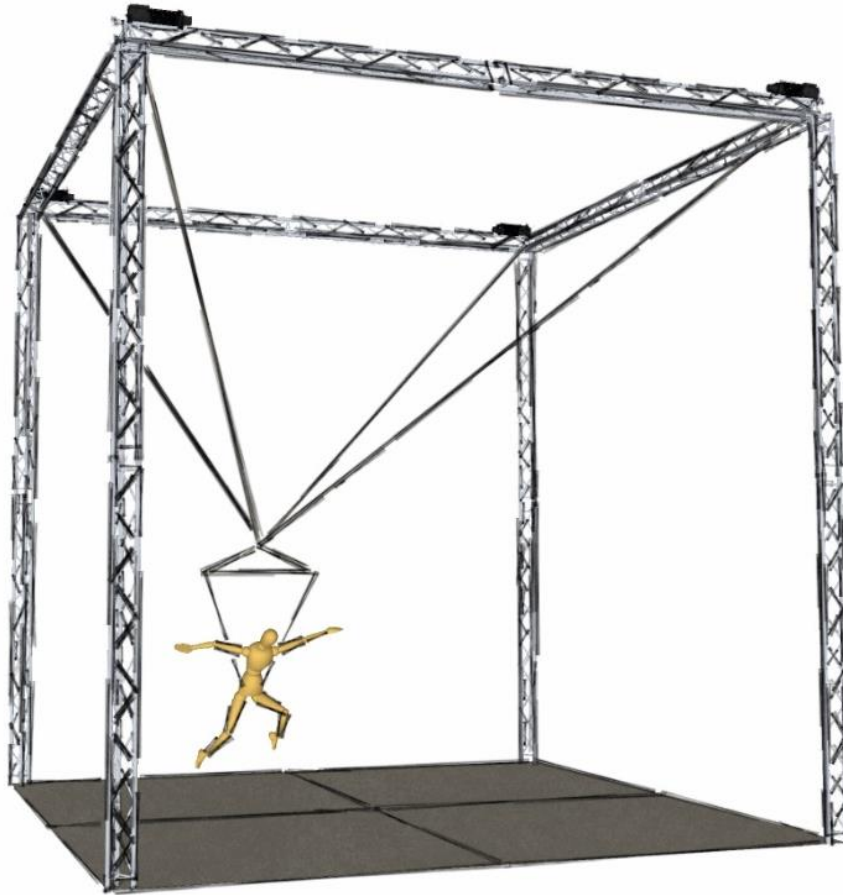




CHALMERS



Vajra - Gravitationssimulering

Vajra - Gravity Simulation

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet i mekatronik

EJNAR ASKBERGER
PETER ZOLTAN

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för dynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015
Examensarbete 2015:05

EXAMENSARBETE 2015:05

Vajra – Gravitationssimulering

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet i mekatronik

EJNAR ASKBERGER
PETER ZOLTAN

Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för dynamik
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

Vajra - Gravitationssimulering
Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet i mekatronik
EJNAR ASKBERGER, PETER ZOLTAN

© PETER ZOLTAN & EJNAR ASKBERGER, 2015.

Examensarbete 2015:05 ISSN 1652-9901
Institutionen för Tillämpad mekanik
Avdelningen för dynamik
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Sverige
Telefon: + 46 (0)31-772 1000

Omslag:
Skiss på gravitationssimulerande rigg i sitt fullskaliga utförande.

Institutionen för Tillämpad mekanik
Göteborg, Sverige 2015

FÖRORD

Detta examensarbete har delvis utförts vid företaget Visual act, Stockholm, och dels i Chalmers egna lokaler på Lindholmen, Göteborg. Examensarbetet omfattar 15 poäng per person och utgör den sista kursen av högskoleingenjörsprogrammet i mekatronik på sammanlagt 180 poäng vid Chalmers tekniska högskola. Peter Bövik, universitetslektor som undervisar i hållfasthetslära och mekanik, har varit examinator.

Vi skulle här vilja rikta ett tack till alla som hjälpt oss under arbetets gång.

Vi tackar Peter Johansson, Fredrik Iversen, Petter Westman, Kevin Nunkoosingh, Olle Larsson, Joakim Norlén, Fredrik Johansson anställda på Visual act, för ett mycket gott stöd och engagemang.

Vi tackar också Bertil Thomas, Göran Hult, Morgan Osbeck, Bill Karlström, Sven Ekered, Sakib Sistik, Robert Svensson, lärare på Chalmers tekniska högskola för den support vi har fått under projektets gång.

Under examensarbetet har Johan Olsson på Visual act ställt upp som handledare och företaget Stork Drives via Lars Svensson och Johannes Östman har sponsrat med drivsteg och motorer.



Vi vill också tacka Fredrik Stråhle på Bosch Rexroth, Olof Melander på Paraform Group, Zelka Cermak på Cowi AB, Izabella Lechanelle grafisk designer, Patrik Alm student på Chalmers tekniska högskola, Tommy Unger på Lindholmens tekniska gymnasium, Thomas Wingate på Dreamler samt Joel Gehlin på ams AG, för stöd och hjälp genom projektet.

SAMMANFATTNING

”Vajra” är en mekanisk rigg för simulering av olika gravitationsnivåer. Användaren tar på sig en sele kopplad till ett antal rep, block och motvikter eller vinschar under användning. Detta system drar användaren uppåt med en reducerande kraft som minskar tyngdkraften och därmed simulerar en lägre gravitation.

Målet med detta examensarbete har varit att konstruera en elektromekanisk version av Vajra reglerad av ett mikrocontrollerkort. Följande förbättringar skulle realiserars. För det första skulle ett mer linjärt uppförande åstadkommas så att driften i den mekaniska riggen mot mitten eliminerades. För det andra skulle ändringar i gravitationsnivåer snabbt vara realiserbara genom en enkel inmatning till reglerprogrammet. Slutligen skulle anpassningar kunna göras så att hänsyn togs till användarens totala vikt under simuleringen.

”Visual act” är ett svenskt företag baserat i Stockholm, som utvecklar avancerad teknologi, bl.a. inom nöjesbranschen där man skapar datorstyrda maskiner och riggar med automationsmöjligheter. Redan i ett tidigt skede hjälpte Visual act till så att deras utrustning kunde testas och utvärderas under examensarbetet med målet att anpassa denna till projektet Vajra. Tekniska problem så som motorfenomenet cogging hindrade dock ett färdigställande av den tänkta riggen.

I ett nästa steg startades bygget av en liten skalmodell. Även reglerprinciperna omarbetades från att ha varit moment- och kraftregleringsbaserade till att även innefatta hastighetsreglering. Efter att skalmodellen färdigställts inleddes tester vilkas resultat presenteras i denna rapport.

Examensarbetet har främst resulterat i en skalmodell där valet av komponenterna styrdes av lärdomarna från det tidiga arbetet. Resultatet medför en möjlighet till vidareutveckling av riggen som i framtiden kan leda till en fullskalig prototyp av riggen.

SUMMARY

“Vajra” is a mechanical rig intended to be used for simulations of various levels of gravity. During the simulations the user is strapped in a harness that is connected to a system that comprises ropes, pulleys blocks and winches. This system pulls the user upwards, and thus a lower gravity force is simulated.

The goal with this thesis was to design and construct an electro-mechanical version of Vajra. It is controlled by a micro-controller board. The goal was to improve a number of parameters compared to the mechanical rig. A more linear characteristic was desired in order to eliminate the drift towards to the center that is present in the mechanical system. It was a goal to get a fast and simple way to change the level of gravity with the aid of an easy-to-use computer interface to the controller program. Finally, the simulation program should be designed to take the total weight of the user into consideration during the simulation.

“Visual act” is a company based in Stockholm. They design advanced technical products intended to be used for example in the entertainment business. They create advanced computer controlled systems to be used on stage plays, etc.

Visual act was involved in the project on an early stage in order to make it possible to integrate their system solutions to the project “Vajra”. A motor phenomenon called “cogging” was one of several technical problems that occurred during the design of the rig that halted the project.

In the next stage a small-scale model was designed. The control algorithms were modified to include speed control too. The previous algorithms were based on torque and force only.

When the scale model was built, a series of tests were performed. The test results are presented in this report.

The work on the design and construction of the model rig resulted in this thesis.

The results give the possibilities to develop a next generation of the system that finally could result in a full-scale prototype rig.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte	2
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Precisering av frågeställningen	2
2	TEORETISK BAKGRUND.....	3
2.1	Gravitation.....	3
2.2	Filter	5
2.2.1	FIR-filter.....	5
2.2.2	IIR-filter	6
2.3	Coggingmoment och friktion	7
2.4	Lastcell	7
2.5	Halleffektvinkelgivare.....	8
2.6	SPI-buss	8
2.7	Pulsbreddsmodulering (PWM)	9
2.8	RC-filter	9
2.9	OP-förstärkare	10
2.10	Reglerteknik	10
2.10.1	PID-reglering.....	10
2.10.2	Kaskadreglering	11
2.10.3	Integratoruppvridning.....	12
2.10.4	Lineäritet	12
3	METOD	13
3.1	Arbetsgång	13
3.1.1	Problemformulering	13
3.1.2	Planeringsrapport och Gantt-schema	13
3.1.3	Kravspecifikation	13
3.1.4	Framtagning av lösningsförslag	14
3.1.5	Tester av befintlig utrustning	14
3.1.6	Konstruktion av skalmodellen.....	14
3.1.7	Tillverkning och montering av skalmodellen.....	14
3.1.8	Justering av skalmodellen	15
3.1.9	Programmering	15
3.2	Kunskapsinsamling under arbetet	15
4	GENERERING OCH TEST AV LÖSNINGSALTERNATIV	16
4.1	Framtagning av position.....	16
4.2	Avläsning av linkrafter.....	17
4.3	Reglerprinciper.....	17
4.4	Stegsvar för motor kopplad till drivsteg	20

4.5	Undersökning av linor.....	21
5	SIMULERING AV LÖSNINGSFÖRSLAG.....	24
5.1	Simulering av hastighetsreglering.....	24
5.2	Simulering av kraftreglering	25
5.3	Kommentarer kring simuleringarna	26
6	UTVÄRDERING AV UTRUSTNING PÅ VISUAL ACT	27
6.1	Test av vinsch med inbyggd snäckväxel med momentreglering	27
6.2	Test av lastcellen	28
6.3	Test av momentreglering.....	30
6.4	Mätning av coggingmomentet.....	32
6.5	Slutsats av tester på Visual act	32
7	LÖSNINGSALTERNATIVEN I 3D-UTFÖRANDE	33
7.1	Matematiska beräkningar för reglersystemet	33
7.1.1	Positionsberäkning	33
7.1.2	Kraftberäkning	35
7.1.3	Beräkning av hastighetsbörvärde	36
7.1.4	Beräkning av hastighetsbörvärde för motorer	36
7.1.5	Reglering av vinkelhastighet hos motorerna	36
7.2	Beskrivning av hårdvaran	37
7.2.1	Riggens stomme	37
7.2.2	Elektriska komponenter i översikt.....	39
7.2.3	Lastceller	39
7.2.4	Instrumentförstärkare	39
7.2.5	Nätaggregat	40
7.2.6	Mikrokontrollerkortet Arduino Due.....	40
7.2.7	Krets för lågpasfiltrering och nivåanpassning	41
7.2.8	Drivsteg och motorer med halleffektvinkelgivare	44
7.2.9	Halleffektvinkelgivare.....	47
7.2.10	Trissor och block.....	47
7.3	Beräkning av maximal tolerabel höjd	48
7.4	Ritning på skalmodellens stomme	52
8	RESULTAT/SLUTSATS/DISKUSSION	53
8.1	Patentering.....	53
	KÄLLFÖRTECKNING	54

BETECKNINGAR

Användaren Den person som rör sig i och är inkopplad i riggen

VDC Likspänning

Pinne In- eller utgång på mikrokontrollerkort

1 INLEDNING

Visual act har sina lokaler i Nacka utanför Stockholm. Företaget producerar dekor och avancerad scen teknik som möjliggör förflyttningar av både scenografi och artister. I sina lokaler inryms både en fullt utrustad metallverkstad, snickeriverkstad och utrymmen för testning av mekatronisk utrustning. Bland personalen finns elektronik- och maskiningenjörer, programmerare, hantverkare, marknadsförare, säljare samt administrativ personal [1].

Visual act tackade under hösten 2014 ja till att ställa upp med handledare och utrustning för att examensarbete om simulerad gravitation skulle kunna genomföras. Eftersom företaget redan erbjuder liknande produkter till sina kunder fanns den utrustning och spetskunskap som behövdes.

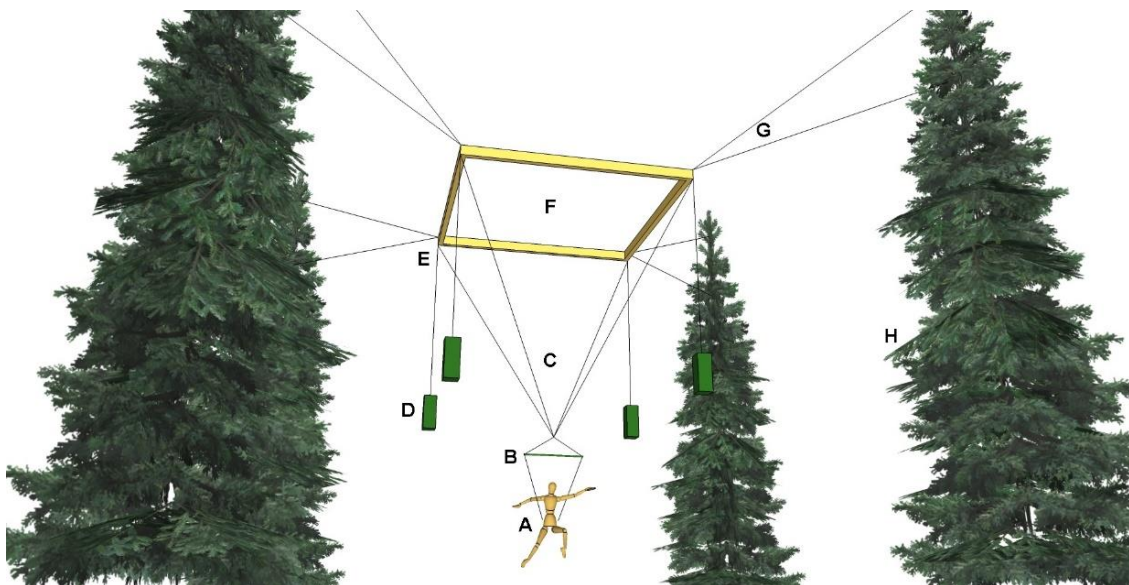
Nedan följer en mer detaljerad beskrivning av examensarbetets bakgrund, dess syfte, avgränsningar och precisering av frågeställningen.

1.1 Bakgrund

Luftakrobatikriggen Vajra byggdes för första gången 2010 i ett mekaniskt utförande i en skogsglänta i Bottna i mitten av Bohuslän. Grundtanken med riggen var att möjliggöra ett nytt sätt att skapa akrobatisk dans, men fler användningsområden såsom träning för astronauter, hjälpmedel vid stunts i filmindustrin eller en åkattraktion vid ett nöjesfält kan vara tänkbara. Sommaren 2011 användes riggen i en föreställning med namnet Luftburen.



*Figur 1.2: Föreställningen Luftburen.
Foto: David Relan.*



*Figur 1.1 Principskiss över mekanisk variant av Vajra.
A användare, B galge, C fyra linor, D fyra motvikter, E ett block till vardera lina, F träram, G två spännband till vardera hörn, H fyra träd.*

Riggen i sitt mekaniska utförande hade en rad begränsningar. En stor träram i vilken riggen var monterad var fixerad mellan fyra träd. Vid användning av riggen sattes både träden, ramen och motvikterna i rörelse. Dessutom fanns friktion i alla block som skapade en extra tröghet i systemet. All den energi som krävdes för att sätta systemet i rörelse genererades såklart av användaren, vilket betydde att riggen blev ansträngande att använda. Dessutom drogs användaren inte alltid lika mycket uppåt, vilket krävs för en realistisk gravitationssimulering, eftersom linkrafterna alltid var konstanta oberoende av användarens höjd över marken och position på markytan. Användarens position påverkar vinkeln mellan horisontalplanet och de fyra linkrafterna och därmed deras kraftresultants riktning och storlek. Detta gjorde också att riggen fick ett olinjärt beteende eftersom användaren ständigt drogs mot mitten. Allt detta sammantaget resulterade i en bristfällig gravitationssimulering och tanken om att skapa en rigg med datorstyrda vinschar väcktes som skulle kunna råda bot på nämnda problem.

1.2 Syfte

Syftet med examensarbetet har varit att inleda arbetet med att skapa en tredimensionell gravitationssimulering som har en bättre funktion än den tidigare mekaniska varianten av Vajra. För att kunna uppnå detta krävs underökning av olika lösningsalternativ genom simulering, tester och jämförelser av de olika framtagna alternativen.

1.3 Avgränsningar

Målet har varit att skapa en rigg för tredimensionell gravitationssimulering. Regleringen av riggen skulle vara endimensionell där användaren bara kan röra sig i höjddled. I mån av tid även en två- och eventuellt en tredimensionell reglering kunde påbörjas, där användaren kan röra sig i ett vertikalt plan respektive i en rymd.

Främst skulle befintlig utrustning som funnits att tillgå på Visual act samt Chalmers användas eftersom examensarbetet haft en minimal budget.

Under arbetet valdes att låta gravitationssimuleringen endast testas på vikter och inga levande varelser. På så vis undveks resurs- och tidskrävande arbete hos Visual act med att tillverka och implementera bromssystem för vinscherna samt andra säkerhetssystem.

1.4 Precisering av frågeställningen

Detta arbete undersöker olika lösningsalternativ på en gravitationssimulering inom examensarbetets gällande tidsram och resurstillgångar. För att ta reda på detta har tester gjorts på utrustning hos Visual act och en skalmmodell, utan koppling till specifik skala mot eventuell fullskalig prototyp, byggts.

Kan en rigg under dessa förutsättningar tas fram som:

- Kan ställas in på viss gravitationsnivå vilken skall simuleras.
- Fungerar för olika vikter.
- Utför jämna kastbanor jämförbara med vald gravitationssimulering.
- Fungerar tillfredställande oberoende av hur vikten påverkas av yttre krafter.

2 TEORETISK BAKGRUND

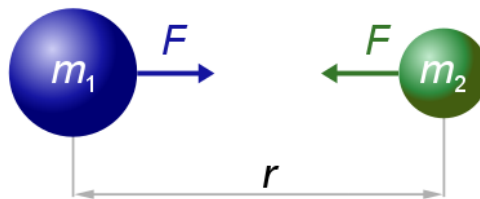
Nedan presenteras formler, metoder, principer, koncept och annan teori samt bakomliggande förklaringar till det som använts för att generera lösningar under examensarbetets gång.

I bilaga 1 finns fler mer elementära förklaringar och ämnen som har en svagare koppling till examensarbetets innehåll men som ändå kan vara av intresse för läsaren.

2.1 Gravitation

Gravitation eller tyngdkraft är en av universums fyra fundamentala naturkrafter även kallat fundamental växelverkan som beskriver hur partiklar påverkar varandra med krafter. Det är en attraherande kraft som gör att kroppar dras mot varandra med lika stora motriktade krafter. Det finns två olika teorier som beskriver hur gravitationen uppträder. Isaac Newton var först ut med att beskriva denna med Newtons gravitationslag. Denna säger att massan m_1 och m_2 påverkar varandra med två lika stora och motriktade krafter F givna av sambandet enligt ekvation 2.1 där r är avståndet mellan kropparnas masscentra och $G \approx 6,7 * 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ är den allmänna gravitationskonstanten [2].

$$F = G \frac{m_1 * m_2}{r^2} \quad (2.1)$$



Figur 2.1: Newtons gravitationslag [2].

En annan formulering gjordes också av Albert Einstein med Allmänna relativitetsteorin som dock inte behandlas i detta examensarbete. I de allra flesta fall duger dessutom Newtons gravitationslag för ingenjörsmässiga beräkningar.

Tyngdacceleration

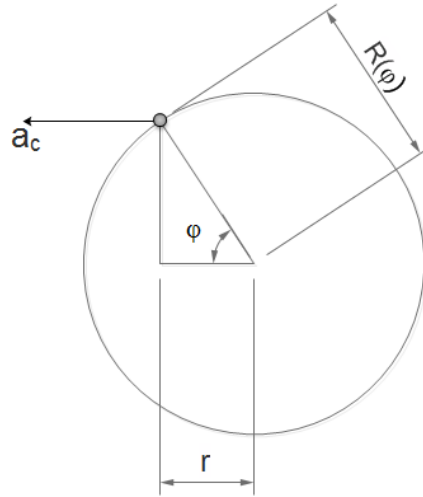
Jordens massa, avståndet mellan en kropps masscentra och jordens samt den allmänna gravitationskonstanten G kan bakas samma och bilda tyngdaccelerationen g vilken har olika värde på olika platser på ytan eftersom jordens masscentra inte exakt är placerad i jordens geometriska centrum och att radien inte är konstant. Jordens rotation gör att den liknar en ellipsoid eftersom centripetalkraften blir större med ett ökande avstånd från centrumlinjen och därmed påverkat jordens form. Radien R som funktion av latitud φ kan beräknas med följande formel där a och b är radien vid ekvatorn respektive vid polerna [3]:

$$R = \sqrt{\frac{(a^2 \cos \varphi)^2 + (b^2 \cos \varphi)^2}{(a \cos \varphi)^2 + (b \cos \varphi)^2}} \quad (2.2)$$

Göteborg har latituden 57 grader, maximala radien a är 6 384,4 km och minimala b är 6352,8km vilket i detta fall ger $R = 6 368,7$ km. Allt detta sammantaget och jordens massa $5,972 \cdot 10^{24}$ kg ger tyngdaccelerationen [4]:

$$g_{Göteborg} = \frac{Gm_2}{R^2} = \frac{6,6743 \cdot 10^{-11} \cdot 5,972 \cdot 10^{24}}{(6368,7 \cdot 10^3)^2} = 9,827 \text{ m/s}^2 \quad (2.3)$$

Som bekant används i Sverige $g = 9,82 \text{ m/s}^2$. I ekvation 2.3 tas inte hänsyn till jordens rotation som skapar en centripetalkraft på kroppar vilket ger upphov till en minskad tyngdacceleration.



Figur 2.2 Skissen visar den acceleration genererad av jordens rotation som verkar på en kropp som befinner sig vid jordens yta vilken är beroende av latitud φ .

Centripetalaccelerationen a_c vid en viss latitud φ ges av följande samband [5]:

$$a_c = \frac{v^2}{r} \text{ och } r = R(\varphi) \cos \varphi \Rightarrow a_c = \frac{v^2}{R(\varphi) \cos \varphi} \quad (2.4)$$

Hastigheten vid latituden 57°N blir sedan med hjälp av jordens vinkelhastighet ω :

$$v = \omega r = \omega R(\varphi) \cos \varphi \text{ där } \omega = \frac{2\pi}{3600 \cdot 24} \Rightarrow \quad (2.5)$$

$$\Rightarrow v = \frac{2\pi}{3600 \cdot 24} \cdot 6368,7 \cdot 10^3 \cdot \cos 57 \approx 252,2 \text{ m/s} \quad (2.6)$$

$$(2.4) \Rightarrow a_c = \frac{252,2^2}{6368,7 \cdot 10^3 \cos 57^\circ} \approx 0,018 \text{ m/s}^2 \quad (2.7)$$

Detta ger en med centripetalaccelerationen kompenserad tyngdacceleration enligt nedan:

$$g_{Göteborg, kompenserad} = g_{Göteborg} - a_c \cdot \cos \varphi = 9,827 - 0,018 \cdot \cos 57^\circ \approx 9,817 \text{ m/s}^2 \quad (2.8)$$

I WGS-84 (World Geodetic System 1984) definieras tyngdaccelerationen istället som [6]:

$$g = g_{45} - \frac{1}{2}(g_{poler} - g_{ekvator}) \cos(2\varphi) \quad (2.9)$$

Där $g_{45} = 9,806 \text{ m/s}^2$, $g_{poler} = 9,832 \text{ m/s}^2$, $g_{ekvator} = 9,780 \text{ m/s}^2$ vilket istället ger:

$$\begin{aligned} g_{Göteborg, WGS-84} &= \\ &= 9,806 - \frac{1}{2}(9,832 - 9,780) \cos(2 * 57) \approx 9,817 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Förutom centripetalacceleration och avstånd till jordens centrum påverkas gravitationsfältet även av andra fenomen. Jordens massa är inte homogen vilket gör att dess masscentra inte sammanfaller med jordens geometriska centrum. Dessutom är jorden inte en perfekt ellipsoid vilket får den att wobbla runt med en periodtid på ca 306 dagar. Förutom detta påverkas fältet även av solens, månens och andra planeters lägen. Allt detta sammantaget gör att påverkar beräkningarna av tyngdaccelerationen men en godtagbar beräkning kan alltså göras med tre värdesiffror.

För att beräkna tyngdkraften F som verkar på en kropp med massan m på en planets eller annan kropps yta med tyngdaccelerationen g används följande formel [7]:

$$F = mg \quad (2.11)$$

2.2 Filter

Vid brusiga eller ryckiga signaler kan man ha behov av att jämna ut dessa. Då kan ett sätt att erhålla en jämnare signal vara att skapa ett digitalt lågpassfilter som släpper igenom låga frekvenser men begränsar de höga.

2.2.1 FIR-filter

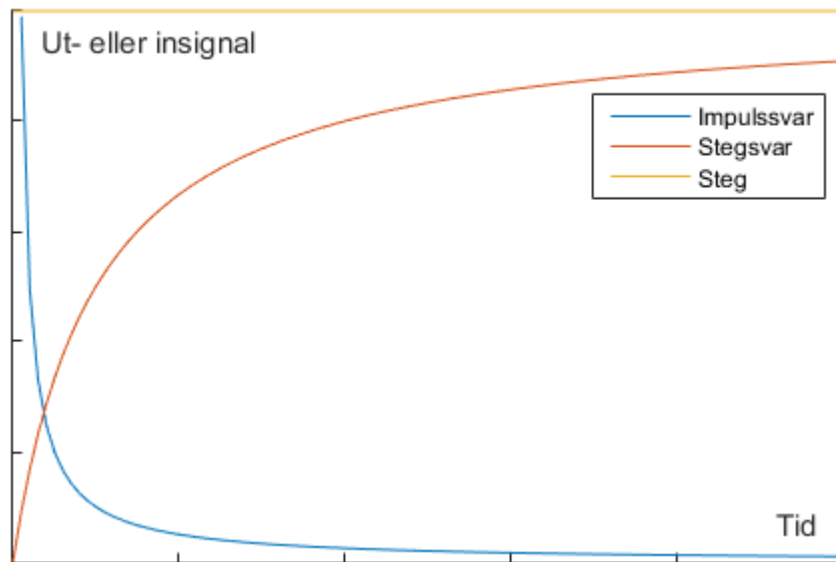
En variant är att ta fram ett medelvärde av de senaste n antal samplen. Att summera ihop de n senaste samplen för att sedan dela dem med n kan vara ett alternativ.

$$I_{medel} = \frac{I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n}{n} \quad (2.12)$$

Fördelen med detta filter FIR (Finite Impulse Response), som har ett ändligt impulssvar, är bland annat att de är stabila och har renare fasegenskaper. Filtret kan dock vara beräkningskrävande i ett program [8].

2.2.2 IIR-filtter

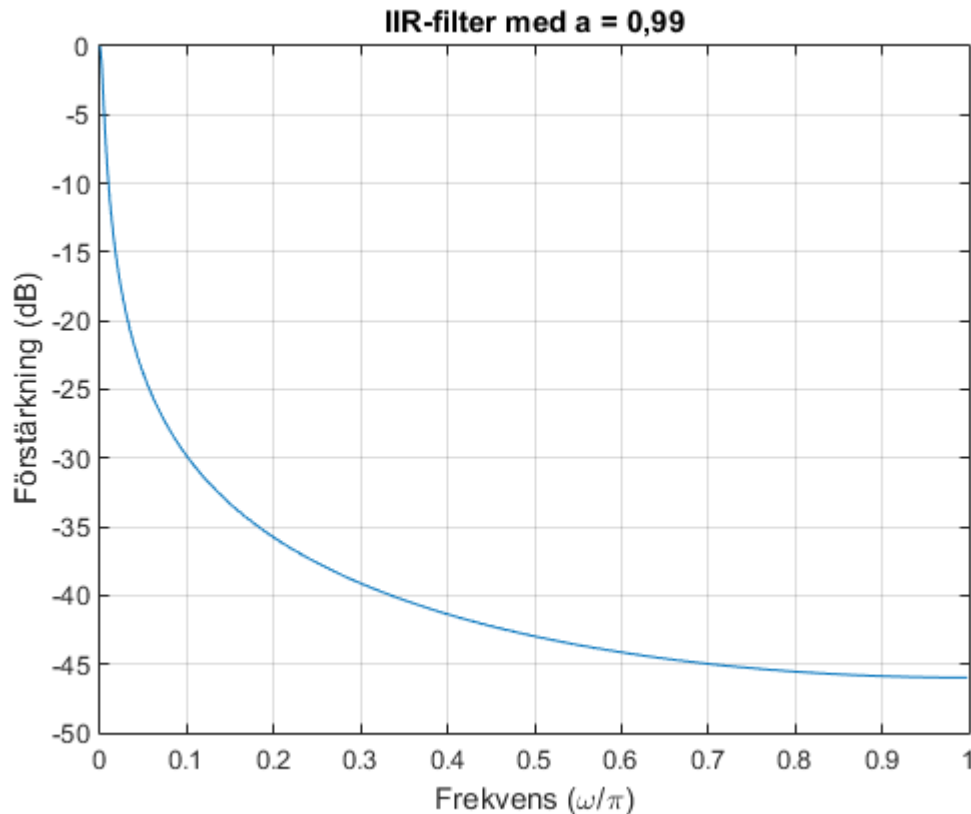
En mindre beräkningskrävande variant är IIR-filtret (Infinite Impulse Response) som har ett impulssvar som är skiljt från noll oändligt länge vilket visas i grafen nedan i figur 2.3. Vid ett steg kommer aldrig utsignalen nå insignalen vilket gäller både för steg- och impulssvar [9].



Figur 2.3: Typiskt impulssvar och stegsvar till följd av steg (gult) hos ett IIR-filtter.
[Graf: Ejnar Askberger]

IIR-filtret är lättare att ställa in och programmera vilket blir tydligt i formeln nedan som beskriver filtret.

$$O_{IIR} = a O_{IRR,föregående} + b I_{senaste\ samplet} \text{ där } a + b = 1 \quad (2.13)$$



Figur 2.4: Förstärkningen vid olika frekvenser hos IIR-filter med $a = 0,99$.

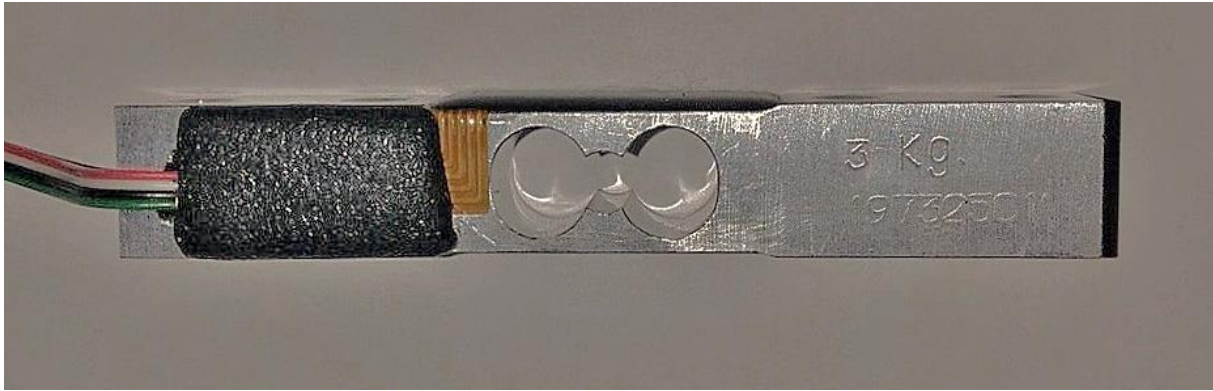
2.3 Coggingmoment och friktion

Det egenhändigt översatta ordet coggingmoment (Cogging Torque) är ett fysikaliskt fenomen som uppstår i vissa elmotorer som gör att ett av motoraxelns vinkelberoende moment påverkar axelns totala moment. Detta uppkommer till följd av rotorns permanentmagnet som i olika grad attraheras av statorn vid olika axelvinklar. Därför skapas ett med varje varv periodiskt återkommande mönster som beskriver detta moment [10].

Det finns åtgärder som kan göras vid konstruktion av motorerna som motverkar coggingmomentet [11]. Man kan också genom experimentella metoder eller genom matematiska modeller kartlägga coggingmomentet för att sedan kunna kompensera för det. Till skalmodellen som byggts i detta projekt används istället en typ av DC-motorer med järnlös rotor. Dessa har en jämn gång utan att ovanstående fenomen inte kan uppstå.

2.4 Lastcell

En lastcell är en transducer, d.v.s. en anordning som omvandlar en energiform till en annan, som används vid mätning av krafter [12]. I detta examensarbete används lastceller som består av en aluminiumstång med kvadratisk tvärsnitt med ett hål av speciell utformning. På stängen är trådtöjningsgivare fästa för att detektera nedböjning av stängen. Dessa är i sin tur anslutna till en wheatstone-brygga. Bryggan är sedan kopplad till en förstärkare som förstärker den lilla spänningsskillnad som uppstår i bryggan. På detta vis kan en nedåtriktad krafts storlek, pålagd till höger på stängen nedan, överföras till en elektrisk avläsbar spänning, proportionell mot kraften.



*Figur 2.5 Lastcell med tillhörande trådtöjningsgivare och wheatstone-brygga i svart.
[bild: Ejnar Askberger]*

2.5 Halleffektvinkelgivare

En laddad partikel som rör sig i ett externt, med rörelsen icke parallell, magnetiskt fält påverkas av Lorentz-kraften. I en strömförande ledare är laddningsbärarna i rörelse. Placeras ledaren i ett magnetiskt fält kommer laddningsbärarna utsättas för Lorentz-kraften. Kraftens riktning är beroende dels av laddningarnas tecken dels av magnetfältets riktning. I en metallisk ledare består den elektriska strömmen av elektroner, som har negativ laddning. Under gynnsamma förhållanden kommer elektronerna under sin rörelse att drivas längst den ena sidan av ledaren med en resulterande negativ potential. I ledarens motsatta sida kommer ett underskott av elektroner att uppträda med en resulterande positiv potential. Den uppkomna elektriska spänningen kallas för Hallspänning och fenomenet för Hall-effekten.

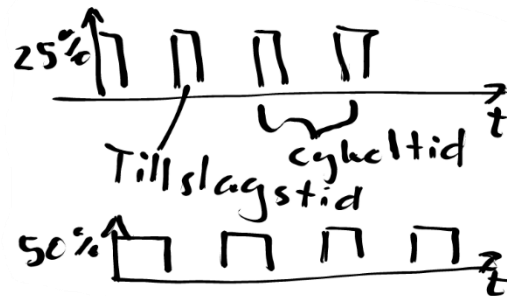
Hallspänningen är riktad vinkelrät mot strömriktningen. Storleken på spänningen är beroende av magnetfältets riktning och styrka, strömmens styrka samt ledarens materialegenskaper och geometri. Är strömstyrkan och ledarens egenskaper kända kan man genom att detektera Hallspänningen få information om det externa magnetfältets riktning och styrka. En detektor som bygger på denna princip kallas för hallgivare.

Placerar man en diametriskt magnetiserad rund magnet centrerad på en roterande axelenda i kombination med en sorts hallgivare har man konstruerat en halleffektvinkelgivare. Givaren är kontaktfri och dess påverkan på rotationsrörelsen är försumbar.

2.6 SPI-buss

SPI står för Serial Peripheral Interface och är en buss, d.v.s. en samling gemensamma ledningar, för synkron seriell datakommunikation. Bussen har fyra logiska signaler där SCLK är seriell klocka som kan konfigureras till olika frekvens. MISO är Master In Slave Out för överföring från master- till slave-enhet. MOSI Master Out Slave In för överföring från slave till masterenhet. Den sista signalen kallas SS Slave Select med vilken slave-enheten kan väljas då flera sådana kopplats till bussen. Bussen kan alltså bara kommunicera med en slave-enhet åt gången.

2.7 Pulsbreddsmodulering (PWM)



Figur 2.6 Skiss över pulsbreddsmodulering som visar cykeltid och tillslagstid.

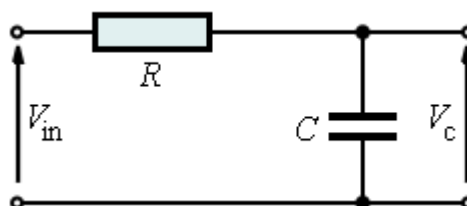
Pulsbreddsmodulering (Puls Width Modulation) är ett sätt att kunna variera en effektmatning steglöst mellan 0 V och matningsspänning genom att slå till och från matningen under olika stor andel av tiden. I PWM används en frekvens som resulterar i en konstant cykeltid. Under denna tid varieras tillslagstiden mellan 0 och 100 % av cykeltiden [13]. I vissa fall kan denna uppstyckning av spänning ställa till med problem t.ex. när spänningen används som analog signal till ett drivsteg som driver en motor. Om inte en ökning av PWM-frekvensen löser problemen så kan ett RC-filter användas för att jämna ut spänningen.

2.8 RC-filter

Ett RC-filter är en typ av första ordningens lågpasfilter som består av en resistor och en kondensator. Överföringsfunktionen har en tidskonstant som är produkten av resistansen och kapacitansen och ser ut som följer [14]:

$$G = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2.14)$$

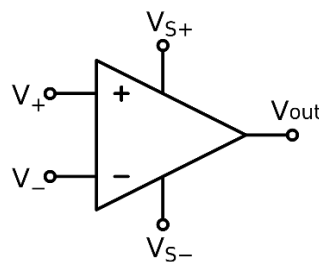
Detta betyder alltså i praktiken att ett högre värde på R och C ger en jämnare signal men också långsammare stigtid och vice versa. Kopplingsschemat ser ut som följer där V_{in} är insignal och V_c utsignal.



Figur 2.7 Kopplingsschema för RC-filter [14].

2.9 OP-förstärkare

En operationsförstärkare är en elektrisk komponent som används i integrerade kretsar för att åstadkomma olika typer av funktioner. Det finns en rad olika kopplingar av OP-förstärkarna som t.ex. kan utföra matematiska operationer. Den har en plus- och minusgång, en positiv spänningsmatning och en negativ oftast av samma belopp som den positiva samt en utgång. Vid beräkningar inom elektriska kretsar används oftast en modell av operationsförstärkaren vilken man kallar en ideal OP. Denna modell har en oändlig förstärkning vid likspänning och växelspanning oavsett frekvens. Den har en oändlig inimpedans, ingen utimpedans och vid 0 V in levererar den 0 ut [15].



Figur 2.8 SchemasyMBOL för operationsförstärkare [16].

I detta examensarbete används operationsförstärkare som en del i nivåanpassningen mellan mikrokontrollerkort och drivsteg till elmotorerna. Mer om detta i 7.2.7.

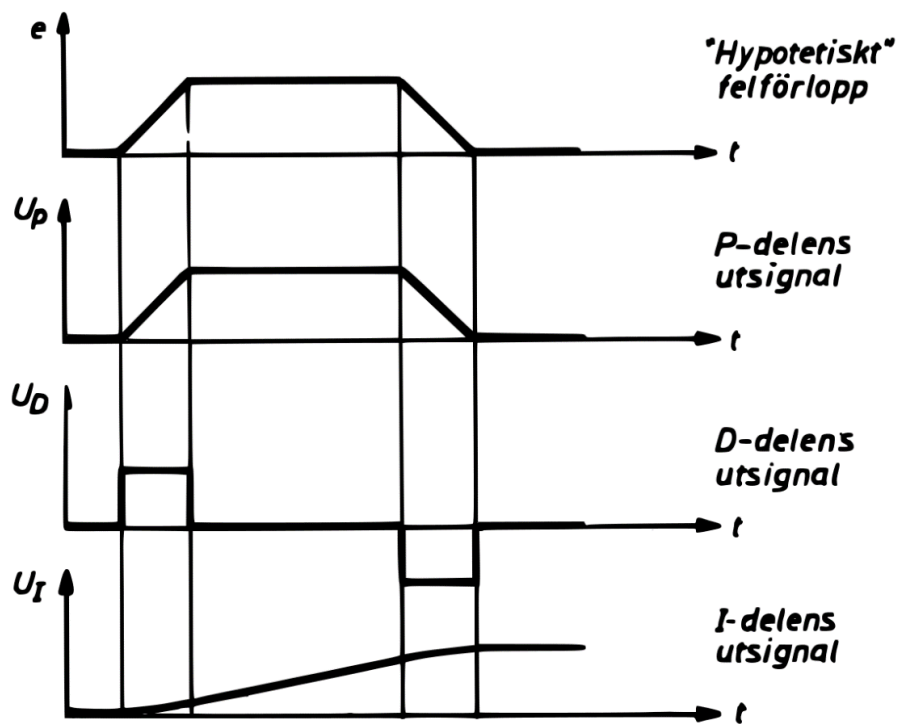
2.10 Reglerteknik

Reglerteknik innebär att man automatiserar styrningen av ett system. I detta arbete används återkopplade reglersystem där systemets uppmätta ärvärde används för att beräkna felet som är skillnaden mellan börvärdet och ärvärdet. Felet används sedan för att generera en styrsignal med hjälp av systemets regulator. Det finns flera typer av regulatorer och strukturer för reglersystem. Nedan följer en presentation av de principer som använts i detta arbete.

2.10.1 PID-reglering

I PID-reglering summeras tre delar för att utifrån är- och börvärde generera en styrsignal. De tre delarna har var för sig en parameter som anger hur mycket de var för sig skall bidra till summan. P-delen (proportionell) beräknas genom en proportionalitetskonstant, K_P , som multipliceras med felet. I-delen (integrerande) är i diskreta sammanhang en summa av aktuellt fel vid vardera samplingstillfälle. Denna summa multipliceras sedan med en konstant K_I . Den tredje och sista komponenten, D-delen har en deriverande verkan och är felets derivata. Även denna multipliceras med en parameter K_D . Det finns andra typer av PID-strukturer och strukturer där en eller två delar utelämnas men i detta arbete har endast ovan nämnda struktur använts.

De olika delarna är bra för regleringen på olika vis. Den integrerande delen är nödvändig för att eliminera kvarstående fel vid stegformade börvärdesändringar och störningar i de fall när processen inte är integrerande. Med hjälp av deriverande verkan, som inte kan användas som fristående del, stärks snabbhet och stabiliteten hos reglersystemet. Den proportionella verkan förbättrar också snabbheten men kan också skapa instabilitet vid för stort K_D [17]. Vid inställning av parametrarna får man göra avvägningar om vilka egenskaper man vill att regleringen skall ha. För att komma fram till dessa används ibland olika typer av tumregelsmetoder men i simulink-modellerna som skapats för skalmodellen har istället Simulink använts för att komma fram till lämpliga parametervärden. I figur 2.9 visas ett exempel på hur de olika delarna bidrar till en styrsignal, u , vid ett hypotetiskt felförlopp.



Figur 2.9 Grafer som visar de olika samverkande delarna i PID-reglering [17].

2.10.2 Kaskadreglering

I kaskadreglering används två PID-regulatorer där den ena yttre, beräknar börvärdet till den andra inre. På detta vis förbättras dynamiska egenskaper och störningar som kan påverka systemet negativt kan lättare minimeras. Vid varvtalsreglering av elmotorer kan kaskadreglering användas där den inre loopen reglerar strömmen till motorn och den yttre reglerar varvtalet [17] [18].

2.10.3 Integratoruppvridning

Vid användning av en PID-regulator kan en komplikation uppstå då felet som regulatorn matas med kvarstår under en längre tid. Detta kan då resultera i att I-delen växer sig större och större. När sedan felet minskar kommer styrsignalen som regulatorn genererar inte kunna förändras trots att det är önskvärt eftersom ingen kompensation längre behövs. Detta beror på att I-delen är så pass stor att det kommer att ta lång tid för den att räknas tillbaka till korrekta värden. Ett sätt att hantera detta kan vara att implementera något som kallas anti-windup. En variant på detta är att sluta integrera när styrsignalen nått ett av sina yttre lägen [19].

2.10.4 Lineäritet

Ett reglersystem kan antingen vara linjärt eller olinjärt. Sambandet mellan in- och utsignalen hos de block som ingår i systemet kan ha lineära eller olinjära differential- eller differensekvationer. Ett olinjärt reglersystem är betydligt mer komplicerat att reglera än ett linjärt. Därför är det önskvärt att alla ingående blockskallvara av linjär karaktär [17]. Vid val av reglersystemet ingående komponenter har fokus därför lagts på att hitta komponenter som är just lineära.

3 METOD

Detta examensarbete har alltså både pågått i Visual act's lokaler i Stockholm samt på Chalmers campus Lindholmen. Under vistelsen i Stockholm pågick ett arbete med att försöka styra momentet hos en permanentmagnetmotor med insignal från en lastcell. Erfarenheter från dessa försök visade dock att styrning av motorers moment inte är helt trivialt. Att styra motorers hastighet kan dock göras med en mycket större precision eftersom ärvärdet för vinkelhastigheten är lätt att mäta. Detta gav arbetet en ny riktning och ett sätt att styra hastigheten hos motorerna togs fram till den skalmodell på den gravitationssimulerande riggen som utvecklades på Chalmers.

Nedan presenteras metoder för mätningar och test som gjorts på Visual act's utrustning samt tillvägagångssätt vid framtagning av skalmodellen på Lindholmen.

3.1 Arbetsgång

Här följer ett antal punkter som beskriver hur arbetet bedrevs. Arbetsprocessen var rörlig och flera av punkterna genomfördes samtidigt och vissa moment som avklarats gick tillbaka till för att i efterhand omformuleras och omarbetas.

3.1.1 Problemformulering

Utifrån tidigare erfarenheter med mekanisk variant av riggen väcktes idén om att skapa en vidareutveckling av riggen enligt tidigare beskrivning. Utifrån detta togs sedan en problemformulering som senare skulle komma att ligga till grund för framtagning av kravspecifikation.

3.1.2 Planeringsrapport och Gantt-schema

En planeringsrapport skrevs som beskrev vilka arbetsmoment som ingick och när de skulle vara färdigställda. I detta dokument ingick även ett gantt-schema som visade hur de olika momenten låg i tiden se bilaga 2. Detta dokument, som skulle komma att uppdateras under resans gång, användes för att få Visual act's och Chalmers officiella godkännande av examensarbetet. Vid planering av examensarbetet hölls olika vägar öppna för sätten att verifiera möjligheten att bygga en gravitationssimulerande rigg. Både en skalmodell och en fullskalig prototyp och om de skulle verka på en, två eller tre dimensioner övervägdes. Detta skulle också komma att ändras under resans gång.

3.1.3 Kravspecifikation

För beslutsfattande vid framtagning av riggen sattes följande kravspecifikation upp med krav och önskemål. Även om en kravspecifikation vanligen uteslutande består av objektiva mätbara punkter så innehåller denna lista även indikationer om vad som värderas som viktigt om projektet i framtiden skulle involvera fler samarbetspartners. Eftersom projektet både är en teknisk och estetisk utmaning bör både riggens funktion, dess beteende och hur den upplevs tas i beaktning vid dess framtagning. Följande objektiva mätbara krav (K) och subjektiva önskemål (Ö) sattes upp.

- Riggen skall ha funktioner som förhindrar personskador (K).
- Av största prioritet för riggens rörelsekaraktär är att det skall ha en god konstnärlig kvalitet och kännas bra att använda snarare än god precision när det kommer till gravitationssimulering (Ö).
- Om riggen genererar ljud skall detta om möjligt väljas så att det är estetiskt tilltalande (Ö).
- Riggen skall ha god flexibilitet vid montering (Ö).
- Användaren skall kunna rotera i minst två led (K).
- Riggen skall vara till en så liten rörelsebegränsning för användaren och dennes omgivning som möjligt (Ö).
- Riggen skall i största möjliga mån fungera med andra objekt/personer placerade inom arbetsrymden (Ö).
- Riggen skall vara enkelt att justera och programmera (Ö).
- Riggen skall fungera oberoende av yttre ljud och ljus och andra eventuella störande påverkan (K).
- Riggen skall fungera på samma sätt oavsett höjd i arbetsrymden (K).
- Riggens skall fungera på samma sätt oavsett höjd i arbetsrymden (K).

3.1.4 Framtagning av lösningsförslag

Ett antal lösningsförslag togs fram som senare kunde utvärderas och testas. I detta examensarbete har varken Pughs matris eller Pughs ballonger setts som nödvändiga verktyg för att utvärdera lösningsalternativen. Istället har frågan ställts för varje lösningsalternativ – hur kan detta på bästa sätt utvärderas och testas? Mer om lösningsalternativ längre fram i rapporten.

3.1.5 Tester av befintlig utrustning

På Visual act gjordes en rad tester och utvärdering av utrustning och metoder som senare skulle ligga till grund för val av tekniska lösningar på skalmodellen. Tester gjordes sedan också kontinuerligt i takt med att olika delmoment färdigställdes av modellen. Dessa förklaras närmare senare.

3.1.6 Konstruktion av skalmodellen

Eftersom skalmodellen är en prototyp på ett tidigt stadium och att fokus i examensarbetet cirkulerat kring att utforska och utveckla reglerprinciper lades ingen större vikt kring att skapa snygga detaljer till denna. Enkla skisser på alla detaljer låg till grund för senare tillverkning. Alla komponenter har valts så att de skall vara så tids- och kostnadsbesparande som möjligt. Elektriska komponenter har i största möjliga mån valts, som tidigare använts och dokumenterats framgångsrikt på den mikrokontrollerkortet som valts till projektet.

3.1.7 Tillverkning och montering av skalmodellen

Alla plåt detaljer till modellen tillverkades i metallverkstaden på Lindholmens Tekniska Gymnasium där Tommy Unger har ställt upp som handledare. Trädetaljer har tillverkats på Bjällansås gård i Bokenäs och detaljer i styren-akrylnitril och ytmontering på mönsterkort har gjorts på Chalmers robotförening, Johanneberg. Övrig montering och justering har gjorts på Chalmers Lindholmen.

3.1.8 Justering av skalmodellen

Både förstärkare till lastceller och nivåanpassningskretsar har försetts med vridpotentiometrar för inställning av förstärkning och offset (förskjutning). Detta motsvarar alltså k-värde respektive m-värde i räta linjens ekvation visad nedan där y motsvarar utsignal och x insignal.

$$y = kx + m \quad (3.1)$$

Fler justeringar har gjorts löpande under utveckling av skalmodellen. Detta går igenom i detalj i avsnitt 7.2.7.

3.1.9 Programmering

På Visual act används ett språk kallat QML (Quick Motion Language) vilket används i kontrollern för att styra de drivsteg som i sin tur tillför effekt och styr de vinschar som används i ett system. Detta språk användes på samtliga tester som gjordes där.

Programmeringen av modellens mikrokontrollerkort gjordes ganska sent i arbetet med skalmodellen eftersom detta inte kunde testas innan alla hårdvara var färdigställd. Arduino gränssnittet har använts för att programmera i ett språk som i stort sätt är det samma som C. Vid programmering användes fält flitigt eftersom många utav variablerna förekom antingen tredimensionellt eller i skalmodellens fyra hörn.

3.2 Kunskapsinsamling under arbetet

Olika källor har används för inhämtande av nödvändig kunskap för examensarbetets genomförande. Vid framtagning av elektriska kretsar har datablad används för de komponenter som valts. Som tidsbesparande åtgärd har mestadels det webbaserade uppslagsverket Wikipedia använts som källa vid författande av avsnittet teoretiska bakgrund. Mer praktiska och teoretiska generella frågor kunde dock tas upp med personal på Visual act, examinatorn för examensarbetet samt lärare på Chalmers och andra muntliga källor. Vid arbetet med reglerelektroniken användes ibland olika forum, bloggar och hemsidor som beskrev olika implementeringar av de tekniker som använts tekniker. Alla typer av källor, bildkällor, litteratur, internetbaserade källor såväl som muntliga källor har alla samlats numrerade i källförteckningen i slutet av rapporten. Detta för att spara tid och göra det lättare att söka reda på källan för läsaren. Bildkällor är angivna med en siffra i bildtexterna under dessa.

4 GENERERING OCH TEST AV LÖSNINGSALTERNATIV

Målet med examensarbetet har alltså varit att försöka skapa en prototyp/skalmodell av en rigg som för en vikt/person skall simulera en lägre gravitation än den på jorden genom användning av linor som drar i användaren.

4.1 Framtagning av position

Det finns flera tänkbara lösningssalternativ för denna rigg. I detta examensarbete används vinschar som via trissor i de fyra övre hörnen av ett tänkt rätblock drar användaren uppåt. Två olika sätt att lösa detta har testats och utvärderats i arbetet.

Det finns också olika tänkbara sätt att kontinuerligt få reda på användarens position och hur denna rör sig. Med denna information skall man sedan kunna reglera de fyra motorerna. Detta examensarbete har haft en mycket begränsad budget och därför har det inte funnits en möjlighet att använda avancerad och dyr utrustning med vilken man kan få en noggrann kännedom om hur användaren rör sig. Exempel på sådan utrustning är [20]:

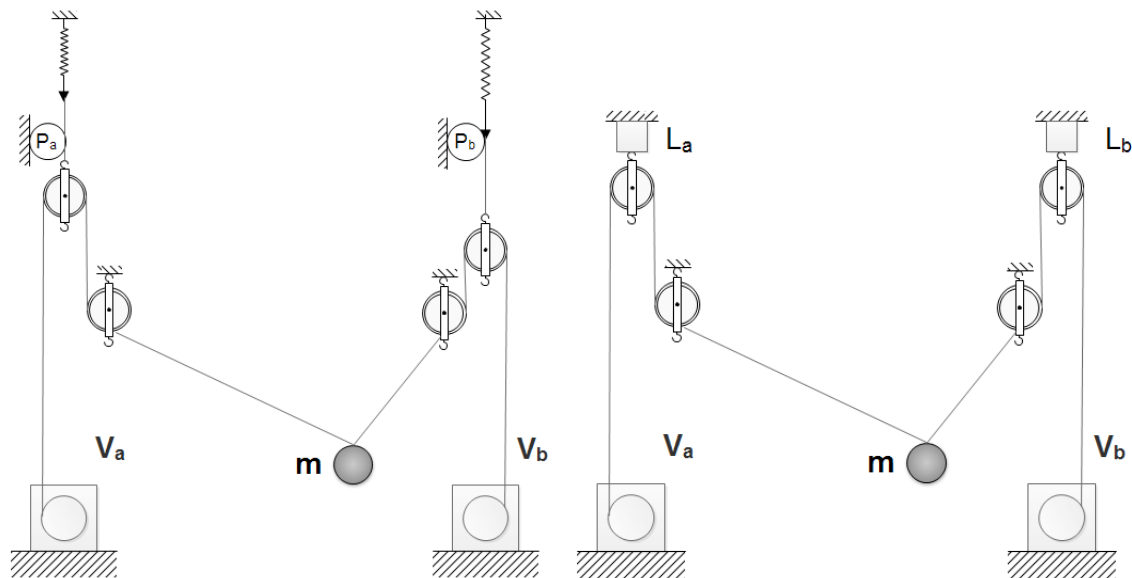
- Ultraljud
- Radar
- Radio
- Tröghetsnavigering
- Optisk avläsning av användarens position
- Optisk avläsning av rummet i förhållande till användaren

Istället övervägdes olika sätt att ta reda på kraften i linorna och använda detta för att beräkna användarens rörelser och reglera motorerna.

4.2 Avläsning av linkrafter

I figur 4.1 nedan visar för tvådimensionell gravitationssimulering, två olika idéer om hur kraften i linorna kan tas fram. De båda vinscherna V_a och V_b drar i varsin lina som går via ett i en fjäder upphängt block och vidare till ett fast block till vikten m som dras uppåt. Beloppet av linkraften är det samma längs var och en av de båda linorna förutsatt att trissornas friktion försummas. Genom att man känner fjäderkonstanten och låter fjäderns förlängning mätas med hjälp av en vridpotentiometer, P_a och P_b , eller halleffektvinkelgivare kan man därigenom få fram beloppet av dubbla linkraften. Denna metod fungerar bra om man har ett statiskt system men blir troligen svår att få till när vikten börjar röra på sig. Då måste hela mätsystemets tröghet och friktion tas i beaktning vid beräkningar av linkrafterna.

En annan variant är att istället ersätta fjädrarna och potentiometrarna med lastceller, L_a och L_b , som mäter den dubbla linkraften. Nu kan massan röra sig utan att mätningen i lika stor grad påverkar systemet i sin helhet.



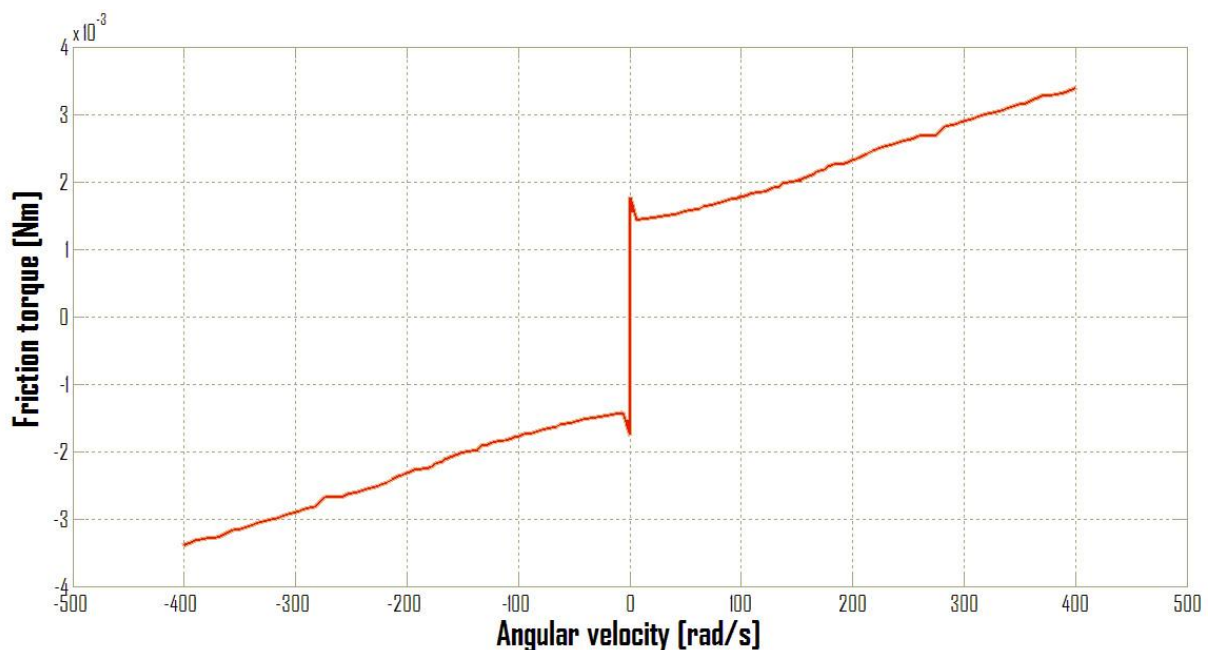
Figur 4.1 Metoder för identifiering av linkrafter. T.v. m.h.a. fjädrar och vridpotentiometrar, t.h. m.h.a. lastceller. [Illustration: Ejnar Askberger]

4.3 Reglerprinciper

Vidare finns det också två olika sätt att använda den uppmätta kraften i linorna för att reglera motorerna. Var än användaren befinner sig i rummet, vill man alltid ha en kraft riktad uppåt, tyngdkraften verkar ju alltid nedåt och det är ju den som man skall minska för att simulera en lägre gravitation. Eftersom riktningarna på linorna ändras då användaren rör på sig måste också krafterna i linorna ändras därefter för att åstadkomma en uppåtriktad kraft. Beloppet på denna kraft som är önskad kraftresultant av linkrafterna skall alltid vara kopplad till den inställda gravitationsnivå man önskar simulera. I teorin borde man därför kunna reglera momenten i varje motor som funktion av användarens position för att generera önskad kraft i varje lina. Varje motors moment-ärvärde skulle då vara beroende av användarens position och dennes massa. I DC-motorer gäller att momentet är ungefärligt proportionellt mot strömmen som motorn drar och därför skulle en strömreglering kunna användas för att åstadkomma önskat moment.

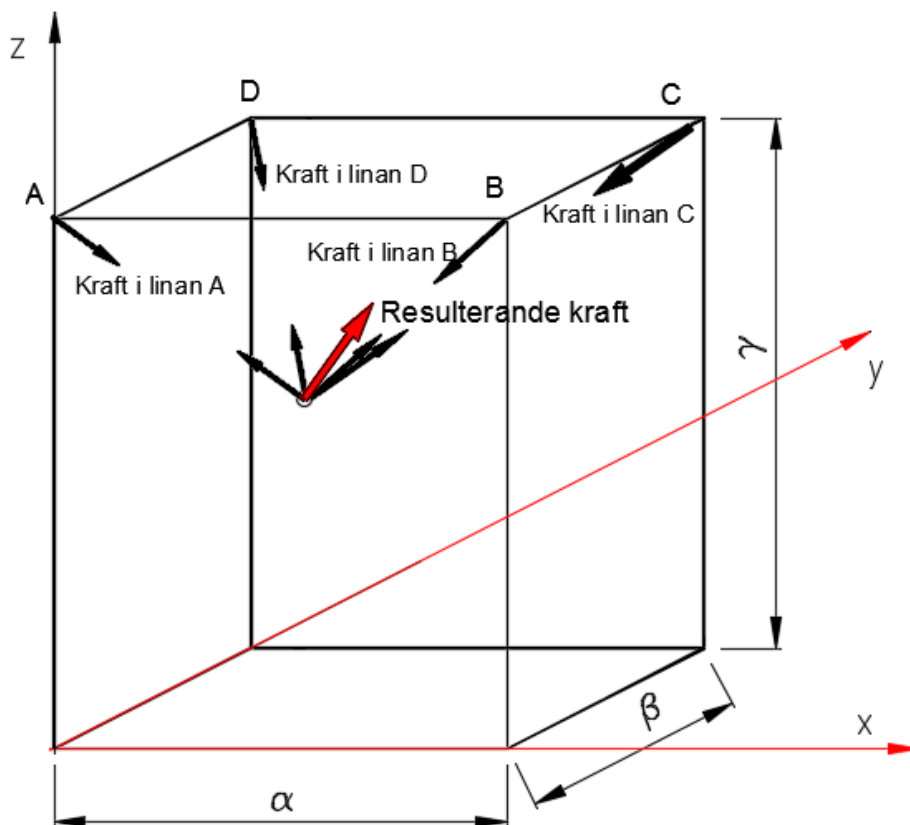
I praktiken finns dock tidigare nämnda fenomen som gör det svårt att förlita sig till att strömmen skulle vara proportionell mot momentet. Motorn har en inneboende friktion som måste övervinnas innan den börjar snurra. Man kan alltså skicka ström till motorn utan att den börjar röra på sig. Allt detta gör att motorn får en olinjär karaktäristik med en dödzon då vinkelhastigheten är noll visad i figur 4.2 nedan där det krävs en stor ström för att övervinna den statiska friktionen som är större än den dynamiska. Coggingfriktionen utökar olinjäriteten ytterligare mellan ström, och det moment som motorn alstrar. Dessutom finns en tröghet i motorn och trumman som är ansluten till vinschen som påverkar sambandet mellan ström och det moment motorn genererar vid acceleration. Enkla experiment gjorda under examensarbetet visade dessutom att dödزونen inte visade sig ha samma gränser vid olika tillfällen.

Nedan stående graf visar hur friktionsmomentet förhåller sig till vinkelhastigheten för motoraxeln i en studie. Som man kan se finns ett stort spann då axeln står stilla där friktionen kan anta vilka värden som helst mellan ca -1,8 till 1,8 mNm för aktuell motor [21].



Figur 4.2 Den statiska friktionen måste övervinnas för att motorn skall kunna börja rotera [21].

Ett alternativ till att styra motorernas moment är också att styra deras vinkelhastighet. Det finns halleffektvinkelgivare som med hög precision kan avgöra motorns vinkelhastighet samt utmatad linlängd. Detta betyder att man har ett noggrant ärvärde att reglera efter men det gäller bara att veta vilket börvärdet är.



Figur 4.3 Linkrafter och kraftresultant för dessa.

Eftersom varje lastcell ger information om linkraften i vardera lina kan en kraftresultant till dessa räknas fram. Riktningen på varje linkraft, som är parallell med linans riktning, kan beräknas eftersom varje linlängd, d.v.s. varje sida i den upp-och-nervända pyramid visad i figur 4.3 som dessa bildar, är kända, beräknade utifrån halleffektvinkelgivaren på varje motor. Utifrån dessa längder och linornas riktning kan sedan en kraftresultantsvektor beräknas. Efter att denna kraftresultant räknats fram kan sedan den kraftkomponent, riktad uppåt, som skall reducera tyngdkraften så att en önskad gravitation kan simuleras, subtraheras. Då har man fått fram en vektor som visar åt vilket håll och med vilken storlek användaren ska accelereras. Denna kraft kan genom beräkningar omvandlas till en hastighet som sedan kan omvandlas så att vinkelhastigheten i alla motorer blir reglerade. Detta förklaras utförligare i kapitel 7.1.

Dessa två lösningsalternativ var de som valdes för vidare studier och tester. Det ena summeras alltså som att åstadkomma gravitationssimuleringen genom att styra motorernas vinkelhastighet m.h.a. ett börvärde som tagits fram från lastcellssignaler och halleffektgivare samt ett ärvärde från motorernas halleffektvinkelgivare. I det andra alternativet regleras istället kraften i linorna genom inläsning av lastcellsärvärden (signalen från varje lastcell) och användarens position.

4.4 Stegsvär för motor kopplad till drivsteg

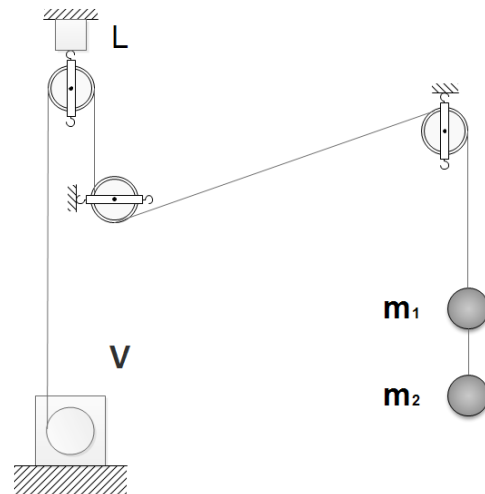
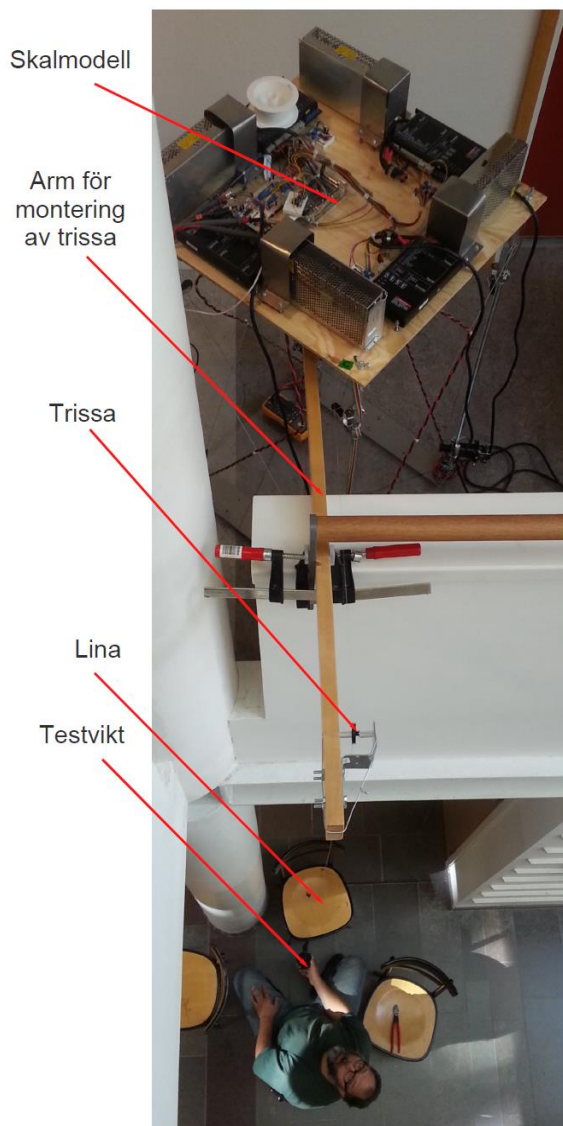
Utifrån databladet kunde man matematiskt bestämma motorens överföringsfunktion. Tyvärr fanns inte likvärdig information tillgänglig för drivsteget. Därför betraktades istället motorn kopplad till drivsteget som ett enda block. En serie försök utfördes där blocket utsattes för stegformade styrsignalförändringar och resultatet från lastcell och vinkelgivare registrerades med hjälp av ett program som finns i bilaga 13. I figur 4.4 på nästa sida visas denna testrigg, där \mathbf{V} är vinschen som via en trissor och en lastcell \mathbf{L} drar i massan \mathbf{m}_1 . Från studium av de resulterade graferna drog man slutsatsen att processen som motsvarade blockets egenskaper var en process med översväng. En process av detta slag beskrivs enklast av en andra ordningens överföringsfunktion av nedanstående typ, där nämnaren har komplexa rötter:

$$G(s) = \frac{K\omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (4.1)$$

Förstärkningen K , den odämpade egensvängningen ω_0 samt den relativa dämpningen ξ bestäms från de insamlade mätvärdena. [17, p. 115]

Med $K = 71,08$, $\xi = 0,0286$ samt $\omega_0 = 47,51$ insatt fick man överföringsfunktionen:

$$G(s) = \frac{160445}{s^2 + 2,721s + 2257} \quad (4.2)$$

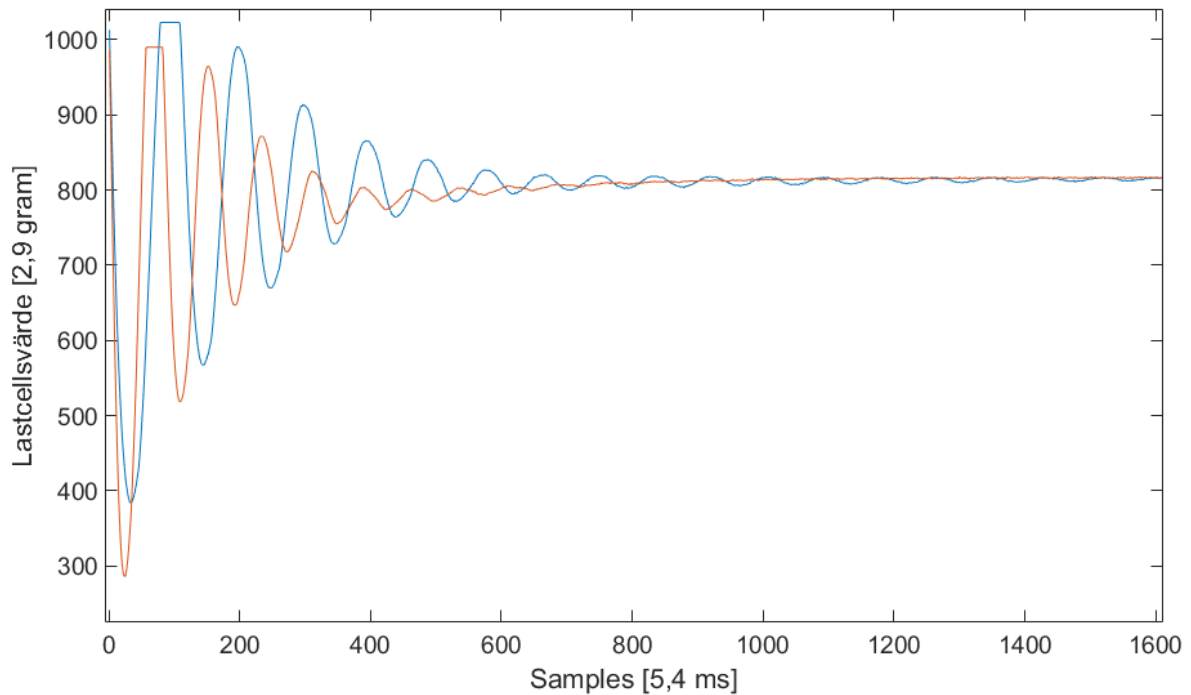


Figur 4.4 Rigg för utförande av stegsvartester.

4.5 Undersökning av linor

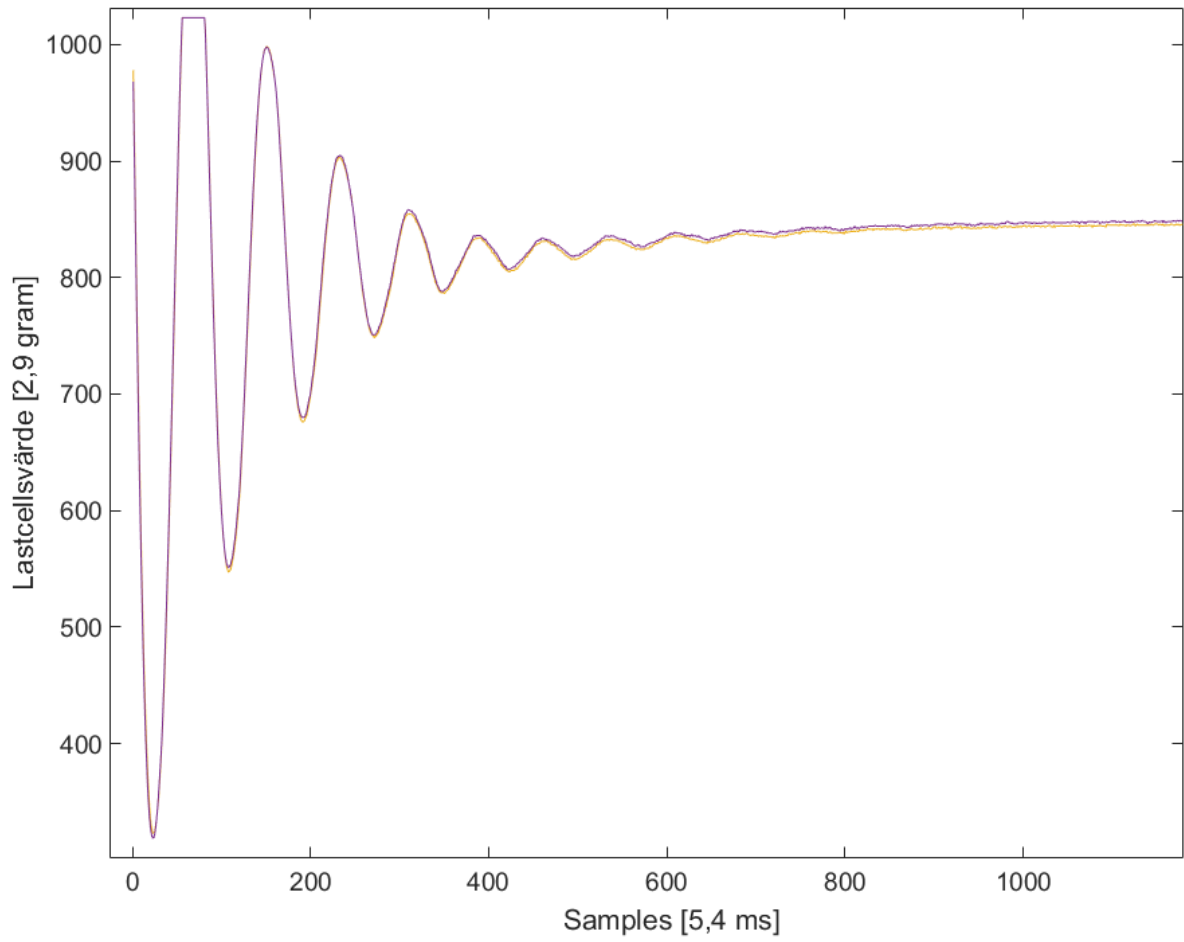
Under försöken med motor kopplad till drivsteg noterades en viss fjädring i linorna. Man ville därför undersöka de tillgängliga linorna och deras inverkan. Undersökningen gjordes genom att under den ordinarie vikten m_1 i en tråd hänga ytterligare en last m_2 av samma storlek. Trumman till vinschen var i under dessa tester låst. Den totala längden av den undersökta linan var ungefär 8 meter. Då de upphängda vikterna hängde orörligt klipptes linan i vilken den extra vikten hängde och den uppkomna fjädringen registrerades via lastcellen. Målet med undersökningen var att hitta linan med störst fjäderkonstant för att minimera svängningsamplituden men även att undersöka hur snabbt fjädringen dämpades i linorna. De testade två linorna var Björntråd i 100 % polyester samt Extreme sjöfiskelina med $0,70 \text{ mm}^2$ tvärsnittsarea. Se figur 4.5 och 4.6.

Det framgick tydligt redan från grafisk lastcellsdata att fiskelinan hade bättre dämpning. Beräkningar visade på 42 % dämpning. Vad det gäller fjäderkonstanten till linorna fick man undersöka periodtiden för svängningarna. Fjäderkonstanten är direkt proportionell mot kvadraten av svängningsfrekvensen och därmed linan med den kortare svängningsperioden har det mindre svängningsamplituden. Även här visade sig fiskelinan vara det bättre valet.



Figur 4.5 Stegsvartester på Björntråd blå och fiskelina röd.

Tyvär visade sig båda linmaterialen vara för elastiska. En ny lina införskaffades i dyneema-fiber och kommer testas senare.

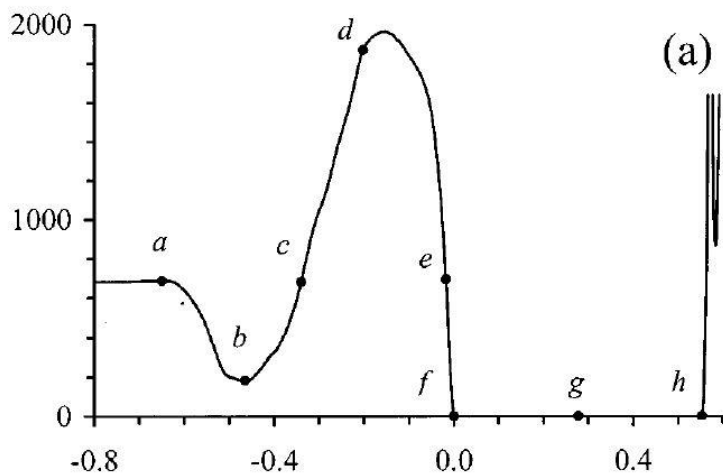


Figur 4.6 Stegsvär uppmätt två gånger under samma förutsättningar med fiskelinan.

5 SIMULERING AV LÖSNINGSFÖRSLAG

I detta avsnitt presenteras simuleringar som gjorts med simulink-modeller. Simuleringen är avgränsad genom att endast endimensionell gravitationssimulering simulerats. Syftet med simuleringen har varit dels att ta reda på om utvalda reglerprinciper kan fungera tillfredställande, men också att få en uppfattning om lämpliga PID-parametrar för reglering av hastigheter på motorerna eller kraften dessa ska reglera i skalmodellen.

I simuleringen för hastighetsreglering har ett scenario där användaren hoppar rakt upp i luften använts. Data hämtades från en studie som visade normalkraften hos en person som gör ett vertikalt upphopp [22]. Följande graf i figur 5.1 ligger till grund för kraften i linan som funktion av tiden. Med hjälp av ett program (GetData Graph Digitizer) kunde kurvans punkter digitaliseras räknas om för simulerad vikt och konverteras till linkraft, vilken sedan kunde användas i simulink-modellen.



Figur 5.1 Graf som visar normalkraft vid ett vertikalt upphopp. På y-axeln visas kraft i N och x-axeln, tiden i steg om 0,1 s [22].

5.1 Simulering av hastighetsreglering

Vid hastighetsreglering används flödet som beskrivs i schemat i bilaga 11. Eftersom dessa modeller endast utförts i en dimension har dock ett antal steg inte varit nödvändiga. Här kommer dock en genomgång av reglerprincipen gällande två- eller tredimensionell gravitationssimulering. Först läses värden in från lastcellsförstärkaren och halleffektvinkelgivarna. Därefter beräknas längden på utmatad lina samt hastigheten på dessa. Efter detta beräknas positionen för användaren utifrån 3 st. linor men en fjärde används också för kontrollräkning. Om ett för stort fel i beräkningen upptäcks ska nödstopp utlösas där alla motorers hastighet rampas (minskas lineärt) ner till noll.

Efter detta beräknas, utifrån lastcellsvärdena, en hastighetsbörvärdesvektor. Detta görs med Newtons andra lag. Man vill att systemet alltid ska dra användaren uppåt med en kraftvektor med beloppet $km g$ där k är andelen av mg som dennes tyngd ska reduceras. Denna vektor subtraheras från lastcellskraftresultanten. Resterande kraftvektor beskriver hur användaren ska accelereras. Efter detta kan hastighetsbörvärdesvektorn beräknas genom integrering av denna acceleration. Hastighetsbörvärdesvektorn används sedan för att beräkna hastighetsbörvärdet för

varje motor. Detta värde och hastighetsärvärdet för var och en av motorerna skapar ett fel för varje motor som används för att reglera hastigheten med hjälp av en PID-regulator. För endimensionell gravitationssimulering behövs inga positionsberäkningar göras och vektorsberäkningar ersätts med skalärberäkningar.

Hela reglersystemet som testas i Simulink beskrivs matematiskt i avsnitt 7.1 och simulink-modellen kan ses i bilaga 9. Motorn kaskadregleras med en inre loop som reglerar strömmen till motorn som är ungefärligt proportionell mot motorns alstrade moment. Denna inre loop motsvarar skalmodellens drivsteg till motorn och kan således inte påverkas. I den yttre loopen regleras motorns vinkelhastighet vilket i den verkliga modellen består av lastcell, signalförstärkare, halleffektvinkelgivare, mikrocontrollerkortet, samt lågpasfilter och nivåanpassningskrets. I bilaga 10 visas grafer som är resultatet när simulering görs med modellen då massan satts till 1.1 kg. Denna massa resulterar i ett moment pålagt på motorn som fås genom följande beräkning där k som för månggravitation blir $5/6$, är andelen av mg som skall reduceras för att uppnå vald gravitationssimulering:

$$F = kmg \text{ och } M = Fr \Rightarrow M = k * mgr = 1,1 * 9,81 * 0,01 \approx 0,09 \text{ Nm} \quad (5.1)$$

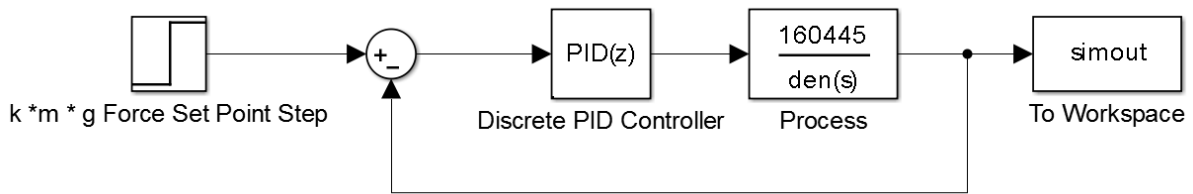
Men denna kraft är i inledningsskedet alstrad av en tabell av värden hämtade från ovan omnämnd graf och övergår sedan till beloppet i ekvation 5.1. Alla parametrar som fanns att tillgå i Maxons datablad för använd motor till skalmodellen (MAXON 148867) användes i Simulink-modellen. Följande övriga parametrar användes när simuleringen genomfördes:

- Viskös friktion för motorn: 0,001 Nms (antaget värde).
- Coulomb friktion för motorn: -0,0015 Nm (experimentellt framtaget värde).
- En dödzon (Dead Zone Voltage) för spänningar vid vilken motorn precis startade röra på sig sattes till +/- 0,2 V efter experiment.
- Samplingstiden sattes till 10 μ s vilket är lika med tiden för en programcykel hos mikrocontrollerkortet.
- En spänningsmätning (Voltage Saturation) sattes till +/- 20 V eftersom detta är maxspänningen hos drivsteget för motorn.

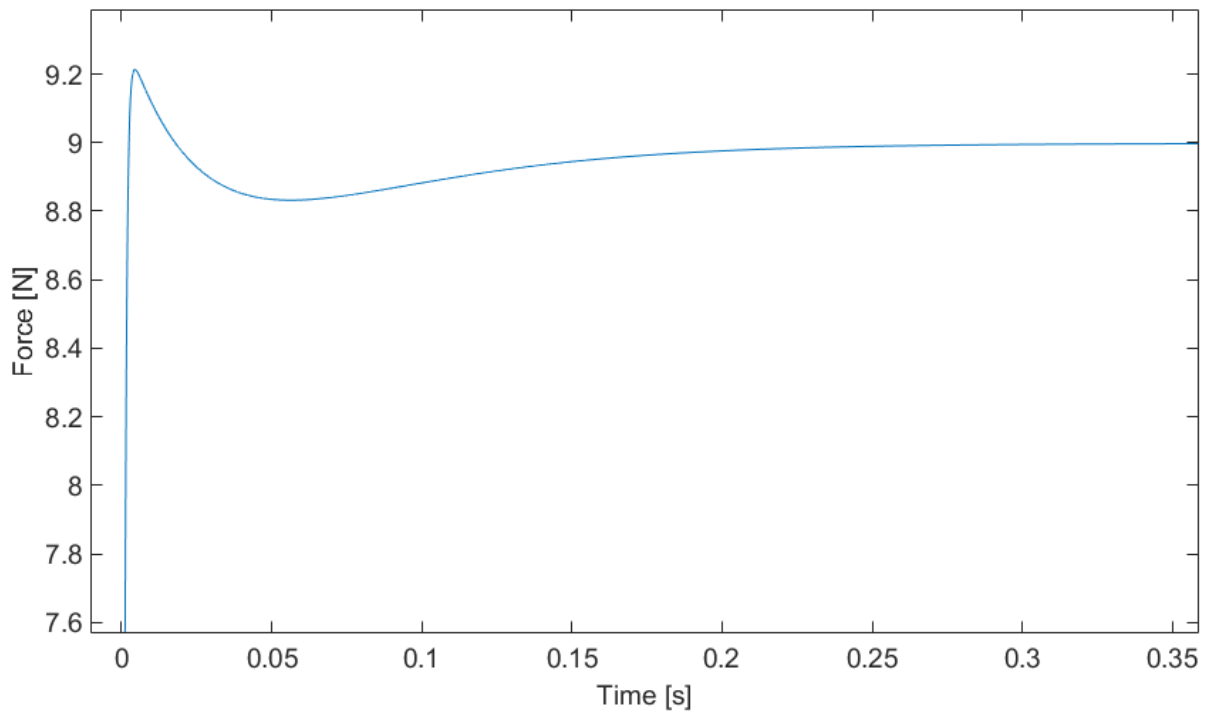
Simulink-modellen resulterade i värden på PID-parametrarna för hastighetsregleringen på motorerna som togs fram med programmets autotune-funktion. I resultatet i bilaga 10 visas den ström och spänning motorn matats med, pålagd kraft samt hastighet och position som funktion av tiden. En kastparabel framräknad i Matlab visas också i samma graf som position för jämförelse.

5.2 Simulering av kraftreglering

Stegsvarstester på processen som innefattar drivsteg, motor, lina och vikt gjordes genom att kontinuerligt läsa av linkraften med lastcellen när drivsteget matades med ett strömbövrädessteg. Detta beskrivs närmare i avsnitt 4.4 och resulterade efter beräkningar till en överföringsfunktion för denna process som används i simuleringen för kraftreglering. Modellen är enkel och simulerar ett bövrädessteg från 0 till km/g . Resultatet simulink-modellen visas nedan.



Figur 5.2 Kraftreglering av processen.



Figur 5.3 Stegsvvar för processen vid ett börvärdessteg från 0 till 9,001 N.

5.3 Kommentarer kring simuleringarna

Det är inte helt självklart hur man ska kunna utvärdera kraftregleringens funktionalitet. Utifrån simuleringen i föregående avsnitt visas ett stegsvar med snabbt insvängningsförlopp för systemet men hur en yttre kraft pålagd på vikten som påverkar detta skall kunna tilläggas är inte lätt att besvara eftersom kraften i en lina alltid ska vara samma i hela linan enligt Newtons tredje lag [7]. Det finns inget ställe där denna yttre kraft kan stoppas in i systemet utan att man bryter mot denna lag.

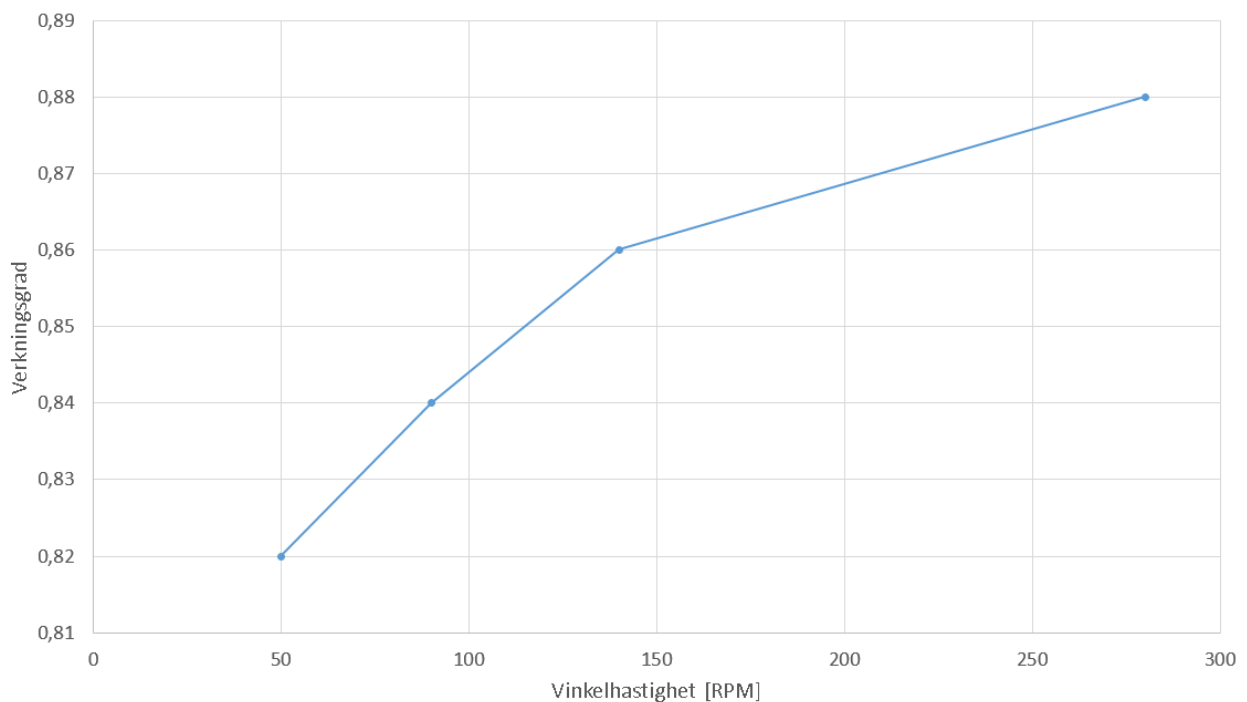
Simuleringen för hastighetsreglering innefattar dock en variabel yttre kraft som tydligare kan ge en uppfattning om systemets egenskaper. Denna simulering visar på att den typen av reglering har en chans att fungera för gravitationssimulering i en dimension. I båda modellerna gäller att inget negativt moment eller kraft får förekomma, linan kan bara överföra kraft i dragriktningen.

6 UTVÄRDERING AV UTRUSTNING PÅ VISUAL ACT

Visual act använder egendesignade vinschar som i stort sett uteslutande används så att man reglerar positionen hos reglerobjektet. All utrustning är anpassad för detta och har väldigt goda egenskaper när det kommer till denna typ av reglering. Det går dock att ställa om systemet så att man istället reglerar momentet hos motorn. Under arbetet på Visual act gjordes tester med utrustningen försatt i momentläge.

6.1 Test av vinsch med inbyggd snäckväxel med momentreglering

En av Visual act's vinschar är utrustad med en snäckväxel för att möjliggöra större maximal belastning. Eftersom motorn i detta fall driver en snäckväxel som i sin tur driver en trumma fastsatt mellan två kullager och ett antal andra maskindelar, finns det många ställen där både glapp och friktion kan uppstå. Detta gör att en del av det moment som motorn alstrar kommer att gå åt till att sätta alla maskindelar massa i rörelse samt att övervinna den interna friktionen. Till följd av detta kommer inte det moment som alstras av motorn vara proportionellt mot den kraft som bildas i linan. Snäckväxlar har dessutom olika verkningsgrad vid drift på skruv respektive hjul och kan i vissa fall dessutom vara självhämmande [23]. I figur 6.1 nedan visas snäckväxelns verkningsgrad framtaget efter snäckväxelns datablad [24] som var olika vid olika varvtal vilket bidrar till vinschens olinjäritet i momentläge.

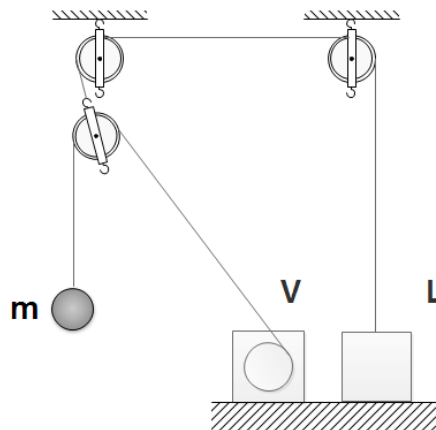


Figur 6.1 Verkningsgrad som funktion av utgående vinkelhastighet hos snäckväxeln TRAMEC XF75 vid drift på skruv.

Ett enkelt test gjordes där drivsteget till motorn styrde motorns moment, varpå man drog i linan, lindad kring vinschens trumma. Kraften som behövdes för att sätta vinschen i rörelse var mycket stor trots att motormomentet var relativt litet. Istället byggdes en direktdriven vinsch, av en av Visual act's medarbetare, där motorns axel direkt var sammanbunden med trummans axel. På så vis eliminerades glapp och både friktion och vinschens tröghet minimerades. Det skall tilläggas att Visual act's vinschar har väldigt hög prestanda men de är inte i första hand konstruerade för att köras i momentläge.

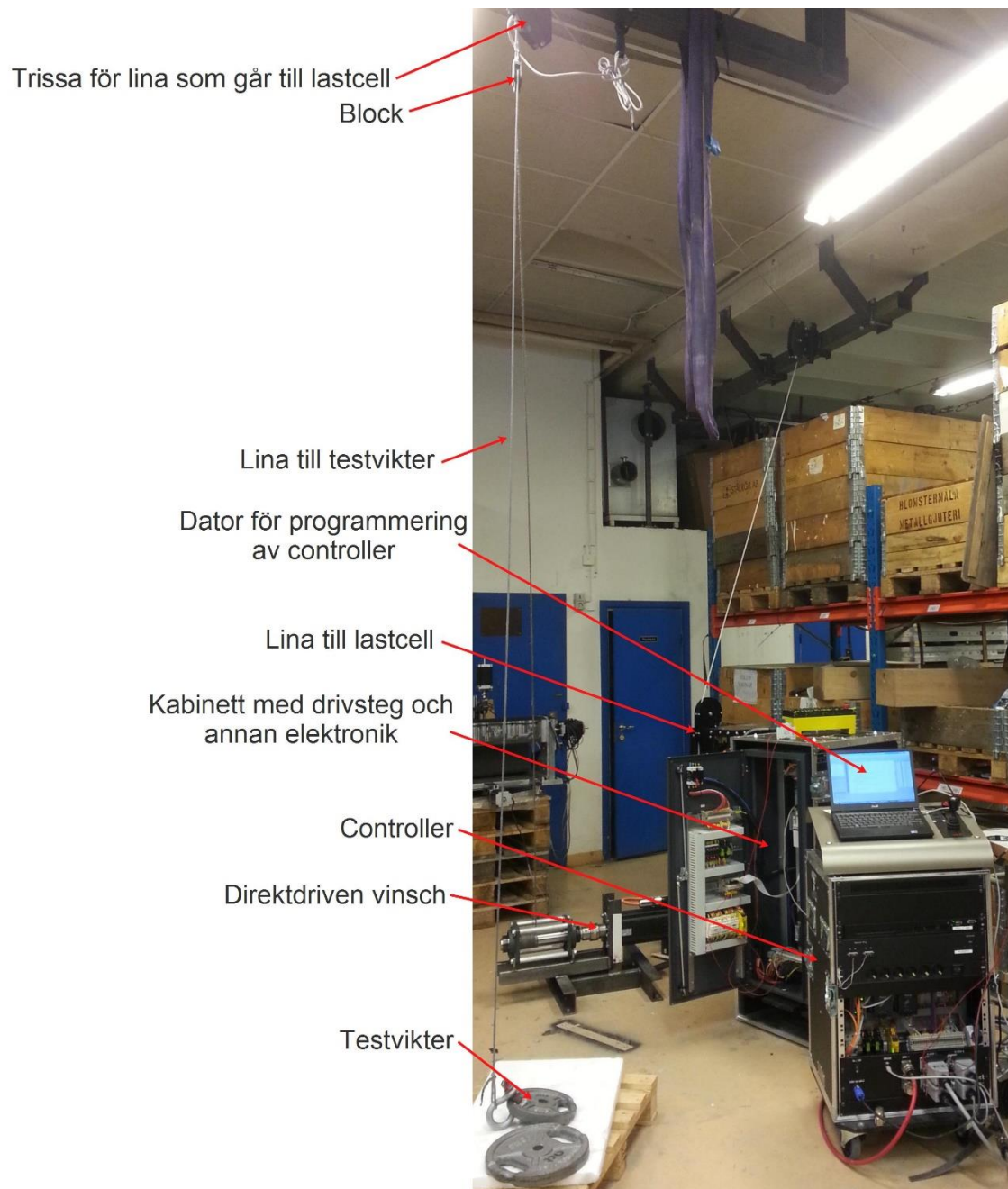
6.2 Test av lastcellen

För att kunna använda signalen från lastcellen behöver man veta hur pass linjär lastcellen är. Om den skulle vara olinjär måste detta kompenseras för. I figur 6.2 används tyngder, m , av känd vikt som hängdes upp med hjälp av en vinsch V i en lina ansluten till lastcellen L så att spänningen från lastcellen kunde uppmätas för olika storlek på massan. Notera att lastcellsvärdet här inte återspeglar tyngden hos massan utan kraftresultanten från linan mellan vinschen och det understa blocket samt linan mellan vikten och det understa blocket. Detta lastcellsvärde är dock proportionellt mot tyngden och eftersom samma rigg används vid gravitationssimuleringen kan detta värde användas som mått på linkraften.



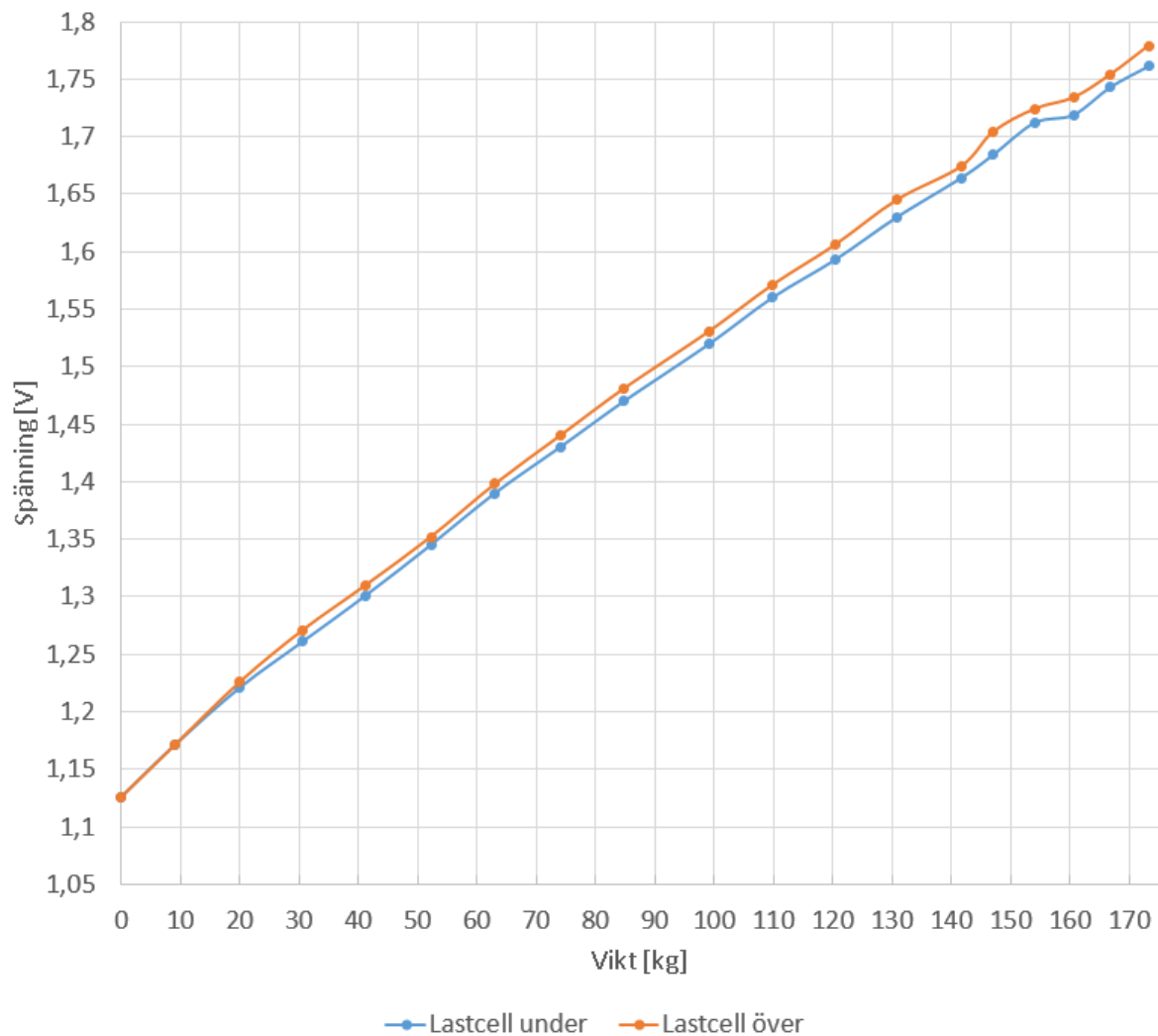
Figur 6.2: Rigg för test av lastcell. [Illustration: Ejnar Askberger]

Vid mätning av varje påhängd vikt utfördes två mätningar. Den ena gjordes genom att vikten pressades uppåt och långsamt släpptes så att den hände fritt. Tanken var med detta att visa hur mycket friktion i blocken påverkade mätresultatet. Den andra mätningen gjordes på motsvarande sätt genom att trycka vikten nedåt för att sedan långsamt släppa den så att den hände fritt. På så vis uppträdde två mätvärden för varje vikt.



Figur 6.3 Testriggen som användes på Visual act under examensarbetet.

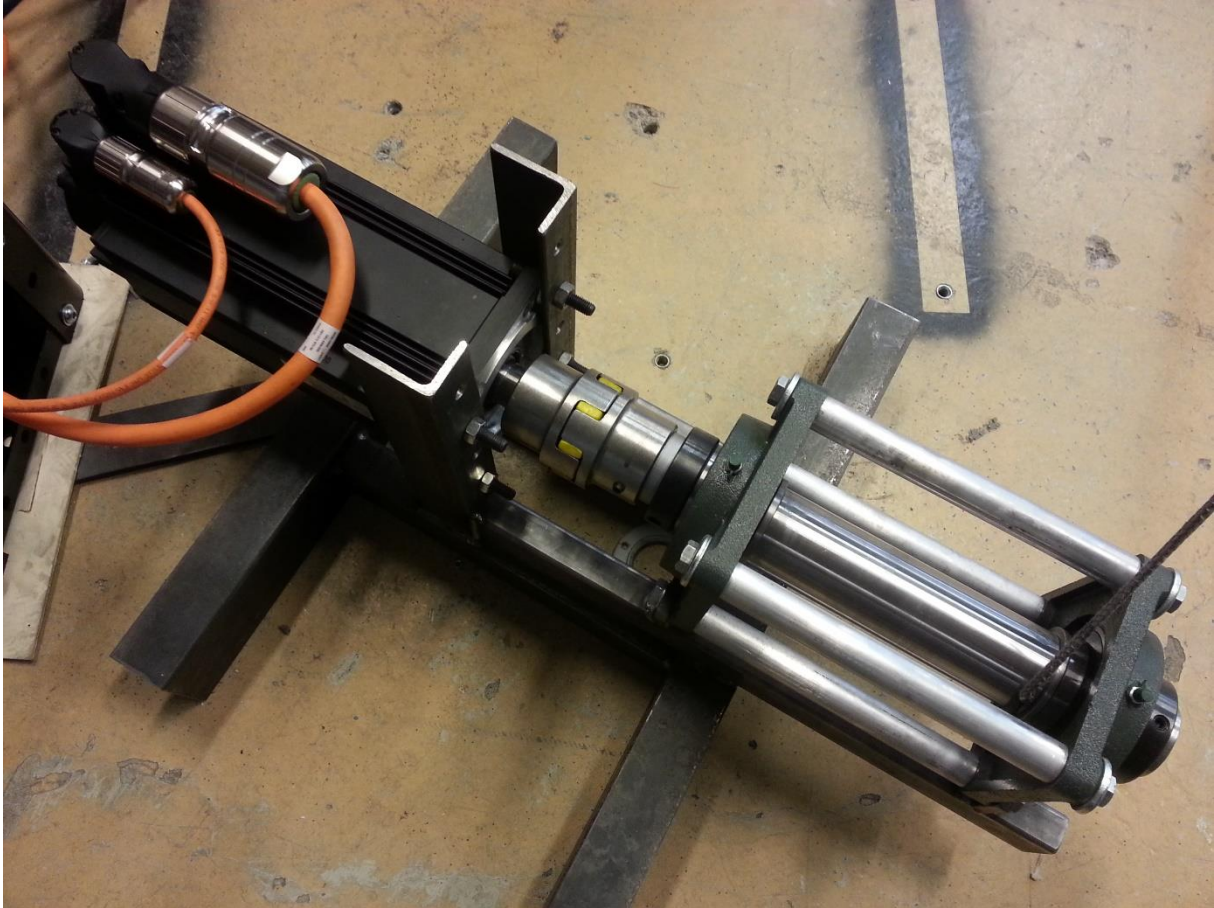
Efter tester med lastcellen framkom det att denna hade en liten linjäritetsavvikelse. Graferna i figur 6.4 visar uppmätta övre och undre värden hos lastcellen. Notera att onoggrannhet kan uppstå både hos lastcellen och hos den våg som användes vid testet.



Figur 6.4: Spänning som funktion av vikt uppmätt med lastcellen VETEK VZ247S.
[Graf: Ejnar Askberger]

6.3 Test av momentreglering

Ett test gjordes på den direkt drivna vinschen, vilket skulle visa på systemets dödzon när det kommer till momentreglering. Samma arrangemang användes som i figur 6.2 men denna gång testades olika maximala och minimala momentnivåer med vilken en och samma massa fortfarande kunde hänga stilla. Återigen togs friktionen i trissorerna i beaktning. Vid mätning med en bestämd massa och momentbörvärde trycktes först vikten uppåt ända tills den precis var på gränsen att få vinschen i rotation. Detta gav ett minvärde på lastcellssignalen. Sedan trycktes vikten nedåt så att vinschen precis var på gränsen att börja rotera i andra riktningen och detta gav ett maxvärde på lastcellssignalen. Detta experiment utfördes med två olika värden på momentbörvärdet och resultatet visas i figur 6.6. Även om detta inte utförligt beskriver död-zonen i systemet, visar det ändå att detta finns och att det bidrar till olinjäritet i systemet.



Figur 6.5 Direktdriven vinsch speciellt byggd för detta examensarbete med motor Rexroth R911317855 IndraDyn S, Synchronous Servo Motor.

Avläst lastcellsvärde		inställt moment [%]	ca vikt [kg]
min [mV]	max [mV]		
1136	1182	-30	5
1176	1213	-120	5
1187	1226	-150	10
1216	1253	-220	10
1216	1256	-230	15
1156	1300	-350	15

Figur 6.6 Experiment som visar på dödzon vid momentreglering.

6.4 Mätning av coggingmomentet

Till drivsteget som driver Visual act's vinschar finns en serie program från Bosch Rexroth kallad IndraWorks som möjliggör programmering av drivstegen samt monitorering av parametrar mm. I ett av dessa program finns en funktion som möjliggör kartläggning av coggingmomentet hos motorn. Denna kartläggningsprocess är automatiserad och under denna process snurrar motoraxeln ett antal gånger fram och tillbaka samtidigt som mätning sker av coggingmomentet. Mätningen sker med motorn bortkopplad från det den driver. Efter denna mätning kan en funktion som kallas Cogging Torque Compensation slås till men p.g.a. tidsbrist fanns ingen möjlighet att få till detta. Grafen för hur kompensationsmomentet för coggingen ser ut visas dock i bilaga 2.

I IndraWorks finns en oscilloskopfunktion som möjliggör plottning av olika parametrar som funktion av tiden. För att visa coggingmomentets effekt i riggen släpptes en vikt upphängd i testriggen från 1,2 meters höjd samtidigt som hastighet och position fångades med oscilloskopfunktionen. Ett konstant momentbörvärde hade satts under hela testet som gjorde att en uppåtriktad kraft verkade på vikten. Resultatet visas i bilaga 3 och som man kan se är hastigheten allt annat än jämn. För att kunna åstadkomma en kastparabel, vilket gravitationssimulering innebär, krävs ett system eller en teknisk lösning som kan ge en linjärt växande hastighet.

6.5 Slutsats av tester på Visual act

Utifrån dessa tester kunde slutsatsen dras att det vore klokt att använda en annan metod än momentreglering för att få till en gravitationssimulering. Åtminstone gällde detta för den utrustning som testats i detta avsnitt. Dessa erfarenheter gjorde det tydligt att motorerna som skulle införskaffas till skalmodellen behövde ha minimalt coggingmoment och låg friktion.

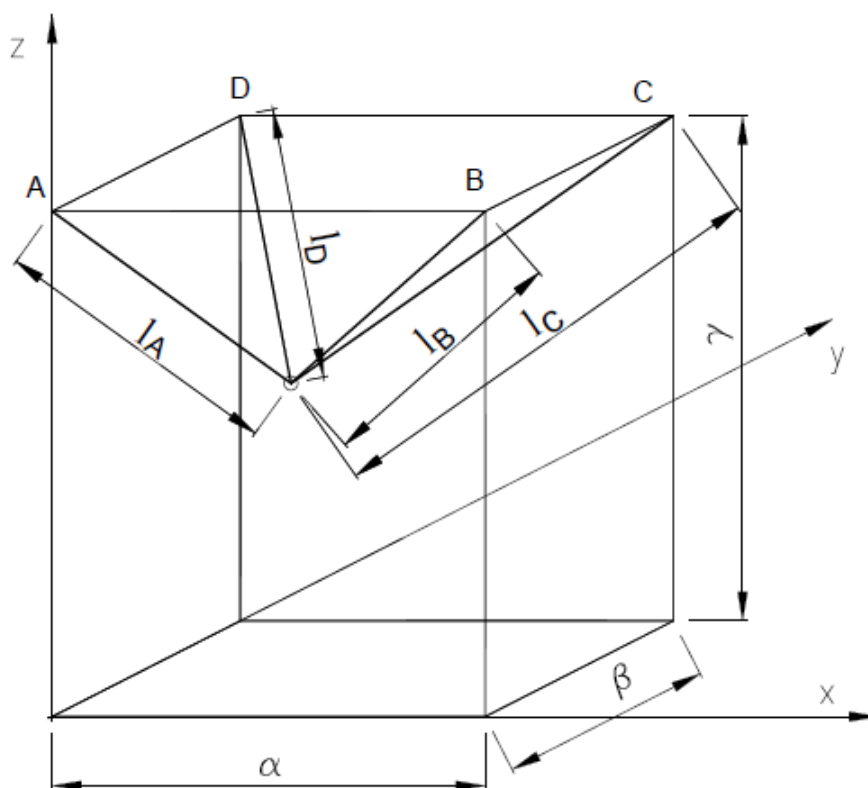
7 LÖSNINGSALTERNATIVEN I 3D-UTFÖRANDE

I detta avsnitt förklaras mer ingående hur delar i reglersystemet för skalmodellen är konstruerat för tredimensionell gravitationssimulering. Hur tillverkningen av riggens hårdvara gått till utelämnas men en genomgång av hur dessa valts och konstruerats tas upp i korthet.

7.1 Matematiska beräkningar för reglersystemet

De två jämförda lösningalternativen har flera gemensamma beräkningsmoment. Till dessa hör beräkning av linlängder, positionsberäkning, kraftberäkning. Linlängdsberäkningarna görs i programmet för mikrokontrollerkortet.

7.1.1 Positionsberäkning



Figur 7.1 Geometrisk skiss över modellen

För att kunna beräkna kroppens position använder man tre av de fyra linlängderna l_A, l_B, l_C, l_D . Det bör också nämnas att massans position definieras som den mötespunkt där alla fyra linor möts och massan är upphängd i och inte massans masscentra. Det är också i denna punkt som alla linkrafter verkningslinjer möts. Linorna till kroppen kommer från de fyra hörnpunkterna med koordinaterna:

$P_A = (0,0,\gamma), P_B = (\alpha,0,\gamma), P_C = (\alpha,\beta,\gamma), P_D = (0,\beta,\gamma)$ och kroppens position betecknas med $P_k = (X,Y,Z)$.

Längderna för linorna B, C, D uppställt i vektorform blir:

$$\begin{cases} |P_B - P_k| = l_B \\ |P_C - P_k| = l_C \\ |P_D - P_k| = l_D \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sqrt{(\alpha - X)^2 + Y^2 + (\gamma - Z)^2} = l_B \\ \sqrt{(\alpha - X)^2 + (\beta - Y)^2 + (\gamma - Z)^2} = l_C \\ \sqrt{X^2 + (\beta - Y)^2 + (\gamma - Z)^2} = l_D \end{cases} \stackrel{(l_i^2)}{\implies} \quad (7.1)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} (\alpha - X)^2 + Y^2 + (\gamma - Z)^2 = l_B^2 \xrightarrow{\text{rad1-rad2}} \\ (\alpha - X)^2 + (\beta - Y)^2 + (\gamma - Z)^2 = l_C^2 \Rightarrow \\ X^2 + (\beta - Y)^2 + (\gamma - Z)^2 = l_D^2 \xrightarrow{\text{rad3-rad2}} \end{cases} \quad (7.2)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} Y^2 - (\beta - Y)^2 = l_B^2 - l_C^2 \\ (\alpha - X)^2 + (\beta - Y)^2 + (\gamma - Z)^2 = l_C^2 \Rightarrow \\ X^2 - (\alpha - X)^2 = l_D^2 - l_C^2 \end{cases} \quad (7.3)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} Y = \frac{l_B^2 - l_C^2 + \beta^2}{2\beta} \blacksquare \\ (\alpha - X)^2 + (\beta - Y)^2 + (\gamma - Z)^2 = l_C^2 \xrightarrow{\text{innsättning av } X \text{ och } Y} \\ X = \frac{l_D^2 - l_C^2 + \alpha^2}{2\alpha} \blacksquare \end{cases} \quad (7.4)$$

$$\Rightarrow \left(\frac{2\alpha^2 - l_D^2 + l_C^2 - \alpha^2}{2\alpha} \right)^2 + \left(\frac{2\beta^2 - l_B^2 + l_C^2 - \beta^2}{2\beta} \right)^2 + (\gamma - Z)^2 = l_C^2 \Rightarrow \quad (7.5)$$

$$\Rightarrow Z = \gamma - \sqrt{l_C^2 - \left(\frac{\alpha^2 - l_D^2 + l_C^2}{2\alpha} \right)^2 - \left(\frac{\beta^2 - l_B^2 + l_C^2}{2\beta} \right)^2} \blacksquare \quad (7.6)$$

Alltså:

$$\left\{ \begin{array}{l} X = \frac{l_D^2 - l_C^2 + \alpha^2}{2\alpha} \\ Y = \frac{l_B^2 - l_C^2 + \beta^2}{2\beta} \\ Z = \gamma - \sqrt{l_C^2 - \left(\frac{\alpha^2 - l_D^2 + l_C^2}{2\alpha}\right)^2 - \left(\frac{\beta^2 - l_B^2 + l_C^2}{2\beta}\right)^2} \end{array} \right. \quad (7.7)$$

Dessa tre formler används löpande för att beräkna kroppens position.

7.1.2 Kraftberäkning

De fyra lastcellerna mäter indirekt kraften i de fyra linorna kontinuerligt. Signalerna från varje lastcell visar linans linkraft multiplicerat med 2. Dessa fyra linkrafter behöver räknas samman för att få fram den resulterande kraften som linorna utsätter kroppen för. Samma beteckningar som ovan används d.v.s. de fyra linlängderna l_A, l_B, l_C, l_D , de fyra hörnpunkterna $P_A = (0,0,\gamma), P_B = (\alpha,0,\gamma), P_C = (\alpha,\beta,\gamma), P_D = (0,\beta,\gamma)$ och kroppens position $P_k = (X,Y,Z)$. De fyra linkrafterna F_A, F_B, F_C, F_D tillkommer.

Först beräknas enhetsvektorer i linornas riktning:

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{e}_A = \frac{P_A - P_k}{l_A} \\ \mathbf{e}_B = \frac{P_B - P_k}{l_B} \\ \mathbf{e}_C = \frac{P_C - P_k}{l_C} \\ \mathbf{e}_D = \frac{P_D - P_k}{l_D} \end{array} \right. \quad (7.8)$$

Därefter multipliceras enhetsvektorerna med respektive linkraft och de resulterande vektorerna summeras:

$$\mathbf{F}_{Tot} = F_A * \mathbf{e}_A + F_B * \mathbf{e}_B + F_C * \mathbf{e}_C + F_D * \mathbf{e}_D \quad (7.9)$$

Genom att reducera gravitationskraften som kroppen känner av med en faktor k , ($0 \leq k \leq 1$) genereras vald gravitation. Avvikelse från den vertikala reducerande kraften beräknas genom:

$$\mathbf{F}_{acceleration} = \mathbf{F}_{Tot} - \mathbf{e}_z * k * m * g \quad (7.10)$$

där \mathbf{e}_z är enhetsvektor i z-led och $\mathbf{F}_{acceleration}$ är den kraft med massan accelereras.

7.1.3 Beräkning av hastighetsbörvärde

Enligt Newtons andra lag gäller som efter integration ger hastighetsbörvärdesvektorn $\mathbf{v}_{bör}$. Integrationen förutsätter i detta fall att den ursprungliga hastigheten var noll.

$$\mathbf{F}_{acceleration} = m\mathbf{a} \Rightarrow \mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}_{acceleration}}{m} \xrightarrow{\text{(integration)}} \quad (7.11)$$

$$\mathbf{v}_{bör} = \int_{t=0}^t \frac{\mathbf{F}_{acceleration}}{m} dt \quad (7.12)$$

7.1.4 Beräkning av hastighetsbörvärde för motorer

Beräkning av hastigheten för respektive motor sker i tre steg:

Först beräknar man en position motsvarande en förflyttning med hastigheten $\mathbf{v}_{bör}$ under en samplingstid där P_k är kroppens nuvarande position, P_{k2} är dess för nästa sample beräknade position och t_s är samplingstiden:

$$\mathbf{P}_{k2} = \mathbf{P}_k + t_s * \mathbf{v}_{bör}. \quad (7.13)$$

I steg två beräknar man linornas längd vid P_{k2} :

$$l_{i2} = |\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_{k2}| \quad (7.14)$$

där i är index för respektive trissa/lina.

Slutligen beräknar man hastighetsbörvärdet till var och en av linorna:

$$v_{bör,i} = (l_{i2} - l_i)/t_s \quad (7.15)$$

Utifrån beräkningarna kan man nu ändra börvärdet för var och en av motorerna för att sedan kunna reglera deras hastighet.

7.1.5 Reglering av vinkelhastighet hos motorerna

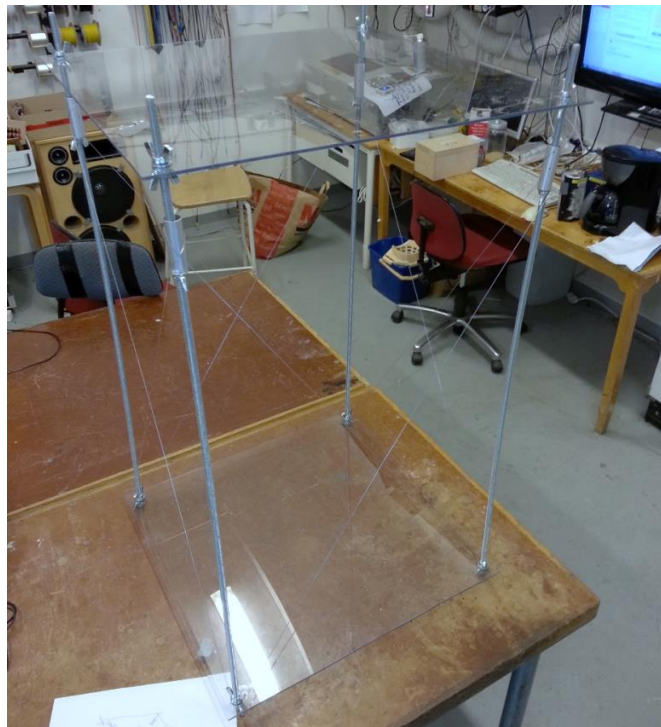
Efter ovanstående beräkningar regleras motorernas hastighet med en PID-regulator. Det finns olika sätt att komma fram till parametrar för regulatorn men detta lämnas till ett senare skede av arbetsprocessen.

7.2 Beskrivning av hårdvaran

Här följer en liten genomgång av hårdvaran som använts till skalmodellen och hur den är byggd.

7.2.1 Riggens stomme

En stomme byggdes med styren-akrylnitril-skivor, gängstänger, stålvaser, aluminiumrör, muttrar och brickor. Stommen skulle vara lagom stor för möjliggörande av tester på riggen samtidigt som den skulle vara enkel att flytta utan att nödvändigtvis behöva monteras ner.



Figur 7.2 Skalmodellens stomme.

På denna monterades alla komponenter. En trälåda byggdes för att skydda merparten av all elektronisk utrustning vid transport.



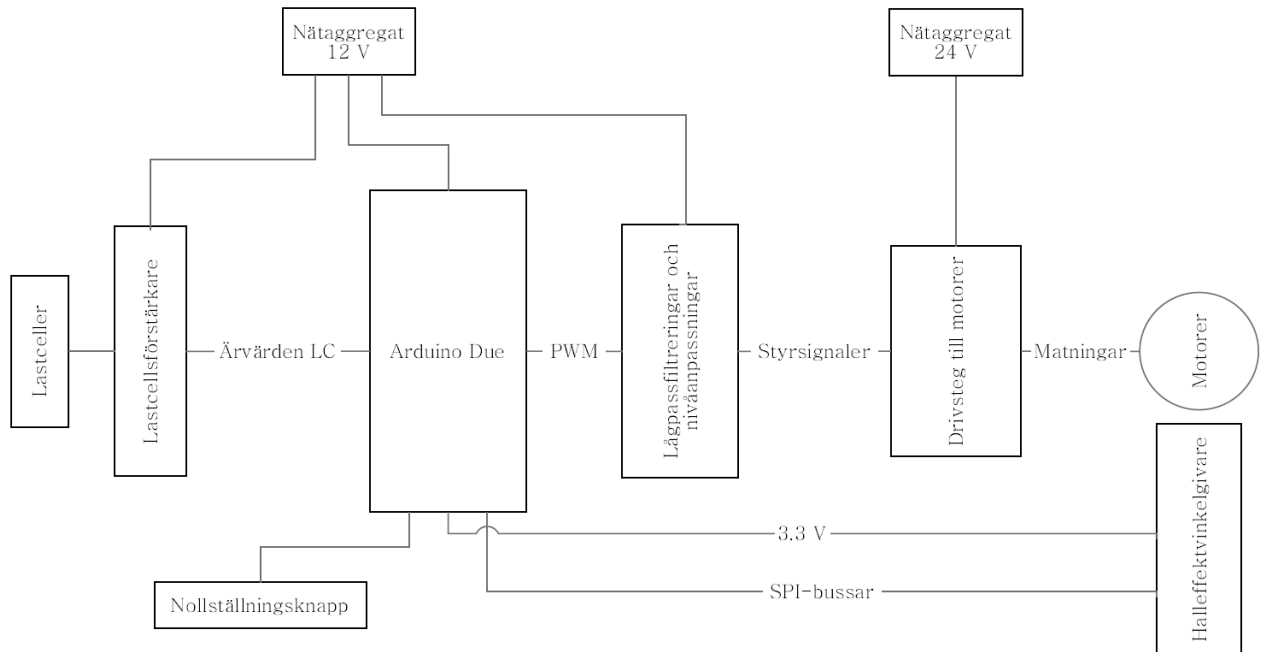
Figur 7.3 Skyddande trälåda för elektronik.



Figur 7.4 Skalmodellen i sin helhet.

7.2.2 Elektriska komponenter i översikt

Figur 7.5 visar hur alla komponenter sammankopplats. I bilaga 8 visas en bild på skalmodellens topp som förklarar var alla komponenter sitter. I följande avsnitt presenteras komponenterna närmare.



Figur 7.5 Kopplingsschema för riggens elektriska komponenter. Varje komponent förekommer fyra gånger så när som på Nättaggregat 12 V, Arduino Due och Nollställningsknapp.

7.2.3 Lastceller

Lastceller valdes så att de skulle klara en rimlig vikt, ha ett lågt pris, kunna levereras så snabbt som möjligt för att hinna så långt som möjligt med examensarbetet och samtidigt ha en god linjäritet. Detta hittades på eBay för en låg kostnad och en lastcell (Tedeo-Huntleigh, Modell 1002) med maximal last på 3 kg valdes. Lastcellen förutsattes vara linjär utan att experiment gjordes för att verifiera detta.

7.2.4 Instrumentförstärkare

Instrumentförstärkare, här även kallade lastcellsförstärkare, valdes efter vad som tidigare använts i projekt där Arduino använts som mikrokontrollerkort. INA125 är en instrumentförstärkare med låg strömförbrukning, hög noggrannhet och med möjlighet till noggrann referensspänning. I bilaga 5, finns ett kopplingsschema som visar hur lastcellens fyra sladdar kopplas till förstärkaren samt hur potentiometrar är anslutna för justering av utsignalen. Som man kan se i detta är referensspänningen på 5 V kopplad till VR0 som är den spänning som lastcellen matas med. Mellan ben 8 och 9 finns två potentiometrar på vardera 100 ohm och 10 ohm som används för inställning av förstärkningen. Den mindre för finjusteringar. Till ben 5 matades en spänning via två vridpotentiometrar på 100 kohm och 100 ohm som används för justering av offset. Också här är den mindre avsedd för finjusteringar. Instrumentförstärkarens matning +12 VDC och -12 VDC anslöts var för sig via en 100 nF kondensator till jord.

Instrumentförstärkaren justerades sedan så att 0 kg levererade en utsignal på 0 V samt 3 kg levererade en utsignal på 3,3 V. Denna signal samplades sedan i mikrokontrollerkortet för att ge ett värde mellan 0-1023 enheter som användes för senare beräkningar.

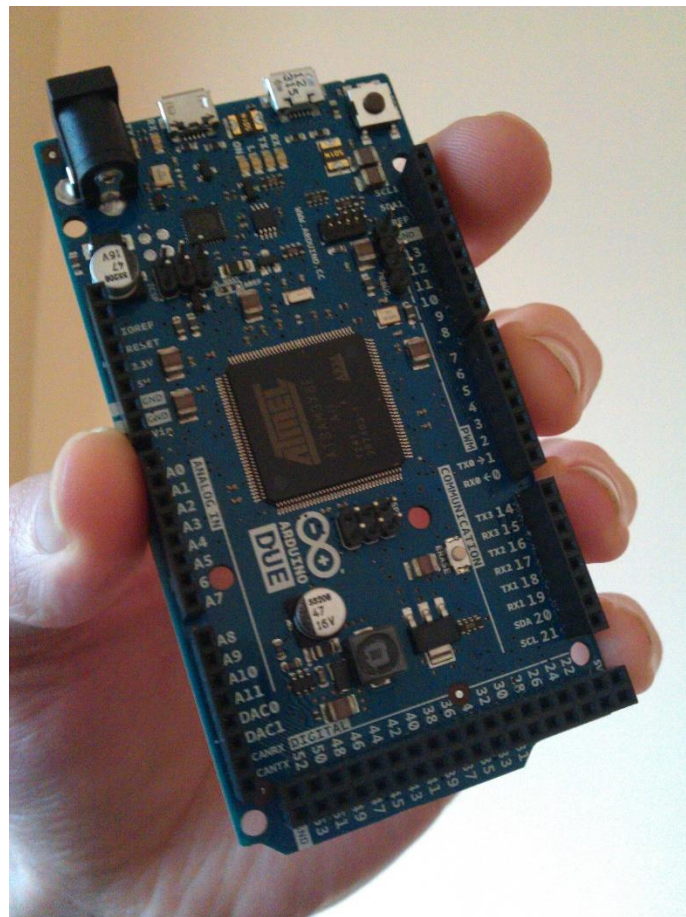
7.2.5 Nätaggregat

Strömförsörjningen till lastcellsförstärkarna, mikrokontrollerkortet samt till lågpasfiltrering och nivåanpassningen skedde med ett labbaggregat (DAGATRON 5033) som levererade +12 VDC, - 12VDC och jord. Alla dessa komponenter anslöts till samma jord eftersom det visade sig fungera utan att problem med jordslingor uppstod.

Alla drivsteg matades med 24 VDC med hjälp av ett nätaggregat (No brand) införskaffat på eBay som vardera kan leverera 10 A.

7.2.6 Mikrokontrollerkortet Arduino Due

Som mikrokontrollerkort valdes ett kort från Arduino-familjen då tidigare erfarenhet från denna miljö redan fanns. Man fick dock till projektet välja ett kort med snabbare processor för att kunna säkerställa att beräkningarna utfördes tillräckligt snabbt. Valet föll på Arduino Due.



Figur 7.6 Arduino Due.

Arduino Due-kortet drivs av en Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 processor. Till skillnad från Arduino Uno har Due en klockfrekvens på 84 MHz, en ökning med fem gånger, samt en databuss på 32 bitar, en dubbling jämfört med Uno. Sammanlagt noterades en tio gånger snabbare kodexekvering på Due vid jämförelse av körtiden för en och samma programkod. Programmeringen av Due görs precis som vanligt med programmeringsspråket C utökat med arduino-specifika tillägg.

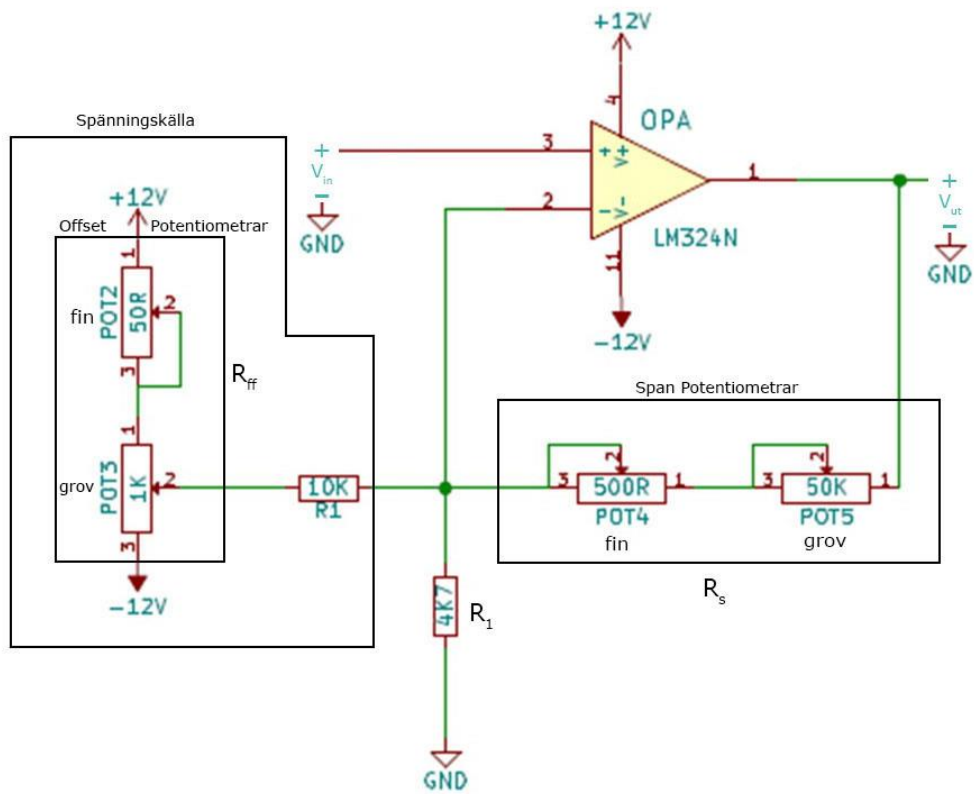
En väsentlig skillnad från andra Arduinokort är att Due arbetar med 3,3 V istället för 5 V. Elektriska kretsar byggda för andra kort behöver eventuellt anpassas eller helt göras om så att Due inte skadas av för höga spänningar. Det finns 54 digitala och 12 analoga in/ut portar. Kortet har även portar för SPI kommunikation. Av de digitala anslutningarna kan 12 stycken användas till 8-bitars PWM. De analoga portarna är kopplade till en 12-bitars AD-omvandlare. Grundinställningen använder dock bara 10-bitar av kompatibilitetskäl. Dessa ingångar konverterar en ingångsspänning mellan 0 och 3.3 Volt till ett värde mellan 0–1023 vid grundinställning (0-4095 vid full upplösning 12-bitar).

Kortet kan förses med drivspänning antingen via USB-kabel eller extern spänningskälla. Den rekommenderade externa matningsspänningen är 7 till 12 V. Varje port kan maximalt leverera 3mA eller 15mA och ta emot 6 mA eller 9 mA vid 3,3 V beroende av port. Det innebär att komponenter som nyttjar större effekt behöver en annan energikälla och signaler från givare som skickar för stor effekt skall skalas ner.

7.2.7 Krets för lågpasfiltrering och nivåanpassning

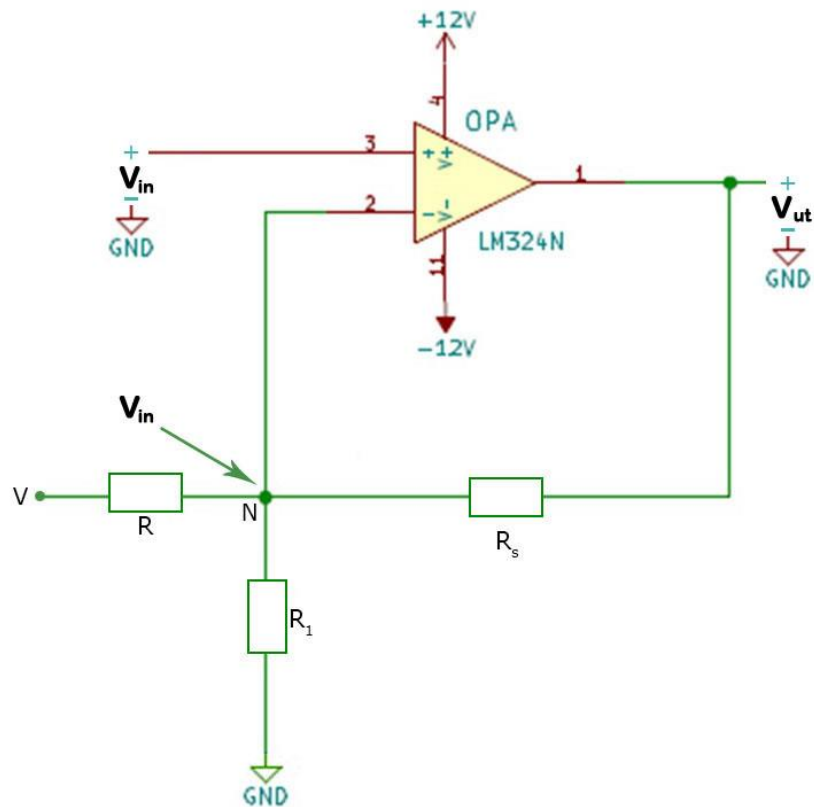
En krets konstruerades för att jämna ut och anpassa spänningsnivån på den pulsbreddsmodulerade signalen från mikrokontrollerkortet till en analog insignal till drivstegen för motorerna. Den pulsbreddsmodulerade signalen som pulsade mellan 0 och 3,3 V omvandlades till en analog spänning mellan -10 och 10 V. Även här behövdes en möjlighet till inställning av förstärkning och offset för att försäkra sig om att omvandlingen blev riktig. En operationsförstärkare (LM324N från Texas Instruments) kopplades som spänningsföljare med tillägg fyra vridpotentiometrar. En vridpotentiometer kopplades även till lågpasfiltret för möjlig inställning av tidskonstanten hos detta. Allt detta åstadkoms på följande vis.

PWM-signalen omvandlas först till en spänning mellan 0 och 3,3 volt av ett lågpasfilter. I nästa steg kommer nivåanpassningen till en spänning mellan -10 och +10 volt. Kretsen i bilden nedan ombesörjer detta.



Figur 7.7 Krets för nivåanpassning

Den vänstra inringade delen av kretsen ovan fungerar som en justerbar spänningskälla och för beräkningarnas vidkommande ersätts den med en ideal spänningskälla med spänningen V och inre resistansen R . Både V och R är beroende av hur offset-potentiometrarna är ställda samt matningspänningarna.



Figur 7.8 Krets med ideal spänningskälla

OP-förstärkaren i bilden är motkopplad och spänningen mellan ingångarna är alltid 0V. Kirchhoffs strömlag tillämpad på noden N ger följande ekvation:

$$\frac{V_{in} - V}{R} + \frac{V_{in}}{R_1} + \frac{V_{in} - V_{ut}}{R_S} = 0 \Rightarrow \frac{V_{ut}}{R_S} = V_{in} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_S} \right) - \frac{V}{R} \Rightarrow \quad (7.16)$$

$$\Rightarrow V_{ut} = V_{in} \left(\frac{R_S}{R} + \frac{R_S}{R_1} + 1 \right) - \frac{V * R_S}{R} \quad (7.17)$$

Då $V_{in} = 0V$ är $V_{ut} = -10V$ och ekvation (7.17) förändras till:

$$-\frac{V * R_S}{R} = -10V \quad (7.18)$$

Då $V_{in} = 3,3V$ är $V_{ut} = +10V$ och ekvation (7.17) förändras till:

$$+10 = 3,3 \left(\frac{R_S}{R} + \frac{R_S}{R_1} + 1 \right) - \frac{V * R_S}{R} \Rightarrow \frac{R_S}{R} + \frac{R_S}{R_1} + 1 = \quad (7.19)$$

$$= \frac{\left(10 + \frac{V * R_S}{R} \right)}{3,3} = \frac{20}{3,3} \quad (7.20)$$

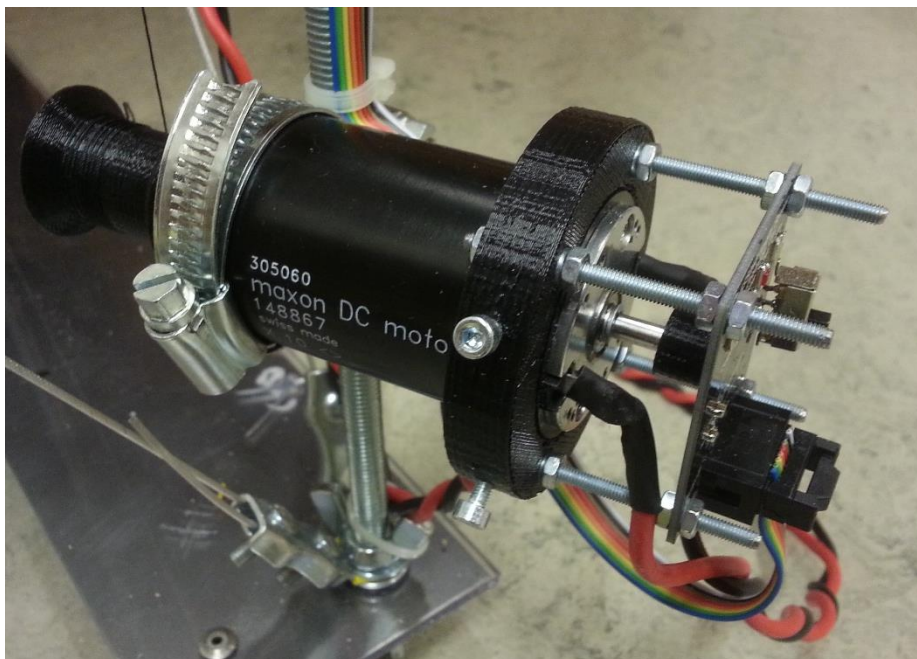
Ekvation (7.17) förenklas till:

$$V_{ut} = V_{in} \frac{20}{3,3} - 10 \quad (7.21)$$

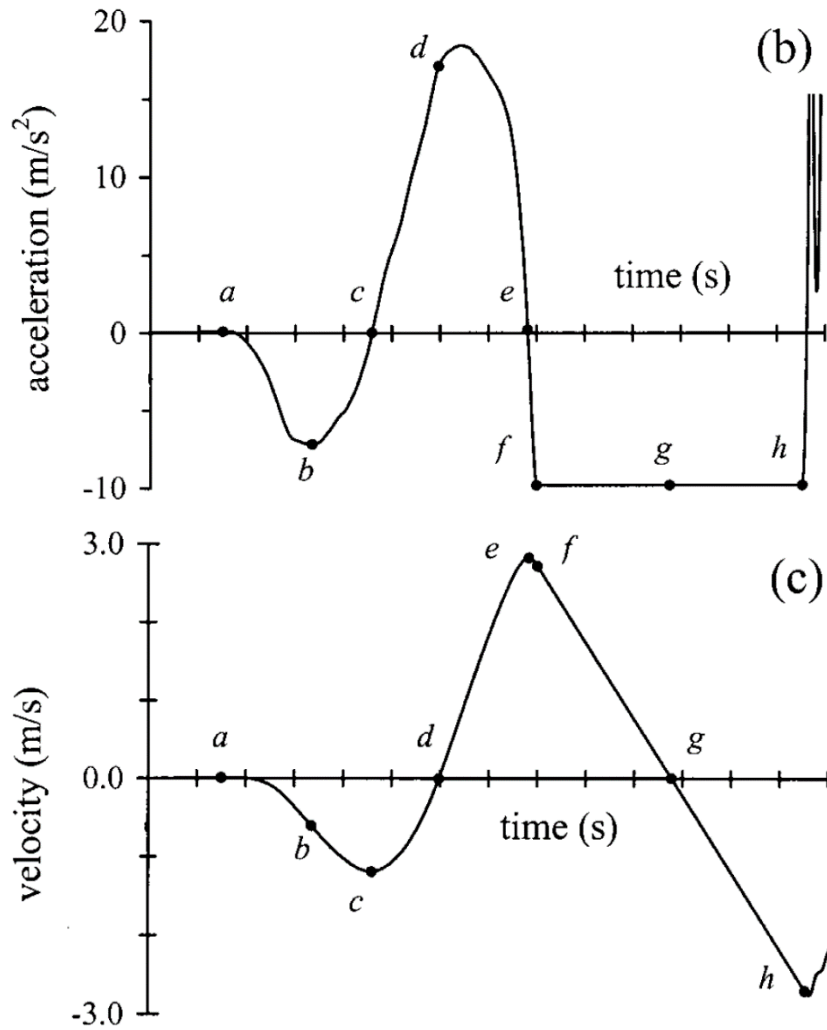
Ekvationen ovan visar att utspänningen V_{ut} varierar linjärt med inspänningen V_{in} från -10V till +10V samtidigt som V_{in} går från 0V till +3,3V.

7.2.8 Drivsteg och motorer med halleffektvinkelgivare

Valet av motor föll på en MAXON 148867 eftersom dessa är järnlösa och därmed har en jämnare gång samt att STORKEDRIVES skänkte bort två av dessa motorer och två drivsteg, 4-Q-DC Servoamplifier ADS 50/5, till projektet. Varje motor förseddes med 3D-utskrivna detaljer i ABS-plast.



Figur 7.9 MAXON 148867 med halleffektvinkelgivare till höger och trumma till vänster.



Figur 7.10 (b) acceleration och (c) hastighet som funktion av tid för ett vertikalt upphopp. Varje sträck på x-axeln motsvarar 0,1 sekunder [30].

För att noggrannare förstå vad motorn och drivsteget behöver vara kapabelt till, undersöktes ett värsta tänkbara scenario där användaren hoppar rakt upp i luften. Då uppstår sannolikt största nödvändiga acceleration som systemet skall klara hantera. En rapport studerades där följande grafer visar hastighet och acceleration som funktion av tiden för ett vertikalt upphopp [22]. I grafen för acceleration blir det tydligt att en maximal acceleration på knappt 20 m/s^2 uppstår efter ca 500 millisekunder in i hoppet. Eftersom det rör sig om en skalmodell skalas erforderlig acceleration ner till 25 % av vad som verkligen krävs. Drivstegen som driver motorerna i skalmodellen kan leverera en ström på $I=10 \text{ A}$. Motorn har en momentkonstant k_m på $30,2 \text{ mNm/A}$. Vid maximal ström ger detta alltså momentet M_M [25]:

$$M_M = I * k_m = 10 * 0,0302 = 0,302 \text{ Nm} \quad (7.22)$$

Trummans radie r på vinschen är 1 cm vilket utifrån erforderlig acceleration a ger vinkelaccelerationen $\dot{\omega}$ [26] [27]:

$$a = \dot{\omega} * r \Rightarrow \dot{\omega} = \frac{a}{r} = \frac{0,25 * 20}{0,01} = 500 \text{ rad/s}^2 \quad (7.23)$$

Accelerationsmomentet M_a beräknas sedan utifrån motorns datablads angivna masströghetsmoment som var 139 gcm^2 . Det totala masströghetsmomentet J uppskattades till 200 gcm^2 eftersom en trumma i plast, ett kugghjul och en magnet monterats på motorns axel [26]:

$$M_a = J \dot{\omega} = 2 * 10^{-5} * 500 = 0,01 \text{ Nm} \quad (7.24)$$

Utifrån ovanstående kan sedan maximalt moment M_L beräknas med vilket motorn kan belastas [28]:

$$M_L = M_M - M_a = 0,302 - 0,01 = 0,292 \text{ Nm} \quad (7.25)$$

Kraften med vilken en vikt kan dras upp måste för tyngdlöshet vara lika med massan multiplicerat med tyngdaccelerationen. Maximalt moment ger en maximal kraft på F_L som beräknas med följande formel [29]:

$$F_L = \frac{M_L}{r} = \frac{0,292}{0,01} = 29,2 \text{ N} \quad (7.26)$$

Vid stillastående kan istället linkraften maximalt vara:

$$F = \frac{M_M}{r} = \frac{0,302}{0,01} = 30,2 \text{ N} \quad (7.27)$$

Varje lastcell drar med dubbla linkraften och eftersom vardera lastcell endast mäter upp till 3 kg medför detta en största linkraft på:

$$F = \frac{m * g}{2} = \frac{3 * 9,81}{2} = 14,7 \text{ N} \quad (7.28)$$

Maximal linkraft blir således 14 N. Utifrån detta kunde maximal arbetshöjd för riggen undersökas som beskrivs i kapitel 7.3.

Mätning av dödzon för motorn

Ett test gjordes på vinschens dödzon som beskrivs i kapitel 6.3. Här användes istället en våg för att mäta kraften som pålades på vikten som hängde i vinschen. Som man kan se i tabellen i figur 7.11 verkar den kraft som behövs för att precis få vikten i rörelse uppåt respektive nedåt inte följa något tydligt samband. Detta kan göra reglering av vinkelhastigheten svår vid låga varvtal och i övergången mellan två rotationsriktningar.

Totalvikt	Ström	Uppåtriktad förflyttning	Nedåtriktad förflyttning	Medelväre uppåtriktad förflyttning	Procentuell andel av totalvikten	Medelväre nedåtriktad förflyttning	Procentuell andel av totalvikten
[g]		[g]	[g]	[g]	[%]	[g]	[%]
118	lmax	5	55	7,5	6,3559322	51,5	43,6440678
	lmin	10	48				
207	lmax	30	35	32,5	15,7004831	32,5	15,7004831
	lmin	35	30				
369	lmax	15	55	31,5	8,53658537	42,5	11,5176152
	lmin	48	30				
433	lmax	22	62	46	10,6235566	36	8,31408776
	lmin	70	10				
603	lmax	10	83	35	5,80431177	56,5	9,36981758
	lmin	60	30				
975	lmax	20	100	60	6,15384615	60	6,15384615
	lmin	100	20				

Figur 7.11 Gränsvärden för dödzon hos skalmodellens vinsch.

7.2.9 Halleffektvinkelgivare

Valda motorer är inte i sitt enklaste utförande utrustade med återkoppling av vinkeläge hos axeln. En givare för detta behövde införskaffas. Denna fick inte vara i fysisk kontakt med axeln eftersom detta skulle påverka momentet hos motorn. Det billigaste sättet att skaffa vinkelgivare i detta examensarbete var att höra av sig till ams AG (austriamicrosystems AG) som har skänkt bort halleffektvinkelgivare, AS5048A. Dessa är absoluta, de ger en absolut vinkel till skillnad från inkrementella som ger pulser för varje fragmentarisk del av ett varv, och har en upplösning på 14 bitar vilket kan ge en maximal noggrannhet på hela $0,05^\circ$.

AS5048A för över informationen via en SPI-buss. IC:n (Integrated Circuit) är ytmoterad på ett mönsterkort, även kallat PCB (Printed Circuit Board), där även tillhörande komponenter lötts fast. I Bilaga 6 finns ett kopplingsschema för detta kort som konstruerats av Richard Webb på Zoetrope [30]. På hemsidan i referensen finns beskrivningar och länkar till allt som behövs för att tillverka detta mönsterkort.

7.2.10 Trissor och block

Respektive lina från vinscharnas trummor går vertikalt upp via varsin trissa, fastsatt i varsin lastcell, vidare vertikalt ner till ett block som ser till att rikta om linan så att den löper fritt ut till vikten. På detta vis kan lastcellen mäta ungefär dubbla linkraften. Kraftvektorer från linan som löper mot motorn och linan som löper mot vikten från lastcellen blir inte helt vertikal men detta försummas i skalmodellens reglersystem.

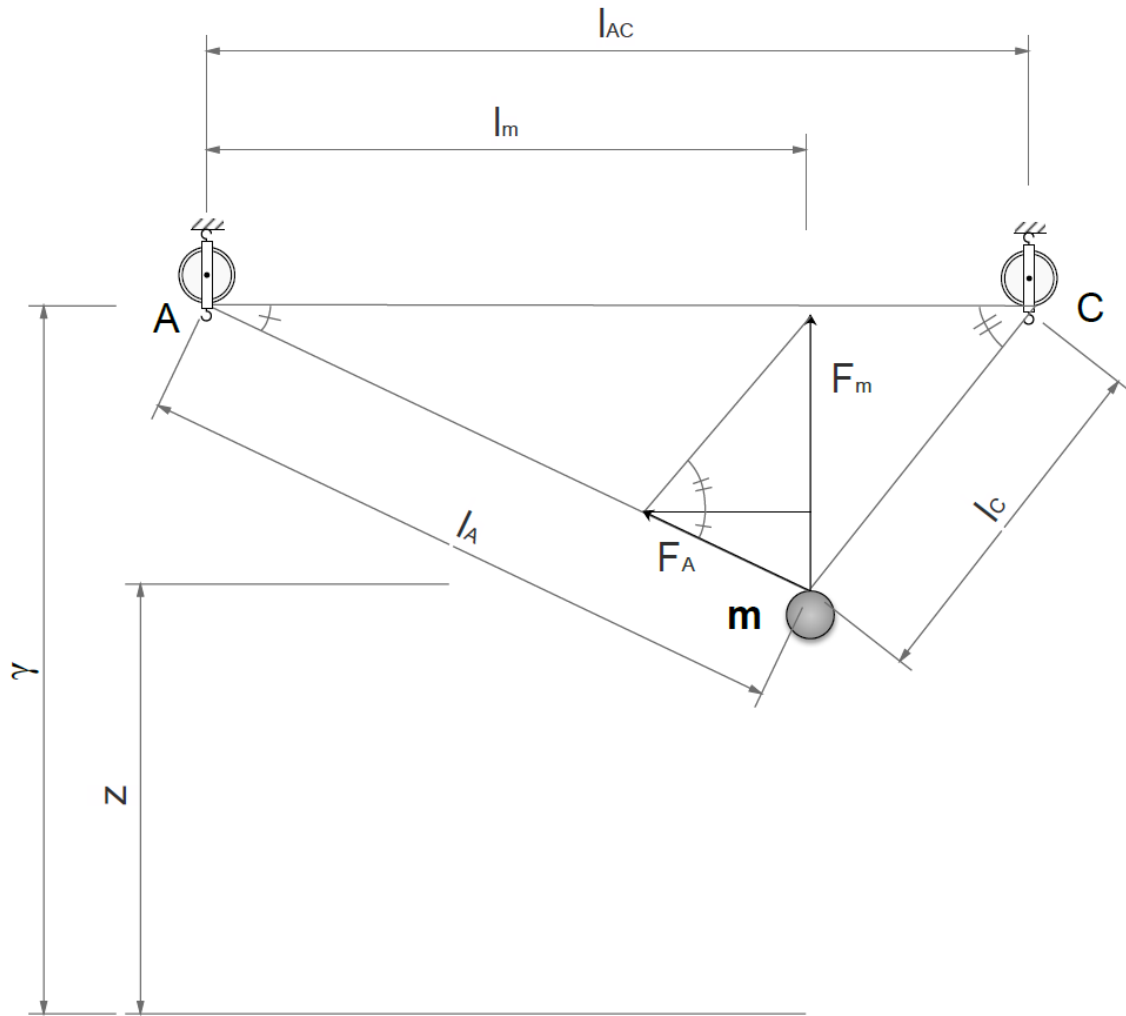


Figur 7.12 Trissa överst monterad på lastcellen och block nederst.

7.3 Beräkning av maximal tolerabel höjd

Maximal höjd på vilken gravitationssimuleringen görs i skalmodellen bestäms av maxbelastning på de lastceller som används och maximal vikt med vilken gravitationssimuleringen får göras. Ju högre upp vikten hänger desto större blir belastningen i varje lina förutsatt att vikten av bestämd massa befinner sig mellan hörnen och inte under ett av dem.

Största möjliga linkraft uppstår då vikten endast hänger i två linor i två ”diagonalt motstående” hörn eftersom detta ger minsta möjliga vinkel mellan horisontalplanet och linorna och därmed störst linkraft. Detta scenario skulle kunna uppkomma då två motorer havererade eller två linor gick sönder, alltså ett värsta tänkbart scenario. Maxbelastning för lastcellerna är 3 kg. Ett alternativ är att experimentellt ta reda på denna maximala höjd genom att göra prova olika vikter och avstånd mellan de båda trissorna samt höjd över golvet men detta ansågs vara mer krångligt och ett matematiskt samband för detta togs fram. Uppgiften var att ta reda på när linkraften var störst, när vikten befinner sig på en och samma höjd men med olika placering horisontellt mellan två hörns lodlinjer. Här följer en beräkning som visar linkraften som funktion av viktens läge, se figur 7.13.



Figur 7.13 Längdmått och vinkelmått för beräkning av linkraft vid olika höjd och lägen på massan m .

Genom Pythagoras sats fås längden på linorna l_A och l_C enligt följande:

$$l_A = \sqrt{l_m^2 + (\gamma - z)^2} \text{ och } l_C = \sqrt{(l_{AC} - l_m)^2 + (\gamma - z)^2} \quad (7.29)$$

Vinklarna A och C fås genom cosinussatsen enligt:

$$\begin{aligned} l_C^2 &= l_A^2 + l_{AC}^2 - 2 * l_A * l_{AC} * \cos A \Rightarrow \\ \Rightarrow A &= \arccos\left(\frac{l_A^2 + l_{AC}^2 - l_C^2}{2 * l_A * l_{AC}}\right) \end{aligned} \quad (7.30)$$

På samma vis fås också:

$$C = \arccos\left(\frac{-l_A^2 + l_{AC}^2 + l_C^2}{2 * l_{AC} * l_C}\right) \quad (7.31)$$

Genom sinussatsen få sedan linkraften F_A :

$$\frac{F_m}{\sin(A + C)} = \frac{F_A}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - C\right)} \Rightarrow F_A = \frac{F_m * \sin\left(\frac{\pi}{2} - C\right)}{\sin(A + C)} \quad (7.32)$$

Med hjälp av Matlab kunde denna funktion plottas som här visar linkraften i den ena linan när en tillgänglig vikt på 1.1 kg användes. Efter tester av olika höjder visade det sig att z=612 mm blev maximal arbetshöjd under följande förutsättningar:

- $F_m = 11,1$ N
- $\gamma = 0,745$ m, det vertikala avståndet mellan golvet och trissorna
- $l_{AC} = 0,614$ m, avståndet mellan de båda diagonalt motstående trissorna
- $F_A < 14$ N

Nedan visas den Matlab-kod som användes vid grafitning av funktionen:

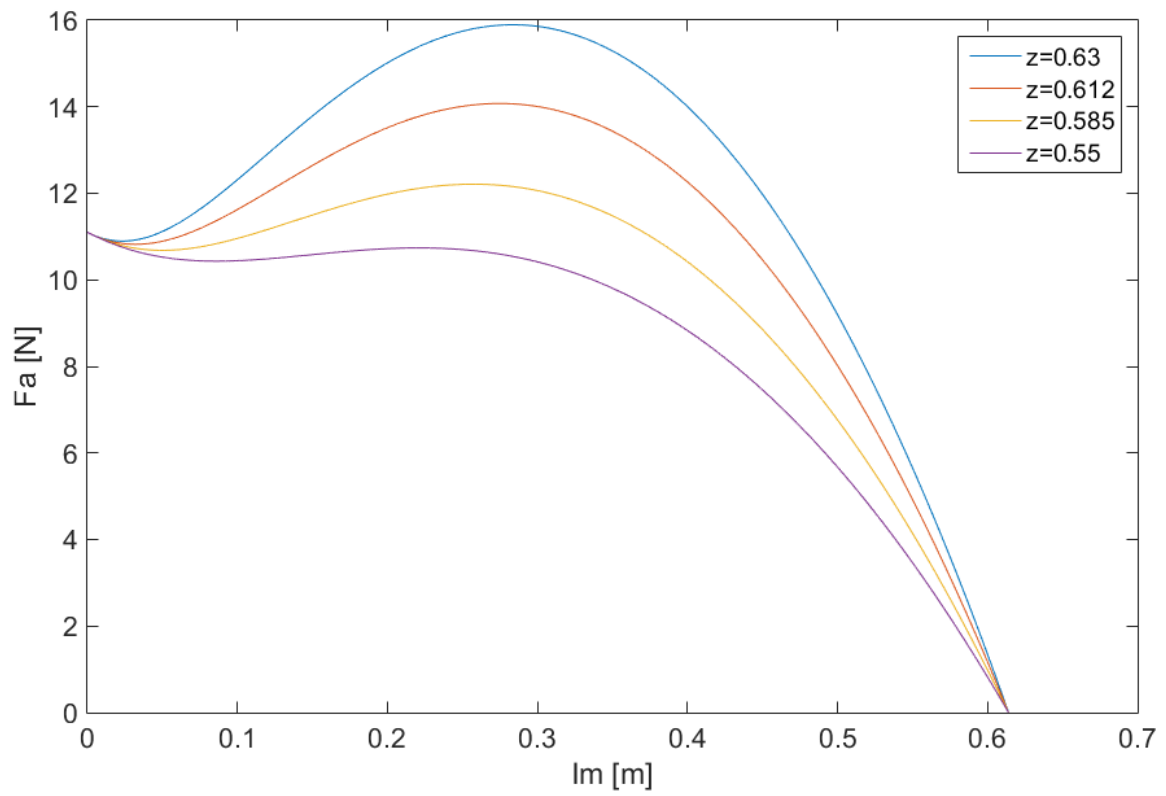
```

lm = 0:0.0001:0.614;           %LineSpace för avståndet till massan
Fm = 11.1;                     %Vertikal kraftkomponent riktad uppåt
gamma = 0.745;                 %Riggens höjd
z = 0.63;                       %Höjd för massan
lac = 0.614;                    %Avståndet mellan trissa A och trissa C
la=sqrt(lm.^2+(gamma-z)^2);     %Beräkning av linlängd A
lc=sqrt((lac-lm).^2+(gamma-z)^2); %Beräkning av linlängd C
A=acos((-lc.^2+la.^2+lac^2)./(2*la.*lac)); %Beräkning av vinkeln i A
C=acos((-la.^2+lc.^2+lac^2)./(2*lc.*lac)); %Beräkning av vinkeln i C
Fa=Fm.*sin(pi/2-C)./sin(A+C);  %Beräkning av linkraft A
plot(lm,Fa)                     %Plottning av linkraft A

```

Figur 7.14 Matlab-kod för plottning av linkraften F_A .

Så här ser resultatet ut för fyra olika höjder, z :



Vad som kan vara intressant att notera är att maximal belastning i linan uppträder vid olika läge l_m vid olika höjder z .

7.4 Ritning på skalmodellens stomme

I bilaga 14 finns förenklade ritningar på skalmodellens stomme utan diagonalt stabiliserande vajrar, sladdar och annan utrustning. Dock togs även komponenter relaterade till lastcellerna och komponenter som utgör skalmodellens block med. CAD-konstruktionsprogrammet SolidWorks användes tillsammans med en 3Dconnexion SpaceNavigator som möjliggör förflyttning av CAD-modellen i sex frihetsgrader under ritningsprocessen. I den verkliga skalmodellen förstärktes plastglasskivorna som utgör botten och toppen i modellen med plåt vilket inte togs med i CAD-modellen.

Komponenterna på de fyra hörnens gängstänger kan flyttas i höjdlid och kan också vridas. Placeringen av dessa komponenter och vinscharna gjordes så att en så parallell dragning som möjligt av de två trådar som går till och från lastcellens trissa uppnåddes. Vidare placerades de så att trådarna var så parallella som möjligt med den riktning som lastcellen skulle belastas. Gängstängerna möjliggör också test med olika inställningar på höjden och vinkeln hos blocket som fördelar ut tråden till punkten där alla fyra trådar möts. På grund av detta har inga mått angetts för dessa komponenters placering. Längden på gängstängerna är 1000 mm och placeringen av skivorna har gjorts så långt ut mot ändarna som möjligt för att möjliggöra en hög placering av blocken och öka tidigare nämnd parallellitet.

Vingmuttrar användes för att festa dessa plattor och användes även för att justera stommens vajrar för att rikta denna. Röret i vajerjusteringen är gjort i aluminium. Alla sprintar utgörs av en bit ståltråd som binder ihop komponenterna. Ståltråden som binder samman lastcellstrissan med hållaren för trissan till lastcellen är förenklad och är ritad som en sammanbunden ståltråd istället för i verkligheten där den är najad. Krökningsradier hos plåtdetaljerna har inte måttsats eftersom dessa styrs av den bockningsmaskin som användes under plåtarbetet.

8 RESULTAT/SLUTSATS/DISKUSSION

Efter ca 1000 mantimmar har detta examensarbete kommit till sitt slut. Målen har delvis uppnåtts men en rad tekniska förhinder gjorde att projektet inte riktigt har så långt som önskat. Huruvida det är möjligt att skapa gravitationssimulering med hjälp av en elektromekanisk rigg har egentligen inte besvarats och troligen är det långt kvar innan detta kan göras. De olika lösningsalternativ har dock jämförts med Simulink, vilket visar att en hastighetsreglering hos riggen skulle kunna vara möjlig att uppnå.

Det viktigaste resultatet av examensarbetet är troligtvis dock den fysiska skalmodell, utrustad med noggrant utvalda delar, som kommer att möjliggöra vidare laborationer med olika reglerprinciper och kunskapsinhämtande. Detta kan komma att göra det möjligt att senare utveckla en fullskalig prototyp.

I skrivande stund fortgår också utvecklandet av riggen genom uppgradering av två av modellens kretsar. Lastcellsförstärkaren modifieras samt signalanpassnings- och lågpåpassningskretsen byts ut till en digital version. Detta var nödvändigt eftersom kretsarna ständigt var i behov av justeringar och därmed blev opålitliga.

Som slutsats kan sägas att det har varit en lärorik process där många hinder övervanns och gett värdefulla kunskaper.

8.1 Patentering

Frågan om möjlighet till patentering kom upp då en liten förstudie till projektet gjordes sommaren 2013. En intervju gjordes med Fredrik Andersson på Almi som menade att om något skulle kunna patenteras på riggen så var det reglertekniken. Han trodde dock att detta var ett patentintensivt område vilket innebär att det nog kan vara svårt att patentera systemet [31]. Eftersom detta projekt för närvarande inte drivs med vinstdrivande intressen övervägs just nu ingen patentering.

Källförteckning

- [1] Visual ACT, "About," [Online]. Available: <http://visualact.se/about/>. [Använd 13 april 2015].
- [2] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Gravitation," [Online]. Available: <http://sv.wikipedia.org/wiki/Gravitation>. [Använd 13 april 2015].
- [3] Wikipedia - The Free Encyclopedia, "Earth radius," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Earth_radius. [Använd 8 augusti 2015].
- [4] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Gravitaiton," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Gravitation>. [Använd 8 augusti 2015].
- [5] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Centripetalkraft," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Centripetalkraft>. [Använd 8 augusti 2015].
- [6] Wikipedia - the free encyclopedia, "Gravitational acceleration," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_acceleration. [Använd 8 augusti 2015].
- [7] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Newtons rörelselagar," [Online]. Available: https://sv.wikipedia.org/wiki/Newtons_r%C3%B6relselagar. [Använd 8 augusti 2015].
- [8] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "FIR (signalbehandling)," [Online]. Available: https://sv.wikipedia.org/wiki/FIR_%28signalbehandling%29. [Använd 15 augusti 2015].
- [9] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "IIR-filter," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/IIR-filter>. [Använd 8 augusti 2015].
- [10] Wikipedia - The Free Encyclopedia, "Cogging torque," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Cogging_torque . [Använd 8 augusti 2015].
- [11] C.-Y. Y. S.-N. H. J.-C. Hsiao, A Novel Cogging Torque Simulation Method for Permanent-Magnet Synchronous Machines, Taiwan: National Taiwan University of Science and Technology, 2011.
- [12] Wikipedia - The Free Encyclopedia, "Load cell," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Load_cell. [Använd 8 augusti 2015].
- [13] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Pulsbreddsmodulering," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Pulsbreddsmodulering>. [Använd 8 augusti 2015].
- [14] Wikipedia - The Free Encyclopedia, "RC circuit," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/RC_circuit. [Använd 8 augusti 2015].

- [15] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Operationsförstärkare," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Operationsf%C3%B6rst%C3%A4rkare>. [Använd 8 augusti 2015].
- [16] Wikipedia - The Free Encyclopedia, "Operational amplifier," [Online]. Available: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/97/Op-amp_symbol.svg/1205px-Op-amp_symbol.svg.png. [Använd 10 augusti 2015].
- [17] B. Thomas, *Modern reglerteknik*, Stockholm: Liber, 2008.
- [18] B. RATHOD, J. NITESH och V. KEERTI, "CASCADE CONTROL OF DC MOTOR WITH ADVANCE CONTROLLER," *International Journal of*, vol. 1, nr 1, p. 18, 2013.
- [19] K.-E. Häggblom, "Professor Kurt-Erik Häggblom," [Online]. Available: <http://www.users.abo.fi/khaggblo/PDC/RTGk7.pdf>. [Använd 15 augusti 2015].
- [20] J.-O. Nilsson, Interviewee, *Doktorand på Kungliga tekniska högskolan*. [Intervju]. 25 juni 2013.
- [21] I. Virgala, P. Frankovský och M. Kenderová, "Friction Effect Analysis of a DC Motor," Department of applied mechanics and mechatronics, Technical university of Košice / Faculty of mechanical engineering, Košice, Slovakia, [Online]. Available: <http://pubs.sciepub.com/ajme/1/1/1/>. [Använd 9 augusti 2015].
- [22] N. P. Linthorne, "Analysis of standing vertical jumps using a force platform," *American Association of Physics Teachers*, nr DOI: 10.1119/1.1397460, 2001.
- [23] M. Mägi och K. Melkersson, *Lärobok i maskinelement*, Göteborg: Kompendiet, 2012.
- [24] TRAMEC, "TRAMEC," [Online]. Available: <http://www.tramec.it/en-us/home-page.aspx?idC=61642&LN=en-US>. [Använd 11 augusti 2015].
- [25] MAXON motor, "maxon Motor Data and Operating Ranges," MAXON motor, 2010.
- [26] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Vinkelacceleration," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Vinkelacceleration>. [Använd 21 augusti 2015].
- [27] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Cirkelbåge," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Cirkelb%C3%A5ge>. [Använd 21 augusti 2015].
- [28] Oriental motor, "Basics of Motor Control," [Online]. Available: <http://www.orientalmotor.com/technology/articles/motor-sizing-calculations.html>. [Använd 16 augusti 2015].
- [29] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Moment," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Moment>. [Använd 21 augusti 2015].

- [30] Zoetrope, "Angle Sensor Breakout Board Giveaway," [Online]. Available: <https://zoetrope.io/tech-blog/angle-sensor-breakout-board-giveaway>. [Använd 16 augusti 2015].
- [31] F. Andersson, Interviewee, *Innovationsrådgivare ALMI*. [Intervju]. 11 juni 2013.
- [32] Wikipedia - The Free Encyclopedia, "Cavendish experiment," [Online]. Available: http://en.wikipedia.org/wiki/Cavendish_experiment. [Använd 13 april 2015].
- [33] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Pythagoras sats," [Online]. Available: https://sv.wikipedia.org/wiki/Pythagoras_sats. [Använd 13 april 2015].
- [34] L. Råde och B. Westergren, *Mathematics Handbook for Science and Engineering*, Femte upplagan red., Lund: Studentlitteratur, 2004.
- [35] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Sinussatsen," [Online]. Available: <https://sv.wikipedia.org/wiki/Sinussatsen>. [Använd 13 april 2015].
- [36] Wikipedia - Den fria encyklopedin, "Cosinussatsen," [Online]. Available: <http://sv.wikipedia.org/wiki/Cosinussatsen>. [Använd 13 april 2015].

Personreferenser:

Johan Olsson, Visual act, Stockholm, tel +46 (0)8 522 472 00

Olle Larsson, Visual act, Stockholm, tel +46 (0)8 522 472 00

Jim Fainberg, Visual act, Stockholm, tel +46 (0)8 522 472 00

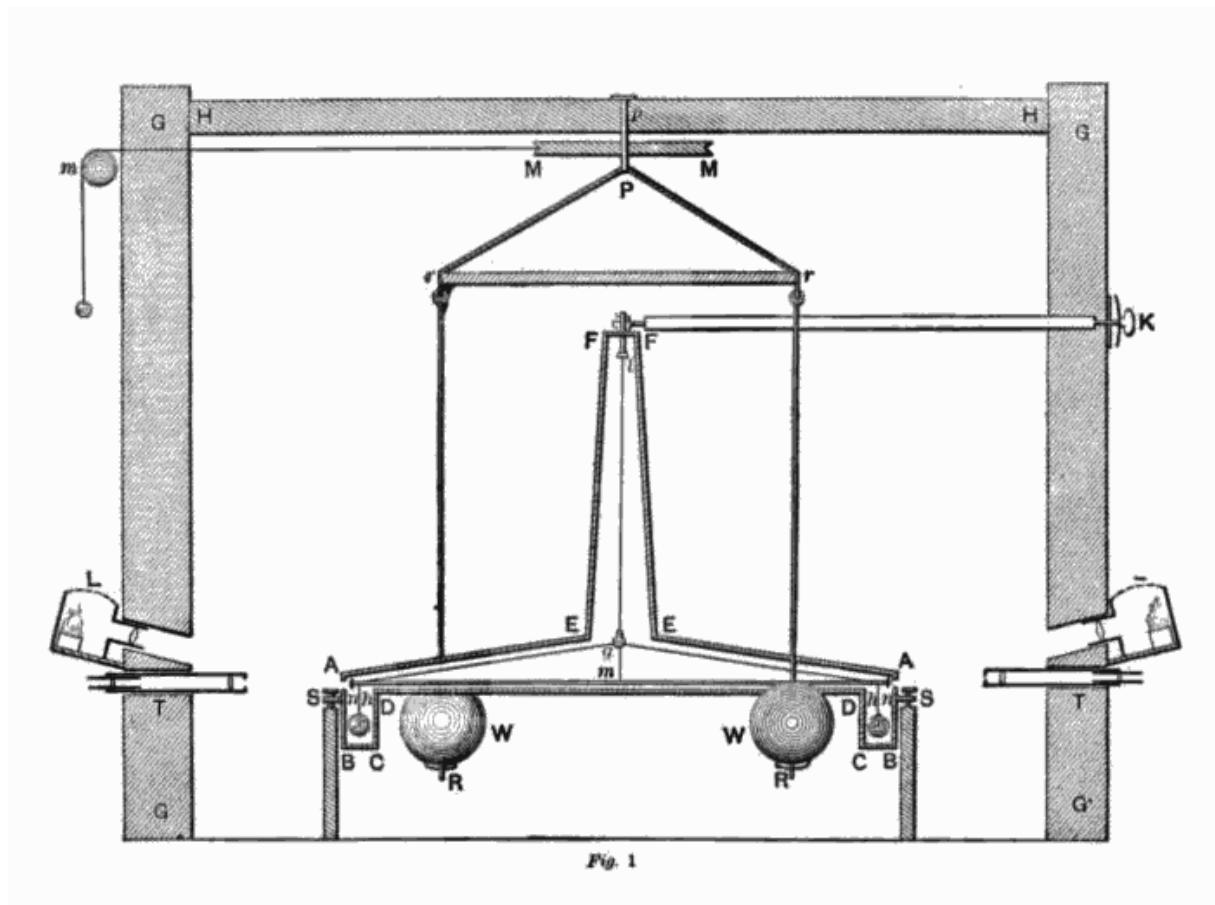
Peter Westman, Visual act, Stockholm, tel +46 (0)8 522 472 00

Fredrik Iversen, Visual act, Stockholm, tel +46 (0)8 522 472 00

Cavendish's experiment

1797-98 gjorde den brittiska vetenskapsmannen Henry Cavendish ett experiment som senare skulle leda till att den allmänna gravitationskonstanten kunde bestämmas. I experimentet används en apparat som visas i Figur 9.1 nedan. Denna består av två blykulor av känd massa och avstånd kring apparatens centrumlinje, vilka kunde roteras kring denna centrumlinje så att vinkeln i förhållande till omgivningen kunde justeras. Dessutom fanns två mindre blykulor av känd massa och avstånd från samma centrumlinje vilka kunde rotera kring denna. Dessa mindre kulor var sammanbundna med en arm vilken var upphängd i en tråd som gick genom centrumlinjen med känd torsionsfjäderkonstant.

All denna utrustning var innesluten i en skyddande kåpa som förhindrade oönskade störningar. Utifrån kunde experimentet betraktas genom små tithål. En gravitationskraft uppstod i apparaten mellan de båda stora kulorna och de båda små kulorna vilken fick armen på vilka de små var fästa att börja vrida sig så att avståndet mellan de små kulorna och de stora kulorna minskades. Denna mycket långsamma rörelse hämmades av tråden som gav ett motriktat moment på grund av torsionen. På så vis kunde Cavendish få fram de krafter som verkade mellan de små och de stora kulorna som senare kunde användas för att få fram den Allmänna gravitationskonstanten med en så god noggrannhet som 1 % [32].



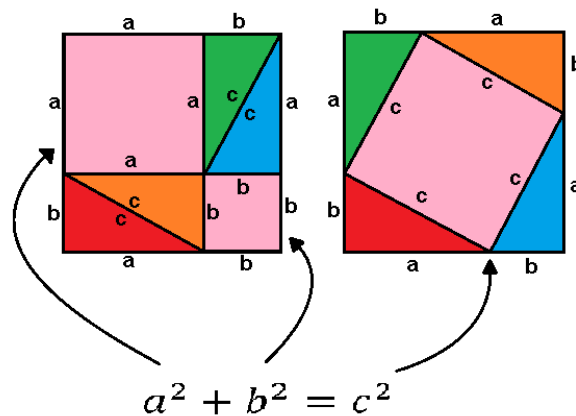
Figur 8.1: Ritning som visar den utrustning som användes vid Cavendish's experiment [32].

Pythagoras sats

I en rätvinklig triangel gäller enligt Pythagoras sats att summan av kateterna i kvadrat är lika med hypotenusan i kvadrat.

$$a^2 + b^2 = c^2 \quad ()$$

Bevis:

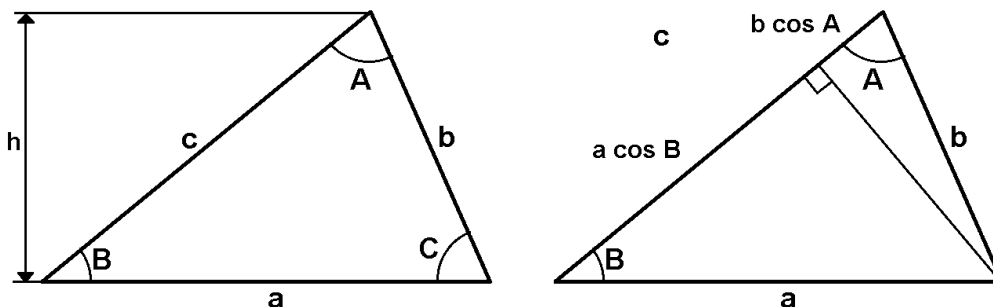


Figur 8.2: Två likadana kvadrater partitionerade på två olika sätt.
[Illustration: Ejnar Askberger]

De båda sammansatta kvadraterna ovan har lika stor area. Varje triangel i de båda sammansatta kvadraterna har lika stor area. Detta betyder att arean av varje sammansatt kvadrat minus arean av de fyra triangelarna i varje sammansatt kvadrat i båda fallen kommer att vara lika stor. I ena fallet är denna $a^2 + b^2$ och i det andra c^2 , vilket skulle bevisas [33].

Triangeltrigonometri

För en godtycklig triangel kan vinklar och sidor beräknas med hjälp av cosinussatsen och sinussatsen [34].



Figur 8.3: Godtyckliga trianglar med betäckningar för sidlängder och vinklar.
[Illustration: Ejnar Askberger]

Sinussatsen

$$\frac{\sin A}{a} = \frac{\sin B}{b} = \frac{\sin C}{c} \quad ()$$

Härledning:

Enligt den vänstra triangeln i Figur 8.3: Godtyckliga trianglar med betäckningar för sidlängder och vinklar. ovan gäller följande.

$$\frac{h}{c} = \sin B \text{ och } \frac{h}{b} = \sin C \Rightarrow c \sin B = b \sin C \Rightarrow \frac{\sin B}{b} = \frac{\sin C}{c}$$

Om h istället är den mot sidan c vinkelräta sträckan mellan sidan c och hörnet med vinkeln C så fås på samma vis också $\frac{\sin A}{a} = \frac{\sin B}{b}$, vilket skulle härledas [35].

Cosinussatsen

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A \quad ()$$

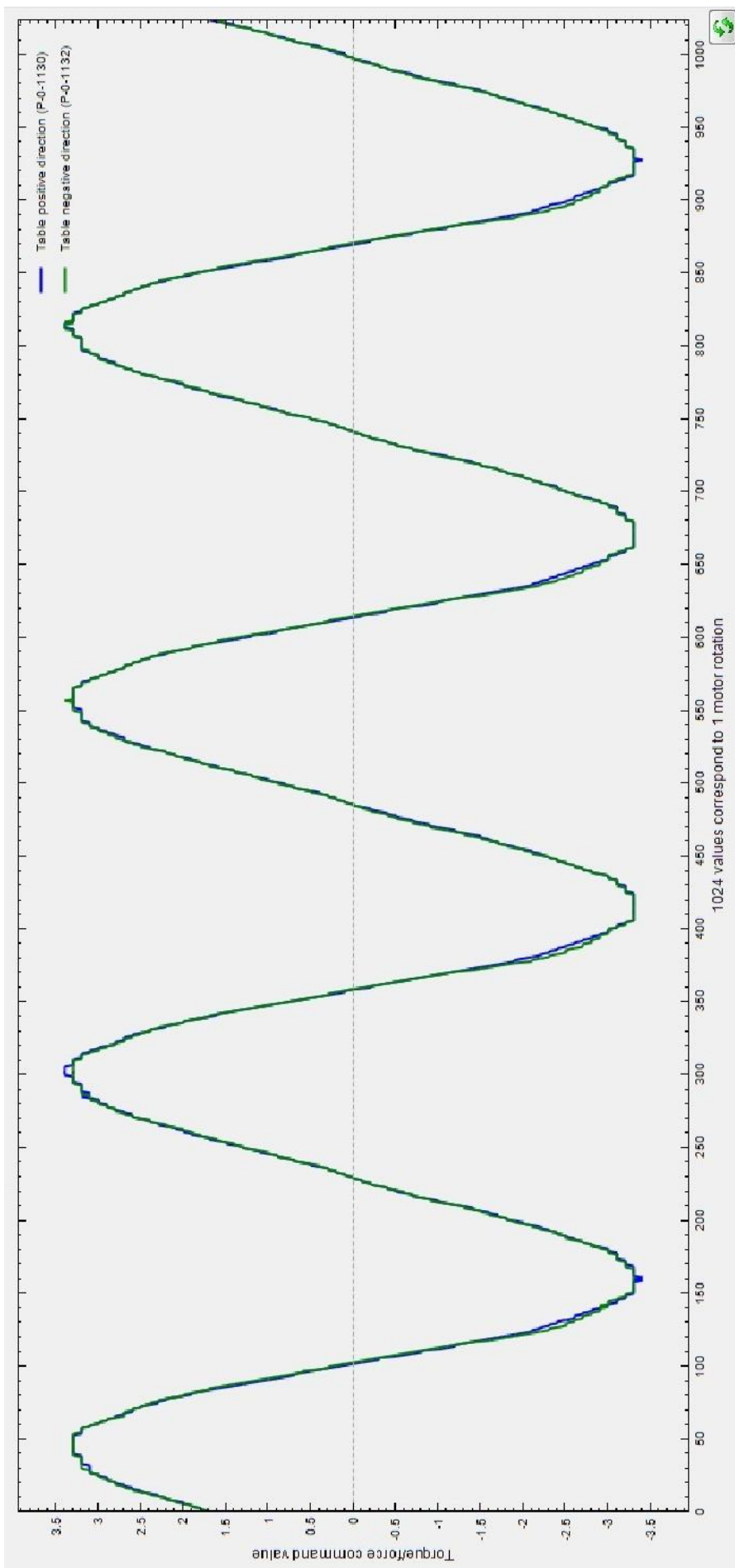
Bevis:

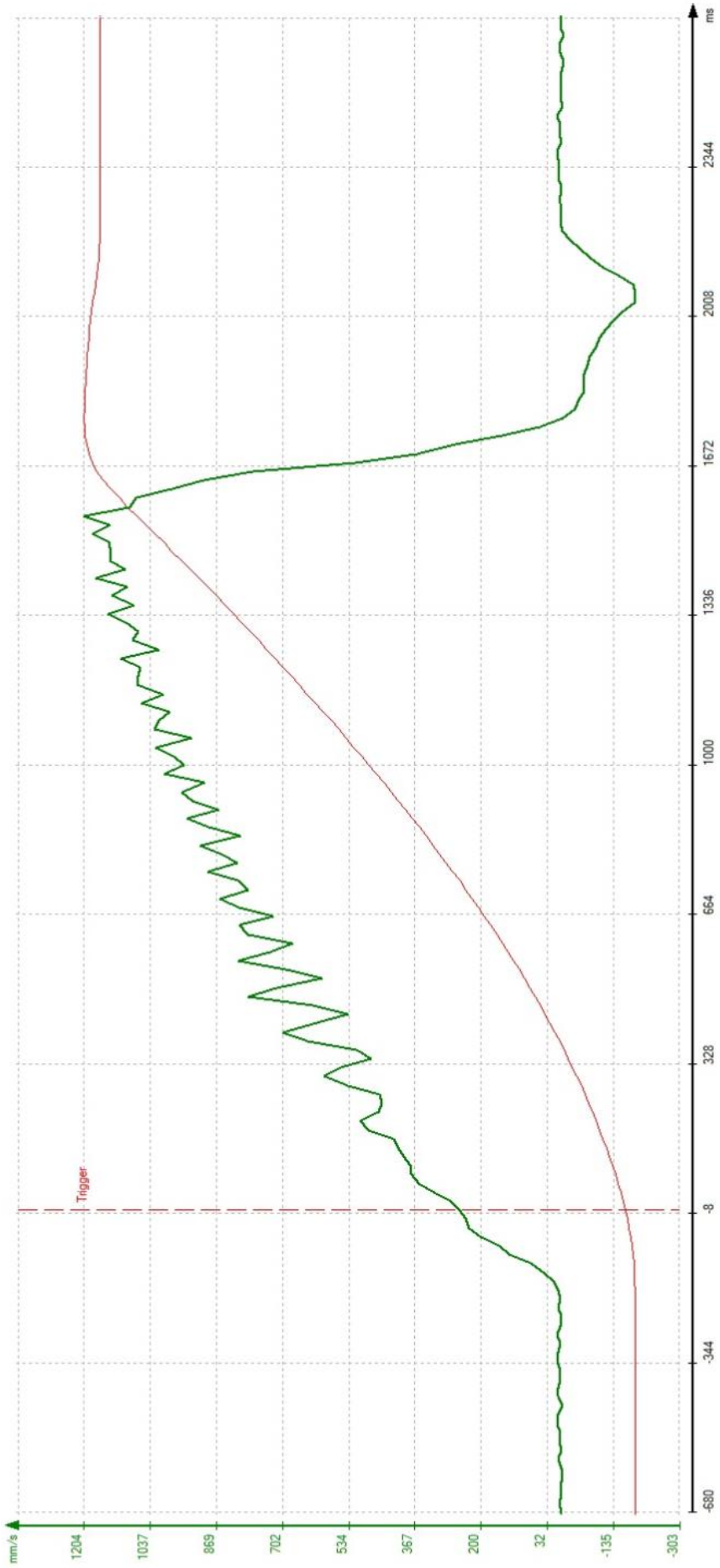
Enligt den högra triangeln i Figur x ovan och tillämpning av Pythagoras sats gäller följande:

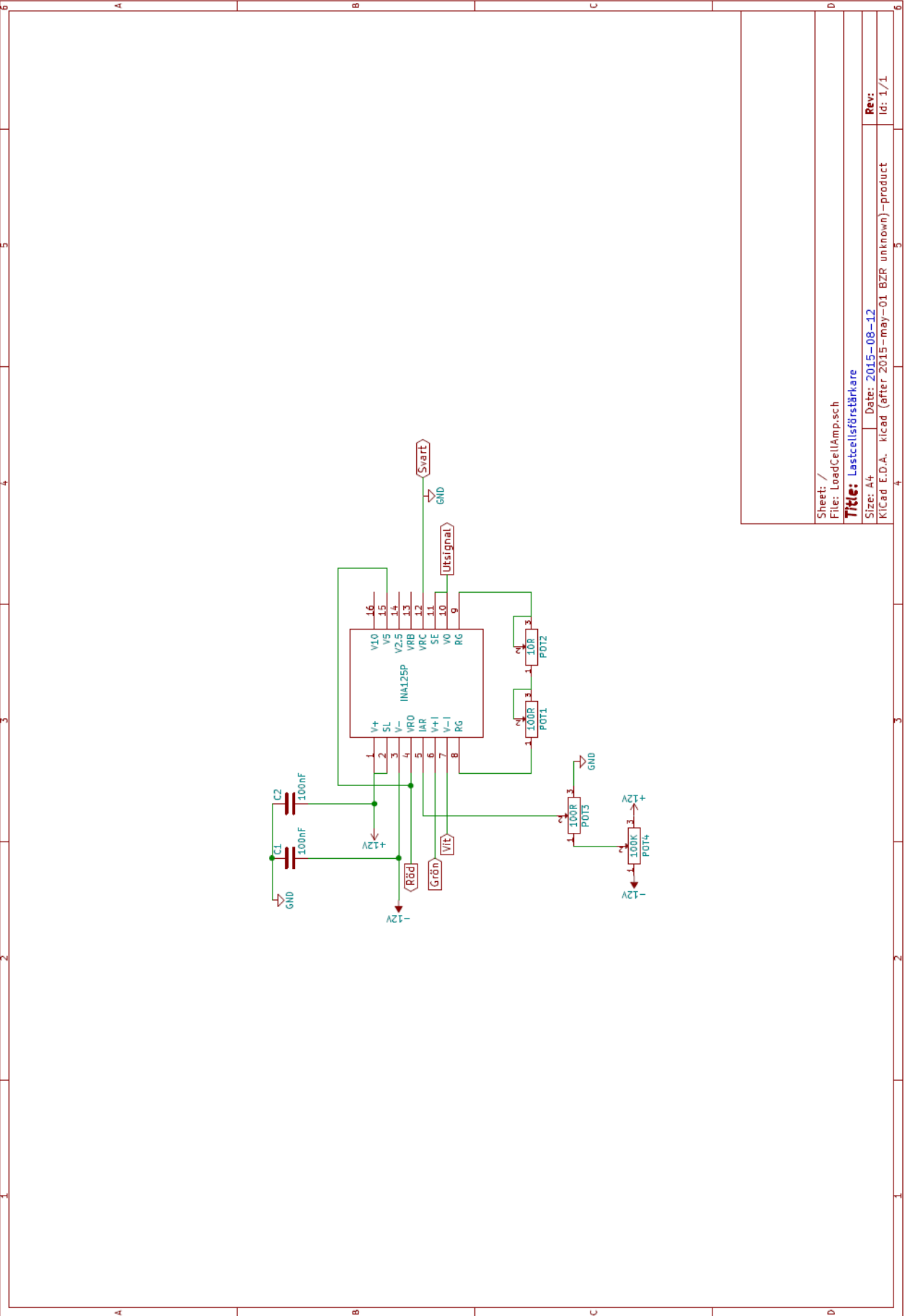
$$a^2 = (a \cos B)^2 + (b^2 - (b \cos A)^2) \text{ och } a \cos B = c - b \cos A \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a^2 = (c - b \cos A)^2 + b^2 - (b \cos A)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A, \text{ vilket skulle bevisas [36].}$$







Sheet: /
File: LoadCellAmp.sch

Title: Lastcellsförstärkare

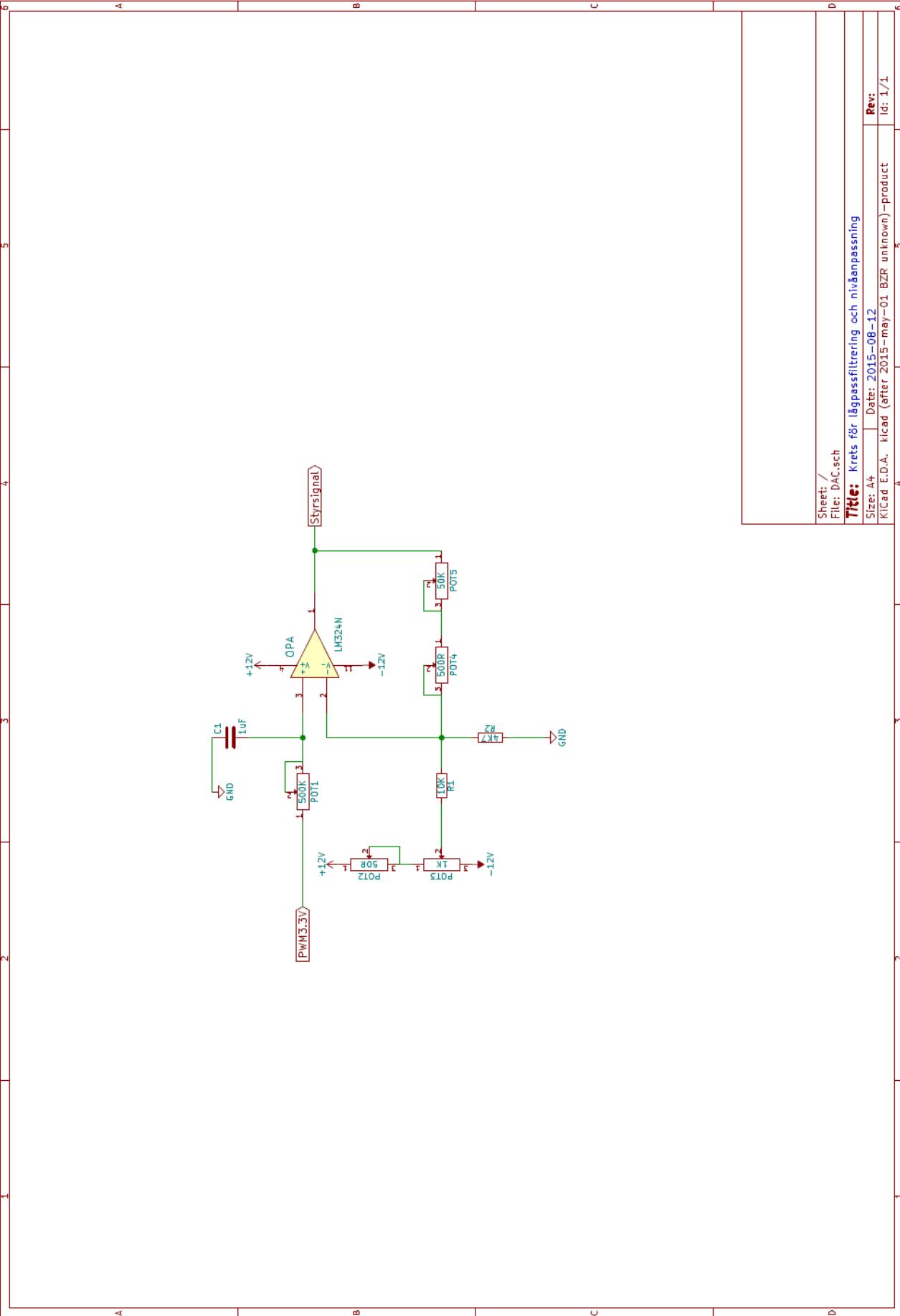
Size: A4

Date: 2015-08-12

Rev:

Id: 1/1

KiCad E.D.A. - kicad (after 2015-may-01 BZR unknown) - product

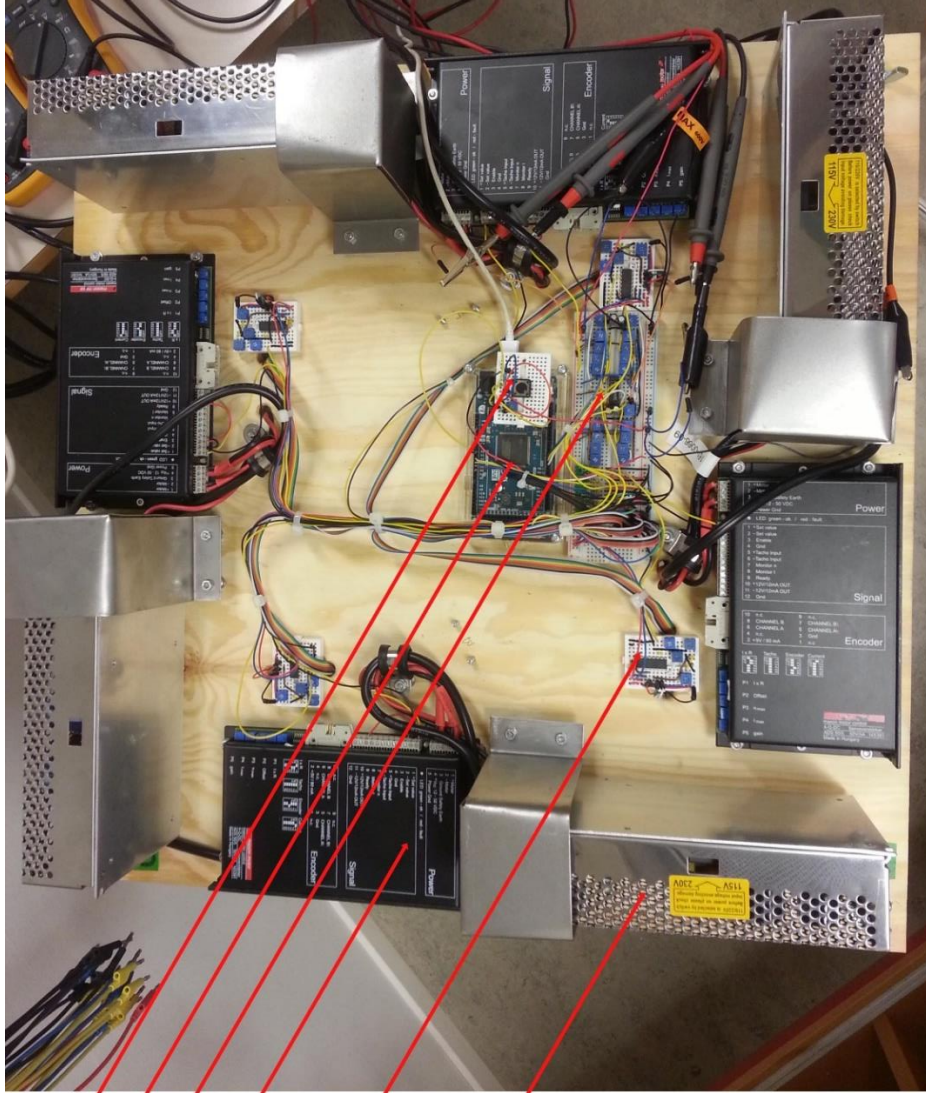


Sheet: /
File: DAC.sch

Title: Krets för lågpassfiltrering och nivåanpassning

Size: A4 Date: 2015-08-12

KiCad E.D.A. - kicad (after 2015-may)-01 BZR unknown)-product **Rev:** id: 1/1



Knapp för nollställning av position och potentiometer för tester

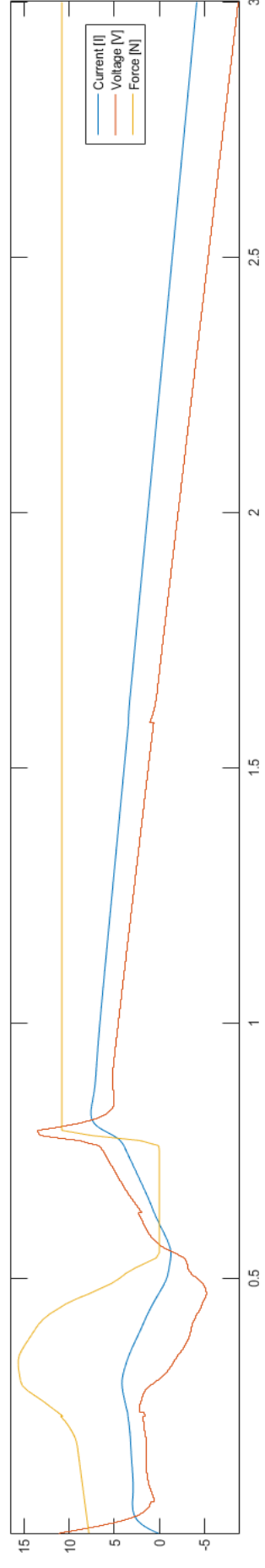
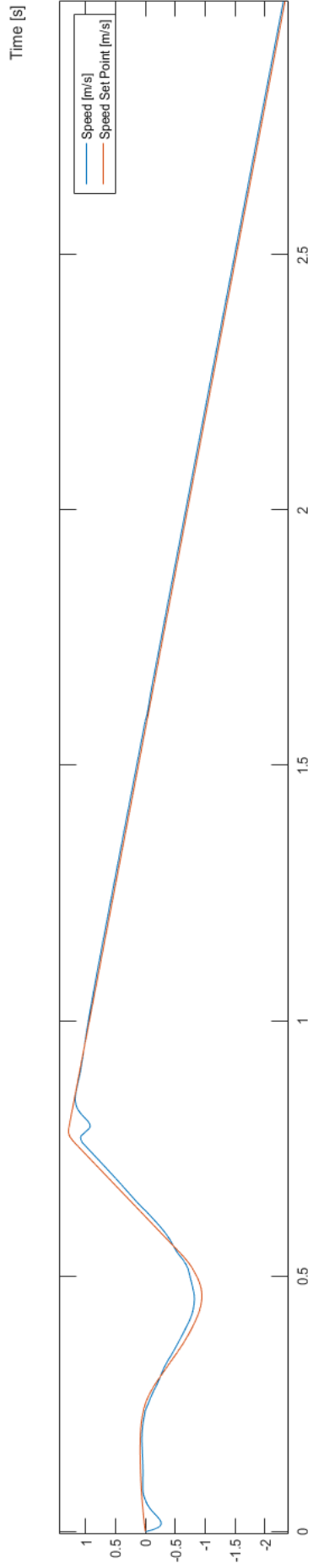
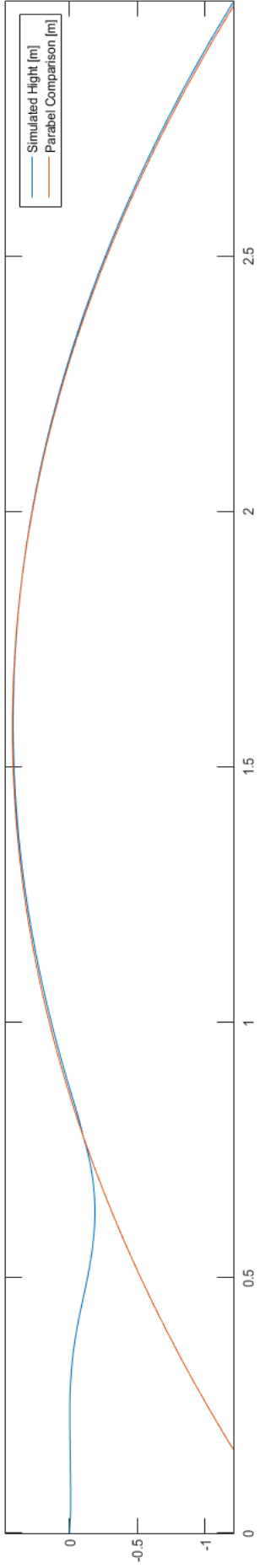
Mikrokontrollerkortet Arduino Due

Lågpassfiltrering och nivåanpassning

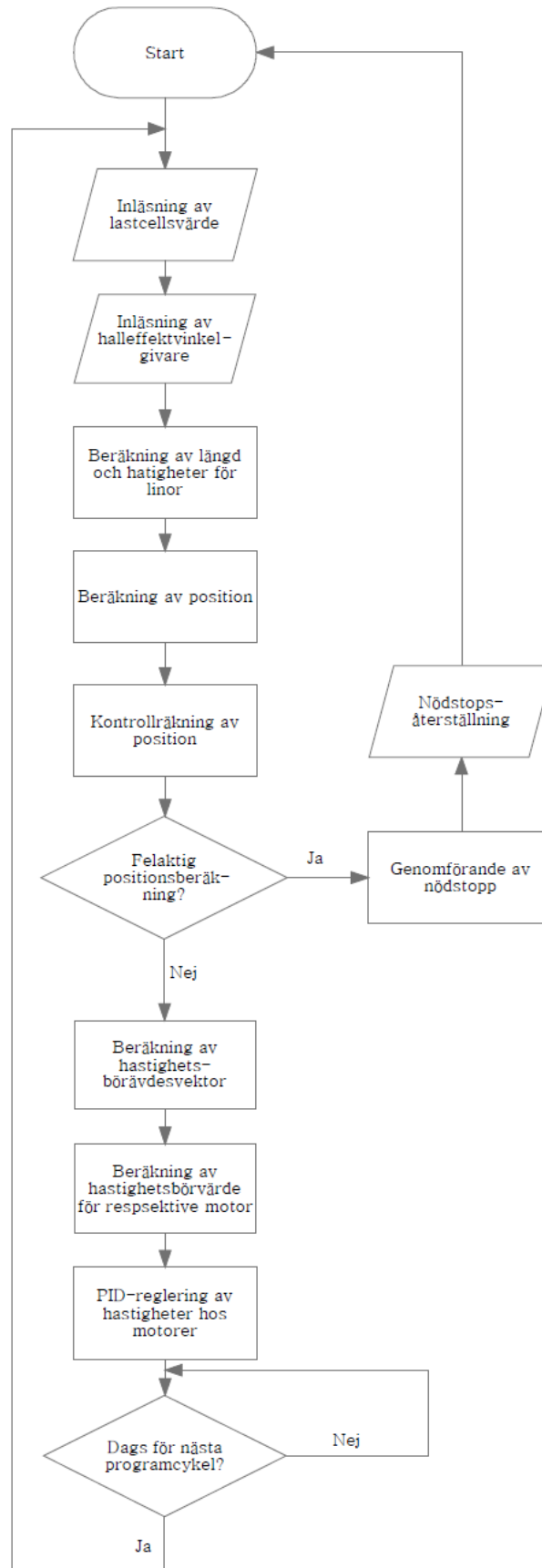
Drivsteg

Lastcellsförstärkare

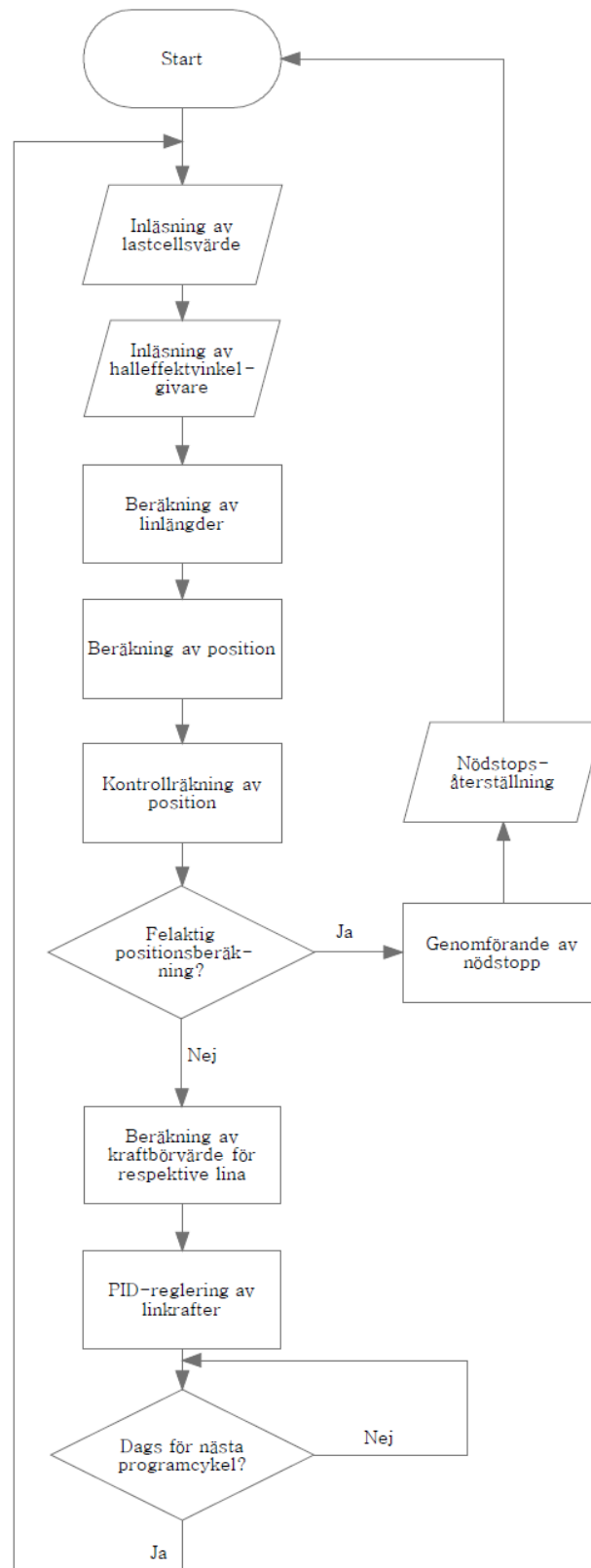
24 V nättaggregat



Flödesschema över program för hastighetsreglering



Flödesschema över program för kraftreglering



```

////////////////////////////////////
//
// Detta arduinoprogram används vid //
// framtagning av stegsvar för //
// systemet och loggar position //
// hastighet och lastcellsvärde //
// för vikten på 1,1 kg. //
// Vissa av programmets funktioner //
// hanterar fält om fyra element. //
//
////////////////////////////////////

#include <SPI.h>

float startLength[4] = {0, 0, 0, 0}; //Startlängder för linorna som sätts vid reset för
linlängder
int angle = 0; //Vinkelärvärde
int oldAngle[4] = {16383,16383,16383,16383}; //Tidigare avläst vinkelvärde
int angle1 = 0; //Mest signifikanta byten
int angle2 = 0; //Lägst signifikanta byten
int turns[4] = {0, 0, 0, 0}; //Antalet varv
int oneTurn = 16383; //Enheter under ett varv
int halfTurn = 8191; //Enheter under ett halvt varv
int totalAngle = 0; //Inkrementell vinkel
float circumference = 0.06337; //omkräts i meter uppmätt genom utdragning av lina och
räkning av antal varv 2,915/46
const int SSpin22 = 22; //Slave select pinnummer för hörn A
const int SSpin23 = 23; //Slave select pinnummer för hörn B
const int SSpin24 = 24; //Slave select pinnummer för hörn C
const int SSpin25 = 25; //Slave select pinnummer för hörn D
float lineLength[4] = {0,0,0,0}; //linlängder
float lengthOffset[4] = {0, 0, 0, 0}; //Offsetvektor för linlängderna
int cornerNumber = -1; //Hörnnummer där A representeras av 0
float lastLength[4] = {0, 0, 0, 0}; //Föregående linlängd
float speedPV[4] = {0, 0, 0, 0}; //Hastighetsärvärde
int wait = 0; //Variabel som väntar på att SPI-bussen ska börja skicka korrekta data
unsigned long int microsInSample = 0; //Tiden då varje sample gjordes i mikrosekunder

int resetButton = 1; //Knapp som används för att sätta linlängderna då vikten är placerad
i origo
const int resetButtonPin = 13; //Pinnummer för resetknappen
const int potPin = 0; //Vridpotentiometer som reglerar stationärtillståndet
double PWMValue = 0; //Styrsignal till drivsteg
double potVal = 0; //Potentiometervärde

int loadCellA = 2; //Lascellingång
int loadCellB = 3; //Lascellingång
int loadCellC = 4; //Lascellingång
int loadCellD = 5; //Lascellingång
float loadL[4] = {0, 0, 0, 0}; //Lastcellsvärde för respektive lina

#define CYCLETIME 10000 //Programmets cykeltid

unsigned long nextMicros = CYCLETIME; //Ser till att programmet körs med rätt cykeltid
första exekveringen
unsigned long cycleTime = CYCLETIME; //Cykeltid

```

```

int stepValue = 187; //Det värde som steget ska landa på

void setup () {
  Serial.begin(115200); //Startar seriell överföring
  SPI.begin(10); //Startar SPI på pin 10 men SS som verkligen används finns nedan

  //Ställer in SPI-kommunikationen
  SPI.setClockDivider(10, 42); //42 för 2 Mhz SPI bus transfer speed
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST); //Mest signifikanta biten först
  SPI.setDataMode(SPI_MODE1); //Mode för SPI-bussen

  //Sätter mode på pinnar
  pinMode(SSpin22, OUTPUT);
  pinMode(SSpin23, OUTPUT);
  pinMode(SSpin24, OUTPUT);
  pinMode(SSpin25, OUTPUT);
  pinMode(resetButtonPin, INPUT);

  //Sätter mode på PWM-pinnar
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  pinMode(5, OUTPUT);
}

void loop () {
  if (digitalRead(resetButtonPin) == 0) { //Om linlängderna skall resetas så utförs denna sats
    lengthOffset[0] = -lengthCal(SSpin22)+startLength[0]; //Hämtar längder som används för
    offset
    resetButton = 0; //Gör så att satsen bara körs när reset önskas
    Serial.print("0"); //Skriver ut noll vid stationärtillstånd
    PWMValue = 96 + analogRead(potPin) / 8; //Beräknar en styrsignal för stationärtillstånd
  }

  else{
    PWMValue = stepValue; //Ger annars steget som styrsignal
    Serial.print("1"); //Och signalerar om att steget är "på"
  }

  getLength(); //Beräknar linlängd för lina A
  getLoadCells(); //Hämtar lastcellsdata
  microsInSample = micros(); //Läser av tiden vid samplingsögonblicket
  speedCal(); //Beräknar hastighet

  //Skriver ut utom "knappidentifikation"
  printAll();

  analogWrite(2, PWMValue);
  nextCycleWait();
}

//FUNKTIONER

void getLoadCells(void) {
  //Hämtar lastcellsnivåer

```

```

loadL[0] = analogRead(loadCellA);
loadL[1] = analogRead(loadCellB);
loadL[2] = analogRead(loadCellC);
loadL[3] = analogRead(loadCellD);
}

void printAll(void){
  Serial.print("\t");
  Serial.print(microsInSample);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(speedPV[0], DEC);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(lineLength[0], DEC);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(loadL[0], DEC);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(PWMValue, DEC);
  Serial.print("\t");
  Serial.println(stepValue, DEC);
}

void speedCal(void){
  if (wait<100){
    wait++; //Väntar för att datat från SPI-bussen skall bli korrekt
  }
  else{
    //Räknar ut hastighetsärvärde och sparrar längd för nästa exekvering
    speedPV[0] = (lineLength[0] - lastLength[0])*1000/(float)cycleTime;
    speedPV[1] = (lineLength[1] - lastLength[1])*1000/(float)cycleTime;
    speedPV[2] = (lineLength[2] - lastLength[2])*1000/(float)cycleTime;
    speedPV[3] = (lineLength[3] - lastLength[3])*1000/(float)cycleTime;
    lastLength[0] = lineLength[0];
    lastLength[1] = lineLength[1];
    lastLength[2] = lineLength[2];
    lastLength[3] = lineLength[3];
  }
}

void getLength(void){
  //Beräknar längder och lägger till offset
  lineLength[0] = lengthCal(SSpin22) + lengthOffset[0];
  lineLength[1] = lengthCal(SSpin23) + lengthOffset[1];
  lineLength[2] = lengthCal(SSpin24) + lengthOffset[2];
  lineLength[3] = lengthCal(SSpin25) + lengthOffset[3];
}

float lengthCal (int SSpin){
  cornerNumber = SSpin-22; //Räknar ut hörnets nummer genom användning av slave select
  pinnummer
  angle = getAngle(SSpin); //Hämtar axelvinkel
  if ((oldAngle[cornerNumber]-angle)>halfTurn){ //Kollar om axeln gått från stor till liten
  vinkel och ökar isf antalet varv
    turns[cornerNumber] += 1;
  }
  if ((angle-oldAngle[cornerNumber])>halfTurn){ //Kollar om axeln gått från liten till stor
  vinkel och minskar isf antalet varv
    turns[cornerNumber] -= 1;
  }
}

```

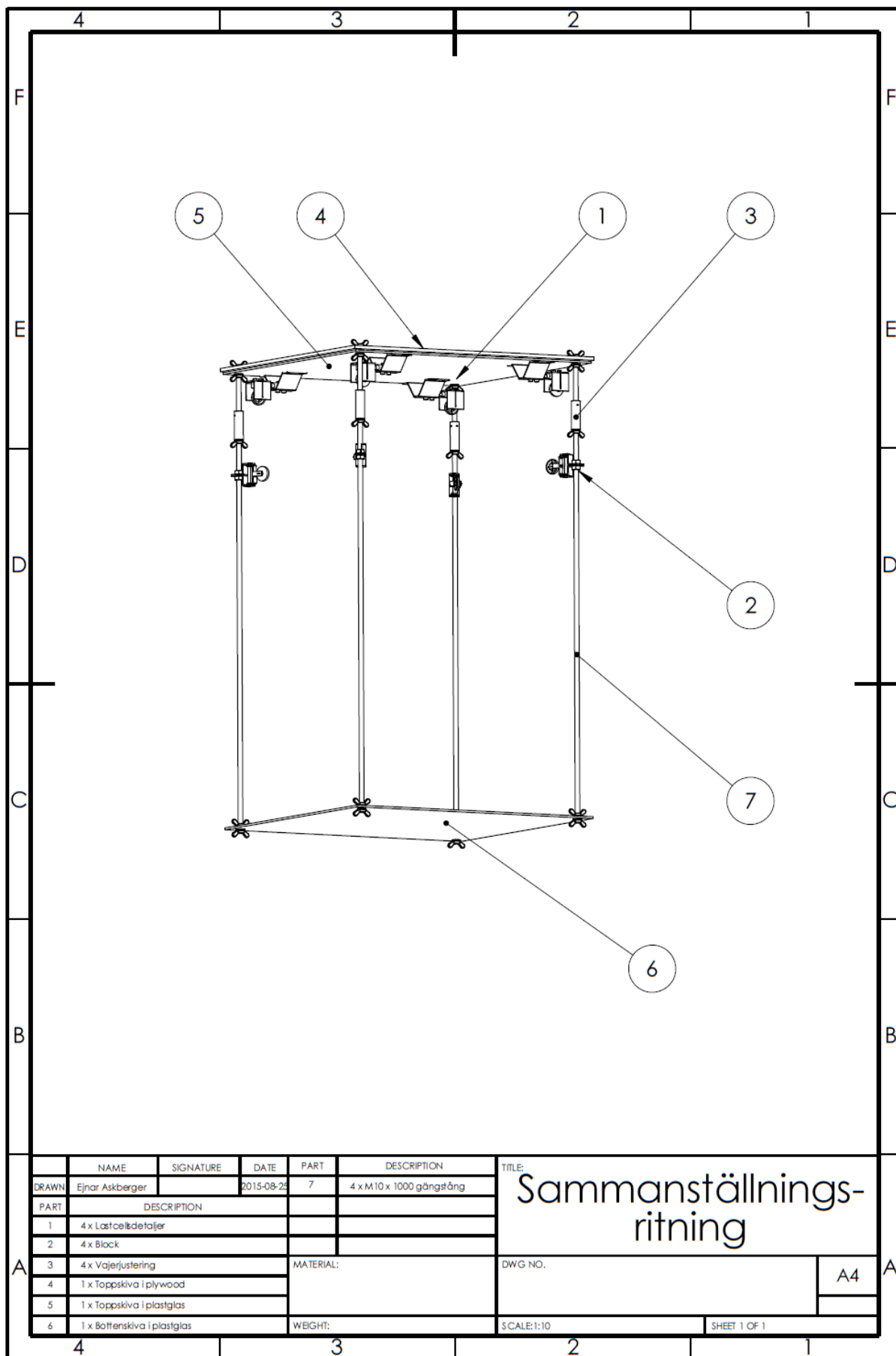
```

}
totalAngle = turns[cornerNumber] * oneTurn + angle; //Beräknar totala vinkeln
oldAngle[cornerNumber] = angle; //Uppdaterar gammal vinkel för att kunna bedömma antalet
snurrade varv
return ((float)circumstance * (float)totalAngle / (float)oneTurn); //Retrunerar totalt
utsläppt linlängd
}

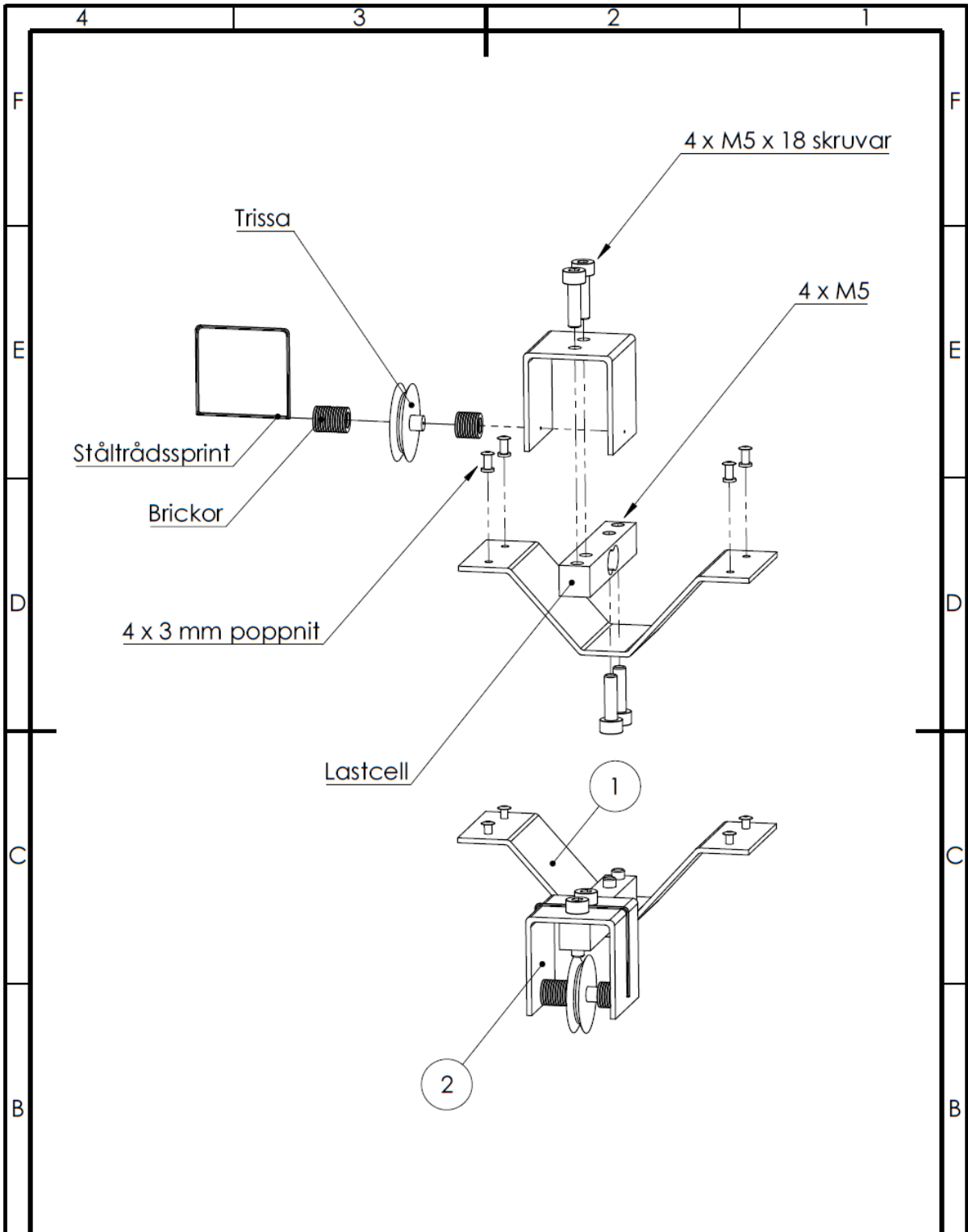
int getAngle (int SSpin){
//Hämtar 2 bytes vinkeldata från AS5048A
digitalWrite(SSpin, LOW);
angle1 = SPI.transfer(10, 0b11111111, SPI_CONTINUE);
angle2 = SPI.transfer(10, 0b11111111);
digitalWrite(SSpin, HIGH);
angle1 &= 0b00111111; //Maskar första två bitarna
angle1 = angle1 << 8; //Vänsterskiftar mest signifikanta bitarna
return angle1 | angle2; //Slår samman
}

void nextCycleWait(void){
//Väntar på att det är dags för nästa cykel och räknar ut när nästa cykel ska avslutas
while(nextMicros>micros()){
}
nextMicros = micros()+cycleTime;
}

```



	NAME	SIGNATURE	DATE	PART	DESCRIPTION	TITLE:
DRAWN	Ejnar Askberger		2015-08-25	7	4 x M10 x 1000 gängstång	Sammanställningsritning
PART	DESCRIPTION					
1	4 x Lastölsdetaljer					DWG. NO.
2	4 x Block					
3	4 x Vänerjustering					A4
4	1 x Toppskiva i plywood					
5	1 x Toppskiva i plastglas					SCALE:1:10
6	1 x Bottenskiva i plastglas					
				WEIGHT:	SHEET 1 OF 1	

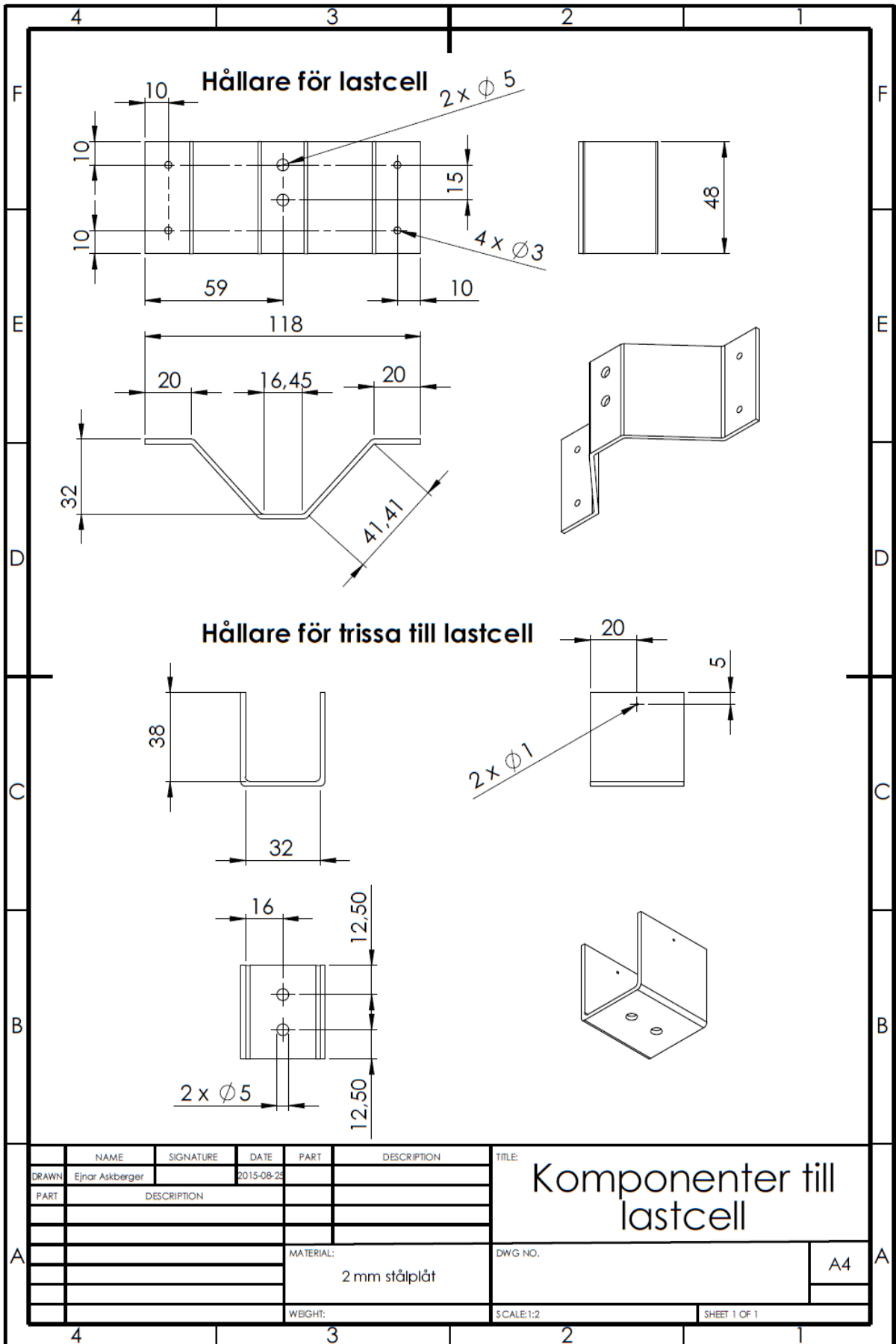


NAME	SIGNATURE	DATE	PART	DESCRIPTION	TITLE:
DRAWN	Ejnar Askberger	2015-08-25			Sprängskiss på lastcellsdetaljer
PART	DESCRIPTION				
1	Hållare för lastcell				
2	Hållare för trissa till lastcell				
MATERIAL:				DWG. NO.	
WEIGHT:				SCALE: 1:2	
				SHEET 1 OF 1	

A

A

4 3 2 1



NAME	SIGNATURE	DATE	PART	DESCRIPTION
DRAWN: Ejnar Askberger		2015-08-23		
PART	DESCRIPTION			

Titel: Komponenter till lastcell

DWG NO.:

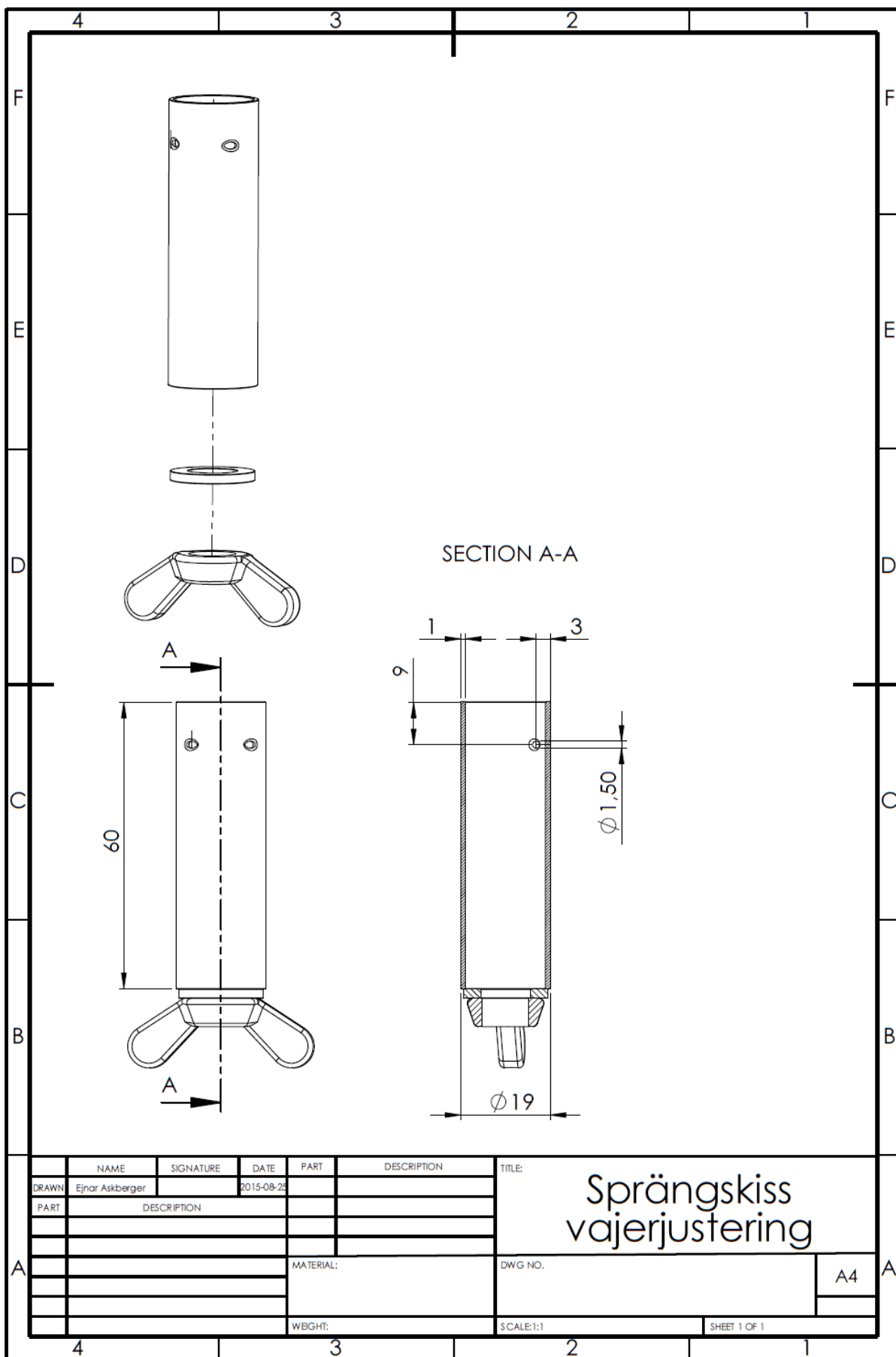
MATERIAL: 2 mm stålplåt

WEIGHT:

SCALE: 1:2

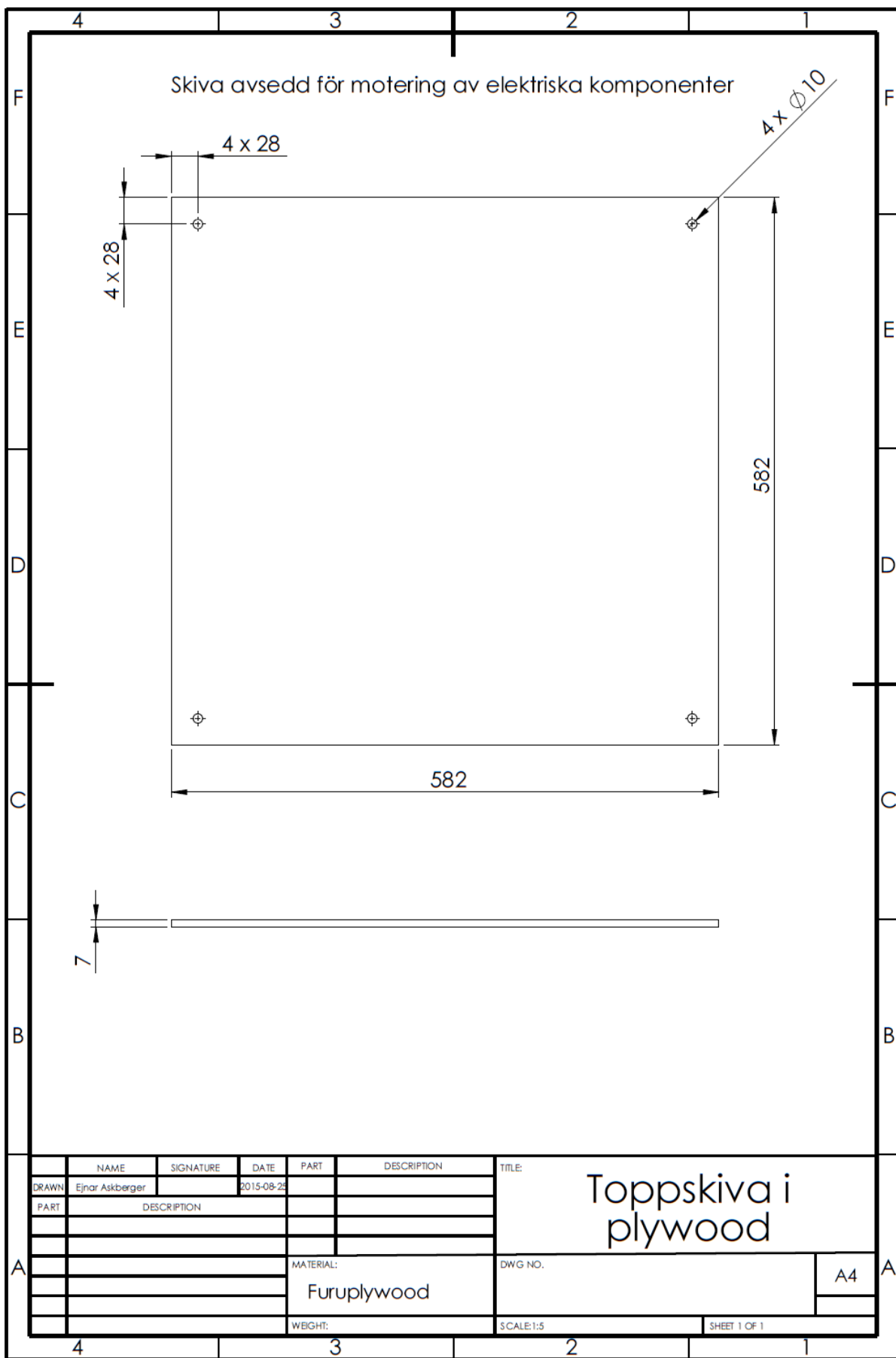
SHEET 1 OF 1

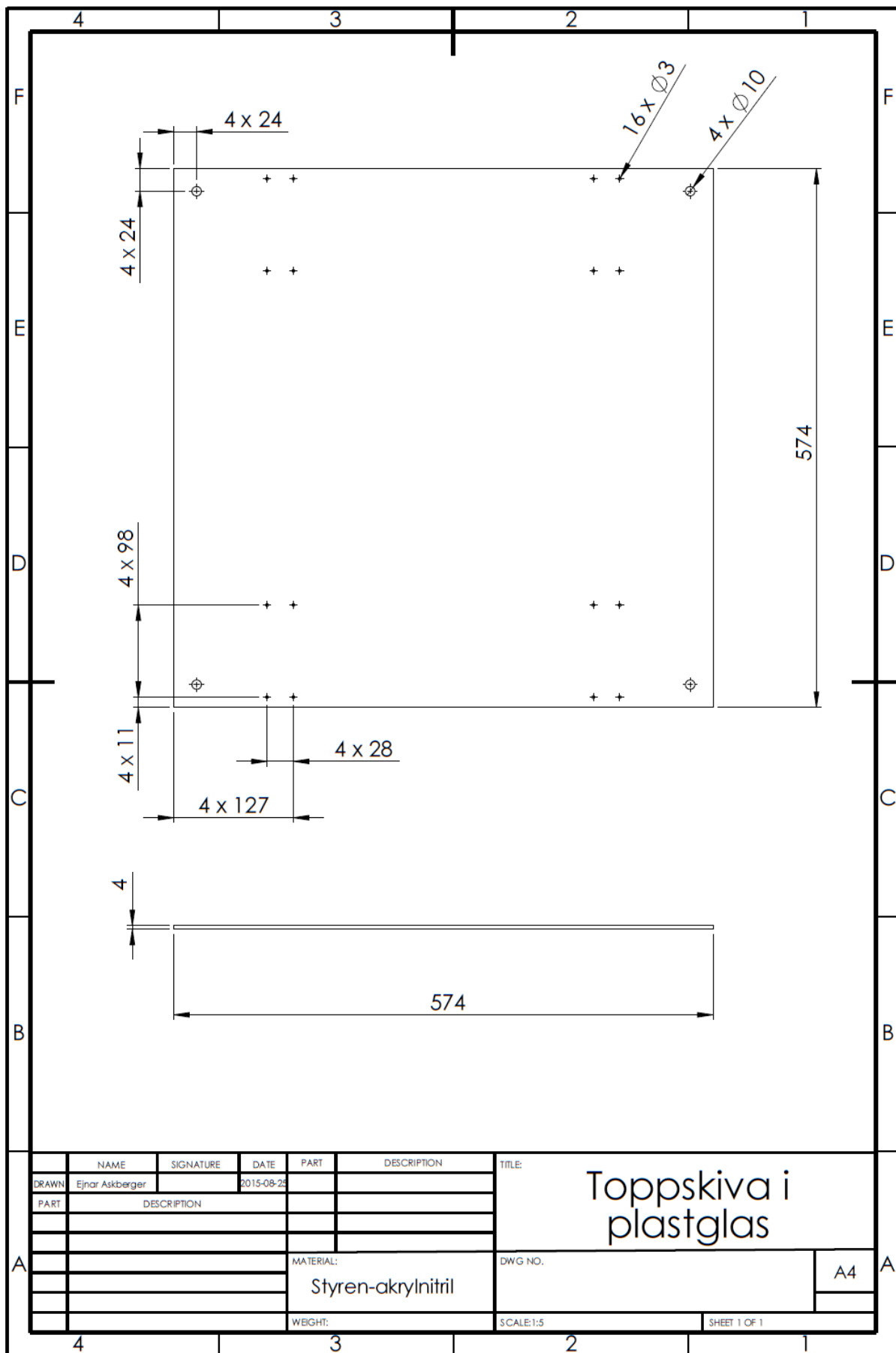
A4



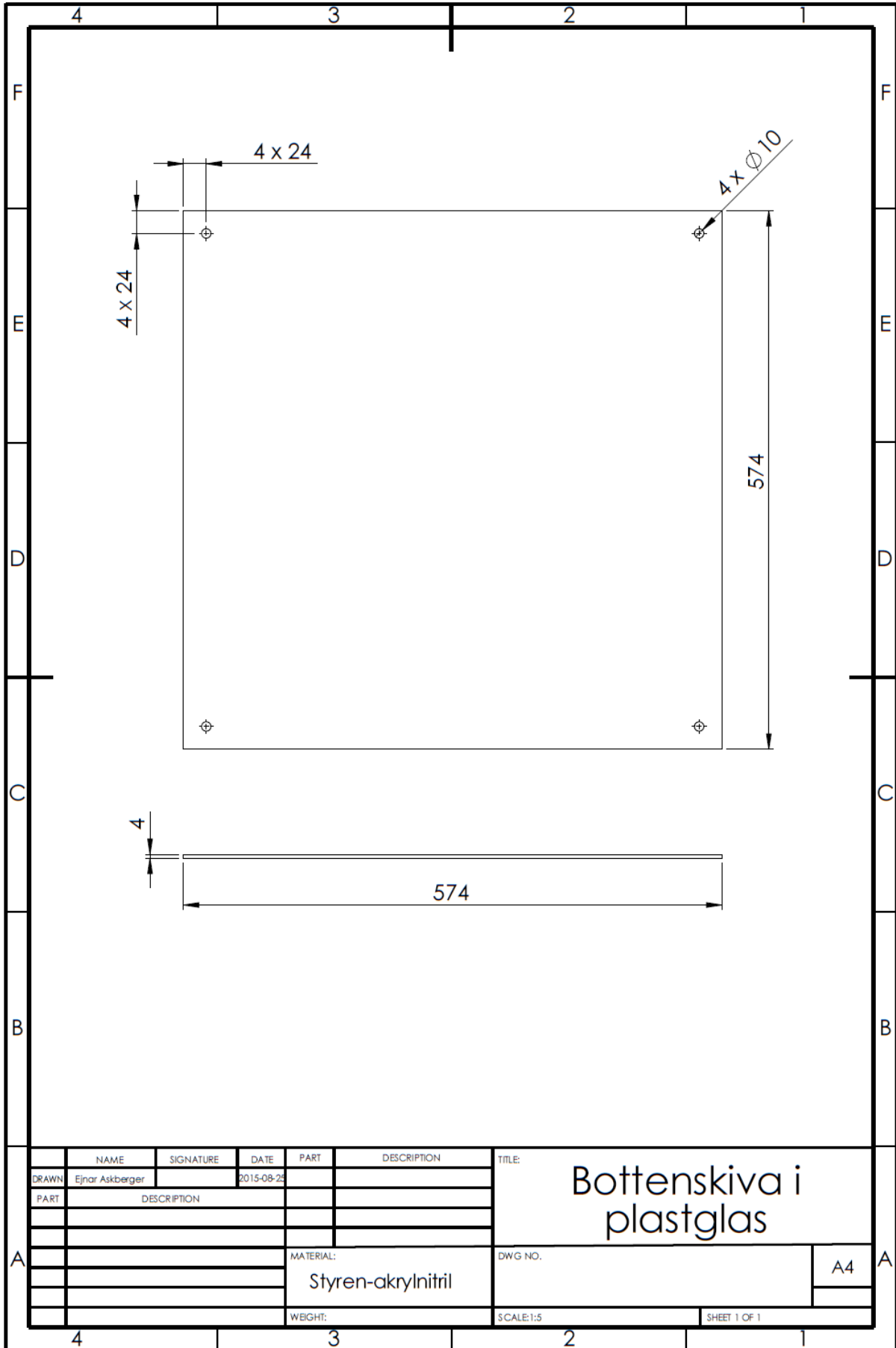
NAME	SIGNATURE	DATE	PART	DESCRIPTION	TITLE:
Einar Askberger		2015-08-25			Sprängskiss vajerjustering
PART DESCRIPTION					
MATERIAL:					DWG NO.
WEIGHT:					SCALE: 1:1
					SHEET 1 OF 1

A4





NAME	SIGNATURE	DATE	PART	DESCRIPTION	TITLE:
DRAWN: Einar Askberger		2015-08-25			Toppskiva i plastglas
PART:	DESCRIPTION:				
MATERIAL: Styren-akrylnitril				DWG NO.:	A4
WEIGHT:				SCALE: 1:5	SHEET 1 OF 1



NAME	SIGNATURE	DATE	PART	DESCRIPTION	TITLE:
DRAWN	Ejnar Askberger	2015-08-25			Bottenskiva i plastglas
PART	DESCRIPTION				
MATERIAL:				DWG NO.	A4
Styren-akrylnitril					
WEIGHT:				SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1

