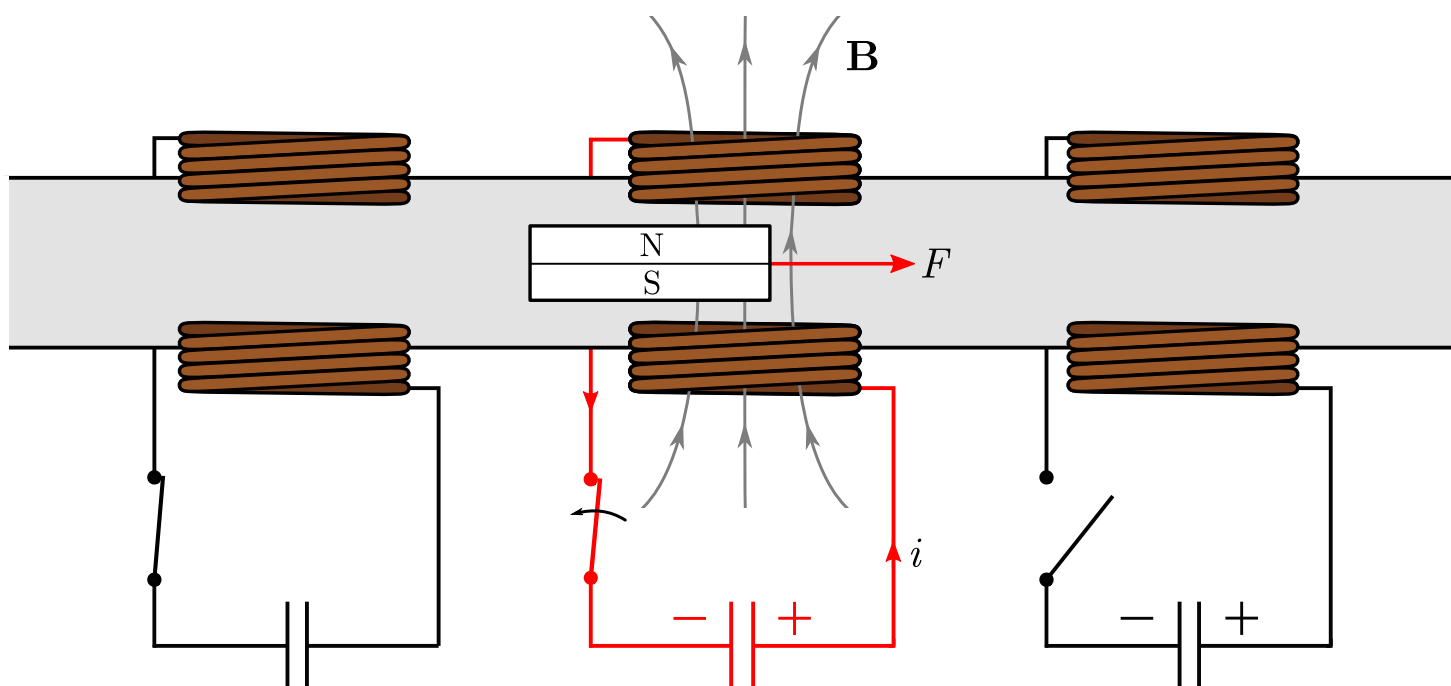




Konstruktion och optimering av en elektromagnetisk massaccelerator

Acceleration genom sekventiell aktivering av spolar intill en permanentmagnetisk projektil

Kandidatarbete vid institutionen för fysik

TIFX04-22-82

Julia Bloom Rolewska
Viktor Lilja
Gottfrid Olsson

Simon Hamberg
Filip Melberg
Anton Stigemyr Hill

INSTITUTIONEN FÖR FYSIK

Konstruktion och optimering av en elektromagnetisk massaccelerator

Acceleration genom sekventiell aktivering av spolpar intill en permanentmagnetisk projektil

Julia Bloom Rolewska¹, Simon Hamberg², Viktor Lilja³,
Filip Melberg⁴, Gottfrid Olsson⁵ och Anton Stigemyr Hill⁶

2022-06-01

Sammandrag

En ny typ av linjär elektromagnetisk massaccelerator (LEMA) har modellerats, konstruerats och testats. Acceleratorn består av en projektil innehållande en permanentmagnet ovanpå en skena med fem par av koppartrådsspolar placerade längs sidorna. Genom kritiskt dämpad urladdning av kondensatorer skapas kortvariga strömpulser som ger upphov till magnetfält i spolarna. Projektillen accelereras genom att sekventiellt aktivera urladdningarna precis när projektillen passerar respektive spolpar. Den slutgiltiga konstruktionen kunde accelerera en projektil med massa $(118,20 \pm 0,05)$ g till en slutfart $(10,01 \pm 0,07)$ m s⁻¹ på mindre än en tiondels sekund med verkningsgrad $(5,16 \pm 0,12)$ %. LEMA:n delar många likheter med konventionella spolpistoler (från engelskans coilguns) som är väl studerade, se exempelvis [1]–[3], men är nyskapande i sin placering av spolarna utmed skenans sidor. Designen har fördelen att projektillen inte behöver vara cylinderformad. Detta öppnar upp för nya tillämpningar men har samtidigt visat sig ställa höga krav på en symmetrisk konstruktion för kontrollerad acceleration. Efter vidare utveckling kan den föreslagna designen eventuellt komma att användas för att snabbt accelerera fordon eller projektiler till höga hastigheter.

Nyckelord: massaccelerator, spolpistol, magnetism, kraftelektronik, optimering, FEM

¹gusbloomju@student.gu.se

²simham@student.chalmers.se

³liljav@student.chalmers.se

⁴filipme@student.chalmers.se

⁵gotols@student.chalmers.se

⁶hilla@student.chalmers.se

Construction and optimisation of an electromagnetic launcher

Acceleration by sequential activation of coils next to a permanent magnetic projectile

Julia Bloom Rolewska¹, Simon Hamberg², Viktor Lilja³,
Filip Melberg⁴, Gottfrid Olsson⁵ och Anton Stigemyr Hill⁶

2022-06-01

Abstract

A new type of linear electromagnetic launcher (LEMA) has been modelled, constructed and tested. The launcher consists of a projectile containing a permanent magnet on top of a track with five pairs of copper coils mounted along its sides. Critically dampened discharge of capacitors causes short current pulses that give rise to magnetic fields in the coils. The projectile is accelerated by sequentially activating the discharges precisely when the projectile passes each pair of coils. The launcher was able to accelerate a projectile with a mass of $(118,20 \pm 0,05)$ g to a final speed of $(10,01 \pm 0,07)$ m s⁻¹ in less than a tenth of a second at $(5,16 \pm 0,12)$ % efficiency. The LEMA is in many ways similar to the extensively studied conventional coilguns, see for example [1]–[3], but is novel in its placement of the coils along the sides of the track. An advantage of this design is that the projectile does not need to be cylindrical. This allows for new applications but has turned out to put great demands on the symmetry of the construction in order to achieve controlled acceleration. After further studies and improvements the proposed design may be utilised to quickly accelerate vehicles or projectiles to high speeds.

Keywords: launcher, coilgun, magnetism, power electronics, optimisation, FEM

¹gusbloomju@student.gu.se

²simham@student.chalmers.se

³liljav@student.chalmers.se

⁴filipme@student.chalmers.se

⁵gotols@student.chalmers.se

⁶hilla@student.chalmers.se

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Syfte och avgränsningar	2
1.2	Samhälleliga och etiska aspekter	2
2	Teoretisk bakgrund	3
2.1	Induktans och magnetflöde	3
2.2	Magnetiska material och magnetisering	4
2.3	Acceleration av en permanentmagnet	5
2.4	Matematisk modell av ett acceleratorsteg	6
2.4.1	Induktormodell av kopplingen mellan spole och projektil	6
2.4.2	Differentialekvationer för ett acceleratorsteg	7
3	Metod	9
3.1	Beräkning av lämpliga parametrar	9
3.1.1	Val av spolgeometri	9
3.1.2	FEM-analys av acceleratorsteg	10
3.1.3	Beräkning av optimalt antal spolvarv	13
3.2	Försöksuppställning	14
3.2.1	Mekanisk struktur	15
3.2.2	Elektronik	16
3.3	Genomförande av optimering och mätningar	19
3.3.1	Optimering steg för steg och datainsamling	20
3.3.2	Databehandling	20
4	Resultat	22
5	Slutsatser och diskussion	25
5.1	Utvärdering av teoretisk modell och optimering	25
5.2	Utvärdering av slutprodukt	26
6	Vidare forskning	28
	Referenser	29
A	Prototyper	I
B	Detaljer för COMSOL model	III
C	Kod för simulering	IV
D	Lindning av spolar	VI
E	Kompletterande figur till resultat	VIII

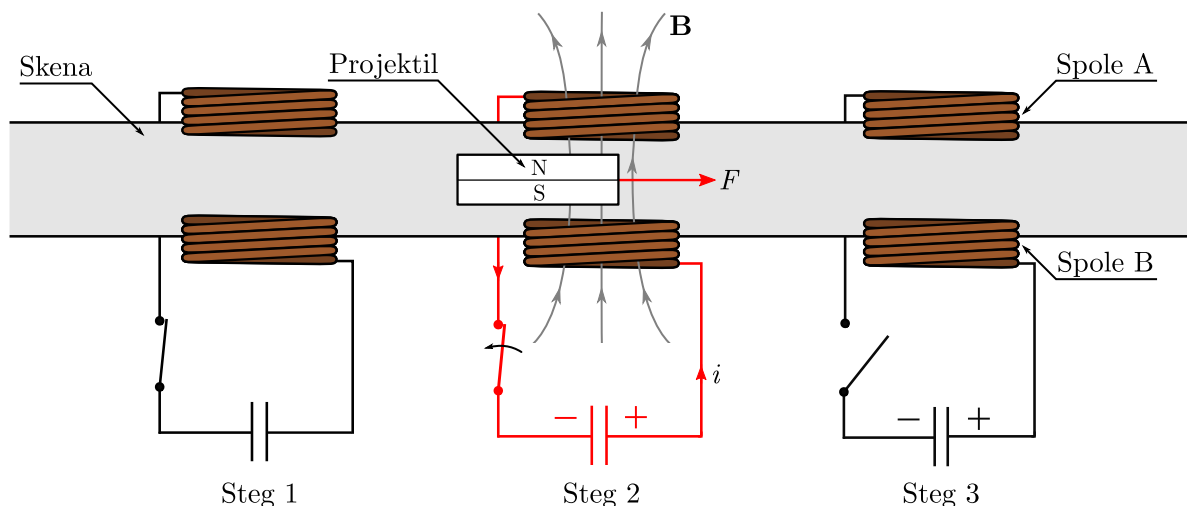
Tabell: Sammanfattning av variabler och parametrar som används i rapporten.

Kategori	Beteckning	Beskrivning
Projektil	x, y, z	Projektilposition (färdriktning, sidled, höjddled)
	$v, v_{\text{in}}, v_{\text{ut}}$	Fart i x -led (allmän, före steg, efter steg)
	Δv_i	Fartökning, steg i
	δ_i	Aktiveringsavstånd steg i (projektilcentrum till spolcentrum)
	m	Projektilens massa
	h	Projektilens tjocklek i y -led (parallellt med magnetfältet)
Spolar	d	Spollängd
	$r_{\text{inre}}, r_{\text{yttre}}$	Spolradie (inre, yttre)
	N	Antal varv tråd i en spole
	A	Tvärsnittsarea för spolkärna
	l	Total längd tråd i en spole
	A_t	Tvärsnittsarea per varv tråd i en spole
	r_t	Trådradie
Magnetism	$\mathbf{E}, E$	Elektriskt fält (vektor, belopp)
	$\mathbf{B}, B$	Magnetisk flödestäthet (vektor, belopp)
	ϵ_0, μ_0	Elektriska och magnetiska konstanterna
	$\mathbf{M}, M$	Projektilens magnetisering (vektor, belopp)
	$\mathbf{m}_d$	Magnetiskt dipolmoment
	$\mathbf{J}_S$	Projektilens bundna ytströmtäthet
	I_P	Projektilens bundna ytström
	L, L_P, L_S	Induktans (allmän, projektil, spolpar)
	L_{SP}	Ömsesidig induktans mellan spolpar (S) och projektil (P)
	Φ_{SS}, Φ_{SP}	Magnetiskt flöde genom S från S respektive P
	Φ_{PP}, Φ_{PS}	Magnetiskt flöde genom P från S respektive P
	k	Kopplingsfaktor mellan spolpar och projektil
	k'	Derivata av k med avseende på x
Elektronik	C	Kapacitans hos kraftkondensator
	R	Resistans hos spole eller spolpar
	σ_t	Konduktivitet hos trådmateriel
	u, u_0	Kondensatorspänning (allmän, initial)
	i, i_{max}	Ström genom spolpar (allmän, maximal)

1 Introduktion

Kristian Birkeland, en norsk vetenskapsman och uppfinnare, utvecklade under slutet av 1800-talet en elektromagnetisk pistol. Pistolen utgjordes huvudsakligen av solenoider runt ett rör och en projektil avfyrares genom att låta en stor ström flöda genom solenoiderna. Projektilens framåt tack vare den elektromagnetiska kraft som uppstår från de inducerade magnetfälten i solenoiderna. Birkelands elektromagnetiska pistol patenterades år 1904 [1] och kallas spolpistol (från engelskans coilgun). Sedan Birkeland patenterade sin elektromagnetiska pistol har forskningen inom området fortsatt och tekniken har utvecklats samt funnit nya tillämpningsområden [4]. Under 1990-talet utvecklade exempelvis Sandia National Laboratories en spolpistol som accelererade en 340 g projektil till 406 m s^{-1} [5], vidareutveckling resulterade i en utgångshastighet på 1000 m s^{-1} för en projektil med massa 237 g [2]. Förslagna tillämpningar innefattar bland annat rymdbranschen, specifikt uppskjutning av satelliter till omloppsbana kring jorden eller till andra himlakroppar. Spolpistoler är speciellt intressanta för himlakroppar med låg tyngdkraft, som exempelvis månen eller Mars, där tekniken har stor potential att reducera uppskjutningskostnader [6]. Syftet med Sandias forskning var att demonstrera spolpistolens tillämpbarhet i att kunna accelerera projektiler till hög fart på omkring 5 km s^{-1} vilket sägs vara tillräckligt för att kostnadseffektivt kunna skjuta upp satelliter till omloppsbana kring jorden [5].

Det som samtliga ovanstående exempel har gemensamt är en cylindrisk konstruktion där projektilens färdas i en sluten pipa kring vilken spolarna är lindade. En annan möjlig konstruktion, hädanefter benämnt LEMA (linjär elektromagnetisk massaccelerator), har spolar monterade vid sidan av en skena ovanpå vilken projektilens färdas. Principen illustreras i figur 1.1. Fördelen med detta är att LEMA:n inte begränsar höjden på projektilens. Den LEMA som beskrivs i rapporten består av en serie oberoende acceleratorsteg och accelererar en projektil som innehåller en permanentmagnet. Varje steg utgörs av två seriekopplade spolar och en kondensator som laddas ur genom dessa. Denna utformning av elektromagnetisk accelerator verkar vara relativt



Figur 1.1: Principen för en LEMA. Spolarna (kopparfärgade) sitter på vardera sida om skenan som projektilens åker på. Varje steg utgörs av två spolar, A och B, samt en kondensator. I figuren har steg 2 aktiverats vilket innebär att en ström i från kondensatorn flyter genom spolarna och genererar ett magnetfält B . Magnetfältet ger upphov till en pådrivande kraft F på projektilens.

utforskad då inga vetenskapliga artiklar som behandlar den hittats. I rapporten presenteras konstruktion samt optimering av LEMA:n med förhoppning om att bidra med forskningsunderlag för framtida lösningar.

1.1 Syfte och avgränsningar

Syftet med kandidatarbetet är att utifrån en teoretisk modell simulera accelerationsförloppet för ett acceleratorsteg samt att utifrån simuleringen konstruera en LEMA optimerad för hög verkningsgrad. LEMA:ns egenskaper, särskilt projektilens fart över tid och verkningsgraden, ska kontrolleras och resultaten ska jämföras med simuleringen.

För att reducera antalet parametrar att undersöka vid optimeringen sätts en rad avgränsningar. LEMA:n ska utformas för att accelerera en massa på omkring 100 g till en hastighet av 10 m s^{-1} . Permanentmagneten till projektilen valdes i förväg och ska vara av typ N35 (neodym) med dimensioner $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$. Samtliga kondensatorer ska ha samma kapacitans och en initial spänning på 300 V. Slutligen fastställs att den elektriska RLC-kretsen som utgörs av kondensatorn och spolparet i varje steg ska vara kritiskt dämpad så att kondensatorerna laddas ur fullständigt och strömmen till spolarna inte oscillerar.

1.2 Samhälleliga och etiska aspekter

Den fysikaliska principen för en LEMA är samma som för de konventionella spolpistoler som är av intresse inom den militära sektorn. Därför måste man inse att även en LEMA konstruerad med rätt parametrar är ett vapen. Detta kandidatarbete fokuserar dock på en design där projektilen färdas på en öppen skena istället för genom en sluten pipa. Anordningen kommer därför sannolikt att vara sämre lämpad än redan existerade alternativ för tillämpning som skjutvapen. Samtidigt medför skenan ett sätt att utvinna den lagrade energin för att driva något annat än en cylindrisk projektil. Detta leder till att det huvudsakliga användningsområdet för konstruktionen ändras från att avfira ett skott till att accelerera ett fordon. För författarna är drivkraften bakom projektet en vilja att bidra till teknologi som i framtiden skulle kunna ge ett grönare sätt att transportera sig, snarare än utveckling av ett vapen.

2 Teoretisk bakgrund

Maxwells ekvationer beskriver den elektromagnetiska fältteorin som är en central del i utformningen av en LEMA. Den mest centrala ekvationen är Maxwells-Amperes lag som säger att en laddning i rörelse ger upphov till ett magnetiskt fält, till exempel när ström flyter genom en spole. Magnetiska fält påverkar i sin tur magnetiska material, som också kan beskrivas utifrån den elektromagnetiska fältteorin. Ett elektromagnetiskt fält från en spole som växelverkar med en permanentmagnet ger upphov till en kraft. Detta är grunden för hur en projektil accelereras i en LEMA.

2.1 Induktans och magnetflöde

En laddning i rörelse genererar enligt Biot-savarts lag magnetflödestäthet, alltså ett magnetfält. Maxwells-Amperes lag säger att strömmar $\mathbf{J}$ och föränderliga elektriska fält $\mathbf{E}$ inducerar magnetfält $\mathbf{B}$ enligt

$$\vec{\nabla} \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t},$$

där μ_0 och ε_0 är den magnetiska respektive elektriska konstanten. När en ström i flyter genom en spole induceras enligt denna lag ett magnetiskt fält som passerar genom spolens centrum. Det totala magnetiska flödet Φ är kopplat till spolens induktans L och definieras

$$\Phi = \iint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = Li, \quad (2.1)$$

där integralen sker över en yta genom spolens centrum. För en ideal lång spole ges induktansen av

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{d}, \quad (2.2)$$

där N är antalet varv i spolen, A är spolens tvärsnittsarea och d är spolens längd [7].

Ett annat viktigt begrepp inom den elektromagnetiska fältteorin är den elektromotoriska spänningen ε som uppstår då det magnetiska flödet genom en krets förändras. Antag att spolen består av endast ett varv. Då ges arbetet per laddningsenhet för att flytta en laddning runt en slinga av

$$\varepsilon = \oint \mathbf{f} \cdot d\mathbf{l} \quad (2.3)$$

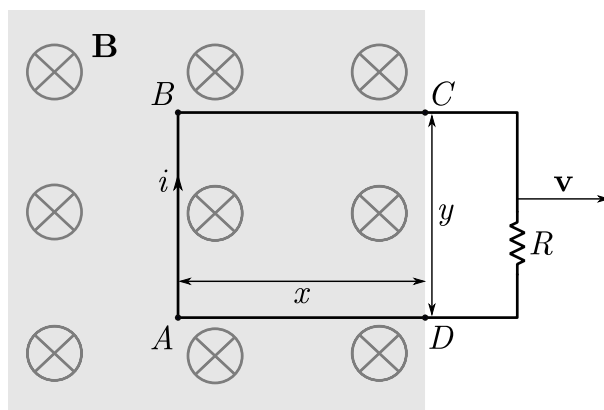
där $\mathbf{f}$ är kraft per laddningsenhet. Arbetet för att flytta en laddning är samma sak som en elektrisk potentialskillnad, vilket innebär att ε är en spänning. Från ekvation (2.1) och (2.3) kan ε relateras till Φ genom att betrakta en krets som rör sig vinkelrätt mot ett magnetfält enligt figur 2.1.

När kretsen förflyttas åt höger med hastigheten $\mathbf{v}$ verkar Lorentzkraften $\mathbf{f} = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ på laddningarna i kretsen längs AB och ger upphov till en ström riktad medurs i kretsen. Eftersom kraften på laddningarna i sträckorna AD eller BC är vinkelrät mot ledaren uppstår ingen spänningskillnad där. Den elektromotoriska spänningen ges enligt (2.3) då av $\varepsilon = v|\mathbf{B}|y$, där y är kretsens vertikala längd inuti magnetfältet. Det magnetiska flödet ges av ekvation (2.1) som $\Phi = |\mathbf{B}|yx$

där x är kretsens horisontella längd i magnetfältet. Eftersom $v = -dx/dt$ fås kombinerat att den elektromotoriska spänningen är magnetflödetsförändring med teckenbyte enligt

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.4)$$

Sambandet kallas Faradays lag [7]. Magnetiskt flöde, induktans och elektromotorisk spänning används för beskrivningen av en LEMA i avsnitt 2.4.2.

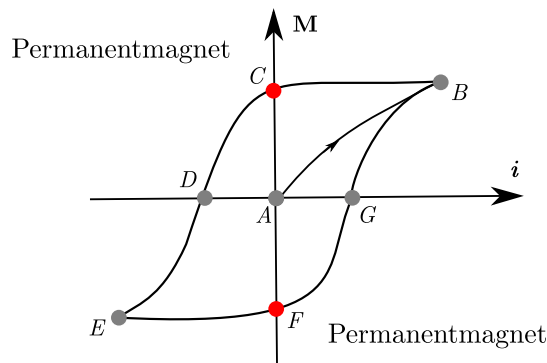


Figur 2.1: För krets som rör sig med hastighet $\mathbf{v}$ vinkelrätt ett magnetfält $\mathbf{B}$ induceras en ström i i kretsens. En spänningsskillnad $\varepsilon = v|\mathbf{B}|y$ induceras mellan punkterna A och B.

2.2 Magnetiska material och magnetisering

Olika material har varierande magnetiska egenskaper som kan delas in i olika kategorier. De tre dominerade kategorierna är dia-, ferro- och paramagnetiska material. Alla material består av elektroner som fungerar som små magneter på grund av deras spin. Dessa magnetiska dipoler har dipolmoment $\mathbf{m}_d$ och följer Pauliprincipen. Magnetiseringsfältet $\mathbf{M}$ är det magnetiska dipolmomentet per volymenhet och är ett mått på hur starkt en region av ett material magnetiseras. Magnetisering av ett material innebär att dipolmomenten ställer in sig i en viss riktning i förhållande till ett yttre fält. När elektronerna är oparade ställs de in i samma riktning som det yttre magnetfältet och blir därmed para- eller ferromagnetiska. Ett diamagnetiskt material repellerar däremot ett yttre magnetfält eftersom elektronerna i materialet är parade. För ett ferromagnetisk material finns orienteringen av dipolerna i materialet kvar efter det externa fältet tagits bort. Detta förklaras med att samlingar av dipolmoment bildar olika domän som är slumpvis orienterade i materialet. När ett starkt magnetfält appliceras kan domänens rand flyttas och domänerna som är närmast parallella med det yttre fältet växer och kan resultera i en permanent orientering, alltså en permanentmagnet [7].

Figur 2.2 visar en hystereskurva som beskriver hur magnetiseringen $\mathbf{M}$ beror på en ström i . Ett material lindas med en strömförande slinga, likt en spole. När strömmen flyter igenom slingan induceras ett magnetiskt fält. Med högre ström och därmed större magnetfält kommer andelen linjerade domäner öka och därmed ökar materialets magnetisering $\mathbf{M}$. Till slut nås en mättnadspunkt B, då alla dipoler är parallella med det yttre fältet. En ytterligare ökning av det magnetiska fältet påverkar inte magnetiseringen märkvärt. Reduceras magnetfältet sedan ner till punkt C finns fortfarande en magnetisering av materialet kvar och en permanentmagnet



Figur 2.2: Hystereskurvan visar hur magnetiseringen $\mathbf{M}$ i ett material beror på strömmen i som ger upphov till det yttre magnetiska fältet som påverkar materialet.

har skapats. Punkten D representerar en demagnetisering av materialet som sker när det yttre magnetfältet byter riktning. En fortsatt ökning av magnetfältet med den nya motsatta riktningen resulterar även här i en mättnad av magnetiseringen hos punkten E . Slutligen resulterar en minskning av fältet till en permanentmagnet i punkten F , och en demagnetisering av materialet sker i punkten G då fältet byter tillbaka riktning. Magnetiseringen beror alltså inte bara på det externa fältet kring materialet utan domänen kan sägas ha ett minne från tidigare exponering av magnetfält. Detta visas tydligt i punkterna A , C och F som alla saknar ett yttre magnetfält men har olika $\mathbf{M}$.

2.3 Acceleration av en permanentmagnet

Elektromagnetiska acceleratorer kan grovt delas in i tre olika kategorier baserat på hur projektilen kopplar till det magnetiska fältet. För en induktiv LEMA består projektilen av ett elektriskt ledande material. Kraften på projektilen uppstår genom den induktiva kopplingen mellan de statiska spolarna och inducerade strömmar i projektilen. För en reluktiv LEMA består projektilen istället av ett icke-ledande mjukt ferromagnetiskt material som tillfälligt magnetiseras av spolarnas fält [4]. För den LEMA som behandlas i denna rapport består projektilen av ett hårt ferromagnetiskt material, det vill säga en permanentmagnet.

För att beskriva fysiken bakom vår LEMA antas den permanentmagnetiska projektilen kunna betraktas som ett konstant och homogent magnetiseringsfält $\mathbf{M}$, motsvarande punkt C i figur 2.2. Kraften $\vec{F}$ på en magnetisk dipol $\mathbf{m}_d$ i ett externt magnetfält $\mathbf{B}$ ges av

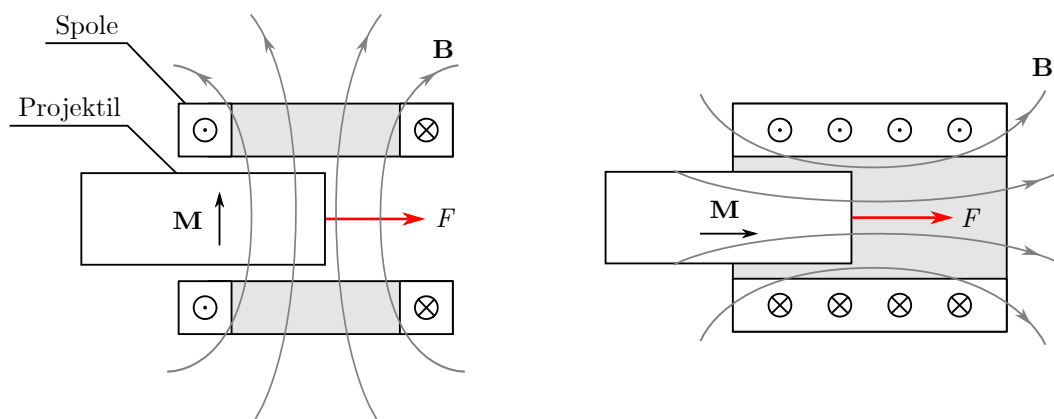
$$\vec{F} = \vec{\nabla}(\mathbf{m}_d \cdot \mathbf{B}),$$

vilket motiveras mer ingående i exempelvis [7]. Från integrering över magnetens volym V' och definitionen av magnetiskt flöde (2.1) följer att den totala kraften på projektilen ges av

$$\vec{F} = \iiint_{V'} \vec{\nabla}(\mathbf{M} \cdot \mathbf{B}) dV' = Mh \vec{\nabla} \iint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = Mh \vec{\nabla} \Phi \quad (2.5)$$

där Φ är det magnetiska flödet parallellt med magnetiseringen från spolen genom projektilen och h är projektilens tjocklek. Uttrycket visar att en permanentmagnet med sin magnetisering linjerad med det externa fältet kommer röra sig i gradientens riktning, det vill säga dit det totala magnetiska flödet genom projektilen är som starkast.

Figur 2.3 visar två möjliga geometrier för elektromagnetiska accelerators med permanentmagnetisk projektil. I det ena fallet (vår LEMA) är kraften vinkelrät mot magnetfältets riktning och i det andra fallet (konventionell spolpistol) är kraften och magnetfältet parallella. I båda fallen är magnetiseringen linjerad med det externa fältet. I enighet med ekvation (2.5) blir kraften därför riktad dit magnetfältet är starkast, det vill säga mot spolarnas mitt. En LEMA accelererar projektilen genom att ha ett starkt $\mathbf{B}$ -fält då projektilen är till vänster om spolen och ett svagt eller motriktat $\mathbf{B}$ -fält då projektilen passerat mitten.



Figur 2.3: Skiss som illustrerar krafterna på permanentmagnetiska projektiler i magnetiska fält inducerade av spolar. Till vänster: geometrin för vår LEMA med spolar monterade vid projektilens sidor. Till höger: en konventionell spolpistol där projektilen passerar genom spolen.

Att konstruera en LEMA med hög verkningsgrad handlar i stor utsträckning om två saker. För det första ska det magnetiska flödet från spolarna genom projektilen maximeras. För det andra ska leveransen av ström till spolarna styras så att projektilen accelereras maximalt innan projektilen når spolarnas mitt och retarderas minimalt efter den passerat mittpunkten.

2.4 Matematisk modell av ett acceleratorsteg

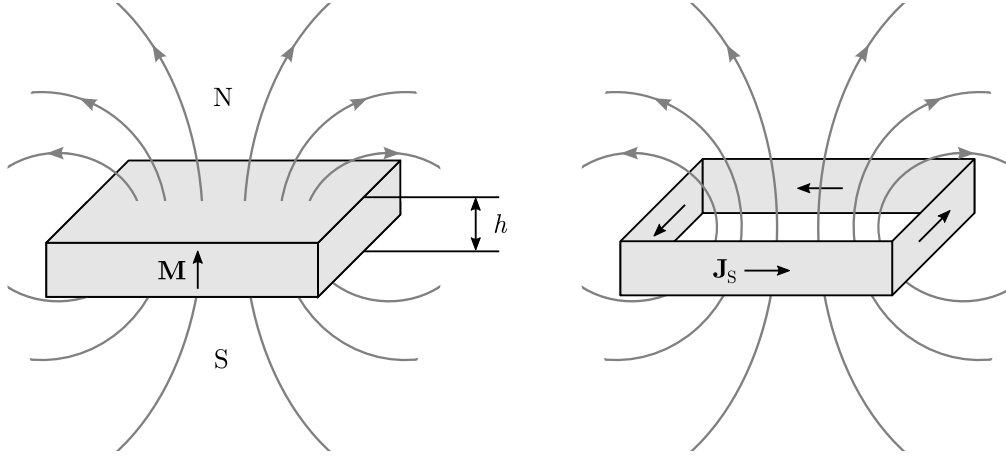
I syfte att konstruera en LEMA med hög verkningsgrad härleds i detta avsnitt en matematisk modell av ett acceleratorsteg för en LEMA med en permanentmagnetisk projektil. Matematiska modeller för induktiva spolpistoler är väl studerade, se exempelvis [3], [8], [9]. För att kunna applicera dessa modeller på en LEMA med permanentmagnetisk projektil betraktas permanentmagneten som en konstant strömfördelning.

2.4.1 Induktormodell av kopplingen mellan spole och projektil

Det kan visas att det magnetiska fältet från magnetiseringen $\mathbf{M}$ är ekvivalent med fältet från en bunden volymströmtäthet $\mathbf{J}_V$ och ytströmtäthet $\mathbf{J}_S$ givna av

$$\mathbf{J}_V = \vec{\nabla} \times \mathbf{M}, \quad \mathbf{J}_S = \mathbf{M} \times \hat{n} \quad (2.6)$$

där $\hat{n}$ är magnetiseringens ytnormal [7]. Detta innebär att fältet från en rektangulär permanentmagnet med liten höjd h är ekvivalent med en rektangulär strömslinga med konstant ström $I_P = Mh$ enligt figur 2.4.



Figur 2.4: En konstant magnetisering $\mathbf{M}$ ger upphov till ett magnetfält som är identiskt med det från en slinga med konstant ytström $\mathbf{J}_S$.

Betrakta nu spolen och projektilen som två strömslingor, S respektive P. Strömmen i S betecknas i och den konstanta magnetiseringsströmmen i P betecknas $I_P = Mh$. Slingorna kopplar elektromagnetiskt till varandra genom att magnetfältet som induceras av S flödar genom P och vice versa. Kopplingen kan beskrivas av induktanserna L_S och L_P samt den ömsesidiga induktansen L_{SP} som definieras

$$L_S = \frac{\Phi_{SS}}{i} \quad L_P = \frac{\Phi_{PP}}{I_P} \quad L_{SP} = \frac{\Phi_{PS}}{i} = \frac{\Phi_{SP}}{I_P}$$

likt ekvation (2.1). Det magnetiska flödet genom P från S betecknas här Φ_{PS} medan flödet genom S från sig själv betecknas Φ_{SS} och så vidare. I [7] visas att det kopplade systemets totala magnetiska energi ges av

$$W_m = \frac{1}{2}L_S i^2 + L_{SP} i I_P + \frac{1}{2}L_P I_P^2. \quad (2.7)$$

Kopplingskoefficienten k för slingorna definieras

$$k = \frac{L_{SP}}{\sqrt{L_S L_P}} = \sqrt{\frac{\Phi_{SP} \Phi_{PS}}{\Phi_{SS} \Phi_{PP}}}. \quad (2.8)$$

Om slingorna inte kopplar till varandra alls är $k = 0$. Om allt magnetiskt flöde från S går genom P och vice versa är $k = 1$. För en LEMA är L_{SP} och k beroende av projektilens position x relativt spolen.

2.4.2 Differentialekvationer för ett acceleratorsteg

Med hjälp av den ovan presenterade teorin kan differentialekvationer som beskriver ett acceleratorsteg för en LEMA härledas. Antag att projektilen är fritt rörlig längs en axel och har position x längs denna. Genom att betrakta förändringen av den magnetiska energin (2.7) vid en infinitesimal förflyttning dx av projektilen kan det visas att den drivande kraften ges av

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} = \left. \frac{dW_m}{dx} \right|_i = \frac{dL_{SP}}{dx} I_P i = k' \sqrt{L_S L_P} I_P i \quad (2.9)$$

där m är projektilens massa och k' betecknar derivatan med avseende på x för kopplingskoefficienten k mellan spole och projektil. Notera att detta uttryck är ekvivalent med (2.5) om fältet

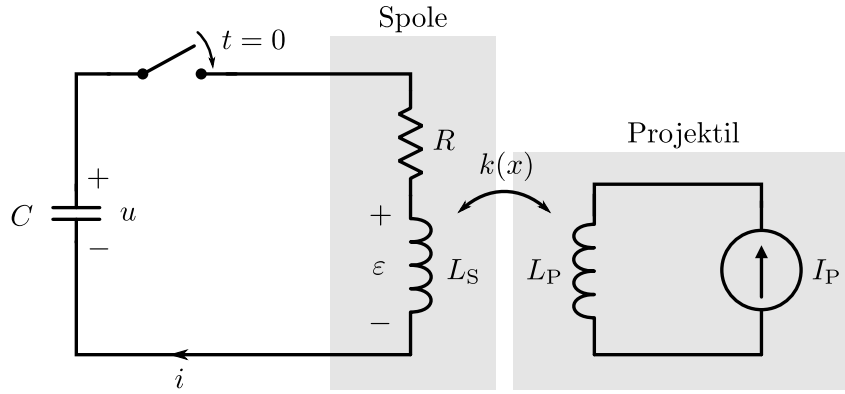
pekar i z -led och projektilen rör sig i x -led eftersom

$$Md \frac{d\Phi_{PS}}{dx} = I_P \frac{dL_{SP}}{dx} i.$$

Det totala magnetiska flödet genom spolen är $\Phi_{SS} = L_S i + L_{SP} I_P$. Från detta följer av Faradays lag (2.4) att den inducerade spänningen ε i spolen är

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_S}{dt} = -L_S \frac{di}{dt} - \frac{dL_{SP}}{dx} \frac{dx}{dt} I_P.$$

Ett acceleratorsteg i vår LEMA är i princip en kondensator som vid en viss tid $t = 0$ laddas ur genom spolen enligt figur 2.5. Kirchoffs spänningslag i den vänstra slingan ger



Figur 2.5: Idealiserat kretsschema för ett acceleratorsteg i en LEMA.

$$u = Ri + \varepsilon = Ri - L_S \frac{di}{dt} - \frac{dL_{SP}}{dx} \frac{dx}{dt} I_P \quad (2.10)$$

där R är kretsens totala resistans. För en kondensator med kapacitans C gäller även att

$$C \frac{du}{dt} = -i. \quad (2.11)$$

Tillsammans utgör ekvationerna (2.9), (2.10) och (2.11), samt sambandet mellan hastighet och position, ett system av kopplade differentialekvationer

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} x(t) = v(t) \\ \frac{d}{dt} v(t) = \frac{\sqrt{L_S L_P} I_P}{m} k'(x(t)) i(t) \\ \frac{d}{dt} u(t) = -\frac{1}{C} i(t) \\ \frac{d}{dt} i(t) = -\frac{I_P}{L_S} k'(x(t)) v(t) + \frac{1}{L_S} u(t) - \frac{R}{L_S} i(t) \end{cases} \quad (2.12)$$

för projektilens position $x(t)$ och hastighet $v(t)$, kondensatorns laddning $u(t)$ och strömmen genom spolen $i(t)$. Lösningen av systemet ger projektilens rörelse över tid givet valda parameterar och begynnelsevärden. Hela beroendet av systemets geometri sammanfattas av $k(x)$. En beskrivning av hur denna funktion beräknades för vår design följer nedan i avsnitt 3.1.2.

3 Metod

En iterativ arbetsprocess valdes där flera prototyper konstruerades, testades och utvärderades innan en slutlig version togs fram. Syftet var att på kort tid upptäcka eventuella problem som uppstår samt få insikter om vad som fungerar och vad som behöver förbättras. Metoden att testa och förbättra något flera gånger har visat sig ge bättre resultat jämfört med att skapa en enda slutprodukt [10]. I projektet togs två prototyper fram (se appendix A) innan den slutgiltiga LEMA:n som behandlas i rapporten konstruerades. I detta avsnitt beskrivs först hur optimeringen gick till i simuleringen och sedan förklaras försöksupställningen och hur optimeringen gick till vid konstruktion av LEMA:n.

3.1 Beräkning av lämpliga parametrar

Utformningen av vår LEMA började med att begränsa antalet fria variabler och identifiera vilka parametrar som är lämpliga att optimera. Från de avgränsningar som nämndes i avsnitt 1.1 följer direkt vissa begränsningar hos andra parametrar. Den kinetiska energin för en projektil med massa 100 g och fart 10 m s^{-1} är 5 J. Baserat på tidigare spolpistoler och preliminära resultat från simuleringen som beskrivs i avsnitt 2.4 uppskattades den slutgiltiga verkningsgraden grovt bli omkring 5 %. Energin för kondensatorerna uppskattades därför till runt 100 J. Givet detta och den initiala spänningen $u_0 = 300 \text{ V}$ samt estimering av fyra spolpar till modellen, beräknades en lämplig kapacitans vara $C = 560 \mu\text{F}$.

En inte uppenbar konsekvens av att kondensatorernas urladdning ska vara kritiskt dämpad är att koppartråden i alla spolpar ska ha samma radie. En kritiskt dämpad RLC-krets har $CR^2 = 4L$ [11]. För spolparet ger ekvation (2.2) uppskattningen $L = 2\mu_0 N^2 (\pi r^2)/d$, där r är spolarnas medelradie. Resistansen hos tråden i spolarna ges av $R = 2(N2\pi r)\sigma/(\pi r_t^2)$, där r_t och σ_t är trådens radie respektive konduktivitet. Detta medför kravet

$$r_t = 4\sqrt{\frac{Cd}{\mu_0\pi\sigma_t^2}}$$

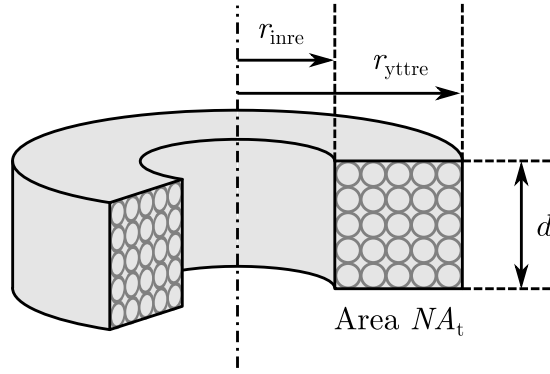
för kritisk dämpning. Med konduktiviteten för koppar och en grov uppskattning att alla spolpar har samma längd 1 cm erhöles $r_t \approx 0,2 \text{ mm}$. Med dessa variabler fastställda var de viktigaste återstående parametrarna att optimera formen och antalet varv N i spolarna i varje steg.

3.1.1 Val av spolgeometri

Spolarna modellerades som ihåliga cylindrar av koppartråd med homogen packningstäthet enligt figur 3.1. För att reducera antalet parametrar att optimera valdes en fix innerradie $r_{\text{inre}} = 7,5 \text{ mm}$. För att maximera den magnetiska kopplingen mellan spole och projektil bör hela spolen vara så nära projektilen som möjligt. Baserat på detta avgränsades spolarnas längd d till att vara lika stor som skillnaden mellan ytterradie r_{yttre} och inneradie r_{inre} så att tvärsnittet blev kvadratisk. Det medför att geometrin entydigt bestäms av antalet varv tråd per spole N .

Längden d som funktion av N ges av likheten mellan två uttryck för spolens totala tvärsnittsarea

$$d^2 = NA_t \implies d = \sqrt{NA_t} \quad (3.1)$$



Figur 3.1: Spolparametrar för en spole med N varv och tvärsnittsarea A_t per varv tråd.

där A_t är tvärsnittsarean per varv tråd. På liknande sätt ges den totala trådlängden i en spole l av två olika uttryck för spolens totala volym

$$d\pi(r_{\text{yttre}}^2 - r_{\text{inre}}^2) = lA_t \implies l = \pi N(\sqrt{NA_t} + 2r_{\text{inre}}). \quad (3.2)$$

Trådarean A_t kan betraktas som en konstant och ges från spolens geometri av

$$A_t = d\pi(r_{\text{yttre}}^2 - r_{\text{inre}}^2)/l.$$

Genom mätningar på fyra lindade spolar uppmättes $A_t = (0,60 \pm 0,05) \text{ mm}^2$ för tråden och lindningstekniken som nyttjades. Senare användes ekvation (3.1) och (3.2) med det experimentella värdet på A_t för att linda spolar med rätt dimensioner givet optimalt N .

3.1.2 FEM-analys av acceleratorsteg

Optimalt värde på N för varje steg bestämdes från en simulering. För att simulera ett acceleratorsteg för ett givet N med hjälp av modellen (2.12) krävs konstanterna L_P och I_P för projektilen, L_S och kopplingsfaktorn $k(x)$. Värden för dessa parametrar erhöles från en FEM¹-simulering av ett acceleratorsteg i mjukvaran COMSOL. Simuleringen genomfördes för den magnet med dimensioner $50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ som valts på förhand.

De två spolarna i acceleratorsteget modellerades som ihåliga cylindrar med dimensioner enligt figur 3.1 och homogen volymströmtäthet Ni/d^2 , där i är en vald konstant ström. Projektilen modellerades som en rektangulär slinga likt figur 2.4 med ytströmtäthet $|\mathbf{J}_S| = M$ enligt ekvation (2.6). Värdet på M antogs vara

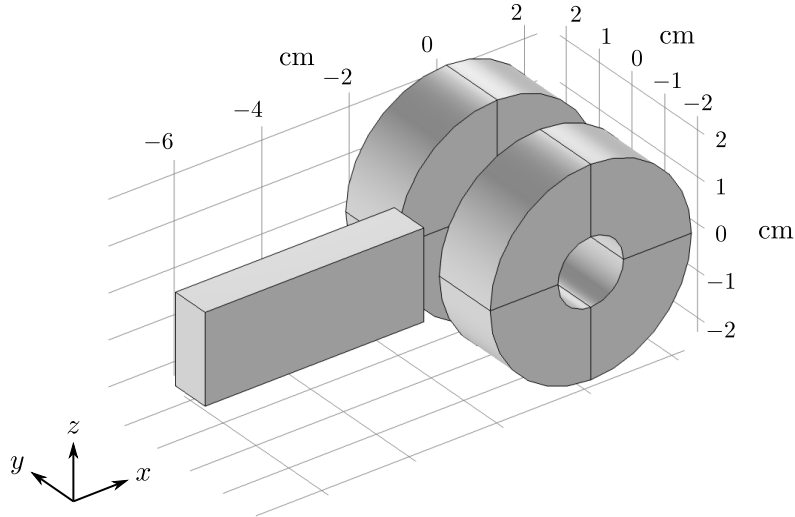
$$M = B_r/\mu_0 = 12,1 \text{ kOe} = 963 \text{ kA m}^{-1} \quad (3.3)$$

där $B_r = 1,21 \text{ T}$ är den nominella permanenta magnetiseringen som angavs i det magnetiska materialets datablad [12]. Projektilen var centrerad i höjd och sidled mellan spolarna. Mellanrummet mellan spole och projektil sattes till 2 mm. En bild på modellen visas i figur 3.2 och mer detaljerad information om geometrin återfinns i appendix B.

Med hjälp av mjukvaran beräknades det magnetiska fältet från spole och projektil i en sfärisk volym luft centrerad kring de två spolarnas mittpunkt. Den totala magnetiska energin beräknades sedan genom att integrera över volymen enligt

$$W_m = \frac{1}{2\mu_0} \iiint B^2 dV.$$

¹Finita elementmetoden.



Figur 3.2: Geometrin som användes i COMSOL simuleringen. Rätblocket är den permanentmagnetiska projektilen och de ihåliga cylindrarna är de två spolarna i ett acceleratorsteg.

Utifrån den totala magnetiska energin med olika värden på i och I_P samt projektilpositioner x beräknades L_S , L_P och $L_{SP}(x)$ genom ekvation (2.7). Kopplingsfaktorn $k(x)$ beräknades sedan med hjälp av ekvation (2.8). Vid beräkning av $L_{SP}(x)$ valdes $i = 20 \text{ A} \cdot (N/400)$ för att bidragen till W_m från spole och projektil skulle vara approximativt lika stora vilket visade sig minimera det numeriska felet i beräkningen.

För att möjliggöra snabb beräkning av induktans och kopplingskoefficient för valfritt antal spolvarv gjordes en analytisk anpassning till de i COMSOL beräknade värdena. En analytisk ansats till L_S som funktion av antal varv inspirerades av uttrycket för induktansen hos en ideal solenoid i ekvation (2.2). Med spolarea $\pi(r_{\text{inre}} + d/2)^2$, längd $d = \sqrt{NA}$ samt kopplingsfaktor κ mellan de två spolarna blir den totala induktansen för ett seriekopplat spolpar

$$L_S(N) = 2(1 + \kappa) \frac{\mu_0 N^2 \pi (r_{\text{inre}} + \sqrt{NA}/2)^2}{\sqrt{NA}} = a \left(\frac{N}{N_0} \right)^{3/2} + b \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 + c \left(\frac{N}{N_0} \right)^{5/2}$$

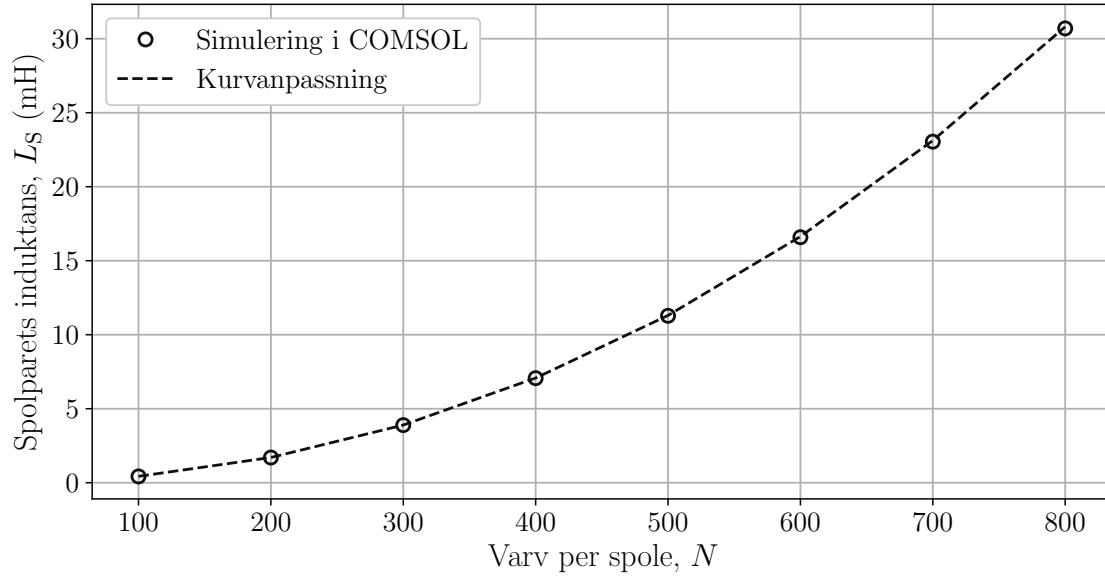
där N_0 är en konstant medan a , b och c är parametrar. Minstakvadratanpassning till data från COMSOL simuleringen med $N_0 = 400$ varv visas i figur 3.3 och gav $a = 0,89 \text{ mH}$, $b = 4,05 \text{ mH}$ och $c = 2,14 \text{ mH}$ för vår spolgeometri. Kopplingskoefficienten k beror framförallt på projektilens position x men även till viss del på spolens geometri som bestäms av antalet varv N . För $k(x)$ gjordes en ansats på formen

$$k(x) = k_0 + k_{\text{max}} \exp \left[- \left(a \frac{x}{x_0} \right)^2 - \left(b \frac{x}{x_0} \right)^4 \right] \quad (3.4)$$

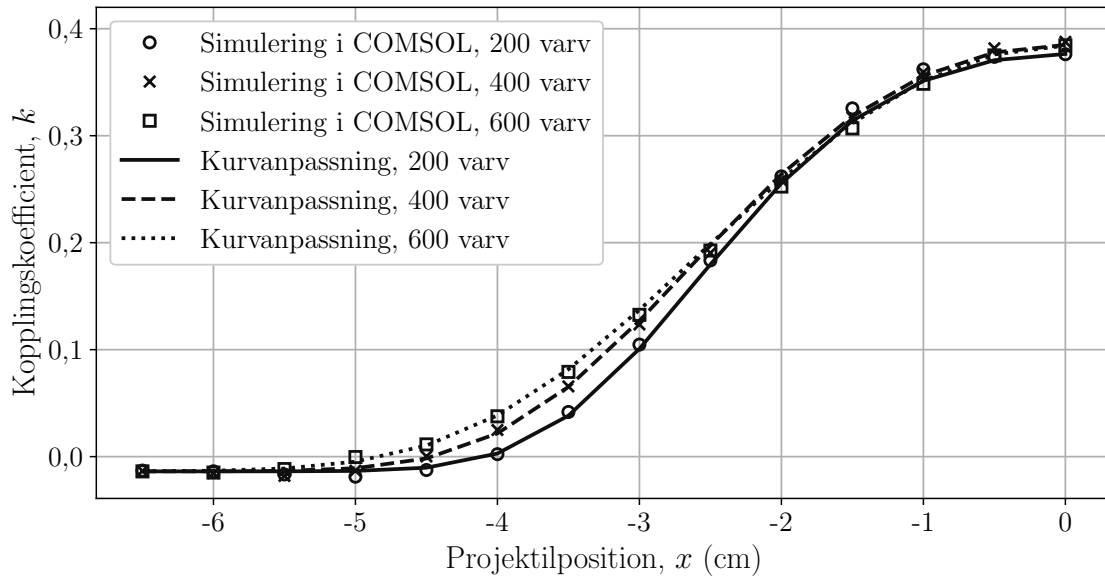
där $x_0 = 1 \text{ cm}$, $N_0 = 400$ varv och k_0 är en parameter. För att ta hänsyn till antalet varv i spolen N tilläts a , b och k_{max} bero av N enligt

$$\begin{aligned} a(N) &= a_1 + a_2(N/N_0) \\ b(N) &= b_1 + b_2(N/N_0) \\ k_{\text{max}}(N) &= k_1 + k_2(N/N_0) + k_3(N/N_0)^2 \end{aligned} \quad (3.5)$$

där a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , k_1 , k_2 och k_3 är parametrar. En minstakvadratanpassning av (3.4) till data från COMSOL simuleringen visas i figur 3.4. I tabell 3.1 visas de resulterande parametervärdena för vår spolgeometri och permanentmagnet.



Figur 3.3: Induktansen i ett spolpar som funktion av N samt anpassat analytiskt samband.



Figur 3.4: Kopplingskoefficient mellan spolpar och projektil som funktion av projektilens position x relativt spolen för olika N samt anpassat analytiskt samband. Anpassningen gjordes till data för N i steg om 100 mellan 100 och 800, ett urval av datan presenteras.

Tabell 3.1: Parametervärden för minstakvadratanpassning av (3.5) till COMSOL-data.

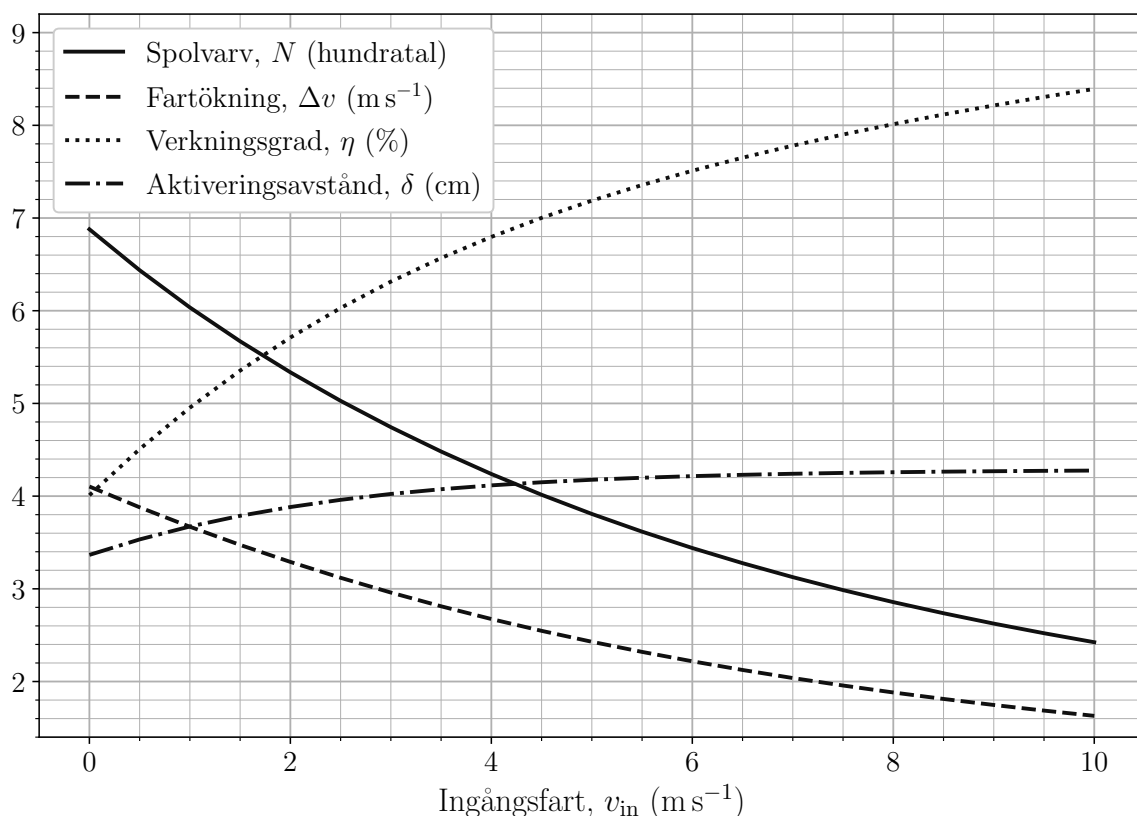
$$\begin{array}{l|l|l}
 a_1 = 0,217 & b_1 = -0,344 & k_1 = 0,373 \\
 a_2 = 0,048 & b_2 = 0,077 & k_2 = 0,044 \\
 & & k_3 = -0,018
 \end{array}$$

3.1.3 Beräkning av optimalt antal spolvarv

Utifrån den teoretiska modellen som presenterats i avsnitt 2.4.2 och med de parametervärden som tagits fram i avsnitt 3.1.2 skapades en numerisk simulering av accelerationsförloppet i ett acceleratorsteg. Ekvationssystemet (2.12) löstes numeriskt för att erhålla sluthastigheten efter acceleration v_{ut} givet ingångshastighet v_{in} , antal varv per spole N och avstånd δ i x -led mellan projektilens och spolparets centrum när stegets aktiveras (se appendix C för kod). För en uppsättning av v_{in} optimerades stegets verkningsgrad

$$\eta = \frac{mv_{\text{ut}}^2 - mv_{\text{in}}^2}{Cu_0^2} \quad (3.6)$$

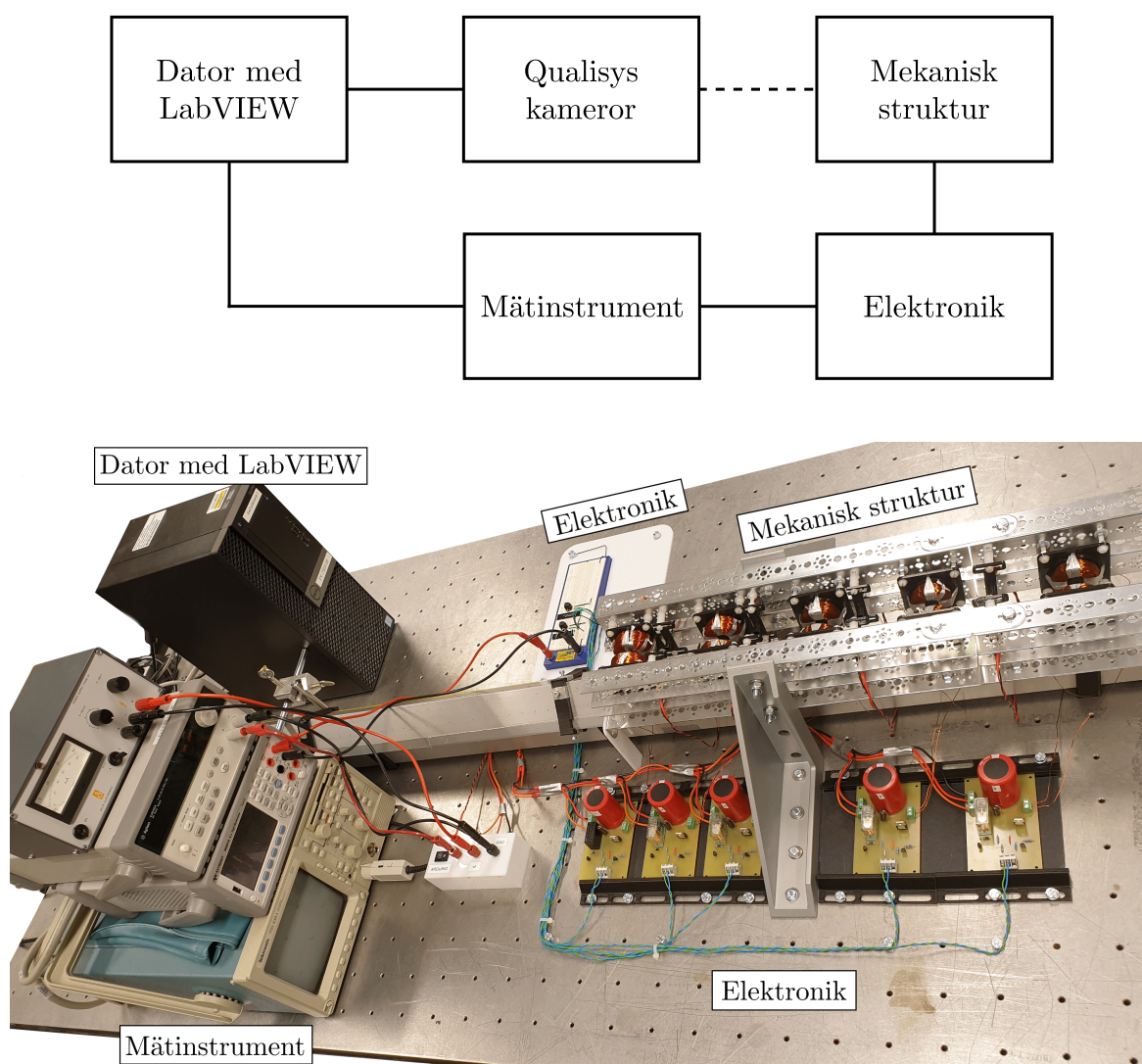
med avseende på δ och N . Resultatet kan sammanfattas med grafen i figur 3.5. Grafen avlästes för att givet ingångshastigheten till ett steg linda spolvarv för steget med optimalt N .



Figur 3.5: Optimala egenskaper för ett acceleratorsteg baserat på simulering. Exempel: Om ingångshastigheten för ett steg är $5,0 \text{ m s}^{-1}$ är den maximala fartökningen och verkningsgraden för steget $2,4 \text{ m s}^{-1}$ respektive $7,2\%$. Det uppnås om spolarna i steget har 380 varv tråd vardera och steget aktiveras när avståndet mellan mittpunkterna för spole och projektil är $4,2 \text{ cm}$.

3.2 Försöksuppställning

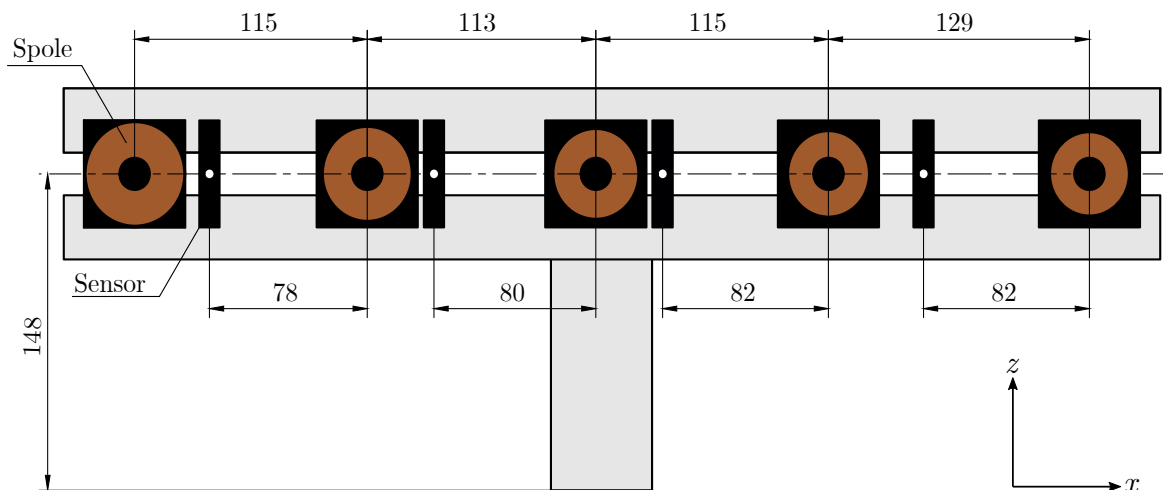
I figur 3.6 visas blockdiagram och fotografi över försöksuppställningen. En dator med LabVIEW styrde dels höghastighetskameror (Qualisys Oqus 300+) och dels mätinstrumenten som utgjordes av ett oscilloskop (Tektronix TDS 430A), en digitalmultimeter (Keysight 34461A) och två spänningsaggregat (Agilent E3640A och Delta Elektronika E0300-0.1). Kamerorna registrerade projektilens position över tid, en strömprob (Tektronix TCP202A) kopplad till oscilloskopet mätte ström genom stegen, digitalmultimetern registrerade signaler från elektroniken och spänningsaggregaten försedde elektroniken med spänning. Elektronikens huvuduppgift var att ladda upp och sedan ladda ur kondensatorerna till respektive steg vid aktivering. Med den mekaniska strukturen fixerades spolar och sensorer nära intill projektilen som färdades på en luftskena. I nedanstående avsnitt beskrivs den mekaniska strukturen och elektroniken mer ingående.



Figur 3.6: Överst: Blockdiagram över huvudsakliga delar hos uppställningen. Heldragen linje mellan block indikerar elektronisk förbindning, medan streckad linje innebär visuell. Underst: fotografi över uppställningen (Qualisys kameror sitter i taket ovanför och visas ej).

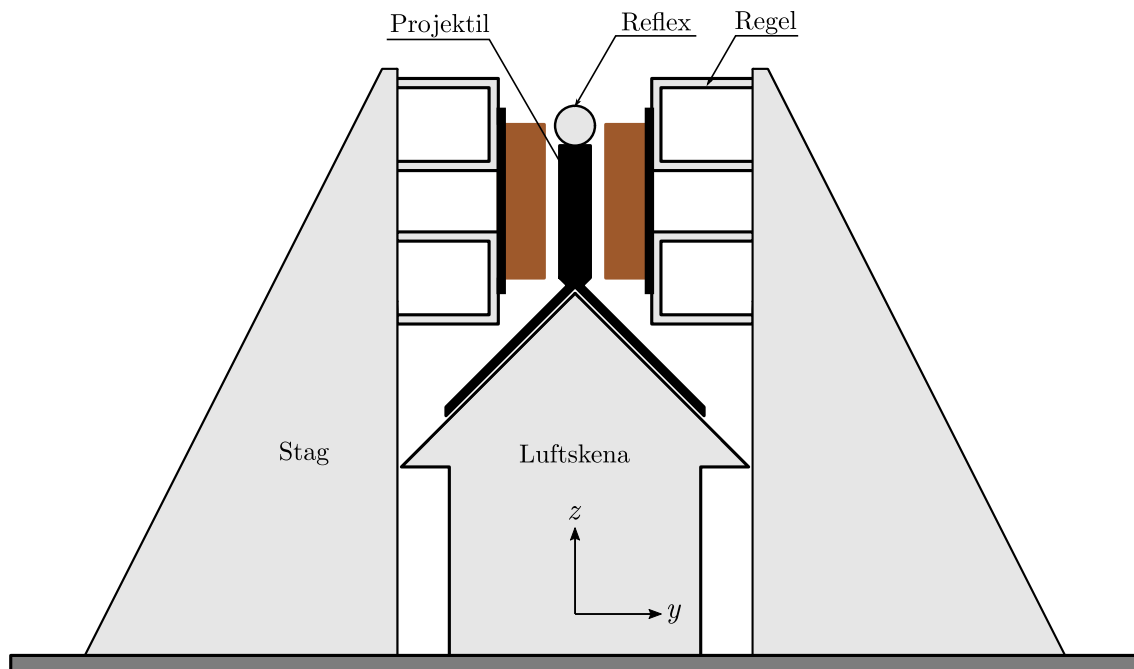
3.2.1 Mekanisk struktur

LEMA:ns stomme utgjordes av Tetrix-strukturer bestående av fyra aluminiumreglar och två monteringsstag. Två regler monterades på vardera stag med olika höjd vertikalt. Stagen var fastskruvade mitt emot varandra på ett optiskt bord. På aluminiumreglarna monterades 3D-utskrivna spol- och sensorhållare med skruvar av polyamid för att inte påverka den magnetiska projektilen. Totalt användes fem spolpar och varje spolpar hade en spole på vardera sida om skenan. Spolhållarna utformades med en kärna som fyllde kopparspolarnas inre diameter i syfte att stabilisera spolen. Vidare fästes spolarna via genomgående hål vid kärnans ytterkant och spolens ytterkant med tunna plastband (presentsnöre av polypropen). Spolhållarna fästes så att kopparspolarnas centrum blev fixerade centrerat mellan reglarna så nära projektilen som möjligt. Sensorer, vilka beskrivs närmare i avsnitt 3.2.2, installerades på varsin platta med förskjutningsskenor mitt emot varandra på vardera regelpar så att deras signal bröts vid passage av projektilen. I figur 3.7 visas en schematisk bild över ett av stagen med aluminiumreglar, spolhållare, sensorer med utvalda mått i millimeter.

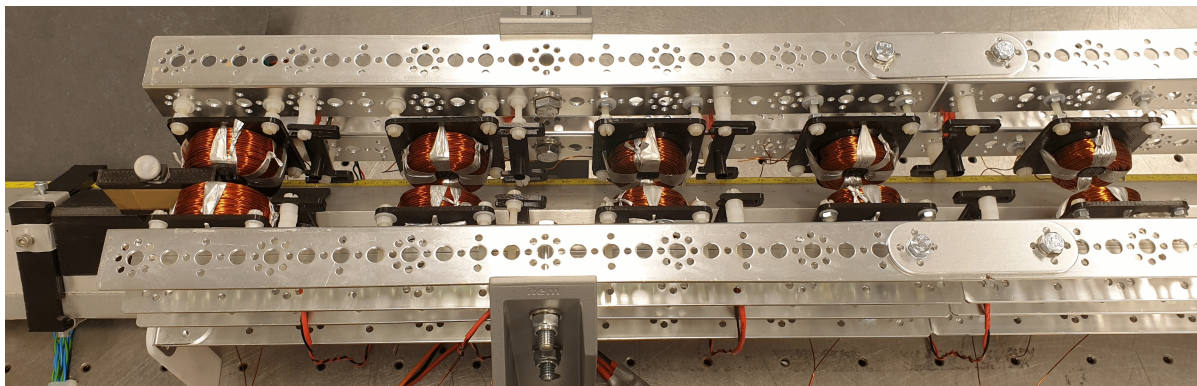


Figur 3.7: Schematisk bild över ett av de två stagen med spolhållare och sensorer. Projektilens färdriktning i figuren är från vänster till höger. Mått i millimeter.

Mellan de två monteringsstagen monterades en triangulär luftskena med tillhörande luftaggregat där projektilen kunde löpa endimensionellt med minimerad friktion. Projektilen bestod som tidigare nämnt av en neodymmagnet $50\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ vilken fästes på en ryttare designad för luftskenas dimensioner. På toppen av ryttaren monterades en reflexkula för att kamerorna skulle kunna registrera projektilens rörelse. Ett tvärsnitt på strukturen syns i figur 3.8 och ett fotografi över den mekaniska strukturen visas i figur 3.9.



Figur 3.8: Schematiskt tvärsnitt av den mekaniska strukturen där projektilen i figuren färdas ut ur pappret.

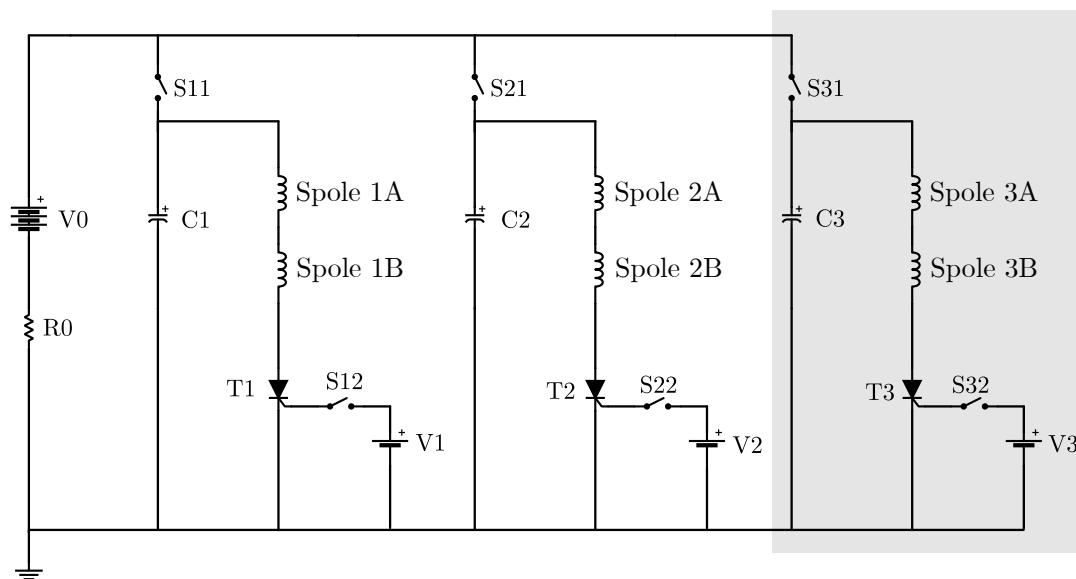


Figur 3.9: Fotografi över den mekaniska strukturen. Projektilen står längst till vänster strax innan steg 1 och färdas åt höger i bilden.

3.2.2 Elektronik

Till en början genomfördes simuleringar i Multisim för att få en förståelse om vilka parametrar på kondensatorer, spolarna och spänningsaggregatet som var rimliga för projektet. En förenklad krets ritades upp och urladdningstid samt strömmen genom en spole mättes för olika värden hos en kondensator. Med detta som stöd valdes kondensatorer med en kapacitans på $560\ \mu\text{F}$ som var dimensionerade för 450 V. Elektrolytkondensatorer valdes istället för superkondensatorer eftersom de kan leverera hela sin strömpuls under en kort tid. Genom att dimensionera spolarna enligt figur 3.5 blev urladdningstiden sådan att ingen ström återstår då projektilen passerat spolarnas mittpunkt. Tack vare detta fanns inget behov av att avbryta urladdningsprocessen och stora backströmmar från spolen kunde undvikas.

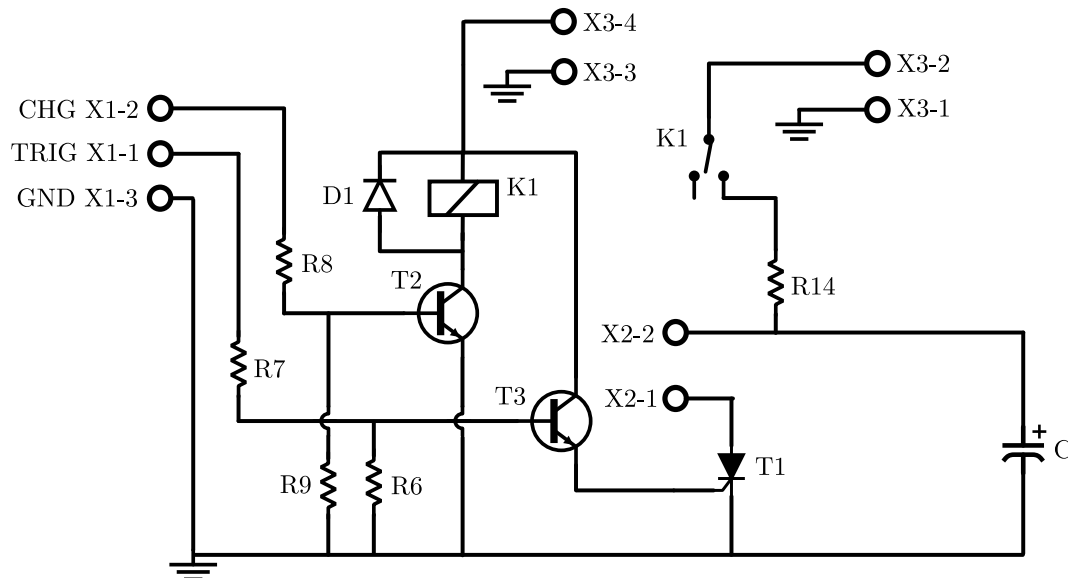
Figur 3.10 illustrerar principen för hur strömmarna flöt mellan kondensatorer och spolar. Det verkliga systemet innehöll fler komponenter och fem steg men följde samma princip. En mikrokontroller (Arduino Uno Rev3 SMD) kontrollerade alla brytare benämnda "S". De tre kondensatorerna C1, C2 och C3 laddades upp från spänningskällan V0 när brytarna S11, S21 respektive S31 slöts. Efter uppladdningen kunde de tre stegen aktiveras med S12, S22 och S32. Varje steg, grå markering i figur 3.10, hanterade höga spänningar under relativt kort tid och kunde därför inte styras direkt med vanliga brytare. Istället användes tyristorerna T1, T2 och T3 som låter stora strömmar flöda mellan anod och katod om en mindre signal appliceras på basen.



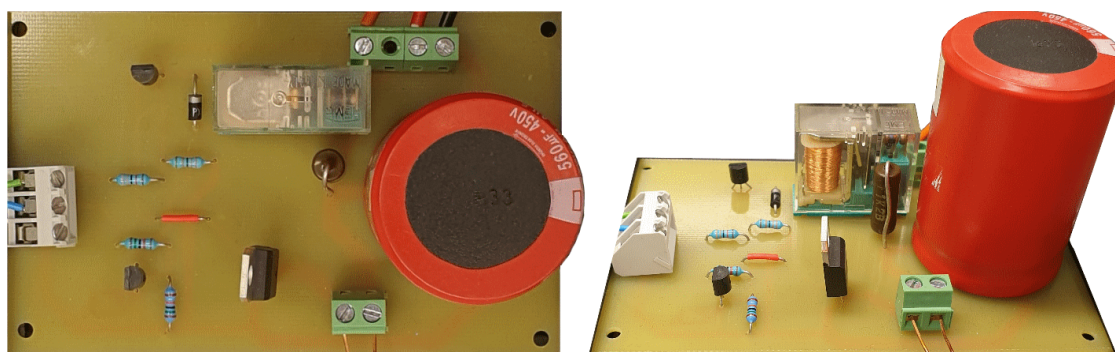
Figur 3.10: Förenklat kopplingsschema för en LEMA med tre steg. För varje extra steg som läggs till seriekopplas ytterligare en sektion inom gråmarkeringen till befintligt schema. Kretsschemat visar principen för hur strömmarna flyter mellan kondensatorer och spolar snarare än den verkliga uppkopplingen som visas i figur 3.11.

Uppkopplingen bestod av fem kretskort, ett för varje steg. Figur 3.11 illustrerar ett komplett kretsschema för ett steg och kan jämföras med sektionen inom grå markering i figur 3.10. Det utökade schemat illustrerar signalingångar för mikrokontrollern samt transistorer och ytterligare en matningsspänning på 10 V för förstärkning av mikrokontrollerns signaler.

Varje kretskort hade terminalerna CHG X1-2, TRIG X1-2 och GND X1-3 kopplade till mikrokontrollern. CHG X1-2 kontrollerade när kondensatorn skulle laddas upp. Genom att applicera en 5 V signal på ingången öppnades transistor T2:s och tillät en 10 V signal att i sin tur öppna reläet. Detta innebar att kondensatorn laddades upp med 300 V från spänningskällan. På samma sätt användes TRIG X1-2 för att aktivera kondensatorurladdningen genom att mikrokontrollern öppnade transistor T3 som då tillät 10 V signal på tyristor T1 som slöt kretsen mellan kondensator och spolar. Transistorerna användes för att garantera tillräckligt stark styrsignal på relä och tyristor då mikrokontrollerns signal var för svag. Spänningen 10 V matades från en extern källa som visas i 3.13. En matningsspänning till kondensatorn på 300 V applicerades mellan X3-2 och X3-1. Spolparet kopplades in mellan X2-2 och X2-1. GND X1-3 är jord och resistanserna R6, R7, R8 och R9 fungerade som spänningsdelare för att få rätt spänning och ström på transistorernas bas. R14 är en högeffektsresistor som begränsade uppladdningshastigheten av kondensatorn för att undvika ljusbågar i reläet. Figur 3.12 visar bilder på ett av de slutgiltiga kretskorten som användes.



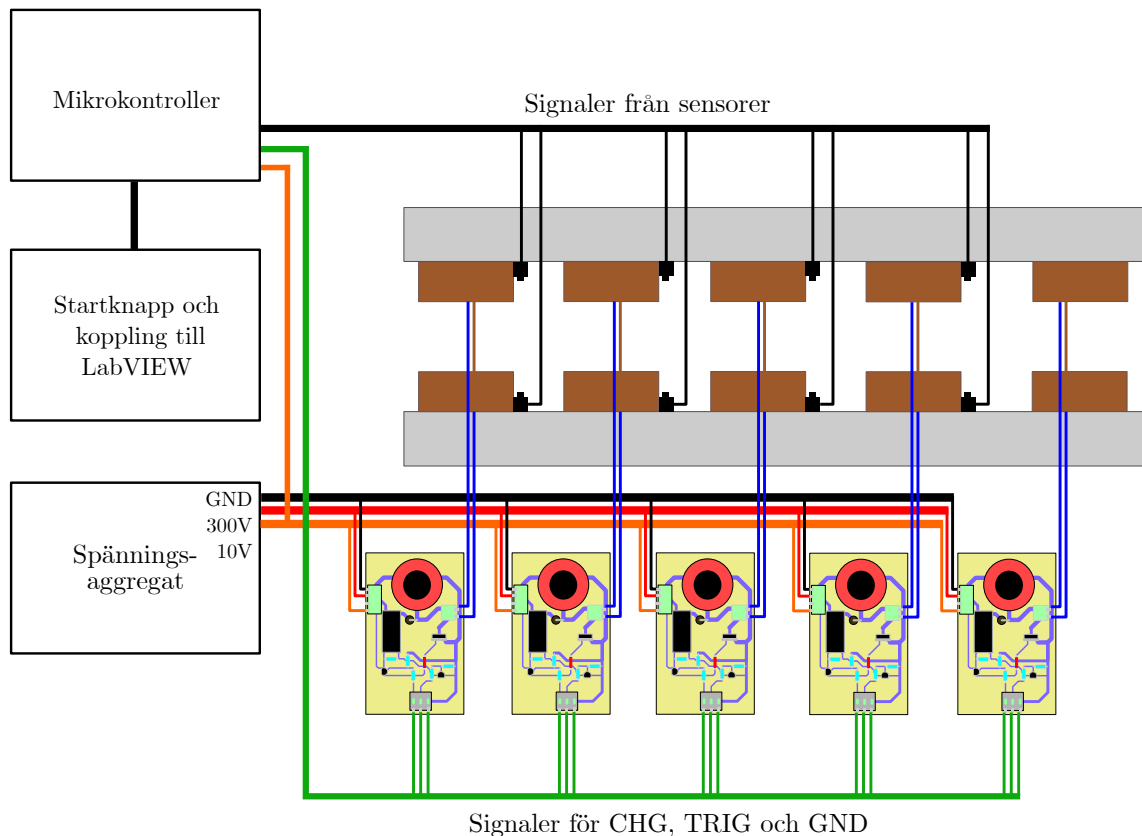
Figur 3.11: Kretschema för kretskorten till varje steg. Denna uppkoppling kan förenklas till kopplingen inom grå markering i figur 3.10.



Figur 3.12: Fotografi över ett kretskort ovanifrån (vänster) och i vinkel (höger).

De fem kretskorten kopplades ihop enligt figur 3.13. Kretskorten designades i mjukvaran EAGLE, ett CAD-program för kretskort, och tillverkades sedan i en kretskortsfräs. Spolarna var seriekopplade i par och varje par direkt kopplat till respektive kretskort. Mikrokontrollern var kopplad till en drivspänning på 10 V samt till en kopplingsplatta med en startknapp som startade uppladdning- och avfyrningssekvensen. Mikrokontrollern mätte även signaler från positionssensorer. Sensorerna utgjordes av lysdioder (OFL-3102) samt fototransistorer (OFT-5301) för infrarött ljus monterade på var sida om skenan. Fotodioden gav en ström så länge den detekterade ljuset från lysdioden. När projektilen passerade mellan diod och transistor bröt den ljusstrålen och fotodioden skickade en signal till mikrokontrollern. Alla steg utom det första hade en tillhörande sensor och mikrokontrollern registrerade vilken sensor som avgav signalen.

När startknappen trycktes ned och programmet i mikrokontrollern exekverades inträffade följande händelser. Först öppnade mikrokontrollern alla reläer och påbörjade uppladdning av kondensatorerna. När detta var klart skickade mikrokontrollern ut en 5 V signal som registrerades av en digitalmultimeter. LabVIEW avläste digitalmultimetern och startade rörelsekamerorna. Därefter initierades avfyrningen genom aktivering av steg 1. Omedelbart efter projektilen passerat första sensorn aktiverade mikrokontrollern nästa steg och processen upprepas för alla steg.



Figur 3.13: Schematisk bild över hur elektroniken (mikrokontroller, kretskort och sensorer) och den mekaniska strukturen sammankopplades till resten av uppställningen.

3.3 Genomförande av optimering och mätningar

Först konstruerades två prototyper som gav flera viktiga lärdomar. För det första observerades att fartökningen i ett steg ökar markant ju närmare spolarna sitter projektilen. Därför monterades samtliga spolpar nära projektilen med enbart någon millimeter mellan spole och projektil. För det andra var friktionen en utmaning dels mellan projektilen och skenan och dels mellan projektilen och spolarna. Friktionen mellan skena och projektil minimerades genom användningen av luftskenan. För det tredje noterades stabiliseringssvårigheter där exempelvis spolarna rörde sig in mot projektilen vid accelerationen och därmed bromsade den. Detta lade grunden för den slutgiltiga prototypen som har beskrivits i detalj i avsnitt 3.2.1 ovan.

För att mäta projektilens position över tid nyttjades som tidigare nämnt två höghastighetskameror. Med en bildhastighet på 10 000 Hz registrerades projektilens position över tid under accelerationsförloppet med en noggrannhet på en hundradels millimeter. LabVIEW användes för att styra kameror och oscilloskopet. Från LabVIEW aktiverades datainsamling med kamerorna och data från både dem och oscilloskopet sparades till en fil efter en mätning.

3.3.1 Optimering steg för steg och datainsamling

När den mekaniska strukturen var monterad, elektroniken inkopplad, mätinstrument och kameror anslutna till LabVIEW påbörjades optimering av stegen. Notera att enbart spolpar 1 var lindat och monterat på den mekaniska strukturen vid detta skede.

Med steg 1 monterat mättes utfarten v_1 efter steget som funktion av olika startpositioner. Projektilens startposition bestämdes av ett stopp som kunde flyttas i x -led längs luftskenan och dess millimeterskala. Startpositionen avgjorde aktiveringsavståndet δ_1 i x -led för steg 1. Aktiveringsavståndet ändrades till dess att maximal utfart erhöles. Därefter mättes utfarten igen, denna gång som funktion av höjd i z -led mellan spolcentrum och projektilcentrum. Höjden varierades genom att placera distanser under luftskenan vilket fick projektilens centrum att komma högre upp i z -led i förhållande till spolarna. Därifrån fastställdes den höjd på luftskenan som gav högst utfart efter första steget och höjden användes för alla efterföljande mätningar. Aktiveringsavståndet optimerades igen med samma resultat som innan.

Med optimalt aktiveringsavstånd för steg 1 simulerades optimala spolparametrar för steg 2 utifrån v_1 (se figur 3.5). Spolarna till nästa steg lindades (se appendix D) baserat på simuleringen och spolparametrarna mättes med skjutmått samt handhållen multimeter av modell CHY 21C. När spolparet monterats uppmättes fartökningen $\Delta v_2 = v_2 - v_1$ från steg 2 som funktion av stegets sensorposition i x -led vilket bestämmer aktiveringsavståndet δ_2 . Projektilens fart beräknades under optimeringsprocessen i Qualisys mjukvara och optimalt aktiveringsavstånd togs som den för vilken Δv_2 var maximal. Med utfarten v_2 simulerades spolparametrar för nästa steg, nästa spolpar lindades, kontrollmättes och monterades. Optimeringen upprepades på samma sätt för resterande steg. Positionsdata från kamerorna sparades vid optimering av aktiveringsavståndet för steg 2.

För att nå så hög slutfart som möjligt, och därmed högst verkningsgrad, applicerades ett lager friktionsminskande medel (symaskinsolja) på projektilens sidor vid mätning av position över tid för vår optimerade LEMA. Tio mätningar togs direkt efter varandra för vilka positionsdata från kamerorna sparades. För en av dessa mätningar registrerades strömmarna genom samtliga steg med en strömprob ansluten till strömdelare. Strömdelare behövdes eftersom maxvärdet för stegens ström $i_{\max}$ överskred vad strömproben maximalt kunde mäta.

3.3.2 Databehandling

Formatering och behandling av mätdata genomfördes i Python². Mätdata från kameror och oscilloskop formaterades först och sedan behandlades datan olika beroende på vilken mätning det gällde. Datat behandlades för beräkning av fart från position, för ström genom samtliga steg, för fartökning i steg 2 och för slutfarten.

För beräkning av fart från position utfördes följande för alla mätserier. Värden där kamerorna inte registrerat projektilen togs bort. Ett gaussiskt filter från biblioteket SciPy applicerades på positionsvärden med standardavvikelse fem som argument. Farten beräknas sedan som tidsderivatan av position med hjälp av funktionen `gradient` från NumPy. För att få samma startpunkt togs alla värden med fart mindre än 80 mm s^{-1} bort. Även de sista 20 värdena på farterna exkluderades då den numeriska derivatan gav icke-realistiska värden mot slutet av datapunkterna.

²Koden och tillhörande filer (mätdata och behandlad data) har gjorts tillgängligt som ett projekt på GitHub: <https://github.com/GottfridOlsson/TIFX04-LEMA-DataProcessing.git>.

En tidsräkning infördes med början på noll när farterna först överskred 80 mm s^{-1} och ökar med kamerornas tidssteg om $0,1 \text{ ms}$ för varje datapunkt.

För strömmen genom samtliga spolpar skalades uppmätt ström om. Strömmens skalningsfaktor på $(6,0 \pm 0,5)$ erhöles genom kontrollmätning av de strömdelare som nyttjats för att med mätprob kopplat till oscilloskopet mäta strömmen. Efter omskalning försköts strömkurvan så att botten av brusgolvet är vid noll samt att tiden börjar då första spolens strömkurva överstiger denna nollnivå.

För fartökning i steg 2 som funktion av aktiveringsavstånd δ_2 behandlades först datan på samma sätt som ovan med gaussiskt filter och tidsderivata. Sedan exkluderades alla värden med fart mindre än 50 mm s^{-1} , de sista 20 värdena togs bort och en ny tidsräkning infördes. Farten v_1 och v_2 innan respektive efter steg 2 togs för varje mätning vid tiderna 35 ms respektive 58 ms . Fartökningen beräknades sedan som $\Delta v_2 = v_2 - v_1$. Osäkerheten i δ_2 var $0,5 \text{ mm}$ och för Δv_2 bedömdes osäkerheten till $0,05 \text{ m s}^{-1}$.

Slutfarten togs som farten efter sista steget aktiverats. Värdet medelvärdesbildades från de tio mätningarna vid den införda tidsräkningens tid 94 ms (se figur 4.1) och osäkerheten togs som standardavvikelsen av de tio farterna vid samma tidpunkt. Verkningsgraden beräknades som kvoten mellan projektilens kinetiska energi $mv_f^2/2$, för projektilens massa m vid slutfart v_f , och total energi i kondensatorerna $\sum_i C_i u_{0,i}^2/2$, där C_i och $u_{0,i}$ är kapacitans respektive spänning för kondensatorn i steg i . Totala verkningsgraden blev alltså $\eta = mv_f^2 / \left(\sum_{i=1}^5 C_i u_{0,i}^2 \right)$ medan ekvation (3.6) gav verkningsgraden per steg.

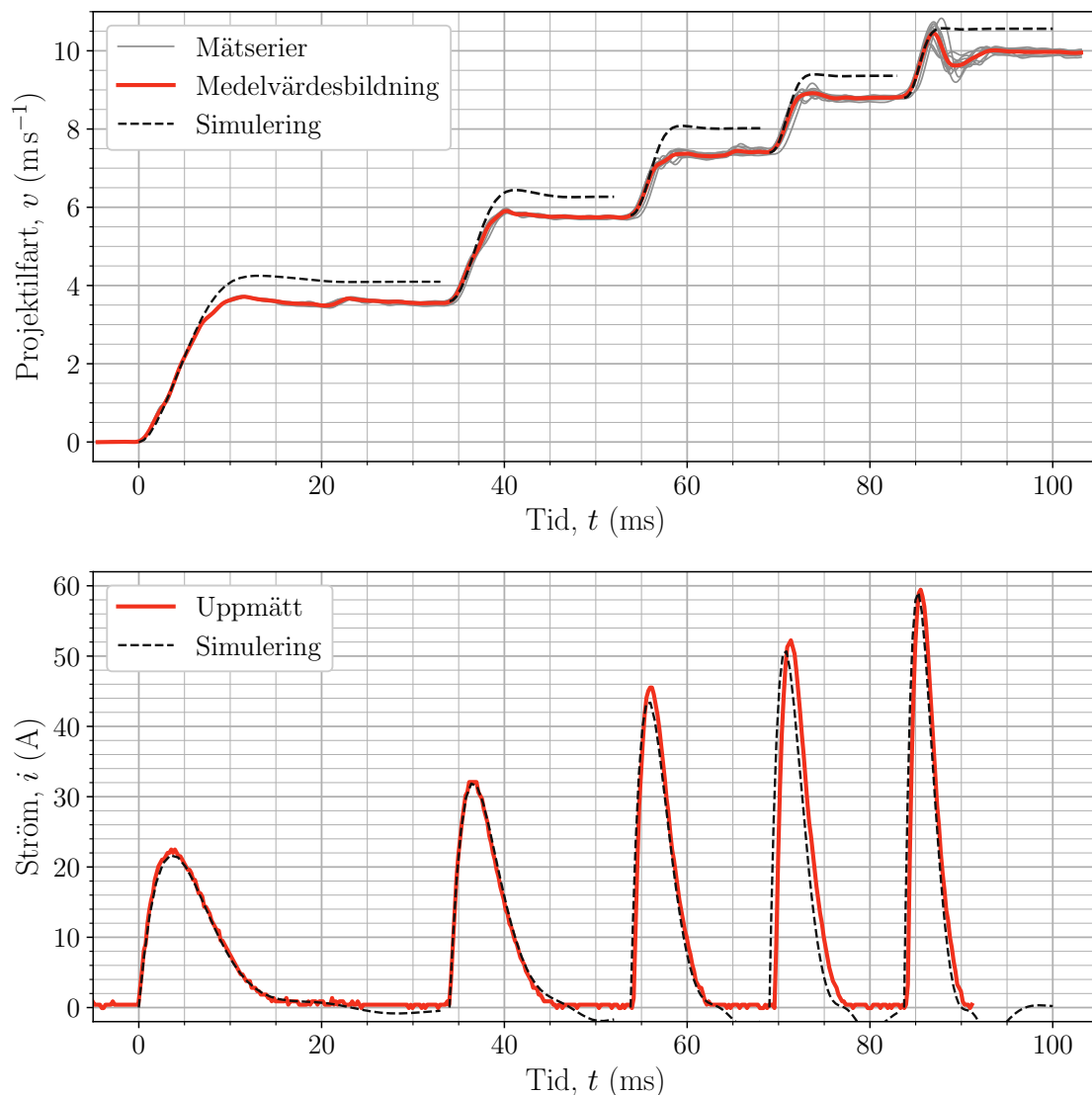
Osäkerheter kan anges på olika sätt med olika innebörd. I denna rapport anger ett mätvärde $X \pm \Delta x$ generellt ett uppmätt värde X med osäkerhet Δx , där osäkerheten representerar gränser för en likformig fördelning i intervallet $(X - \Delta x, X + \Delta x)$ inom vilket det verkliga värdet finns. I rapporten görs undantag från detta för osäkerheter i slutfarten v_f och verkningsgrad η . Som nämnt ovan anges slutfartens osäkerhet som standardavvikelse av de mätserier som slutfarten beräknats från. För verkningsgrader beräknades osäkerheten $\Delta\eta$ med hjälp av felfortplantningsformeln

$$(\Delta\eta)^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial\eta}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2$$

där $\eta = \eta(x_1, x_2, \dots, x_n)$ är en funktion av n variabler och σ_i är standardavvikelse för variabeln x_i . Eftersom en likformig fördelning med intervallbredd $2\Delta x$ antas för mätvärden kan fördelningens standardavvikelse för varje mätvärde beräknas som $\sigma_i = \Delta x_i / \sqrt{3}$. Felfortplantningsformeln ovan nyttjades med detta för att beräkna $\eta \pm \Delta\eta$, där det betonas att osäkerheten för verkningsgraden anger en standardavvikelse.

4 Resultat

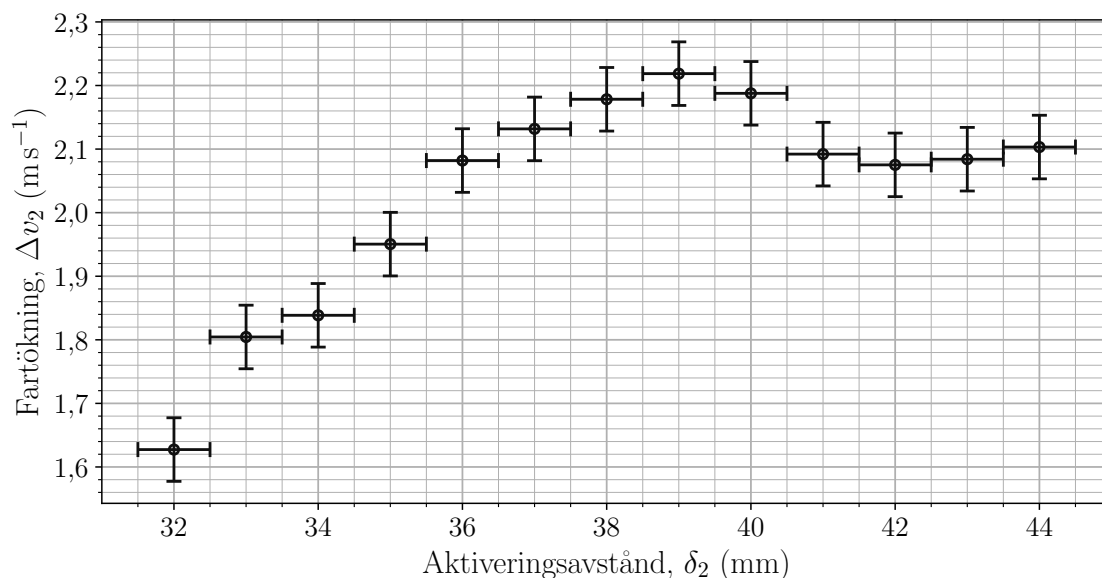
Projektilens fart i x -led som funktion av tid samt strömmen genom stegen för optimerad LEMA visas i figur 4.1. Simuleringens fart och ström för respektive steg inkluderas som jämförelse. Projektilen når en slutfart på $(10,01 \pm 0,07) \text{ m s}^{-1}$ från stillastående på under 100 ms. Lagg



Figur 4.1: Projektilens fart i x -led (överst) samt ström genom stegen (underst) som funktion av tid och jämförelse med simulering. För uppmätt ström gäller att första toppen är ström genom steg 1, andra toppen är ström genom steg 2 och så vidare.

märke till att fartökningen per steg blir mindre och att strömkurvan per kondensator får högre toppvärde samt kortare urladdningstid i och med att antal varv per spole minskar. Strömmen stämmer väl överens med simuleringen medan farten i varje steg är något lägre än simulerat. Variationen mellan olika mätningar blir större ju fler steg som aktiverats (se appendix E).

Figur 4.2 visar projektilens fartökning som funktion av aktiveringsavståndet (avståndet mellan spolcentrum och projektilens centrum vid aktivering) för steg 2. Maximal fartökning erhöles



Figur 4.2: Projektilens fartökning Δv_2 i steg 2 som funktion av aktiveringsavståndet δ_2 i x -led mellan spolcentrum och projektilens centrum. Ur grafen avläses optimalt $\delta_2 = (39,0 \pm 0,5)$ mm.

för detta steg vid uppmätt aktiveringsavstånd $(39,0 \pm 0,5)$ mm vilket kan jämföras med simuleringens beräknade optimala avstånd 41 mm enligt figur 3.5. Notera att fartökningen minskar markant för små δ_2 medan den minskar något och sedan planar ut för stora δ_2 . En liknande kurva mättes upp vid optimering av aktiveringsavstånd för övriga steg.

Utvalda parametrar för optimerad LEMA presenteras i tabell 4.1. Både aktiveringsavståndet och verkningsgraden ökar med minskande antal spolvarv i stegen, vilket stämmer överens med simuleringen i figur 3.5. Notera att kapacitanserna för samtliga kondensatorer var runt 500 μF vilket är avsevärt lägre än det specificerade värdet på 560 μF .

Tabell 4.1: Utvalda parametrar för respektive steg hos vår optimerade LEMA.

Steg	δ (mm)	Δv (m s ⁻¹)	C (μF)	u_0 (V)	η (%)
1	$31,0 \pm 0,5$	$3,6 \pm 0,1$	493 ± 1	305 ± 5	$3,34 \pm 0,08$
2	$39,0 \pm 0,5$	$2,22 \pm 0,05$	488 ± 1	305 ± 5	$5,38 \pm 0,14$
3	$40,0 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,1$	495 ± 1	305 ± 5	$5,42 \pm 0,17$
4	$42,0 \pm 0,5$	$1,40 \pm 0,05$	501 ± 1	305 ± 5	$5,75 \pm 0,20$
5	$42,0 \pm 0,5$	$1,20 \pm 0,05$	492 ± 1	305 ± 5	$5,88 \pm 0,23$

Den optimerade LEMA:n gav projektilen slutfart $(10,01 \pm 0,07)$ m s⁻¹. Med projektilens totala massa $(118,20 \pm 0,05)$ g och värden från tabell 4.1 erhöles total verkningsgrad $(5,16 \pm 0,12)$ %.

I tabell 4.2 presenteras spolparametrar för optimerad LEMA. Observera hur väl spolparametrarna stämmer överens för spole A och B i respektive steg. Detta tyder på att lindningstekniken (se appendix D) var lämplig och tillförlitlig. Steg 1 avviker mest i denna aspekt, specifikt ytterradien och längden vilket påverkar induktansen.

Tabell 4.2: Spolparametrar för optimerad LEMA. Där osäkerheter utelämnats är osäkerheten i sista värdesiffran, med undantag för trådlängden l där samtliga värden har osäkerhet $\pm 0,05$ m.

Steg	Spole	r_{inre} (mm)	r_{yttre} (mm)	d (mm)	l (m)	L (mH)	R (Ω)	m (g)
1	A	$7,2 \pm 0,1$	$24,5 \pm 0,3$	$21,0 \pm 1,0$	73,56	9,45	4,54	196,2
	B	$7,3 \pm 0,2$	$25,2 \pm 0,3$	$20,0 \pm 0,5$	73,52	9,54	4,54	195,7
2	A	$7,3 \pm 0,1$	$22,0 \pm 0,3$	$17,0 \pm 0,4$	46,93	4,63	2,90	126,8
	B	$7,3 \pm 0,1$	$22,0 \pm 0,3$	$17,0 \pm 0,3$	46,93	4,63	2,90	126,8
3	A	$7,3 \pm 0,2$	$21,0 \pm 0,3$	$14,0 \pm 0,3$	33,40	2,58	2,10	86,6
	B	$7,3 \pm 0,2$	$21,0 \pm 0,3$	$14,0 \pm 0,5$	33,40	2,64	2,10	86,7
4	A	$7,3 \pm 0,1$	$19,8 \pm 0,3$	$13,0 \pm 0,5$	28,21	1,97	1,84	75,8
	B	$7,3 \pm 0,1$	$19,9 \pm 0,1$	$13,5 \pm 0,5$	28,18	1,94	1,84	75,8
5	A	$7,3 \pm 0,2$	$19,5 \pm 0,2$	$12,5 \pm 0,5$	23,86	1,47	1,58	64,8
	B	$7,3 \pm 0,2$	$19,8 \pm 0,3$	$12,5 \pm 0,5$	23,93	1,50	1,60	64,8

5 Slutsatser och diskussion

En LEMA som uppfyller avgränsningarna i avsnitt 1.1 har simulerats och konstruerats. Med de parametrar som enligt simuleringen var optimala uppmättes LEMA:ns verkningsgrad till $(5,16 \pm 0,12) \%$. Resultatet indikerar att en kritiskt dämpad LEMA med spolar vid sidorna av projektilen kan vara ett gångbart koncept för att på kort tid accelerera en permanentmagnetisk projektil till höga hastigheter. Figur 4.1 visar att de genom modellen beräknade spolparametrarna resulterade i nära optimal strömfördelning i varje steg med hög acceleration och låg retardation. Utifrån detta tycks simuleringsmetoden, trots överskattning av fartökningen i varje steg, ha varit tillräckligt noggrann för att finna nära optimala värden för undersökta parametrar.

En viktig lärdom från konstruktionen av en LEMA är att det finns ett fundamentalt problem med att montera spolarna vid sidan av spåret. För projektilen är mittpunkten mellan spolarna i y -led inte en stabil jämviktspunkt. Med andra ord leder små asymmetrier i spolarnas placering till att projektilen dras mot ena spolen och skrapar mot dess kant under accelerationsförloppet. Effekten förvärras av att spolarna också rör sig något in mot projektilen, vilket är svårt att undvika på grund av de höga krafterna under accelerationsförloppet. Konsekvenserna blir dels slitage på spolarna, vilket observerades efter upprepade mätningar, och dels en minskad acceleration av projektilen. Att applicering av friktionsminskande medel ökade projektilens fart är ett tecken på att friktionen är betydande. Detta är sannolikt en av anledningarna till att den uppmätta hastigheten var lägre än den simulerade i figur 4.1.

I författarnas vetenskap finns det inte några tidigare publicerade artiklar rörande konstruktionen av en accelerator med permanentmagnetisk projektil och spolar vid projektilens sidor. De uppmätta egenskaperna för konstruktionen och de metoder som utvecklades för simulering och optimering tillför därför ny kunskap till området. Specifikt har vi föreslagit en teoretisk modell (2.12) för accelerationen hos en permanentmagnet samt i avsnitt 3.1.2 demonstrerat en metod för beräkning av den magnetiska kopplingen mellan spole och projektil för icke-cylindersymmetriska geometrier med permanentmagneter. Vidare har elektriska kretsar och en mekanisk struktur som realiserar designen presenterats.

Jämfört med konventionella induktiva spolpistoler har den undersökta konstruktionen en lägre verkningsgrad än de högsta som har uppnåtts tidigare [2], [3]. Detta är väntat eftersom god magnetisk koppling mellan spole och projektil är enklare att uppnå för den konventionella designen. Jämförelsen är dock inte helt rättvis eftersom egenskaperna varierar kraftigt beroende på bland annat projektilens massa, geometri och önskad utgångshastighet. Dessutom kan en lägre verkningsgrad för vissa tillämpningar vara acceptabel givet att den nya spolplaceringen tillåter projektiler som inte är cylindriskt symmetriska.

5.1 Utvärdering av teoretisk modell och optimering

De teoretiska och experimentella optimeringsmetoderna kompletterade varandra och utgjorde tillsammans en kraftfull metod för att designa en LEMA med hög verkningsgrad. Simuleringen fungerade väl för att beräkna nära optimala spolparametrar men var mindre bra på att förutsäga projektilens acceleration. Att utforma samtliga acceleratorsteg enbart från simuleringen skulle ge långt ifrån maximala parametrar eftersom överskattningen av projektilens fart skulle

bli större och större för varje steg. Tack vare den stegvisa konstruktionsprocessen som beskrivs i avsnitt 3.3.1 justerades simuleringen kontinuerligt med projektilens verkliga fart vilket undvek problemet. En mer pålitlig modell hade dock minskat behovet av empiriska justeringar och därmed sparat tid i utvecklingsprocessen.

Det finns flera möjliga orsaker till att simuleringen överskattade projektilens fartökning. För det första antogs det i FEM-analysen att projektilen var centrerad i höjddled relativt spolcentrum trots att den i verkligheten var upphöjd cirka 3 mm. Det innebär att simuleringen överskattade kopplingskoefficienten k mellan spole och projektil. För det andra tar modellen (2.12) inte hänsyn till friktionskraften som uppstår då projektilen trycks ned mot skenan till följd av projektilens upphöjning relativt spolcentrum. En tredje felkälla är att modellen antog att kondensatorernas angivna kapacitans 560 μF var korrekt. Som nämdes i avsnitt 4 var kapacitanserna vid mätning närmare 500 μF vilket innebär att mindre energi fanns tillgänglig för att accelerera projektilen. Slutligen finns det en risk att projektilen hade en svagare magnetisering än det som beräknades genom (3.3), exempelvis på grund av upprepade mekaniska stötar under mätningar.

Metoden som användes för att simulera parametrar som beror av geometrin hos spolen och projektilen var adekvat men opraktisk. Att genomföra FEM-analysen som beskrivs i avsnitt 3.1.2 var mycket tidskrävande då ett tvådimensionellt parametersvep (beräkning av W_m för omkring 100 kombinationer av N och x) kunde ta flera timmar att genomföra. Dessutom ledde numeriska fel till att beräkningarna behövde upprepas flera gånger med olika inställningar för att uppnå ett tillfredsställande resultat. En snabbare metod för att extrahera relevanta parametrar från den tredimensionella geometrin skulle göra det praktiskt möjligt att optimera fler parametrar och därmed ge den slutgiltiga designen högre verkningsgrad.

5.2 Utvärdering av slutprodukt

En styrka hos metoden som användes är valet av en iterativ förbättringsprocess med flera prototyper. Flera problem upptäcktes tidigt och möjliga lösningar testades genom prototyperna. Vid konstruktion av den slutgiltiga LEMA:n beaktades följande lärdomar. Andra prototypens struktur i 3 mm tjock akrylplast deformerades elastiskt när spolarna aktiverades vilket gjorde att spolarna trycktes ihop mot projektilen och därmed bromsade den. För att minimera friktionen mot projektilen nyttjades en luftskena och en massiv struktur i metall att montera spolarna på. Spolarna placerades även mycket nära projektilen för maximal fartökning i stegen och icke-ferromagnetiskt monteringsmaterial användes för att möjliggöra start i vila.

Trots lärdomarna från prototyperna finns det flera saker med den mekaniska strukturen som skulle kunna förbättras. När projektilen färdades längs skenan skrapade den emot spolarna som monterats tätt intill. Detta skulle kunna motverkas genom att utforma skenan och spolarnas fixturer på ett annat sätt. Till att börja med bör projektilens masscentrum hållas nära skenan för att minska hävarmen för de krafter som drar projektilen åt sidan i y -led. En annan förbättring kan vara en annan form på luftskenan sådan att projektilens rörelse begränsas i sidled. Stabiliteten hade förbättras ytterligare om flertal stag applicerats på reglarna där spolar var installerade, exempelvis ett stag vid varje spole. Avsaknaden av fler stag bedöms för vår LEMA vara försumbart, vilket motiveras av videoinspelningar i slowmotion under mätning där deformationen ansågs vara minimal. Utvecklingspotential finns även gällande precisionen i position för spolar och framförallt sensorer eftersom dessa installerades och justerades för hand. Ett alternativ hade varit en solid struktur med alla ingående komponenter i ett stycke.

Ett problem inom elektroniken var att kondensatorerna och tyristorerna hade ett läckage vilket för kondensatorn innebar att den laddades ur även när det var avbrott i kretsen. För tyristorerna innebar det att dessa släppte igenom en liten ström trots att de var ”av”. Resultatet var att verkningsgraden för hela systemet minskade men eftersom kondensatorerna var uppladdade under relativt kort tid var förlusterna små. Dessutom kunde projektets mikrokontroller inte direkt kontrollera tyristorer och reläer på grund av dess begränsade signalkapacitet. Istället kopplades en extern spänningskälla in som möjliggjorde att mikrokontrollern kunde kontrollera tyristorer och reläer indirekt via extra transistorer.

Elektroniken kan förbättras på flera olika sätt. För att minimera den förlorade effekten rekommenderas att komponenter med högre kvalitet används samt att tiden som kondensatorerna måste vara fullt uppladdade på minimeras. Det kan även finnas bättre lämpade komponenter för att kontrollera spolarana. I detta projekt användes tyristorer av typen TYN640RG. Ett alternativ hade kunnat vara reläer vilka eventuellt kunnat eliminera problemet med tyristor-läckage då de gör ett fysiskt avbrott i kretsen. Viktigt att beakta är att dessa måste klara mycket höga spänningar och strömmar. Uppkopplingen hade även kunnat förenklas genom att använda en mikrokontroller med högre ut-effekt eller med motsvarande förstärkare.

6 Vidare forskning

Projektet har uppfyllt sitt syfte att utifrån en teoretisk modell simulera och konstruera en LEMA optimerad för hög verkningsgrad. Arbetet har ökat kunskapen om elektromagnetiska massacceleratorer med spolar längs sidorna och är ett steg på vägen mot ett system som snabbt och energisnålt kan accelerera ickecylindriska projektiler till mycket höga hastigheter. För att utformningen ska bli användbar i praktiken krävs dock vidare utveckling och optimeringar.

Det kanske viktigaste problemet att lösa är att projektilen skrapar mot spolarnas sidor. Nötningen som uppstår över tid förkortar produktens livslängd avsevärt. Möjliga vägar framåt är att undersöka nya spolkonfiguratiner eller skenor som håller projektilen fixerad. Ett annat alternativ är att vända spolarnas polaritet och låta spolarna repellera projektilen istället för att attrahera den. Detta skulle göra mittläget till en stabil position för projektilen men kan eventuellt leda till gradvis demagnetisering.

Inom avgränsningarna för projektet har enbart en bråkdel av det totala parameterrummet utforskats vilket innebär att det finns stora möjligheter för vidare optimering av verkningsgraden. Det hade varit intressant att försöka finna optimala projektildimensioner samt innerradie och längd för spolarna för att maximera kopplingskoefficienten. Vidare kan det undersökas huruvida det finns fördelar med att låta stegens kondensatorer ha olika kapacitans och initialspänning. Ytterligare en tänkvärd frågeställning är om det vore mer lämpligt utesluta kondensatorerna och istället driva spolarna med ett batteri.

Ur ett bredare perspektiv kan man tänka sig att framtida studier undersöker andra kombinationer av projektiler och spolgeometrier, exempelvis massacceleratorer där sidmonterade spolar kopplar till projektilen induktivt eller inducerar magnetiseringen i en mjuk ferromagnetisk projektil. En eventuell fördel med dessa alternativ är att spolarna kan förses med ferromagnetiska kärnor som förbättrar den magnetiska kopplingen och ger spolarna ett högre induktans-resistans förhållande. Vidare undersökning av permanentmagnetiska projektiler i samband med konventionell cylindersymmetrisk spolgeometri kan också vara intressant.

Författarna hoppas att rapporten har väckt ett intresse för nya typer av elektromagnetiska massacceleratorer och kan vara en inspiration för kommande års kandidatarbeten.

Referenser

- [1] K. Birkeland, "Electromagnetic gun," amerikanskt patent 754.637, 15 mars 1904. URL: <https://patents.google.com/patent/US754637A/en>.
- [2] R. J. Kaye, "Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers," *IEEE Transactions on Magnetics*, årg. 41, nr 1, s. 194–199, 2005. DOI: 10.1109/TMAG.2004.838982.
- [3] M. Baharvand, A. D. Kolagar och M. R. A. Pahlavani, "Design, Simulation, and Parameter Optimization of a MultiStage Induction Coilgun System," *IEEE Transactions on Plasma Science*, årg. 49, nr 7, s. 2256–2264, 2021. DOI: 10.1109/TPS.2021.3085775.
- [4] S. S. Reelkar, U. V. Patil, V. V. Khataavkar, H. Mehta och U. Alset, "Electromagnetic Launcher : Review of Various Structures," *International journal of engineering research and technology*, årg. 9, nr 9, s. 505–508, 2020. DOI: 10.17577/IJERTV9IS090223.
- [5] R. J. Kaye, E. C. Cnare, M. Cowan och B. W. Duggin, "Design and performance of Sandia's contactless coilgun for 50 mm projectiles," *IEEE Transactions on magnetics*, årg. 29, nr 1, s. 680–685, 1993. DOI: 10.1109/20.195657.
- [6] R. J. Lipinski, S. Beard, J. Boyes, E. Cnare, M. Cowan och B. Duggin, "Space Applications for Contactless Coilguns," *IEEE Transactions on magnetics*, årg. 29, nr 1, s. 691–695, 1993. DOI: 10.1109/20.195659.
- [7] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, 4. utg. Cambridge: Cambridge University Press, 2017, ISBN: 9781108420419.
- [8] R. Ram och M. J. Thomas, "Experimental and Computational Studies on the Efficiency of an Induction Coilgun," *IEEE Transactions on Plasma Science*, årg. 48, nr 10, s. 3392–3400, 2020. DOI: 10.1109/TPS.2020.3007551.
- [9] H. Kolm och P. Mongeau, "Basic principles of coaxial launch technology," *IEEE Transactions on Magnetics*, årg. 20, nr 2, s. 227–230, 1984. DOI: 10.1109/TMAG.1984.1063050.
- [10] T. Wujec. "Build a tower, build a team." (hämtad: 2022-04-23). (febr. 2010), URL: https://www.ted.com/talks/tom_wujec_build_a_tower_build_a_team.
- [11] C. Nordling och J. Österman, *Physics Handbook for Science and Engineering*, 7. utg. Studentlitteratur, 2007, ISBN: 9144031521.
- [12] *N35 Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets*, 151021, Rev. 210607, Arnold magnetic technologies, nov. 2017.

A Prototyper

Under den iterativa arbetsprocessen konstruerades två prototyper innan den LEMA som presenterats i rapporten stod klar. Korta videoklipp på samtliga prototyper finns på projektets YouTube-kanal¹.

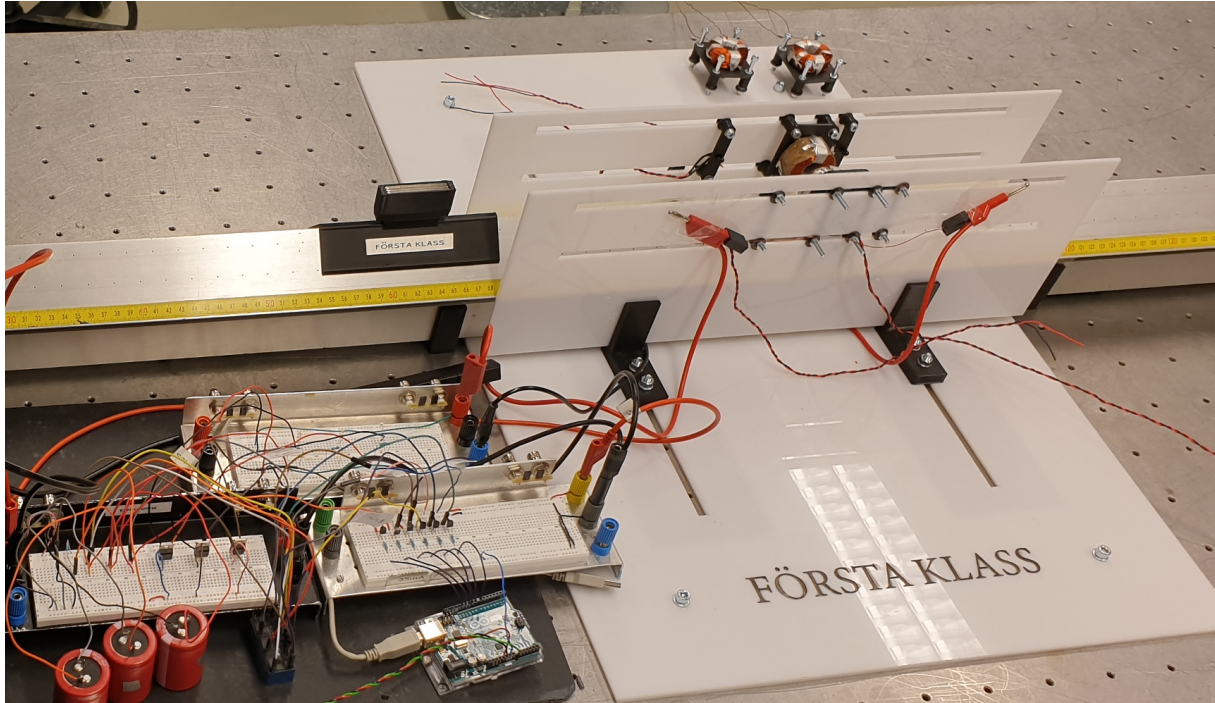
Prototyp 1 som visas i figur A.2 bestod av ett spolpar och en centrerad skena där projektilen kunde löpa.



Figur A.1: Prototyp 1.

¹<https://www.youtube.com/channel/UC810mVXhTa6Y8VCMXCrKwNg>.

I figur A.2 visas prototyp 2 där svagheter från prototyp 1 förbättrats. Den platsmonterad strukturen var centrerad kring luftskenan där projektilen kunde löpa. Uppställningen bestod av en monteringsplatta där två sidoplattor fästest för montering av spolpar och sensorer kring luftskenan.



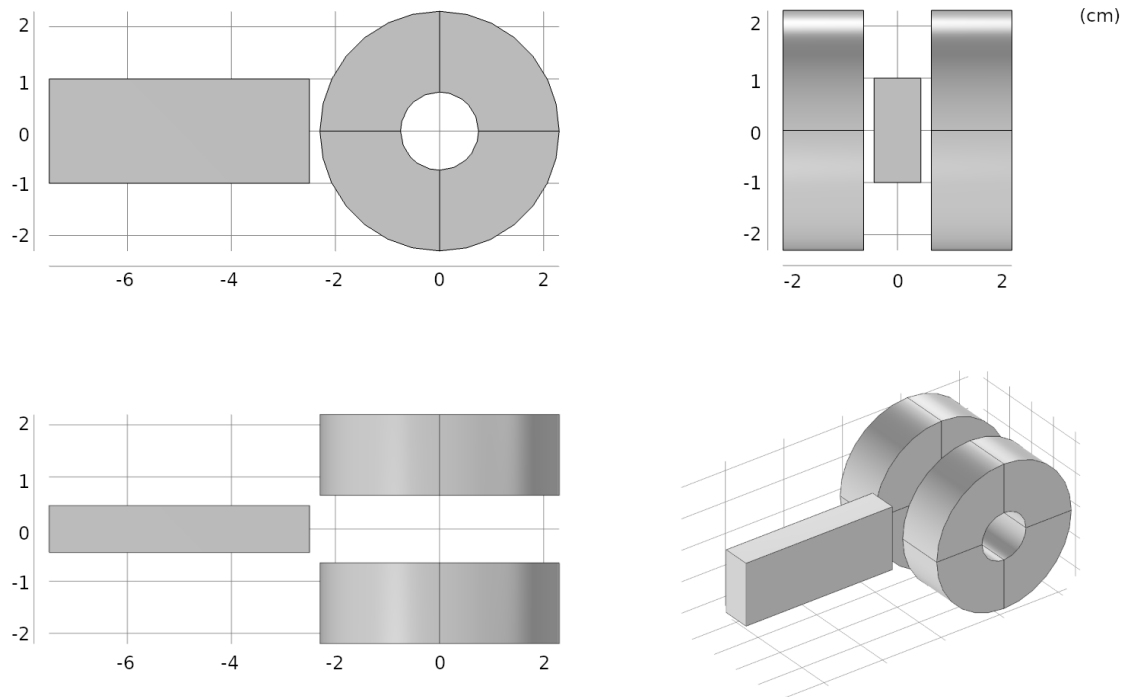
Figur A.2: Prototyp 2.

B Detaljer för COMSOL model

I tabell B.1 och figur B.1 visas parametrar respektive geometri för den COMSOL simulering som beskrivs i avsnitt 3.1.2.

Tabell B.1: Parametervärden som användes i COMSOL simuleringen.

Namn	Uttryck	Värde
turns_per_coil	400	400
wire_crossection	0.6 [mm ²]	6E-7 m ²
coil_width	$\sqrt{\text{wire_crossection} * \text{turns_per_coil}}$	0.015492 m
coil_inner_radius	7.5 [mm]	0.0075 m
coil_outer_radius	$\text{coil_inner_radius} + \text{coil_width}$	0.022992 m
coil_current	$20 [\text{A}] * (500 / \text{turns_per_coil})$	25 A
coil_current_density	$(\text{coil_current} * \text{turns_per_coil}) / (\text{coil_width}^2)$	4.1667E7 A/m ²
coil_gap	13 [mm]	0.013 m
projectile_height	2 [cm]	0.02 m
projectile_width	9 [mm]	0.009 m
projectile_length	5 [cm]	0.05 m
projectile_position	-5 [cm]	-0.05 m
mu0	$4 * \pi * 1\text{E-}7 [\text{H/m}]$	1.2566E-6 H/m
remanence	1.22 [T]	1.22 T
magnet_surface_current	$\text{projectile_width} * \text{remanence} / \mu_0$	8737.6 A



Figur B.1: Ritning över geometrin som studerades i COMSOL.

C Kod för simulering

Denna bilaga beskriver en förenklad version av Python-koden som användes för att simulera ett acceleratorsteg genom att numeriskt lösa ekvationsystemet (2.12). Den fullständiga koden har gjorts mer modular och är tillgänglig på GitHub¹.

Följande avsnitt kod innehåller de funktioner som användes för att beräkna de geometriberoende parametrarna k_x och L_S , L_P , I_P , från kurvanpassningingar till data från FEM-analys. Koden visar även hur spolens resistans uppskattades från trådens längd genom ekvation (3.2).

```
1 import math
2
3 # Coupling factor between projectile and coil pair
4 # as a function of turns in coil and projectile position
5 def dk_dx(N, x):
6     x0 = 1e-2
7     N0 = 400
8     a1, a2 = 0.21651925, 0.04803981
9     b1, b2 = -0.34392363, 0.07699456
10    k1, k2, k3 = 0.37254388, 0.04442989, -0.01831165
11    a = a1 + a2 * (N/N0)
12    b = b1 + b2 * (N/N0)
13    kmax = k1 + k2 * (N/N0) + k3 * (N/N0)**2
14    return kmax * math.exp(-(a*x/x0)**2 - (b*x/x0)**4) * \
15        (- 2 * x * (a/x0)**2 - 4 * x**3 * (b/x0)**4)
16
17 # Inductance of coil pair as a function of number of turns
18 def Ls(N):
19     N0 = 400
20     A, B, C = 0.88747166e-3, 4.05174052e-3, 2.13676405e-3
21     return A * (N/N0)**1.5 + B * (N/N0)**2 + C * (N/N0)**2.5
22
23 # Self inductance and current of permanent magnet equivalent loop
24 def Lp(): return 5.4101e-08
25 def Ip(): return 8737.6
26
27 # Resistance of coil pair with N turns
28 def R(N):
29     # Constants
30     A_t = 0.6 # [mm2] Effective wire crossection area
31     r_i = 7.5 # [mm] Inner radius of coil
32     rho = 61.02e-3 # [Ohm/m] Resistance of wire
33
34     # Dependent variables
35     d = math.sqrt(A_t * N) # [mm] Thickness of coil
36     r_o = r_i + d # [mm] Outer radius of coil
37     vol = d * math.pi * (r_o**2 - r_i**2) # [mm3] Volume of coil
38     l = 1e-3 * vol / A_t # [m] Length of wire
39
40     return 2 * rho * l
```

¹<https://github.com/ViktorLilja/TIFX04-LEMA>.

Med hjälp av parametrarna simulerades acceleratorstegets dynamik genom att numeriskt lösa differentialekvationssystemet (2.12). Det gjordes med på samma sätt som i följande kodavsnitt med hjälp av standardfunktionen `solve_ivp` i SciPy som implementerar en Runge-Kutta metod av ordning 5(4) med variabel steglängd.

```

1 from scipy.integrate import solve_ivp
2
3 # ODE system describing accelerator
4 def dy_dt(t, y, param):
5     x, v, u, i = y
6     m, C, N = param
7
8     dx_dt = v
9     dv_dt = dk_dx(N, x) * math.sqrt(Lp()*Ls(N)) * Ip() * i / m
10    du_dt = - i / C
11    di_dt = - Ip() * dk_dx(N, x) * math.sqrt(Lp()*Ls(N)) * v / Ls(N) \
12            + u / Ls(N) \
13            - R(N) * i / Ls(N)
14
15    return (dx_dt, dv_dt, du_dt, di_dt)
16
17
18 # Constants
19 m = 118.2e-3 # [kg] Projectile mass
20 C = 560e-6   # [F] Capacitor capacitance
21
22 # Parameters
23 N = 700      # Turns of wire in coils
24 dx = -4e-2   # [m] Activation position
25 u0 = 300     # [V] Starting capacitor voltage
26 v0 = 0       # [m/s] Starting projectile speed
27
28 # Solve ODE system
29 y0 = (dx, v0, u0, 0) # Initial values
30 tspan = (0, 0.05)   # Timespan
31 param = m, C, N
32 result = solve_ivp(lambda t,y:dy_dt(t,y,param), tspan, y0, rtol=1e-8)
33
34 t = result.t
35 x, v, u, i = result.y
36
37 # plot(t, v) will show projectile speed over time

```

Verkningsgraden (3.6) för det simulerade accelerationsförloppet optimerades med funktionen `optimize.minimize` i SciPy givet olika starthastigheter med avseende på parametrarna N (N) och dx (δ) för att generera figur 3.5.

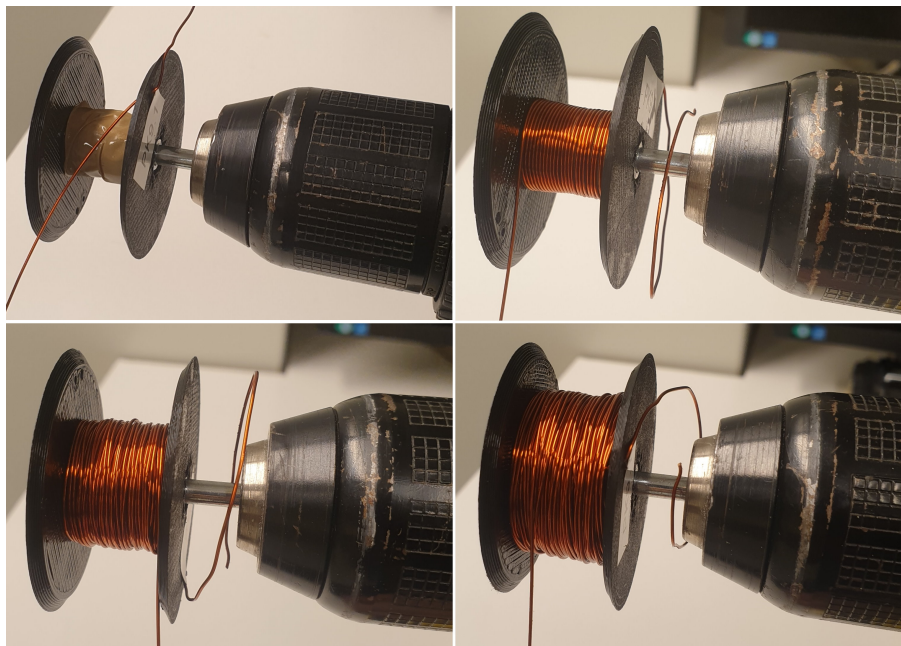
D Lindning av spolar

I figur D.1 visas det 3D-skrivna verktyget som användes för att linda spolar till LEMA:n. Verktöget består av tre delar. Två ändar vilka utformats med konisk form vid centrum för att underlätta vid losstagning av lindad spole och en distans i mitten som kan bytas ut för att få olika spoltjocklekar.



Figur D.1: Fotografi över spollindaren som användes för att linda spolar.

Figur D.2 visar fotografier vid olika tidpunkter vid lindning av en spole. För att se en timelapse när en spole lindas, följ länken i fotnoten¹. Vid lindning av en spole utfördes följande. Först mät-



Figur D.2: Fotografi vid olika tidpunkter för en spole som lindas.

tes simulerad längd koppartråd upp. Sedan 3D-skrevs en distans som med spollindaren resulterar i en något mindre tjocklek för spolen än simulerat. Detta eftersom lindad spole hade en tendens att utvidgas ungefär en halv till en millimeter i bredd efter att spollindaren öppnats. Därefter monterades spollindaren med skruv i skruvdragare och spollindarens inre radie tejpades för att

¹<https://youtu.be/YtABqy98ewY>.

underlätta bortplockandet av spolen. Koppartråden fördes genom ett litet hål i ena änden på spollindaren för att hålla fast tråden vid start. Sedan snurrades skruvdragaren samtidigt som en person förde koppartråden fram och tillbaka längs spollindarens kärna. Viktigt var att de första tre till fem lagrena blev packade tätt och prydligt. Då kunde skruvdragarens rotationsfart ökas och koppartråden mer eller mindre följde de tidigare lagrens struktur. Vid lindning eftersträvades att tråden lades ett lager i taget på lagren under för att få en jämn fördelning av koppartråd.

När spolen väl var lindad på spollindaren tejpades ytterkanten av spolen för att undvika att den gick upp vid demontering av spollindaren. Försiktigt plockades spollindaren isär, distansen blockades bort (detta underlättades av konisk kärna hos spollindaren samt första lagret tejp). Spolen hölls ihop med händerna och knöts ihop med presentsnören för att kunna mätas och senare monteras på den mekanisk strukturen. En färdiglindad spole syns i figur D.3.

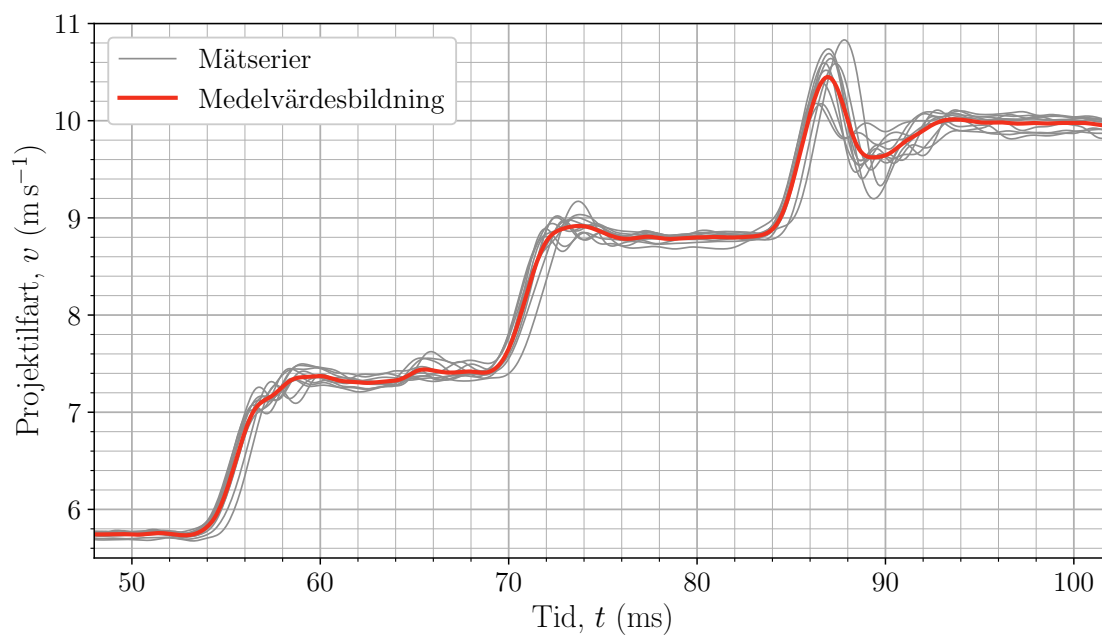


Figur D.3: Fotografi över en lindad och ihopknuten spole.

Tillvägagångssättet fungerade bra trots att det är aningen primitivt. Spolarna i varje spolpar lindades konsekvent, det vill säga att spolparametrarna är mycket lika varandra för varje steg. Spolparametrarna visas i tabell 4.2.

E Kompletterande figur till resultat

I figur E.1 visas samma data som i figur 4.1 med fokus på de tre sista stegen där variationerna mellan mätningar blir mer påtagliga.



Figur E.1: Projektilens fart i x -led för tio olika mätningar. Notera hur variationerna mellan mätserierna ökar med antalet steg som aktiverats.

INSTITUTIONEN FÖR FYSIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se



GÖTEBORGS
UNIVERSITET



CHALMERS