

Utveckling av ett två-axligt bildsensorstabiliseringsystem



Albert Knutsson
Nicklas Lindell

Division of Industrial Electrical Engineering and Automation
Faculty of Engineering, Lund University

Abstract

Even the simplest cameras today house a plethora of impressive mechatronic systems. One of the key systems that determines the camera performance is the image stabilization, as involuntary hand movements during exposure can produce unsharp images. One way to compensate is by an internal image sensor stabilization system.

This thesis describes the design and implementation of a 2 degrees of freedom balanced stabilizing system for a camera image sensor using small linear dc actuators. The purpose is to develop a new system that fits into a new camera model. Empty space is hard to find in modern cameras, and the size of the available space affects the system design greatly. Thus both the design of the mechanical system and the design of the actuators go hand in hand.

The simulation tools Comsol and FEMM are used to evaluate actuators with regards to size, material, force production, force linearity, power consumption and hall effect sensor compatibility. Position sensing of the system is implemented using a differential hall effect sensor setup to minimize temperature impact on measurements. By placing hall sensors in pairs and modifying the results using simple arithmetics, the linear sensing range can be increased and the temperature dependence greatly decreased.

The results are a CAD model for a mechanical system that fits within the given design space, two optimized actuator concepts, and a 3D printed experimental set up for evaluating force production and position sensing.

Actuators are built and tested in experimental assemblies. A scale of 1:1 mechanical assembly was built which can be further developed to make a fully working prototype.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	8
1.1	Bakgrund	8
1.2	Syfte	8
1.3	Metodik	8
2	Problembeskrivning	8
2.1	Förflyttningshastighet	9
2.2	Jämviktat system	10
3	Teori aktuatorer	10
3.1	Voice coil aktuatorn	10
3.1.1	Magnetiska kretsen	12
3.1.2	Spolens egenskaper	14
3.1.3	Energiförluster	16
3.2	Piezoelektriska aktuatorer	16
4	Begränsningar	17
4.1	Geometriska begränsningar	17
4.2	Elektriska begränsningar	17
4.3	Temperaturbegränsningar	17
4.4	Magnetiska begränsningar	18
5	Aktuatorkoncept	18
5.1	Koncept 1	19
5.2	Koncept 2	20
5.2.1	Koncept 2a	22
5.2.2	Koncept 2b	23
5.3	Koncept 3	24
5.3.1	Koncept 3a	26
5.3.2	Koncept 3b	27
5.3.3	Koncept 3c	28
5.4	Koncept 4	29
5.5	Koncept 5	30
5.6	Piezomotorer	31
6	Preliminär aktuatorutvärdering	31
7	Sensorer	33
7.1	Hallsensorer	33
7.2	Linear Variable Differential Transformer	33
7.3	Giant Magnetoresistance	34
8	Hallsensor implementation	34
9	Aktuatoroptimering för positionsmätning	38
10	Slutgiltiga aktuatorkoncept	40

11 Mekanisk design	41
11.1 Bildsensorvagn	42
11.2 Spolar & spolvagn	42
11.3 Fixerade plattor	43
11.4 Motvikt	43
11.5 Linor och fjädring	44
11.6 Materialval	46
11.6.1 Magneter	46
11.6.2 Mjukmagnetiskt material	46
11.6.3 Spole	47
11.6.4 Spolhållare & sensorhållare	48
11.6.5 Motvikt	48
11.6.6 Övriga komponenter	49
12 Reglering och styrning	49
12.1 Spolinduktans	49
13 Prototyp och testrigg	51
13.1 Testning	54
13.1.1 Kraft	54
13.1.2 Hallsensormätning	55
14 Diskussion	56
15 Slutsats	58
16 Referenser	59
17 Bilagor	61

Figurlista

1	Brännvidden f' till den bakre fokuspunkten är maximalt 300mm.	9
2	Kraften \vec{F} på en strömledare i ett magnetfält \vec{B}	11
3	Kraft på strömledare i magnetfält	11
4	Ekvivalent magnetisk krets	12
5	Fringing, när magnetfältet sprider ut sig utanför luftgapet	13
6	Maxwells stress tensor	14
7	Spolens geometri	15
8	Designutrymme runt bildsensorn, bildsensorn visas i rött och kretskort inklusivekomponenter visas i grönt och grått	17
9	Koncept 1	19
10	Kraft och MMK vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 2a	20
11	Strömdensitet och ström vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 2a	20
12	Förlust samt förlusttäthet vid 0.17N vid olika spoltjocklek för koncept 2a	21
13	Värmeutveckling i spole efter 55 sekunder	21
14	Temperatur i spole över tiden [s]	21
15	Koncept 2a	22
16	Koncept 2b	23
17	Kraft och MMK vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 3a	24
18	Strömdensitet och ström vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 3a	24
19	Förlust samt förlusttäthet vid 0.17N vid olika spoltjocklek för koncept 3a	25
20	Värmeutveckling i spole efter 55 sekunder	25
21	Temperatur i spole över tiden [s]	25
22	Koncept 3a	26
23	Koncept 3b	27
24	Koncept 3c	28
25	Koncept 4	29
26	Koncept 5	30
27	PiezoLEGS från PiezoMotor	31
28	Simulerade kraftkurvor för varje aktuator typ med 15.7mA ström	32
29	Värmeutveckling visas vid $2A/mm^2$ strömdensitet för 2x2mm spolesegment	32
30	Linear variable differential transformer	33
31	Hall konfiguration för mätning med hög precision.	34
32	Standard Hallkoppling med differentialförstärkare.	35
33	Illustration från patentansökan visar två hallelement samt hur deras signal kan kombineras [16].	36
34	Illustration av de kombinerade signalerna [16].	37
35	De dimensioner som påverkar hallkurvorna	38
36	Koncept 3a. $Md_h=2.5mm$ $Md_w=2.6mm$ $Hd_h= 1.25mm$ $Hd_w=3.4mm$	39
37	Koncept 3b. $Md_h=2.3mm$ $Md_w=3.0mm$ $Hd_h= 1.15mm$ $Hd_w=2.4mm$	39
38	Koncept 3c. $Md_h=3.5mm$ $Md_w=0.0mm$ $Hd_h= 1.75mm$ $Hd_w=2.4mm$	40
39	Slutgiltiga aktuatorkoncept 3a och 3b	41
40	Uppbyggnad av av bildsensorstabiliseringssystemet	42
41	Aktuatorplacering i förhållande till bildsensor sett framifrån. Pilar indikerar varje aktuator kraftgenereringsriktning.	42
42	Vertikalriktad flödestäthet B_z med två olika längder på bakplattor av kolstål . .	43
43	Strukturellt stöd som används dubbelt som bakplatta till aktuatorerna	43
44	Fjädringsberäkningsbilder	44

45	F_X i förhållande till förflyttning L_2 med olika förspänningslängder dx . $m = 70g, L_1 = 34mm, k_m = 1.2$	45
46	Simulering magnetfältsstyrka beroende på tjocklek av bakplattan.	47
47	Dämpning visas vid maximal hastighet $32.9mm/s$	48
48	LTspice strömripping. 100kHz 50% duty cycle	50
49	LTspice simulering av strömändring, 10mH induktans	51
50	3D-printad testtrigg för krafttestning av en aktuator	52
51	Experimentella prototyper tillverkade av laserutskurna metalldelar	52
52	Prototyp böjning. Magneternas attraktionskrafter drar bakplattorna mot varandra vilket minskar storleken på luftgapet.	53
53	Handlindade spolar	53
54	Differentialkretsen för förstärkning av hallsensorer	54
55	Kraftmätning på prototypvariant av koncept 3a, jämfört med FEMM simulerad koncept 3a. Mätningarna på testtrigg ligger i linje med simulerade resultat.	54
56	Kraftmätning på prototypvariant av koncept 3b, jämfört med FEMM simulerad koncept 3b. Mätning uppnår cirka 83% av simulerad kraftresultat.	55
57	Hallsensormätning för två hallsensorer A och B för testprototyp av koncept 3a vid $25^\circ C$	55
58	Beräkning av $A+B/B-A$ för hallsensordata A och B över spolens rörelseområde för två olika temperaturer på testprototyp av koncept 3a.	56
59	Kraft beroende på spolhöjd och magnethöjd	57

Tabellista

1	Förflyttningshastighet av bildsensor för olika CIPA skakningsfrekvenser [1] . . .	9
2	Skinndjup för koppar vid olika frekvenser[7]	16
3	Koncept 1	19
4	Koncept 2a	22
5	Koncept 2b	23
6	Koncept 3a	26
7	Koncept 3b	27
8	Koncept 3c	28
9	Koncept 4	29
10	Koncept 5	30
11	Sammanställningstabell koncept	31
12	Sammanställningstabell slutgiltiga koncept	41
13	Uppskattad vikt på komponenter som ska förflyttas	44
14	Magnetdata [17]	46
15	Skakningsamplitud av bildsensor för olika PWM frekvenser	50
16	Magnetgeometrier [mm] som behövdes för de olika koncepten samt vilka som inköptes för prototypkoncepten. Magneterna är magnetiserade i första dimensionsriktningen.	51

Nomenclature

α_{Br}	Temperaturkoefficient magnetisk remanens [$1/K$]
α_{cu}	Temperaturkoefficient koppars resistivitet [$1/K$]
ω	Frekvens [rad/s]
ϕ	Magnetisk flöde [Wb] [Vs]
ϑ	Temperatur [K]
A	Area [m^2]
B	Magnetisk flödestäthet [Wb/m^2] [T]
f'	Brännvidd [m]
H	Magnetisk fältstyrka [A/m]
I	Ström [A]
J	Strömdensitet [A/mm^2]
k_{fill}	Fyllnadsgrad, hur tätt lindad koppartråden är
l	Längd [m]
MMK	Magnetomotorisk kraft [At]
R	Reluktans [At/Wb]

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Det är nästan tvåhundra år sedan det första fotografiet togs. Sedan dess har kamerateknologin utvecklats ofantligt. En av utmaningarna i dagens kameror är att förbättra skärpan på bilder tagna med handhållna kameror. Ingen människa kan ta ett foto med en handhållen kamera utan att utsätta kameran för små skakningar och vibrationer. Dessa små vibrationerna kan leda till att pixlar hamnar fel och att bilden blir oskarp. I lågljussmiljöer krävs det en längre exponeringstid för att få in tillräckligt med ljus till bildsensorn. Under denna längre exponeringstid hinner användaren skaka mer, vilket medför en ännu större risk för oskarpa bilder. För att motverka dessa skakningarna kan ett bildsensorstabiliseringssystem införas. Ett bildsensorstabiliseringssystem är ett system som minskar inverkan av användarskakningar genom att flytta den inre bildsensorn för att kompensera för användarens rörelser. Fördelen med detta, istället för ett system som kompenserar för skakningar genom att flytta linserna i objektivet, är att ett bildsensorstabiliseringssystem skulle tillåta användaren att använda gamla kameraobjektiv utan inbyggd stabilisering, och ändå få kompensation för skakningar.

Ett bildsensorstabiliseringssystem kräver att bildsensorn kan röra sig i flera led. En nackdel med detta är att det krävs konstant effekt för att motverka gravitationskraften och hålla bildsensorn centrerad. Med hjälp av motvikter kan ett balanserat system utvecklas, där gravitationskraften kan bortses från.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att designa en drivordning som kan flytta den interna bildsensorn i en mellanformatskamera. Systemet ska vara balanserat för att kunna eliminera gravitationskraftens påverkan på bildsensorn, och på så sätt minska systemets effektförbrukning. Drivsystemet ska kunna producera de krafter som krävs för att motverka skakningar från kameraanvändaren och samtidigt ta upp så liten plats som möjligt. Utöver drivsystemet så ska positionsmätningstrustning tas fram och inkomponeras för att kunna skapa återkoppling för bildsensorpositionsregleringen.

1.3 Metodik

Grundläggande aktuatorkonceptdesign görs i en iterativ process där koncept simuleras med finita element metoden i programvaror FEMM och Comsol. Lovande koncept utvärderas vidare i Comsol. Geometrioptimering utförs på koncepten för att förbättra kraftresultaten. De aktuatorkoncepten som tas fram modifieras för att bäst anpassas till bildsensorns positionsmätningssensorer. Parallellt sker modellering av aktuatorkoncepten, och uppbyggnaden av det mekaniska balanserade systemet i CAD programvara. Verifiering av kraftsimulationer och hallsensorkurvor sker genom testning av fysiska prototyper.

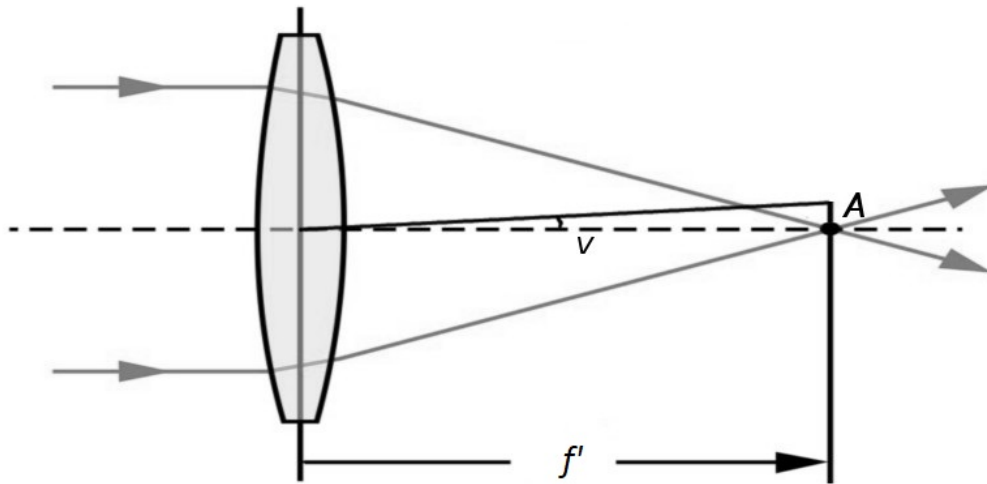
2 Problembeskrivning

Ett bildsensorstabiliseringssystem ska tas fram till en eventuell framtida produkt. Bildsensorn ska kunna flyttas ± 2 mm i x och y-led. En vridning på cirka 1° runt z-axeln ska också kunna tas hand om. Accelerationerna som krävs för ett sådant system baseras på data från CIPA (Camera

& Imaging Product Association) [1]. Nedan beskrivs beräkning av bildsensorns acceleration och krafterna som därmed erfordras.

2.1 Förflyttningshastighet

Bildsensorns maximala kompenserande förflyttningshastighet beror på vinkeln användaren skakar med, frekvensen på skakningen och objektivetvets brännvid. CIPA anger skakspekifikationerna för testning av systemets prestanda [1]. Data från CIPA kan ses i tabell 1. Skakningsvinkeln varierar med skakningsfrekvensen där högre frekvenser har en lägre skakningsvinkel. Denna skakningsvinkel kan räknas om till en amplitud med hjälp av ekvation 1 vilket visas i figur 1. Amplituderna i tabell 1 beräknas med en brännvid f' på 300mm.



Figur 1: Brännvidden f' till den bakre fokuspunkten är maximalt 300mm.

$$A = f'_{focal} \cdot \tan(v) \quad (1)$$

$$y = A \sin(2\pi f_{Hz} t) \quad (2)$$

$$v = 2\pi f_{Hz} A \cos(2\pi f_{Hz} t) \quad (3)$$

$$a = 4\pi^2 f_{Hz}^2 A \sin(2\pi f_{Hz} t) \quad (4)$$

Den sinusformade skakningen, ekvation 2, kan deriveras två gånger för att få fram accelerationen, ekvation 4. Max acceleration för de olika frekvenserna visas i tabell 1. Störst acceleration uppstår vid skakningsfrekvens på 10Hz. För att kompensera för dessa skakningar krävs att aktuatoren kan flytta bildsensorn med en acceleration på $2m/s^2$.

Frekvens(Hz)	Vinkel(°)	Amplitud(mm)	Hastighet(mm/s)	Max acceleration(m/s^2)
0.1	2	10.47	6.8	0.004
0.5	2	10.47	32.9	0.103
1	1	5.24	32.9	0.206
5	0.2	1.05	33.0	1.033
10	0.1	0.52	32.7	2.066

Tabell 1: Förflyttningshastighet av bildsensor för olika CIPA skakningsfrekvenser [1]

Kraften som erfordras för att uppnå accelerationen beror på massan av det som ska förflyttas.

2.2 Jämviktat system

En sakerna som ville undersökas var möjligheten för ett jämviktat bildsensorstabiliseringssystem. Ideén med motvikt kom från uppdragsgivare. Med hjälp av en motvikt kopplad till sensorn ska gravitationens påverkan på systemet tas bort. Aktuatoren behöver då inte konstant jobba för att motverka gravitationen som annars vill dra bildsensorn nedåt. Nackdelen med det jämviktade systemet är att massan som ska förflyttas måste fördubblas.

$$F_{non-balanced} = m \cdot (g + a) \quad (5)$$

$$F_{balanced} = (m + m) \cdot a \quad (6)$$

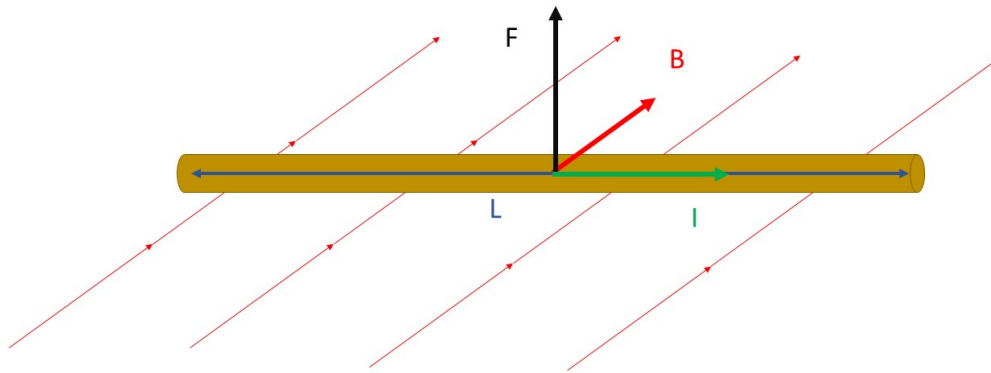
Kraften som krävs är lägre för det jämviktade systemet i de fallen då den eftersökta max accelerationen a är lägre än gravitationskraften g . I vårt fall krävs en max acceleration på $2m/s^2$, enligt föregående sektion 2.1. Ett jämviktat system kräver då mindre kraft att flytta än ett icke jämviktat. Regleringsprocessen kan desutom göras lättare då systemet nu kräver lika mycket kraft att flytta i alla riktningar. Den totala massan som ska flyttas inklusive motvikt, uppskattas till 140g, detta diskuteras mer utförligt i kapitel 11.4. Det balanserade aktuatorsystemet som skall designas måste således producera en kraft på cirka 0.28N i varje riktningen enligt de preliminära mass och accelerationskattningarna. Denna kraften utökas till 0.34N med införandet av fjädrar, vilket diskuteras i kapitel 11.5.

3 Teori aktuatorer

En aktuator är en motortyp som omvandlar elektrisk energi till en begränsad mekanisk rörelse. De vanligaste formerna av linjära aktuatorer i bildstabiliseringssystem är piezoelektriska och voice coil aktuatorer. Båda valen är väl lämpade för den rörelselängd och acceleration som krävs men ställer olika krav på mekanisk uppbyggnad och reglering. Nedan följer en teoretisk genomgång av de grundläggande principerna för voice coil aktuatorer samt en kort överblick av piezoelektriska aktuatorer [2].

3.1 Voice coil aktuatoren

Kraftgenereringen från voice coil aktuatoren bygger på lorentzkraften enligt ekvation 7. Ekvationen visar att en laddning som rör sig genom ett magnetfält med en viss hastighet kommer påverkas av en kraft F . Genom att kombinera Lorentz ekvation med definitionen för ström kan kraften på en strömförande ledare i ett magnetfält beräknas enligt ekvation 8. Kraften på ledaren är vinkelrätt mot både magnetfältet och strömmen. Storleken på kraften $F[N]$ beror på storleken på strömmen $I[A]$, den magnetiska flödestätheten $B[T]$ och längden $L[m]$ på strömledaren i magnetfältet enligt figur 2 [3].

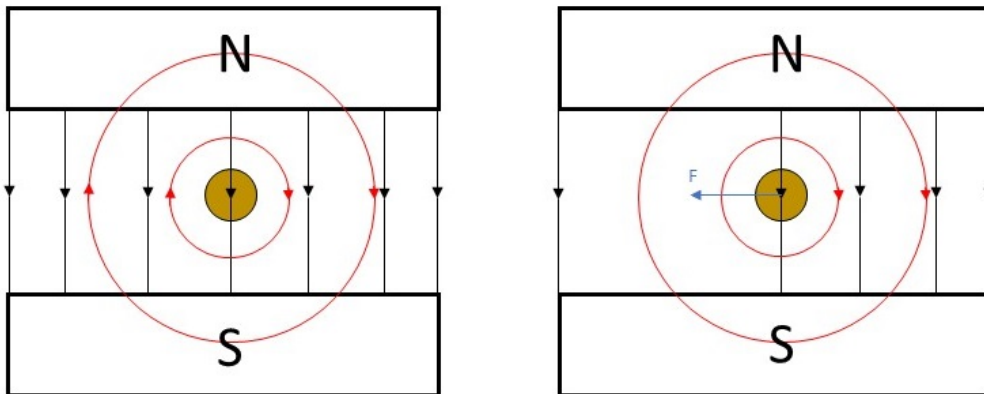


Figur 2: Kraften \vec{F} på en strömledare i ett magnetfält \vec{B}

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (7)$$

$$\vec{F} = \vec{B} \times \vec{I} \times L \quad (8)$$

Ett pedagogiskt sätt att se på varför kraften uppstår visas i figur 3. Figuren visar principiellt hur en voice coil aktuator är konstruerad. Magnetfältet skapat av ström genom en ledare komplementerar magnetfältet skapat av permanentmagneterna på ena sidan av ledaren och tar ut varandra på andra sidan av ledaren. Detta resulterar i en större flödestäthet B på ena sidan av ledaren. Fältet försöker då utjämnas och tvingar ledaren mot området med lägre flödestäthet.



Figur 3: Kraft på strömledare i magnetfält

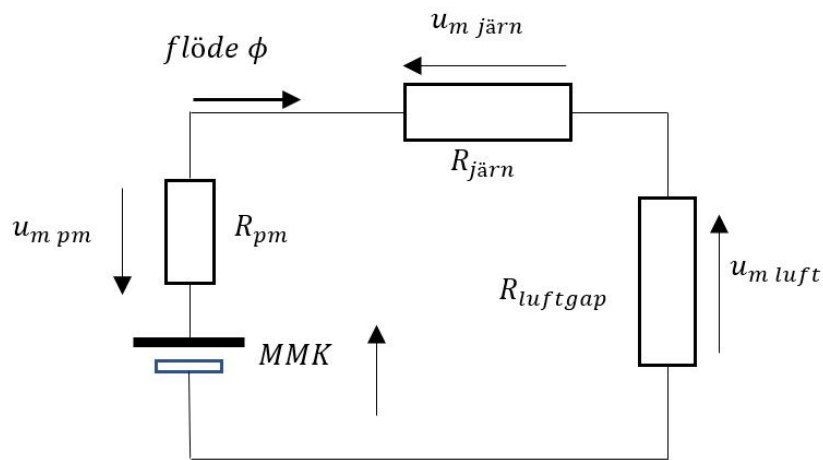
För att producera en större kraft F måste B , I eller L ökas. I ökas enkelt genom att öka strömmen genom ledaren. L ökas genom att öka längden av magnet och ledare, eller genom att öka antal lindningsvarv i spolen. En ökning av B diskuteras vidare nedan.

3.1.1 Magnetiska kretsen

Magnetisk flödestäthet B kräver en utförligare beskrivning. Hopkins lag definierar den magnetiska potentialen u_m som produkten av det magnetiska flödet ϕ och den magnetiska reluktansen R_m enligt ekvation 9.

$$u_m = \phi \cdot R_m \quad (9)$$

Analogt med Ohms lag kan reluktans ses som magnetkretsens resistans, det magnetiska flödet kan ses som strömmen och den magnetiska potentialen kan ses som spänningen enligt figur 4. Denna krets består av en permanentmagnet som skapar den magnetomotoriska kraften MMK . Magneten är direkt kopplad till ett mjukmagnetiskt material som leder tillbaka magnetflödet till magneten via ett luftgap.



Figur 4: Ekvivalent magnetisk krets

Den magnetomotoriska kraften MMK motsvarar summan av magnetpotentialerna. Den magnetomotoriska kraften är en av de avgörande delarna i aktuatorsystemet och det är permanentmagneterna som ger upphov till denna kraften. Magnetpotentialerna kan skrivas om som produkten av dess längd och dess fältstyrka enligt ekvation 10.

$$u_{mfe} = H_{fe} l_{fe} \quad (10)$$

Amperes kretslag, ekvation 11, används för att analysera kretsen vilket ger ekvation 12. I det fall då en spole som ger upphov till ett betydande magnetfält saknas blir $N \cdot I = 0$.

$$\sum H \cdot l = N \cdot I \quad (11)$$

$$H_{pm} \cdot l_{pm} + H_{fe} \cdot l_{fe} + H_{luft} \cdot l_{luft} = 0 \quad (12)$$

Förhållandet mellan magnetiska fältstyrkan H och flödestätheten B ges enligt ekvationer 13, 14 och 15.

$$B_{pm} = B_r + \mu_0 \mu_{pm} H_{pm} \quad (13)$$

$$B_{fe} = \mu_0 \mu_{fe} H_{fe} \quad (14)$$

$$B_{luftgap} = \mu_0 H_{luftgap} \quad (15)$$

Samma magnetiska flöde går genom hela kretsen. $\phi_{pm} = B_{pm} \cdot A_{pm} = \phi_{fe} = B_{fe} \cdot A_{fe} = \phi_{luftgap} = B_{luftgap} \cdot A_{luftgap}$ där A avser tvärsnittet på varje sektion. Omskrivning ger ekvation 16 samt 17.

$$\frac{B_{pm} - B_r}{\mu_{pm}\mu_0} l_{pm} + \frac{B_{fe}}{\mu_{fe}\mu_0} l_{fe} + \frac{B_{luftgap}}{\mu_0} l_{luftgap} = 0 \quad (16)$$

$$\left(\frac{l_{pm}}{\mu_{pm}\mu_0 A_{pm}} + \frac{l_{fe}}{\mu_{fe}\mu_0 A_{fe}} + \frac{l_{luftgap}}{\mu_0 A_{luftgap}} \right) \cdot \phi = \frac{B_r}{\mu_{pm}\mu_0} l_{pm} \quad (17)$$

Alla ingående delar i kretsen i figur 4 har reluktans enligt ekvation 18. Detta ger slutgiltigen ekvation 19.

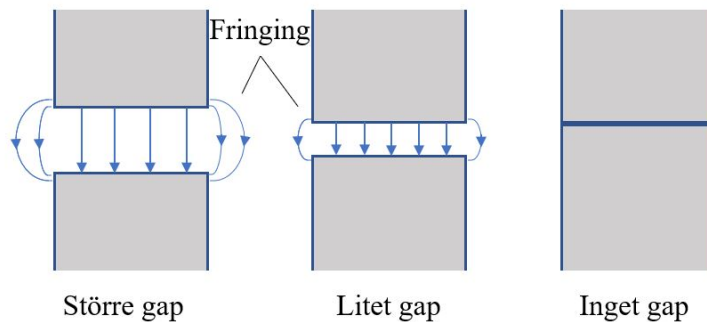
$$R = \frac{l}{A \cdot \mu} \quad (18)$$

$$(R_{pm} + R_{fe} + R_{luftgap}) \cdot \phi = \frac{B_r}{\mu_{pm}\mu_0} l_{pm} \quad (19)$$

l är längden magnetfältet måste färdas i materialet. A är materialets tvärsnitt. μ är materialets permeabilitet där ett högt värde innebär att materialet lätt magnetiseras av ett externt fält. Permeabiliteten för järn är i storleksordningen tusentals gånger större än för luft [3]. I de magnetkretsarna examensarbetet behandlar kommer reluktansen från luftgapet vara den helt dominerande faktorn som begränsar det magnetiska flödet. Luftgapet kan dock endast minskas på bekostnad av spolens tjocklek. B_r bestäms av permanentmagnetens styrka och dess tjocklek l_{pm} . Tjockleken begränsas av det tillgängliga designutrymmet. Permanentmagnetens styrka B_r varierar med temperaturen enligt ekvation 20. Så länge temperaturen varierar inom magnetens arbetsområde är förändringen reversibel.

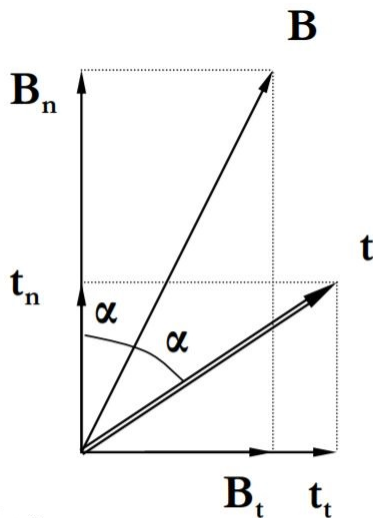
$$B_r = B_{r0}(1 + \alpha_{Br}(\vartheta - \vartheta_0)) \quad (20)$$

Arean på luftgapet kan vara svår att skatta analytiskt på grund av den så kallade fringing effekten. Magnetflödet har en tendens att vilja sprida ut sig utanför luftgapet. Denna tendensen ökar med allt större luftgap [3]. Fringing illustreras i figur 5.



Figur 5: Fringing, när magnetfältet sprider ut sig utanför luftgapet

Attraktion mellan ferromagnetiska material och magnetfält från exempelvis permanentmagneter resulterar i reluktanskrafter. Dessa krafter samt attraktionskrafterna mellan magneter kan delvis analytiskt skattas med hjälp av Maxwells stresstensor enligt ekvation 21 och 22. Dessa ekvationer ger normalspänningen respektive skjuvspänningen enligt figur 6 [4].



Figur 6: Maxwells stress tensor

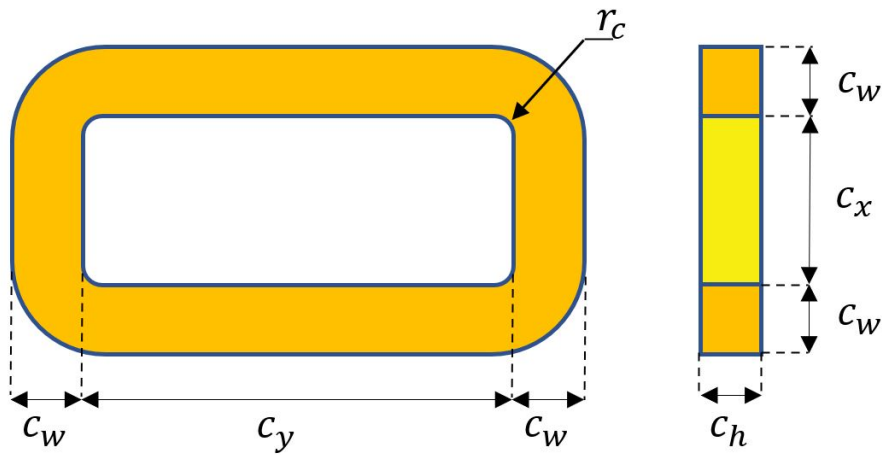
$$t_n = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot (B_n^2 - B_t^2) \quad (21)$$

$$t_t = \frac{B_n \cdot B_t}{\mu_0} \quad (22)$$

Under examensarbetet kommer framförallt FEM programvara användas för att utföra beräkningar. De ovanstående ekvationerna ligger dock till grund och används emellanåt för att tolka och bekräfta att FEM simuleringarna verkligen ger rimliga resultat.

3.1.2 Spolens egenskaper

Spolen leder strömmen genom magnetfältet och dess geometri definieras enligt figur 7. Exempel på hur spolen sitter i förhållande till magnetfältet visas i figur 15a.



Figur 7: Spolens geometri

Ju högre strömdensitet $J[A/m^2]$ desto mer kraft kan vi få ut för en viss area enligt ekvation 8. Då den tillgängliga strömmen och spänningen är begränsad lindas flera varv N genom spolens tvärsnitt för att uppnå en hög strömtäthet. Strömtätheten begränsas främst av värmeutvecklingen i spolen då kylningen är begränsad, samt den mängd ström batteriet kan leverera. Värmeutvecklingen undersöks med värmesimulering i kapitel 6. Batteriets specification avseende ström är okänd. Spolens fyllnadsgrad k_{fill} ges enligt ekvation 23, d_w anger tråddiametern.

$$k_{fill} = \frac{A_{cu}}{A_{slot}} = \frac{N \cdot \frac{\pi \cdot d_w^2}{4}}{c_h \cdot c_w} \quad (23)$$

Fyllnadsgraden begränsas av flera olika faktorer.

- Den precision med vilken tråden kan lindas på spolen.
- Koppartrådens profil, en kvadratisk tråd kan under rätt förutsättningar fylla upp arean mer än en rund tråd.
- Koppartrådens isolering.
- Med vilken spänning tråden kan lindas på spolen.

En fabrikstillverkad spole bör nå 70% fyllnadsgrad med hjälp av så kallad ortocyklisk lindning [5]. En handlindad spole når maximalt 50% enligt författarnas egna nyvunna erfarenheter.

Spolen ger även upphov till en induktans i kretsen som ska tas i beaktning. Induktansen i kretsen vill motverka strömförändringar i kretsen vilket medför att strömförändringar inte kan ske omedelbart. Tiden det tar att för strömmen att byta värde räknas i tidskonstanten t , som bestäms av induktansen och resistansen i kretsen enligt ekvation 24. Efter en tidskonstant t så har 63.2% av strömförändringen skett [6].

$$t = L \cdot R \quad (24)$$

3.1.3 Energiförluster

Strömmen genom kopparlindningen ger upphov till energiförluster i form av värme enligt ekvation 25. Förlusterna beror på koppars resistivitet ρ_0 vilken varierar med temperaturkoefficienten α_{cu} [4].

$$P_{cu} = \rho_0(1 + \alpha_{cu}(\vartheta - \vartheta_0)) \cdot J^2 \cdot A_{cu} \cdot l_{cu} \quad (25)$$

Vidare uppstår förluster på grund av skinneffekten och proximitetseffekten som får ledarens AC motstånd att öka. Skinneffekten innebär att när strömfrekvensen i en ledare ökar, så skapas allt starkare magnetfält inuti ledaren med interfererande virvel strömmar som resultat. Detta inre magnetfält är starkast i mitten och avtar utåt mot ledarens yta. En allt större del av strömmen kommer således färdas närmre ytan vid högre frekvenser. Detta innebär att ledarens area upplevs som mindre. Sambandet för skinndjupet δ ges enligt ekvation 26 med vinkelfrekvens w samt resistiviteten ρ och permeabiliteten μ hos koppar. Skinndjupet är det avstånd från ledarens yta där strömdensiteten sjunkit till 36.7% av strömamplituden. I tabell 2 ges exempel på skinndjup i koppar för olika frekvenser [7].

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho\vartheta}{\omega\mu}} \quad (26)$$

Frekvens (kHz)	Skinndjup (mm)
10	0.66
50	0.30
100	0.21
500	0.094

Tabell 2: Skinndjup för koppar vid olika frekvenser[7]

Med tanke på resultatet från tabell 2 tros inte skinneffekten ge upphov till betydliga förluster i de aktuatorer som behandlas, eftersom tråddiametern visar sig vara mindre än skinndjupet för de frekvenser som är av intresse i denna design.

Proximitetseffekten beror på påverkan från ett yttre föränderligt magnetfält. Detta ger upphov till virvel strömmar vilket kan leda till förluster på samma sätt som skinneffekten [7]. Proximitets effekten antas inte ge några förluster i detta fall då magnetfältet är designat att vara oföränderligt över spolens justering.

3.2 Piezoelektriska aktuatorer

Piezoaktuatorer använder den omvända piezoelektriska effekten för att generera rörelser. Den piezoelektriska effekten är förmågan hos vissa material att skapa en elektrisk laddning när de utsätts för tryck eller spänning. Detta funkar även omvänt där materialet ändrar form när det utsätts för spänning, detta ofta kallas den omvända piezoelektriska effekten [14]. Denna effekten kan utnyttjas på många sätt för att översätta dessa små diskreta formändringarna till större rörelser. De vanligaste är "stick-slip", "stepper" och "ultrasonic" [13]. Specifikationerna för dessa tre olika typer varierar stort, men generellt sett så har de samma styrkor, micro till nanometer precision och hög relativ hållkraft i avstängt läge. Rörelsehastigheter varierar

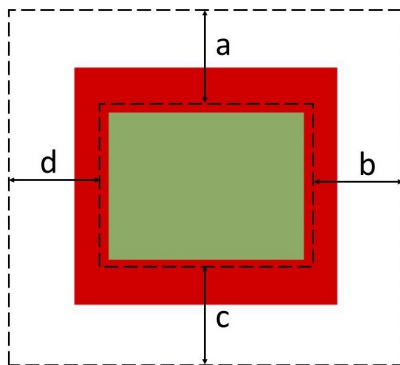
från 10mm/s till 100mm/s beroende på aktuator typ [12]. Denna siffran kan jämföras med hastighetskraven i tabell 1.

4 Begränsningar

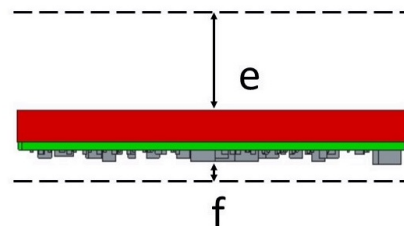
4.1 Geometriska begränsningar

Konceptutrymmet är en av de stora begränsningarna i detta projekt och har stor påverkan på designen av aktuatoren och av det mekaniska systemet. Den ljuskänsliga bildsensorytan har måtten 38.9x42.8mm och ska kunna förflytta sig ± 2 mm i x och y led utan att ljusinsläppet till bildsensorn blockeras. Detta ger ett effektivt område på 42.9x46.8 där inget får finnas framför. De yttre måtten på konceptutrymmet är 80.8x89.5mm, vilket ger ett område på cirka 20mm runt hela bildsensorn att placera komponenter i, se figur 8a. Det verkliga området blir lite mindre då det inte får byggas ända upp till bildsensorkanten, detta för att undvika att ljus reflekteras in i bildsensorn.

Höjden på designutrymmet är begränsat från 1mm bakom bildsensorkretskortet fram till kamerans linsbajonett och cirka 12mm framför bildsensorn. Figur 8b visar höjden på designutrymmet som finns framför och bakom bildsensorn. I detta utrymmet ska aktuatorerna, motvikten samt all mekanik och upphängningsanordningar få plats.



(a) $a=21\text{mm}$, $b=20.85\text{mm}$, $c=22.9\text{mm}$, $d=20.85\text{mm}$



(b) $e=12\text{mm}$, $f=1\text{mm}$

Figur 8: Designutrymme runt bildsensorn, bildsensorn visas i rött och kretskort inklusive komponenter visas i grönt och grått

För att få plats med identiska akuatorer på varje sida och samtidigt ha plats för motvikt och mekanik har aktuatorkoncepten fått ett maximalt utrymme på 15x8.5x50mm var.

4.2 Elektriska begränsningar

I kameran finns en spänningpotential på 7.27V och 3400mAh att tillgå. Detta kan medföra begränsningar i mängden ström som kan användas av bildsensorstabiliseringssystemet.

4.3 Temperaturbegränsningar

Kameran ska kunna vara fullt funktionsduglig i temperaturer från -20°C till 50°C . Kameran ska kunna klara förvaring i temperaturer från -50°C till 70°C . Detta innebär att bildsensorstabilis-

eringssystemet inte får skapa för mycket värme, samt att bildsensorstabiliseringssystemet inte får ta skada av dessa temperaturer.

4.4 Magnetiska begränsningar

En tidig idé var att placera delar av aktuatorn på den rörliga motviktsplattan. Magneter eller bakplatta skulle kunna användas som mekanisk motvikt för att undvika att motviktsplattan endast bestod av dödvikt. Tyvärr fick dessa idéer skrotas då simuleringar visade att reluktanskrafterna som uppstod då magneterna eller bakplattan rörde på sig blev många gånger större än den kraften aktuatorerna skulle kunna producera. Vid fallet med rörlig bakplatta skulle dessa reluktanskrafter kunna minimeras genom att göra bakplattan så pass stor att reluktansen i magnetkretsen inte påverkas av bakplattans position. Resultatet blev en bakplatta som inte uppfyllde de geometriska begränsningarna beskrivna i föregående avsnitt. Utifrån detta drogs slutsatsen att aktuatorn endast kunde ha en rörlig del, spolen.

Aktuatorerna kan, beroende på hur de är designade, skapa överflödiga magnetiska fält runt omkring sig. Bildsensorn och de andra komponenterna som ligger i närheten av aktuatorerna ska inte vara känsliga för permanenta magnetiska fält. Inga övre gräns finns satt på storleken på dessa läckageflöden.

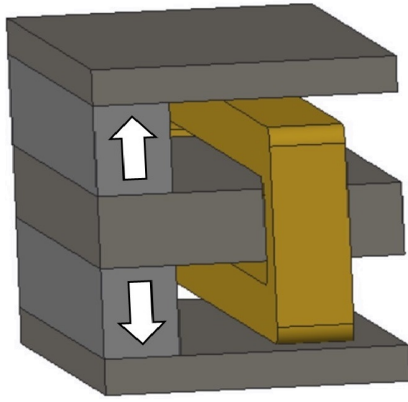
5 Aktuatorkoncept

Utifrån designutrymmet tidigare diskuterat togs olika linjära aktuatorkoncept fram. Alla koncept utom piezomotorkonceptet använder magneter och mjukjärn för att skapa ett permanent magnetfält i vilket en strömledande spole placeras. Därmed skapas en kraft enligt teorin diskuterad i 3.1. Aktuatorkoncepten itererades fram genom simulationer i programmen FEMM och Comsol. FEMM används mest som ett vägledande simuleringsverktyg för att snabbt kunna testa olika varianter på koncept och få en indikation om konceptets magnetiska egenskaper. Mer djupgående verifierande simuleringar gjordes i Comsol. Huvudsakliga målet i det första konceptsteget var att maximera kraften aktuatorn kunde producera.

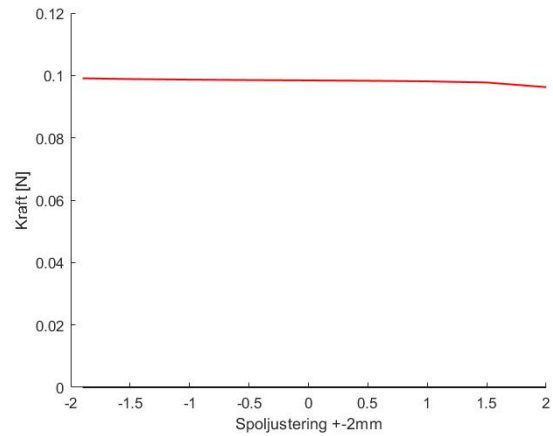
För varje koncept presenteras en CAD modell där magnetiseringsriktningen på magneterna indikeras med vita pilar, en kraftkurva för att visa linjäriteten på kraften, en Comsol fältstyrke bild, en graf över hur B-fältet varierar över spolgäpet och en datatabell. Datan i tabellen är uträknad för en aktuator, men ett fullt system är tänkt bestå av fyra aktuatorer, två aktuatorer per förflytningsriktning. Varje enskild aktuator måste kunna producera 0.17N för att tillsammans uppnå det preliminära kraftkravet på 0.34N per förflytningsriktning. Kraft vid $2A/mm^2$ används som jämförelse då detta ses som en säker strömdensiteten ur ett värmeutvecklingsperspektiv för 0.1mm koppartråd [8]. Kopparspoleffekten visas vid 0.17N. För det totala systemets max koppareffektförbrukning måste detta värdet multipliceras med fyra. Denna effektförbrukningsantarm antar inga förluster i det mekaniska systemet. Max läckage är en siffra på magnetfältets maximala storlek 5mm bort från aktuatorns fysiska slut. För koncept 2-5 är denna maxpunkt centrerad i mitten av aktuator, 5mm ovanför övre bakplattan. De olika konceptidéerna visas nedan.

5.1 Koncept 1

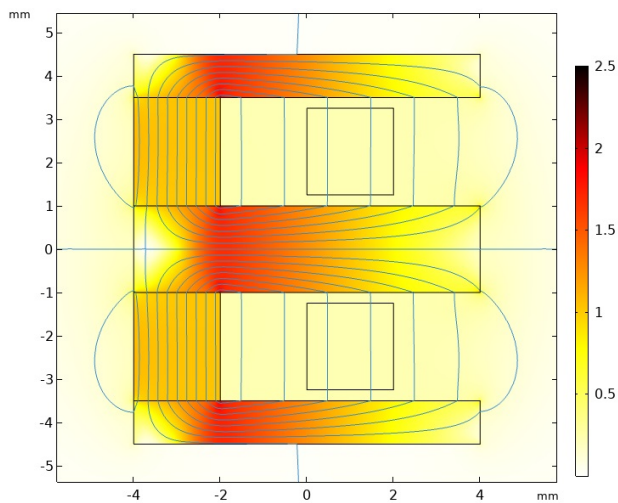
Aktuatorn består av tre mjukmagnetiska kolstålbitar strukturerade som benen i ett E. Två magneter med motsatt riktad magnetisering är placerade i utrymmet mellan kolstålbitarna. Två raka uniforma motriktade magnetfält skapas mellan det mjukmagnetiska stålbenen, se figur 9c. Beroende på strömriktningen i spolen kommer den resulterande kraften förflytta spolen in eller ut ur E:et. Aktuatorn har måtten 8x9x50mm.



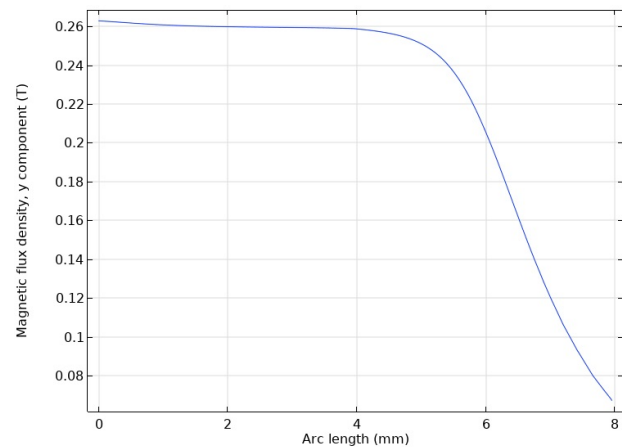
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgapet

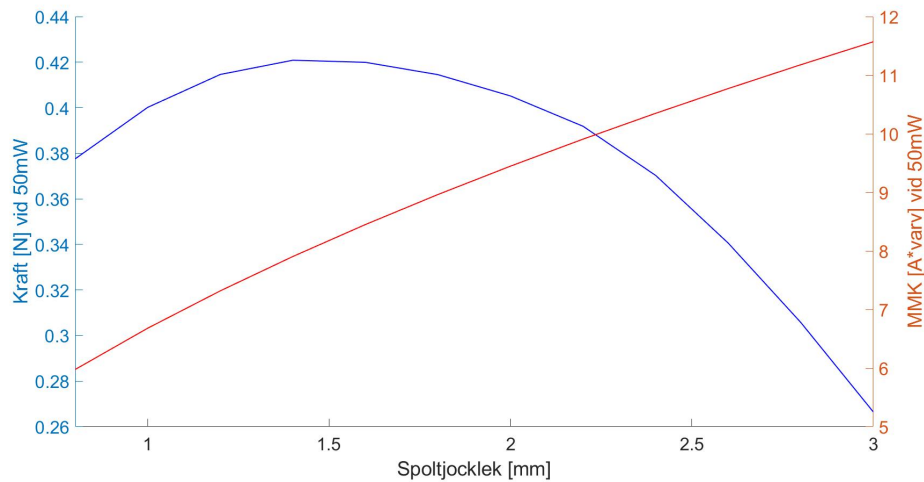
Figur 9: Koncept 1

Aktuatomått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Max läckage @5mm
8x9x50	15.9g	0.088N	57.8mW	0.029T

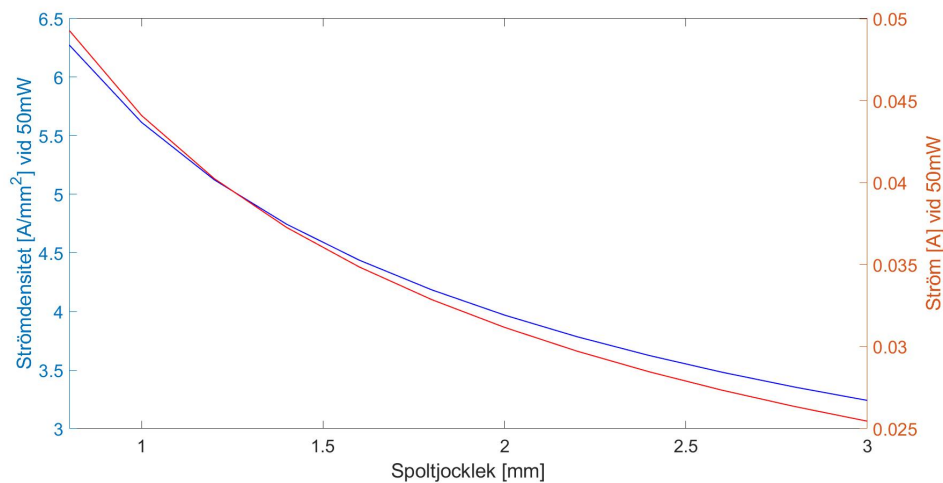
Tabell 3: Koncept 1

5.2 Koncept 2

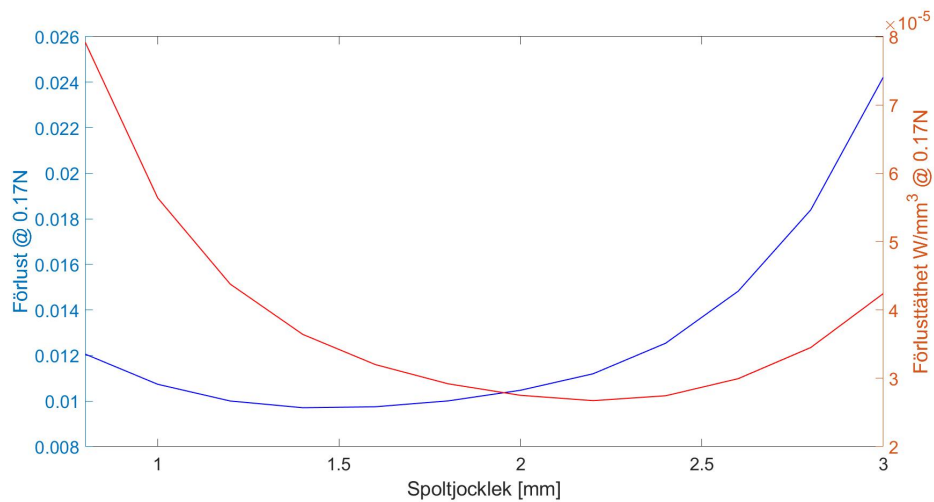
Två varianter av koncept 2 är framtagna. Båda lägger spolen platt mellan två motriktade magneter. Spolen upplever krafter som drar till vänster eller höger beroende på strömriktning. Magneter limmas fast på bakplattorna som i sin tur hålls isär med fysiska pelare placerade utanför aktuatorområdet. Magneterna och spolen delar på ett utrymme totalt 4mm högt. Höjden på magneterna och spolen valdes genom optimeringssimuleringar enligt figur 10 samt 11. I figur 10 visas kraft på vänstra y-axel vid 50mW för koncept 2a tillsammans med MMK på högra y-axeln. MMK avser Ampere-turns d.v.s. ström multiplicerat med antal varv i spolen med en fyllnadsgrad på 0.72. I figur 11 visas strömdensitet och ström för samma variation av spoltjocklek och magnetjocklek vid 50mW som i figur 10. Comsol optimering som visas i figur 10 visar att denna aktuator typ är krafteffektivast när spolen är 1.4mm hög. Magneterna har då en höjd på 2.6mm.



Figur 10: Kraft och MMK vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 2a

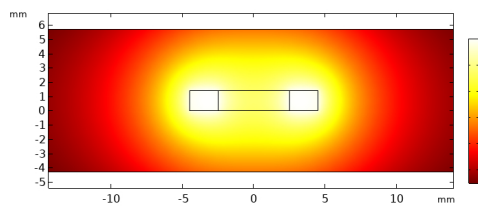


Figur 11: Strömdensitet och ström vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 2a

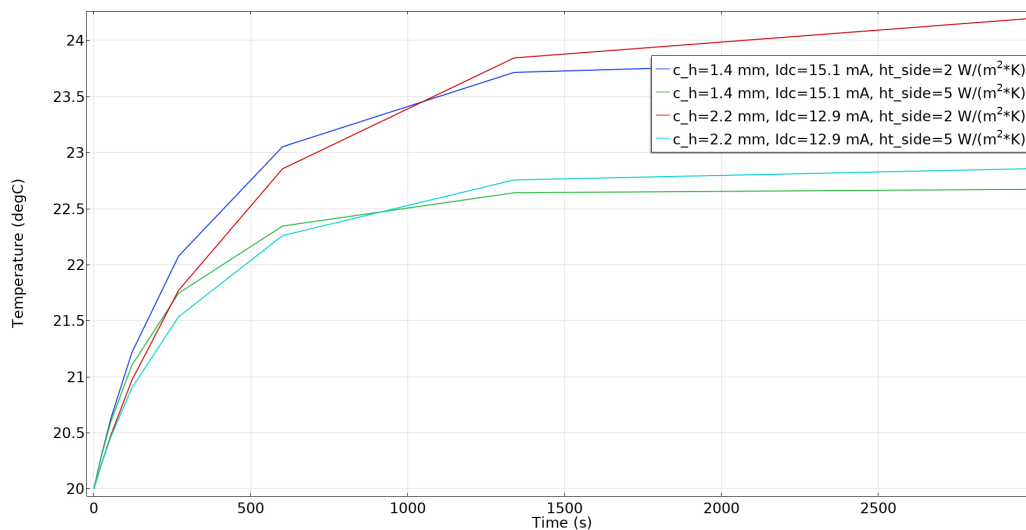


Figur 12: Förlust samt förlusttätet vid 0.17N vid olika spoltjocklek för koncept 2a

I figur 12 visas effektförlusten och förlusttätet vid 0.17N när spolens tjocklek varieras på bekostnad av magneternas tjocklek. Minsta effektförlust sker när spolen är 1.4mm tjock vilket även återspeglas i figur 10. Förlusttäteten är däremot som minst vid 2.2mm tjock spole. En värmesimulering görs för att undersöka dessa två optimum. Spolen är placerad enligt 13 med randvillkor 2 samt $5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ naturlig konvektion på 20°C . P.g.a svårigheter att modellera de exakta förhållandena i kameran så är det svårt att avgöra vilket optimum som är bäst. Författarna väljer att gå vidare med optimum avseende minsta totala effektförlust enligt figur 10 samt 12.



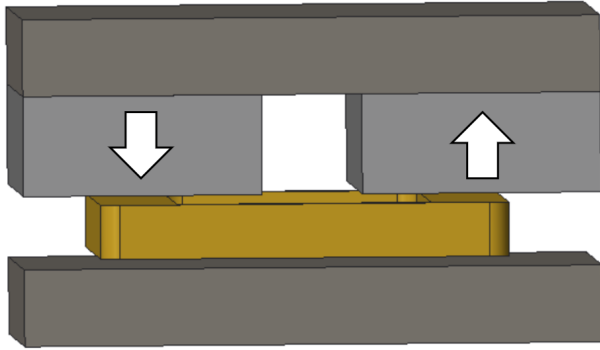
Figur 13: Värmeutveckling i spole efter 55 sekunder



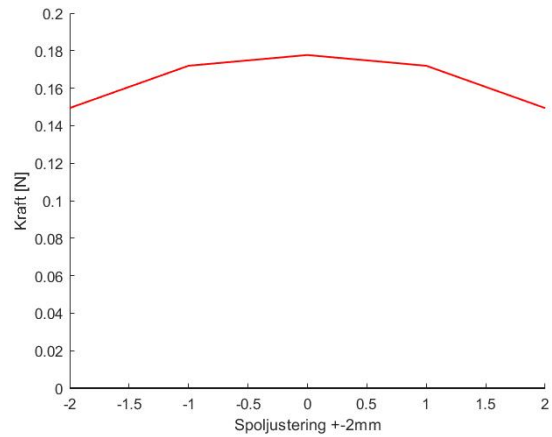
Figur 14: Temperatur i spole över tiden [s]

5.2.1 Koncept 2a

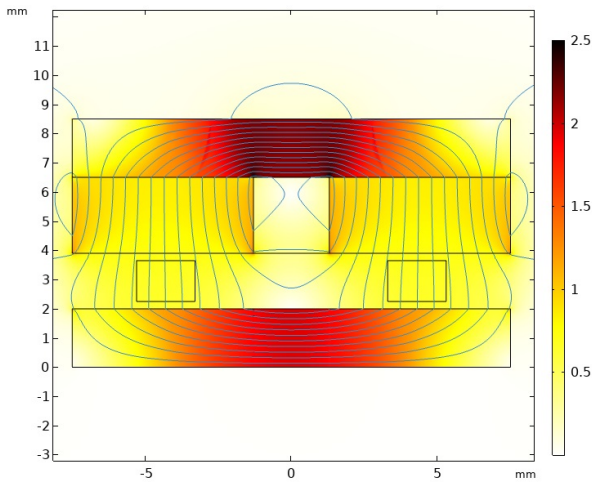
Koncept 2a lämnar ett 2.6mm tomrum i mitten mellan magneterna, se figur 15a. Detta är ett utrymme där spolens längsgående tråd aldrig kommer ligga direkt under. Kraften skapad är lätt olinjär med ett maximum när spolen är centrerad under magneterna. Magnethöjd 2.6mm, bakplattehöjd 2mm, spolhöjd, 1.4mm. Aktuators totala storlek är 15x8.5x50mm.



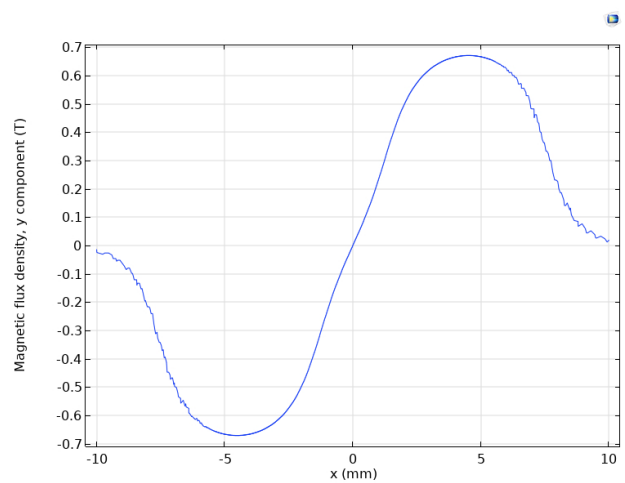
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning på de ljusgrå magneterna



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgäpet

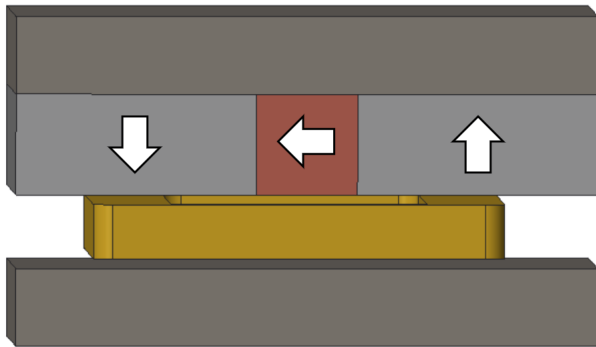
Figur 15: Koncept 2a

Aktuatormått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Maxläckage @5mm
15x8.5x50	35.4g	0.150N	14.0mW	0.05T

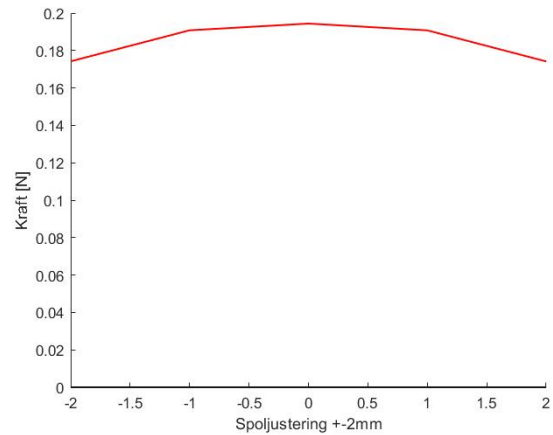
Tabell 4: Koncept 2a

5.2.2 Koncept 2b

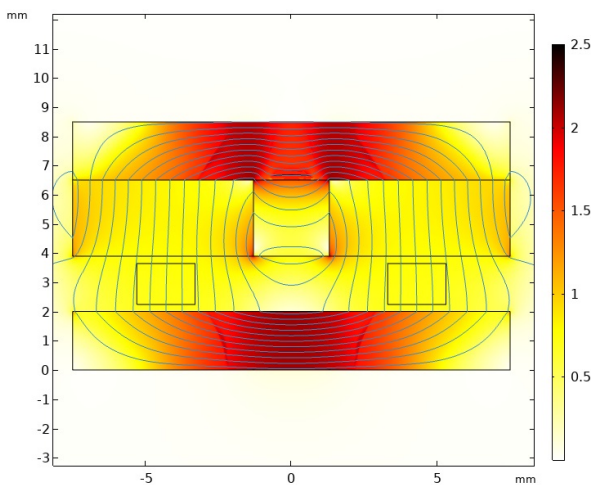
Det tomma utrymmet i koncept 2a kan utnyttjas genom att placera en magnet riktad 90° från de andra magneterna. Denna extra magnet kallar vi Halbacht magnet, med införandet av den är magneterna delvis strukturerade i en Halbacht struktur. Halbacht magneten visas i rött i figur 16a. Tillägget av halbachtmagneten ökar magnetfältet i luftgapet, vilket ökar kraften konceptet kan producera. Nackdelen är att halbachtmagneten kan vara svår att montera. Kraftfördelningen är lätt olinjär beroende på spolplacering. Magnethöjd 2.6mm, bakplattehöjd 2mm, spolhöjd, 1.4mm. Aktuators totala storlek är 15x8.5x50mm.



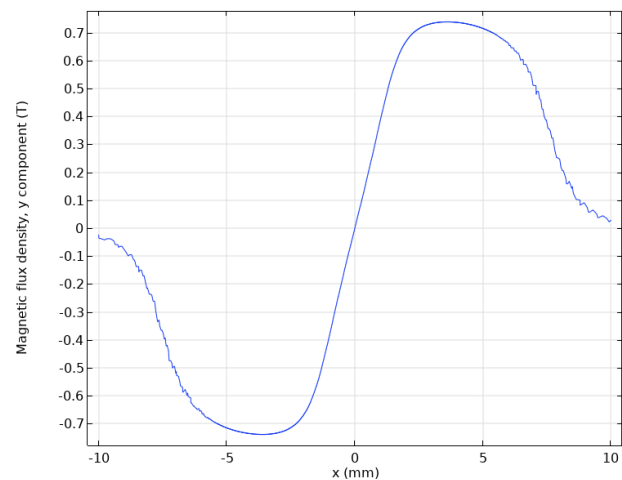
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning på de ljusgrå magneterna



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgapet

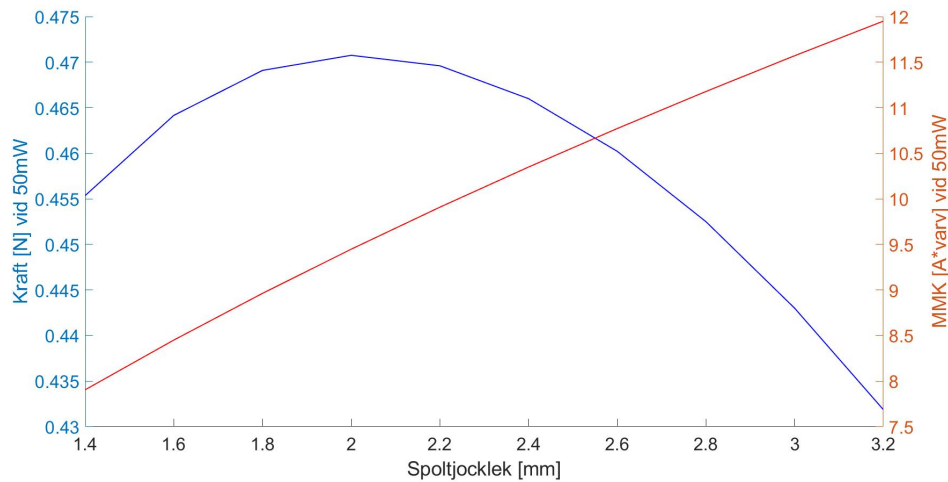
Figur 16: Koncept 2b

Aktuatormått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Maxläckage @5mm
15x8.5x50	37.75g	0.161N	12.0mW	0.035T

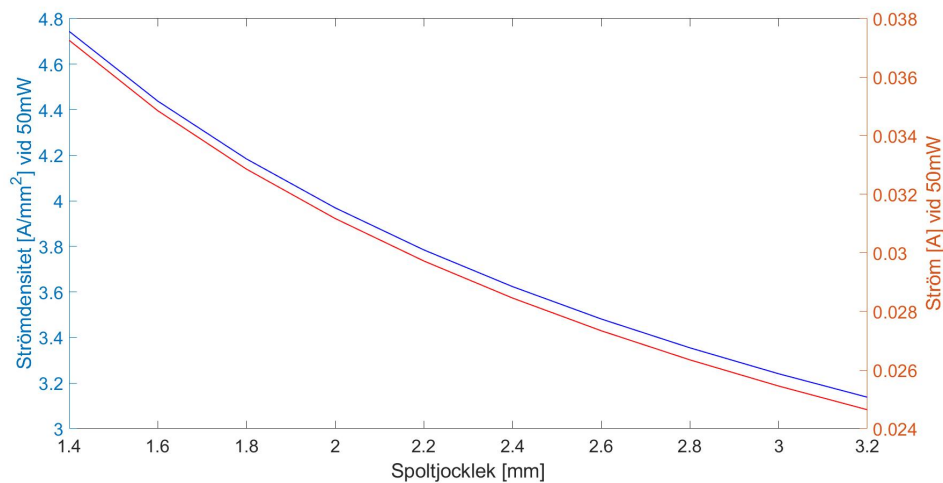
Tabell 5: Koncept 2b

5.3 Koncept 3

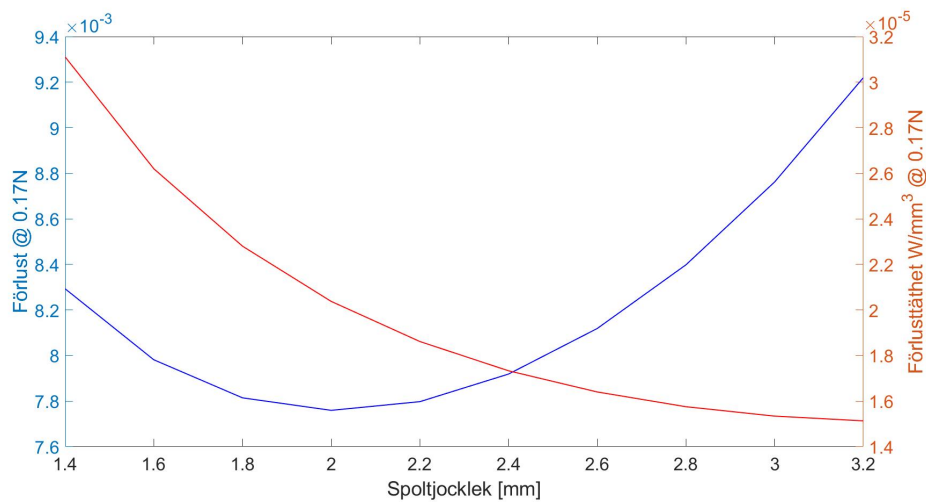
Tre varianter av koncept 3 är framtagna. Alla tre har magneter på båda sidor av spolen som leder magnetflödet över spolgapet. Dubbla magneter ger större resulterande krafter i förhållande till spoleffekt jämfört med koncept 2. I konceptet uppstår attraktionskrafter mellan magneterna på vardera sida av spolen och de resulterande krafter som vill dra ihop konstruktionen är högre än tidigare koncept. Bakplattorna får göras tunnare för att kompensera för de tillagda magneterna. Detta gör att läckageflödet är större för dessa aktuatorerna än för de tidigare presenterade aktuatorerna. Geometrioptimering görs för koncept 3 enligt figur 17 samt 18. I figur 17 visas kraft på vänstra y-axel vid 50mW för koncept 3a tillsammans med MMK på högra y-axeln. MMK avser Ampere-turns d.v.s. ström multiplicerat med antal varv i spolen med en fyllnadsgrad på 0.72. I figur 18 visas strömdensitet och ström för samma variation av spoltjocklek och magnetjocklek vid 50mW som i figur 17.



Figur 17: Kraft och MMK vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 3a

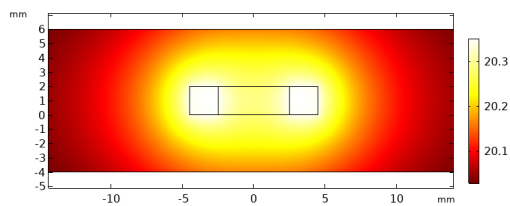


Figur 18: Strömdensitet och ström vid höjdoptimering av spole och magnet för koncept 3a

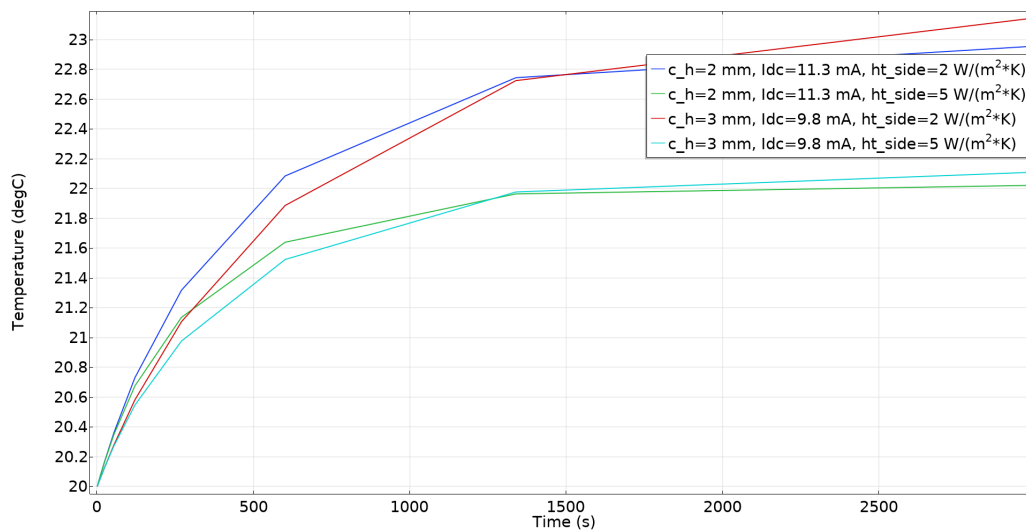


Figur 19: Förlust samt förlusttätet vid 0.17N vid olika spoltjocklek för koncept 3a

I figur 19 visas effektförlusten och förlusttätet vid 0.17N när spolens tjocklek varierar på bekostnad av magneternas tjocklek. Minsta effektförlust sker när spolen är 2mm tjock vilket även återspeglas i figur 17. Förlusttäteten är däremot som minst vid 3mm tjock spole. En värmesimulering görs för att undersöka dessa två optimum. Spolen är placerad enligt 20 med randvillkor 2 samt $5 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ naturlig konvektion på 20°C . P.g.a svårigheter att modellera de exakta förhållandena i kameran så är det svårt att avgöra vilket optimum som är bäst. Författarna väljer att gå vidare med optimum avseende minsta totala effektförlust enligt figur 17 samt 19.



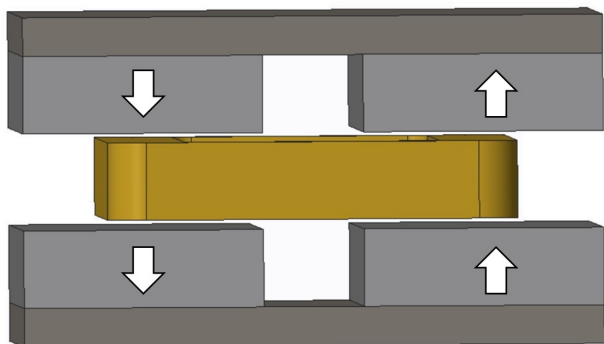
Figur 20: Värmeutveckling i spole efter 55 sekunder



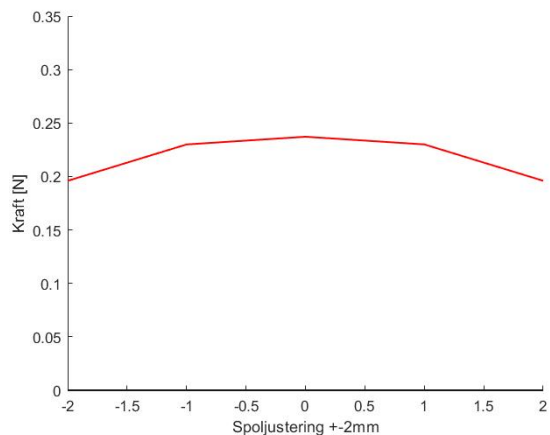
Figur 21: Temperatur i spole över tiden [s]

5.3.1 Koncept 3a

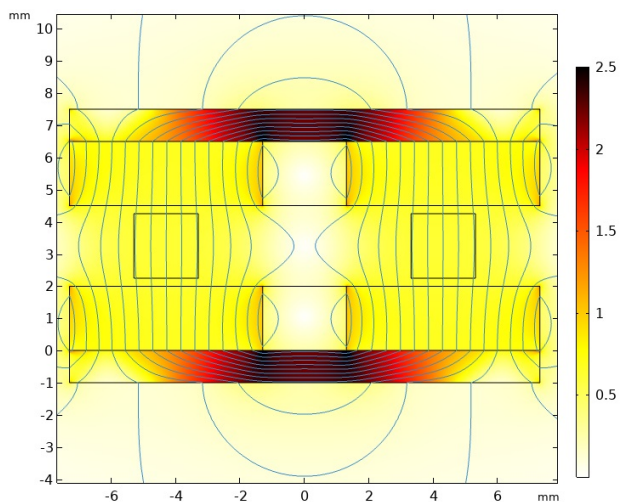
Koncept 3a lämnar ett 2.6mm tomrum mellan magneterna. Magnethöjd 2mm, bakplattehöjd 1mm, spolhöjd 2mm. Aktuatorns totalstorlek är 15x8.5x50mm.



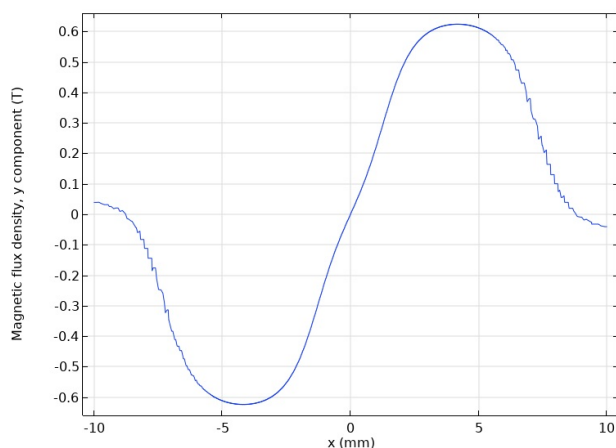
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning på de ljusgrå magneterna



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgäpet

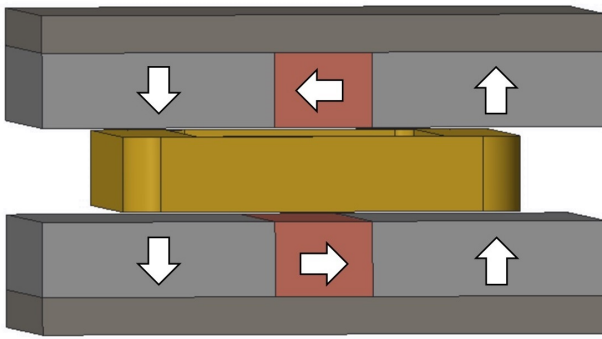
Figur 22: Koncept 3a

Aktuormått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Max läckage @5mm
15x8.5x50	31.5g	0.225N	8.8mW	0.075T

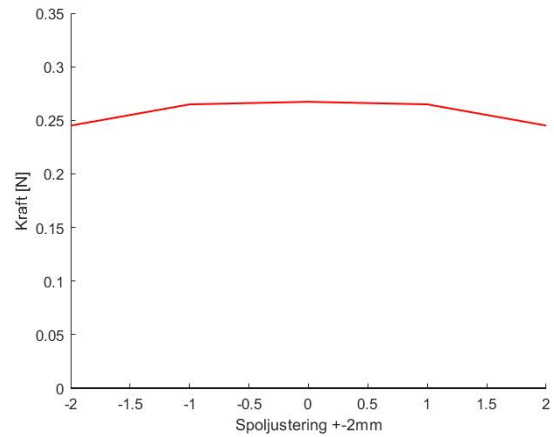
Tabell 6: Koncept 3a

5.3.2 Koncept 3b

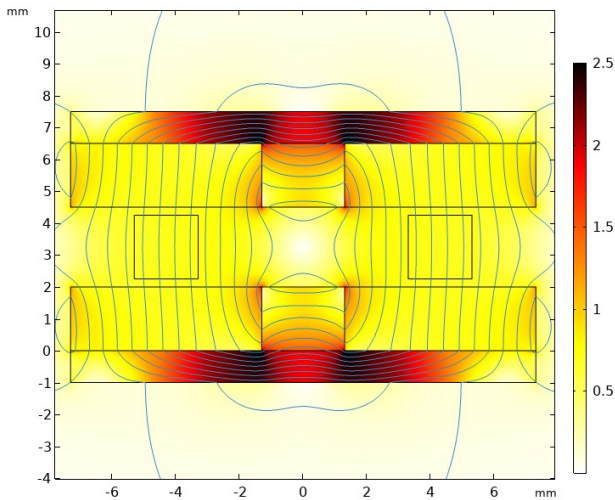
För koncept 3b ges utrymme i mitten för extra magneter i en Halbach struktur. Detta ger ett ökat flödestäthet i spolgapet och större resulterande krafter på spolen, men kan återigen vara svårare att montera. Magnethöjd 2mm, bakplattehöjd 1mm, spolhöjd 2mm. Bredden på mittmagneterna är 2.6mm. Aktuatorn har måtten 15x8.5x50mm.



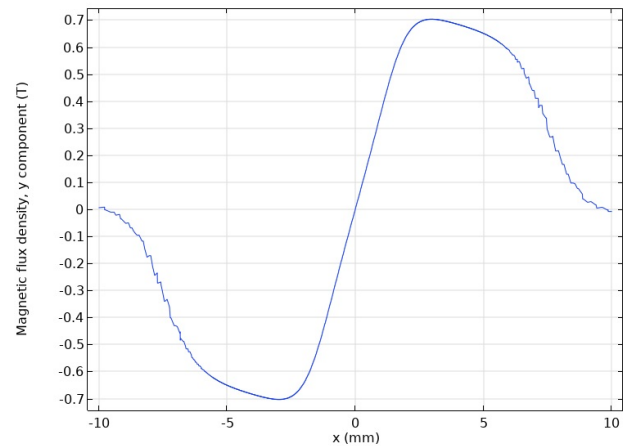
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgapet

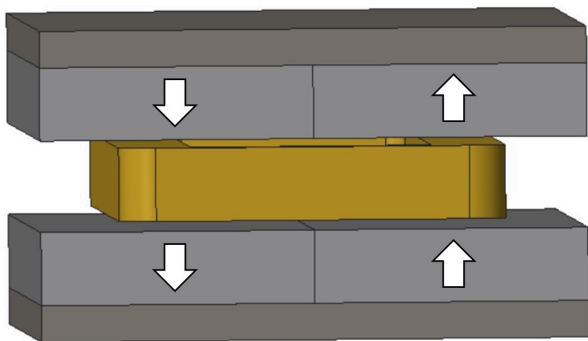
Figur 23: Koncept 3b

Aktuatormått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Max läckage @5mm
15x8.5x50	33.8g	0.263N	6.1mW	0.073T

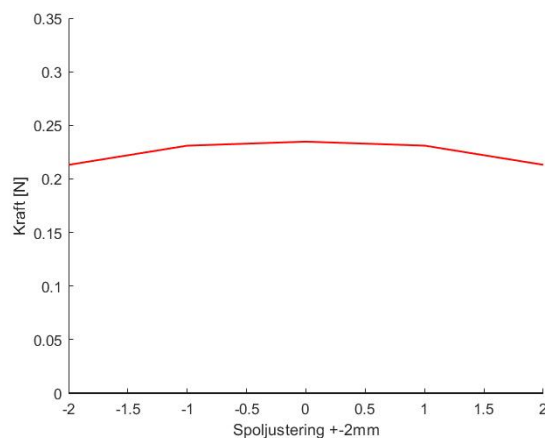
Tabell 7: Koncept 3b

5.3.3 Koncept 3c

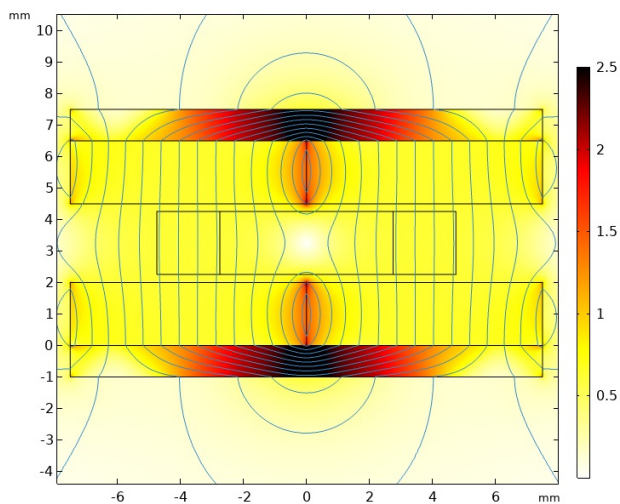
För koncept 3c lämnas inget utrymme i mitten. Detta gör övergången från negativ till positiv magnetflöde snabbare än för de tidigare koncepten vilket kan ses i figur 24d. Kraften som produceras är lite lägre än för koncept 3b samtidigt som läckageflödet är något högre. Magnethöjd 2mm, bakplattehöjd 1mm, spolvhöjd 2mm. Aktuators totalstorlek är 15x8.5x50mm.



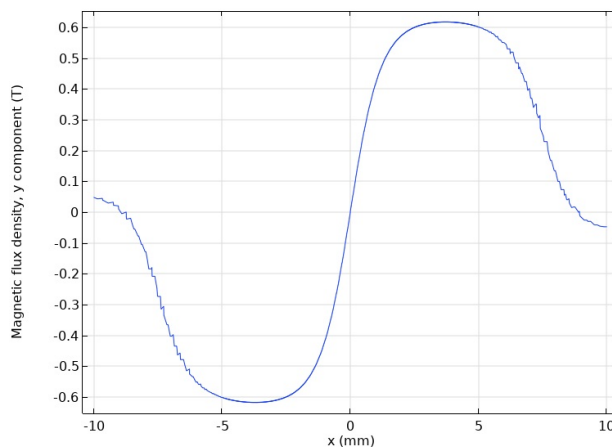
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgapet

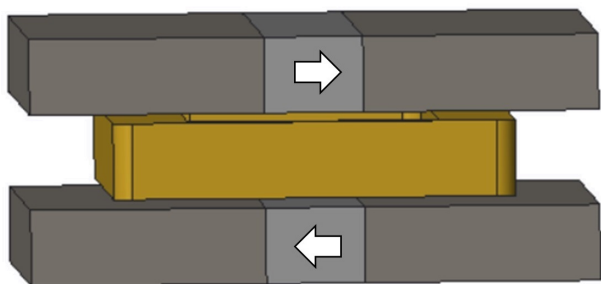
Figur 24: Koncept 3c

Aktuatomått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Max läckage @5mm
15x8.5x50	33.8g	0.223N	9.0mW	0.086T

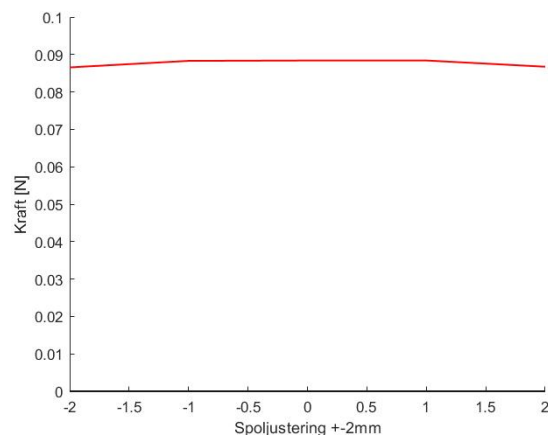
Tabell 8: Koncept 3c

5.4 Koncept 4

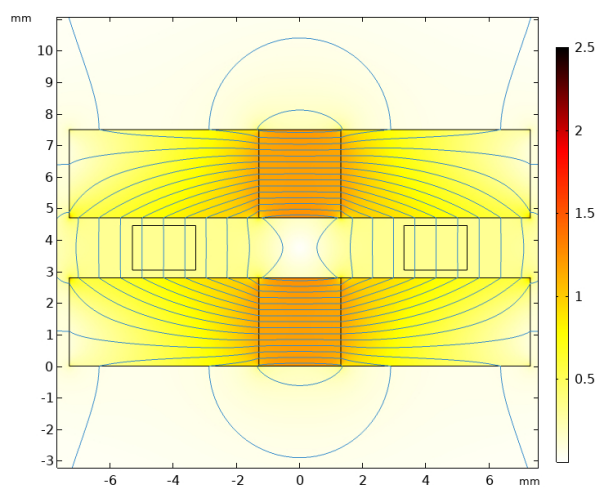
Två magneter riktade bort från varandra skapar ett magnetfält som korsar luftgapet enligt figur 25a. Magnetfältet som skapas i spolgapet är mycket linjärt över hela utslagsområdet. Kraften som produceras är liten i förhållande till tidigare presenterade koncept. Aktuatoren är något mindre och lättare än koncept 2 och 3. Magnethöjd 2.8mm, bakplattehöjd 2.8mm, spolhöjd, 1.4mm. Aktuatorns totalstorlek är 15x7.5x50mm.



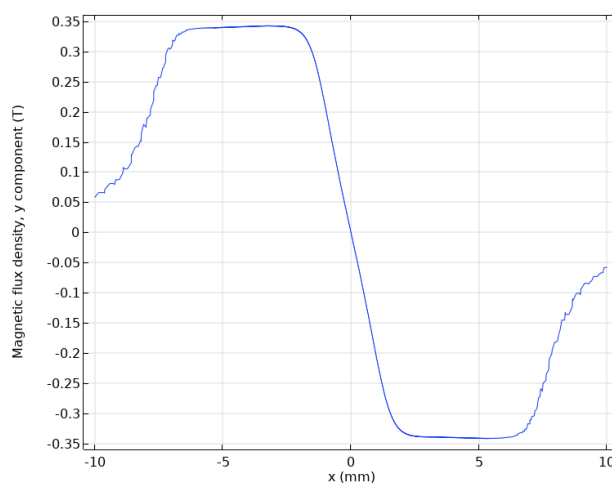
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning på de ljusgrå magneterna



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgapet

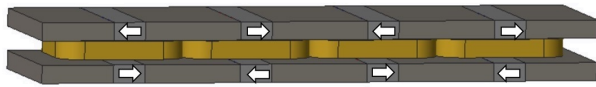
Figur 25: Koncept 4

Aktuatomått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Max läckage @5mm
15x7.5x50	27.7g	0.079N	60.9mW	0.032T

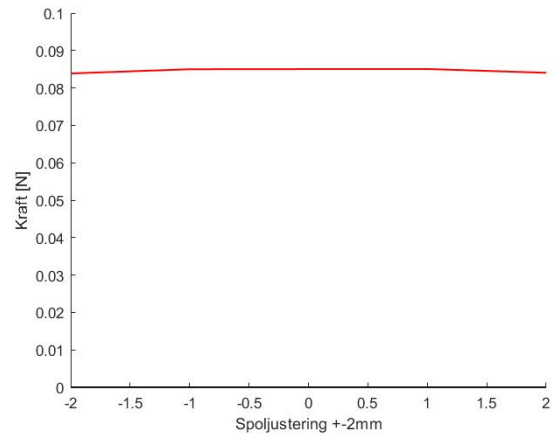
Tabell 9: Koncept 4

5.5 Koncept 5

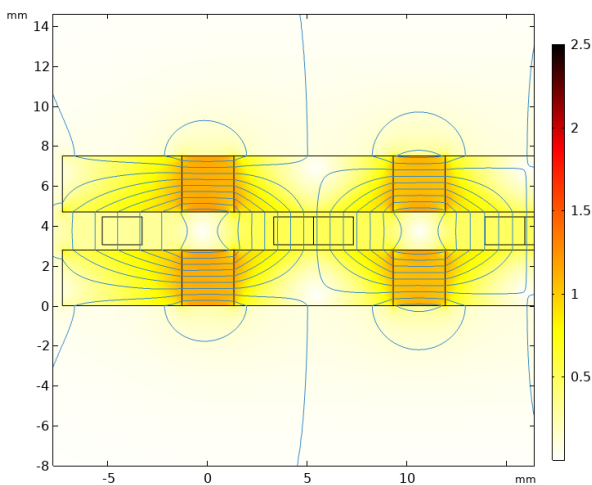
Koncept 5 är baserat på koncept 4. Flera mindre sektioner med magneter och spollindningar hjälper till att skapa en kraft i aktuatorns längsgående led. Konceptets förmåga att skapa kraft i längsgående riktningen gör det möjligt att placera aktuatorerna symmetriskt kring bildsensorn och ändå skapa moment kring bildsensorns mittpunkt. Kraften som produceras är precis som för koncept 4 mycket linjär över hela spolens utslagsområde. Men styrkan på den producerade kraften är inte så hög. Magnethöjd 2.8mm, bakplattehöjd 2.8mm, spolhöjd 1.4mm. Aktuatorns totalstorlek är 46.5x7.5x15mm.



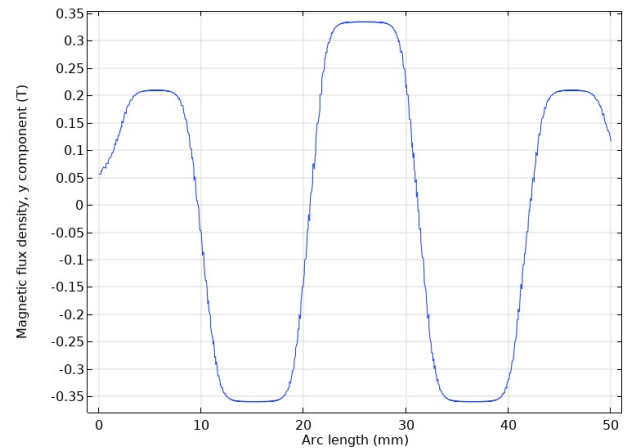
(a) CAD modell, pilar indikerar magnetiseringsriktning på de ljusgrå magneterna



(b) Resultande aktuatorkraft över 4mm, strömstyrka på 15.7mA



(c) Magnetfält vänster halva, färg indikerar fältstyrka [T]



(d) B-fältstyrka över spolgapet

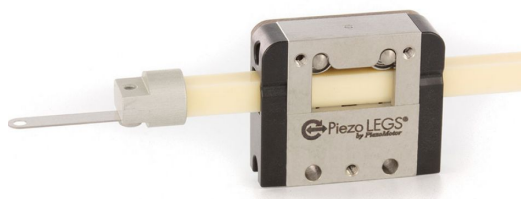
Figur 26: Koncept 5

Aktuormått	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Max läckage @5mm
46.5x7.5x15	24.9g	0.074N	82.2mW	0.034T

Tabell 10: Koncept 5

5.6 Piezomotorer

Piezomotorer var tidigt en konceptidé. Motortypen använder den piezoelektriska effekten och gör förflyttningar i små snabba diskreta steg. Motortypen kan producera rörelser av hög precision och har dessutom fördelen att ha en hållkraft i avstängt läge [12]. Dessa finns färdiga att köpa på hemsidor såsom svenska piezomotor.com figur 27.



Figur 27: PiezoLEGS från PiezoMotor

6 Preliminär aktuatorutvärdering

Piezomotorkonceptet lades tidigt ner. De kommersiellt tillgängliga piezomotorena frfattarna kunde hitta var för stora för att passa syftet. Specialtillverkade piezomotorer skulle möjligtvis kunna uppfylla kraven, men skulle troligtvis vara väldigt dyra.

Preliminär utvärdering av linjära dc aktuatorkoncept gjordes med hänseende till kraften koncepten kunde producera vid $2A/mm^2$ och effekten vid $0.17N$. $2A/mm^2$ valdes då det är en strömdensitet som kan användas kontinuerligt utan att få för höga temperaturer i spolen vilket visas i figur 29b. Jämförelsen vid $0.17N$ gjordes då detta är vad varje aktuator måste kunna producera om aktuatorparen ska nå upp till den preliminära kraftbehovet på $0.34N$ som behövs för att uppnå en acceleration på $2m/s^2$. Ett sammanställt resultat från kraftsimuleringarna visas i tabell 11 och figur 28.

Koncept	Aktuatorvikt	F@2A/mm ²	Effekt@0.17N	Max läckage @5mm
1	15.9g (x4)	0.088N	57.8mW	0.029T
2a	35.4g (x4)	0.150N	14mW	0.05T
2b	37.75g (x4)	0.161N	12.0mW	0.035T
3a	30.9g (x4)	0.217N	8.8mW	0.075T
3b	33.8g (x4)	0.251N	6.1mW	0.073T
3c	33.8g (x4)	0.223N	9.0mW	0.086T
4	27.7g (x4)	0.079N	60.9mW	0.035T
5	24.9g (x4)	0.074N	82.2mW	0.034T

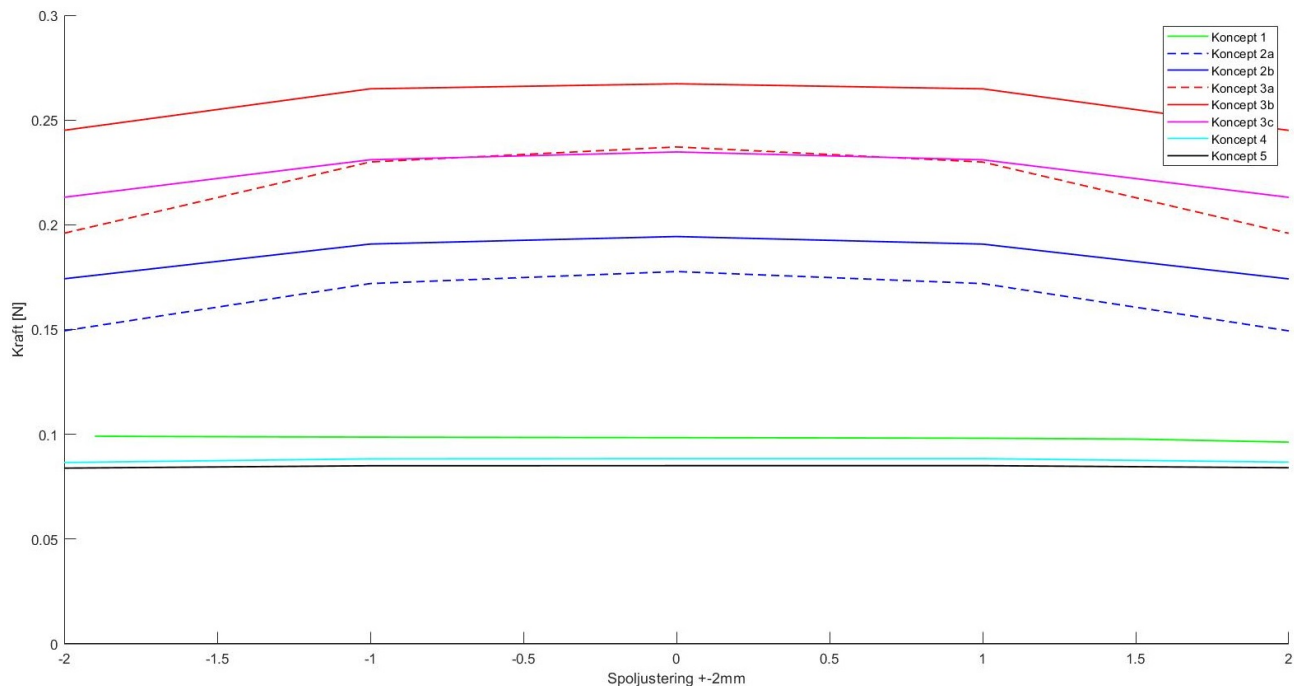
Tabell 11: Sammanställningstabell koncept

Koncept 1, 4 och 5 ger mycket linjära kraftfördelningar, men kraften som produceras är väsentligt mycket mindre än för de andra koncepten. Fördelen med dessa koncept är att en viss

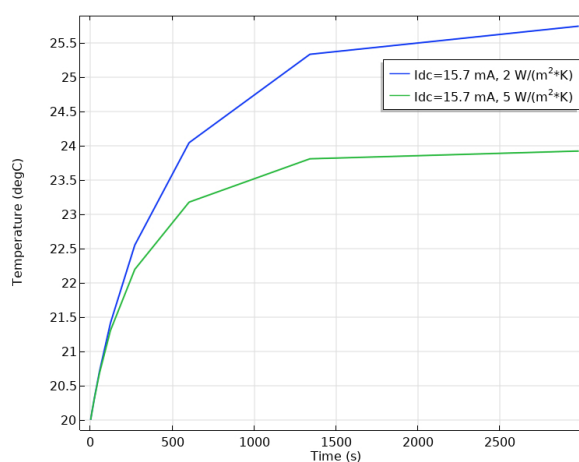
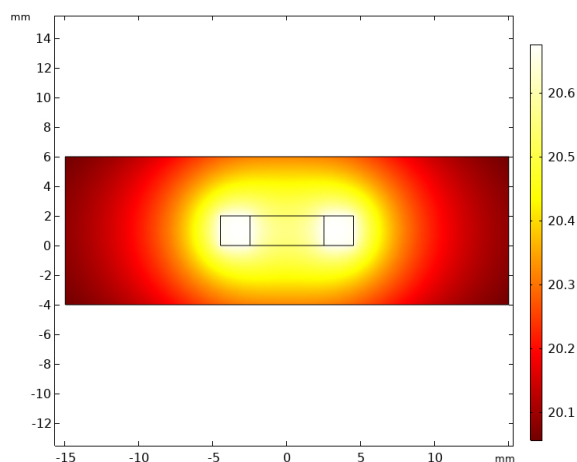
ström ger samma kraftutslag över hela spolens rörelseområde, medans koncept 2 och 3 ger mer kraft i mitten. Men detta ses inte som en jättestor fördel då kraftolinjäriteten kan kompenseras för i ett återkopplat reglersystem. På grund av detta kasseras koncept 1, 4 och 5.

Koncept 2a och 2b valdes inte heller att fortsättas med då effektförlusten i koncepten är högre än för koncept 3 varianterna.

Koncept 3a, 3b och 3c är de som presterade bäst. De har lägst effektutveckling för given kraft. 3b har lite högre kraft per effekt och kraft per strömdensitet än 3a och 3c, samt lite lägre läckageflöde. Det valdes att fortsättas vidare med alla tre av dessa koncepten till nästa utvärderingsprocess.



Figur 28: Simulerade kraftkurvor för varje aktuator typ med 15.7mA ström



(a) Temperaturfördelning efter 55 sekunder. Omgivningstemperatur 20 °C (b) Två kurvor plottas då termiska koefficienten för naturlig konvektion varierar mellan 2 – 5W/m²K

Figur 29: Värmeutveckling visas vid 2A/mm² strömdensitet för 2x2mm spolesegment

7 Sensorer

För att kunna reglera bildsensorn till rätt position måste det finnas ett sätt att bestämma bildsensorns nuvarande position. Detta kan göras på ett flertal olika sätt med olika noggrannhet och snabbhet. En pixel i kameran är $5\mu\text{m}$. Målet är en sensorupplösning på 1-3 pixlar , alltså $5\text{-}15\mu\text{m}$. Nedan beskrivs olika typer av sensorer som övervägdes.

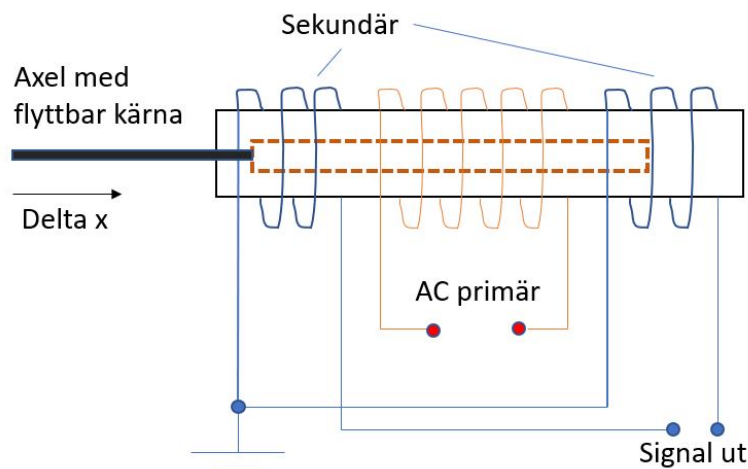
7.1 Hallsensorer

Hallsensorer mäter en spänningspotential som uppstår över en strömförande platta då den utsätts för ett magnetfält vinkelrätt genom plattan. Detta beror på att elektronbanorna böjs i magnetfältet. Denna så kallade Hall effekten är döpt efter Edwin Hall som upptäckte den 1879. Sambanden åskådliggörs genom att återigen betrakta Lorentz kraften enligt ekvation 7. Spänningspotentialen V_H som uppstår över hallelementet är proportionerligt mot strömmen I och magnetfältstyrkan B enligt ekvation 27. I flera av aktuatorkoncepten finnes ett område där magnetfältet varierar linjärt med position. Här skulle en eller flera hallsensorer kunna placeras. Både magnetfältstyrkan och hallsensorspänningen är temperaturberoende [9]. Hallsensorer kan även drifta över tid.

$$V_H = \frac{IB_{\perp}}{\rho_n qt} \quad (27)$$

7.2 Linear Variable Differential Transformer

Linear variable differential transformer, LVDT, använder sig av en primärspole och två sekundärspolar lindade runt en rörlig kärna enligt figur 30. Primärspolen magnetiserar kärnan som i sin tur inducerar en spänning i sekundärspolorna vilket varierar beroende på kärnans position. Ett korrekt designat LVDT system uppfyller de krav på precision och temperatur som applikationen kräver [10].



Figur 30: Linear variable differential transformer

Nackdelen med LVDT är att det kräver spolar lindade runt en kärna vilket endast tillåter kärnan att röra sig i en ledd. Applikationen kräver mätning av rörelser i x-led samtidigt som rörelser tillåts i y-led. Detta skulle kunna tillgodoses på två olika sätt. Genom att låta två olika LVDT

mäta x och y frikopplat. Alternativt genom att tillverka en LVDT där spolens dimensioner är tillräckligt stora eller är lindat ovalt runt kärnans y -leds ändläge och på det viset tillåter rörelser i två riktningar. En vanlig LVDT med cirkulära spolar är relativt okänslig för små radiella förflyttningar jämfört med dess tänkta positionsmätning i x -led.

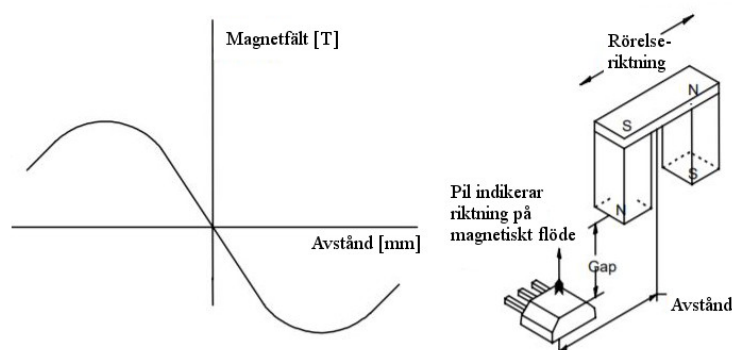
De sistnämnda alternativen kräver en utveckling av nya LVDT sensorer med hög precision som ej är möjlig inom examensarbetets begränsningar. Det första alternativet kräver inköp av micro miniatyr LVDT samt en upphängning som mekanisk frikopplar mätningen i varje led.

7.3 Giant Magnetoresistance

Giant magnetoresistance, GMR, är en variabel resistans som består av lager av mjukmagnetiska material. Resistansen på detta material kan ändras genom att utsätta det för ett externt magnetiskt fält [11]. Det externa magnetfältet kan då mätas genom att mäta den variabla resistansen. Som nämnt tidigare i 7.1 finns det ett område i flera koncept där magnetfält varierar linjärt med position. Här skulle en GMR sensor kunna placeras för att mäta position. GMR resistorn är ofta placerad i en wheatstone configuration med andra resistorer för att förstärka utsignalen och eliminera temperaturinverkan på resistormätningarna. En wheatstone konfiguration kan dock inte kompensera bort mätfelet som uppstår på grund av magnetfältsförändringen som sker till följd av temperaturförändringar. GMR valdes att inte användas på grund sensororientation och den relativt stora förpackning på de kommersiellt tillgängliga GMR sensorerna vilket inte passar utrymmet inuti spolen.

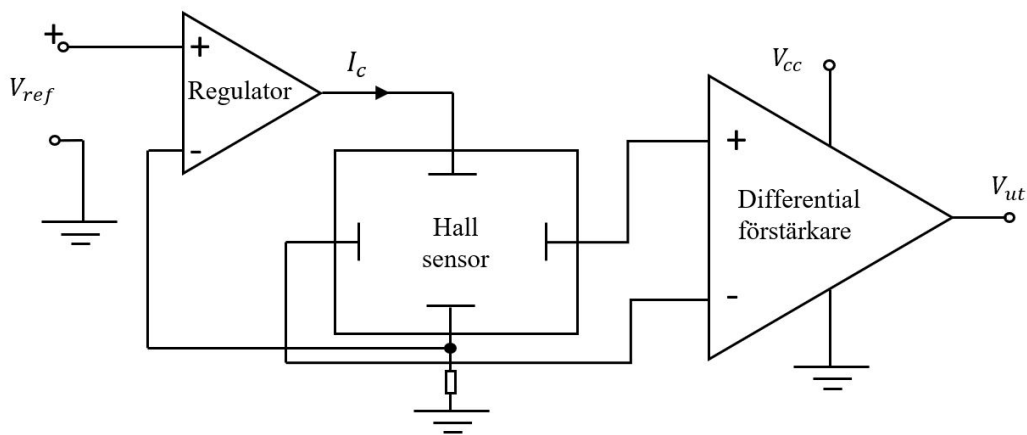
8 Hallsensor implementation

Med tanke på det begränsade utrymmet, tillgängligheten och en väl dokumenterad funktion, väljs hallsensor som metod för positionsmätning. Den bästa utformningen på hallsensor-magnetsystemet för att implementera linjär positionsmätning med hög precision är så kallad bipolar slide by konfiguration [15]. Denna konfiguration innebär att hallsensorn rör sig förbi två magnetiska poler monterade med ett visst avstånd enligt figur 31.



Figur 31: Hall konfiguration för mätning med hög precision.

Hallsensorsignalen måste förstärkas och den vanligaste kopplingen visas i figur 32. En op-förstärkare matar hallsensorn med konstant ström och potentialskillnaden på hallsensorns utgångar förstärks med en differentialförstärkare. Differentialförstärkaren på bilden är ensidigt matad vilket kräver en referensspänning som utgången varierar kring.



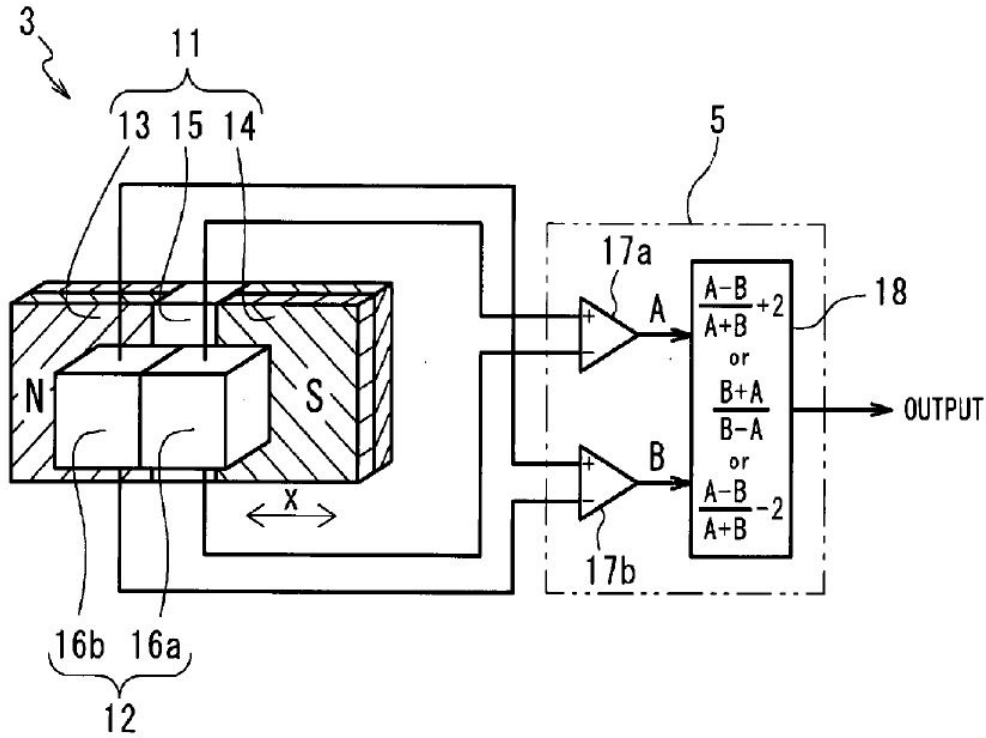
Figur 32: Standard Hallkoppling med differentialförstärkare.

En utmaning med att använda hallsensorer är deras temperaturberoende och åldringsdrift, samt att finna ett område där magnetfältet varierar linjärt över hela bildsensorns förflyttning. Det går att kompensera för åldringsdriften genom att då och då ta sig till ett förutbestämt nollställe och kalibrera om hallsensorn. Temperaturberoendet kan kompenseras för på två sätt.

1. Mäta temperaturen nära hallelementen.
2. Använda sig av flera hallsensorer och mäta förhållandet i spänning mellan dessa.

Eftersom både magnetfältstyrkan och hallsensorelementet är temperaturberoende kan det vara svårt att mäta temperaturens exakta inverkan på alla delar.

En lösning är att använda flera hallsensorer som utsätts för samma temperaturberoende och använda förhållandet mellan sensorerna för att kompensera bort temperaturberoendet. En sådan lösning kan även användas för att utöka det linjära området. Konfigurationen blir då liknande figur 31 med skillnaden att två sensorer placeras bredvid varandra med ett visst avstånd. Ett exempel på idén visas i ett japanskt patent och figur 33 illustrerar tankesättet [16]. Två hallelement monteras bredvid varandra och utsignalen förstärks av separata differentialförstärkare. Därefter skickas signalerna till analog/digital konvertering.



Figur 33: Illustration från patentansökan visar två hallelement samt hur deras signal kan kombineras [16].

Signalerna kan kombineras på olika sätt för att minimera temperaturberoendet. Utspänningen för varje sensor a och b beräknas enligt ekvation 28 och 29.

$$U_{ha} = B_a(1 + \alpha_{Br} \cdot \Delta T) \cdot K_a(1 + \beta_a \cdot \Delta T) + O_a(1 + \gamma_a \cdot \Delta T) \quad (28)$$

$$U_{hb} = B_b(1 + \alpha_{Br} \cdot \Delta T) \cdot K_b(1 + \beta_b \cdot \Delta T) + O_b(1 + \gamma_b \cdot \Delta T) \quad (29)$$

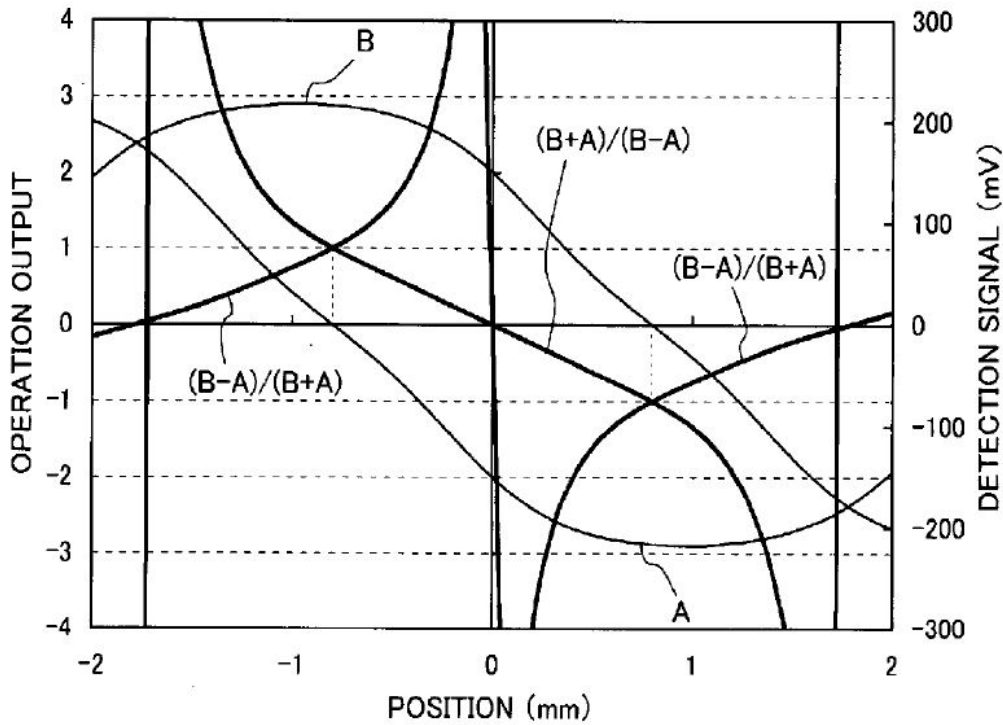
Första delen av ekvationen $B(1 + \alpha_{Br} \cdot \Delta T)$ anger magnetfältet B och dess temperaturkoefficient α_{Br} . Koefficient α_{Br} är materialberoende. För magnetmaterial NdFeB N52M är $\alpha_{Br} = -0.12\%$ per °C [17]. Känsligheten K [Volt/Tesla] för varje sensor beror på strömmatning samt tillverkningsvariationer. β anger temperaturkoefficienten för känsligheten K . Slutligen har varje sensor en liten offset O i storleksordningen 1-2mV vid magnetfältstyrkan 0mT. Offset uppvisar också en temperaturvariation med koefficienten γ . Offset beteendet är relativt konstant och kan lätt hanteras med kalibrering. När offseten stryks kan det ses att temperaturberoendet kan minimeras genom att dividera de båda sensorernas värden enligt ekvation 30.

$$\frac{U_{hB} + U_{hA}}{U_{hB} - U_{hA}} = \frac{B_b(1 + \alpha_{Br} \cdot \Delta T) \cdot K_b(1 + \beta_b \cdot \Delta T) + B_a(1 + \alpha_{Br} \cdot \Delta T) \cdot K_a(1 + \beta_a \cdot \Delta T)}{B_b(1 + \alpha_{Br} \cdot \Delta T) \cdot K_b(1 + \beta_b \cdot \Delta T) - B_a(1 + \alpha_{Br} \cdot \Delta T) \cdot K_a(1 + \beta_a \cdot \Delta T)} \quad (30)$$

Med förkortning och antagandet att känsligheten kan kalibreras för varje sensorpar i ekvation 31, så kan genom division kurvor skapas som är relativt okänslig för temperaturvariationer. Eftersom hallsensorerna sitter nära varandra upplever de samma ΔT vilket innebär att temperaturberoendet försvinner från ekvationen.

$$\frac{U_{hB} + U_{hA}}{U_{hB} - U_{hA}} = \frac{B_b \cdot K_b + B_a \cdot K_a}{B_b \cdot K_b - B_a \cdot K_a} \quad [K_a == K_b] \Rightarrow \frac{B_b + B_a}{B_b - B_a} \quad (31)$$

Exempel på dessa positionskurvor visas i figur 34. Det visar sig att dessa kurvor går att få mer eller mindre linjära över hela sensorområdet beroende på magnetstrukturen och hur sensorerna är placerade.

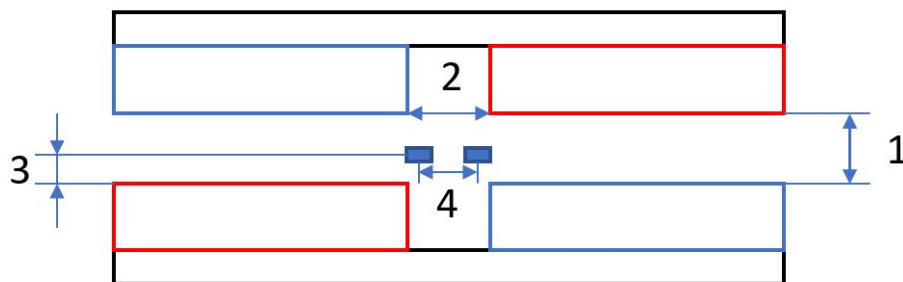


Figur 34: Illustration av de kombinerade signalerna [16].

De geometriska parametrarna som ger störst påverkan på hallsensorkurvornas linjäritet är följande, vilket illustreras i figur 35.

1. Höjden på luftgapet som spolen rör sig i Md_h
2. Bredden på avståndet mellan magneterna Md_w
3. Höjdpacering av Hallelement Hd_h
4. Avståndet mellan hallsensorerna Hd_w

Av dessa är det endast de två förstnämnda som påverkar designen av magnetstrukturen.



Figur 35: De dimensioner som påverkar hallkurvorna

Variation i luftgapets höjd (1) i figur 35 påverkar flödestätheten i luftgapet. För att ej förlora kraft justeras spolens höjd som kompensation. På detta sätt minskas påverkan av den maximala kraften på grund av förluster i flödestäthet. Dock ökar fringing effekten med större luftgap. Detta innebär att kraften minskar vid spolens yttre arbetsområden. Avståndet mellan magneterna (2) har en yttre gräns vid ca 3mm. Ett större avstånd innebär att spolens tvärsnitt måste minskas vilket påverkar den tillgängliga kraften.

9 Aktuatoroptimering för positionsmätning

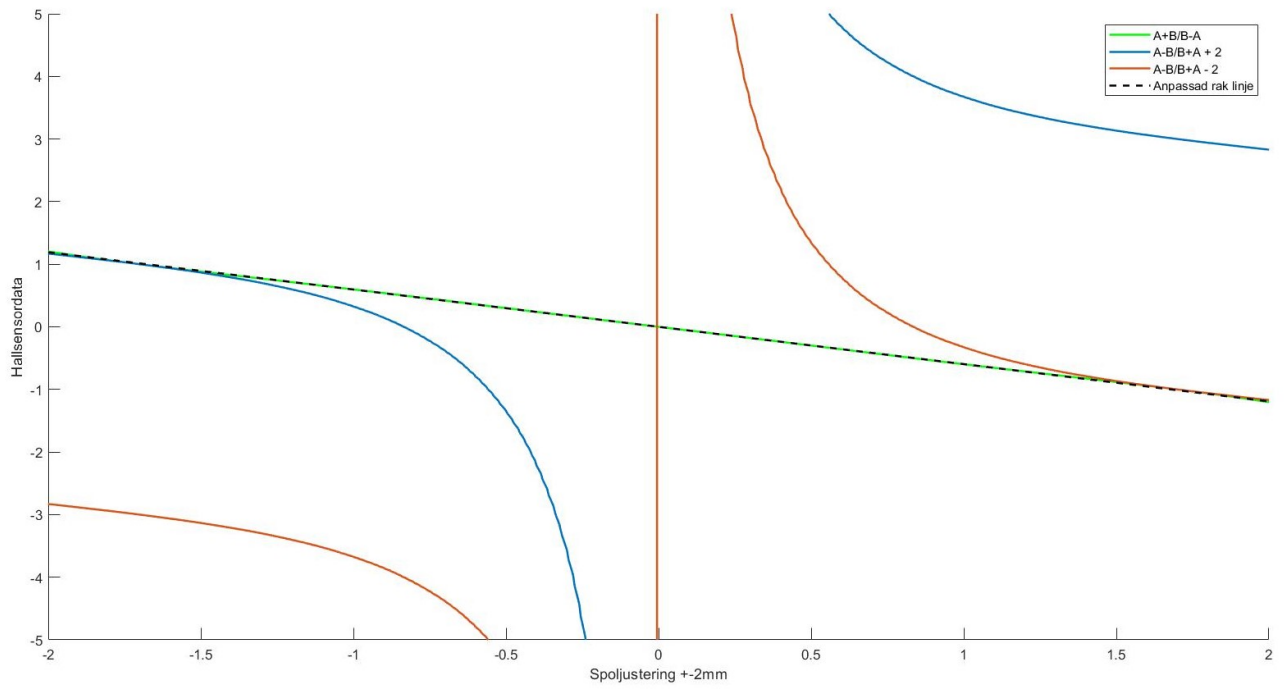
Efter den preliminära utvärderingen görs nu en ny optimering av kvarvarande koncept för att förbättra hallsensorernas möjlighet att mäta position. De fyra dimensionerna som påverkar hallsensorkurvorna varieras för de tre kvarvarande koncepten. Hallsensorkurvorna tas fram genom simuleringar av B-fältets styrka över en vald hallsensorplacering. Förskjutning av fältlinjerna ger en plottad kurva för varje hallsensor. Resultatet exporteras till Matlab där utvärdering kan göras. I figur 36, 37 och 38 visas de bästa framtagna hallsensorkurvorna för koncepten 3a, 3b och 3c. Den streckade svarta linjen är en linjärisering av det mittersta området på den gröna kurvan. Målet är att den svarta linjen skall följa antingen endast den gröna kurvan, alternativt följa den gröna kurvan till de blåa och röda kurvorna tar vid.

Om den svarta streckade linjen kan följas bra med hjälp av hallsensorkurvorna kan förhållandet mellan hallsensordatan och positionen beräknas linjärt. Vid dålig följning kan extra beräkningar och korrigeringar behöva göras på hallsensordatan för att försöka översätta den till en position. Vid riktigt dålig följning skulle förprogrammerade tabeller kunna användas som översättning från hallsensordata till position.

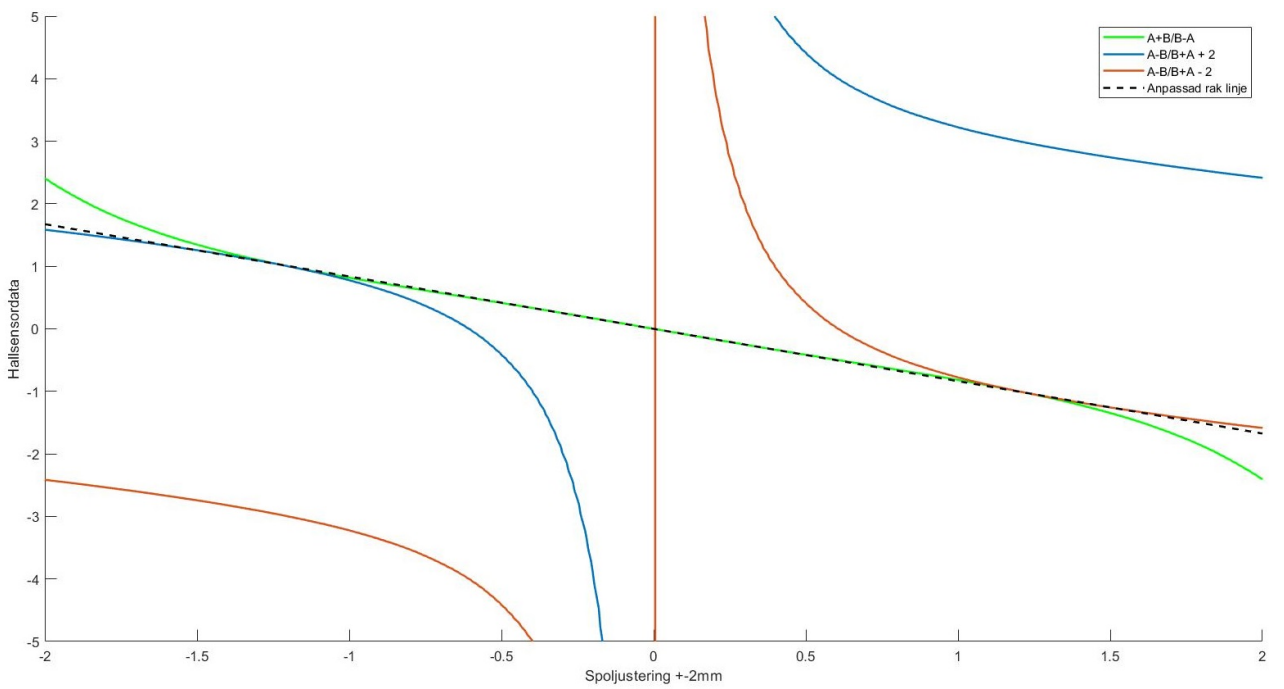
$$\text{Grön} : \frac{B_b + B_a}{B_b - B_a} \quad (32)$$

$$\text{Blå} : \frac{B_a - B_b}{B_a + B_b} + 2 \quad (33)$$

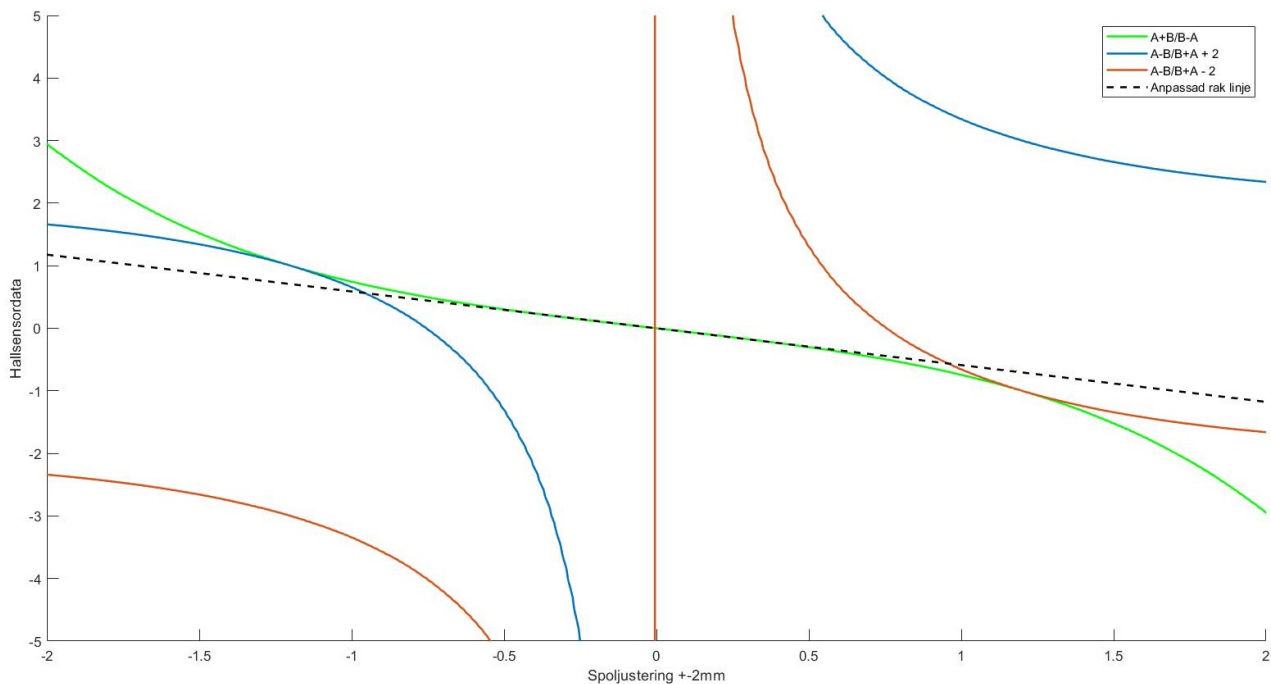
$$\text{Röd} : \frac{B_a - B_b}{B_a + B_b} - 2 \quad (34)$$



Figur 36: Koncept 3a. $Md_h=2.5\text{mm}$ $Md_w=2.6\text{mm}$ $Hd_h=1.25\text{mm}$ $Hd_w=3.4\text{mm}$



Figur 37: Koncept 3b. $Md_h=2.3\text{mm}$ $Md_w=3.0\text{mm}$ $Hd_h=1.15\text{mm}$ $Hd_w=2.4\text{mm}$



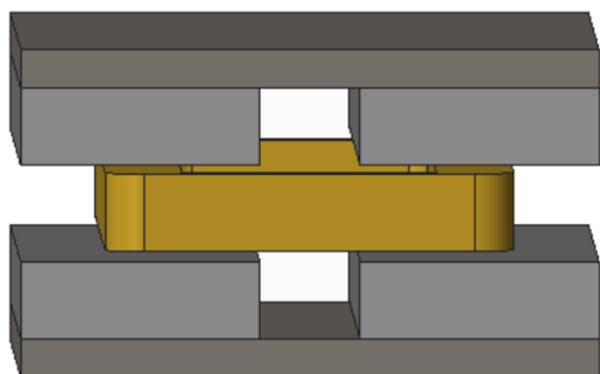
Figur 38: Koncept 3c. $Md_h=3.5\text{mm}$ $Md_w=0.0\text{mm}$ $Hd_h=1.75\text{mm}$ $Hd_w=2.4\text{mm}$

Utifrån dessa kurvor görs en ny utvärdering. Koncept 3c uteskuts då det inte går att få hallsensorkurvor som följer en linjär bana. Detta kan ses i figur 38 som är en av de bättre optimeringarna för hallmätning. För både koncept 3a och 3b går det att skapa hallsensorkurvor som kan uppskattas med en linjär linje.

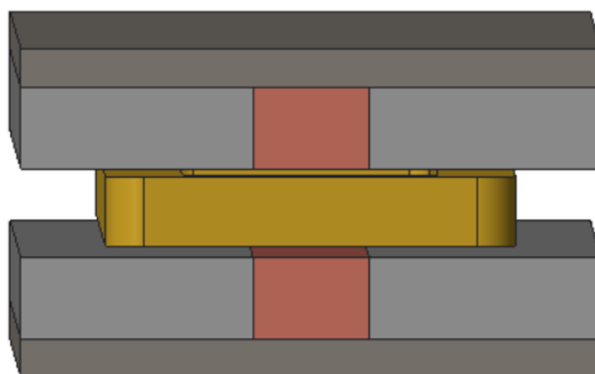
10 Slutgiltiga aktuatorkoncept

Både koncept 3a och 3b presenteras som slutgiltiga koncept. Tillägget av extra magnet i halbachstruktur i koncept 3b tillför mer kraft och bidrar till mindre maxläckage. Men den extra magneten gör även att konceptet innehåller två olika sorters magneter vilket kan resultera i en ökad tillverkningskostnad. Magneter i halbachstruktur ska även vara svårare att montera ihop vilket återigen kan innebära högre kostnader. Dimensioner och data från de två aktuatorkoncepten kan ses i figur 39 och tabell 12.

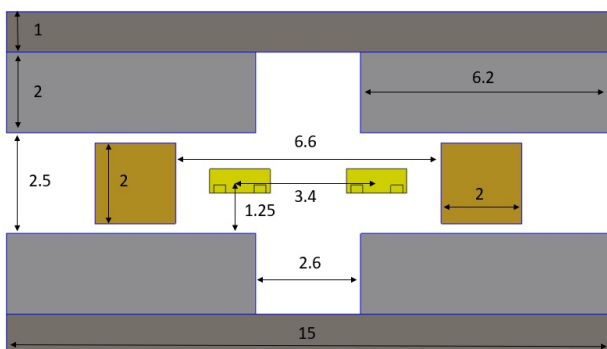
Det slutgiltiga valet mellan de två koncepten får göras med hänsyn till tillverkningskostnader och monterbarhet av slutprodukt.



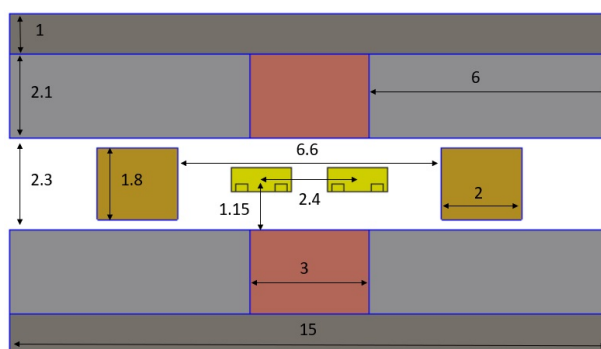
(a) 3a



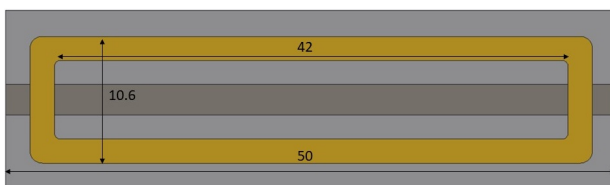
(b) 3b



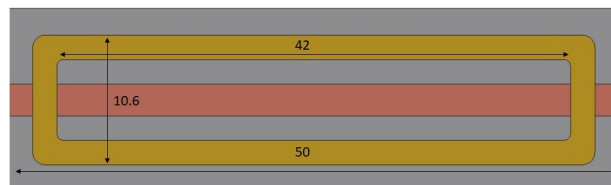
(c) 3a slutgiltiga tvärsnitt dimensioner



(d) 3b slutgiltiga tvärsnitt dimensioner



(e) 3a slutgiltiga dimensioner ovanifrån



(f) 3b slutgiltiga dimensioner ovanifrån

Figur 39: Slutgiltiga aktuatorkoncept 3a och 3b

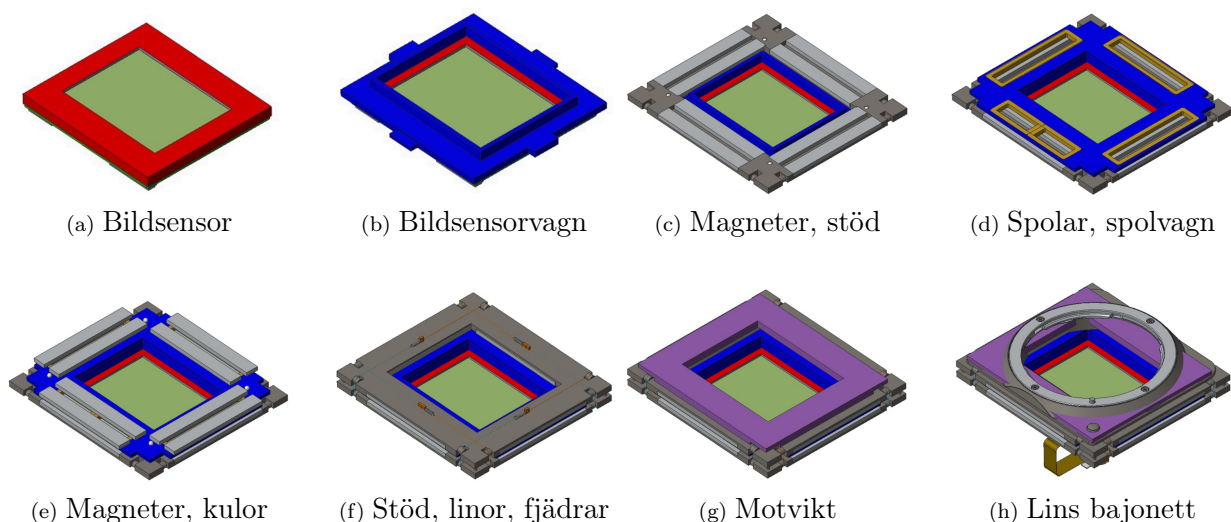
K	Vikt (g)	M_{dh}	M_{dw}	H_{dh}	H_{dw}	$F@2A/mm^2$	$P@0.17N$	Max läckage@5mm
3a	33.8 (x4)	2.5mm	2.6mm	1.25mm	3.4mm	0.217N	8.8mW	0.075T
3b	41.5 (x4)	2.3mm	3mm	1.15mm	2.4mm	0.256N	6.1mW	0.058T

Tabell 12: Sammanställningstabell slutgiltiga koncept

11 Mekanisk design

Kraften producerad av de designade aktuatorerna ska översättas till en rörelse av bildsensor och motvikt. Det görs via ett mekaniskt system som använder sig av fjädrar, linor, kullager och kulor. I figur 40 ses en överblick av de ingående komponenter och deras placering i förhållande till varandra i den mekaniska uppbyggnaden.

Det slutgiltiga systemet är inte fullt utvecklat. I kapitlet presenteras grundläggande ideér och tankar bakom de olika komponenterna och materialval.



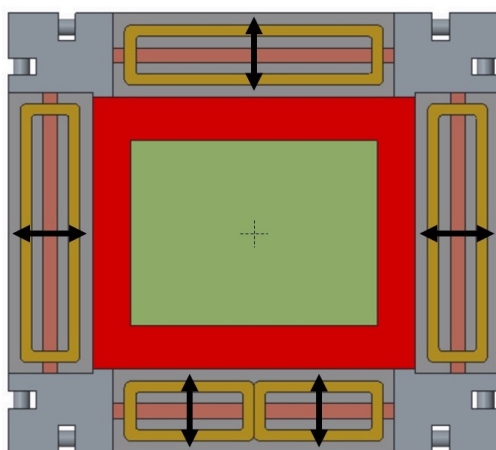
Figur 40: Uppbyggnad av av bildsensorstabiliseringssystemet

11.1 Bildsensorvagn

Bildsensorvagnen håller bildsensorn på plats och tillåter kopplingar att göras till bildsensorn. Linor till motvikten fästs här. Bildsensorvagnen monteras ihop med spolvagnen, vilket definierar bildsensorns position i x-, y- och z-led.

11.2 Spolar & spolvagn

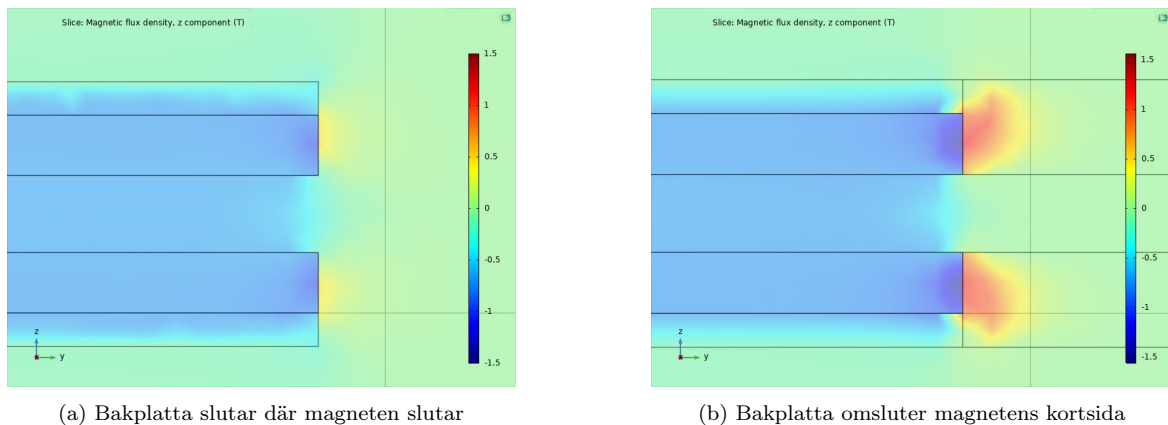
Aktuatorspolarna är placerade i en icke magnetisk spolvagn, syns i blått i figur 40d, som är i sin tur direkt kopplad till bildsensorn, ses i blått i figur 40b. Genom denna koppling översätts aktuatorspolarnas rörelse till rörelse av bildsensorn. Spolvagnen är infäst mellan de två bakplattorna med kuler på vardera sida. Detta definierar spolvagnens position i z-led och kan tillåta en nästintill friktionsfri rörelse av spolvagnen i planet. Den understa aktuatoren är uppdelad i två spolar som styrs individuellt, se figur 41. Detta tillåter moment att skapas kring bildsensorns mittpunkt och kontroll av bildsensorns rotationsvinkel.



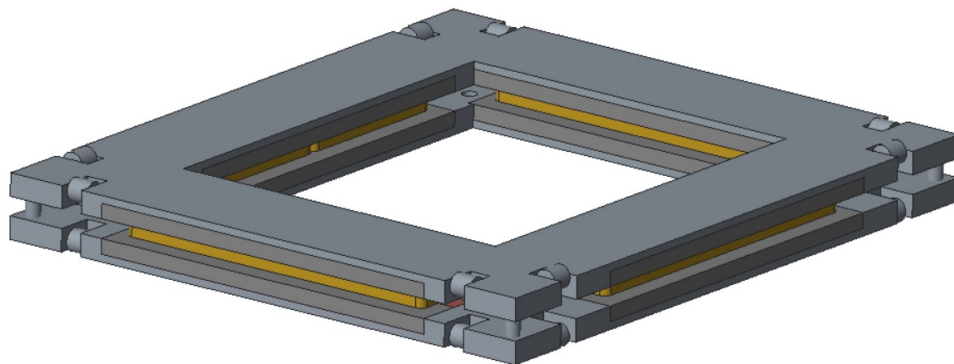
Figur 41: Aktuatorplacering i förhållande till bildsensor sett framifrån. Pilar indikerar varje aktuatorns kraftgenereringsriktning.

11.3 Fixerade plattor

Bakplattornas främsta uppgift är att leda runt det magnetiska flödet och minska reluktansen i kretsen. Men bakplattorna kan användas dubbelt om de även kan agera strukturellt stöd åt aktuatorn. Flera simuleringar gjordes för att se hur en förlängd bakplatta påverkar magnetfältet i aktuatorn. Resultaten av detta är att en förlängd bakplatta minskar den magnetiska flödestätheten i spolgapet, men bara nära kanten av magneterna, se figur 42. Denna magnetiska flödestäthetsminskningen avtar snabbt när vi rör oss in under magneterna. 1-2mm in under magneterna så är effekten av den förlängda bakplattan helt borta. Detta innebär att en magnetisk bakplatta kan användas som strukturellt stöd utan större påverkan på aktuatorprestandan. Ett exempel på detta visas i figur 43 där det ljusgråa strukturella stödet även agerar bakplatta åt aktuatorerna. Magnetstrukturen kan limmas direkt till bakplattorna vars avstånd från varandra då också definierar avståndet mellan magneterna.



Figur 42: Vertikalriktad flödestäthet B_z med två olika längder på bakplattor av kolstål



Figur 43: Strukturellt stöd som används dubbelt som bakplatta till aktuatorerna

11.4 Motvikt

En motvikt till bildsensorn kan användas för att undvika att gravitationskraften påverkar systemet. Upphängningen och mekaniken bakom motvikten förklaras vidare i kapitel 11.5. Som

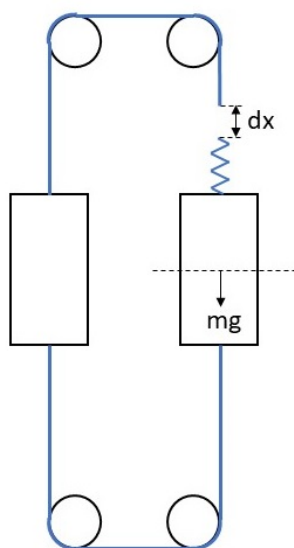
tidigare nämnt i 2.2 minskar införandet av en motvikt kraften som aktuatorerna måste producera. Uppskattning av vikten för de rörliga komponenterna ses i tabell 13. Dessa massorna är preliminära och kommer ändras med ändrad design och materialval av respektive komponent. Totalt väger dessa komponenter 67.75g vilket vi avrundar upp till 70g. Motvikten ska då väga cirka 70g för att fullt kunna kompensera för de andra rörliga komponenterna. Motvikten, som ses i lila i figur 40g, placeras framför den främre fixerade plattan. Kulor används återigen för att tillåta rörelse i planet medans det definierar motviktens position i z-led. Ytterligare kulor måste införas på bortsidan av motvikten för att förhindra att motvikten faller bort.

Komponent	Vikt (g)
Bildsensor	35
Spolar	7
Sensorglas	5.25
Sensorvagn	8.5
Spolvagn	12
Motvikt	70
Totalt, inklusive motvikt	137.75

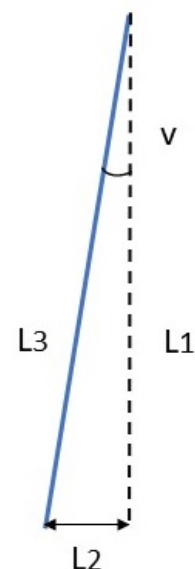
Tabell 13: Uppskattad vikt på komponenter som ska förflyttas

11.5 Linor och fjädring

Den rörliga bildsensorn och motvikten är sammankopplade med linor. Linorna är fästa på bildsensorns baksida och leds sen längs med bildsensorn upp över två fast infästa rullar och ner till infästningar i motvikten. När bildsensorn rör sig i ett led kommer det krävas att de linor som är ansvariga för förflyttelse i det andra ledet förlängs. Detta kan lösas genom att låta en dragfjäder, monterad i infästningen mellan linan och motvikten, sköta förlängningen. Denna fjädern ska vara förspänd för att undvika att linan blir slak.



(a) Fjäderplacering och förspänningsdistans



(b) Fjäderförlängnings geometri

Figur 44: Fjädringsberäkningsbilder

Med introduktionen av dragfjädrar uppstår resulterande fjäderkrafter och resonansfrekvenser som måste beräknas och tas hänsyn till.

Fjädern förspänns med en kraft större än maximala kraften massan påverkar fjädern med på grund av gravitation och acceleration enligt ekvation 35. k_m är en säkerhetsmarginalsfaktor.

$$F_{f\ddot{a}dersp\ddot{a}nning} = \frac{m}{2}(g + a) \cdot k_m \quad (35)$$

När bildsensorn förflyttas bort från mittenläget måste fjädrarna förlängas för att kompensera för den längre linsträckan. Varje fjäder kompenserar för fyra linförflyttningar enligt figur 44a. Den resulterande förlängningen varje fjäder måste hantera ses i ekvation 38.

$$v = \arctan(L_2/L_1) \quad (36)$$

$$L_3 = \frac{L_1}{\cos(v)} \quad (37)$$

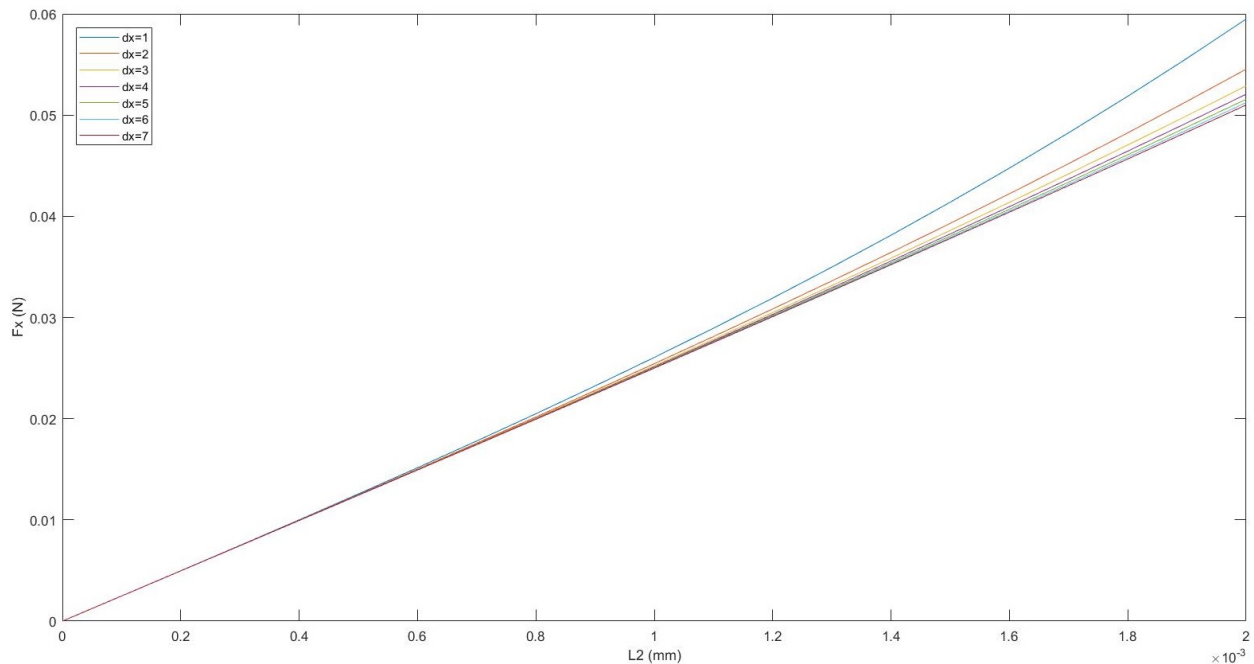
$$\Delta L = 4 \cdot (L_3 - L_1) \quad (38)$$

Den totala kraften på varje fjäder beror på fjäderkonstanten som väljs så att rätt förspänningskraft uppnås för vald förspänningsförlängning dx .

$$F_{total} = F_{f\ddot{a}dersp\ddot{a}nning} + \frac{F_{f\ddot{a}dersp\ddot{a}nning}}{dx} \Delta L \quad (39)$$

Den resulterande tvärkraften i x-led beräknas i ekvation 40.

$$F_x = F_{total} \cdot \sin(v) \quad (40)$$



Figur 45: F_x i förhållande till förflyttning L_2 med olika förspänningslängder dx .
 $m = 70g$, $L_1 = 34mm$, $k_m = 1.2$

Från figur 45 kan vi se att längre förspänningslängd ger mindre F_x kraft. Detta då en längre förspänningslängd innebär att fjäderkonstanten k kan hållas låg och ändå uppnå samma förspänningskraft. En förspänningslängd över 4mm rekommenderas för att minimera fjäderkraften F_x .

Sedan tidigare behövde aktuatorerna kunna producera uppskattningsvis 0.28N för att kunna accelerera bildsensorn och motvikten. Nu med införandet av fjädrar måste aktuatorerna kunna producera ytterligare 0.06N till. Den totala kraften aktuatorerna måste kunna producera är nu 0.34N. Även om fjäderkraften F_x kommer vara något som måste övervinnas när bildsensor ska flyttas ut mot ett ytterläge så kommer det inte påverka energieffektiviteten på systemet eftersom fjäderkraften F_x är en hjälpande kraft när bildsensorn ska ta sig tillbaka till mitten.

11.6 Materialval

11.6.1 Magneter

Neodymmagneten N52M valdes på grund av sin höga magnetiska styrka på 1450mT och rekommenderad användningstemperatur upp till 100°C. Magnetfältsstyrkan på en N52M minskar med 0.12% per °C [17]. Över 100°C är denna magnetfältsstyrkeminskingen inte längre reversibel. Som tidigare diskuterat i 4.3 är extremtemperaturerna kameran ska klara mellan -50°C och 70°C, vilket N52M klarar. Två billigare liknande alternativ som även kan klara av temperaturbegränsningarna är N50 och N48 som ses tillsammans med N52M i tabell 14 nedan. Kraften som aktuatorerna kan producera är direkt proportionerlig mot magnetfältstyrkan hos magneterna.

Magnettyp	Temperatukoefficient	Max temperatur	Magnetfältstyrka
N48	-0.12% per °C	80°C	1400mT
N50	-0.12% per °C	80°C	1425mT
N52M	-0.12% per °C	100°C	1450mT

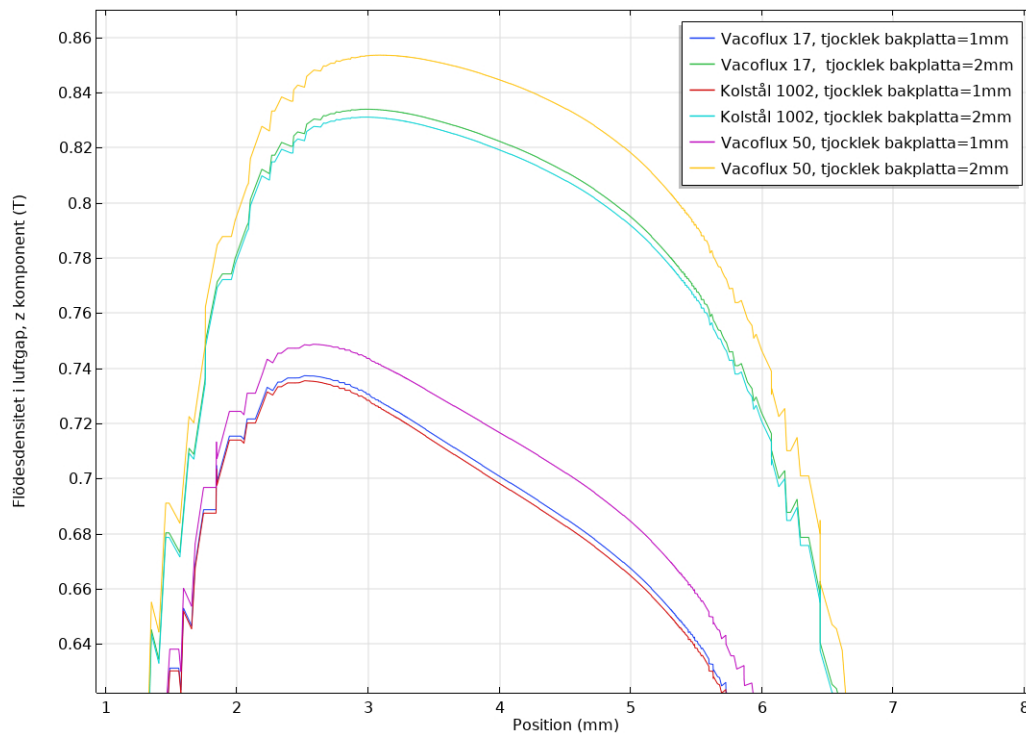
Tabell 14: Magnetdata [17]

11.6.2 Mjukmagnetiskt material

Mjukmagnetiska materialet valdes till kolstål. Vacoflux 17 diskuterades också då det har lägre reluktans och en högre mätnadsnivå. Simuleringar visade att det inte blev några ökning av flödestätheten i luftgapet den magnetiska kretsen med vacoflux 17 jämfört med kolstål för bakplattor med tjockleken 1mm och 2mm, vilket kan ses i figur 46 där flödestäthet för koncept 3b visas. Vacoflux 50 ger en cirka 2% ökning av flödestätheten. Att skillanden är så liten beror på att den övervägande delen av den magnetiska kretsen reluktans kommer från det relativt stora luftgapet och från reluktansen i magneterna. Att förbättra reluktansen i mjukmagnetiska materialet resulterar då inte i en märkbar skillnad i det stora hela. Den högre mätnadsgraden för vacoflux ger inte heller någon stor ökning av magnetfältsstyrkan då både vacoflux och kolstål ändå är mättade. Med detta i åtanke är det då bättre att välja det väsentligt billigare kolstålet.

Den stor ökningen av flödestätheten kommer från ökning av bakplattans tjocklek. Så som kretsen är dimensionerad ger en ökning av bakplattan från 1mm till 2mm en lägre mätnadsgrad av bakplattan, och en flödestäthetsökning i luftgapet på cirka 13%. Den minskade mätnadsgraden minskar också läckageflödet. Men en ökning av spolens höjd eller magneternas höjd ger ett ännu större utslag på kraften aktuatorerna kan generera än en ökning av bakplattans tjocklek.

Bakplattans tjocklek ska ökas ifall läckageflödet vill minskas eller större mekanisk stabilitet krävs i konstruktionen.



Figur 46: Simulering magnetfältstyrka beroende på tjocklek av bakplattan.

11.6.3 Spole

Spolen är tänkt att vara tillverkad med koppartråd med diameter kring 0.1-0.2mm. Större tråd ger färre varv och mindre resistans. Kraften per watt är teoretiskt identisk oberoende av trådtjocklek så länge fyllnadsgraden är detsamma. Runt koppartråden finns isolering som påverkar fyllnadsgraden. Med minskad trådtjocklek minskar andelen av trådtvärsnittet som består av koppar och andelen av trådtvärsnittet som består av isoleringsmaterial ökar. Data tagen från Dahren [18] visar att tråd med 0.1mm koppardiameter har en max ytterdiameter på 0.117mm, medans en tråd med 0.2mm koppardiameter har en max ytterdiameter på 0.226mm. Detta ger en kopparfyllnadsgrad för 0.1mm tråden på 73.1% och en kopparfyllnadsgrad för 0.2mm tråd på 78.3%. Geometrisk fyllnadsgradsberäkningar gjorda med orthocyklisk lindning ger en total kopparfyllnadsgrad på 63.05% för 0.1mm tråd respektive 62.83% för 0.2mm tråd. Anledningen till att 0.1mm tråden har högre fyllnadsgrad är att hänsyn har tagits till antal varv som får plats i det begränsade utrymmet. Med olika trådtjocklek kommer ett sista lindningsvarv precis få plats eller precis inte få plats i varje lager. Beroende på hur bra spolutrymmet är anpassat till den specifika trådtjockleken som valts kommer den slutgiltiga andelen koppar som får plats i det tänkta utrymmet variera. Slutsatsen är att isoleringen tar upp mindre andel av platsen när koppartråden görs större vilket ökar fyllnadsgraden, men fyllnadsgraden kan drastiskt sänkas om ökning av trådtjockleken skapar ett tomrum i varje lager där en tråd precis inte får plats. Antagandet görs att spoltråd med cirkulärt tvärsnitt används då författarna ej funnit rektangulär tråd med liknande tvärsnittsarea som för 0.1-0.2mm diameter cirkulär tråd. Förslagsvis används så kallad baktråd vilket innebär att trådens yttre isolering binder med närliggande trådsegment efter bakning i höjd temperatur alternativt efter doppning i lösningsmedel [19]. På så sätt kan bobbiner undvikas och plats sparas då spolen blir en stel

enhet.

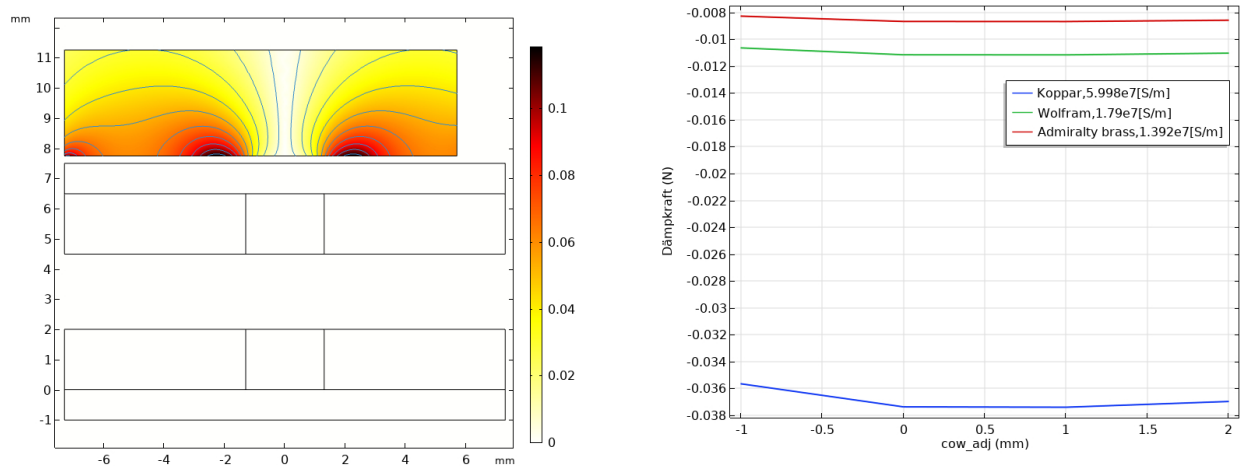
Trådtjockleken kommer ha stor påverkan på induktansen i spolen. En ökad trådtjocklek minskar antal varv i spolen och således spolens induktans. Spolinduktansen diskuteras vidare i kapitel 12.1.

11.6.4 Spolhållare & sensorhållare

Sensorhållare behöver vara tillverkat i ett så lätt material som möjligt för att sänka vikten på systemet. Materialet får inte heller vara magnetiskt ledande då det skulle påverka aktuatorns möjlighet att producera kraft. Aluminium eller någon form av plast är tänkta kandidater. Plast är att föredra då aluminium kan bilda dämpströmmar. Samma gäller spolhållare vars uppgift är att hålla spolarna på rätt avstånd från magneterna samt att överföra kraften genererad i spolarna till bildsensorn.

11.6.5 Motvikt

Motvikten finns till för att balansera de andra rörliga delarna och ska väga cirka 70g enligt 11.4. För att minska platsen motvikten tar så ska de vara tillverkad av något med hög densitet. Motvikten ska heller helst inte vara i ett mjukmagnetiskt material för att undvika att motviktens rörelse påverkas av magnetfälten från den närliggande aktuatorerna. Simuleringar på ett sådant scenario har inte gjorts. Tänkbara material med hög densitet är mässing, koppar, vismut, molybden, wolfram eller lågmagnetiskt stål. Det är dock viktigt att använda material med låg elektrisk konduktivitet då det magnetiska läckagefältet enligt koncept 3 skapar virvelströmmar beroende på motviktens hastighet enligt figur 47a och 47b. Mässing med hög andel zinc har låg konduktivitet och ger en motriktad kraft på 0.008N per aktuator vid maximal hastighet. En inte helt försumbar kraft men enligt författarna acceptabel. Ökas avståndet till motvikt alternativt minskas läckaget genom tjockare bakplatta så försvinner denna kraft helt. Med nuvarande geometri på CAD modellen så har motvikten en volym på 9.5cm^3 vilket ger en vikt på 73g för ett motviktsmaterial med densitet 7.85g/cm^3 . Här måste en avvägning göra mellan pris på materialet och platsen motvikten kommer ta i kamerahuset.



(a) Virvelström A/mm^2 enligt färgskala för Admiralty Brass

(b) Kraft på motvikt per aktuator för olika material. I x-led varierar motviktens placering

Figur 47: Dämpning visas vid maximal hastighet 32.9mm/s

11.6.6 Övriga komponenter

Linan som ska användas för att ansluta motvikt till bildsensor är tänkt att vara en flätlina. Lintypen används ofta som fiskelina och är tunn och har hög brottstyrka.

Kulorna som ska separera de rörliga delarna i systemet från de fasta kan antingen vara keramiska kulor eller metallkulor. Valet beror mycket på monteringslätthet. Metallkulor kommer att attraheras till bakplattorna när magneterna väl är limmade på bakplattorna. Detta kan göra att kulorna lättare hålls på plats under monteringsfasen, men kan vara svårare att ta ut om det skulle behövas. Keramiska kulor kommer inte påverkas av någon attraktionskraft till bakplattorna och det är då större risk att de trillar ut under montering.

Ingen tid har lagts på undersökning av de kullager som ska minska friktionen mellan linor och fixerade plattor.

12 Reglering och styrning

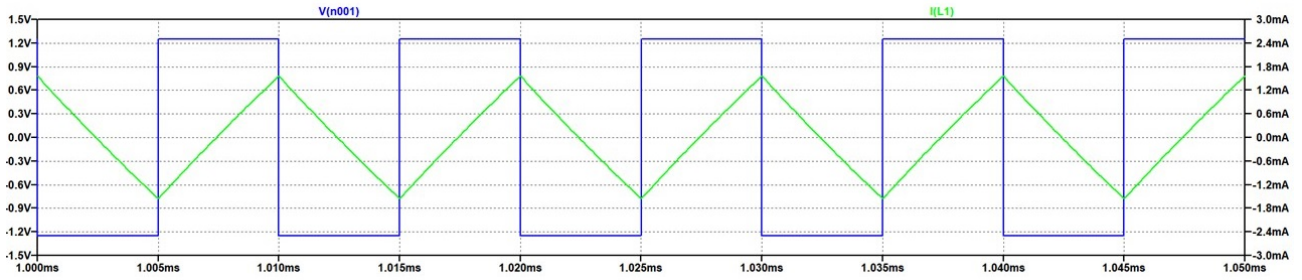
Mätningen av position utförs med 6 hallsensorer. För att behandla informationen kopplas signalerna via differentialförstärkare och filter till en microprocessor vilken måste ha 6 ADC ingångar, en för varje hallsensor. Det är av stor vikt att ADC omvandlingen kan ske på tillräckligt kort tid så att alla positioner kan mätas utan att bildsensorn hinner röra sig mellan varje mätning. Microprocessorn bör även ha minst 3 PWM utgångar för styrning av aktuatorerna. De två aktuatorerna som sköter sidledsförflyttningarna kan styras med samma signal. Den övre aktuatoren samt en av de mindre undre aktuatorerna kan styras med en andra styrsignal. Den sista lilla aktuatoren styrs med en tredje styrsignal och ser då till att det går att utföra rotationskompensationer. PWM utgångarna styr 3 fullbryggor eftersom strömmen skall kunna gå genom spolarna i båda riktningar.

Enligt en överblick av bildstabiliseringsteknologi från sensortillverkaren InvenSense [2] bör reglerloopen köras med en frekvens mellan 500Hz-4kHz medans PWM signalen bör ha en frekvens mellan 100kHz-1Mhz. Detta ger en indikation på valet av microcontroller. Exempelvis ger micro processorn dsPIC33CH128MP202-I/SS från tillverkaren *Microchip Technology* fullgod prestanda.

12.1 Spolinduktans

Eftersom styrningen av systemet är tänkt att göras med en PWM spänning ger detta upphov till strömrippel knutet till induktansen i kretsen. Inledningsvis skattas spolinduktansen till mellan 2-10mH och resistansen i kretsen till cirka 65 Ω . Detta grundar sig på LCR mätningar av liknande spolar samt geometriska beräkningar på spolen där motståndet kan skattas med hjälp av koppars resistivitet. LTspice simulering gjordes för att undersöka om detta strömrippet skulle vara tillräckligt stort för att ge upphov till bildsensorvibrationer.

Eftersom lägre induktans ger högre rippel gjordes simuleringarna med den lägsta gissade induktansen på 2mH vilket visas i figur 48.



Figur 48: LTspice strömrippel. 100kHz 50% duty cycle

Strömrippet uppskattas som en sinusvåg med en amplitud A och en frekvens f . Förflyttningen av bildsensorn på grund av strömrippet beräknas genom omvandling av ström till kraft, kraft till acceleration och acceleration till position enligt ekvationer 41,42 samt 43.

$$i = A \sin(2\pi ft) \quad (41)$$

$$F = Bil \cdot N_{trn} \quad (42)$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{B \cdot A \sin(2\pi ft) \cdot l \cdot N_{trn}}{m} \quad (43)$$

Från acceleration kan position integreras fram i ekvation 44. Toppen på sinusvågen för bildsensorposition uppstår vid tiden $1/4f_{PWM}$.

$$s = \left[-\frac{BA \sin(2\pi ft) N_{trn} \cdot l}{m(2\pi f)^2} \right]_0^{\frac{1}{4f_{pwm}}} \quad (44)$$

För PWM frekvenser lägre än 10kHz hinner strömmen nå sitt nya värde innan nästa omslagning av PWM spänningen och strömrippet kan då mer korrekt uppskattas som en fyrkantsvåg enligt ekvation 45.

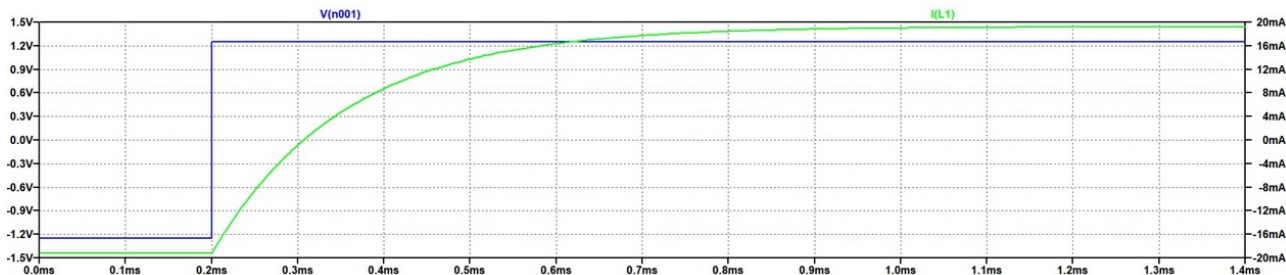
$$s = \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{Bil \cdot N_{trn} \cdot t^2}{2} \quad (45)$$

Frekvens	Strömrippel amplitud	Massa	l	N_{trn}	B	Skakningsamplitud
1kHz	19mA	0.14kg	80mm	250	0.3T	0.025 μ m
10kHz	12mA	0.14kg	80mm	250	0.3T	0.13nm
100kHz	3mA	0.14kg	80mm	250	0.3T	0.326pm

Tabell 15: Skakningsamplitud av bildsensor för olika PWM frekvenser

Positionsuträkning gjorda med data från LTspice simuleringarna syns i tabell 15 och visar att strömrippet inte kommer orsaka vibrationer med tillräckligt stora amplituder för att vara relevanta. Största beräknade vibrationen är 0.025 μ m, vilket är magnituder mindre än bildsensorns pixelstorlek på 5 μ m.

Induktans i kretsen medför även tröghet vid ändring av ström. Tidskonstanten för att beräkna $2/3$ av strömändringen beräknas genom $t = L/R$. I värsta fallet med $10mH$ induktans och 65Ω blir tidskonstanten $0.15ms$. Detta stämmer överens med LTspice simulering, se figur 49.



Figur 49: LTspice simulering av strömändring, $10mH$ induktans

Bildsensorn ska regleras för skakningar under $100Hz$, vilket är betydligt långsammare än tidskonstanten på $0.15ms$. Detta innebär att tiden det tar strömmen att byta värde inte ska påverka aktuatorernas möjlighet att producera rätt krafter i rätt tid.

13 Prototyp och testrigg

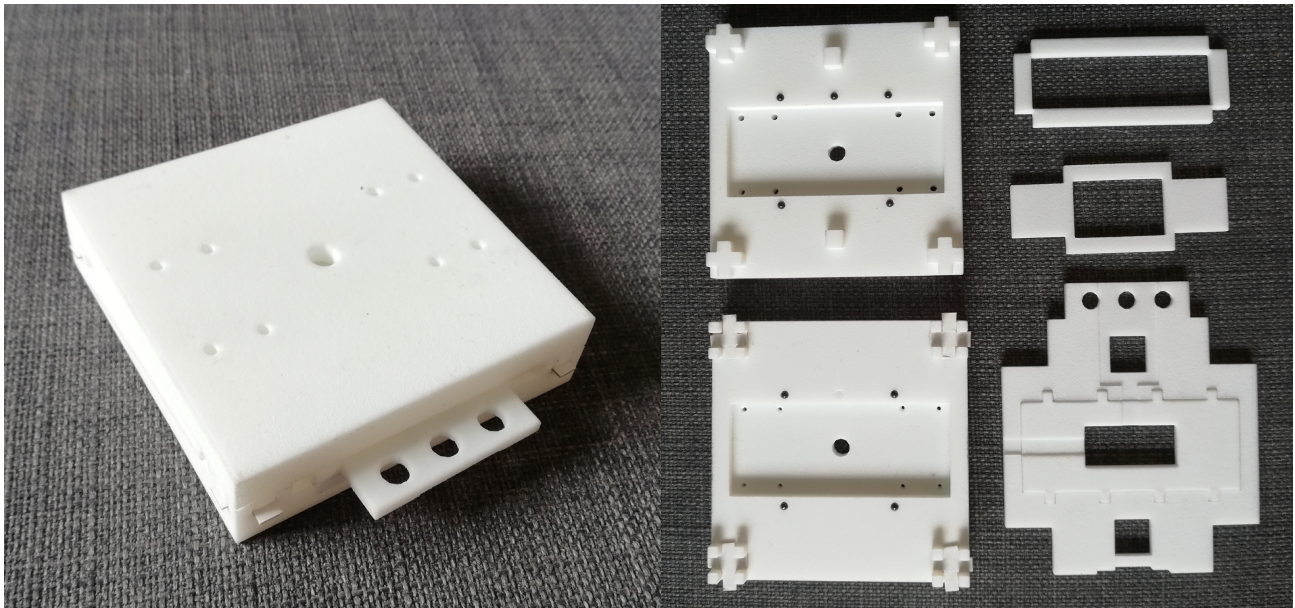
Testriggar tillverkades för att kunna verifiera kraftsimuleringarna och testa positionsmätning med hallsensor.

Målet var att tillverka koncept 3a och 3b då de hade presterat bäst i simuleringarna. På grund av de mycket specifika magneterna som behövdes till koncepten skulle dessa behöva specialtillverkas, vilket innebar långa ledtider. I väntan på de specialtillverkade magneterna valdes det också att göra prototyper på koncepten 3a och 3c då deras magnetstruktur lättare kunde skapas med magneter direkt från magnetleverantörers lagerhyllor. Magneterna som fanns tillgängliga på lagerhyllan var kortare och av lite annan geometri än vad vi önskade för koncept 3a och 3c. För koncept 3b kunde vi inte hitta några passande magneter. De önskade magnetgeometrierna och de inköpta prototypmagneterna kan ses i tabell 16. Nya FEMM simuleringar gjordes med dessa nya geometrier för att kunna jämföra med resultaten från prototypmätningarna.

	3a	3b	3c	3a Prototyp	3b Prototyp	3c Prototyp
Magnet	2x6.2x50	2x6x50 & 3x2x50	2x7.5x50	2x6x25	—	1x8x25

Tabell 16: Magnetgeometrier [mm] som behövdes för de olika koncepten samt vilka som inköptes för prototypkoncepten. Magneterna är magnetiserade i första dimensionsriktningen.

En första 3D-printade version av testriggen, se figur 50, printades i nylon i en SLS 3D-skrivare. Den består av två stödstrukturer som kan ses till vänster i figur 50b. Till dessa stödstrukturer fästs utskurna järnbakplattor och de inköpta magneterna. En rörlig spolvagn ses nere till höger i bild 50b, den håller spolen på plats och glider på kulor placerade i stödstrukturerna. Kraftmätningar görs på denna rörliga spolvagn.



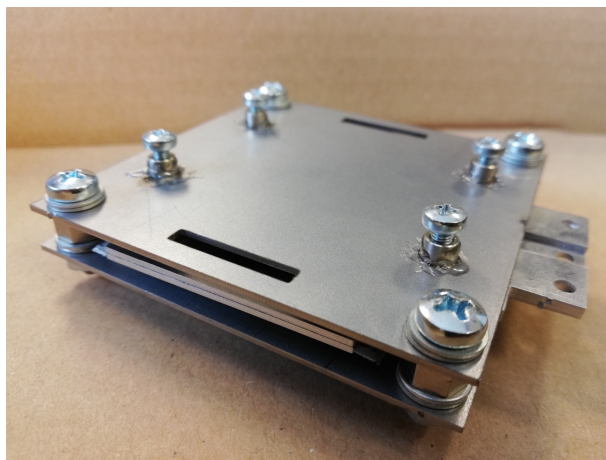
(a) Ihopmonterad testtrigg utan aktuatorkomponenter

(b) Separata 3D-printade delar

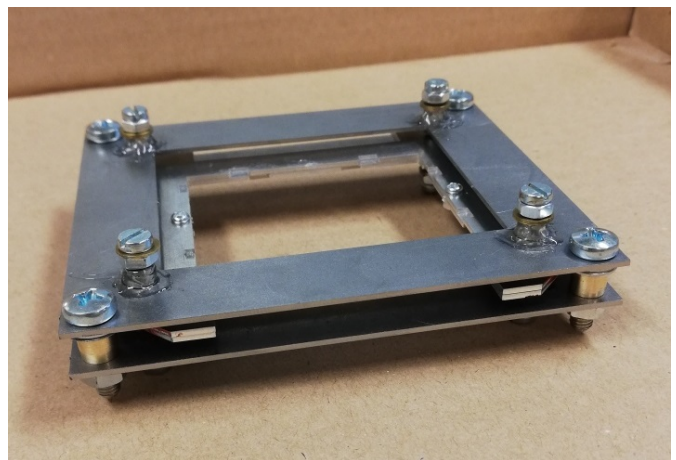
Figur 50: 3D-printad testtrigg för krafttestning av en aktuator

Den 3D-printade testtriggen är begränsad i den aspekten att ytfinheten på materialet ger upphov till en del friktion mellan kulorna och spolvagnen, samt att böjbarheten av spolvagnen ger dåliga toleranser i avståndet mellan magneter och spole.

För att förbättra testresultaten beställdes laserutskurna metallbitar för tillverkning av två testtriggar med bättre toleranser och mindre friktion. Den första av dessa två, som gjordes för test av singel aktuator, kan ses i figur 51a. Inga tester utfördes på denna prototyp då de nya inpasseringsstöden krävda för precisionsmontering av magneterna inte hann tillverkas. Utan dessa inpasseringsstöd skulle magneternas position inte nödvändigtvis vara korrekta och mätningar gjorda skulle inte ha något större värde.



(a) Experimentell prototyp i metall

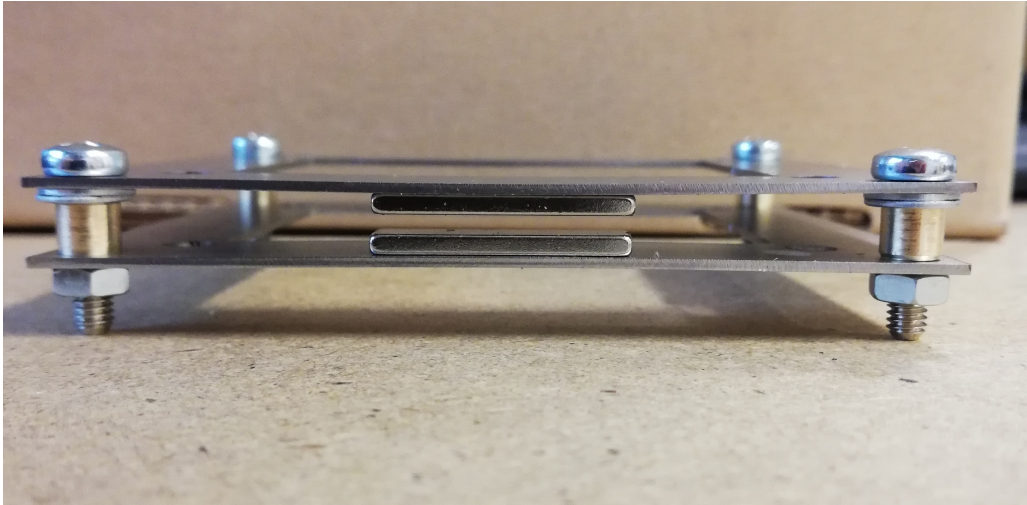


(b) Prototyp för fullt aktuatorsystem i metall

Figur 51: Experimentella prototyper tillverkade av laserutskurna metalldelar

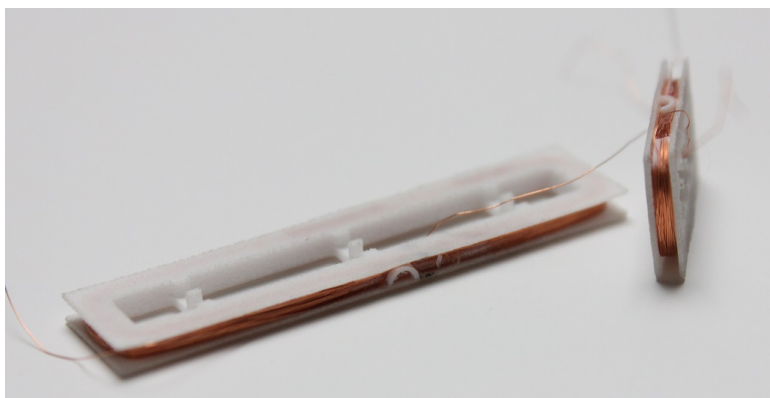
Den andra prototypen kan ses i figur 51b och är gjord för att testa det totala systemet med specialbeställda magneter till fyra aktuatorer. Dessa magneterna levererades inte, istället mon-

terades ett par av de mindre magneterna. Utifrån detta sågs det att attraktionskrafterna från dessa magneter böjde metallstrukturen vilket fick luftgapsstorleken att minska in mot mitten. Detta kan ses i figur 52. Två stycken N48 magneter i storleken 2x6x25mm minskade luftgapet i mitten på strukturen med 1.1mm.

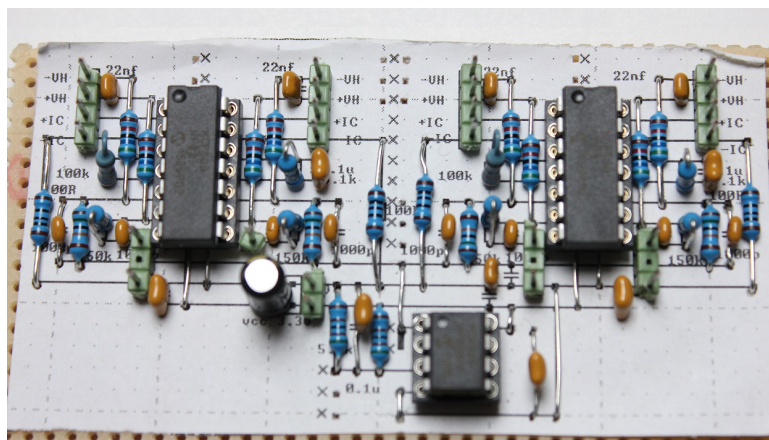


Figur 52: Prototyp böjning. Magneternas attraktionskrafter drar bakplattorna mot varandra vilket minskar storleken på luftgapet.

Korta spolar till 3a och 3c prototyperna handlindades på 3D-printade bobbiner figur 53. Spolarna lindades med 135 varv och fick en fyllnadsgrad på cirka 50%. Inledningsvis monterades spolen på en roterande axel men spänningen i tråden fick bobbinen att skruva sig. Speciellt på långsidorna blir tråden lös och en "mage" bildas medans tråden i hörnen läggs mycket kompaktare. Nya styvare bobbiner beställdes men 3D printern havererade innan dessa kunde levereras. Lindning för hand kräver ett stort mått tålamod och koncentration. Men resultatet blir fullgott för testning. Snabblim användes för att fixera tråden i spolen då vibrationer troligen skulle uppstå och minska kraften. Induktanstester gjordes på dessa spolar vilket resulterade i en induktans på 0.4mH i luft och 0.8mH monterad i magnetstrukturen. I spolarna placerades två hallsensorer för positionsmätning. Hållare för hallsensorerna skapades i spolen då SLS 3D print tekniken tillåter toleranser ner mot 0.1-0.3mm. En krets tillverkades för mätning och förstärkning av hallsensorsignalerna. I figur 54 visas den färdiga kretsen. Kretsen har möjlighet att mäta 4 hallsensorer samtidigt.



Figur 53: Handlindade spolar



Figur 54: Differentialkretsen för förstärkning av hallsensorer

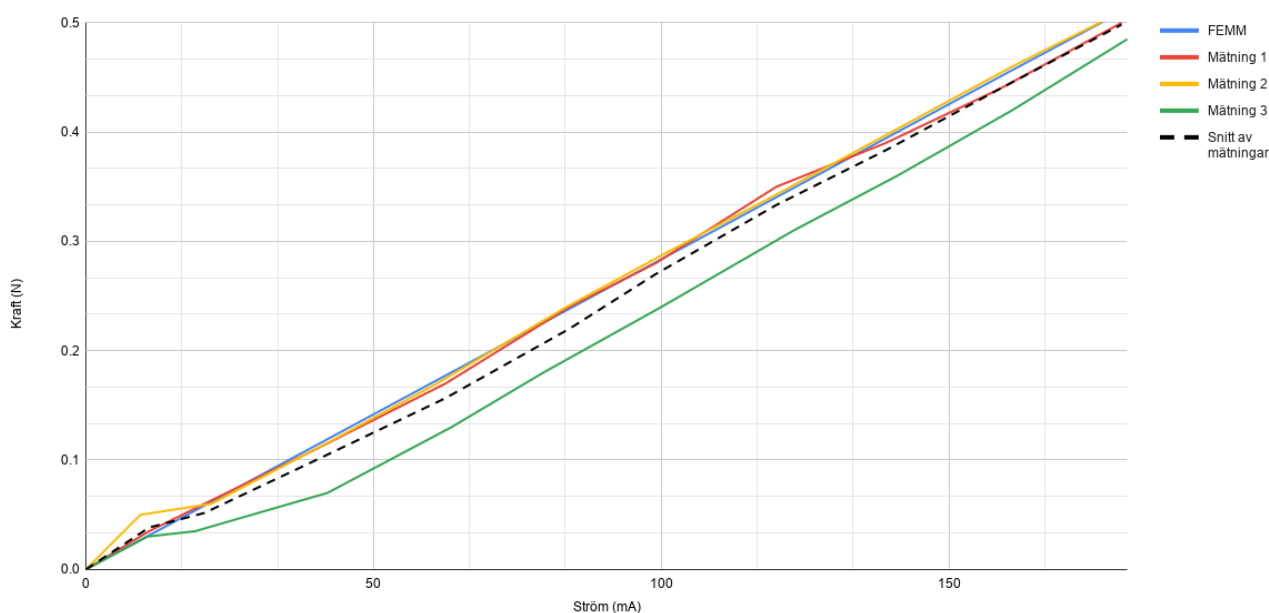
13.1 Testning

13.1.1 Kraft

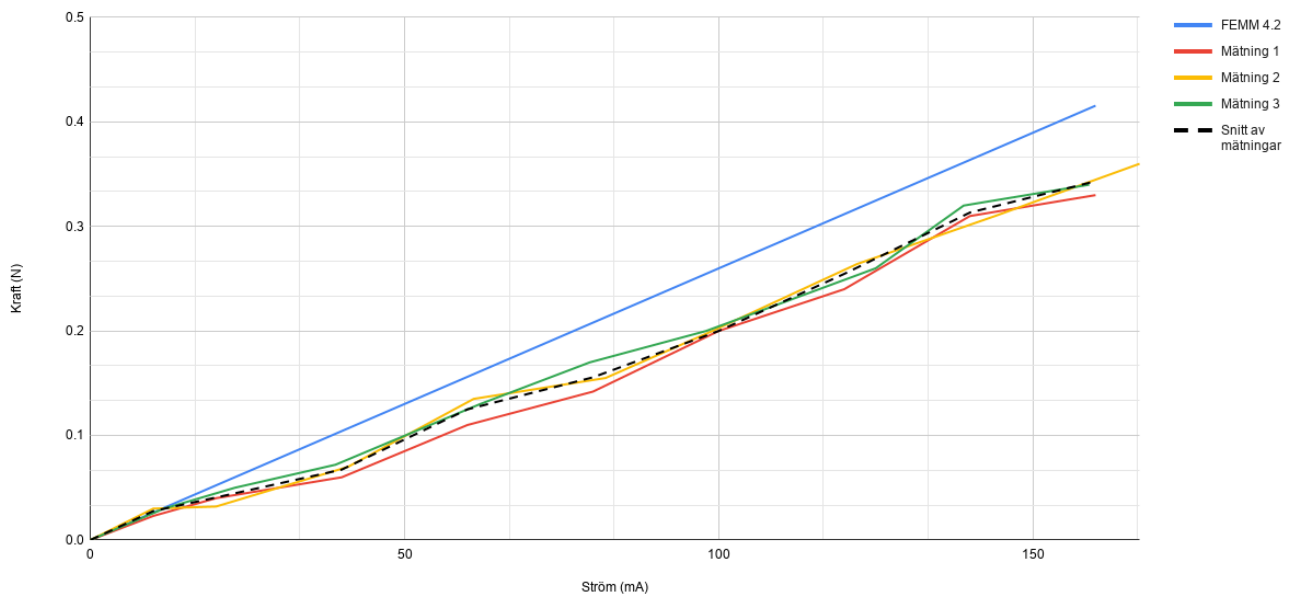
Krafttest gjordes på aktuatorerna till de modifierade koncepten 3a och 3c i den 3D-printade testtriggen. En *Vernier Dual Range Force Sensor* användes för att mäta krafter vid olika konstanta strömmar mellan 10 och 180mA. Datan från dessa mätningar är plottad i figur 55 och 56 tillsammans med datan från de simulerade FEMM modellerna.

De uppmätta krafterna ligger kring de simulerade. Prototypmätningen för 3a ligger i linje med simuleringen medan 3c ger cirka 20% mindre kraft än simulering.

Kraftresultaten måste ses med viss försiktighet då kraftmätningens utrustningen ger brusiga resultat på de små krafterna som mäts. Dessutom ger små felkalibreringar av utrustningen relativt stora resultatsskillnader. Storleken på luftgapet är också svårt att uppskatta då spolvagnen är lätt böjbar samt att den 3D-printade prototypen har grova toleranserna.



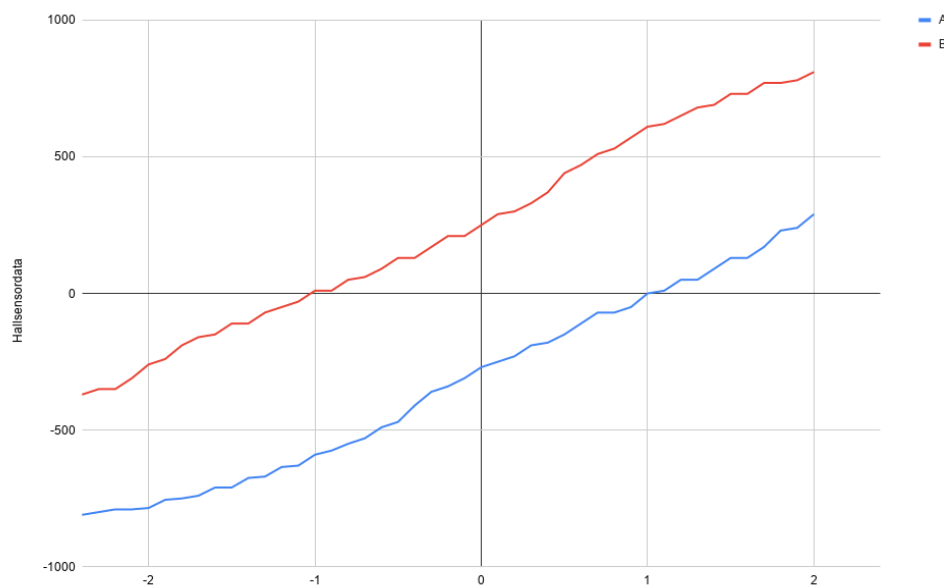
Figur 55: Kraftmätning på prototypvariant av koncept 3a, jämfört med FEMM simulerad koncept 3a. Mätningarna på testtrigg ligger i linje med simulerade resultat.



Figur 56: Kraftmätning på prototypvariant av koncept 3b, jämfört med FEMM simulerad koncept 3b. Mätning uppnår cirka 83% av simulerad kraftresultat.

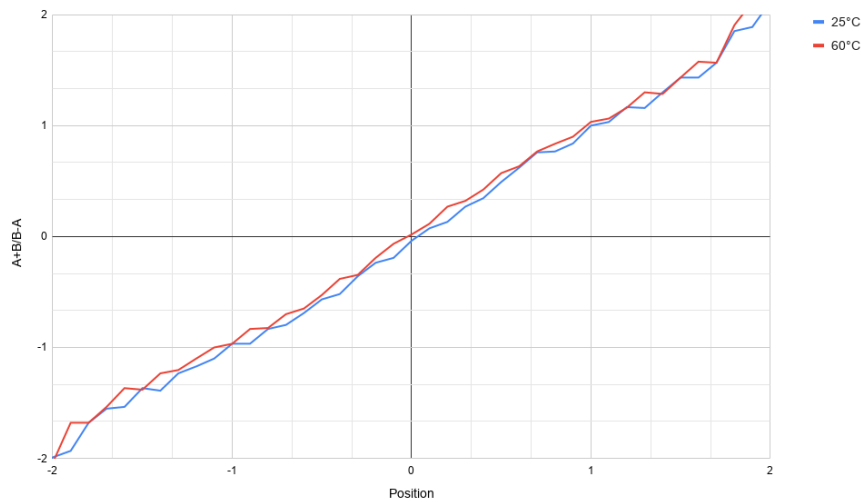
13.1.2 Hallsensormätning

Hallsensormätningar gjordes på en variant av koncept 3a med den 3D-printade riggen. Två hallsensorer, A och B, placerades inuti spolen på ett avstånd av 2.4mm från varandra.



Figur 57: Hallsensormätning för två hallsensorer A och B för testprototyp av koncept 3a vid 25°C.

Utsignalsmätningarna från de två hallsensorerna A och B mättes för 40 punkter mellan -2mm till +2mm. Utdatan A och B visas i figur 57. Resultatet av uträkningen $\frac{A+B}{B-A}$ kan ses i figur 58. Ett linjärt förhållande mellan position och utdatan från hallsensorerna visas att finnas. Två mätningar gjordes för att testa temperaturkompensationen, en vid 25°C och en vid cirka 60°C.



Figur 58: Beräkning av $A+B/B-A$ för hallsensordata A och B över spolens rörelseområde för två olika temperaturer på testprototyp av koncept 3a.

Tyvärr är mätosäkerheten med testtriggen mycket större än temperaturinverkan på de uppmätta hallsignalerna. Mätningar med större noggrannhet måste göras innan temperaturkompensationen från hallsensor beräkningen kan konstateras fungera. Åtgärder för att minska mätbrus bör utföras såsom skärmning av all utrustning med tanke på noggrannheten i den slutgiltiga positionmätningen. Det går i alla fall att konstatera att det går att skapa linjära förhållande mellan spolens position inuti aktuatoren och utdatan från hallsensorerna, även om upplösningen på den uppmätta datan inte är hög.

14 Diskussion

Två större missar gjordes under tidiga stadiet av utvecklingsfasen. Det första var att mycket tid lades på design av aktuatorkoncept innan ett definitivt designområde var definierat. Det andra var att en felinställning i en simulering ledde till att kraftresultaten från koncept 5 blev fyra gånger större än de borde. Detta märktes inte förrän överslagsberäkningar gjordes för hand två veckor senare. Två veckors optimering och design kring koncept 5 gjordes i onödan. Bland annat undersöktes triangulära magneter för koncept 4 och 5.

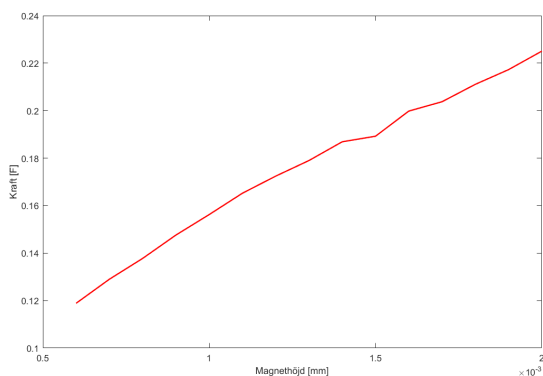
Tiden att beställa komponenter till prototyper underskattades. Förhoppningen var att kunna tillverka flera iterationer av prototyper, men underskattning av leveranstider ledde till att vi endast hann tillverka en 3D-printad experimentell prototyp och två laserutskurna prototyper med fel magneter.

Design, simuleringar och optimeringar av aktuatorerna gjordes med utgångspunkt i att den nödvändiga accelerationen av bildsensorn var 2m/s^2 , vilket resulterade i att aktuatorerna designades för att skapa 0.34N i varje riktning. Alternativa skakningstester tillhandahållna av kameratillverkaren indikerade att en acceleration på cirka 0.2m/s^2 är tillräcklig för att kompensera för användarskakningar. Detta skulle innebära en krävd aktuatorkraft på 0.088N för acceleration av bildsensor och motvikt, samt för att motverka fjäderkraftern. I detta fallet skulle den presenterade aktuatordesignen vara överdimensionerad.

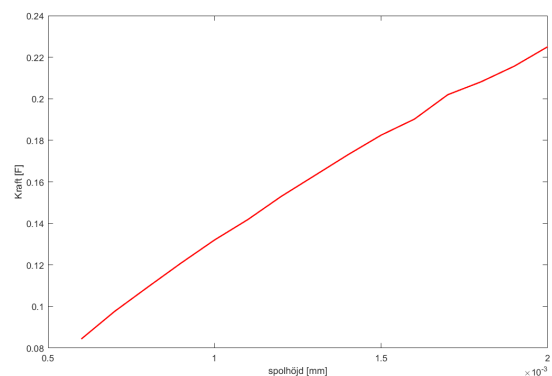
Det finns några olika sätt att skala ner aktuatordesignen. Nedan presenteras dessa i ordningen vi löst rekommenderar att de implementeras i.

1. Ta bort två av fyra aktuatorer. Genom att göra detta halveras både kraft som kan skapas och volym aktuatorerna tar upp. Detta är det krafteffektivaste sättet att få mer plats i kamerahuset.
2. Längden på varje enskild aktuator kan göras kortare. Kraften aktuatoren kan generera är direkt proportionerlig längden spoltråd i aktuatoren, vilket i sin tur är direkt proportionerligt mot aktuatorlängden.
3. Minska effektförbrukningen genom att minska strömmen genom spolen. Exempelvis så kan nuvarande koncept 3a enligt simuleringar köras på en effekt på 0.4mW per spole och uppnå kraften 0.088N.
4. Minska magnetjocklek. Detta minskar höjden på aktuatorerna och kraften aktuatoren kan leverera. Om en av de parametrarna som diskuterades i slutet på kapitel 8 ändras så kommer hallsensorkurvornas utseende ändras. Minskas endast magnetjockleken med bibehållen spölhöjd och bakplattettjocklek kommer hallkurvorna ändras och nya kurvor måste göras. Men ökas tjockleken på bakplattan lika mycket som magnetjockleken minskas så är hallkurvor oförändrade. Minskning av magnetstorleken kommer även ge ett minskat läckageflöde.
5. N52M magneterna kan bytas ut mot billigare svagare magnettyper. Kraften i aktuatoren varierar proportionerligt med den valda magnetens B_r värde. Magnettypen påverkar inte de beräknade hallsensorkurvorna.
6. Minska spölhöjden. Detta minskar kraften och effektförbrukningen hos aktuatoren. För att behålla luftgapets storlek måste avståndet mellan magneterna göras kortare. Detta leder till att nya hallsensorkurvsimuleringar måste göras.
7. Bredden på aktuatorerna kan göras lite smalare. Men med en minskning av aktuatorbredden tvingas även spolen att göras smalare. En liten ändring av aktuatorns bredd kan på detta sätt ge en stor förändring i kraft. Vid en minskning av aktuatorbredden med 2mm har kraften aktuatoren producerat halverats. Detta rekommenderas inte.

En eller flera av dessa lösningar kan göras för att skala ner koncepten till rätt storlek. Vid ändringar som påverkar dimensionerna beskrivna i kapitel 8 måste nya simuleringar göras för att hitta optimala hallsensorkurvor. Graferna nedan visar kraften i koncept 3a när magnethöjden alternativt spölhöjden varieras.



(a) Kraft beroende på magnet höjd för koncept 3a



(b) Kraft beroende på spol höjd för koncept 3a

Figur 59: Kraft beroende på spolhöjd och magnet höjd

Det var från början tänkt att göra en prototyp på det totala systemet med 4 aktuatorer. Dålig framförhållning med magnetbeställningar och långa leveranstider gjorde att vi inte hann med att göra detta. Istället fick vi nöja oss med enkla tester av enskilda aktuatorer på den 3D-printade riggen. Dåliga toleranser på testriggen och brusiga mätdata från kraftmätningssutrustningen gör att den presenterade datan måste noteras med aktsamhet.

De tester som gjordes på den totala systemprototypen visar att bakplattor med tjockleken 1mm buktas in av magneternas attraktionskraft. För att förhindra att storleken på luftgapet mellan magnet och spole varierar så behöver strukturen mer strukturellt stöd. Detta kan vara i form av tjockare bakplattor, styvare material eller stödpelare. Detta problemet kanske helt försvinner i de fallen magneterna görs tunnare eller aktuatoren görs kortare.

15 Slutsats

Målet med detta examensarbete var att ta fram ett drivsystem för förflyttning av en inre bildsensor i en kamera. Drivsystemet skulle vara dimensionerat för att få plats i en befintlig kamera. En eller flera av konceptlösningarna skulle vara utarbetade så att det går att göra experimentella prototyper för utvärdering. I mån av tid skulle även olika lösningar för positionsmätningar utvärderas.

De två aktuatorkoncepten vi har utvecklat och presenterat uppfyller och överstiger de preliminära kraftkraven. Beroende på vilken acceleration av bildsensorn som vill uppnås kan dessa två aktuatorkoncept skalas ner för att skapa ett mer kompakt system. Det slutgiltiga valet mellan koncept 3a och 3b beror på faktorer som monterbarhet och pris. Detta har inte utvärderats och lämnas åt framtiden. Vidare måste mer tid läggas på att definiera alla komponenter i det mekaniska systemet. Det som har presenterats i denna rapport får räknas som en validering att det mekaniska systemet är möjligt att implementeras.

Delar till en skalenlig experimentell prototyp har beställts. Komponenterna såsom spolar och magneter bör även beställas enligt våra rekommendationer för att validera kraftmätningar och effektmätningar.

Indikationerna från de utförda hallsensormätningarna talar för att det teoretiska resultaten är korrekta. Ytterligare positionsmätningstester med hallsensorerna borde utföras under olika temperaturförhållande för att med säkerhet avgöra dugligheten på temperaturkompensationen.

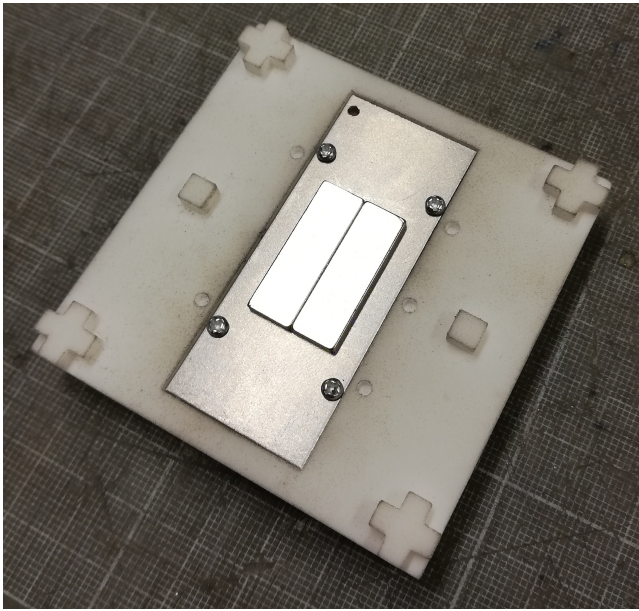
Vårt examensarbete tar slut just som det blir som mest spännande. Vi väntar på nästa avsnitt.

16 Referenser

- [1] DC-X011-2012 *Verification method of Vibratory Apparatus* http://www.cipa.jp/image-stabilization/documents_e/VMVA_for_DC-X011_E.pdf
- [2] D. Sachs, S. Nasiri, D. Goehl *Image Stabilization technology Overview* https://www.digikey.com/pdf/i/invensense/image-stabilization-technology?sc_lang=ja
- [3] A. Veltman, D.W.J Pulle and R.W.De Doncker. *Fundamentals of Electric Drives* Springer, 2007, pp. 8-25. ISBN:978-1-4020-5504-1
- [4] Avo Reinap. *Electromechanics* Hämtad 2020-05-18, https://www.iea.lth.se/emk/lectures/L206_M06_e_lmechA.pdf
- [5] Wijdeven. *Orthocyclic coils*, Hämtad 2020-05-28, <https://www.wijdeven.com/en/products/orthocyclic-coils/>
- [6] J. L. G. Janssen, J. J. H. Paulides, L. Encica, and E. A. Lomonova, *High-Performance Moving-Coil Actuators with Double-Sided PM Arrays : A Design Comparison*, in Proceedings of the International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Incheon, Korea, October 10-13 2010, pp. 1603–1608. [5664358]
- [7] Elektrisola *Technical basics and calculations*, Hämtad 2020-05-28, <https://www.elektrisola.com/hf-litz-wire-litz/products/terminology-basics/technical-basics-and-calculation.html/>
- [8] Power Stream, *Wire gauge and current limits including skin depth and length*, Hämtad 2020-06-14, https://www.powerstream.com/Wire_size.htm
- [9] Ivelina N. Cholakova, Tihomir B. Takov, Radostin Ts. Tsankov, Nicolas Simonne *Temperature Influence on Hall Effect Sensors Characteristics*, 2012, http://e-university.tu-sofia.bg/e-publ/files/802_TELFOR2012_07_07.pdf
- [10] TE Connectivity *LVDT Tutorial* Hämtad 2020-05-15, <https://www.te.com/global-en/industries/sensor-solutions/insights/lvdt-tutorial.html>
- [11] M.Djamal and R.Ramli *Giant Magnetoresistance Sensors Based on Ferrite Material and Its Applications* DOI: 10.5772/intechopen.70548 <https://www.intechopen.com/books/magnetic-sensors-development-trends-and-applications/giant-magnetoresistance-sensors-based-on-ferrite-material-and-its-applications>
- [12] *How do piezo motors work?*, Hämtad 2020-05-15, <https://xeryon.com/technology/how-do-piezo-motors-work/>
- [13] Rob Carter, Richard Kensley *Introduction to Piezoelectric Transducers*, Hämtad 2020-05-15, <https://piezo.com/pages/piezoelectric-actuators>
- [14] *Arbetsprincip piezo-elektricitet, perovskit och polarisering*, Hämtad 2020-05-15, <https://www.ceramtec.se/keramiska-material/piezokeramer/grunderna/>
- [15] *Hall effect sensing*, Hämtad 2020-05-17, <https://sensing.honeywell.com/hallbook.pdf>

- [16] T.Hoshino, 2006, *Position detector and positioning device*, EP20060715648 20060314, Hämtad från <https://worldwide.espacenet.com/>
- [17] Arnold Magnetic Technologies *Neodymium iron boron magnets*, Hämtad 2020-05-18, <https://www.arnoldmagnetics.com/products/neodymium-iron-boron-magnets/>
- [18] LWW Group, *Technical data for winding wire*, Hämtad 2020-05-18, <http://www.lww.se/wp-content/uploads/2017/06/LWW-brochure-2016.pdf>
- [19] MWS, *Self bonding magnet wire*, Hämtad 2020-06-14, <https://mwswire.com/magnet-wire/bondable-magnet-wire/>

17 Bilagor



(a) Magneter och bakplatta till prototyp 3c



(b) Kraftmätningrigg



(a) Hallsensortest



(b) Hallsensortest