



CHALMERS



Solrosen Ett riktningsystem för solpaneler

An inquiry into the availability of solar energy in theory and practice

Bachelor's thesis in Electrical Engineering

TOBIAS MÖLLERSTEDT
LEO LANDBERG INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden 2022
www.chalmers.se

BACHELOR'S THESIS 2022

Design of a solar tracking PV system

Simulating and measuring the insolation of solar cells

TOBIAS MÖLLERSTEDT
LEO LANDBERG



CHALMERS

Department Electrical Engineering
CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Gothenburg, Sweden 2022

Design of a solar tracking PV system
Simulating and measuring the insolation of solar cells
TOBIAS MÖLLERSTEDT
LEO LANDBERG

© TOBIAS MÖLLERSTEDT, LEO LANDBERG 2022.

Examiner and Supervisor: Thomas Hammarström,
Department of Electrical Engineering

Bachelor's Thesis 2022
Department of Electrical Engineering
Chalmers University of Technology
SE-412 96 Gothenburg
Telephone +46 31 772 1000

Cover: The constructed PV system, Solrosen, sitting on a window sill

Typeset in L^AT_EX
Printed by Chalmers Reproservice
Gothenburg, Sweden 2022

Design of a solar tracking PV system
Simulating and measuring the insolation of solar cells
TOBIAS MÖLLERSTEDT
LEO LANDBERG
Department of Electrical Engineering
Chalmers University of Technology

Abstract

Today, the consumption of energy in society is growing fast along with an increasing demand for renewable energy sources. Solar energy is a promising energy source, although the limited effect coupled with high costs have limited the popularity of solar energy in earlier decades.

This cost has in later years become affordable to the point where it provides a cost-effective energy alternative not only to the commercial energy grid, but for personal use as well. However, the effectiveness of a Photovoltaic system depends on the implementation and general energy availability present at a location.

This project aims to determine the gains made by using a solar tracking system in comparison to having a stationary solar cell unit present at a location during any time of the year. This by first simulating the physical properties at play for such units in a Simulink program, and then by comparing the values obtained to values measured from an actual solar tracking unit built by us. The positives and negatives of the tracking case versus the stationary case will then be discussed.

The project found that the gains in solar energy output depend on a variety of factors, and that some factors' relevance depend on geographical location. For the case of Gothenburg, Sweden, horizontal solar tracking produced almost double the energy of a stationary solar cell, while the energy gain from vertical tracking was almost negligible.

Keywords: solar energy, photo-voltaic systems, renewable, arduino, simulink, matlab

Acknowledgements

Examensarbetet är för Högscoleingenjörsprogrammet inom Elektroteknik på Chalmers Tekniska Högskola. Projektet har genomförts inom institutionen för elektroteknik. Projektet bygger på en vilja att utforska utvunnen solenergi genom riktningssystem. Vi vill tacka Thomas Hammarström för att ha varit handledare och examinator under exjobbperioden och för inköp av solceller för testning. Vi vill även tacka föreningen ETA på Chalmers för deras tillhandahållning av 3D-printers och verkstad i sina lokaler i EDIT-huset på Chalmers, och för en trevlig arbetsmiljö under konstruktionsfasen av Exjobbet.

Leo Landberg och Tobias Möllerstedt, Göteborg, Juni 2022



Contents

List of Figures	xiii
List of Tables	xv
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Precisering av Frågeställning	3
2 Teknisk Bakgrund	5
2.1 Funktionsprinciper	5
2.1.1 Solspårning	5
2.1.2 Solbanor	5
2.2 Mjukvara	5
2.2.1 Simulink	5
2.2.2 Autodesk Fusion 360	5
2.2.3 PrusaSlicer	6
2.3 Komponenter	6
2.3.1 Solpaneler	6
2.3.2 Generisk LDR	6
2.3.3 L298n Motordrivare	6
2.3.4 DC-motor	7
2.3.5 Arduino UNO	7
2.3.6 3d-skrivare	8
3 Metod	9
3.1 Simulationen	9
3.1.1 Programmets princip	9
3.1.2 Programmets uppbyggnad	10
3.1.2.1 Solposition	10
3.1.2.2 Lutningsvinst	10
3.1.2.3 Rotationsvinst	10
3.1.2.4 Sammanföring	11
3.1.3 Simuleringstester	12
3.2 Konstruktion	12
3.2.1 Ritning	12

3.2.2	Slicer/3d-skrivning	13
3.3	Programkod	13
3.3.1	Preprocessing	13
3.3.2	Setup	13
3.3.2.1	Pinmode	14
3.3.2.2	Serialvärden	14
3.3.2.3	Koden för funktionsanropen driveLR(); och driveUD();	15
3.4	Kretsdesign	18
4	Resultat	21
4.1	Simulationsresultat	21
4.2	Mätresultat från PV-systemet	23
5	Diskussion	25
5.1	Komplikationer	25
5.2	Simulering och test resultat	25
5.3	Lönsamhet	25
5.4	Klimateffekt	26
5.5	Uppföljning	26
6	Slutsats	27
6.1	Praktiska resultatet	27
6.2	Potential	27
6.3	Reflektion	27
6.4	Tillämpning och Användningsområden	28
	Bibliography	29
A	Appendix 1: Code	I
B	Appendix 2: Simulation	V

List of Figures

2.1	Kretsschemat för en H-brygga	7
3.1	Kretsschema kring Arduinoenheten	18
4.1	Årlig energitillgång för solceller med och utan PV-system	22
4.2	Energitillgång för månaderna i ett år med och utan vinkling	22
4.3	Värden Juni månad	23
4.4	4.1 ritad på graf	24

List of Tables

4.1	Effekt vid olika klockslag för solcellen	24
-----	--	----

1

Introduktion

1.1 Bakgrund

Samtidigt som energibehovet ökar har klimatfrågan blivit allt viktigare och efterfrågan av klimat vänligare energikällor efterfrågas. I ett sökande på grönare el har solenergin med sitt låga klimatavtryck blivit ett alltmer önskvärt alternativ. Begränsningarna i effektiviteten samt kostnaden har begränsat utbyggnaden av solenergi. Men med sjunkande kostnader för produktion och installation av solceller utgör det idag ett bra energialternativ även för privatpersoner.

Effektiviteten av ett Foto-voltaiskt system (PV-System), dvs den omkringliggande installationen kring en solcell, varierar dock kraftigt beroende på implementationen. Utöver plats på jordklotet och installationsvinkel beror även systemets effektivitet på dess utformning samt en rad externa faktorer.

Det är vanligt för solpaneler att installeras i ett stationärt läge, som på ett hustak. Men för större installationer involveras ofta någon form av solspårningssystem som vinklar panelen mot solen. Detta ökar effektiviteten hos systemet, och ger i teori en nettovinst i producerad energi.

Det är av intresse att undersöka hur implementering av ett styrsystem för solspårning kan göras på ett sätt så att energiupptaget av solcellen maximeras. Som förarbete utformas även en simulation av förväntad effekt gentemot en solcell som placerats i en fast vinkel. Detta är vad arbetet kommer att handla om.

1.2 Syfte

Genom att designa en rörlig plattform för solcellsinstallation kan vi ändra förutsättningarna för solexponeringen. Målet med arbetet är att undersöka fördelar och nackdelar med ett styrsystem till solceller och avväga vart ett sådant system skulle göra nytta. Genom att jämföra hur mycket potentialvinst som görs med en helt stationär solcell hoppas vi kunna identifiera ifall ett riktningssystem till solceller har konkreta användningsområden, och vilka avvägningar man skulle kunna göra i designprocessen för att öka effektiviteten av ett sådant system.

1.3 Avgränsningar

Då undersökningen avser hur mycket mer potentiell energi som kan utvinnas från en rörlig gentemot en stationär solcell, kommer eventuella externa faktorer inte diskuteras i detalj. Detta avser till exempel energiförluster med avseende på väderlek, skuggning från objekt i den närliggande miljön samt strålning från sekundära ljuskällor- dessa faktorer kan variera avsevärt beroende på tid och plats.

I undersökningen är det specifika förhållandet mellan den fastmonterade och den rörliga solcellen som är viktigast och inte det absoluta energivärdet i Joule / Watt som är intressant. Utöver detta är solbanan i simuleringarna en approximation som är dugligt för denna studie. Därmed får solbanan i simuleringarna anses som ett idealfall.

Då fysiska tester inte kan utföras över årets alla månader är testdata begränsad till att avse en mindre tidsperiod av ett fåtal dagar med klara väderförhållanden. Jämförelser kommer att vara mest aktuella för den tidsram då solpanelen har testats, och även om simulationen täcker hela året kan effektivitet gentemot modellen utanför denna tidsram enbart tas upp i diskussion.

Solcellens egenskaper och begränsningar tar vi inte upp i detalj då dessa varierar beroende på modell[1]- i testerna används samma sorts panel till alla fysiska tester, och därmed blir begränsningarna för alla tester lika. Solpanelers prestation påverkas också av förlängd exponering av solenergi då solpanelsinstallationerna blir för varma och verkningsgraden hos system påverkas negativt. Då det skulle bli dyrare att bygga installationer som klarade peakeffekten under en längre tid och då detta bara händer när det är mycket sol så är det mera ekonomiskt att välja en enklare installation. Men även om detta fenomen skulle förstärkas med vår konstruktion så väljer vi att bortse från detta då det både varierar mellan olika modeller samt är beroende av luftens temperatur och väder (luftfuktighet m.m). Det är också ett problem som naturligt blir mindre med tiden då effektivare solceller konverterar mera av solljuset till el och mindre till värme.

Solcellen kommer att utvecklas för bruk i Sverige, eller i allmänt för bruk på norra halvklotet, alltså att hänsyn kommer tas till hur solen rör sig längs himlen på nordligare längdgrader. [2] Detta leder till att vissa designaspekter som eventuellt kunde vara aktuella närmare ekvatorn bortses från.

Vad tilläggskostnaden för vår lösning kommer att kosta både i ekonomisk synvinkel såväl som miljökostnad kommer att tas med som diskussion och reflektion kring lönsamhet, däremot kommer ingen exakt kalkyl göras vad gäller ekonomisk vinst från systemet.

1.4 Precisering av Frågeställning

Begränsningarna för hur mycket el en solcellspanel producerar beror av flera faktorer, men den mest avgörande är exponeringen av solljus. Så grundidén med vårt projekt är att undersöka hur mycket mera exponering man kan åstadkomma med en rörlig plattform som kan rotera och vinkla solpanelen mot solen. För att hela tiden hålla solpanelen vinklärt mot solens position.

Systemet som riktar solcellen kan ses som en utökning till solcellspaketet. Men för att kunna avgöra om utökningen ger några positiva resultat så är det viktigt att uppskatta de utökade kostnaderna, både i ekonomisk hänsyn och med avseende på klimatavtryck, för att kunna avgöra vad utökningen skulle få för konsekvenser. I Detta arbetet kommer ingen data på detta utvärderas utan bara vara med som en reflektion under analyser och diskussioner.

Det är en sak att jämföra effektiviseringen mellan en rörlig panel och en installerad i den optimala fasta positionen. Men ibland finns det inte en optimal fast position då objektet som man installerar på inte har en fast position som till exempel en färja. Så därför vill vi kolla om det kan finnas tillämpningar när rörliga solceller har större användnings potential.

Vårt PV-system har två grader av frihet (rotation respektive lutning av solcellen). Dessa parametrar har olika betydelse för systemets energivinst beroende på vart på jordklotet systemet implementeras. Det som ska undersökas är vilken parameter som ger bäst verkan och vilka förutsättningar som gör den ena mer gynnsam än den andra. Det som antas är att rotation kommer att ge ett bättre resultat för vår geografiska position (Göteborg, Sverige) då solen speciellt på sommaren färdas relativt långt längs horisonten och stigningen över horisonten inte har så stor variation under dagen.

Frågeställningen:

- Hur mycket kan vi öka energiintaget för en solcell genom att vinkla den mot solen
- Hur mycket energi skulle ett sådant system förbruka.
- Skulle systemet vara ekonomiskt motiverbart.
- Vilka klimateffekter skulle systemet ge.
- Hur påverkar geografisk position implementeringen och effektiviteten av styrsystemet?

2

Teknisk Bakgrund

2.1 Funktionsprinciper

2.1.1 Solspårning

Solspårning är processen där en solcell via ett regelsystem (som kan vara passivt eller aktivt) rättar sig till att vara vinkelrät mot solens strålar. I det passiva fallet sker detta vanligtvis med cylindrar som innehåller gas eller vätska som expanderar när solens ljus värmer dem, vilket orsakar ett jämviktsläge beroende på applikationens utformning.

I det aktiva fallet är det vanligare med styrsystem som tolkar inkommande värden från ljuskänsliga komponenter (ex. Fotoresistorer).

2.1.2 Solbanor

Solens position på himmelen är avgörande för hur mycket solenergi som kommer ner till jordens yta. För att skapa en matematisk modell av banan behövde vi en godtycklig modell över hur solen färdas för vår geografiska position. SMHI data över solposition valdes som en trovärdig källa. Med hjälp av deras data skapades 12 olika scenarion som representerar var sin månad för Göteborgsregionen. Då de tester som vi är intresserade att utföra är relativa varandra så är inte den exakta modellen så viktig.

2.2 Mjukvara

2.2.1 Simulink

Simulink är en simulationsmiljö baserad på Matlab, där man kan simulera matematiska modeller och regelsystem. Simulink används i arbetet för att producera simulationer på olika scenarion för att få fram teoretiska resultat.

2.2.2 Autodesk Fusion 360

Autodesk Fusion 360 är en CAD-mjukvara som tillåter för parametrisk design av komponenter att 3d-printa. I projektet designas och 3d-printas delar för att undvika mycket av urval av specifika delar och logistiken kring att beställa dessa. Det blir även ett billigt alternativ, då produktionen tas hem till institutionen.

2.2.3 PrusaSlicer

Ett slicerprogram hjälper till att transformera en 3D-modell i form av en CAD-modell till ett skript som en 3D-printer kan använda. Programet kollar på CAD-modellen och beräknar hur en 3D-printer behöver jobba för att bygga upp denna. Skriptet som programmet kompilerar beskriver för en 3d-skrivare hur den ska röra sig och hur mycket material den ska mata ut och när. Den beskriver också vilka hastigheter och temperaturer 3d-skrivaren ska ha vid olika moment under processen. Prusaslicer kan också hjälpa användare att modifiera komponenten genom att ändra på 3d-modellen eller parametrarna som bestämmer hur utskriften ska genomföras. Det finns också verktyg som hjälper användaren skapa supportmoduler som hjälper till att stabilisera modellen under utskriften.

2.3 Komponenter

2.3.1 Solpaneler

En solpanel är uppbyggd av en mängd solceller som seriekopplas samt parallellkopplas för att åstadkomma en gemensam likströmsmatning som levererar energi från solpanelen.[3] Det finns idag några olika typer av solceller men de absolut vanligaste är kristallina kiselceller. Beroende på modell av panel så varierar prestanda och egenskaper. En viktig egenskap är solpanelens prestanda när solljuset kommer vinklat mot solpanelen.

2.3.2 Generisk LDR

En fotoresistor är en resistans som beror av ljuset som träffar dess yta. Detta åstadkommes genom att ena sidan av resistorn är P-dopad och andra är N-dopad. I mitten finns en kanal som kan släppa över elektroner. Då fotoner från en ljuskälla träffar denna kanal tillåter det elektronerna att röra sig friare mellan det P-dopade och N-dopade området, vilket leder till minskad resistans.[4]

2.3.3 L298n Motordrivare

Projektet använder en L298n Motordrivare för kontroll av rotationsriktning- och hastighet på motorerna som används.

Rotationsriktningen styrs via en H-brygga. På kretsplanet består en H-brygga av ett nät av 4 switchar i serie parallellt med matningsspänningen. Då kretsen matas med spänning flödar elektriciteten åt ena eller andra hållet beroende på vilken konfiguration som är aktiv.[5] Nedan visas kretsschemat.

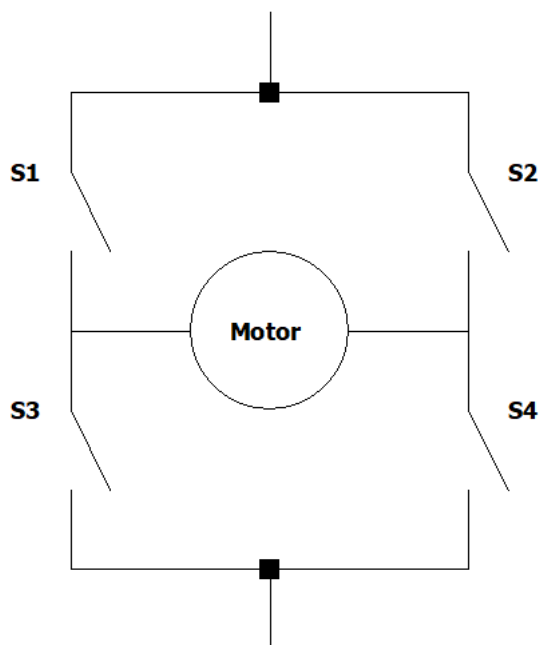


Figure 2.1: Kretsschemat för en H-brygga

Ovan beror motorns polaritet på om S1/S4 eller S2/S3 är i TILL-läge.

För rotationshastighet använder sig styrkretsen av PWM (Pulse Width Modulation). Styrkretsen har två extra inportar för denna sortens styrning. En styrsignal matas till dessa inportar, vilken definierar andelen av spänningen som bryggan driver motorn med. När PWM-portarna inte används driver H-bryggan motorn med full hastighet då signalen är aktiv.

H-bryggan matas med en spänning på mellan 5 och 35 volt. För logikstyrningen matas den med 5 volt (som med PWM kan variera mellan 0 och 5 Volt).

2.3.4 DC-motor

En komponent som omvandlar likström till roterande mekanisk energi genom att skapa ett magnetfält som roterar en axel. Motorerna som vi hade tillgång till har lågt vridmoment och får sin effekt genom ett högt varvtal. Därför valde vi motorer med en integrerad utväxlingsmekanism som gav ett högre vridmoment för en lägre hastighet på utgående axel.

2.3.5 Arduino UNO

Arduino UNO är ett mikrokontrollerkort som bygger på mikrokontrollern ATmega328P.[6] Kortet kan användas för att styra elektronik på många olika sätt. Programkod för

Arduino skrivs i en anpassad version av programmeringsspråket C kallad Wiring. Denna implementation är något nedskalad och ett program utgörs enbart av två delar; en setupfunktion som exekverar nödvändiga funktioner vid uppstart av programmet och en loopfunktion som anropas kontinuerligt medan programmet körs. Detta gör det enkelt att komma igång med programmering i Arduino.

2.3.6 3d-skrivare

En 3d-skrivare är en produktionsmaskin som kan producera komplexa komponenter från olika råmaterial- oftast plast. Den gör detta genom att läsa upp ett skript som definierar var en viss mängd material ska pressas ut i ett koordinatsystem som motsvarar arbetsytan. Skrivaren bygger sedan objektet som ska skrivas ut, lager för lager i höjdlängd. Genom att återupprepa denna process kan en 3d-skrivare producera komponenter.

3

Metod

3.1 Simulationen

3.1.1 Programmets princip

Första steget för att skapa en simulering där vi kan utvärdera konsekvenserna av solpanelens vinkel i förhållande till solens position är att ta fram en godtycklig representation av solens position på himlakroppen. Det viktiga är att modellen representerar den banan som solen färdas över himmelen i ett geografiskt område, till exempel mellersta Sverige. I denna simulering valdes solbanan för Göteborgsområdet som är tagen från SMHI.[7]

Nästa steg är att konvertera solens position till hur mycket solenergi som kommer ner till marknivå och träffar en yta som är vinkelrät mot solen. Detta görs genom att beräkna hur mycket atmosfär solstrålarna behöver passera för att nå solpanelerna. Detta betyder att den optimala vinkeln skulle vara om solen skulle lysa rakt ovanifrån för att minimera sträckan solen behöver passera. Men för Göteborg är maximala solvinkeln för året ungefär 55 grader om man räknar från horisonten och uppåt medan de under vinterhalvåret som minst kan uppnå enbart 10 grader. I denna stund har man all data som behövs för att ta fram hur mycket solenergi en solpanel som följer solens position kan maximalt utsättas för och också vilken energi den då kan generera om man bortser från alla förluster.

Denna data kommer vi nu använda som bas för att ta fram hur mycket energi man förlorar på att ha en fast monterad solpanel och även undersöka skillnaden mot att bara kunna rotera eller luta panelen. Förlusten som är relaterad till solpanelens vinkel mot solen kommer från de trigonometriska reglerna som beskriver hur mycket av panelen som solen ser. Där d är antalet grader från vinkelrät mot solen.

$$y = \cos(d) \tag{3.1}$$

Med andra ord hur stor andel av panelens totala area som exponeras för solen. Det vi då får ut är en faktor från noll till ett som beskriver hur stor procentuell förlust vi får kopplat till vinkeln.

Genom att sammanföra modellen för hur mycket solenergi som når marken med hur mycket förluster vi får genom att solpanelen inte är optimalt vinklad så får vi en ny modell som beskriver hur mycket energi en fast monterad solpanel kan förväntas utsättas för. Alternativt bara roterande eller lutande solpanel med den andra axeln fastlåst.

Som ett slutligt steg så kan vi integrera resultatet för att få det uttryckt i total mängd solenergi i kWh/m² som en solpanel blir exponerad för under en dag. Med den information kan vi sätta upp olika scenarion där panelens vinkel och solens position inverkan på hur vår energitillgång påverkas.

3.1.2 Programmets uppbyggnad

Programmet består av ett huvudprogram och tre sekundära program. Där de tre sekundära programmen skickar information till huvudprogrammet som sammanställer informationen till avläsbar information. Det första av dessa sekundärprogram skickar ett värde som representerar solens position medan de två andra skickar värden som representerar den förlust man har på grund av ej optimal vinkel mot solen i respektive lodrät och vågrät vinkel.

3.1.2.1 Solposition

Detta sekundärprogram består i grunden av en sinussignal som är manipulerad för att under simulerings processen leverera en sinuslik halv våg. Där dess värde i y-led representerar antalet grader solen stigit och dess värde i x-led representerar vart längs horisonten den befinner sig. Resultatet går att variera genom att ändra vågen för att representera olika månader under året.

3.1.2.2 Lutningsvinst

Ur programmet skickas ett värde mellan 0 och 1 som representerar hur mycket förlust som existerar på grund av att solpanelen inte är optimalt vinklad mot solen. För att kunna avgöra det så behöver man först bestämma vilken lutningsvinkel den hypotetiska solpanelen sitter monterad med. Här har 35 graders vinkel valts då det är en vanligt rekommenderad vinkel för göteborgsområdet för maximalt solupptag.[8] Genom att jämföra solens faktiska vinkel som fås från sekundärprogrammet Solposition kan man räkna ut hur mycket av solpanelen som solen ser. Denna faktor blir då vår förlust som skickas ut ur programmet.

3.1.2.3 Rotationsvinst

Här tas samma typ av data fram som i Förlust för ej vinklad men med utgångspunkt att solpanelen är riktad rakt söderut vilket är den optimala vinkeln för Göteborgs

området. Alltså är solen i sin högsta position när den befinner sig rakt söderut. Detta är också då solen står som högst på himlen alltså när vi har som mest potential solenergitillgång. Genom att utgå från detta läge som 0 procent förlust på grund av rotations vinkel så kan en förlustfaktor tas fram när solen rör sig från denna riktning. När solen vandrat så långt att inget direkt solljus träffar panelen är solens rotationsvinkel mer än 180 grader.

3.1.2.4 Sammanföring

I huvudprogrammet används all data från sekundärprogrammen för att göra informationen förståelig och lättläslig. Först körs värdet från Solposition genom en matematisk modell som omvandlar den från solvinkeln som funktion av tiden till solenergi i kW/m². Detta värde sammanförs med värdena från Förlust för ej lutande och Förlust för ej roterande vilket ger alternativa värden som säger till hur mycket av den potentiella energin som går förlorad. Med hjälp av lite integrering och sammanställning kan jag få informationen presenterad i lite olika format som gör olika delar av informationen lättare överskådlig.

3.1.3 Simuleringstester

De tester som behöver utföras i simuleringen är hur mycket Solenergi man går miste av på grund av att solpanelen är fastmonterad. Detta görs månad för månad för att få en förståelse för hur årstiderna påverkar resultatet. En sammanställning görs också så man får ett årsgenomsnitt. Dessa tester görs i tre variationer där man har olika mycket rörlighet i solpanelen med bara rotation eller bara lutande samt med båda. För att se vad som ger bäst utslag och vilka egenskaper systemen får.

3.2 Konstruktion

3.2.1 Ritning

I det första stadiet gjordes enkla skisser där funktionsprincipen realiserades på olika sätt. Efter några olika modeller bestämde vi oss för en konstruktion som vi trodde skulle uppfylla våra krav på funktion samtidigt som den skulle kunna byggas med de hjälpmedel och material som vi hade tillgång till. Konstruktionen bestod av ett stativ som skulle hålla uppe en disk som skulle kunna rotera. på disken placerade vi en ram som skulle hålla solpanelen på plats, denna ramen skulle sitta med ett gångjärnsmekanism på disken. Framför ramen placerade vi en vinsch som kunde lyfta ramen via en lina för att utföra lutningen.

Efter grundprincipen var framtagen började vi överföra idén till CAD-miljön Autodesk Fusion 360. Vi valde att inte ta fram några bestämda mått i förväg utan utgick istället från solpanelen vi hade och konstruerade en ram som passade runt denna. Längst upp på ramen hade vi en monteringsyta till solkorset vilket tillförde att solpanelen och korset fick samma orientering.

Med en färdig designad ram påbörjades designen av disken. Diskens storlek avgjordes av ramens mått och fick ett fäste som passade mot ramen. Fram på disken designades en repguide för att leda linan från ramen till en vinsch som ska monteras under disken. Under disken designas även en pinne som ska centrera disken samt ett kugghjul som drev.

Där efter konstruerades ett stativ med ett centralt hål där pinnen från disken ska placeras samt ett fäste till en motor som ska snurra disken genom att driva kugghjulet undertill disken.

Med detta var solföljardesignen i sin helhet färdig. Slutligen togs de delarna fram där man hade avvaktat med designen i ett tidigare skede på grund av osäkerhet kring mått och placering. Det första var ett till kugghjul som kan monteras på en elmotor och driva rotationen av disken. Det andra var ett motorfäste till elmotorn som drar i vinschlinan för att styra vinklingen. Den sista detaljen var solkorset som skulle monteras på ramen.

Slutligen designades också ett stativ till en sekundär solpanel för att ha som jämförelse till solfångaren.

3.2.2 Slicer/3d-skrivning

Tillgång till 3d-skrivare kom genom ETA (Elektrosektionens Teletekniska Avdelning) som hade 2 olika modeller tillgängliga. En Prusa mini samt en Prusa MK3S+ dessa två 3d-skrivare hade för våra behov samma funktion; skillnaden var att Prusa mini har en byggvolym på 18x18x18 cm medans Prusa MK3+ har en volym på 25x21x21 cm. Men under den tiden när vi gjorde våra utskrifter var Prusa MK3S+ trasig så vi fick nöja oss med den mindre.

För att producera alla komponenter i en 3d-skrivare så måste CAD-ritningarna göras om till ett slicer skript. För detta användes programmet Prusaslicer. Då utskriftsytan var mindre än den som vi räknat med under designfasen så fick vi dela upp vissa designer i 2-4 delar för att kunna skrivas ut. Detta ökade tiden det tog för utskrift, då det kunde vara kö för att använda skrivaren.

Alla utskrifter gjordes i PLA (PolyLactid) vilket är en lättbearbetad plast med bra hållfasthet.

När alla komponenter var utskrivna kunde vi bygga ihop vår solpanel med bara någon mindre omskrift på grund av toleransproblem.

3.3 Programkod

Logiken som används för att styra vår solpanel ges av programkoden i Appendix Y. Den förklaras även nedan steg för steg.

3.3.1 Preprocessing

För att kunna skriva till samt läsa av data från arduinoenheten måste en samling deklarationer göras som förklarar vilken variabel i programmet som kontrolleras, och hjälper till att strukturera arbetet medan koden utvecklas.

<code>valAr (1-4)</code>	Värdet på en LDR i ett nät av fyra resistorer
<code>lSide/rSide/uSide/dSide</code>	Medelvärden för två LDR:er på vänster/höger/upp/nersida
<code>diffUD/diffLR</code>	Differensen mellan upp/nersida samt vänster/högersida.
<code>pitchMSB/LSB (OUTPUT)</code>	Pinvärde för MSB/LSB vid vinkling av solcellen i sidled.
<code>yawMSB/LSB (OUTPUT)</code>	Pinvärde för MSB/LSB vid vinkling av solcellen i höjddled.
<code>writePWMpin (OUTPUT)</code>	Pinvärde för skrivning av PWM-värde till motordrivaren.

3.3.2 Setup

I setupdelen av ett arduinoprogram anger man vilka funktioner och tilldelningar som ska exekveras precis i början av programmets drift. Setup körs en gång innan programmet går vidare till att kontinuerligt exekvera den logik som utgör programmets huvuddel.

3.3.2.1 Pinmode

En pin definieras som en INPUT eller en OUTPUT i Arduinokoden. En pin på Arduino UNO deklarerad som en INPUT läser av värden på en inkopplad enhet, medan en pin deklarerad som en OUTPUT skriver värden till en inkopplad enhet. Tabellen ovan anger om en pin är satt till INPUT eller OUTPUT.

3.3.2.2 Serialvärden

I setup-delen av koden anropar man funktionen `Serial.begin(val)` för att etablera seriell kommunikation. Vid exekvering av koden kommer ett konsolfönster att öppnas upp på en ansluten dator. Där kan programmet exempelvis skriva innevarande värden på olika variabler med hjälp av anropet `Serial.println`.

Vid anrop av `serial.begin(val)` anger argumentet `val` vilken baudrate man vill använda. Baud är en enhet för datahastighet inom datakommunikation. En baudrate på 9600 baud motsvarar en dataström på 9600 bitar/sekund. För avläsning av variabler i programmet är detta mer än tillräckligt.

```
//Main

void loop() {
  //Call function to calibrate pitch position towards the sun
  driveRL();

  //Turn of LR Motor
  digitalWrite(pitchMSB, LOW);
  digitalWrite(pitchLSB, LOW);

  //Call function to calibrate yaw position towards the sun
  driveUD();

  //Set UD motor to low power to be able to keep solar cell in stable
  position
  analogWrite(writePWMPin, 70);
  digitalWrite(yawMSB, HIGH);
  digitalWrite(yawLSB, LOW);

  //Wait 8 seconds for reading of values from serial monitor
  delay(800);
```

Programmets huvuddel utgörs av anrop av två funktioner, `driveRL()` och `driveUD()`, samt ett antal funktionsanrop för att nollställa ändrade pinvärden efter att dessa funktioner har körts. `DriveRL/UD()` drivs av loopar som kör under bestämd tid, och avgör om solpanelen behöver korrigeras för att peka rakt mot solen. `driveRL()` korrigerar riktningen i sidled och `drive(UD)` i höjddled.

Efter att `driveRL()`; anropats och exekverat under ett tidsintervall behöver det logiska värdet som matas till DC-motorn ändras till LOW/LOW. (Detta motsvarar 00 binärt och stänger av motorn, så att solpanelen inte fastnar i att köra åt samma håll efter färdigt funktionsanrop.)

Sedan anropas `driveUD()`; för att utföra riktningen i höjddled. På grund av solpanelens konstruktion kan motordriften inte helt nollställas, då solpanelens tyngd skulle få den att ramla ner igen. En serie av funktionsanrop sätter höjddledsmotorn att dra uppåt med låg kraft för att motverka gravitationen. Efter dessa är en delay tillagd för debugging-syften, bland annat för att hinna läsa av värden på seriellkonsolen.

3.3.2.3 Koden för funktionsanropen `driveLR()`; och `driveUD()`;

<code>valAr (1-4)</code>	Värdet på en LDR i ett nät av fyra resistorer
<code>lSide/rSide/uSide/dSide</code>	Medelvärden för två LDR:er på vänster/höger/upp/nersida
<code>startTime</code>	Tidpunkt då <code>drive()</code> anropas.
<code>duration</code>	Tiden i millisekunder funktionen ska köras.
<code>endTime</code>	Summan av <code>startTime</code> och <code>Duration</code> .

```
void driveRL(){
  unsigned long startTime = millis();
  unsigned long duration = 5000;
  unsigned long endTime = startTime + duration;
  millis();
```

`Millis()`; är ett funktionsanrop som returnerar antalet millisekunder som har passerat sen arduinoenheten startades upp. På grund av att talet som returneras med tiden blir väldigt högt sparar man tiden till en unsigned long, vilket ger en ungefärlig tid på 50 dagar innan numret nollställs (Overflow).

I vår kod används `millis()`; för tidskontroll. En tid i millisekunder `duration` ställs in i programkoden, och summan av ett anrop `millis()`; och `duration` sparas i en unsigned long `endTime`. Sedan anropas `millis()`; kontinuerligt i en while-loop, som slutar då returvärdet är större än `endTime`. Därav blir det möjligt att köra funktioner ett förbestämt antal sekunder.

```
while(millis() < endTime){
  digitalWrite(yawMSB, LOW);
  digitalWrite(yawLSB, LOW);
  /*DO Automatic routine*/
  valAr1 = analogRead(A0); // read the input pin
  valAr2 = analogRead(A1); // read the input pin
  valAr3 = analogRead(A2); // read the input pin
  valAr4 = analogRead(A3); // read the input pin

  lSide = (valAr1 + valAr3) / 2;
  rSide = (valAr2 + valAr4) / 2;
  diffLR = rSide-lSide;
  if(rSide >= lSide ) {
    if(abs(diffLR) > 20){
      digitalWrite(pitchMSB, HIGH);
      digitalWrite(pitchLSB, LOW);
    }
    else if(abs(diffLR) < 20){
```

3. Metod

```
    digitalWrite(pitchMSB, LOW);
    digitalWrite(pitchLSB, LOW);
}
```

Funktionen utgörs av en whilesats som körs under den tid vi definierat, här 5 sekunder. Så länge whilesatsen körs hämtas värden från arduinons analoga inportar, vilka motsvarar spänningen som ligger över vardera LDR på solpanelen. Denna spänning översätts till ett nummer mellan 1 och 1023. Den högsta nivån är 5V.

Sedan fås medelvärden för de kombinationer av ljusresistorer som sitter på olika sidor, främst för att kunna ignorera eventuella resistansskillnader hos komponenter trots identiska ljusförhållanden.

```
    }
    else if(lSide > rSide) {
        if(abs(diffLR) > 20){
            digitalWrite(pitchMSB, LOW);
            digitalWrite(pitchLSB, HIGH);
        }
        else if(abs(diffLR) < 20){
            digitalWrite(pitchMSB, LOW);
            digitalWrite(pitchLSB, LOW);
        }
    }
```

Medelvärdet av de olika sidorna jämförs med varann och bestämmer åt vilket håll DC-motorn körs. Satserna ovan definierar en dödzon på 20 punkter ($20 \cdot 5 / 1024 = 0,1$ V) där DC-motorn inte längre körs. Anledningen är att när DC-motorn slås av tar det en fraktion av en sekund för drivaxeln att sluta snurra. Under denna tid överskjuts målet, och programmet kommer försöka korrigera åt andra hållet. Detta gör att då panelen är vinkelrät mot solen kommer motorn alltid att försöka korrigera för en grads skillnad, vilket kostar mer energi i motordrift än vinsten från gradskillnaden är värd.

```
    }
    else{
        digitalWrite(pitchMSB, LOW);
        digitalWrite(pitchLSB, LOW);
    }
}
```

Sist skrivs att om differensen i resistans mellan två sidor av korset är inom det accepterade intervallet kommer motordriften slås av.

Med undantag från skillnader i vissa variabler (avsedda PINS för drift av annan motor samt andra kombinationer av LDR:er för höjdledsfallet) är `driveUD()`; nästintill likadan. Den enda skillnaden relevant för diskussion är följande sats:

```
if(uSide >= dSide ) {  
  
    if(abs(diffUD)>30){  
        analogWrite(writePWMPin, 50);  
        digitalWrite(yawMSB, LOW);  
        digitalWrite(yawLSB, HIGH);  
    }  
    else if(abs(diffUD)<30){  
        digitalWrite(yawMSB, LOW);  
        digitalWrite(yawLSB, LOW);  
    }  
}  
else if(dSide >= uSide ) {  
    if(abs(diffUD)>30){  
        analogWrite(writePWMPin, 220);  
        digitalWrite(yawMSB, HIGH);  
        digitalWrite(yawLSB, LOW);  
    }  
    else if(abs(diffUD)<30){  
        digitalWrite(yawMSB, LOW);  
        digitalWrite(yawLSB, LOW);  
    }  
}  
else{  
    digitalWrite(yawMSB, LOW);  
    digitalWrite(yawLSB, LOW);  
}  
}
```

Då motorn drivs i höjdlöd kompenserar den för solpanelens tyngd. Motordriften är satt till lägre när panelen sänks ($50 / 255 = 20\%$) för att inte sänka panelen snabbare än programmet kan svara. På vägen upp ges mycket mer kraft ($220 / 255 = 86\%$) för att motorn ska orka arbeta mot gravitationen. Hade full motorkraft istället applicerats hade motorn återigen korrigerat för snabbt.

3.4 Kretsdesign

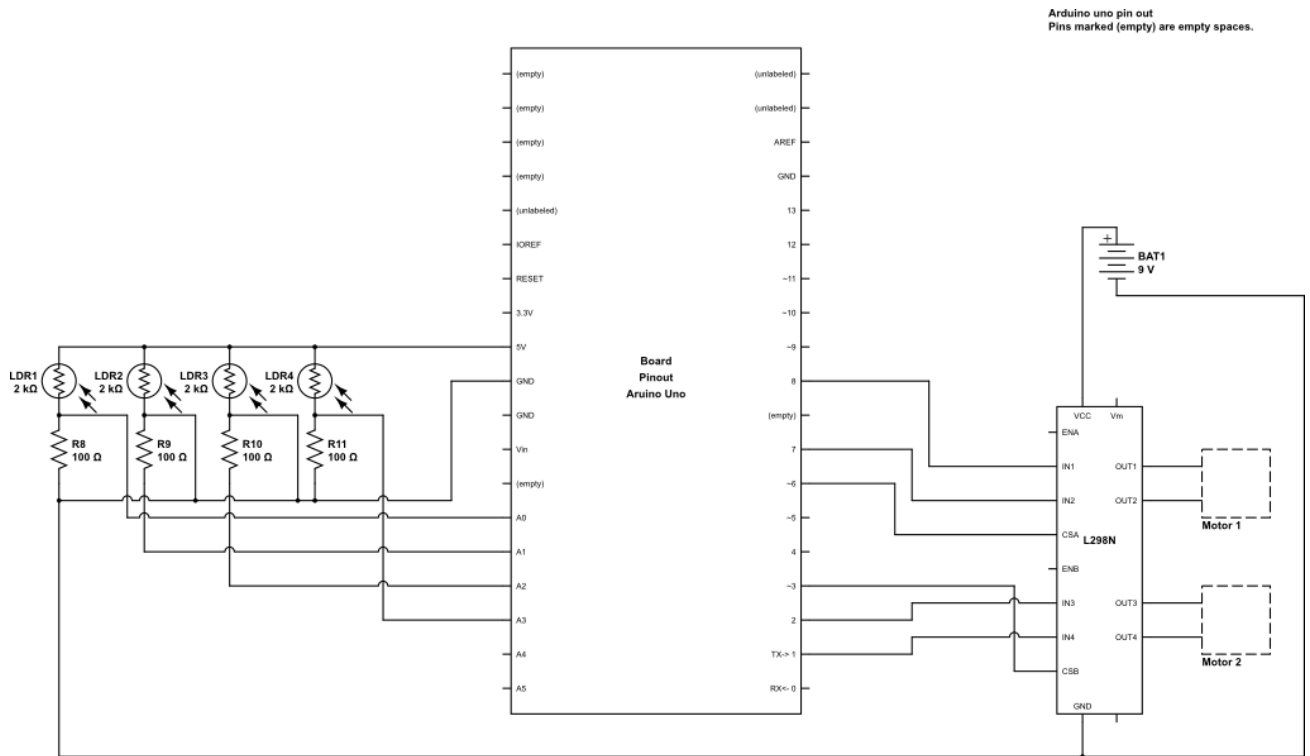


Figure 3.1: Kretsschema kring Arduinoenheten

För att mäta ljusnivån på LDR:erna behöver de analoga portarna på Arduinoenheten (A0-A3) vara inkopplade mellan fotoresistorn och en resistor. På vänstersidan av figur 3.1 syns spänningsdelningarna, där spänningen över en resistor på 100 ohm mäts. Fotoresistorens resistivitet minskar med högre ljusnivåer, vilket gör att en högre andel av 5-Voltsspänningen som kretsen matas med ligger över den vanliga resistorn. Sambandet för spänningsdelningen är som följer:

$$V_{a0} = V_r = 5V * ((R)/(R_{pr} + R)) \quad (3.2)$$

Där spänningen i mätpunkten för a0 är lika med spänningen över resistorn, vilket är matningsspänningen multiplicerat med kvoten av resistorns resistans och den totala resistansen.

4 av dessa spänningsdelningar är parallellkopplade och har en mät punkt vardera som går till A0-A3 på Arduinon. Matningsspänningen kommer från Arduinon, och alla spänningsdelare har gemensam jordning.

På högersidan av Arduinon syns motordrivaren L298N. CSA och CSB är inportar för en PWM-signal, som ges från programmerbara pins som märks med (), vilket

antyder att pinnen har stöd för att sända och ta emot en PWM-signal. PIN-paren 1, 2 och 7, 8 får agera utportar; dessa bestämmer motordriften för vardera motor. L298N matas med ett 9V-batteri och har gemensam jord mellan sig och Arduinon. Arduinon får under våra tester spänning från en bärbar dator, men kan även matas med ett 9V-batteri (då seriell data avläses för att felsöka under mätningar användes USB-matningen under tester.)

4

Resultat

4.1 Simulationsresultat

Från simuleringsdatan kan vi utläsa att energitillgängligheten för en fast monterad solpanel med 35 graders vinkel är runt 1918 kWh/m² under ett år, jämfört med 3313kWh/m² per år för solpaneler som följer solbanan. Detta är en ökning på ungefär 72 procent. För solpaneler som är begränsade till enbart vinkling blir energitillgängligheten 1982 kWh/m² per år och för solpaneler med enbart rotation blir energitillgängligheten 3200 kWh/m² per år.[Figur 4.1]

När man delar upp året till sina 12 månader och kollar på energitillgången under ett dygn ser man ett tydligt mönster. Under Januari och December får vi den lägsta energitillgängligheten ca 2kWh/m² per dygn för en fast monterad solcell och en fullt rörlig solpanel ger en ökning av detta på ca 10 procent. Medan under Juni och Juli får vi den högsta energitillgängligheten ca 7 kWh/m² per dygn för en fast monterad vilket ökar till ca 15 kWh/m² per dygn med en fullt rörlig panel, vilket ger en ökning på ca 115 procent. [Figure 4.2]

Om man tittar på energitillgängligheten under ett dygn så ser man en tydlig skillnad mellan en fast monterad pannel och en fullt rörlig (denna för juni där grön är rörlig och blå fast i kW/m²). [Figure 4.3]

4. Resultat

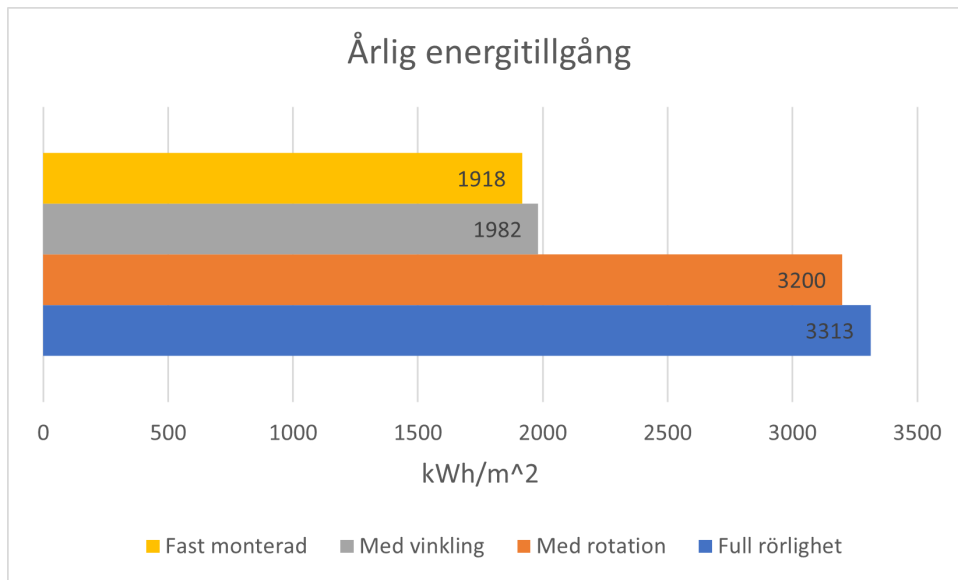


Figure 4.1: Årlig energitillgång för solceller med och utan PV-system

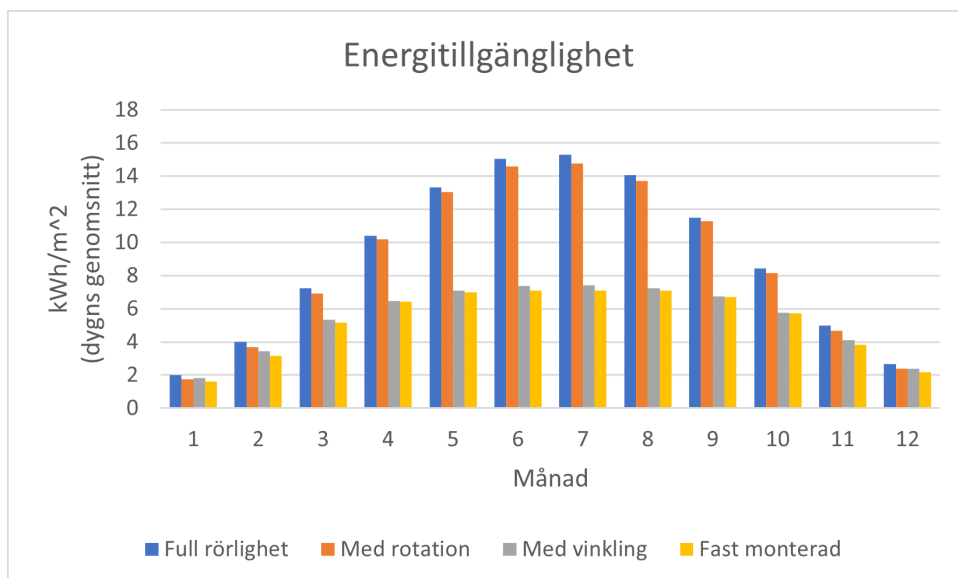


Figure 4.2: Energitillgång för månaderna i ett år med och utan vinkling

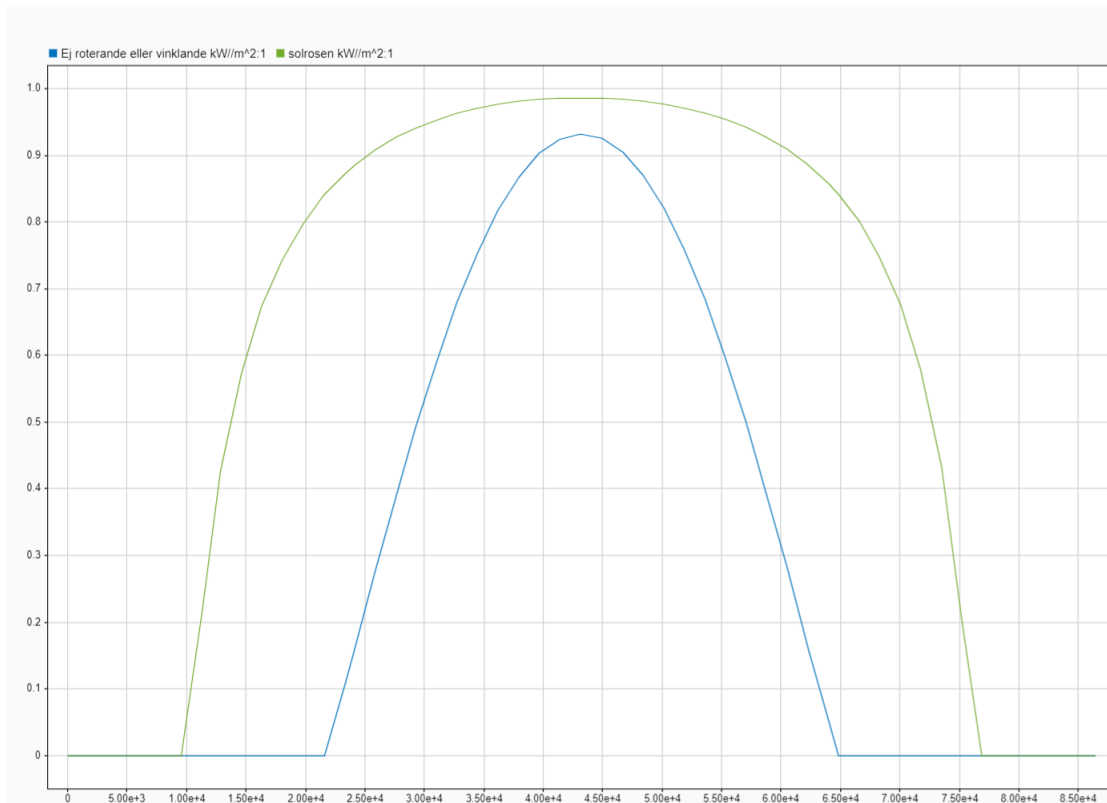


Figure 4.3: Värden Juni månad

4.2 Mätresultat från PV-systemet

De första mätvärdena för den färdiga riggen togs under December. För simpelhetens skull togs ett par stickprover flera gånger under dagen för att mäta effekten som solcellen gav då den antingen var monterad i PV-systemet eller i ett 3d-printat stativ med den s.k "Optimala vinkeln", dvs 35 grader, placerad i söderläge. Dessa tester blev svårtydda på grund av stora variationer i värden som kom sig av svårigheter att hitta bra testmiljöer där solen inte skymdes av hus och träd på grund av den låga solvinkeln. Samt otur med mycket och varierande molntäcke samt snö och regn. Flera tester gjordes sedan i Juni som blev stabilare och där ett tydligt mönster kunde avläsas.

4. Resultat

Klockslag	Riktad	Oriktad
5	0,01 < W	0,01 < W
6	0,08 W	0,01 < W
7	0,16 W	0,01 < W
8	0,20 W	0,02 W
9	0,25 W	0,07 W
10	0,29 W	0,19 W
11	0,30 W	0,26 W
12	0,30 W	0,30 W
13	0,30 W	0,30 W
14	0,30 W	0,30 W
15	0,30 W	0,26 W
16	0,29 W	0,20 W
17	0,24 W	0,06 W
18	0,21 W	0,02 W
19	0,18 W	0,01 < W
20	0,10 W	0,01 < W
21	0,01 < W	0,01 < W

Table 4.1: Effekt vid olika klockslag för solcellen

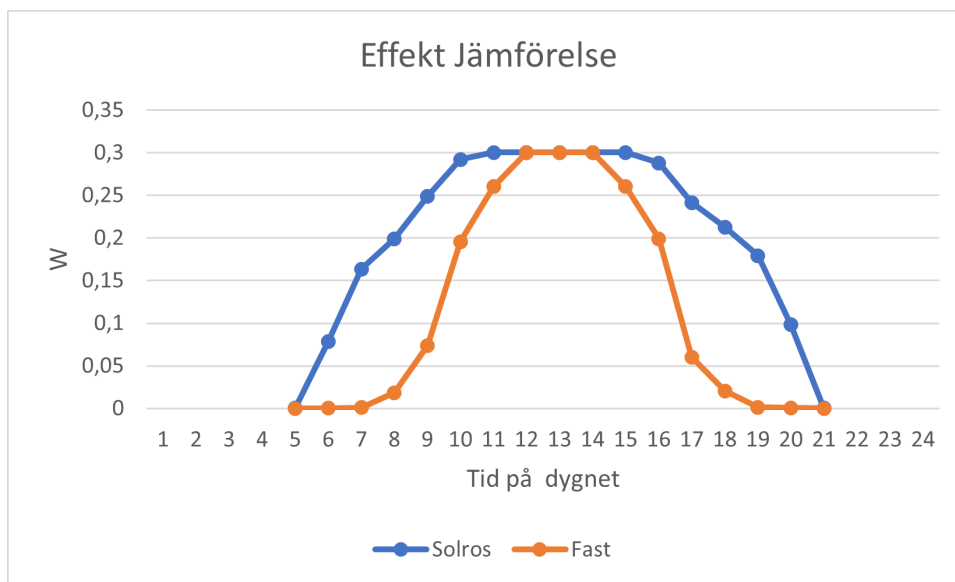


Figure 4.4: 4.1 ritad på graf

5

Diskussion

5.1 Komplikationer

Det första steget för att kunna bygga ihop solfångaren var att printa ut alla designade delarna. I detta skedet tillkom de största komplikationerna under projektet från tre faktorer.

Den första var bristande kunskaper om begränsningar som avgränsar vad en 3D-printer klarar av att skriva ut. Detta medförde att en del designlösningar fick modifieras samt i vissa fall delas upp i flera komponenter som sedan kunde monteras samman.

Den andra felberäkningen var tiden för en utskrift, som underskattades- Vilket förvärrades av bristen på tillgänglighet av 3D-printer. På ETA där all 3D-printer-konstruktion ägde rum finns det två stycken printrar. Men under vår konstruktions tid var en trasig, vilket ökade kötiden på den som var kvar. Vilket leder till den största faktorn som komplicerade tillverkningen. Under designen hade vi räknat med att ha tillgång till en viss 3D-printer vilket gjorde att vi designade alla delar för att få plats på dennas printeryta. Men då denna maskinen var trasig och den enda andra 3D-printern som fanns tillgänglig var mindre medförde detta att flera delar inte fick plats i den mindre skrivaren. Detta resulterade i att de delarna som var för stora fick separeras och printas i flera delar som sedan fick monteras ihop vilket både påverkade tiden samt hållfastheten på dessa komponenter.

5.2 Simulering och test resultat

På grund av begränsningar i hur mycket testresultat vi kunde samla in under arbetet så går inte denna datan att använda för att dra några konkreta beslut. Istället användes denna datan för att utvärdera hur pålitlig simuleringsresultaten var, genom att jämföra ett simuleringsresultat med verkligheten och analysera om datan visar jämförbara tendenser.

5.3 Lönsamhet

Det vi kunde konstatera är att det finns stora potentialer att öka energitillgängligheten för solpaneler genom att montera dem på solföljare. Det vi inte har analyserat så noga är hur mycket dyrare installationen och driften skulle

bli. Det som talar emot lönsamheten är att den extra tillgängligheten av energi tillkommer på sommaren när priserna oftast är lägre än genomsnittet. [9]

5.4 Klimateffekt

För att avgöra om det finns en klimat vinst att få behövs data på produktionsutsläpp. om den ökade energiproduktionen kan kompensera de utsläpp som blir vid tillverkningen av de extra komponenter som krävs samt den energi som förbrukas under användning.

5.5 Uppföljning

Ett uppföljnings projekt skulle kunna analysera hur mycket energi och resurser ett system som kan rotera på solceller skulle dra per m² och utvärdera om slutresultatet skulle vara tillräckligt bra för att applicera i till exempel solparker.

6

Slutsats

6.1 Praktiska resultatet

Resultatet från de praktiska testerna med solfångaren användes för att testa om simuleringsdatan har någon förankring i verkligheten. Det vi kan se när man analyserar resultaten mellan simuleringen för Juni och testvärdena för Juni är att dom följer samma mönster. Men mitt under dagen når vår testutrustning sin mätnads grad och får därför en plåtå när solen står som högst på himmelen. Det är dock tydligt att när solpanelen följer solen så uppnår den denna mätnaden under en längre tid. Resultatet tyder på att simuleringsresultaten är överensstämmande med verkligheten.

6.2 Potential

Resultaten visar på att det finns stora potentiella energivinster med att ha solpaneler som följer solen. Däremot fås nästan hela delen av den ökade potentialen från rotationen medan effektvinsten från vinklingen är nästintill försumbar. Därför drar vi slutsatsen att det är effektivare att konstruera ett system som endast roterar en solpanel medan den har en fast vinkel. Detta skulle resultera i ett mycket enklare och billigare system utan att minska energipotentialen markant.

Under Juni och Juli färdas solen en längre sträcka över himlen. Detta gör att ett PV-system som följer solen har större effektvinst än en fastmonterad solpanel, som i princip har samma potential under hela sommarhalvåret.

6.3 Reflektion

En solföljare till solceller har mest vinning på vår och höst då energibehovet fortfarande är relativt stort på grund av svalare utomhustemperaturer. Även om solföljarens effektvinster blir högre på sommaren så minskar samtidigt energibehovet i landet med undantag när det blir så varmt så att AC-system behöver jobba tungt. Förvisso kan energiöverskott potentiellt lagras i batterier; men energilagring av solenergi fortsätter att vara ett stort dilemma.

På vintern är det möjligt att effektökningen blir så liten att systemdriften inte kompenseras. Men då vi inte har möjlighet att få fram ett entydigt svar på hur

mycket ett PV-system drar (då åtgången beror kraftigt på implementeringen av ett sådant system) så kan vi inte svara på den sanna vinsten från systemet. Men om nettovinsten är för liten eller till och med negativ så kanske det är bättre att avaktivera det under vintermånaderna.

6.4 Tillämpning och Användningsområden

Ett PV-system skulle kunna användas på en solcellspark där fördelen är att installationen är enklare än till exempel på ett hustak och solcellsparkens energipotential skulle öka markant. Nackdelen är att merparten av den extra potentialen tillkommer under sommaren då elen är billigare. Så potentialen skulle behöva analyseras från en ekonomisk vinkel eftersom ett system som vinklar solcellerna skulle bidra med en merkostnad både vid drift och inköp.

En annan fördel är att man kan få ut mera potential/m² solpanel speciellt på sommaren. Vilket kan vara bra då mindre solpaneler behövs för att täcka samma effektbehov. Speciellt när monterings utrymmen är begränsade.

Ett alternativ när en solföljare kan vara extra användbar är fritidsbåtar, då dessa i princip bara används på sommaren när en solriktare har högst potential.

Samtidigt är ytan på dessa mycket begränsad och det är omöjligt att montera fasta solceller i en optimal vinkel på ett rörligt objekt.

Bibliography

- [1] I. Geisemeyer et al., "Angle Dependence of Solar Cells and Modules: The Role of Cell Texturization," in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 7, no. 1, pp. 19-24, Jan. 2017, doi: 10.1109/JPHOTOV.2016.2614120.
- [2] William David Lubitz, Effect of manual tilt adjustments on incident irradiance on fixed and tracking solar panels, Applied Energy, Volume 88, Issue 5, 2011, Pages 1710-1719, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.008>.
- [3] SEK Svensk Elstandard, Solceller Råd och regler för elinstallationen, Kista: SEK Svensk Elstandard 2019 E-bok
- [4] Bengtsson L. Elektriska mätsystem och mätmetoder, Lund, 2012
- [5] Mohan, Underland, Robbins, "Power Electronics - Converters, Applications and Design", p.188-194, Hoboken, 2003
- [6] Arduino UNO R3 Product Reference Manual, Monza, Italy, Juni 2021
- [7] Vad är ett solbandediagram?, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, Svenska Statan, 2021, <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/vad-ar-ett-solbandediagram-1.31981> (Acc 2022-03-13)
- [8] Så undersöker du förutsättningarna för solel, Energimyndigheten, Statens Energimyndighet, Svenska Statan, 2021, <https://www.energimyndigheten.se/fornybart/solelportalen/har-mitt-hus-ratt-forutsattningar/sa-undersoker-du-forutsattningarna/> (Acc 2022-02-15)
- [9] Prishistorik över rörligt elpris, Vattenfall AB, Svenska Statan, <https://www.vattenfall.se/elavtal/elpriser/orrligt-elpris/prishistorik/>

A

Appendix 1: Code

```
unsigned int valAr1, valAr2, valAr3, valAr4, lSide, rSide, uSide, dSide,
    diffUD, diffLR;
int pitchMSB = 7;
int pitchLSB = 8;

int yawMSB = 5;
int yawLSB = 6;

const int writePWMpin = 11;

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    pinMode(pitchMSB, OUTPUT);
    pinMode(pitchLSB, OUTPUT);
    pinMode(yawMSB, OUTPUT);
    pinMode(yawLSB, OUTPUT);
    pinMode(writePWMpin, OUTPUT);

    Serial.begin(9600);        // setup serial
}
/*-----*/
void loop() {
    // put your main code here, to run repeatedly:

    driveRL();
    digitalWrite(pitchMSB, LOW);
    digitalWrite(pitchLSB, LOW);

    driveUD();
    analogWrite(writePWMpin, 70);
    digitalWrite(yawMSB, HIGH);
    digitalWrite(yawLSB, LOW);
    delay(800);
}
/*-----*/
void driveRL(){
    unsigned long startTime = millis();
```

A. Appendix 1: Code

```
unsigned long duration = 5000;
unsigned long endTime = startTime + duration;

while(millis() < endTime){
  digitalWrite(yawMSB, LOW);
  digitalWrite(yawLSB, LOW);
  /*DO Automatic routine*/
  valAr1 = analogRead(A0); // read the input pin
  valAr2 = analogRead(A1); // read the input pin
  valAr3 = analogRead(A2); // read the input pin
  valAr4 = analogRead(A3); // read the input pin

  lSide = (valAr1 + valAr3) / 2;
  rSide = (valAr2 + valAr4) / 2;
  diffLR = rSide-lSide;

  Serial.print("Arr 1: ");
  Serial.println(valAr1);           // debug value
  Serial.print("Arr 2: ");
  Serial.println(valAr2);
  Serial.print("Arr 3: ");
  Serial.println(valAr3);
  Serial.print("Arr 4: ");
  Serial.println(valAr4);
  Serial.println("-----");

  Serial.println(rSide);
  Serial.println(lSide);

  if(rSide >= lSide ) {
    if(abs(diffLR) > 20){
      digitalWrite(pitchMSB, HIGH);
      digitalWrite(pitchLSB, LOW);
    }
    else if(abs(diffLR) < 20){
      digitalWrite(pitchMSB, LOW);
      digitalWrite(pitchLSB, LOW);
    }
  }
  else if(lSide > rSide) {
    if(abs(diffLR) > 20){
      digitalWrite(pitchMSB, LOW);
      digitalWrite(pitchLSB, HIGH);
    }
    else if(abs(diffLR) < 20){
```



```
        digitalWrite(pitchMSB, LOW);
        digitalWrite(pitchLSB, LOW);
    }

}
else{
    digitalWrite(pitchMSB, LOW);
    digitalWrite(pitchLSB, LOW);
}
}
}

void driveUD(){
    unsigned long startTime = millis();
    unsigned long duration = 80;
    unsigned long endTime = startTime + duration;

    while(millis() < endTime){
        /*DO Automatic routine*/
        valAr1 = analogRead(A0); // read the input pin
        valAr2 = analogRead(A1); // read the input pin
        valAr3 = analogRead(A2); // read the input pin
        valAr4 = analogRead(A3); // read the input pin

        uSide = (valAr1 + valAr2) / 2;
        dSide = (valAr3 + valAr4) / 2;

        diffUD = uSide-dSide;

        Serial.print("Arr 1: ");
        Serial.println(valAr1);           // debug value
        Serial.print("Arr 2: ");
        Serial.println(valAr2);
        Serial.print("Arr 3: ");
        Serial.println(valAr3);
        Serial.print("Arr 4: ");
        Serial.println(valAr4);
        Serial.println("-----");
        Serial.println();

        Serial.println(uSide);
        Serial.println(dSide);

        if(uSide >= dSide ) {

            if(abs(diffUD)>30){
                analogWrite(writePWMPin, 50);
                digitalWrite(yawMSB, LOW);
                digitalWrite(yawLSB, HIGH);
            }
        }
    }
}
```

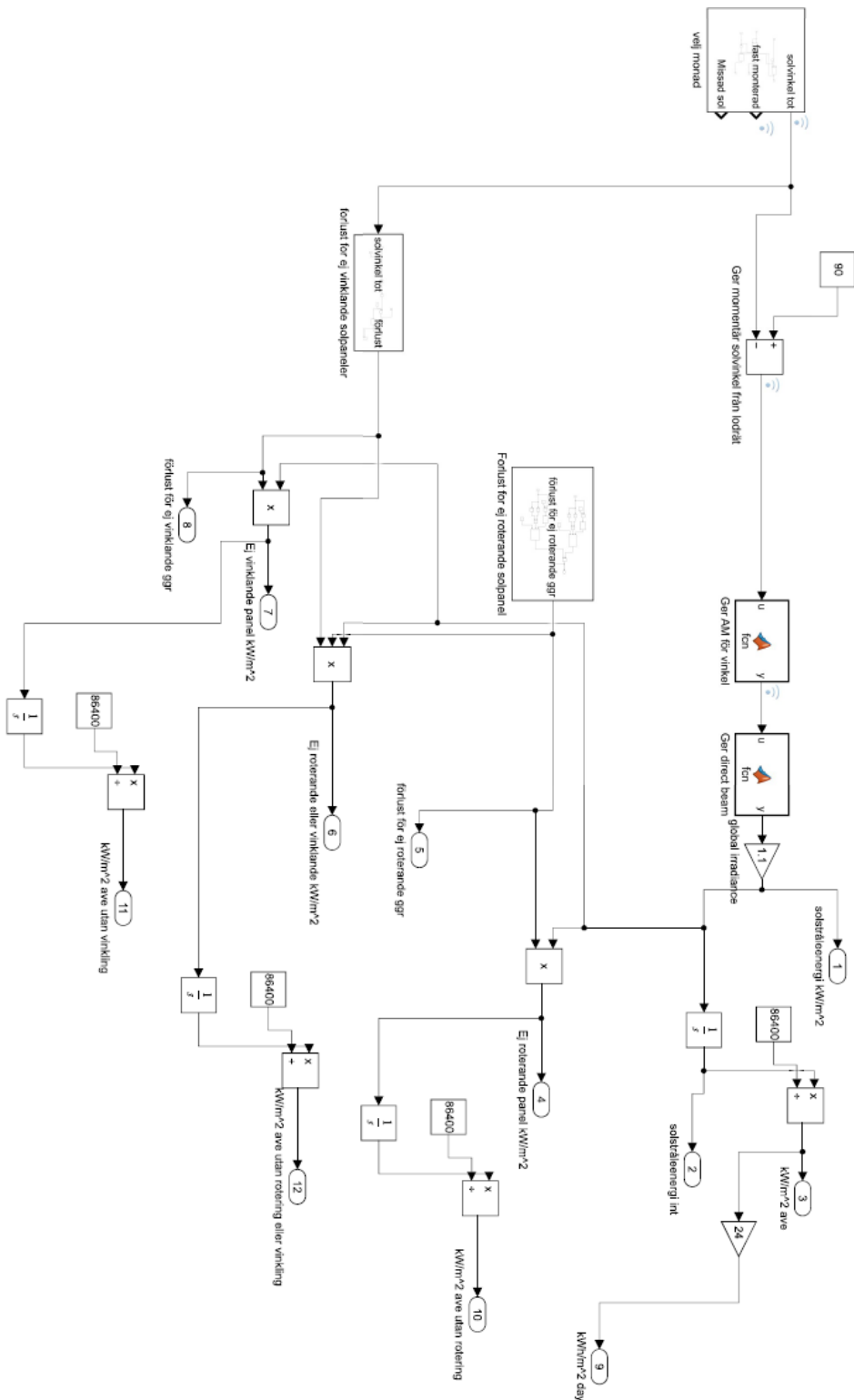
A. Appendix 1: Code

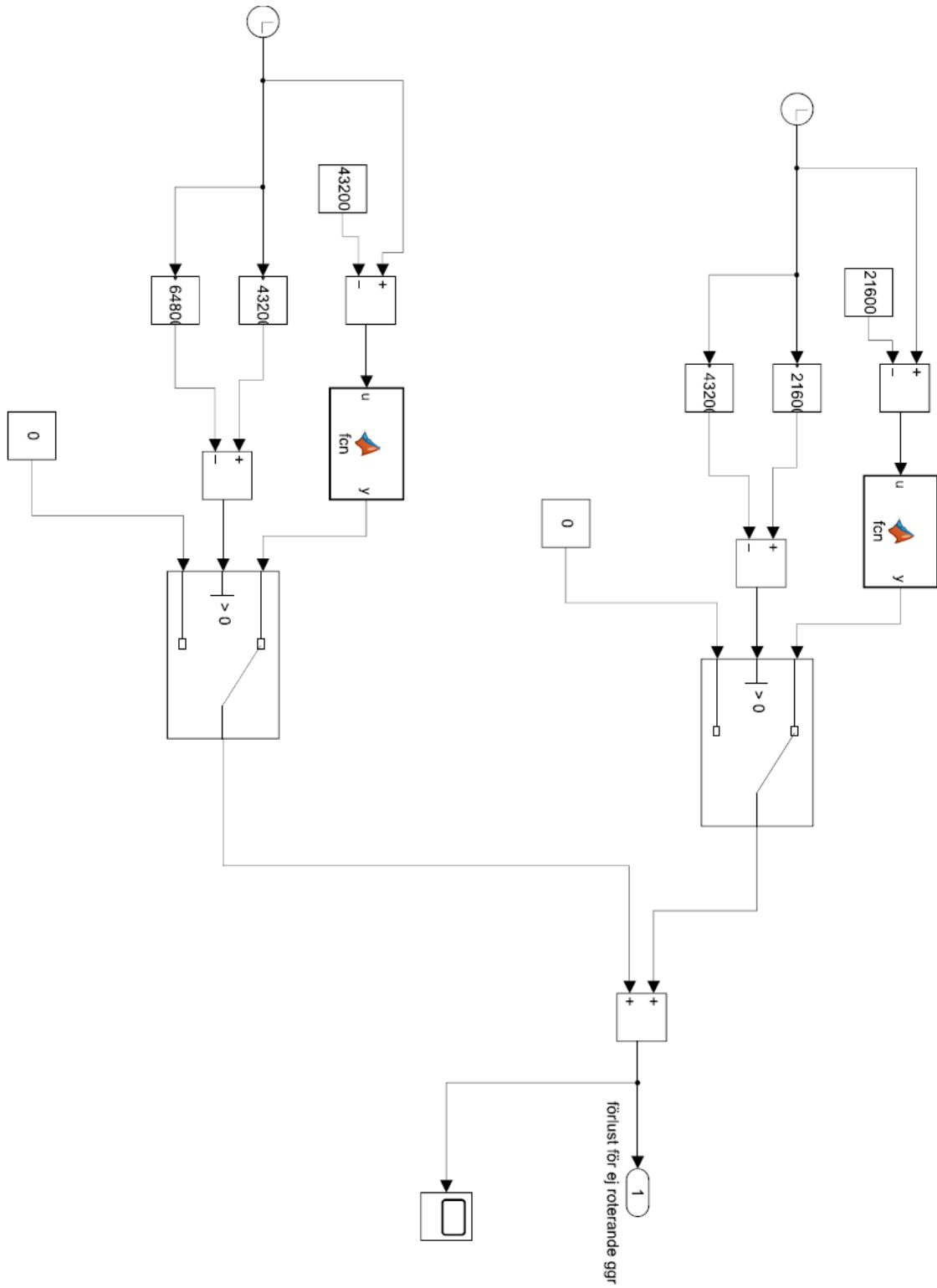
```
    }
    else if(abs(diffUD)<30){
        digitalWrite(yawMSB, LOW);
        digitalWrite(yawLSB, LOW);
    }

}
else if(dSide >= uSide ) {
    if(abs(diffUD)>30){
        analogWrite(writePWMPin, 220);
        digitalWrite(yawMSB, HIGH);
        digitalWrite(yawLSB, LOW);
    }
    else if(abs(diffUD)<30){
        digitalWrite(yawMSB, LOW);
        digitalWrite(yawLSB, LOW);
    }
}
else{
    digitalWrite(yawMSB, LOW);
    digitalWrite(yawLSB, LOW);
}
}
}
```

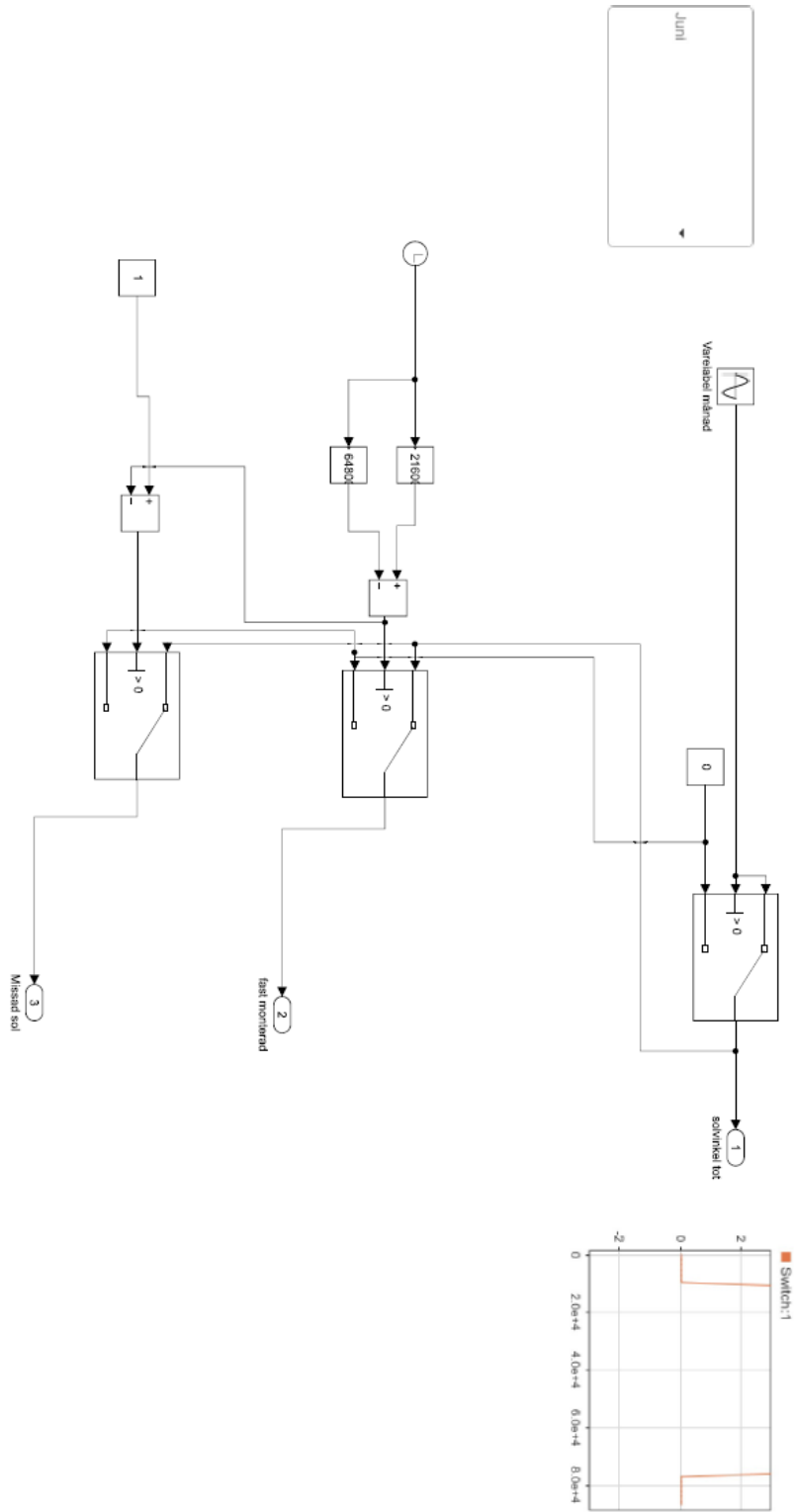
B

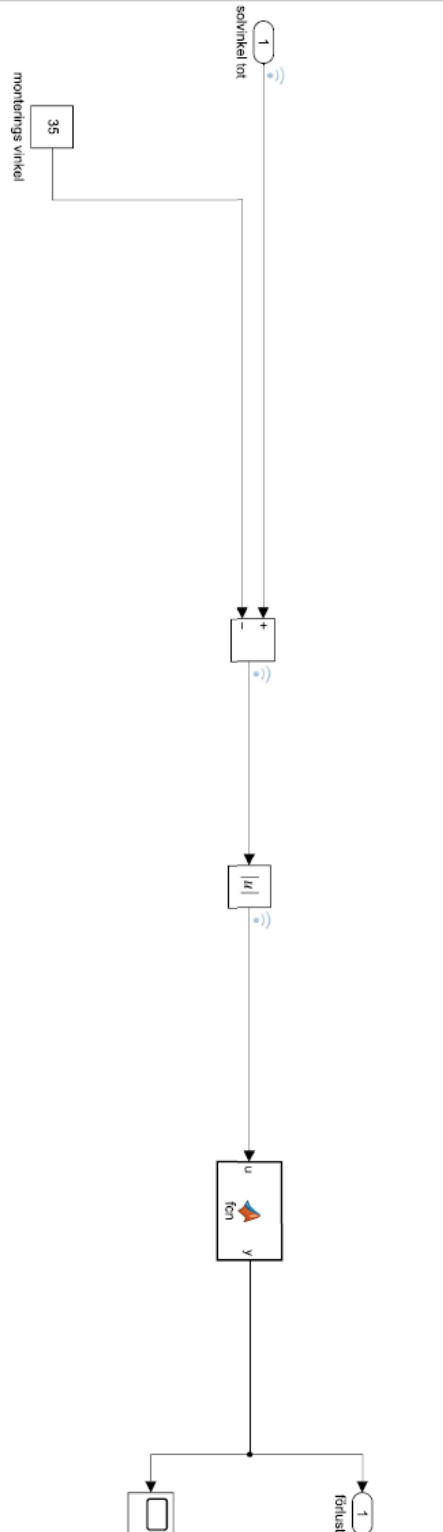
Appendix 2: Simulation





B. Appendix 2: Simulation







CHALMERS