

Steelstream

Slutrapport i kursen EN1020, Elektroprojekt del 2



Grupp 1

Maichl Hendi

Tomas Matty

Mohammed Abbas

Tim Persson

Mostafa Alkousa

Giovanni Reichard

2024-05-29

Kungliga Tekniska högskolan, Stockholm

Innehåll

Abstract	2
1. Inledning	3
1.1 Bakgrund och syfte	3
1.2 Problembeskrivning	3
2. Kravspecifikation	3
2.1 Tekniska krav	3
2.2 Miljökrav	3
2.3 Budget och tid	4
3. Systemdesign	4
3.1 Övergripande koncept	4
3.2 Spolar och drivning av kulan	4
3.3 Drivsystem och styrning	6
3.4 Beräkning av hastighet	6
4. Delsystemtester	7
4.1 Spolar	7
4.2 Styrsystem	7
4.3 Mikrokontroller och mjukvara	8
5. Slutlig konstruktion och verifikation	9
5.1 Elektriska schemat	9
5.2 Mekaniskt utförande	10
5.3 Kravverifikation	10
6. Diskussion	12
6.1 Projektgenomförande	12
6.1.1 Intro	12
6.1.2 Kretsen och komponenter	13
6.1.3 Design	13
6.2 Hållbarhet	14
6.3 Förslag till systemförbättringar	14
Referenser	16
Bilaga A: Programkoden	17
Bilaga E	21

Sammanfattning

Projektet Steelstream utfördes med målet att konstruera en cirkulär bana där en stålkula kontinuerligt drevs av magnetfält genererade av kopparspolar, med hjälp av en superkondensator som extern strömkälla. Projektgruppen ställdes inför tekniska utmaningar, bland annat behovet av att omkonfigurera från två till tre spolar för att öka den magnetiska drivkraften och därmed upprätthålla kulan i konstant rörelse. Vidare valde gruppen att ersätta lasrar med ljusdioder för att minska energiförbrukningen och förenkla systemets sensorbaserade styrning. Ytterligare en kritisk komponent, en DC-DC omvandlare, integrerades för att stabilisera spänningen från superkondensatorn och säkerställa en jämn prestanda hos spolarna. Projektets genomförande, från initiala beräkningar till praktiska tester och systemjusteringar, har belyst vikten av flexibilitet och pragmatism i designprocessen, vilket har lett till värdefulla insikter och förbättrade konstruktionsprinciper.

1 Inledning

1.1 Bakgrund och syfte

Projektet Steelstream grundades på en specifikation som krävde att en stålkula kontinuerligt skulle förflytta sig längs en cirkulär bana med hjälp av magnetfält. Dessa fält genererades av kopparspolar, vilka strömförsörjdes exklusivt av en superkondensator, utan stöd från externa strömkällor. För att projektet skulle betraktas som framgångsrikt, var kriteriet att stålkulan skulle kunna färdas oavbrutet i banan under minst tio sekunder med en jämn hastighet.

1.2 Problembeskrivning

En stålkula med en diameter på 3.5 mm och en vikt på 1.1 g ska drivas runt en bana med en radie på 10 cm i konstant hastighet under minst 10 sekunder. Systemet ska försörjas av en superkondensator med en kapacitans på 2.5 F och en spänning på 6 V. För att uppnå detta måste spolar konstrueras och ett kontrollsystem implementeras. Kontrollsystemet bör inkludera sensorer som möjliggör effektiv aktivering av spolarna för att upprätthålla en jämn hastighet under minst 10 sekunder. Dessutom ska banans design ta hänsyn till elektroniken för att skapa passande fästen.

2 Kravspecifikation

Denna kravspecifikation beskriver de tekniska och funktionella kraven för att utveckla ett system som driver en stålkula med konstant hastighet runt en bana med hjälp av elektromagneter och en superkondensator som strömkälla.

2.1 Tekniska krav

1. **Smidig bana utan hindrande faktorer:** Banan ska vara slät och fri från hinder som kan påverka eller hindra bollens rörelse.

2. **Felmarginal för hastigheten:** En konstant hastighet definieras som en hastighet som inte avviker mer än $\pm 5\%$ från stålkulans uppmätta hastighet.

3. **Antal spolar:** Projektet ska använda sig utav maximalt tre stycken spolar.

4. **Strömförsörjning:** Endast en superkondensator på 2.5 F ska användas för att strömförsörja hela systemet.

5. **Hastighetsmätning och visning:** Medelhastigheten på stålkulan ska kunna visas i realtid för att kontinuerligt verifiera och justera systemets prestanda under drift.

6. **Användning av hastighetspotentiometrar:** Två hastighetspotentiometrar ska användas för att styra bollens hastighet eller annan specificerad funktion.

2.2 Miljökrav

7. **Värmetålig bana:** Vid banans konstruktion ska material väljas utifrån miljö- och hållbarhetsperspektiv.

2.3 Budget och tid

8. **Budgetövervakning:** Projektet hade en total budget på 2100 kr.

9. **Komponentbeställning:** Alla komponenter som behövs för projektet ska vara beställda och tillgängliga innan 24/12-2023.

3 Systemdesign

I detta avsnitt beskrivs systemdesignen, baserat på den planering som presenterades under gruppredovisningarna i början av projektet. Fokus ligger på hur tidigare utförda beräkningar och simuleringar har format det slutliga systemet, inklusive användningen av spolar för att driva och styra metallkulan runt den cirkulära banan.

3.1 Övergripande koncept

Systemet skapades utifrån fyra huvudsakliga subsystem: spolar, styrsystem, hastighetsberäkning och kulbanans kropp. Ursprungligen planerades att använda två spolar, men detta ökades till tre efter tester under byggprocessen. NMOS-transistorer användes för att slå på och av strömmen till spolarna. Signalen registrerades med ljuskänsliga sensorer och LED-lampor, som placerades på vardera sida om banan. När kulan blockerade ljuset registrerades en signal.

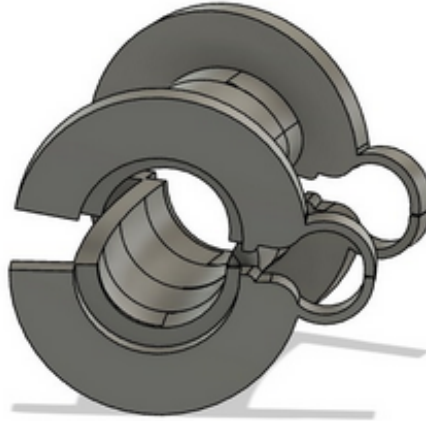
Styrsystemet planerades först att bestå av hårdvara som transistorer, utan mikrokontrollerkort som Arduino. Men i slutet av planeringsfasen ändrades detta till att använda en Arduino Uno för att ta emot och skicka signaler till transistorerna.

Hastighetsberäkningen sköttes av en annan Arduino Uno, som var uppkopplad och strömförsörjdes av en extern dator. Denna Arduino mätte och visade kulans hastighet genom att skicka informationen till datorn där den presenterades. Kulbanan, grunden i systemet, designades i CAD och var helt tillverkad av 3D-utskrivet material.

3.2 Spolar och drivning av kulan

I det initiala skedet av projektet planerades användningen av två spolar, var och en utrustad med en laser och en sensor placerad före respektive spole. Laser-sensorsystemet var utformat för att effektivt detektera kulans position och skicka signaler för att aktivera nästa spole i banan vid rätt tidpunkt. Syftet med dessa komponenter var att möjliggöra noggrann styrning och positionering av kulan.

Spolens innerradie bestämdes för att fästas exakt på banan. anledningen beror på att skapa ett så starkt magnetfält som möjligt för stålkulan att färdas genom. Denna innerradie låg på 7.35 mm. Ytterradien skulle också minimeras för att spolen ska vara så nära stålkulan som möjligt, däremot behövde det vara tillräckligt tjockt för att inte gå sönder när koppartråden lindades runt spolhållaren. Detta resulterade i en ytterradie på 9.45 mm hos spolhållaren. Därefter skulle antalet varv av koppartråd samt bredden på spolen bestämmas. Spolen hade bredden 29.20 mm och det valdes för att koppartråden som lindades runt skulle vara närmre stålkulan och därmed bidra mer till det magnetiska fältet. Utöver detta designades spolen med hänsyn till hållbarhet genom att utnyttja "compliance mechanism" vilket innebär att den ska kunna fästas på banan och tas av likt en mun, se figur 1.



Figur 1 Spolhållaren

PETG valdes som materialet för spolhållaren. Anledningen var att PETG är ett flexibelt material som kommer möjliggöra ”compliance mechanismdesignen” på spolen, samt att materialet har en högre tolerans mot höga temperaturer än, exempelvis, PLA och ABS. Detta innebär att mindre utskrifter av spolar skulle krävas på grund av bräcklighet eller låga temperatur toleranser och därför var PETG att föredra över PLA, även om PLA är lättare att skriva ut. (Futura, 2024)

Tjockleken som koppartråden hade, 0.50 mm, bestämdes baserat på ett flertal olika anledningar: Den fanns i stora mängder i ELAB. En tunnare koppartråd är tillräckligt tunn för att vara flexibel och därför lättare att linda runt spolhållaren, samtidigt är den tillräckligt tjock för att bibehålla sin form och styrka under drift. En 0.50 mm tjock tråd kan hantera en strömstyrka på upp till 1.96 A utan att överhettas.

Under projektets genomförandefas ställdes projektgruppen inför utmaningen att bestämma den nödvändiga kraften för att driva stålkulan längs den cirkulära banan. Beslutet fattades att använda tre spolar för att generera den magnetiska kraft som behövdes. Utan tillgång till simuleringsprogram utfördes alla beräkningar manuellt. Dessa beräkningar inkluderade bestämningen av den magnetiska kraften som var nödvändig för att få stålkulan att fördras ett tredjedels varv på banan. Kraften som krävdes beräknades genom att summera den radiella kraften som ges av

$$F_{rad} = mr\omega^2 \quad (1)$$

där F_{rad} är den radiella kraften, m är stålkulans massa, r är banans radie, och ω är vinkelhastigheten.

Friktionskraften ges av

$$F_{friktion} = F_n * \mu \quad (2)$$

där $F_{friktion}$ är friktionskraften, F_n är normalkraften, och μ är friktionskoefficienten.

Luftmotståndet ges av

$$F_{luft} = \frac{\rho v^2 C_A A}{2} \quad (3)$$

Där F_{luft} är luftmotståndet, ρ är luftens densitet, v är hastigheten, C_A är luftmotståndskoefficienten samt A är referensarean.

Den magnetiska kraften som ska accelerera stålkulan ges av:

$$F_{mag} = q * v \times B \quad (4)$$

Där F_{mag} är den magnetiska kraften, q är elektronens laddning, v är hastighetsvektorn, B är magnetiska flödestätheten.

Eftersom att målet var ett och ett halvt varv per sekund $f = 1.5 \text{ Hz}$ gav detta att: (1) blev 9.77 mN, (2) gav 2.2 mN, och (3) blev 0.311 mN. Det innebär att den magnetiska kraften måste vara:

$$F_{mag} \geq F_{rad} + F_{friktion} + F_{luft} \quad (5)$$

Däremot upptäcktes att dessa krafter inte verkar samtidigt, samt att den magnetiska kraften som accelererar stålkulan inte verkar kontinuerligt längs banan utan endast vid enstaka tidpunkter. Gruppen behövde därför övergå från en teoretisk metod till en experimentell metod på grund av tidsbrist.

Efter noggrann analys och ytterligare designöverväganden beslutades att omkonfigurera systemet till att omfatta tre spolar istället för två, där varje ny spole hade 400 varv. Anledningen berodde på höga hastighetsförluster på grund av friktion, luftmotstånd, etc, som märktes när systemet endast hade två stycken spolar. Fyra stycken spolar skulle däremot kräva mer material för spolhållaren samt förbruka mer energi. Därför var ökningen till tre spolar samt antalet varv nödvändig för att förbättra den magnetiska drivkraften och därmed hålla kulan i konstant rörelse hela vägen.

3.3 Drivsystem och styrning

Under den tidiga fasen av projektet baserade vi vår systemdesign på användningen av två fotosensorer placerade framför varsin spole längs med den cirkulära kulbanan. Dessa sensorer skulle användas för att läsa av kulans position och utlösa lämpliga åtgärder för att styra dess rörelse.

När en sensor registrerade kulan skickades en signal till en Arduino Uno. Mikrokontrollen användes som central enhet för att koordinera styrningen av spolarna. När signalen mottogs från sensorn, skickade Arduino Uno en instruktion för att aktivera den motsvarande spolen under en förutbestämd tid. Målet var att skapa ett magnetfält som skulle dra kulan mot mitten av spolen utan att dra tillbaka den när den passerat mitten.

Vid den tidpunkt då gruppredovisningen hölls, hade vi ännu inte genomfört tester för att bestämma den optimala tiden för aktivering av elektromagneterna. Vår avsikt var att undersöka olika tidsintervall för att optimera energiförbrukningen och samtidigt säkerställa att styrningen av kulan var tillräckligt effektiv.

3.4 Beräkning av hastighet

För att bestämma hastigheten hos metallkulan använde vi en enkel metod som involverade mätning av den tid det tog för kulan att förflytta sig från en sensor till den andra längs med den cirkulära banan. Genom att mäta tiden för denna sträcka kunde vi sedan beräkna den genomsnittliga hastigheten hos kulan. Hastigheten v beräknades enligt formeln:

$$v = \frac{s}{t} \quad (6)$$

där s är sträckan mellan de två sensorerna längs banan och t är den tid det tog för kulan att röra sig från en sensor till den andra.

4 Delsystemtester

Detta avsnitt beskriver de olika tester som genomförts på systemets delkomponenter. Här ingår tester av spolarna, styrsystemet, och microcontrollern samt den mjukvara som används. Fokus ligger på att verifiera funktionaliteten hos varje delsystem och säkerställa att de uppfyller de uppställda kraven.

4.1 Spolar

För att bestämma ett bra antal varv på våra spolar genomförde vi en serie systematiska tester med målet att hitta balans mellan antal varv, ström och värmeförluster. Vi började med att linda en spole med 200 varv, som sedan kopplades till en spänningsförsörjare och ett oscilloskop för att mäta strömmen genom spolen. Initialt valde vi en spänning på 12 V, vilket är den maximala utspänningen som Arduino Uno kan hantera. Under detta test observerades dock att en alldeles för hög ström gick igenom spolen, vilket indikerade en låg resistans och därmed otillräckligt antal varv.

För att åtgärda detta problem ökade vi successivt antalet varv med 50 i taget och upprepade testproceduren. Detta iterativa tillvägagångssätt tillät oss att noggrant observera och dokumentera hur förändringar i varvantalet påverkade spoleffektens kapacitet att generera kraft, strömmens styrka och värmeutvecklingen i spolen.

Vid testet med 400 varv uppmätte vi en ström under 1 A, men på grund av den höga spänningen blev spolen varm efter en kort stund. För att reducera värmeutvecklingen sänkte vi inspänningen till 9 V, vilket resulterade i en ström genom spolen på 0.8 A. Denna justering minskade värmeförlusterna och säkerställde att spolen kunde fungera effektivt utan att överhettas.

Genom denna noggranna och systematiska testprocess kunde vi konstatera att 400 varv var ett bra antal varv för våra spolar, vilket balanserade behovet av tillräcklig kraft och minimerade ström- och värmeförluster inom de specificerade spänningsgränserna. Detta metodiska angreppssätt säkerställde att vi kunde identifiera den mest effektiva konfigurationen för våra specifika behov och säkerställde en säker och stabil drift av systemet.

4.2 Styrsystem

Ett kontinuerligt spårande av kulans rörelse berodde på att bestämma dess position, vilket åstadkoms med hjälp av fotosensorer. Systemet kunde således rapportera kulans position i realtid. För att hitta de mest lämpliga sensorerna, samt optimera deras tids- och ljuskänslighet, genomfördes flera tester. Vid valet av sensorer fanns två huvudkandidater: fotosensorer och ultraljudssensorer. För ett rättvist test skedde utförandet i ett mörkt rum eftersom att foto sensorerna inte ska påverkas i början av externa ljuskällor och bara av LED ljuset. Innan testet började behövde sensorerna justeras i syfte att kunna känna av kulan vid rätt känslighet. Under testningen skickades kulan för hand vid hög fart och genom att läsa av sensorernas respons kunde slutsatsen dras att fotosensorer var bättre på att meddela kulans exakta position. Ultraljuds sensorerna kunde känna av kula på alldeles för långa avstånd även efter

justering vilket skulle komplicera kodningen. Den skulle komplicera koden genom att behöva skapa funktioner för att enbart välja ett specifikt avstånd man väljer använda för igångsättning av spolarna. och vinnande kandidaten blev fotosensorer.

Efter valet av fotosensorer utfördes ett test på deras känslighet beroende på miljö. När sensorn placerades i olika rum med olika starka ljus ändrades sensorernas känslighet och det skapade komplikationer för att känna av kulan. En lösning till problemet var att isolera sensorn från extern ljus där enbart ljuset från LED:n kändes av sensorn. För att isolera sensorn testades först att tejpa över toppen av sensorn för att minska extern ljus uppiifrån vilket funkade delvis. I mörkare miljöer funkade den lösningen gallant medan i ljusa miljöer kunde sensorn inte känna av kula vid höga farter. Ett till test utfördes genom att täcka över sensorn med hjälp av kartong bitar vilket funkade bättre på grund av att sensorn kunde känna av mindre ljus. Den lösningen hade fortfarande ett problem vilket var att LED:n var alldeles för stark eftersom mer ljus från LED:n koncentrerades på sensorn. Ett byte av LED:n behövdes där svagare LED:n som drog mindre ström testades och det löste problemet.

Sensorernas påverkan på systemet var betydande men för ett komplett drivsystem behövde dessa sensorers respons utnyttjas för att driva kulan fram utan stora komplikationer. Sensorerna skickade en digital etta och en digital nolla. När kulan stog framför sensorn och bröt ljuset skickades en digital 1a vilket indikerade att kulan hade passerat en specifik sensor. Med hjälp av dessa värden kunde man styra tre olika MOSFET som i sig skulle styra när en specifik spole sätts igång. Detta krävde ström mätnings tester på transistorerna för att säkerställa att spänningen över spolarna var maximal utan att påverka funktionaliteten av andra komponenter. Under testningen av hela kretsen påverkades övriga komponenter när en av spolarna sattes igång. Att maximera spänningen över spolarna ledde till enorma problem där DC-DC omvandlaren inte kunde leverera tillräckligt mycket ström till alla komponenter. En lösning var att separera mellan styrsystemet och spolarna. Att separera dessa två betydde att två olika DC-DC omvandlare behövdes för att strömförsörja vardera ett av dessa system. Först testades en seriekoppling av två DC-DC omvandlare vilket inte ledde till bra resultat utan bara snabbare urladdning av kondensatorn, därefter parallel kopplades två DC-DC omvandlare där den ena ström försörjde styrsystemet som bestod av sensorer, LED:n och arduino medans den andra ström försörjde spolarna. Detta ledde till att tillräckligt mycket ström kunde dras av DC-DC omvandlare vid igångsättning av spolarna.

4.3 Mikrokontroller och mjukvara

Under byggfasen av projektet genomförde vi ett antal tester för att säkerställa att mjukvaran och mikrokontrollerna fungerade korrekt och kunde hantera de nödvändiga funktionerna för styrning av systemet.

Först genomförde vi ett sensorfunktionalitetstest för att verifiera att Arduino kunde ta emot signaler från sensorerna när de upptäckte närvaron av kulan. Vi kopplade varje sensor enskilt till Arduino och programmerade dem för att skriva ut en 1:a i dess seriella monitor om de upptäckte att ljuset blockerades och en 0:a annars. Syftet var att säkerställa att sensorerna fungerade korrekt och kunde detektera kulan när den passerade.

Efter det genomförde vi ett tidmätningstest för att kontrollera att vi kunde mäta den tid det tog för kulan att förflytta sig från en sensor till en annan. Vi registrerade tiden

från att en sensor kände av kulan tills att nästa sensor gjorde detsamma. Samtidigt filmades kulan för att jämföra resultaten med filmen och säkerställa att mätningarna var korrekta.

Slutligen genomförde vi ett test för att bestämma den optimala tiden för aktivering av spolarna för att ge kulan maximal fart. Vi testade olika tidsintervall för spolaktivitet när sensorn kände av kulan och kunde fastställa den mest effektiva tiden för maximal fart, vilket i detta fall visade sig vara 50 millisekunder.

Genom att utföra dessa delsystemtester kunde vi säkerställa att mjukvaran och mikrokontrollerna fungerade enligt förväntningarna och att systemet var redo för vidareutveckling och integrering.

5 Slutlig konstruktion och verifikation

I detta avsnitt beskrivs den slutliga konstruktionen av systemet och de verifieringar som utförts för att säkerställa dess funktionalitet. Fokus ligger på det elektriska schemat, det mekaniska utförandet och verifikationen av att kraven uppfylls. Här presenteras hur alla delsystem integrerats och testats för att garantera att den slutliga lösningen fungerar som avsett.

5.1 Elektriska schemat

Den slutliga konstruktionen av elektriska schemat krävde en viss del förändring från grundschemaschemat. Vid början var tanken att använda en DC-DC omvandlare som kan leverera 1.5A men senare under testing krävdes två DC-DC omvandlare som satt parallellt för att kunna hantera alla kretsens komponenter, vilket krävde en förändring i kretsschemat. Den stora förändringen i det slutliga elektriska systemet var kopplingen av transistorerna. I början togs ingen hänsyn till användningen av en flyback-diod. En sådan diod är kritisk för att skydda kretsen från spänningsspikar som uppstår när en induktiv last kopplas från en spänningskälla. När strömmen genom en induktiv last plötsligt bryts, genereras en hög spänning i motsatt riktning. Denna spänning kan skada andra komponenter i kretsen. En flyback-diod placerad parallellt med den induktiva lasten tillåter strömmen att cirkulera genom dioden istället för att skapa en skadlig spänningsspik. Därmed skyddas känsliga elektroniska komponenter från potentiella skador.

Den slutliga konstruktionen av kretsen utfördes under två olika moment där den ena var att löda kablar till alla komponenter och sedan löda på dem till en protoboard. Detta ledde till att komponenterna kunde jämnt fördelas över fler små proto boards beroende på deras position i kretsen. Slutliga kretsen gick att konstruera på en breadboard men det skulle leda till svaga kopplingar, på grund av detta sattes ett krav att alla komponenter skall vara löda på en protoboard för att säkerställa ett fungerande system vid redovisning av projektet.

Ett system kräver att styrsystemet och drivsystemet enbart kan strömförsörjs av kondensatorn. Detta komplicerade hastighets visningen då grund iden var att koppla arduinon till en datorn för att visa hastigheten i seriell monitor. Den lösningen bröt mot systemkravet eftersom Arduinon skulle då få ström av en dator. För att uppfylla kravet användes en till arduino som enbart får signaler från huvud arduinon för att sedan kopplas till en datorn som visar hastigheten på en serial monitor. Den slutliga

kretsen går att se i bilaga B. Slutliga komponentval:

- DC-DC omvandlare (MT-3608)
- Lysdiod 3.3 V
- Spolen
- Arduino Uno
- Fotosensorer (LM393)
- MOSFET (RFP25N05)
- Superkondensator 6V 2.5F (VEC6R0 255QG)
- Diod (1N5819)

5.2 Mekaniskt utförande

Under den slutliga konstruktionsfasen uppkom flera mekaniska utmaningar kopplade till det mekaniska utförandet av banan. En central fråga var imperfektionerna från 3D-utskrivningen, där banan inte blev helt slät. Denna ojämna yta ledde till vibrationer och hastighetsförluster på grund av ökad friktion när stålkulan förflyttade sig längs banan. För att korrigera dessa problem krävdes omfattande manuellt arbete, där flera timmars slipning utfördes på varje tredjedel av banan (se figur 2) för att uppnå en jämn och slät yta.

Efter att banans yta hade förbättrats, fortsatte arbetet med att montera spolehållaren



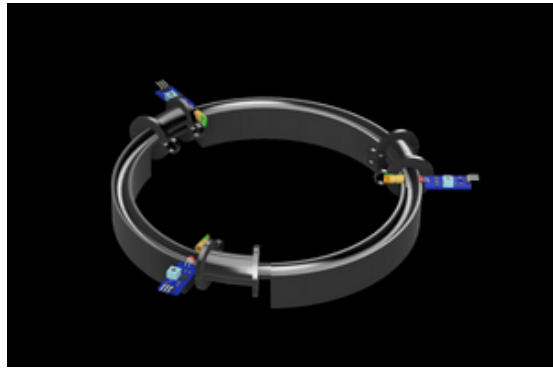
Figur 2 Tredjedel av banan

på bankonstruktionen. Detta inkluderade att linda 400 varv av koppartråd runt hållaren för att effektivt skapa de magnetiska fälten nödvändiga för stålkulans rörelse. Slutligen, för att sammanfoga de olika sektionerna av banan, användes en limpistol. Denna metod valdes för att snabbt och enkelt kunna fästa delarna. Därefter limmades fotosensorn och lysdioden på (se figur 3).

5.3 Kravverifikation

Under projektets gång satte vi upp tydliga mål för att vägleda vår arbetsprocess och säkerställa att våra tekniska lösningar uppfyllde de förväntade kraven. Nedan beskrivs hur dessa mål relaterar till de planerade testerna för att verifiera att kraven uppfylls:

Smidig bana utan hindrande faktorer: Detta mål kräver att banan ska vara slät



Figur 3 CAD-konstruktionen med fotosensorn och ljusdioden

och fri från hinder som kan påverka eller hindra bollens rörelse. För att uppnå detta såg gruppmedlemmarna till att slipa banan för att säkerställa sig om att den skulle vara slät och enkel för kulan att rulla på. Dessutom var gruppen noga med att inte ha några komponenter som blockerade kulans väg.

Värmetålig bana: Då det finns komponenter i systemet som lätt hettas up under drift är det viktigt att banan är värmetålig så att den inte deformeras av värmen. Gruppen såg till att eliminera kontakten mellan banan och dessa komponenter så mycket som möjligt. Det var endast spolarna som behövde vara nära banan. Gruppmedlemmarna byggde då en spolkållare som kan fästas kring banan. Dessa hållare är 3D-printade i PETG, vilket enligt har en bra värmetålighet. Därmed eliminerades behovet av en värmetålig bana eftersom alla komponenter som hade risk att hetta upp den blev isolerade. Detta tillät gruppen att skriva ut banan i PLA, som är mer miljövänligt. (Form Futura, 2024)

Hastighetsmätning och visning: Gruppen hade även ett krav på att kunna mäta kulans hastighet och visa den på en separat skärm. Som tidigare beskrivet i avsnitt 4.3 använde gruppen sensorer för att mäta hastigheten och skrev ut den i Arduinos seriella monitor på en skärm kopplad till den. Detta var även ett krav givet av de kursansvariga, vilket gav gruppen stor motivation för att se till att detta målet blev avklarat.

Felmarginal för hastigheten: Eftersom spänningen i kondensatorn som driver systemet varierar över tid, ämnade gruppen att säkerställa att systemet var väl anpassat efter uppgiften och energisnålt för att minimera hastighetsvariationer. Gruppen satte därför som mål att hastigheten på kulan vid varje mättillfälle, inte skulle avvika med mer än $\pm 5\%$ från föregående mätning. Detta verifierades sedan när gruppen införde hastighetsberäkning och kunde visa detta. Då jämfördes hastigheten som visades upp på skärmen vid varje mätning med kulans hastighet vid föregående mättillfälle. Därmed kunde gruppen konstatera att hastigheten höll sig inom den angivna marginalen.

Sedan finns det en del mål som inte går att testa, utan endast behöver verifieras om de har uppnåtts eller inte. Dessa mål beskrivs nedan:

Strömförsörjning: Målet var att systemet endast skulle drivas av en superkondensator. Gruppen behövde ständigt ta hänsyn till detta under designfasen av projektet. Senare bestämde gruppen sig för att omformulera målet till

att endast de delar av systemet som påverkar kulan behöver drivas av kondensatorn, medan delar som inte är en del av den elektriska kretsen, som exempelvis datorskärmen för att visa hastigheten på, kan drivas av externa energikällor. Det nya målet uppnåddes och verifierades av kursansvariga under mässan.

Användning av hastighetspotentiometrar: Ett mål som gruppen hade i början av projektet var att kunna köra kulan på två olika hastigheter. Gruppen planerade att använda potentiometrar i kretsen för att höja eller sänka kretsens resistans och därmed påverka kulans hastighet. Under byggfasen insåg gruppen att de behövde åsidosätta detta mål för att få nog med tid att klara de andra målen.

Antal spolar: Gruppen hade som mål att använda sig av maximalt tre spolar då de ansåg att fler spolar kunde införa större utmaningar gällande design och beräknar på den elektriska kretsen. Den slutgiltiga konstruktionen som visades upp på mässan hade tre spolar vilket innebär att gruppen uppnådde målet.

Komponentbeställning: Under designfasen hade gruppen som mål att få tillgång till alla komponenter innan byggfasen skulle börja. Därför satte gruppen som mål att alla komponenter skulle vara beställda innan den 24/12 - 2023. Gruppen lyckades delvis med detta mål då de beställde alla planerade komponenter inom den tid som de satt ut, men på grund av designändringar under byggfasen behövde gruppmedlemmarna köpa nya komponenter vid ett senare tillfälle.

Budgetövervakning: Gruppen satte som mål att hålla sig inom sin budget på 2100 kr, vilket motsvarar 350 kr per person. Efter mässan räknade gruppen fram att de spenderat 1500 kr, vilket motsvarar 250 kr per person. Därmed kunde gruppen verifiera att de uppnått målet.

6 Diskussion

6.1 Projektgenomförande

Övergripande diskussion av slutresultatet, grupparbete, affärsmässiga mål, tidsbudget. Särskild vikt ska läggas på att försöka förklara avvikelserna mellan de verkliga och de förväntade resultaten.

6.1.1 Intro

Projekt gruppen bestog av 6 medlemmar där varje person blev tilldelad en uppgift att utföra. Vissa uppgifter var mer krävande och därav kunde en uppgift vara tilldelad till flera personer i gruppen. Maichl, Tim och Mostafa jobbade på kretsbyggande och kretsdesign. Mohammed och Tomas arbetade med CAD-design. Giovannis uppgift var att skriva koden för systemet. Projektgenomförandet organiserades kring olika arbetsgrupper och deras självbestämda deadlines för att optimera arbetsflödet. Huvuddeadlines fastställdes, vilka alla grupper gemensamt skulle följa. Vidare etablerade varje undergrupp sina egna specifika mål. Denna strategi underlättade ett parallellt arbetssätt, där alla grupper kunde arbeta kontinuerligt och effektivt. Ett exempel på detta är från projektets början. För att elektronikgruppen skulle kunna testa sitt kretsschema och komponenter var det avgörande att designgruppen hade färdigställt och printat både en spolhållare och en tredjedel av banan, samt att programmeringsgruppen hade utvecklat mjukvaran för åtminstone en av sensorerna.

6.1.2 Kretsen och komponenter

Under projektgenomförandet diskuteras val av krets och komponenter. Initialt planerades användning av en Arduino Nano, men denna enhet skadades under lödning, vilket ledde till att en Arduino Uno valdes istället. Arduino Uno har en något högre energikonsumtion än Nano, men på grund av tidsbrist fanns det inte andra lämpliga alternativ.

Alla elektriska komponenter valdes med hänsyn till energieffektivitet. Inledningsvis inköptes laserdioder som skulle användas tillsammans med en ljussensor för att detektera när stålkulan passerade och därmed aktivera spolarna vid korrekt tidpunkt, vilket agerade som kontrollpunkter. Emellertid visade det sig att en grön ljusdiod var ett bättre alternativ. Ljusdioden var svagare, vilket underlättade för stålkulan att helt blockera ljuset, vilket säkerställde att spolarna aktiverades korrekt. Dessutom var ljusdioden mer energisnål än laserdioderna, vilket ytterligare stärkte beslutet att välja ljusdiod framför laser för detta tillämpningsområde.

För att bemöta en annan kritisk aspekt av kretsen integrerades en DC-DC omvandlare i systemet. Användningen av en superkondensator för att driva spolarna innebar att spänningen från kondensatorn minskade kontinuerligt när laddningen förbrukades. Detta kunde resultera i en ojämn prestanda från spolarna över tid, där kraften avtog i takt med att spänningen sjönk. För att motverka detta och säkerställa att spolarna kunde leverera en konstant och hög kraft, valdes en DC-DC omvandlare. Denna komponent stabiliserade spänningen till en konstant nivå, oberoende av superkondensatorns aktuella laddningsstatus, vilket garanterade att stålkulan fick en kontinuerlig och effektiv drivkraft längs banan.

För att bemöta en annan kritisk aspekt av kretsen integrerades en DC-DC omvandlare i systemet. Användningen av en superkondensator för att driva spolarna innebar att spänningen från kondensatorn kunde minska kontinuerligt när laddningen förbrukades. Detta kunde resultera i en ojämn prestanda från spolarna över tid, där kraften avtog i takt med att spänningen sjönk. För att motverka detta och säkerställa att spolarna kunde leverera en konstant och hög kraft, valdes en DC-DC omvandlare. Denna komponent stabiliserade spänningen till en konstant nivå, oberoende av superkondensatorns aktuella laddningsstatus, vilket garanterade att stålkulan fick en kontinuerlig och effektiv drivkraft längs banan.

6.1.3 Design

Designen av kulbanan baserades på en cirkulär form med en radie på 10 centimeter. Eftersom banan var större än vad skrivaren kunde hantera, beslutade designgruppen att dela upp banan i tre sektioner. Banans bredd minimerades för att minimera avståndet mellan spolkållarna och banan när de monterades. Gruppen valde att placera tre spolar vid varje skarv mellan bansektionerna. Spolkållarna tillverkades av PETG för att hantera de höga temperaturer som kunde uppstå när ström leddes genom spolarna, medan banan tillverkades av PLA, ett material valt för att inga extrema tillstånd förväntades.

Spolkållarens design utvecklades under projektets gång (se Bilaga 1). Den första prototypen tog inte hänsyn till antalet varv spolen skulle ha eller banans böjning, och var dessutom betydligt smalare än slutprodukten. Den andra prototypen åtgärdade flera av dessa problem: den var bredare, vilket möjliggjorde fler spolvarv, och väggarna

som höll kopparvarven ökades i höjd. Eftersom spolkållaren blev bredare anpassades dess böjning för att passa banan, vilket förbättrade magnetfältets styrka och därmed kulans färd längs banan. Slutprodukten av spolkållaren designades med modularitet i åtanke och utrustades med en "compliance mechanism" för att enkelt kunna monteras och demonteras.

För att adressera utmaningen med att banan var uppdelad, påbörjade designgruppen arbete på modulära lösningar för att sammanfoga sektionerna. Första idén var att använda 'snap-joints' för sammanfogning (se Bilaga C), men denna metod övergavs då banans tjocklek och gruppens skicklighet inte var adekvata. En alternativ lösning som testades var en 'lego design' (se Bilaga D), där ben användes för att stabilisera och hålla samman sektionerna. Denna lösning misslyckades eftersom inte benens och banans bredd var tillräckliga för att säkert hålla fast knapparna.

När banan printades med 3D-skrivaren var ytan på insidan inte slät. För att säkerställa att stålulan kunde färdas så smidigt som möjligt slipades banans yta noggrant.

6.2 Hållbarhet

Projektgruppen valde att ersätta lasertekniken med ljusdioder i syfte att minska energiförbrukningen. Denna ändring reflekterar en strävan efter högre energieffektivitet då ljusdioder generellt sett förbrukar betydligt mindre energi jämfört med lasrar. Dessutom är ljusdioder ekonomiskt fördelaktiga, då de vanligtvis är billigare i inköp än motsvarande laserteknik. Trots den lägre kostnaden och energianvändningen uppfyller ljusdioderna de tekniska krav som projektet ställer, vilket gör dem till ett optimalt val för vårt system.

För tillverkning av spolkållarna har PETG använts, vilket är ett material som kombinerar flexibilitet med hög temperaturlöslans. Denna kombination är avgörande då spolkållarna integrerar en 'compliance mechanism', vilket kräver både rörelsefrihet och hållfasthet under mekanisk belastning. PETGs förmåga att tåla högre temperaturer minskar risken för deformation under drift, vilket är särskilt viktigt i applikationer där komponenter utsätts för uppvärmning. Valet av PETG över mer bräckliga alternativ som PLA minskar därmed behovet av frekvent utbyte av spolkållare på grund av överhettning eller mekanisk skada.

För 3D-utskriften av själva banan har PLA valts på grund av dess lägre kostnad och miljöpåverkan jämfört med andra termoplastiska polymerer. PLA är biologiskt nedbrytbart och erbjuder tillräcklig strukturell styrka för användningsområden där komponenterna inte utsätts för höga temperaturer eller behov av flexibilitet. Eftersom banan inte kräver samma temperaturlöslans eller flexibilitet som spolkållaren, är PLA ett lämpligt och hållbart materialval för detta ändamål.

6.3 Förslag till systemförbättringar

Under genomförandet av projektet identifierades flera områden där systemet kan förbättras för att öka prestanda, effektivitet och användarvänlighet. Genom att noggrant utvärdera systemets nuvarande funktionalitet och genomföra en djupgående analys av dess svagheter och begränsningar, har vi kunnat formulera flera förslag till systemförbättringar som kan bidra till att optimera projektets resultat och öka dess övergripande framgång. Nedan presenteras dessa förslag, som sträcker sig från hårdvaruförbättringar till mjukvaruoptimeringar, med syfte att främja systemets

kapacitet och funktionalitet.

Automatisk nedsänkning av kulan: Som tidigare nämnt hade gruppen planerat att ha ett hål och en extern bana för att föra kulan till kulbanan. Eftersom detta inte var ett systemkrav givet av de kursansvariga valde gruppen att inte prioritera denna idé. Detta är däremot en sak som gruppen kan göra i efterhand för att öka säkerheten, både för användarna och systemet, eftersom det eliminerar kontakten mellan användaren och den primära banan och dess komponenter. Detta gör så att det finns mindre risk att användaren kommer i kontakt med känsliga komponenter vilket ökar robustheten för hela systemet.

Gränssnitt för att visa hastighet: För nuvarande visas hastigheten på kulan direkt i Arduino IDE:s seriella monitor. Gruppen hade fördragit att själva skapa ett program med ett tydligt gränssnitt som enkelt visar hastigheten på kulan, och eventuellt annan information som kan vara av intresse för användaren. Detta hade bidragit mycket till användarvänligheten av produkten.

Litteraturförteckning

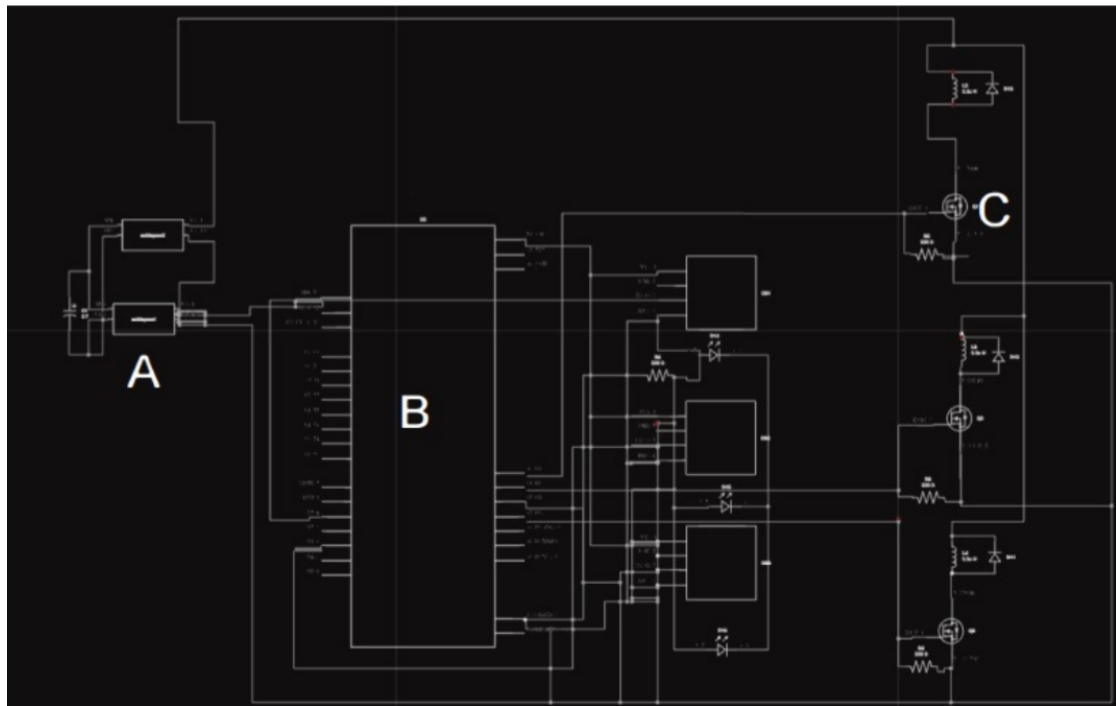
- [1] H. Young R. Freedman. (1996). *University Physics with Modern Physics*.
- [2] G. Petersson. (2021). *Teoretisk Elektroteknik, Stationära fenomen & Elektromagnetism*.
- [3] B. Karlström. (2021). *Kretsanalys*. Studentlitteratur
- [4] Form Futura. (2024). *PLA vs PETG - Which filament is right for me?*.
<https://formfutura.com/blog/material-guide-pla-vs-petg/>

Bilaga A: Programkoden

Länk till programkoden:

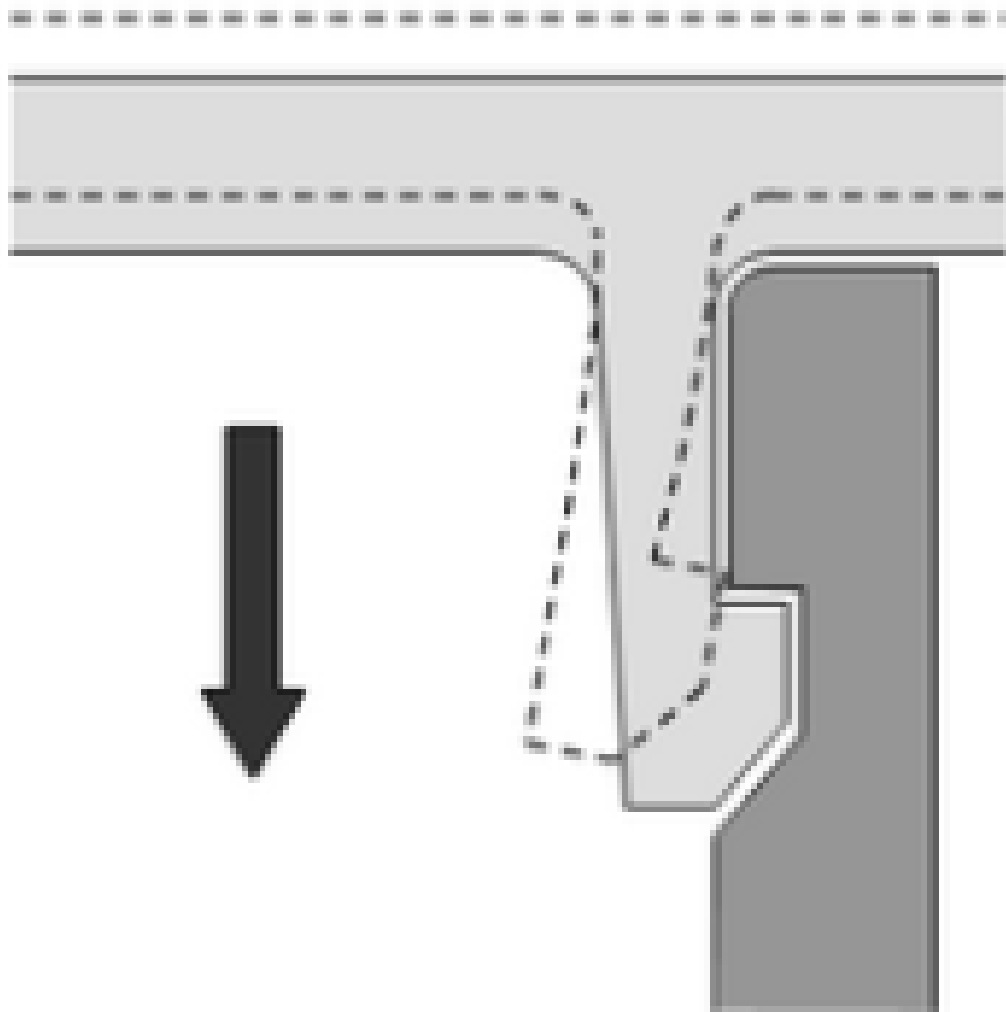
<https://docs.google.com/document/d/1Dwth0nIzrpD-yYpIxj85cmvy2vY9IWylw43pqNgM>

Bilaga B: Kretsschema



Figur B Andra Arduinon som skulle hantera hastighetsmätningen kopplas till Arduino B.

Bilaga C: Snap-joint



Figur C Sammanfogning genom snap-joint

Bilaga E: Checklista för rapportinlämning

Krav	Förklaring	Uppfyllt
Struktur	Rapporten ska delas in i numrerade kapitel och avsnitt osv. Hierarkin ska ha fler än ett element på varje nivå (dvs det får inte vara bara ett numrerat avsnitt i ett kapitel). Titlar på kapitel och avsnitt ska återspegla innehållet.	ja
Styckindelning	Styckindelning av texten ska följa logisk struktur, ett stycke – ett tema. Undvik för korta (en mening) och för långa (en sida) stycken.	ja
Meningsstruktur	Varje mening skall börja med stor bokstav och sluta med punkt. Varje mening skall ha subjekt och verb.	ja
Pluralis	Grammatisk böjning av singularis och pluralis ska stämma.	ja
Stavning	Rapporten ska vara stavningskontrollerad.	ja
Tempus	Använd rätt tempus! Presens ska användas för fakta, förklaringar av begrepp, beskrivningar, mm. Futurum ska användas när man syftar på händelser i framtiden	ja
Decimaler	Antal decimaler ska motsvara noggrannheten i talet. Använd punkt för att separera decimaler från heltal.	ja
Tabeller	Varje tabell ska ha nummer och titel (tex ”Tabell 1. Jämförelse av prestanda hos olika motorer”). Alla tabeller måste hänvisas från texten med nummer (tex ”... , se tabell 1”, inte ”Tabellen nedan”). En tabell är inte en del av mening.	ja
Figurer	Varje figur ska ha nummer och titel (tex ”Figur 1. Bilden på testanläggningen”). Alla figurer måste hänvisas från texten med nummer (tex ”... , se figur 1”, inte ”figuren här uppe”). En figur är inte en del av mening.	ja
Ekvationer	En ekvation är en del av mening, och ska skrivas på en separat rad, med numrering på höger sida. Starta ej ett nytt stycke i samband med en ekvation! Om man behöver hänvisa till en ekvation, används dess nummer. Hänvisa ej med nummer till ekvationer i samma mening.	ja
Kursivering	Alla variabler skall vara kursiverade. Enheter skall inte vara kursiverade, det skall finnas mellanslag före enheter. Tex $V = 3.5 \text{ m}^3$	ja
Förkortningar	Första gången en förkortning introduceras, ska den skrivas ut.	ja
Referenser	Använd referenser för att ange källan. Referensen ska stå närmast påståenden som ska styrkas, och ska vara en del av meningen. Om det är flera påståenden som hänvisar till samma källa, kan en signalfrasanvändas med referensen (hellre än ha samma referens i varje mening).	ja

Tabell 1: Alla krav ska uppfyllas.