då regeneratoren inte har varit i fokus har en sådan varken utvecklas eller använts. Det som bör göras är att undersöka material och konstruktion hos regeneratoren för att kunna optimera motorn.

En annan utvecklingspunkt är designen med avseende på att vidare underlätta tillverkningen i prototyplabbet. Vid större utnyttjande av CNC-maskiner skulle designen kunna bli betydligt bättre och toleranserna skulle kunna bli lättare att uppnå.

Ytterligare en vidareutveckling skulle kunna vara en alternativ värmekälla istället för den spritbrännare som föreslagits i detta projekt. Vi har spekulerat i att till exempel med hjälp av speglar eller linser använda koncentrerad solstrålning för att driva motorn och tycker detta skulle vara en intressant vidareutveckling.

En annan sak som vi skulle se som en utvecklingspotential skulle vara att koppla motorn till en generator för att generera el och kanske driva någon form av process. Detta skulle kunna vara att driva dioder som lyser eller att driva en mätutrustning som mäter och visar motorns varvtal.

Angående den termodynamiska analysen var kravet att den skulle finnas med för att i detta praktiska projekt få med ett teoretiskt avsnitt. Rekommendationer lämnas till framtida projekt att initialt vara tydligare med varför och hur denna teori skall involveras i projektet. Syftet från början var att resultatet av den teoretiska modellen skulle ställas mot mätvärden från testkörningar av den färdigkonstruerade motorn. Då denna motor som tidigare nämnts inte kunde färdigställas föll den delen av analysen.

Rekommendationer kring arbetet är att färdigställa en fullständig kravspecifikation så tidigt som möjligt. Då mycket förändringar om vad som har varit krav och önskemål har gjort det svårt att kunna jobba strukturerat och progressivt. För att inte förlora viktigt tid bör underleverantörer involveras minimalt. Skulle det vara nödvändigt är det väldigt viktigt att kunna bestämma deadlines och möjligtvis skriva något sorts kontrakt för att säkerställa att begäran faktiskt uppfylls.

Vid liknande projekt bör det eftersträvas att börja tillverkningen tidigt. Problem uppkommer alltid och vissa oförutsägbara tillverkningskomplikationer kan försvåra och försena tillverkningen då delar måste omarbetas vilket minskar tiden för tillverkning.

Referenser

- [CB12] Y. Cengel och M. Boles. *Thermodynamics- an engineering approach 7:th edition*. William C Brown Pub, 2012.
- [DS05] R. Darlington och K. Strong. *Stirling and hot Air Engines*. The Crowood Press Ltd, 2005.
- [LB03] P. Lindstedt och J. Burnerius. *The Value Model*. Nimba AB, 2003.
- [LOW08] Lilja, Olsson och Wickström. *Kompendium Ritteknik*. Kompendiet, 2008.
- [Sen07] J. Senft. *Mechanical Efficiency of Heat Engines*. Cambridge University Press, 2007.
- [Too12] T. E. Toolbox. *Friction and Coefficients of Friction*. 2012 [hämtad: 2013-05-22]. URL: http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html.
- [Too13] C. Tools. *Vad är en 3D-skrivare?* 2013 [hämtat: 2013-05-10]. URL: <http://www.creativetools.se/3d-skrivare-info>.
- [Wal80] G. Walker. *Stirling Engines*. Oxford University Press, 1980.

A Uppskattade delar

Tabell A.1: Uppskattade antal delar per koncept.

<i>Antal delar</i>	Alpha	Gamma Ross-Yoke	Gamma
Länkage	3	9	6
Vevhus	1	2	2
Fästelement	10	15	15
Cylindrar+topplock	4	3	3
Kolvar	2	2	2
Regenerator	5	-	-
Totalt antal delar	25	31	28
<i>Antal olika delar</i>			
Länkage	2	8	5
Vevhus	1	2	2
Fästelement	3	7	7
Cylindrar+topplock	3	3	3
Kolvar	2	2	2
Regenerator	5	0	0
Totalt olika delar	16	22	19

B Materialanskaffning

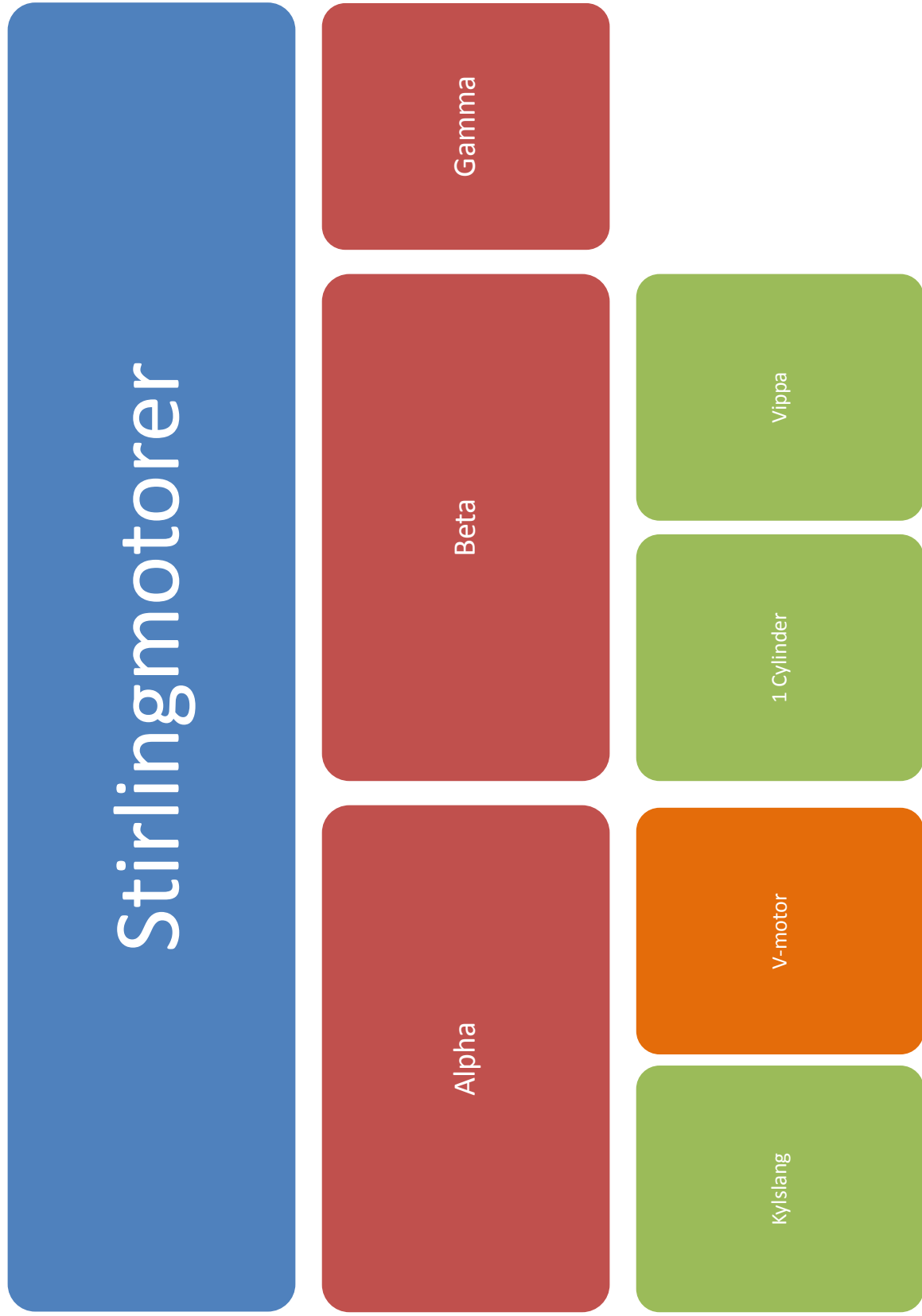
Tabell B.1: Undersökta materialkostnader innan anskaffningen.

Material	Försäljare	Pris	Antal	Totalt
Rörkoppling (art.nr 1236966)	Ahlsell	40	20	800
Lager 12x21x5 [mm]	Kullagergrossisten	10,56	20	211,2
Lager 4x8x3 [mm]	Kullagergrossisten	10	20	200
Alu 80mm	Metallservice	1187,5	1,2	1425
Alu 60mm	Metallservice	687,5	1,7	1168,75
Alu 150mm 0.5m	Metallservice	1900	1	1900
Rostfri 55mm	Metallservice	1517,2625	0,8	1213,81
Rostfri 40mm	Metallservice	887,375	0,7	621,1625
Alu vevstake 10x70x500 [mm]	Metallservice	160	1	160
Alu kolven 25mm	Metallservice	150	1	150
Alu rör 4(in) 6(ut) 3dm	Metallservice	20	1	20
Alu rör 12(in) 16(ut) 3dm	Metallservice	20	1	20
Alu profil 50x25 [mm]	Metallservice	350	1	350
M5 Insex 70mm	Skruvcenter	5,17	110	568,7
M6 torx kullig 10mm VÄNSTER	Skruvcenter	1,35	10	13,5
Distansbricka M6(in) 19mm(ut)	Skruvcenter	0,59	10	5,9
Kil 3x3x1000 [mm] syra-rostfri	Wiberger	100	1	100
Spårring rostfri 1.4116 SGA C4 4	Wiberger	1,05	10	10,5
Totalt pris				8938,5225

C Kravspecifikation

Chalmers		Dokumenttyp	Kravspecifikation					
Stirlingmotor		Utveckling och konstruktion av en stirlingmotor för utbildningssyfte						
Utfärdare: CJJLR		Skapad: 2013-02-21						
Kriterier		Målvärde	K/Ö	Vikt	Verifiering	Referens		
1. Prestanda								
1.1	Minimera friktion	Kullager eller självsmörjande material	Ö					
1.2	Minimera tryckläkage	Tätningar eller "tycktrappa".	Ö					
2. Miljö								
2.1	Miljövänlig	Minimera materialspill	Ö					
3. Underhåll								
4.1	Minimera underhåll	Undvik korrosion	Ö					
4. Tillverkningskostnad								
5.1	Minimera kostnad	< 2500 kr per motor	K					
5. Distributionssätt								
7.1	Personligt	Kompakt och centrerade delar	K					
6. Paketering								
8.1	Möjligt i låda	Innermått 210x290x210 mm	Ö					
8. Tillverkningsanläggning								
10.1	Tillverkningsbarhet	Möjlig att tillverka i prototyplabbet	K					
9. Storlek								
11.1	Bredd	< 210 mm	K					
11.2	Längd	< 290 mm	K					
11.3	Höjd	< 210 mm	K					
10. Vikt								
12.1	Minimera vikt	< 2.5 kg	Ö					
11. Estetik och ytfinish								
11.1	Minimera ytbehandling	Undvik stål	Ö					
11.2	Skapa nyfikenhet	Maximera synligadelar	Ö					
11.3	Skapa konstnärligt intresse	Clean och robust utseende	Ö					
11.4	Minimera friktion	Fin ytjämnhet i cylindrar och på kolvar	Ö					
12. Material								
12.1	Minimera rostrisk	Undvik stål	Ö					
12.2	Minimera galvanisk korrosion		Ö					
12.3	Självsörjning	Använd brons eller mässing	Ö					
12.4	Kylförmåga	Använd aluminium	Ö					
12.5	Värmeförmåga	Använd stål	Ö					
13. Tillverkningskapacitet								
13.1	Tillverkningstid	< 40 timmar	K					
13.2	Minimera tillverkningsoperationer		Ö					
13.3	Minimera komponenter		Ö					

D Strukturschema



Stirlingdelar

Värmekälla

Värmeljus
Gasbrännare

Värmelampa

Bränsle

Etanol
Metanol
Fotogen
Olja

Veke
Behållare

Ramverk

Bottenplatta
Stativ

2+ delar
1 del

Svänhjul

Axel
Montering
Placering

Bronsbusning
Kullager
Skruvförband
Klämförband
På sidan
Centrerat

Arbetskolv

Tätning

Oring
Lufttrappa
Kolvring

Displacer

Kolv

Tätning
Sammanfogning

Oring
Lufttrappa
Kolvring
Limning
Fräsning/svarvning
Skruvning
Svetsning
Pressning

Kyldel
Värmedel

Vattenkylning
Flänsar
Tjocklek

2+ del
1 del

Tätning

Packningsmassa
Oring
Läder

Länkage

Vev
Ross
Armar

2 punkt
1 punkt
Länksystem
Triangel
Bronsbusning
Kullager

Stirlingmaterial

Gummi

Tätning

Trä

Lätt

Läder

Fult

Tätning

Brons

Smörjning

Mässing

Estetiskt

Smörjning

Stål

Rost risk

Tungt

Bra värme

Aluminium

Estetiskt

Lätt

Bra kylning

E Schmidt-analys

Schmidt-analys av stirlingmotor modell alfa

Table of Contents

Indata	1
Volymer	2
Temperaturer	2
Momentan Volym for arbetsmedium	2
Momentant Tryck	2
Arbete och effekt	3
Resultat	3

Följande kod redovisar beräkningar gjorda för att ta fram P-V-diagram och effekt för den ideala stirlingcykeln.

Analysen är baserad på den ideala gaslagen: $pV = mRT$

Antaganden för analysen

- Regeneratorns (värmeväxlaren) process är ideal.
- Momentant tryck är samma genom hela motorn.
- Arbetsmediet följer den ideala gaslagen.
- Systemet är tätt och arbetsmediemets massa är konstant.
- Volymvariationer sker i sinusform.
- Regeneratorns gastemperatur är genomsnittet av den expanderade och komprimerade gastemperaturen.
- Cylinderväggarnas och kolvarnas temperatur är konstant.
- Arbetsmediets temperatur är konstant i övrig dödvolym.
- Motors varvtal hålls konstant

Indata

```
clear all
close all

B=0.025;           %Diameter pa cylindrarna [m]
S=0.030;           %Slaglangd [m]
Dk=0.002;          %Frigang, kall cylinder [m]
Dv=0.002;          %Frigang, varm cylinder [m]
Varvtal=1000;      %Antaget varvtal for motor under drift [varv/min]

R=287;             %Gaskonstant for luft [J/kg*K]
pInitialt=101300;  %Atmosfarstryck [Pa]
alfa=90*pi/180;    %Fasforskjutning 90 grader [rad]
```

```
phi=0:0.01:2*pi; %Vektor över momentan vinkel för vevaxel
```

Volymer

Dessa volymer är baserade utifrån motorns dimensioner

```
volymSvepVarm=(B^2/4)*pi*(S-Dv); % Svep volym varm cylinder [m^3]
volymDodVarm=(B^2/4)*pi*Dv; % Dodvolym expansion [m^3]
volymSvepKall=(B^2/4)*pi*(S-Dk); % Svep volym kall cylinder [m^3]
volymDodKall=(B^2/4)*pi*Dk; % Dodvolym kall cylinder [m^3]
volymRegenerator=1.25e-6; % Volym regenerator [m^3]
```

Temperaturer

Följande värden är antagna som rimliga temperaturer under drift

```
%Temperatur varm cylinder vid drift
temperaturVarm=300+273; %[K]
%Temperatur kall cylinder vid drift
temperaturKall=60+273; %[K]
%Temperatur initialt för motor
temperaturOmgivning=20+273; %[K]
%Temperatur regenerator
temperaturRegenerator=(temperaturVarm+temperaturKall)/2; %[K]
```

Momentan Volym för arbetsmedium

Nedan beräknas de momentana volymerna under en cykel baserat på phi

```
for i=1:1:length(phi);

%Momentan volym varm cylinder för vinkel phi hos vevaxeln
volymVarm(i)=(volymSvepVarm/2)*(1-cos(phi(i)))+volymDodVarm; %[m^3]
%Momentan volym kall cylinder för vinkel phi hos vevaxeln
volymKall(i)=(volymSvepKall/2)*(1-cos(phi(i)-alfa))+volymDodKall; %[m^3]
%Total momentan volym i motorn för vinkel phi
volymTotal(i)=volymVarm(i)+volymKall(i)+volymRegenerator; %[m^3]
%Maxvolym arbetsmedium
volymMax=max(volymTotal); %[m^3]
%Arbetsmediets massa mao på dess maxvolym
m=pInitialt*volymMax/(R*temperaturOmgivning); %[kg]
```

Momentant Tryck

Först beräknas koefficienter och ration för att vidare beräkna momentant tryck för cykelns varierade tillstånd

```
%Temperatur- och volymration
Tau=temperaturKall/temperaturVarm;
Kappa=volymSvepKall/volymSvepVarm;
xDodVarm= volymDodVarm /volymSvepVarm;
xDodKall=volymDodKall/volymSvepVarm;
xRegenerator=volymRegenerator/volymSvepVarm;
```

```
%Koefficienter
theta=atan((Kappa*sin(alfa))/(Tau+cos(alfa)+1));

d1=Tau+(2*Tau*xDodVarm)+((4*Tau*xRegenerator)/...
    (1+Tau))+Kappa+2*xDodKall+1;

d2=sqrt(Tau^2+2*(Tau-1)*Kappa*cos(alfa)+Kappa^2-2*Tau+1);

delta=d2/d1;

tryckKoefficient(i)=(d1-d2*cos(phi(i)-theta));

end

% Tryck totalt
tryckTotal=(2*m*R*temperaturKall)./(volymSvepVarm.*tryckKoefficient); %[Pa]
% Maxtryck
tryckMax=max(tryckTotal); %[Pa]
% Mintryck
tryckMin=min(tryckTotal); %[Pa]
% Medeltryck
tryckSnitt=mean(tryckTotal); %[Pa]
```

Arbete och effekt

Arbetsmediets utförda arbete på expansionskolven per varv

```
arbeteVarm=(tryckMax*volymSvepVarm*pi*delta*sin(theta))/...
    (1+sqrt(1-delta^2))*sqrt(1-delta)/sqrt(1+delta); %[J/varv]
% Arbetsmediets tillförda arbete från kompressionskolven per varv
arbeteKall = -(tryckMax*volymSvepVarm*pi*delta*Tau*sin(theta))/...
    (1+sqrt(1-delta^2))*(sqrt(1-delta)/sqrt(1+delta)); %[J/varv]
% Nettoarbete per varv
arbeteNetto = arbeteVarm+arbeteKall; %[J/varv]
% Nettoarbete
Effekt = arbeteNetto*Varvtal/60; %[W]
% Termisk verkningsgrad
e = arbeteNetto / arbeteVarm; %
```

Resultat

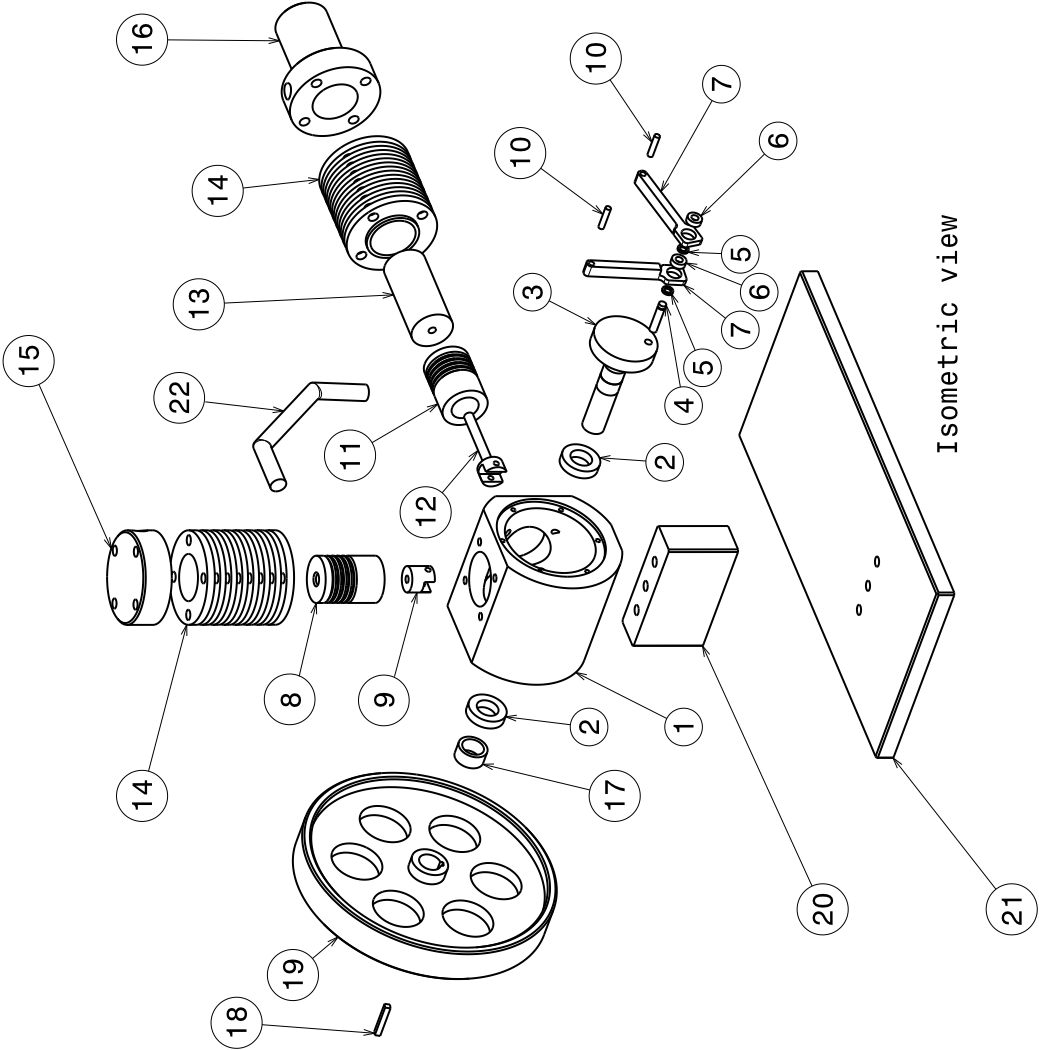
```
displayResult;
```

```
Arbete netto: 0.301973. [J/varv]
Effekt: 5.03288.[W]
Verkningsgrad: 0.418848.
```

Published with MATLAB® 7.11

F Ritningar

#	Antal	Beteckning
1	1	Vevhus
2	2	Vevaxellager
3	1	Vevaxel
4	1	Vevaxeltapp
5	2	Vevarmsdistans
6	2	Vevarmslager
7	2	Vevarm
8	1	Kolv (kall)
9	1	Vevarmsfäste (kall)
10	2	Kolvpinne
11	1	Kolv (varm)
12	1	Vevarmsfäste (varm)
13	1	Displacementkolv
14	2	Kylcylinder
15	1	Topplöck
16	1	Värmecylinder
17	1	Svänghjulsdistans
18	1	Svänghjulsfil
19	1	Svänghjul
20	1	Stativ
21	1	Bottenplatta
22	1	Rör



Vevoxellager:
12x21x5 Metalltätning ABEC 3
[6801 ZZ]

Vevarmslager:
4x8x3 Metalltätning. ABEC 3
[MR84 ZZ]

Rör:
Kopparrör 6mm
Rörfäste: art.nr 1236966

Skruv:
M5 Insex 70mm
M6 torx kullig 10mm VÄNSTER

Kil:
Kil 3x3x1000 syra-rostfri

Spårring: Spårring rostfri 1.4116 SGA C4 4

Lager kan införskaffas hos Kullagergrossisten.se
Rörfäste kan införskaffas hos Ahlsell
Kopparrör kan införskaffas hos Biltema
Skruv kan införskaffas hos Skruvcenter
Kil och Spårring kan införskaffas hos Wiberger

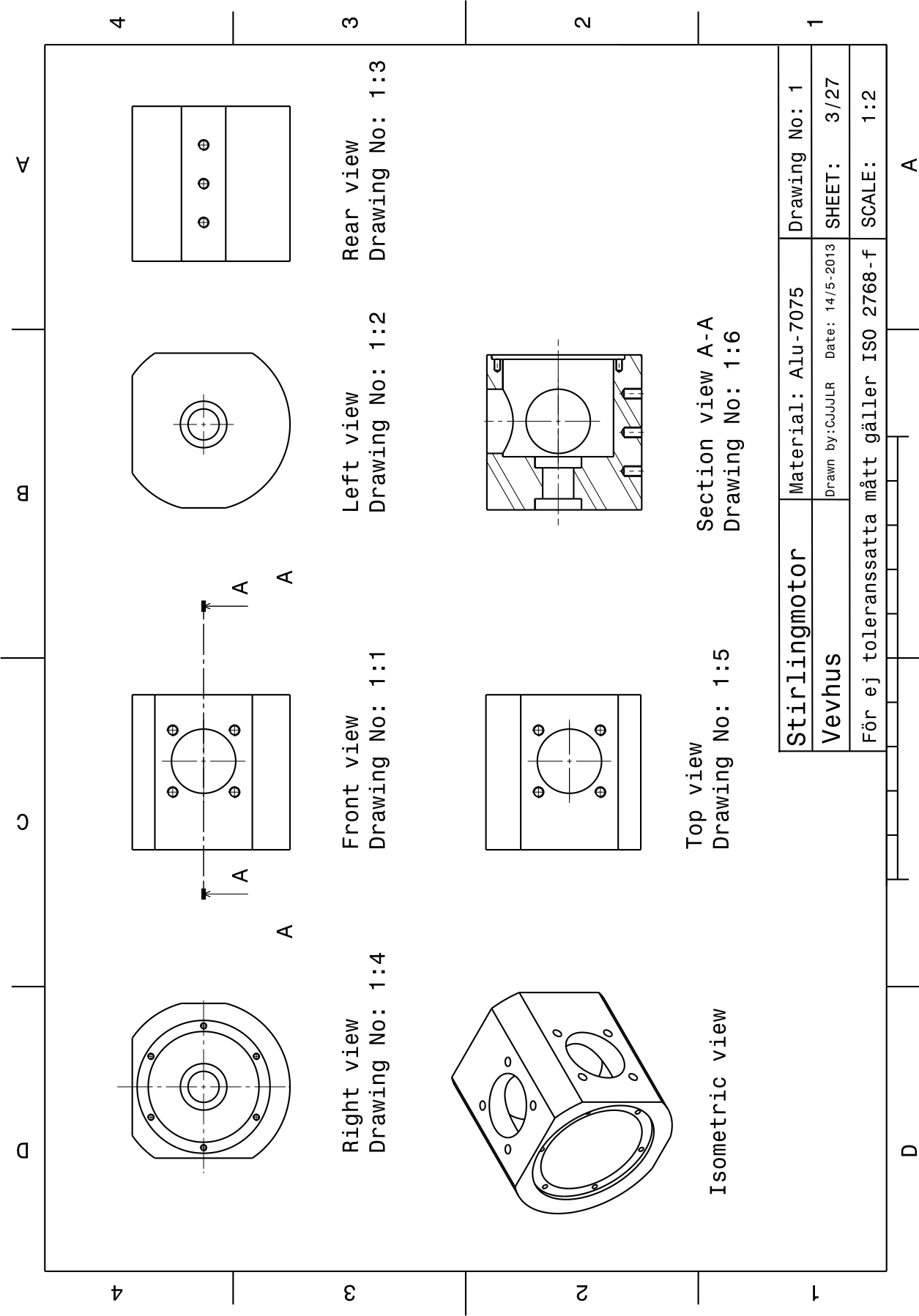
Drawing No: 2, 6, 22

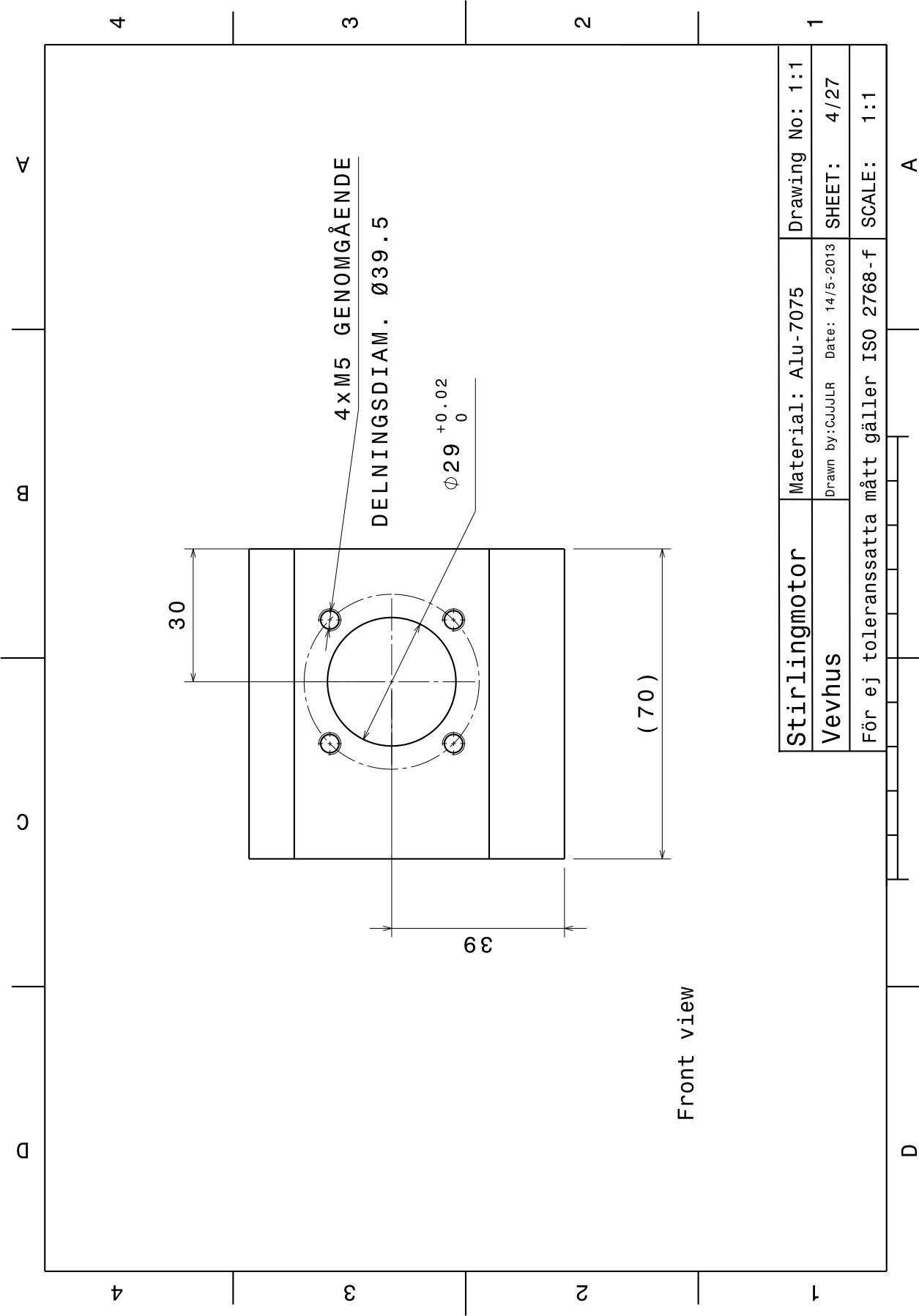
SHEET: 2/27

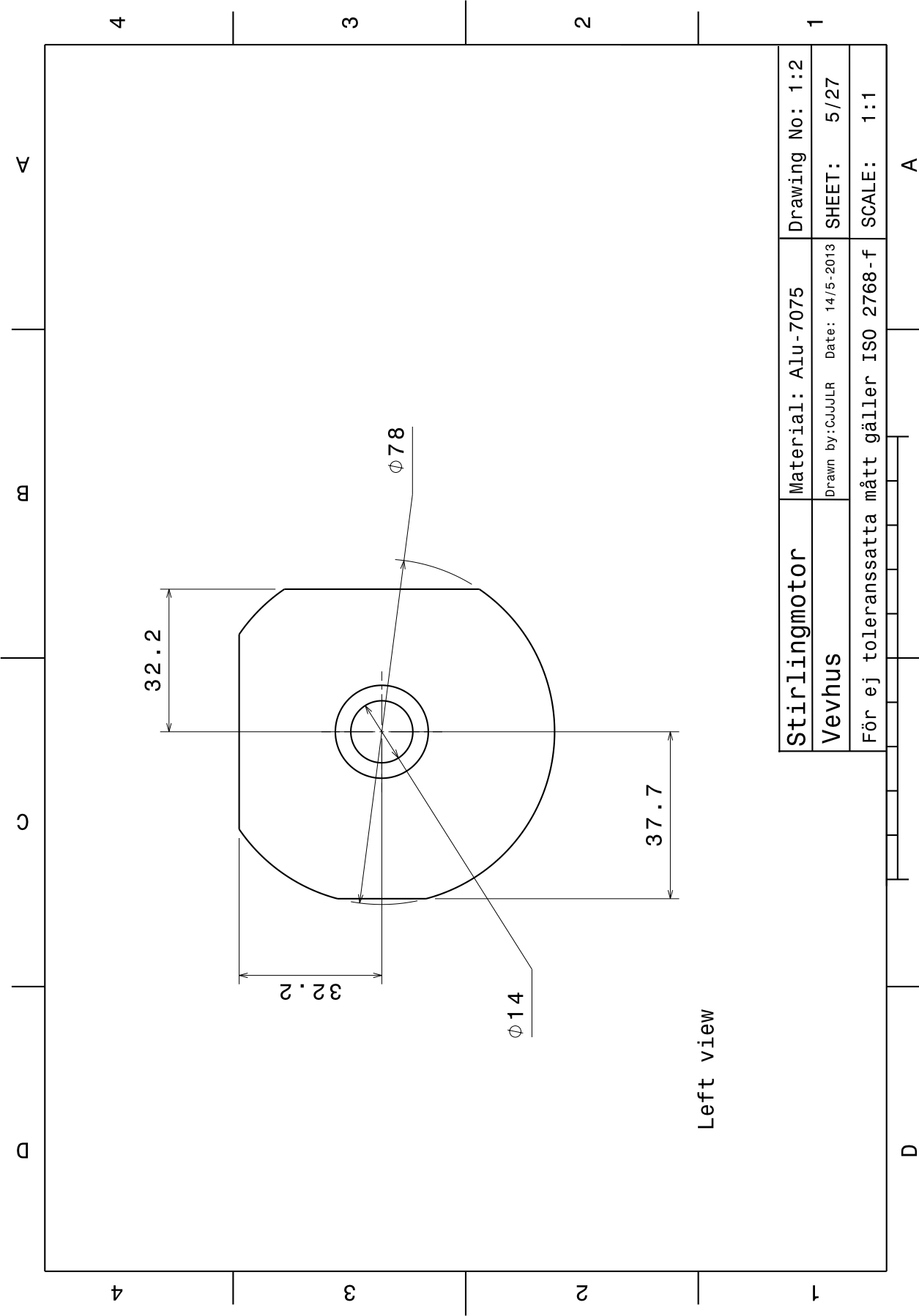
Viktiga Inköp

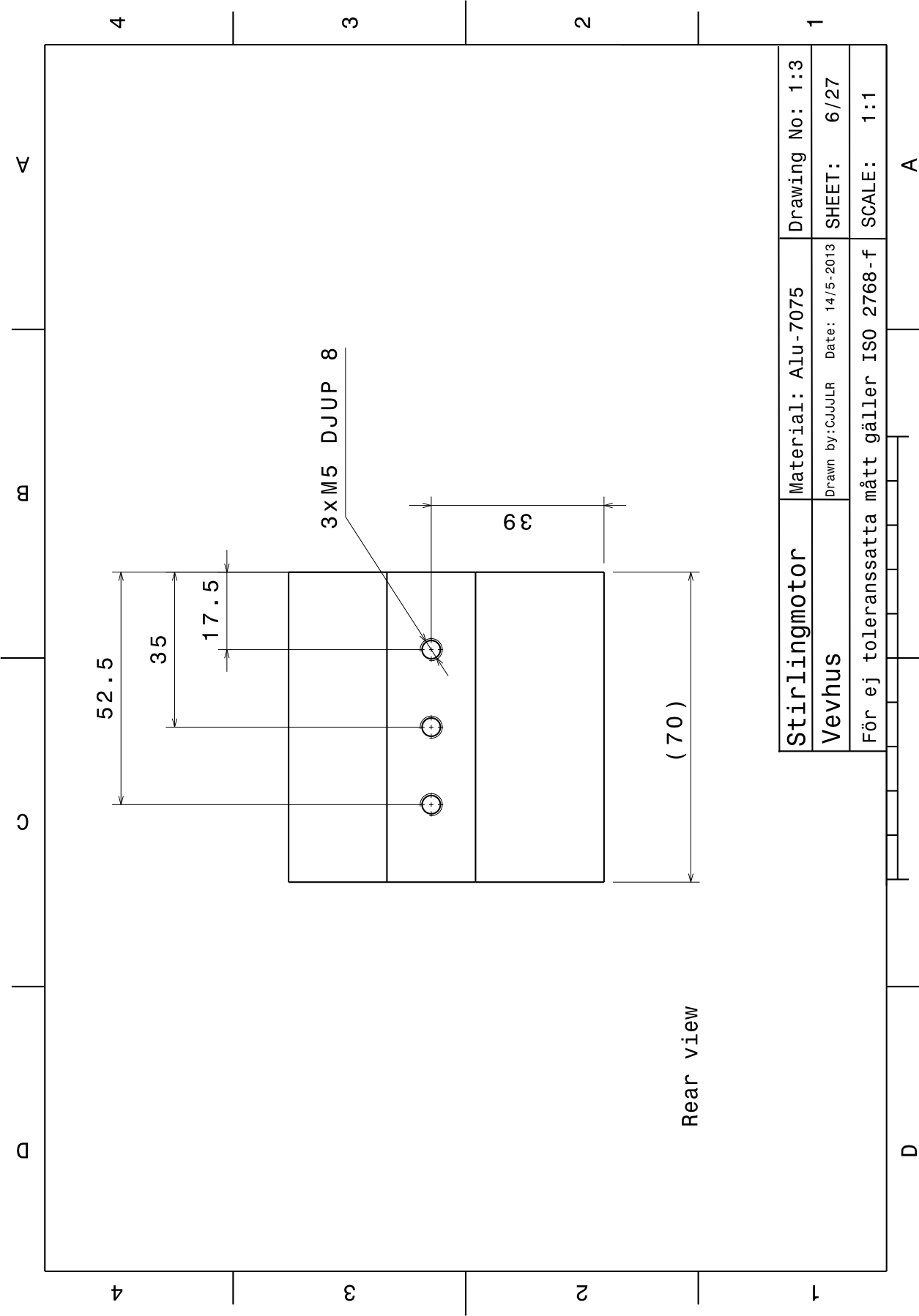
Stirlingmotor

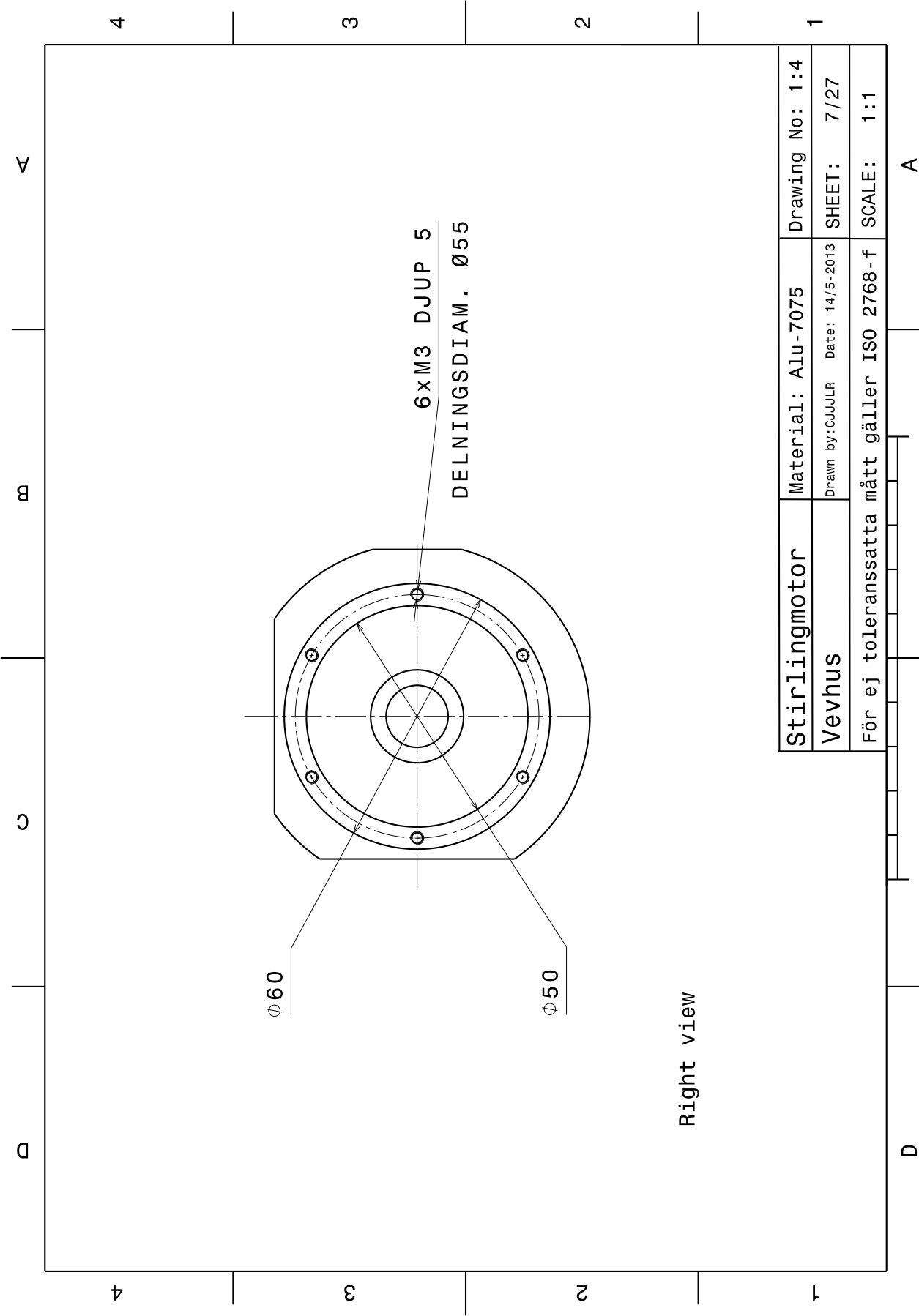
A



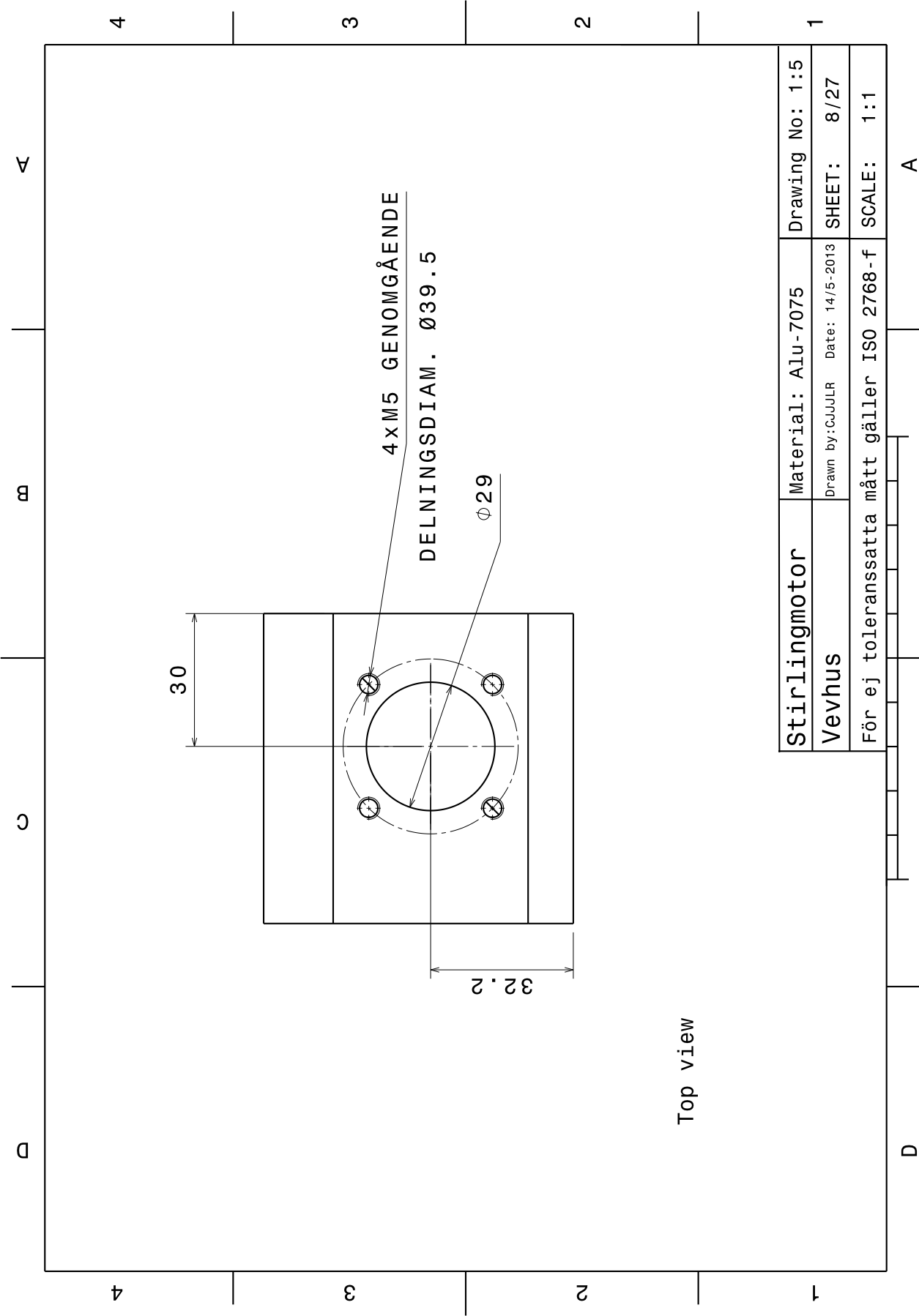


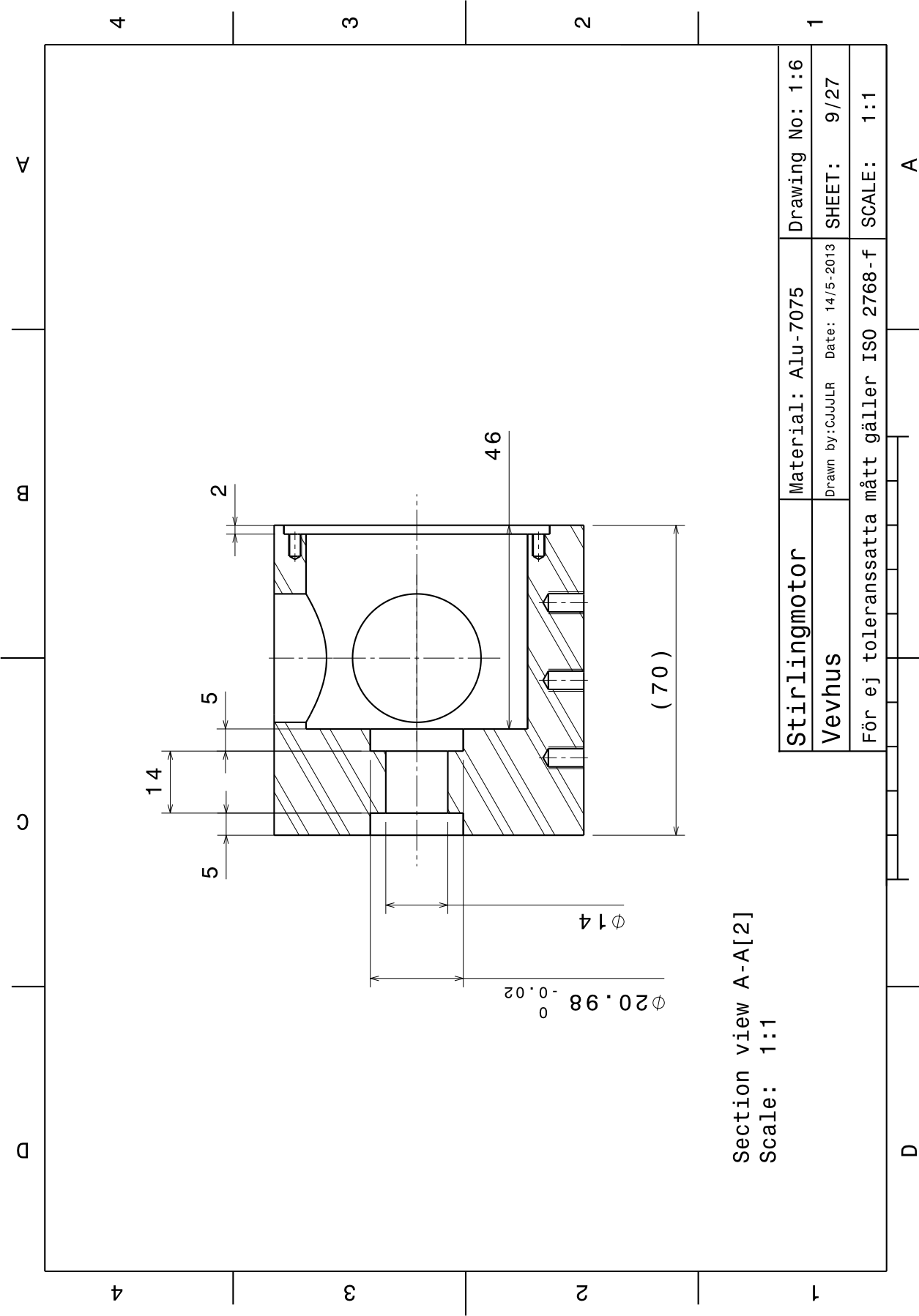




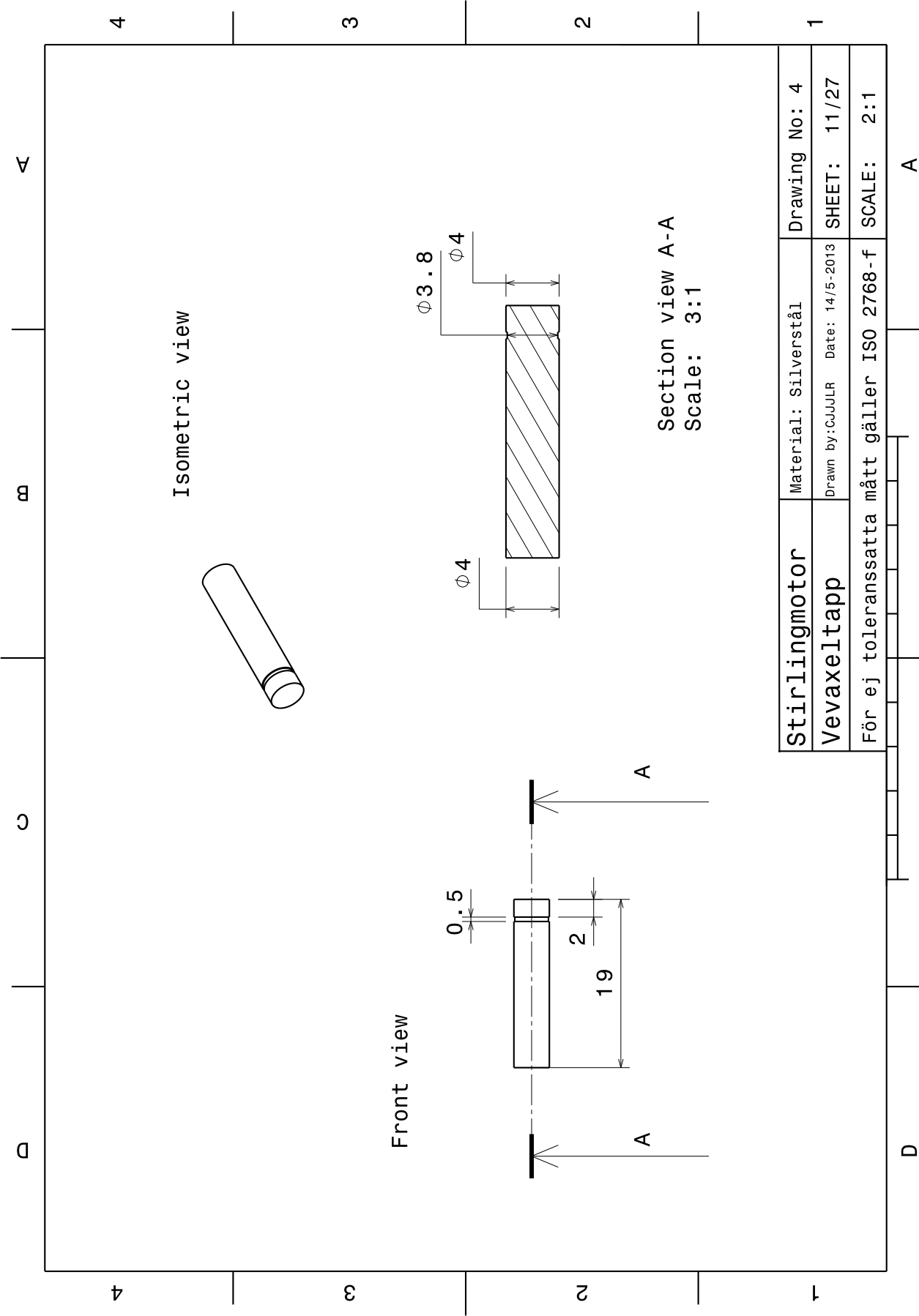


Stirlingmotor	Material: Alu-7075	Drawing No: 1:4
Vevhus	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 7/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1





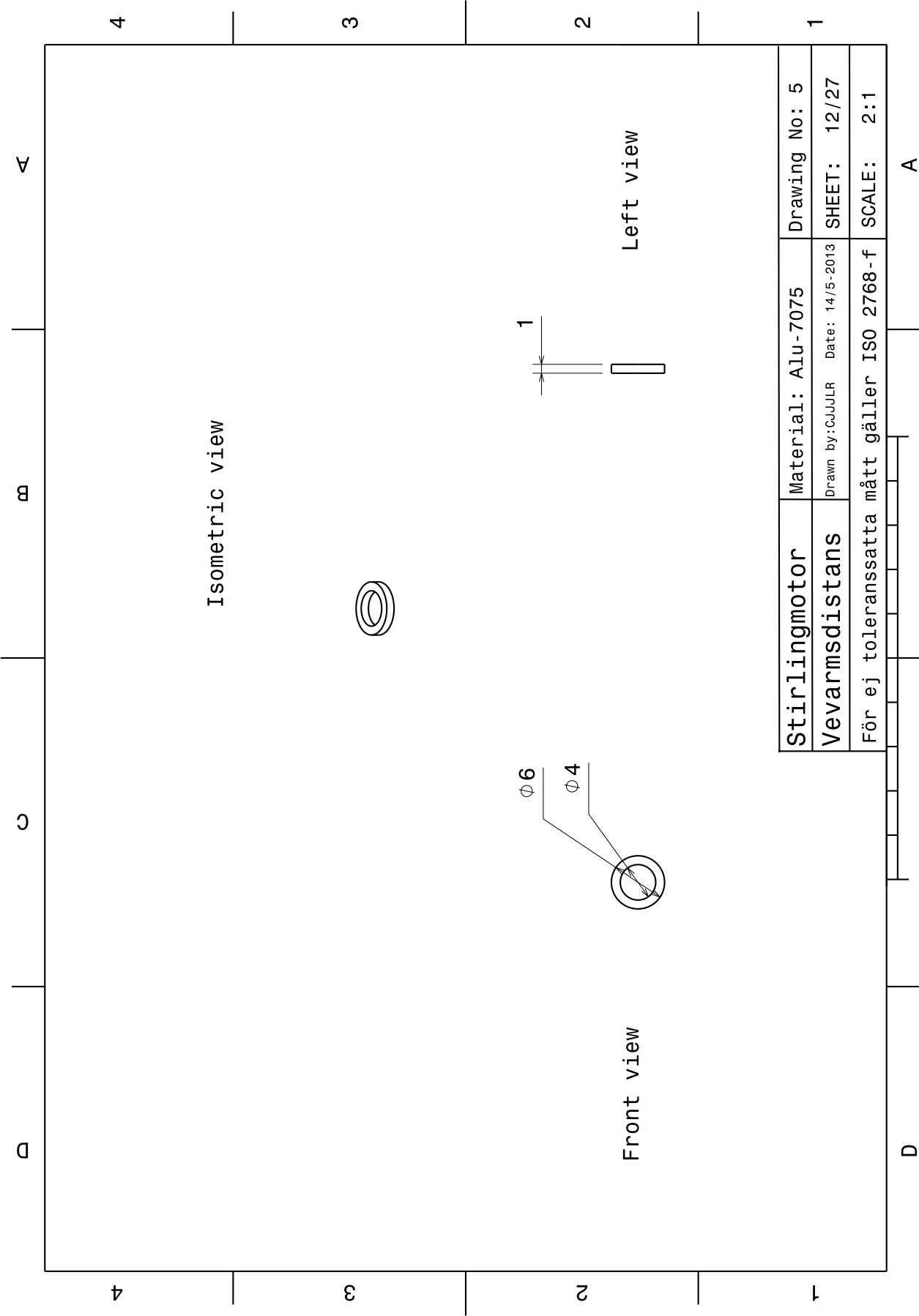
Section view A-A[2]
Scale: 1:1

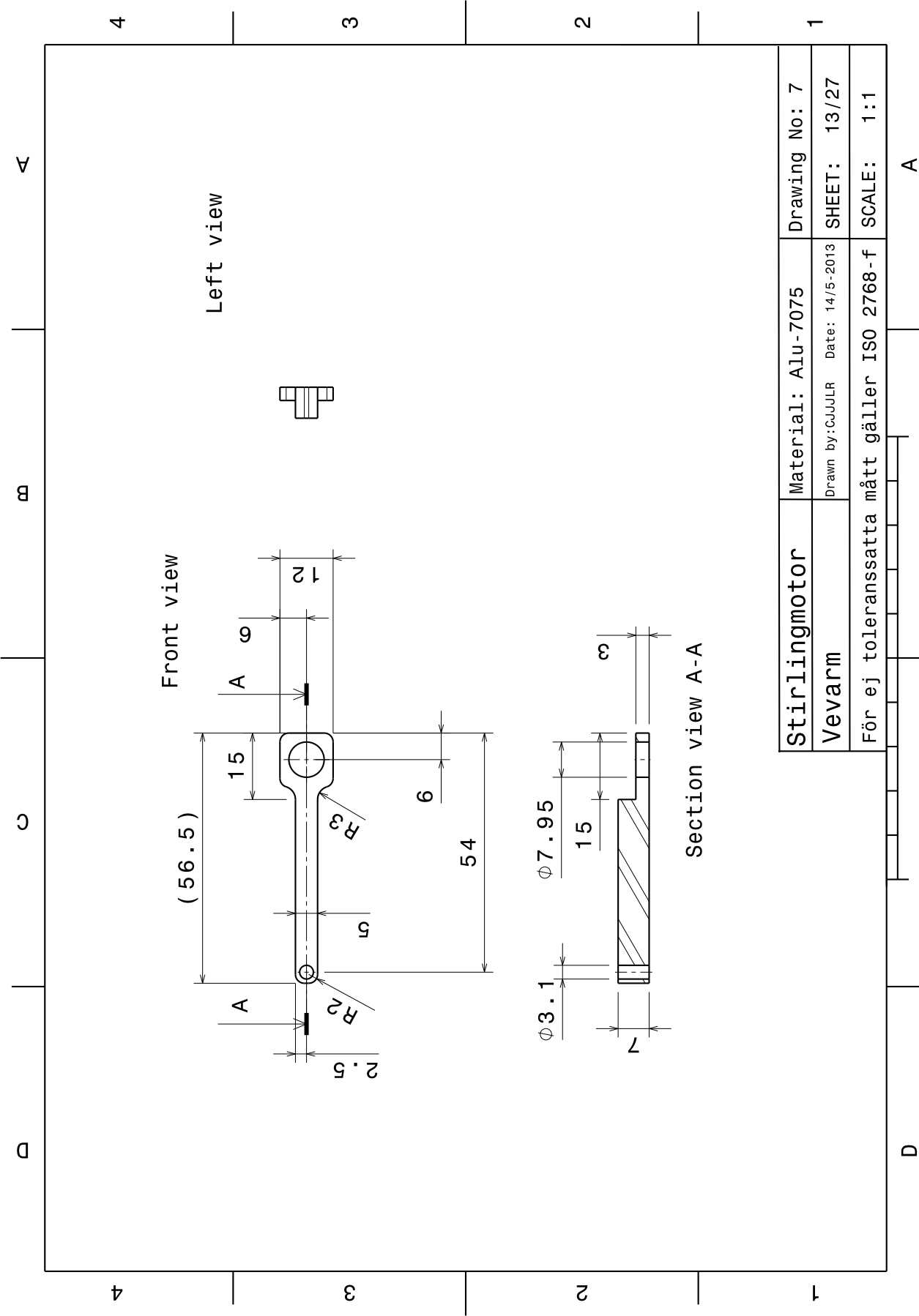


Stirlingmotor	Material: Silverstål	Drawing No: 4
Vevaxeltapp	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 11/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 2:1

A

D

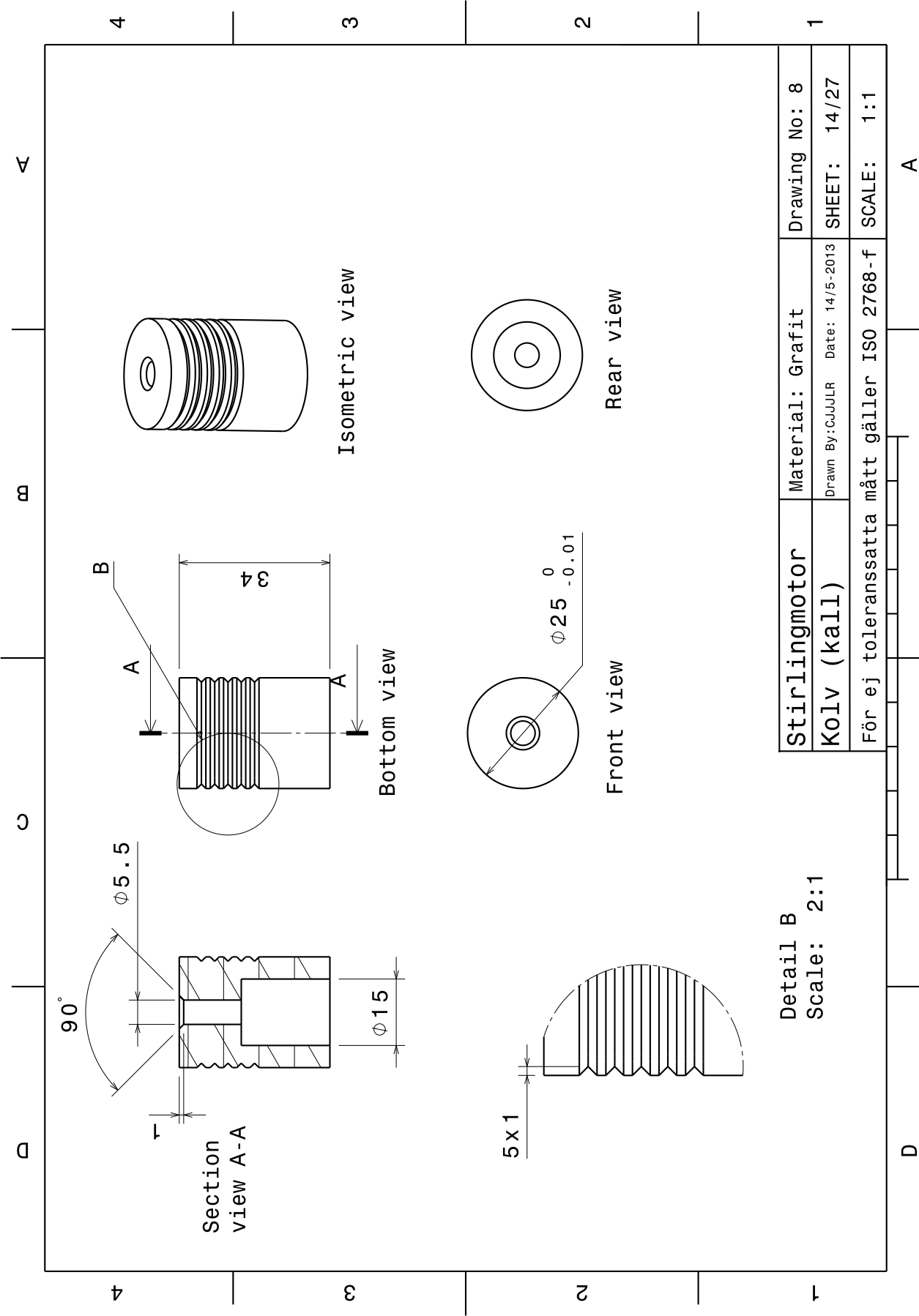




Stirlingmotor	Material: Alu-7075	Drawing No: 7
Vevarm	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 13/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1

A

D

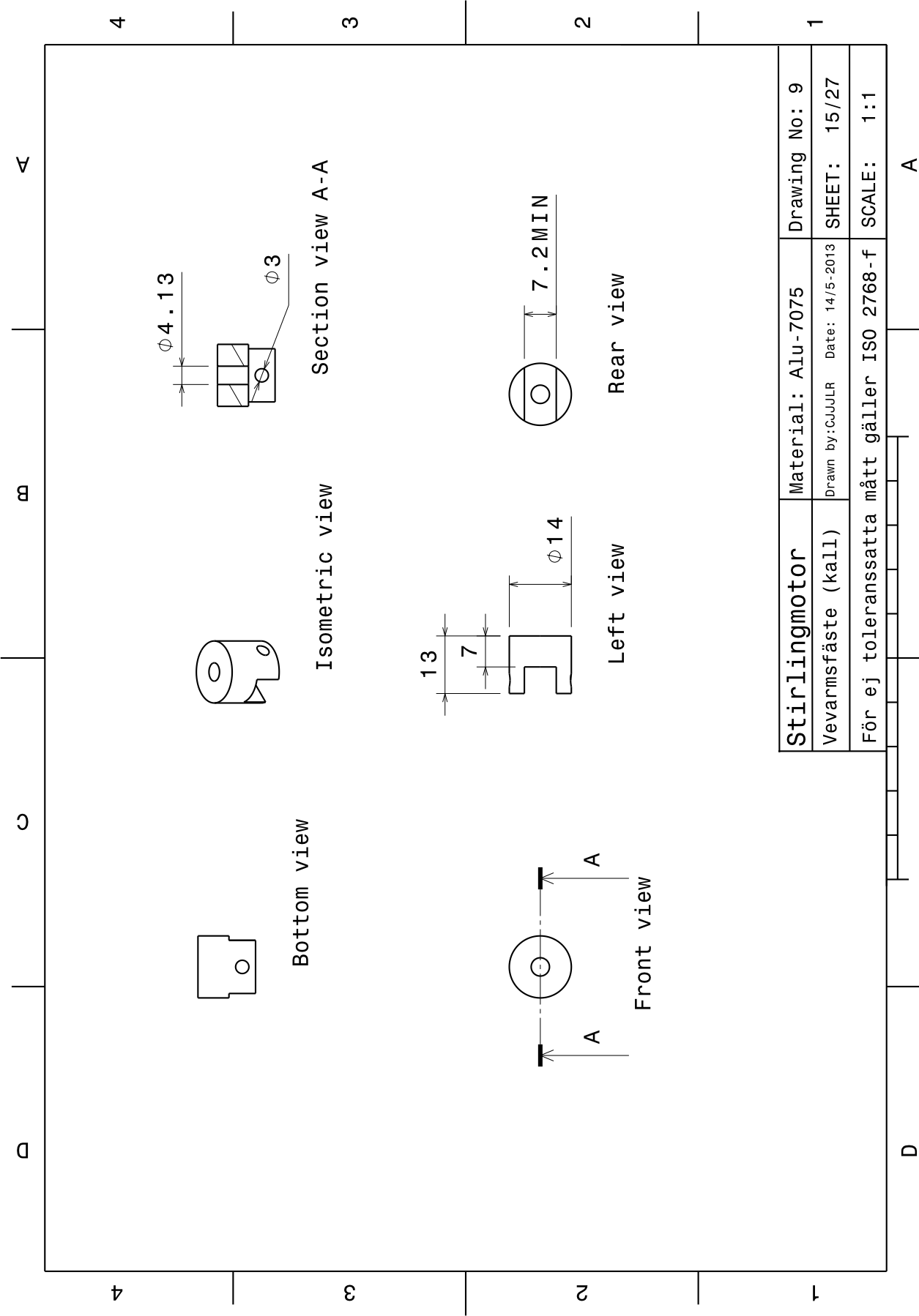


Detail B
Scale: 2:1

Stirlingmotor	Material: Grafit	Drawing No: 8
Kolv (kall)	Drawn By: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 14/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1

A

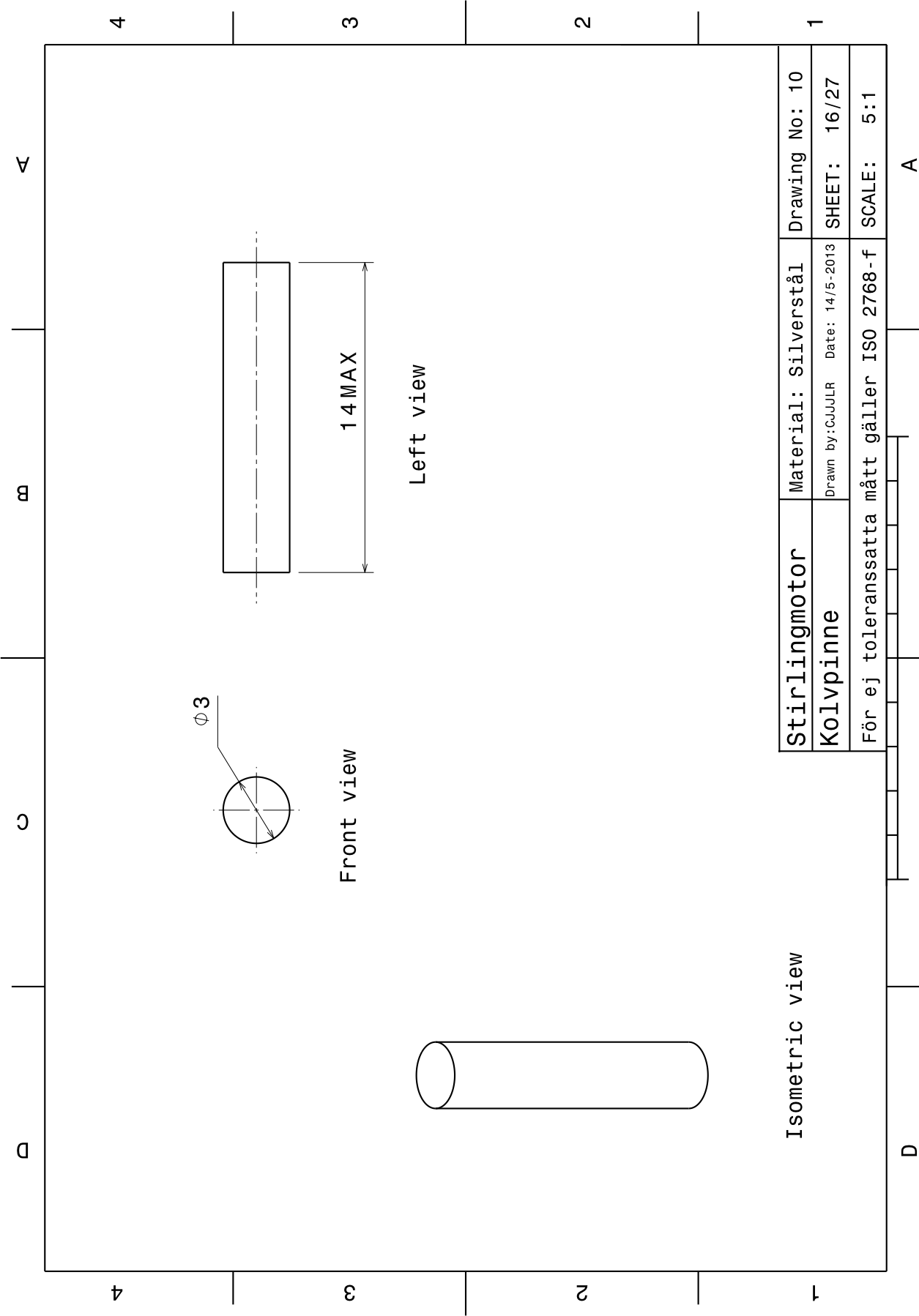
D



Stirlingmotor	Material: Alu-7075	Drawing No: 9
Vevarnsfäste (kall)	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 15/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1

A

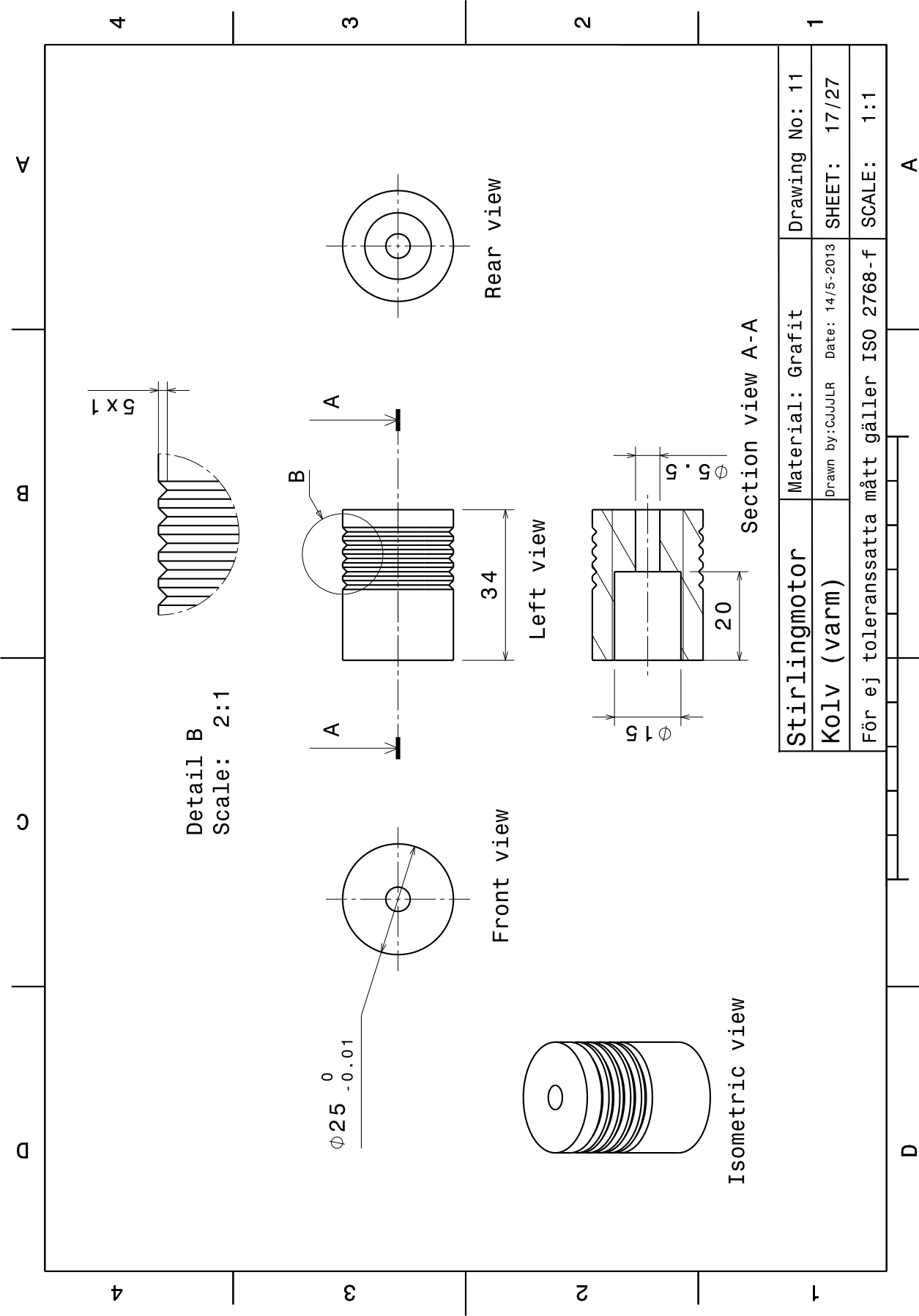
D



Isometric view		Stirlingmotor	Material: Silverstål	Drawing No: 10
		Kolvpinne	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 16/27
		För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 5:1

A

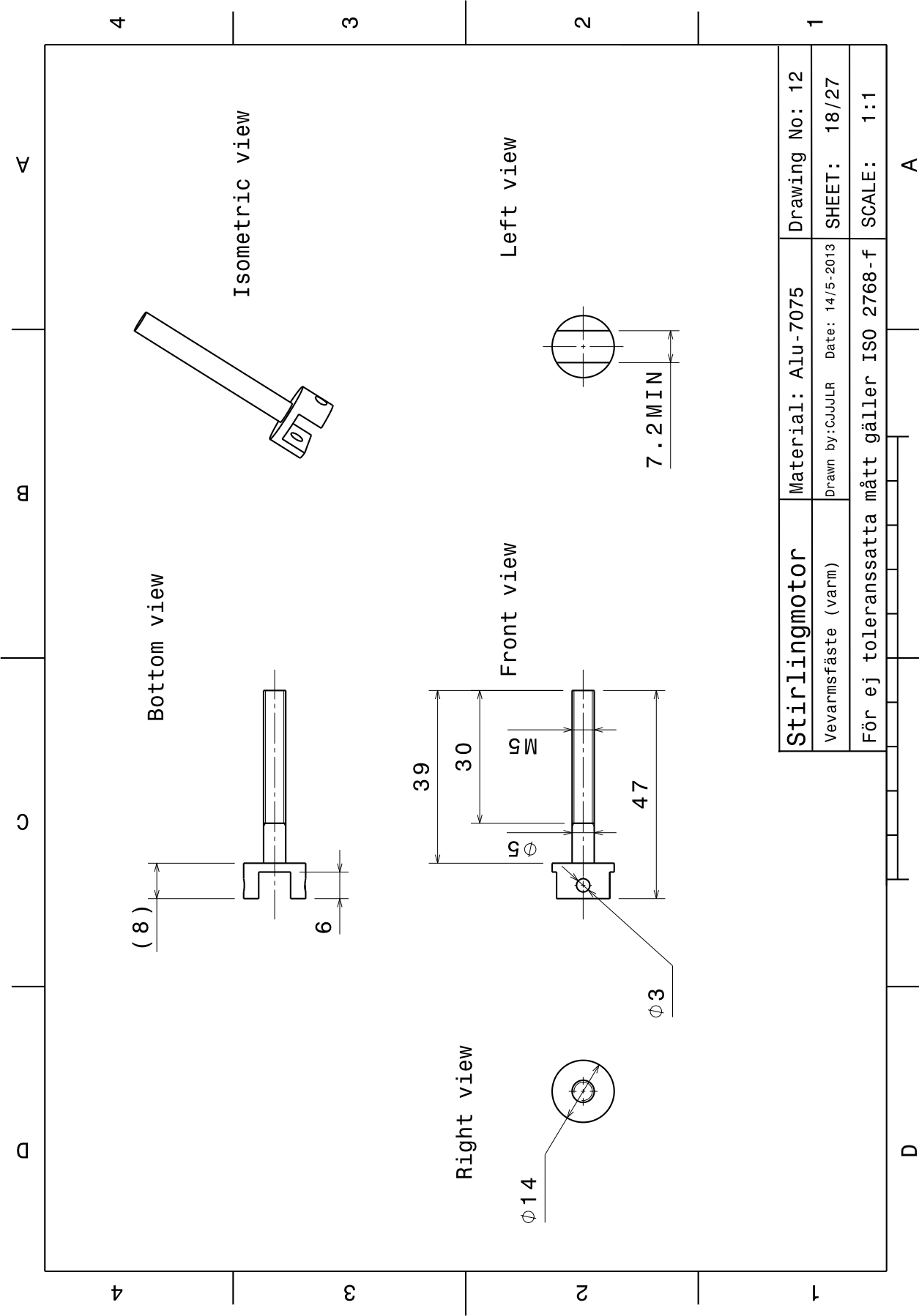
D

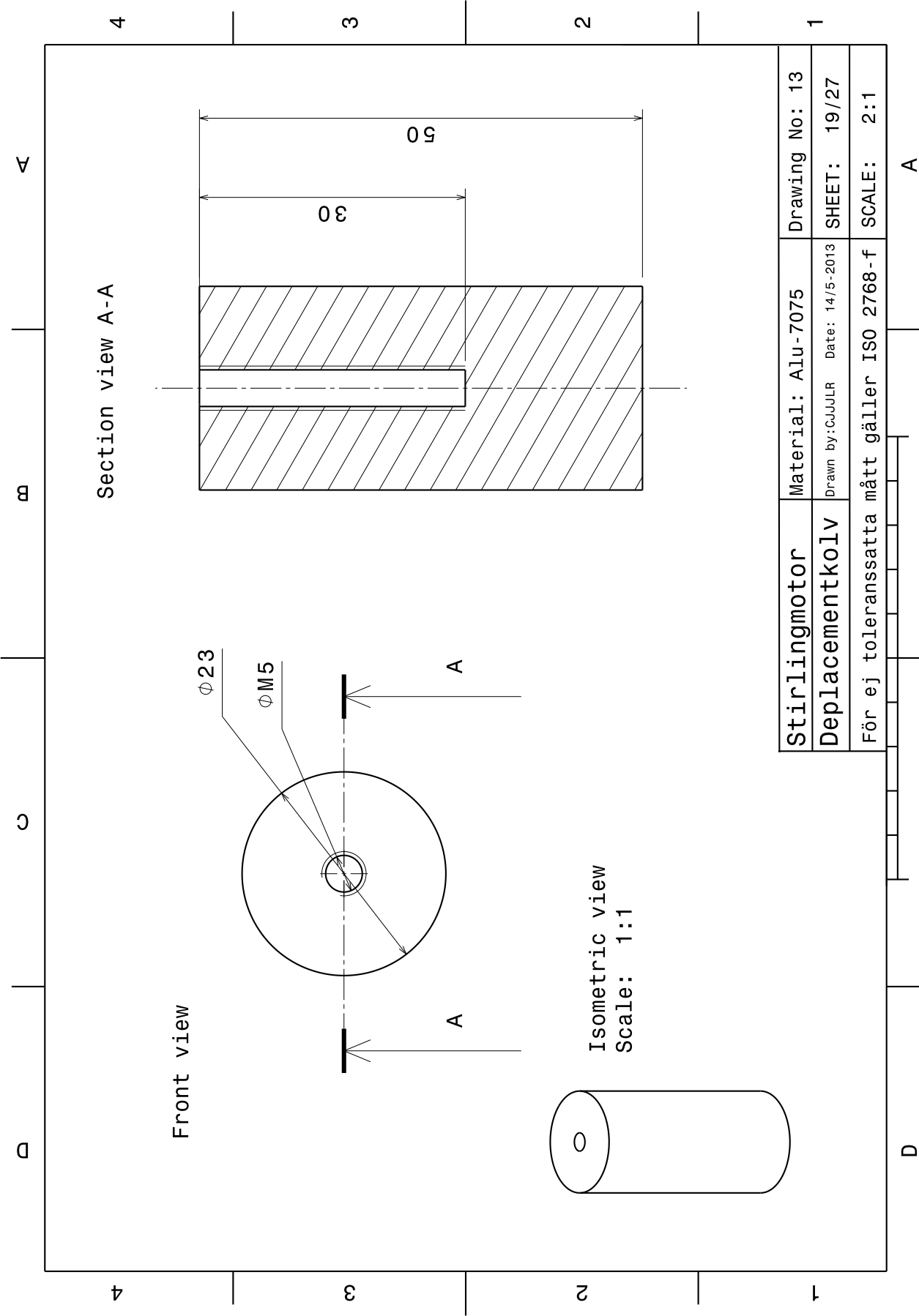


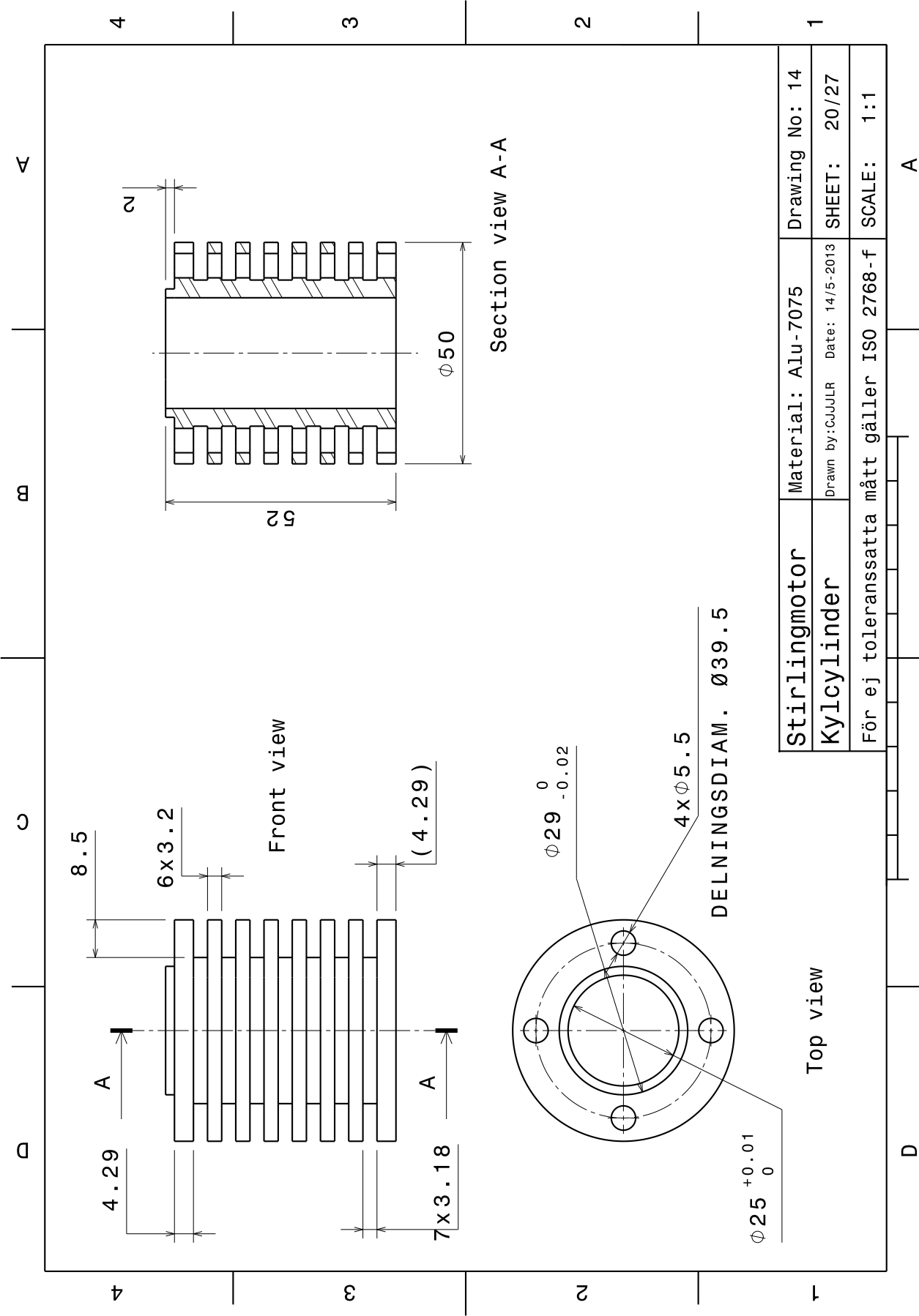
Stirlingmotor	Material: Grafit	Drawing No: 11
Kolv (varm)	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 17/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1

A

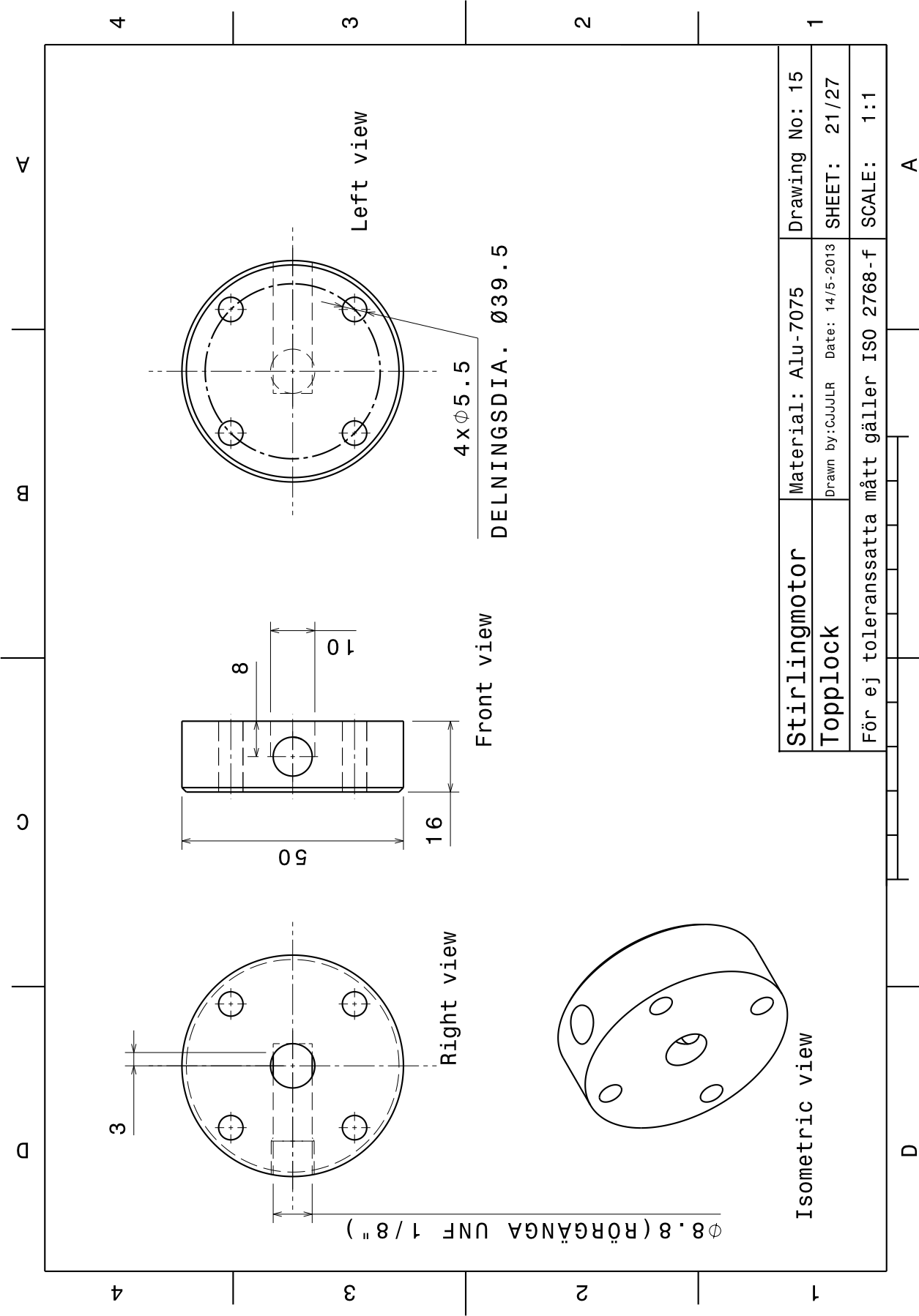
D







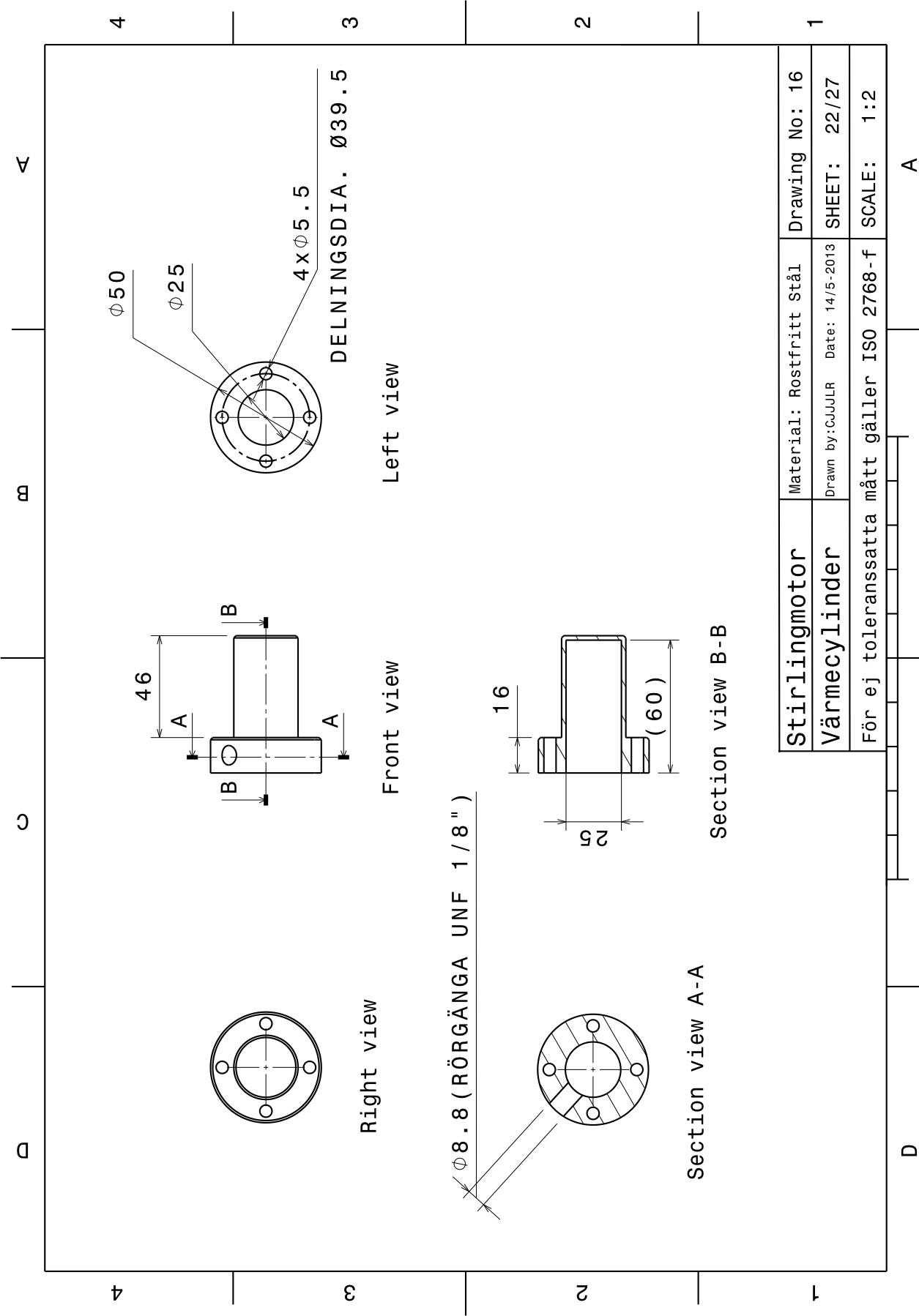
Stirlingmotor	Material: Alu-7075	Drawing No: 14
Kylcylinder	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 20/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1



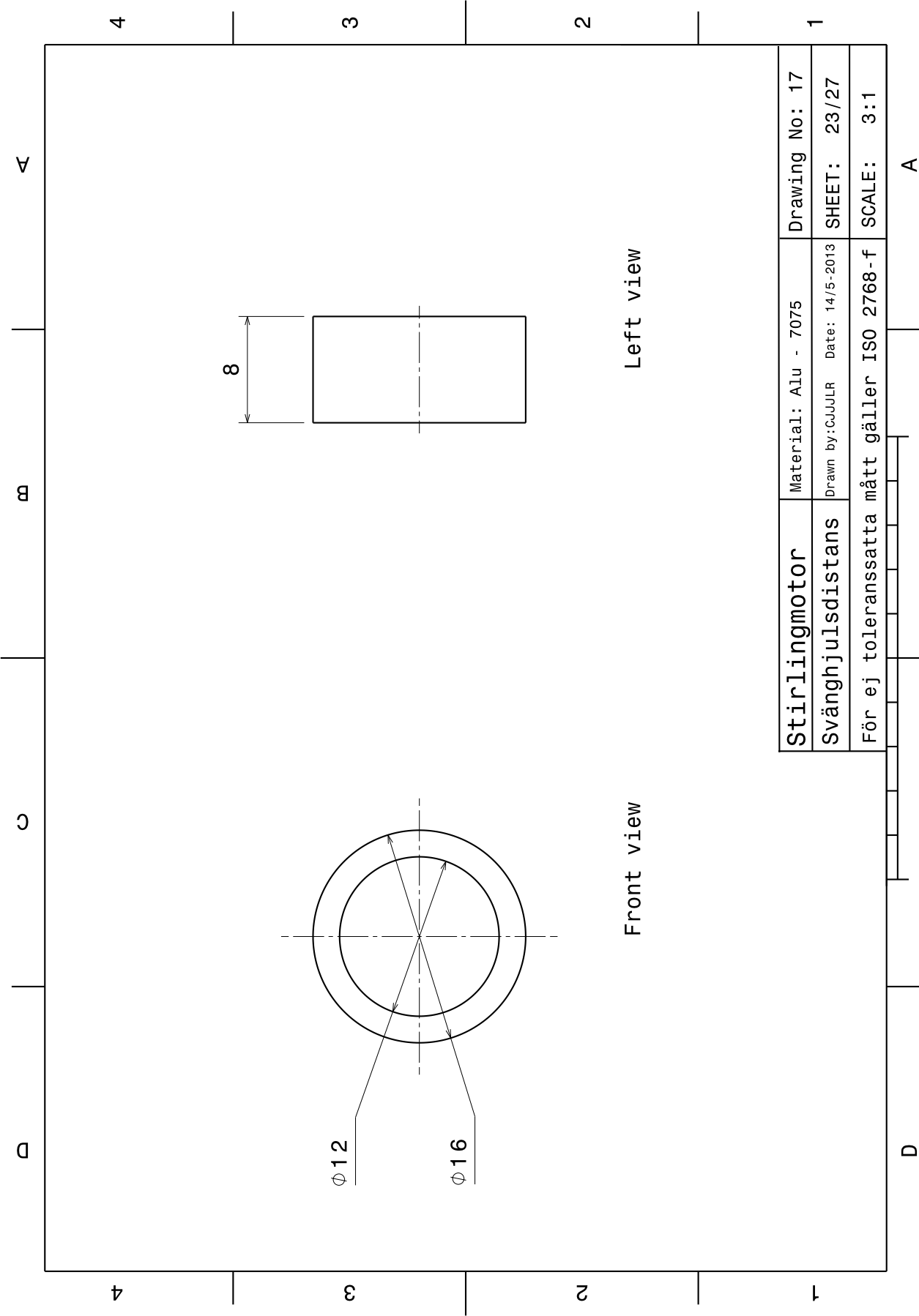
Stirlingmotor	Material: Alu-7075	Drawing No: 15
Topblock	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 21/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1

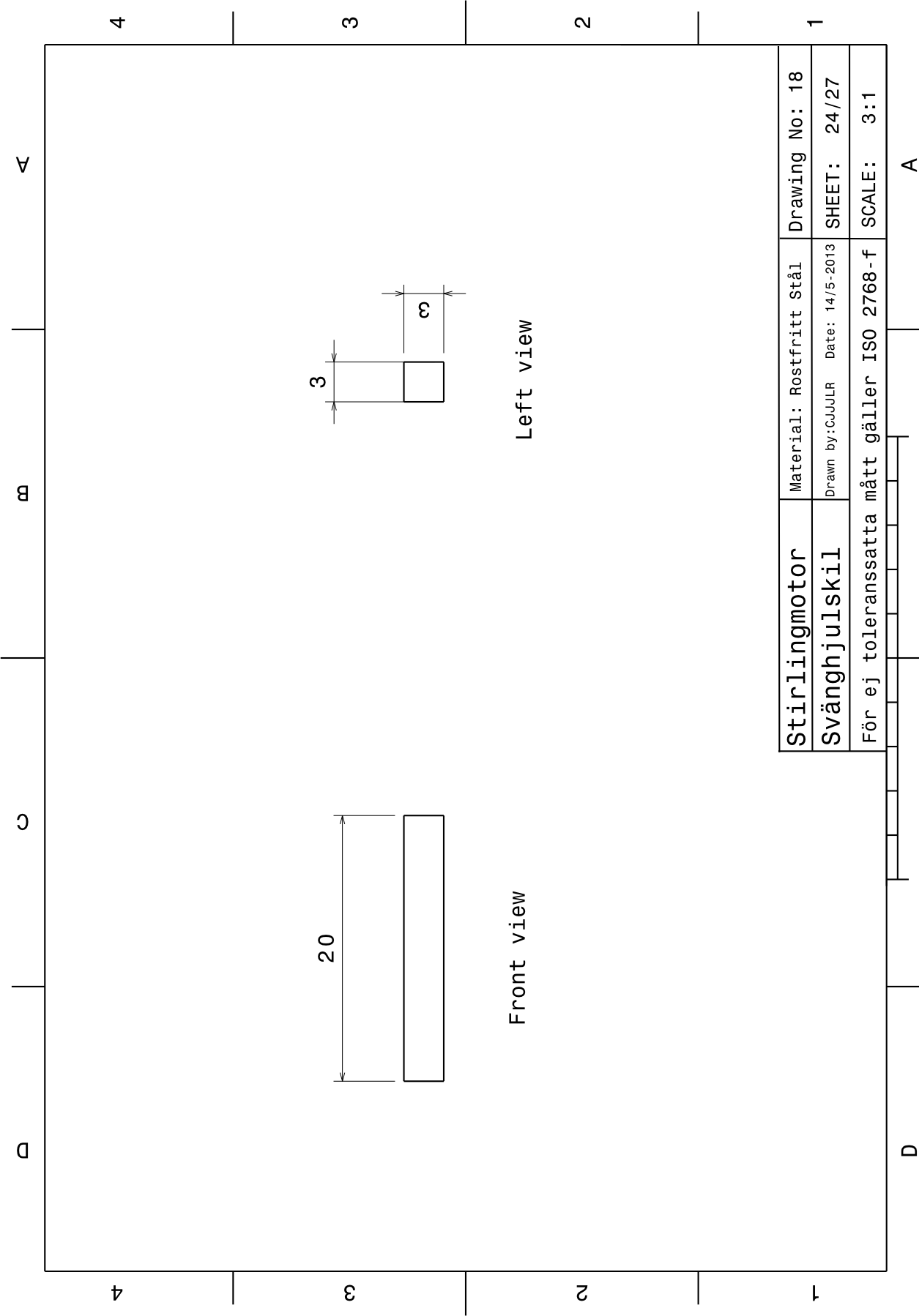
A

D

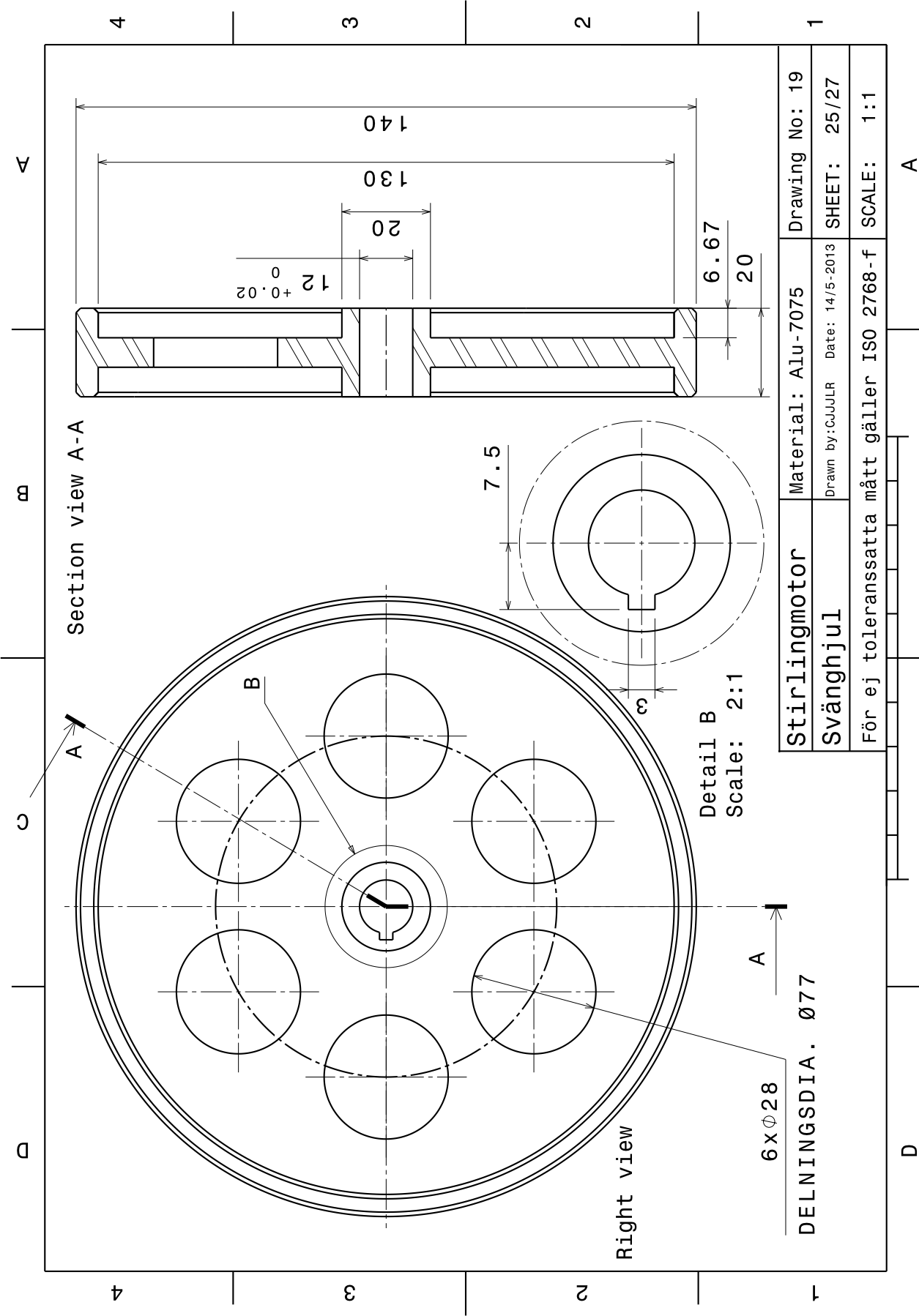


Stirlingmotor	Material: Rostfritt Stål	Drawing No: 16
Värmecylinder	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 22/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:2





Stirlingmotor	Material: Rostfritt Stål		Drawing No: 18
Svänghjulskil	Drawn by: CJJULR	Date: 14/5-2013	SHEET: 24/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f			SCALE: 3:1



Stirlingmotor	Material: Alu-7075	Drawing No: 19
Svånghjul	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 25/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:1

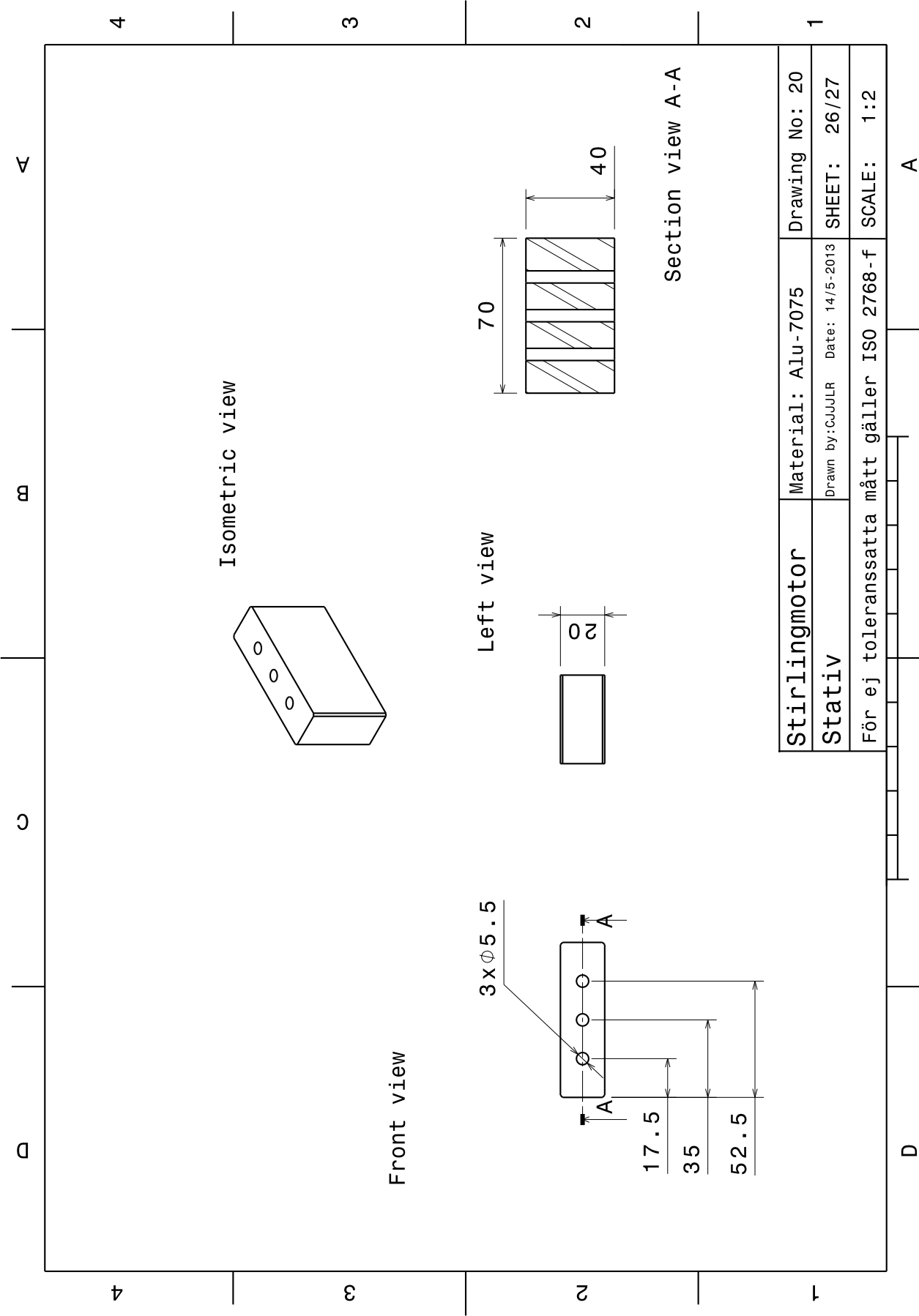
DELNINGSDIA. Ø 77

6 x Ø 28

Detail B
Scale: 2:1

Section view A-A

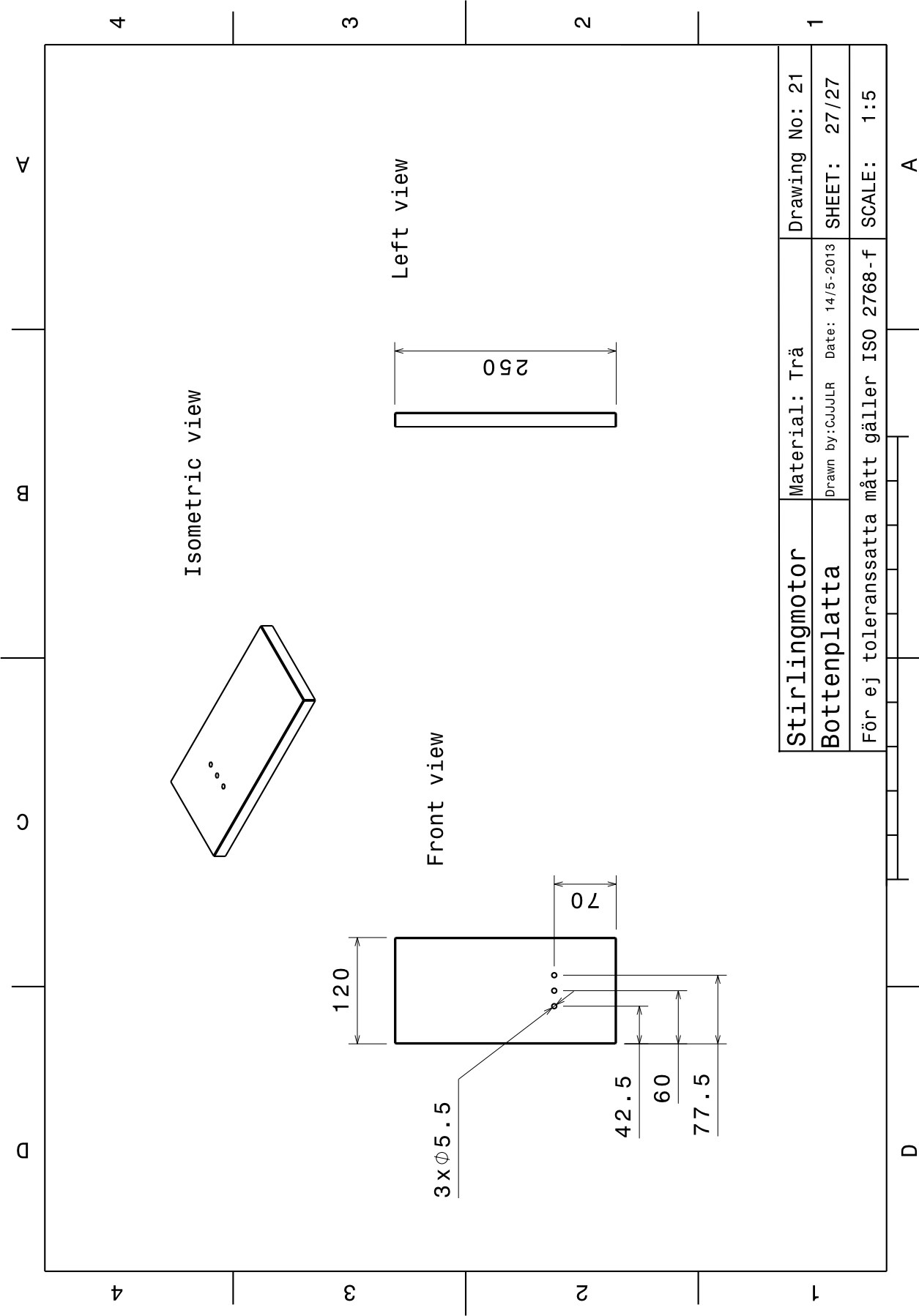
Right view



Stirlingmotor	Material: Alu-7075	Drawing No: 20
Stativ	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 26/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:2

D

A



Stirlingmotor	Material: Trä	Drawing No: 21
Bottenplatta	Drawn by: CJJULR Date: 14/5-2013	SHEET: 27/27
För ej toleranssatta mått gäller ISO 2768-f		SCALE: 1:5

A

D

G Instruktioner

Tillverkningsbeskrivningar

Härefter följer tillverkningsbeskrivningar till varje del i stirlingmotorn. Dessa är alltså förslag på tillvägagångssätt och inte nödvändigtvis det bästa sättet. Följ det du anser vara bra och tycker du att ett annat sätt skulle passa bättre så prova detta. Är du det minsta osäker så fråga personalen i verkstaden innan du sätter igång!

En del lösningar har vi inte hunnit testa fullt ut då vi inte hunnit tillverka allt under vårt kandidatarbete. Därför kan det finnas lite brister i de beskrivningar som följer men de kan vara till god hjälp vid tillverkning.

Beskrivningarna beskriver i första hand tillverkning i de manuella maskinerna i verkstaden men de ska även gå att applicera i NC-maskinerna. Dock kan det skilja lite på tillvägagångssätt här så ta reda på vad som man bör tänka på där.

Beroende på vilken maskin du står och jobbar med har du olika förutsättningar så det kanske inte alltid är lämpligt att följa anvisningarna med avseende på detta.

Tänk på att det alltid är säkerheten först! Är du osäker på något moment fråga personalen i verkstaden. Bygger du under XP-tid så fråga någon i föreningen om hjälp.

Skärdatan läser du ut ur verkstadshandboken som finns tillgänglig i flera exemplar nere i prototyplabbet. Var noga med att du kör med rätt data så du inte har sönder maskinerna eller skadar dig själv!

Vevhus

Ritningsnummer: 1

Vevhuset har en försänkt avsats för att möjliggöra infästning av en plexiglas, vilket tillsammans med en tätning vid vevaxelgenomföringen möjliggör trycksättning av motorn. Om ingen plexiglasskiva eller tätade lager finns att tillgå, eller om trycksättning inte är aktuellt behöver denna avsats ej tillverkas.

1. Mät i den svarv du ska använda vad du behöver för utstick och greppyta för att kunna spänna upp biten.
2. Såga en bit i kallsågen efter vad du kom fram till i punkt 1.
3. Spänn upp biten i svarven med lämpligt extra utstick, alltså utöver vad biten i slutet ska bli och plats för stickstål. Denna del kommer aldrig bearbetas, rekommenderat ca 5 mm.
4. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
5. Svarva stycket runt, tänk på att du ska gå tillräckligt långt in så att du även kan sticka av biten efteråt.
6. Svarva nu ytterytan till angivet mått.
7. Förbered för att borra genom att använda en dubbhålsborr.
8. Stega upp med borrar tills du borrar 14 mm.
9. Byt nu verktyg till en invändig svarvbom, tänk på att ha tillräckligt med utstick på verktyget för att kunna svarva hela längden på biten, det vill säga 70 mm.
10. Mät noga mellan gångerna så att du hamnar inom toleransen när du gör lagerläget.
11. Svarva upp till angiven diameter (50 mm).
12. Svarva sedan avsatsen som är tänkt för plexiskivan, diameter 60 mm.
13. Svarva nu ett skär på lite ingrepp längst bak där det än så länge bara är borrarat, detta för att ett borrar inte är helt rakt och för att du sedan ska använda denna hål för att mäta upp biten i nästa uppspanning, hålet bör inte bli mer än 14.2 mm
14. Svarva nu lagerläget.
15. Stick av kutsen med lite övermått, ca 0.5 mm.

16. Spänn nu upp biten i svarven med en individuellt inställbar fyrbackschuck. Ta hjälp av dubbkockans kona när du gör första inställningen

17. Mät med indikorklocka i hålet så att den sitter inom en hundraedels tolerans.

18. Plana av biten till angivet mått.

19. Svarva lagerläget.

20. Spänn upp biten i skruvstycket i fräsen. Sätt den så att backarna i skruvstycket klämmer på de plana ändarna.

21. Plana av en yta och borra hålet för cylindern. För att uppnå rätt tolerans kan det hända att du behöver använda en AR-borra.

22. Borra hålen för skruvförbandet och gänga dessa med en gängtapp, använd fräsen som stöd så att gängorna blir raka.

23. Vänd på biten 90 grader och upprepa 21-22 igen.

24. Vänd på biten ytterligare 90 grader, det vill säga 180 grader från första ytan

25. Fräs av ytan.

26. Borra hålen för skruvförbandet och gänga dessa med en gängtapp, använd fräsen som stöd så gängorna blir raka.

27. Vänd nu upp biten och spänn fast den, så du kan göra skruvförbandet för plexiskivan.

28. Borra hålen för skruvförbandet och gänga dessa med en gängtapp, använd fräsen som stöd så gängorna blir raka.

29. Delen är nu färdig.

Vevaxel

Ritningsnummer: 3

1. Mät i den svarven du ska vara vad du behöver för utstick och greppyta för att kunna spänna upp biten.
2. Såga en bit i kallsågen efter vad du kom fram till i punkt 1.
3. Spänn upp biten i svarven med lämpligt extra utstick, alltså utöver vad biten i slutet ska bli och plats för stickstål. Dvs denna bit kommer aldrig bearbetas, rekommenderat ca 5 mm.
4. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
5. Svarva stycket runt, tänk på att du ska gå tillräckligt långt in så du även kan sticka av biten efteråt. Svarva in ca 70 mm.
6. Svarva kutsen till givet yttermått, glöm inte att mäta och kontrollera så du når rätt mått.
7. Svarva nu stegvis ner kutsen till givna mått och tänk på att mäta noggrant, så att rätt tolerans uppnås.
8. Förbered bormningen med en dubbhålsborr.
9. Borra hålet med en borr gjord för M6.
10. Gänga hålet med en M6-gängtapp.
11. Stick av biten.
12. Spänn upp den i fräsen och klocka in centrum med digitalen, borra hålet.
13. Spänn om i fräsen, klocka in, fräs kilspåret.
14. Delen är nu klar.

Vevaxeltapp

Ritningsnummer: 4

Denna ska vara gjort i silverstål. Utgå ifrån en silverstålsaxel med rätt dimension och såga denna med en bågfil eller i bandsågen. Tänk på att ta några mm extra mot vad den ska vara. Se till att inte repa axeln med sågen.

1. Såga av en bit med bandsåg/bågfil med några mm övermått. Rekommendation: 2 mm.
2. Spänn upp biten i spännhylschucken i svarven och plana av en sida.
3. Ta loss biten och spänn upp den åt andra hållet från innan.
4. Plana av biten.
5. Ta loss biten och mät den hur lång den är, spänn upp den igen och nolla verktyget mot den planade ytan.
6. Svarva biten till rätt längd.
7. Nu ska du göra spåret för låsringen. För detta behöver du ett specialverktyg som finns slipat för detta, fråga personalen i verkstaden om detta. Nolla verktyget mot kanten och gå sedan in till angivet mått och gör spåret.
8. Delen är nu klar.

Vearmsdistans**Ritningsnummer: 5**

1. Ta en rundstång som har cirka ytterdiametern 10 mm.
2. Såga av ca 15 mm i kallsågen.
3. Spänn upp biten med lagom med utstick i spännhylsechuken i svarven.
4. Plana av ytorna och nolla verktyget mot biten.
5. Svarva biten till angivet mått tänk på att mäta så att du når rätt tolerans.
6. Förbered för att borra med en dubbhålsborr.
7. Borra upp hålet till angivet mått.
8. Stick av biten så den blir till angivet mått, tänk på stickstålets bredd och på hur du nollar verktyget utifrån detta.
9. Delen är nu klar.

Vevarm

Ritningsnummer: 7

1. Kapa till en lämplig bit i kallsågen, den ska vara ca 5-10 mm bredare än vad vevarman ska bli. Den ska dessutom vara högre än två vevarmar plus material att spänna i, rekommenderad storlek 20x50x70 mm.

Nu ska du göra ett rättblock innan du påbörjar operationerna för att tillverka själva stakarna, tänk på att rättblocket ska ha minst 5 mm övermått i förhållande till vad vevstaken ska bli!

2. Fäst biten i ett skruvstäd i en fräs och plana av en av de två största ytorna. Använd passbitar för att fästa biten på rätt höjd i skruvstället. Konsultera verkstadshandboken eller personalen för rätt maskinhastighet och ingrepp.

3. Vänd biten i skruvstället och se till att den avplanade ytan ligger mot passbitarna, så att den nya ytan som skall fräsas blir parallell med denna. Plana av den andra största ytan och mät biten med ett skjutmått. Ställ in maskinen i z-led genom att höja bordet tills verktyget precis nuddar biten och mata in måttet du mätte med skjutmättet.

4. Fäst nu biten på högkant i skruvstället, använd passbitar om det behövs. Plana av en av de mellanstora sidorna.

5. Vänd biten och plana av den motstående sidan.

6. Byt ut fräsverktyget mot en pinnfräs. Vänd biten så att den återigen sitter med en av de största ytorna uppåt och de mellanstora sidorna mot skruvställets backar. Använd passbitar. Använd sidan av pinnfräsen för att plana av en av de minsta sidorna. Glöm inte att byta varvtal på maskinen för att passa pinnfräsen.

7. Nu har du förhoppningsvis ett rättblock med rätt mått och helt raka kanter. Fila till alla kanterna och hörnen med en metallfil så att biten blir trevligare att hantera.

Nu kan du börja fräsa vevstakarna.

8. Spänn upp biten så att du spänner på den delen som var 50 mm från början, använd passbitar och se till att du kan fräsa ner cirka 25 mm ner i biten utan att ta i skruvstycket.

9. Använd en pinnfräs med diameter 6 mm, nolla in verktyget i ett hörn av biten och fräs ut konturen på vevstakarna 25 mm ner i biten. Detta måste göras successivt.

10. Byt ut verktyget till de borrar du ska använda och borra hålen lika djupt som du har fräst konturerna, tänk på att toppen av borret inte når korrekt mått.

11. Fräs ansatsen vid det stora hålet.

12. Ta nu en slitsfräs och nolla mot toppen av stycket, gå ner ca 10 mm plus slitsfräsens tjocklek och fräs av en vevarm.

13. Plana nu av biten så du får snygg yta på nästa vevarm.

14. Fräs ansatsen vid det stora hålet.

15. Upprepa nu punkt 12 för att få ut vevarm nummer 2.

16. Spänn upp en vevarm och plana ner den till angivet mått på ytan som slits-fräsen gått mot.

17. Upprepa punkt 16 för vevarm nummer 2.

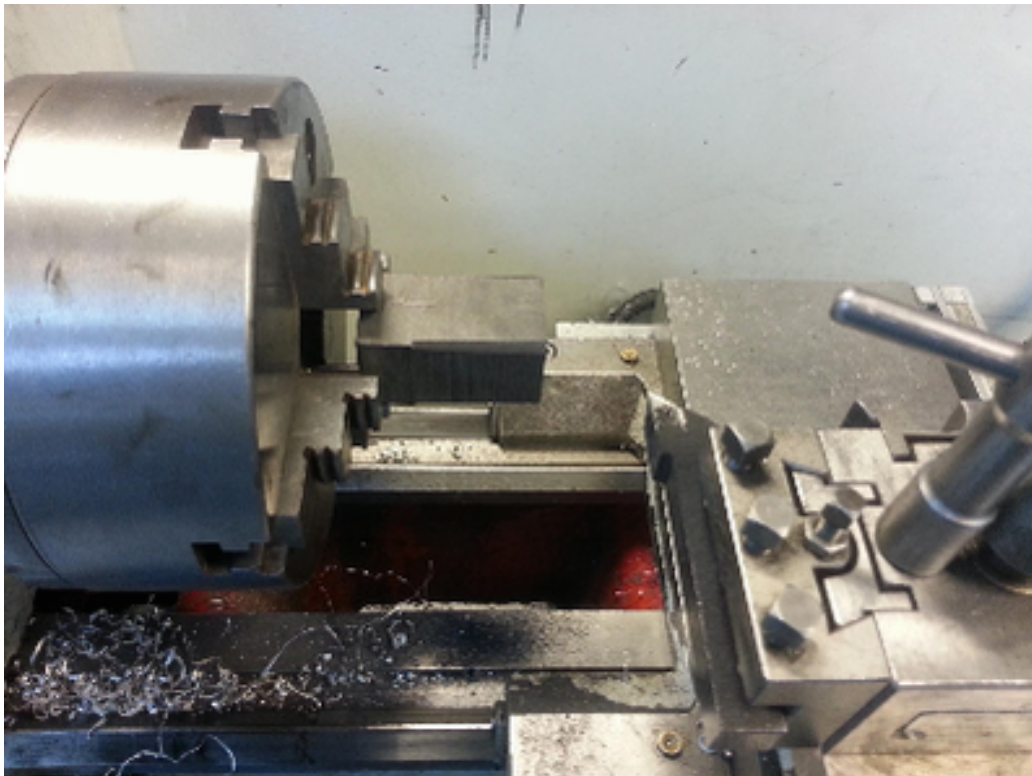
18. Nu är dina vevarmar klara!

Kolv (Kall)

Ritningsnummer: 8

Denna kolv är tillverkad i grafit. Den grafiten vi fick tillgång till var tvungen att sågas upp till fyrkantiga block i bandsågen. Tänk på att detta dammar mycket! Det kommer även damma mycket vid resterande bearbetning så det rekommenderas att ha en dammsugare i närheten. Vi gjorde som sagt fyrkantiga block som var ca 50x50x100 mm. Dessa tog vi sedan och satte upp i en fyrapunktchuck i en svarv. Tänk på denna biten ska räcka till båda kolvorna som sitter i motorn, d.v.s. denna och Kolv (Varm) (ritningsnummer 11).

1. Sätt upp biten i svarven med ett utstick så du har marginal att göra en kolv, rekommendation ca 55 mm.
2. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
3. Svarva stycket runt, tänk på att grafit är sprött och innan du har fått biten rund så kommer det slå mycket i biten vilket kan resultera i att den går sönder så var försiktig med ingreppet! Tänk även på att du ska gå tillräckligt långt in så du även kan sticka av biten efteråt. Svarva in ca 40 mm.

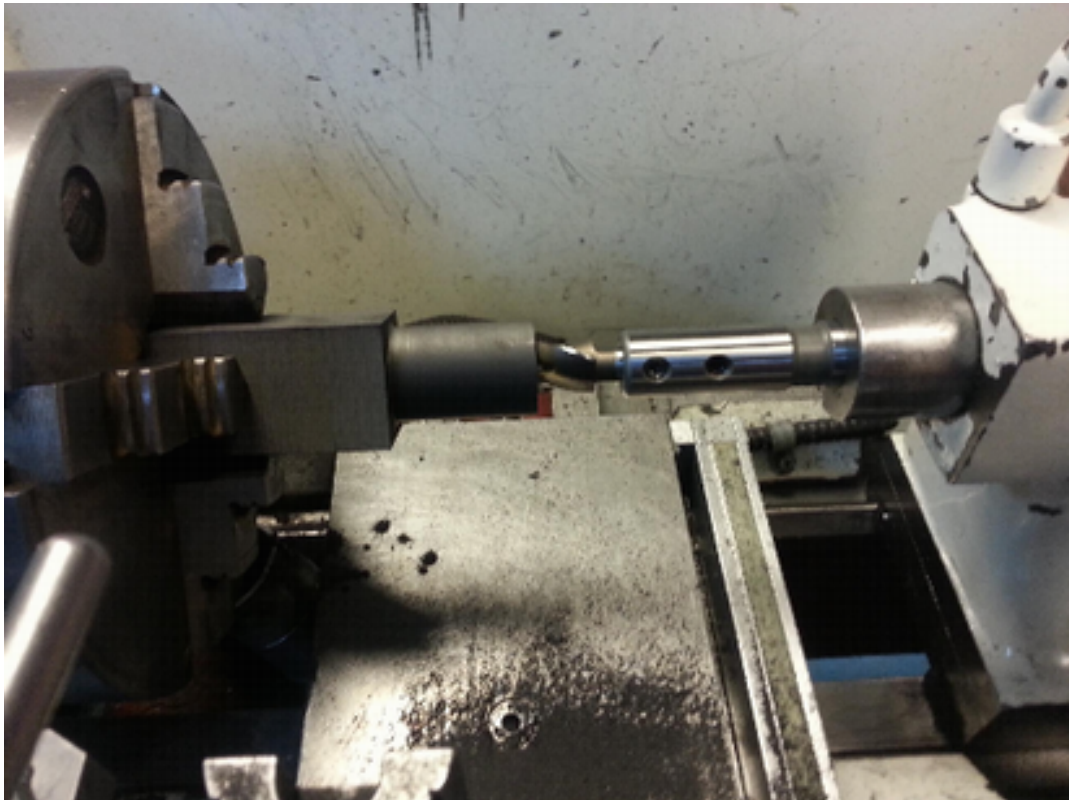


3. Grovmät din bit och mata in det värdet på digitalen, lättast är att du tar ett släpskär när du gör detta. Alltså du flyttar bara Y axeln och låter verktyget ligga an på ytan när du går tillbaka.

4. Svarva kolven till dess slutgiltiga mått, denna ska vara lite undermått till cylindrarna. När du börjar närma dig slutvärdet, kanske 5 mm ifrån, så ta fram en micrometer och mät mellan varje passage så du kan få bra tolerans. Tänk på att ha lika varvtal, ingrepp och matning mellan gångerna då detta är en nödvändighet för ett bra resultat. Undermålet rekommenderas till 24.990-24.998 mm.

5. Nu är det dags att borra i biten. Ta ett 5.5 mm borr och sätt upp denna i dubbdockan. Nolla borret mot biten så du vet hur långt in du har borrar. Här finns det flera sätt att göra det på och det beror även på vilken svarv du står i. I den svarven vi stod i så var ett varv på manövervredet på dubbdockan 3 mm, dvs efter du vevat ett varv på manövervredet hade borret borrar in 3 mm. Nolla denna genom att tex lägga en plåt med uppmätt tjocklek, lämpligtvis 3 mm, mot biten, se till att dubbdockan sitter löst gå imot plåten med borret och veva så att du har vevtappen neråt. Vrid så indikatorn visar 0 där. Backa dubbdockan ett varv för att sedan avlägsna plåten och vrida tillbaka dubbdockan. Nu vet du att du är 3 mm, eller ett varv, från att ligga kant i kant med biten. Borra ca 40 mm in i biten.

6. Nu ska vi använda oss utav en Granlunds-försänkare av diameter 15 mm. Nolla denna på samma sätt som du gjorde med borret och bearbeta ytan enl. ritning.



7. Nu är det dags att göra spåren som ska göra så att det inte ska läcka så mycket mellan kolven och cylindern. Ta ett lämpligt verktyg och nolla detta mot bitens ytterkanter. Gå in till angivna mått och gör spåren.

8. Stick nu av biten. Nolla verktyget till ytterkanten och gå in till angivet mått och stick av biten. Beroende på hur du nollat verktyget gäller det att du tänker på stickstålets bredd!

OBS! Momentet nedan kräver att man vet vad man gör och att man tar det riktigt försiktigt, det går att göra med en handborr men för bästa resultat rekommenderas momentet nedan. Känner du dig det minsta osäker fråga personalen i verkstaden!

9. Spänn nu upp en 90 graders försänkare i svarven, placera dubbdockan så du kan lägga an kolven mot denna och ha den som stöd. Starta svarven och håll i kolven med fingrarna samtidigt som du försiktigt vevar dubbdockan framåt. Testa med jämna mellanrum om skruven passar. Upprepa till önskat resultat är uppnått.

10. Delen är nu färdig.

Vearmsfäste (kall)

Ritningsnummer 9

Denna del tillverkas av en rundstång aluminium 7075. Tillverkningsprocessen innefattar sågning, svarvning och fräsning/borrning. Svarvningen utförs lämpligen i den minsta svarven då denna har en spännhylsechuck.

1. Kapa upp en lagom lång bit i kallsågen. Tänk på att gör biten lång nog att fästas i svarven, cirka 30 mm extra är lämpligt.
2. Fäst biten i svarven för att svarva ner den till rätt diameter. Låt biten sticka ut lite längre än det som skall svarvas bort, men inte mer än några millimeter.
3. Ställ in rätt hastighet på svarven och plana av änden på biten.
4. Svarva ner biten till rätt diameter.
5. Borra ett hål med rätt diameter och gänga hålet.
6. Snygga till kanterna med en fil.
7. Ta ur biten ur svarven.
8. Fäst biten i skruvstället på en fräs.
9. Använd en slitsfräs för att fräsa spåret i biten. Se till att det hamnar centrerat. Använd en så bred fräs som möjligt då denna som regel är stabilare och ger ett finare snitt.
10. Låt biten sitta kvar och borra hålet, som nu blir helt vinkelrätt mot spåret. Borra först med ett stabilt dubbhålsborr så att det vanliga borret inte glider på den runda ytan.
11. Fäst biten i svarven igen och stick av den till rätt längd.
12. Snygga till alla kanter och hål med en fil.
13. Biten är nu klar.

Kolvpinne

Ritningsnummer: 10

Denna ska göras i silverstål så denna tillverkas lättast genom att ta en silversåtsaxel med rätt mått och såga den med några mm övermått.

1. Såga av en bit med bandsåg/bågfil med några mm övermått. Rekommendation 2 mm.
2. Spänn upp biten i spännhylschucken i svarven och plana av en sida.
3. Ta loss biten och spänn upp den åt andra hållet från innan.
4. Plana av biten.
5. Ta loss biten och mät den hur lång den är, spänn upp den igen och nolla verktyget mot den planade ytan.
6. Svarva biten till rätt längd.
7. Delen är nu färdig.

Kolv (Varm)

Ritningsnummer: 11

Denna kolv är tillverkad i grafit. Den grafiten vi fick tillgång till var tvungen att sågas upp till fyrkantiga bock i bandsågen. Tänk på att detta dammar mycket! Det kommer även damma mycket vid resterande bearbetning så det rekommenderas att ha en dammsugare i närheten. Vi gjorde som sagt fyrkantiga block som var ca 50x50x100 mm. Dessa tog vi sedan och satte upp i en fyrpunktchuck i en svarv. Tänk på denna biten ska räcka till båda kolvarna som sitter i motorn, kolv (kall) (ritningsnummer 8).

1. Sätt upp biten i svarven med ett utstick så du har marginal att göra en kolv, rekommendation ca 55 mm.
2. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
3. Svarva stycket runt, tänk på att grafit är sprött och innan du har fått biten rund så kommer det slå mycket i biten vilket kan resultera i att den går sönder så var försiktig med ingreppet! Tänk även på att du ska gå tillräckligt långt in så du även kan sticka av biten efteråt. Svarva in ca 40 mm.
3. Grovmät din bit och mata in det värdet på digitalen, lättast är att du tar ett släpskär när du gör detta. Alltså du flyttar bara Y axeln och låter verktyget ligga an på ytan när du går tillbaka.
4. Svarva kolven till dess slutgiltiga mått, denna ska vara lite undermått till cylindrarna. När du börjar närma dig slutvärdet, kanske 5 mm ifrån, så ta fram en micrometer och mät mellan varje passage så du kan få bra tolerans. Tänk på att ha lika varvtal, ingrepp och matning mellan gångerna då detta är en nödvändighet för ett bra resultat. Undermåtet rekommenderas till 24.990-24.998 mm.
5. Nu är det dags att borra i biten. Ta ett 5.5 mm borr och sätt upp denna i dubbdockan. Nolla borret mot biten så du vet hur långt in du har borrar. Här finns det flera sätt att göra det på och det beror även på vilken svarv du står i. I den svarven vi stog i så var ett varv på manövervredet på dubbdockan 3 mm, dvs efter du vevat ett varv på manövervredet hade borret borrarat in 3 mm. Nolla denna genom att tex lägga en plåt med uppmätt tjocklek, lämpligtvis 3 mm, mot biten, se till att dubbdockan sitter löst gå imot plåten med borret och veva så att du har vevtappen nedåt. Vrid så indikatorn visar 0 där. Backa dubbdockan ett varv för att sedan avlägsna plåten och vrida tillbaka dubbdockan. Nu vet du att du är 3 mm eller ett varv från att ligga kant i kant i biten. Borra ca 40 mm in i biten.
6. Nu ska vi använda oss utav en Granlunds-försänkare av diameter 15 mm. Nolla denna på samma sätt som du gjorde med borret och bearbeta ytan enl. ritning.

7. Nu är det dags att göra spåren som ska göra så att det inte ska läcka så mycket. Ta ett lämpligt verktyg och nolla detta mot bitens ytterkanter. Gå in till angivna mått och gör spåren.

8. Stick nu av biten. Nolla verktyget till ytterkanten och gå in till angivet mått och stick av biten. Beroende på hur du nollat verktyget gäller det att du tänker på stickstålets bredd!

9. Delen är nu färdig.

Vearmsfäste (varm)

Ritningsnummer 12

Denna del tillverkas av en rundstång aluminium 7075. Tillverkningsprocessen innefattar sågning, svarvning och fräsning/borrning. Svarvningen utförs lämpligen i den minsta svarven då denna har en spännhylsechuck.

1. Kapa upp en lagom lång bit i kallsågen. Tänk på att gör biten lång nog att fästas i svarven, cirka 30 mm extra är lämpligt.
2. Fäst biten i svarven för att svarva ner den smala delen av fästet. Låt biten sticka ut lite längre än det som skall svarvas bort, men inte mer än några millimeter.
3. Ställ in rätt hastighet på svarven och plana av änden på biten.
4. Svarva ner biten till rätt diameter för att gängas med M5-gänga. Svarva ungefär halva längden i taget så att biten inte blir för vek.
5. Fäst ett gängsnitt med lämplig hållare i dubbdockan och börja gänga med stöd av detta så att gängan blir rak. Gänga enligt ritningen.
6. Vänd biten i svarven och svarva den bredare delen till rätt diameter.
7. Stick av till rätt längd och snygga till kanterna med en fil.
8. Fäst den smala delen av biten i skruvstället på en fräs. Det finns en specialtillverkad hållare i mässing för detta.
9. Använd en slitsfräs för att fräsa spåret i biten. Se till att spåret hamnar centrerat. Använd en så bred fräs som möjligt då denna som regel är stabilare och ger ett finare snitt.
10. Låt biten sitta kvar och borra hålet, som nu blir helt vinkelrätt mot spåret. Borra först med ett stabilt dubbhålsborr så att det vanliga borret inte glider på den runda ytan.
11. Snygga till alla kanter och hål med en fil.
12. Biten är nu klar.

Deplacementkolv

Ritningsnummer: 13

Deplacementkolven tillverkas i aluminium 7075 p.g.a. låg vikt på delen är önskvärt för att minska friktion i motorn och den mängd massa som rör sig.

1. Tag en alu kuts på 25 mm diameter och kapa upp en lämpligt stor bit. Tänk på att du behöver lite extra material att spänna upp kutsen i svarven så tag åtminstone 30 mm extra material.
2. Sätt upp biten i svarven. Tänk på att du kommer behöva mer utstick än deplacementkolvens längd för att kunna sticka av den senare.
3. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
4. Svarva stegvis ner ytan till önskat mått.
5. Nu är det dags att borra i biten. Ta ett dubhålsborr och sätt upp denna i dubbdockan. Borra ett litet hål och ersätt sedan dubhålsborren med borren som är till för att förborra för gängning. Nolla borret mot biten så du vet hur långt in du har borrarat. Finns olika metoder beroende på vilken svarv du står vid.
6. Sätt in gängsnittet i dubbdockan och gänga hålet.
7. Byt verktyget i svarven och stick av biten.
8. Ta en fil och grada av kanterna så du inte skär dig.
9. Biten är nu klar.

Kylcylinder

Ritningsnummer: 14

Denna del ska du göra 2 gånger. Det vill säga du behöver 2 stycken till din motor.

1. Mät i den svarven du ska vara vad du behöver för utstick och greppyta för att kunna spänna upp biten.
2. Såga en bit i kallsågen efter vad du kom fram till i punkt 1.
3. Spänn upp biten i svarven med lämpligt extra utstick, alltså utöver vad biten i slutet ska bli och plats för stickstål. Denna del kommer alltså aldrig bearbetas. Rekommenderad längd ca 5 mm.
4. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
5. Svarva stycket runt, tänk på att du ska gå tillräckligt långt in så du även kan sticka av biten efteråt. Svarva in ca 60 mm.
6. Svarva kutsen till givet yttermått, glöm inte att mäta och kontrollera så du når rätt mått.
7. Svarva avsatsen längst ut på cylindern.
8. Förbered borrar med en dubbhålsborr.
9. Borra upp hål i mitten till du får in en invändig bom i lämplig storlek.
10. Svarva invändigt till du får angivet mått, eventuellt kan du brotcha med en 25 h7 brotch, eller om ytan inte skulle bli bra vid svarvning hona cylindern med ett honingsverktyg. Använd rikligt med olja/skärvätska.
11. Gör kylflänsarna med ett stickstål, avstånden är anpassade efter det stickstål skolan har.
12. Stick av biten i lite övermått.
13. Spänn upp biten åt andra hållet och plana av ytan.
14. Spänn upp biten i rundmatningsbordet i fräsen och nolla in biten med hjälp utav digitalen.
15. Använd digitalen för att ställa in hålbilden och borra sedan de genomgående hålen i cylindern.

16. Delen är nu färdig.

Topplock

Ritningsnummer: 15

1. Mät i den svarven du ska vara vad du behöver för utstick och greppyta för att kunna spänna upp biten.
2. Såga en bit i kallsågen efter vad du kom fram till i punkt 1.
3. Spänn upp biten i svarven med lämpligt utstick, rekommenderat ca 5 mm.
4. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
5. Svarva stycket runt, tänk på att du ska gå tillräckligt långt in så du även kan sticka av biten efteråt. Svarva in ca 20 mm.
6. Svarva kutsen till det givna yttermåttet, glöm inte att mäta och kontrollera så du når rätt mått.
7. Ta loss biten och såga av den till lite övermått i kallsågen.
8. Spänn upp den i svarven och plana av ytan som du just sågat fram.
9. Spänn upp biten i rundmatningsbordet i fräsen och nolla in biten med hjälp utav digitalen.
10. Använd digitalen för att ställa in hålbilden och borra sedan de genomgående hålen i biten.
11. Borra nu hål i mitten till angivet djup.
12. Använd en Granlunds-försänkare för att få en bra avsats i botten av hålet.
15. Spänn nu upp biten i ett skruvstöd i fräsen för att göra 1/8-gängan.
11. Borra hål för att förbereda för gängtappen.
12. Använd fräsen som stöd när du tillverkar gängan med gängtappen.
13. Delen är nu klar.

Värmecylinder

Ritningsnummer: 16

1. Mät i den svarven du ska vara vad du behöver för utstick och greppyta för att kunna spänna upp biten.
2. Såga en bit i kallsågen efter vad du kom fram till i punkt 1.
3. Spänn upp biten i svarven med lämpligt utstick, rekommenderat ca 5 mm.
4. Svarva av änden så den blir rak och nolla digitalen innan du flyttar bort verktyget från biten så du vet hur långt in på biten som du sedan har passerat.
5. Svarva stycket runt, tänk på att du ska gå tillräckligt långt in så du även kan sticka av biten efteråt. Svarva in ca 70 mm.
6. Svarva kutsen till det givna stora yttermåttet, glöm inte att mäta och kontrollera så du når rätt mått.
7. Svarva nu det lilla yttermåttet.
8. Förbered borrar med ett dubbdocksborr.
9. Borra stegvis upp till dessa att du får in en invändig bom.
10. Svarva med den invändiga bommen tills dess att du fått rätt innerdiameter.
11. Ta loss biten och såga av den till lite övermått i kallsågen.
12. Spänn upp den i svarven och plana av ytan som du just sågat fram.
13. Spänn upp biten i rundmatningsbordet i fräsen och nolla in biten med hjälp utav digitalen.
14. Använd digitalen för att ställa in hålbilden och borra sedan de genomgående hålen i cylindern.
15. Spänn nu upp biten i ett skruvstöd i fräsen för att göra 1/8-gången.
16. Borra hål för att förbereda för gängtappen.
17. Använd fräsen som stöd när du tillverkar gången med gängtappen.
18. Delen är nu klar.

Svänghjulsdistans

Ritningsnummer: 17

1. Ta en rundstång som har cirka ytterdiametern 18-20mm.
2. Såga av ca 50 mm i kallsågen.
3. Spänn upp biten med lagom med utstick i spännhylsechuken i svarven.
4. Plana av ytorna och nolla verktyget mot biten.
5. Svarva biten till angivet mått tänk på att mäta så att du når rätt tolerans.
6. Förbered för att borra med en dubbhålsborr.
7. Borra upp hålet till angivet mått.
8. Stick av biten till angivet mått, tänk på stickstålets bredd och på hur du nollar verktyget utifrån detta.
9. Delen är nu klar.

Svänghjulskil

Ritningsnummer: 18

Denna kil köpes på metervara.

1. Mät och markera var du ska såga av kilen.
2. Såga av kilen med exempelvis en bågfil.
3. Eventuellt kan man spänna upp denna och fräsa av kortsidan för att få en fin yta men detta är ej nödvändigt.
4. Kilen är nu kapad och klar. Bra jobbat!

Svänghjul

Ritningsnummer: 19

Denna kan vid första inblick tyckas vara en enkel konstruktion men efter lite noggrannare granskning kommer man fram till att så inte är fallet. Dock kan man inse snabbt att man kan spara en hel del material om man är lite slug. Denna är även lättast att tillverka i de större svarvarna med tanke på uppspänningsmöjligheterna.

1. Såga ut en bit på ca 25 mm i bandsågen, tänk på att den ska vara inställd för aluminium och att den hela tiden får bra med kylning och att den inte tar emot någontans vid sågningen då biten är stor.
2. Spänn upp biten i svarven, här kan du få byta backar till ett par andra så du kan spänna upp biten ordentligt.
3. Plana av en sida så den blir plan. Nu kommer den lite lurigare delen, ta en invändig bom som du sätter upp som vanligt. Lägg en liten vinkel på den enligt bilden nedan.



4. Nu tar du och nollar verktyget mot bitens yttersidor. Gör ett spår några mm ifrån måttet 130 mm, lämpligtvis 125 mm. Gör ett lika spår en bit från 20 mm måttet, lämpligen 25 mm. Nu ska du ta bort material mellan dessa två spår. När du kör mot det

stora måttet kör du svarven som vanligt men när du ska köra mot det lilla måttet går du förbi centrum på delen och kör svarven baklänges. Gör detta tills du nått rätt djup på biten.

5. Nu gör du ett renskär mot den stora diametern. Mät in och skriv in i digitalen det måttet som biten är i, lämpligen går du bara ut med verktyget så du lämnar släpspår. Svarva till rätt mått.

6. Gör samma som i punkt 5, men du slipper nolla in verktyget, på den lilla diametern. Tänk på att du ska köra svarven baklänges!

7. Nu ska du vända på biten, du får byta tillbaka till "standardbackarna" då du nu ska spänna på insidan av svänghulets stora innerdiameter. Var noga med att den ligger imot backarna överallt så den sitter rakt. Svarva ytan rak och så att svänghjulet får sitt slutliga mått.

8. Upprepa nu punkt 4-6 igen.

9. Nu är det dags att borra, använd dig utan en dubbhålsborr innan du borrar med borret avsett för en 12 mm H7 brotch.

10. Brotcha hålet med en 12 H7 brotch.

11. Svarva nu svänghulets ytterdiameter, tänk på att mäta några passager innan så du får rätt mått.

12. Ta ner biten och spänn upp den i rundmatningsbordet till fräsen. Nolla in biten med hjälp av digitalen och mata sedan ut hålbilden i digitalen. Borra ut lättningshålen. Tänk på att stega dig upp i diametrarna på borrarerna.

13. Nu ska du dragbrotcha kilspåret.

14. Nu är delen klar.

Stativ

Ritningsnummer: 20

Denna del är tillvekad av aluminium och tillverkas till största delen i en fräs. Fråga om hjälp om du inte är helt säker på vad du gör innan du börjar använda maskinen.

1. Kapa till en lämplig bit i kallsågen, cirka 5-10 mm större än komponentens slutgiltiga mått.
2. Fäst biten i ett skruvstöd i en fräs och plana av en av de två största ytorna. Använd passbitar för att fästa biten på rätt höjd i skruvstödet. Konsultera verkstadshandboken eller personalen för rätt maskinhastighet och ingrepp.
3. Vänd biten i skruvstödet och se till att den avplanade ytan ligger mot passbitarna, så att den nya ytan som skall fräsas blir parallell med denna. Plana av den andra största ytan och mät biten med ett skjutmått. Ställ in maskinen i z-led genom att höja bordet tills verktyget precis nuddar bitn och mata in måttet du mätte med skjutmättet. Fräs ner biten till rätt mått. Toleransen är inte jättehög, så länge alla sidorna blir parallella/ortagonala mot varandra.
4. Fäst nu biten på högkant i skruvstödet, använd passbitar om det behövs. Plana av en av de mellanstora sidorna.
5. Vänd biten och plana av den motstående sidan. Mät biten igen och ställ in maskinen som i steg 3. Fräs ner biten till korrekt mått.
6. Byt ut fräsverktyget mot en pinnfräs. Vänd biten så att den återigen sitter med en av de största ytorna uppåt och de mellanstora sidorna mot skruvstödet backar. Använd passbitar. Använd sidan av pinnfräsen för att plana av en av de minsta sidorna. Glöm inte att byta varvtal på maskinen för att passa pinnfräsen.
7. Vänd biten och mät. Ställ in maskinen i x-led på samma sätt som i steg 3 och 5, och fräs biten till rätt mått.
8. Nu har du förhoppningsvis ett rätblock med rätt mått och helt raka kanter. Fila till alla kanterna och hörnen med en metallfil så att biten blir trevligare att hantera. Byt verktyg i fräsen till en spännhylsechuck och ta fram ett dubbhålsborr av lämplig storlek (något mindre än hålet du ska borra) och ett vanligt metallborr av rätt storlek (5.5 mm). Ta även fram en mätpinne, vilket är en stålpinne med en mycket exakt diameter (10 mm), och fäst med en 10 mm spännhylsa i maskinen.

9. Fäst biten i skruvstället med en av mellansidorna uppåt och de största sidorna mot backarna. Använd mätpinne för att mäta in maskinen i x- och y-led. Sätt nollkoordinaten i ett av bitens hörn, och tänk på att kompensera för mätpinnens diameter.

10. Byt ut mätpinne mot dubbhålsborret (du kommer även att behöva byta spännhylsa) och försäkra dig om att koordinatsystemet är rätt inställt. Ställ in maskinen till rätt varvtal och förborra tre små hål där hålen skall vara. Byt till det andra borret och borra de tre hålen. Tänk på att inte borra hela hålet i ett steg utan gå ur hålet helt med borret några gånger för att få ut alla spånor.

11. Använd ett större borrar för hand för att snygga till hålkanterna.

12. Delen är nu färdig.

Bottenplatta

Ritningsnummer: 21

Bottenplattan tillverkas i trä. Förutom hålbilden är måtten till den här delen inte kritiska. Gör bara inte plattan för tunn.

1. Kapa brädan i bandsågen så längden är ca 330 mm, då planhyveln kräver en minimulängd på 300 mm. Bredden ska kapas till ca 150-200 mm för att ha marginal till hyvlingen senare.
2. Planhyvla två sidor och kontrollera så ytorna är plana och det är 90 grader i förhållande med varandra.
3. Använda sedan parallellhyveln för att få de övriga två sidorna plana. Tänk på vilken sida som ska läggas upp. Här ska bredden minskas till rätt längd. Hyvla i 2 mm-steg på varje sida för att få bästa resultat.
4. När alla sidor är plana ska biten kapas till rätt längd. Lägg biten i cirkelsågen, mät upp 270 mm och såga av den överflödiga delen.
5. Mät upp vart hålbilden ska vara på biten. Spänn sedan upp biten i pelarborren, använd en 5.5 mm borr, och gör ett genomgående hål.
6. Använd en försänkare för att göra en ca 3 mm försänkning.
7. Använd sedan sandpapper för att runda av alla kanter.
8. Delen är nu färdig.