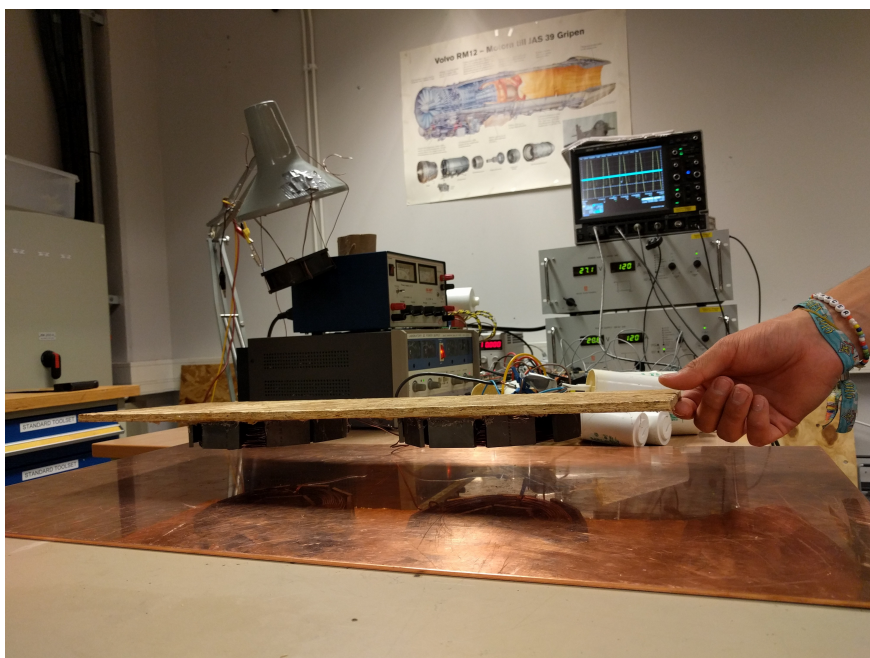




CHALMERS

UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Konstruktion av hoverboard med elektrodynamisk suspension

Kandidatarbete vid Institutionen för Energi och miljö

Viktor Claeson Paulina Eriksson Nils Jacobson
Charlie Jägerhag Philip Larsson Calle Malm

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2016

KANDIDATARBETE VÅREN 2016

Konstruktion av hoverboard med elektrodynamisk suspension

Viktor Claeson Paulina Eriksson Nils Jacobson
Charlie Jägerhag Philip Larsson Calle Malm



Avdelningen för Elteknik
Institutionen för Energi och miljö
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2016

Konstruktion av hoverboard med elektrodynamisk suspension

Viktor Claeson Paulina Eriksson Nils Jacobson
Charlie Jägerhag Philip Larsson Calle Malm

Handledare: Robert Karlsson, Energi och miljö, Chalmers

Examinator: Jimmy Ehnberg, Energi och miljö, Chalmers

Kandidatarbete Våren 2016

Institutionen för Energi och miljö

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Sammanfattning

Projektet utfördes för att avgöra om det var möjligt att konstruera en hoverboard som svävar med hjälp av elektrodynamisk suspension. Arbetet genomfördes genom att testa vilka ingående variabler som påverkade vid försök att skapa lyftkraft med hjälp av spolar. Resultaten från försöken användes för att optimera en spole för högsta lyftkraft, som sedan kunde dupliceras och placeras på en bräda. Slutsatsen var att det teoretiskt går att skala upp projektet för att lyfta en person, även om projektets prototyp slutligen endast klarade att generera en lyftkraft på 16 kg.

Abstract

This project was conducted to determine whether it was possible to construct a hoverboard utilizing electrodynamic suspension. This was accomplished by testing the affecting input variables during attempts to provide a vertical force using coils. The results of the experiments was then used to optimize one coil for maximum lift, which was then duplicated and mounted on a board. The conclusion was that it is theoretically possible to scale up the project to carry one person, even though the final prototype only was capable of lifting 16 kg.

Tack

Vi vill tacka vår handledare Robert Karlsson för hans hjälp med vårt kandidatarbete att konstruera en hoverboard. Robert har varit oersättlig då han med stor entusiasm och glädje hjälpt oss genomföra och peppa oss under detta projekt. Vi vill även tacka vår examinator Jimmy Ehnberg för tålmodigt och metodiskt förklarat de tips och tricks som en vilken grupp studenter behöver för att skriva och genomföra detta grupparbete.

Göteborg, Maj 2016

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	3
1.2	Syfte	4
1.3	Problem	4
1.4	Avgränsningar	5
2	Teori	6
2.1	Elektromagnetisk fältteori	6
2.1.1	Elektromagnetiskt fält från en spole	6
2.1.2	Virvelströmmar och induktans	7
2.1.3	Kraft mellan två spolar	8
2.1.4	Materialegenskaper	9
2.1.5	Skineffekt	10
2.2	Värmeutveckling i spole	11
2.3	Resonans	11
2.4	Oscillator	13
3	Metod	16
3.1	Test-rigg	17
3.2	Optimering av nyttolast	18
3.2.1	Spolens geometri	18
3.2.2	Ledande underlag	19
3.2.3	Styrning av magnetfält	19
3.2.4	Nyttolastens strömberoende	19
3.3	Kylningssystem	20
3.4	Konstruktion av prototyp	20
4	Resultat	21
4.1	Optimering av nyttolast	21

4.1.1	Spolens geometri	21
4.1.2	Ledande underlag	23
4.1.3	Styrning av magnetfält	24
4.1.4	Nyttolastens strömberoende	26
4.2	Kylningssystem	27
4.3	Konstruktion av prototyp	28
5	Diskussion	31
5.1	Mätosäkerhet	33
5.2	Metodik	34
5.3	Alternativa lösningar	35
5.4	Vidare utveckling	36
5.5	Övriga användningsområden	36
6	Slutsats	37
	Litteraturförteckning	38

1

Inledning

I filmen *Tillbaka till framtiden del II* reser Marty McFly fram i tiden till den 21:e oktober 2015. I framtiden fanns då flygande skateboardar kallade hoverboards. År 2015 har kommit och gått, men ännu ser vi inga brädor flyga omkring genom luften. Denna studie skall därför undersöka huruvida det går att konstruera en hoverboard med nutida teknik. Specifikt om det går att konstruera en hoverboard liknande den som förekommer i *Tillbaka till framtiden del II*. Hoverboarden skall kunna belastas med en vikt som motsvarar en vuxen människa utan att vidröra marken. Hoverboarden skall även kunna röra sig fritt i horisontalled, dock begränsat till en särskild bana.

Det finns flera tänkbara metoder för att få en bräda att sväva. Till exempel skulle en kompressor med luftkudde för liknande teknik som i en svävare kunna användas. Även raketmotorer, heliumballonger eller propellrar som i en helikopter skulle kunna vara tänkbara alternativ. Eftersom detta är ett projekt i elektroteknik kommer det dock, oavsett vilka andra metoder som är realistiska eller intressanta, beröra magnetisk levitation i form av elektrodynamisk suspension.

Vad det gäller hoverboards finns det redan en del exempel inom området magnetisk levitation. Biltillverkaren Lexus har byggt en hoverboard i marknadsföringssyfte, där de använde sig av supraledare kyllda med flytande kväve [1]. Hoverboarden kan då genom Meissnereffekten sväva på ett magnetiskt spår [2]. I Silicon Valley utvecklar företaget Hendo en hoverboard med roterande permanenta magneter. Dessa inducerar strömmar i ett ledande underlag av till exempel koppar eller aluminium. De inducerade strömmarna ger enligt Lenz lag upphov till

ett motriktat magnetiskt fält som repellerar magneterna på brädan som då svävar [3],[4].

Elektrodynamisk suspension med spolar och växelström fungerar på liknande sätt som Hendos hoverboard. Strömmen genom spolen ger upphov till ett magnetiskt fält som varierar med tiden på samma sätt som när permanenta magneter roterar. Strömmar kan då induceras i ett ledande underlag som i sin tur ger upphov till ett motriktat magnetiskt fält som repellerar spolarna och detta resulterar i en lyftkraft.

Hoverboards kan vara intressanta i sig själva som ett trendigt, modernt och roligt transportmedel eller som en kul pryl för en bred åldersgrupp. Tekniker för magnetisk levitation kan dock vara intressant ur en mängd andra perspektiv. En fördel med magnetisk levitation är att friktionen mot underlaget blir försumbar. Med låg friktion kan hastigheter ökas och minska kraften som behövs för att flytta saker i horisontell riktning. Detta undviker en del energiförluster i form av friktionsvärme. Potentiellt skulle då energieffektiviteten kunna ökas. Dock uppstår andra energiförluster eftersom det hela tiden behövs energi för att hålla något svävande med magnetisk levitation. Redan idag implementeras tekniken i samhället, som till exempel Maglevtåg vilket finns i bland annat San Diego, China och Japan [5]. Magnetisk levitation används även för att smälta metall utan att det kommer i kontakt med omgivningen [6].

I framtiden skulle magnetisk levitation kunna användas till att göra byggnader mer tåliga för jordbävningar [7]. Ett annat tänkbart användningsområde skulle kunna vara inom lagertransport och förflyttning av utrustning som är känslig för stötar och skakningar. Magnetisk levitation skulle kunna undvika många av de riskerna som det innebär att använda truck genom att göra stötar och skakningar mjukare. På samma sätt skulle magnetisk levitation även kunna underlätta i hemmet. Vid förflyttning av tunga möbler som riskerar att repa golv eller tunga lyft för att minska skaderisk för människor.

1.1 Bakgrund

I inledningen nämndes det att företagen Lexus och Hendo tidigare utvecklat hoverboards som svävar genom magnetisk levitation. Lexus använde sig av supraleutare som hölls under den övergångstemperaturen med flytande kväve vilket har en kokpunkt på 77 K [8]. En supraleutare har oändligt bra ledningsförmåga och är diamagnetiskt. Diamagnetism innebär att det tränger undan magnetfält så att det magnetiska flödet i supraleutaren är noll. Detta beror på Meissner-effekten som är ett kvantmekaniskt fenomen [9]. Resultatet är att en supraleutare kan fixeras på en viss höjd ovanför en magnet. I Lexus modell hade de en magnetisk räls längs med vilken hoverboarden kunde sväva. Supraleutare gjorde att hoverboarden kunde fixeras i ett magnetfält ovanför rälsen. Hoverboarden kan lyfta ungefär 200 kg, 2,5 cm till 5 cm ovanför marken i 20 minuter [10].

Hendos hoverboard bygger på en skiva med permanentmagneter riktade åt olika håll. Skivan roteras med en elmotor för att skapa ett varierande magnetfält. Det växlande magnetfältet kan enligt Lenz lag inducera virvelströmmar i ett ledande underlag [3]. De inducerade virvelströmmarna ger upphov till ett motriktat magnetfält som repellerar permanentmagneterna vilket lyfter den roterande skivan [4]. I en intervju säger Greg Henderson, uppfinnaren bakom Hendos hoverboard, att den klarar av att bära 136 kg [11].

Det finns en mycket begränsad mängd publicerad forskning om hoverboards som utnyttjar elektrodynamisk suspension. Därav fanns det även en begränsad mängd information och resultat som kunde användas som vägledning. Projektet fyllde därmed ett kunskapsgap. Detta kunskapsgap kan delvis förklaras genom att det tidigare inte funnits batterier som kan förse en hoverboard med tillräckligt hög effekt. Det har inte heller funnits transistorer som klarar av att belastas med denna effekt. Dessa begränsningar framkom i en intervju med R. Karlsson 17 maj 2016. Ny batteri- och halvledarteknik har på senare år gjort detta möjligt. Det finns idag batterier som kan ge en matningseffekt på 7,5 kW/kg [12] och transistorer som kan matas med en drain-source-

spänning på 60 V och en maximal drainström på 210 A [13].

1.2 Syfte

Syftet med detta projekt är att undersöka om det genom elektrodynamisk suspension är möjligt att realisera en hoverboard.

1.3 Problem

Den huvudsakliga uppgiften med detta projekt var att konstruera en hoverboard som skulle klara av att sväva med en vuxen person på. För att denna uppgift skulle kunna lösas behövdes en konkret definierad problemställning, samt att bryta ner denna i mindre delar. Vad som behövde uppnås tydliggörs här.

De spolar som skulle krävas för elektrodynamisk suspension behövde designas sådana att nyttolasten blev så stor som möjligt. Därför behövdes antal varv, geometri och deras material bestämmas.

Efter tidiga tester upptäcktes ett problem i form av värmeutveckling. På grund av värmeutvecklingens omfattning behövde hoverboarden kylas vid drift, annars riskerade den att överhettas. Av denna anledning har implementeringen av ett kylningssystem undersökts.

Frekvensen på den ström som hoverboarden matades med vid drift hade en avgörande påverkan på hur väl hoverboarden svävade. Därav behövde frekvensen på strömmen beaktas. Om den valda frekvensen var för hög, skulle det medföra att inträngningsdjupet blev litet och i sin tur resistansen hög.

Nyttan av att eventuellt köra kretsen i resonans behövde också utredas. Att köra hoverboarden i resonans medförde komplikationer med att anpassa frekvensen så att resonans uppnåddes, då höjdskillnaden mellan spole och underlag ändrade induktansen i spolen.

Eftersom hoverboarden svävade på grund av två motriktade magnetfält som repellerade varandra så skapades ingen stabil punkt. Detta i kombination med avsaknandet av friktion mot underlaget gav upphov till stabilitetsproblem.

1.4 Avgränsningar

Målet var i första hand att få en bräda att sväva bärandes en person. Fokus låg därför inte på design av ett regelsystem för stabilitet och framåt drift.

Ytterligare en avgränsning gjordes gällande konstruktion av en bana för hoverboarden. Det fungerar inte att åka överallt utan det krävs ett ledande underlag. Eftersom det, enligt syftet, endast utfördes en undersökning om det var möjligt att konstruera en hoverboard innefattades det ej hur denna kunde implementeras i verkligheten.

I projektet realiserades elektrodynamisk suspension med spolar över ett ledande material. Principiellt kunde det lika gärna varit tvärtom, spolar som underlag och en hoverboard gjord av ledande material ovanför. Fast då uppstår det flertalet andra problem som exempelvis att hoverboarden blir mindre mobil. På grund av detta fokuserades projektet på den första principen, spolar över ett ledande underlag och inte tvärtom.

Gällande konstruktionen av hoverboarden så lades det minimalt fokus på estetik. En hoverboard behöver vara mobil, vilket innebar att det inte kunde vara någon sladd ansluten och att den därför behövde drivas med batterier. Teori kring batterier och konstruktion av dessa innefattades ej i projektet. Det som undersöktes var vilken elektrisk effekt hoverboarden behövde och vilken effekt batterierna kunde leverera. En växelriktare så att de tillgängliga batterierna kunde användas konstruerades inte heller, då detta hade blivit ett alltför omfattande delprojekt.

2

Teori

För att förklara de fysikaliska fenomen som utnyttjades i projektet redovisas den bakomliggande teorin i detta avsnitt.

2.1 Elektromagnetisk fältteori

Elektromagnetisk fältteori har varit viktig för att beskriva elektrodynamisk suspension under projektets gång och förklaras här.

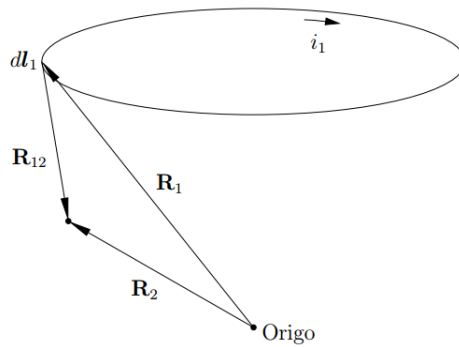
2.1.1 Elektromagnetiskt fält från en spole

En ström genom en spole ger upphov till ett magnetiskt fält. För att förstå hur detta magnetiska fält ser ut undersöker vi bidraget från ett infinitesimalt spolelement, $d\mathbf{l}_1$, av en spole med ett varv vilket kan ses i figur 2.1.

Spolelement, $d\mathbf{l}_1$, i $\mathbf{R}_1$ som i figur 2.1 ger upphov till magnetfältet, $d\mathbf{B}(\mathbf{R}_2)$, i $\mathbf{R}_2$ enligt (2.1)

$$d\mathbf{B}(\mathbf{R}_2) = \frac{\mu_0 i_1}{4\pi} \frac{d\mathbf{l}_1 \times \mathbf{R}_{12}}{|\mathbf{R}_{12}|^3}, \quad (2.1)$$

där i_1 är strömmen genom spolen, $\mathbf{R}_{12}$ är vektorn från $\mathbf{R}_1$ till $\mathbf{R}_2$ och μ_0 är permeabiliteten för vakuum [14]. Om vi integrerar bidragen



Figur 2.1: En spole med ett varv och strömmen i_1 . Vektor $\mathbf{R}_{12}$ mellan punkt 2 och det infinitesimala spolelementet, $d\mathbf{l}_1$, i punkt 1.

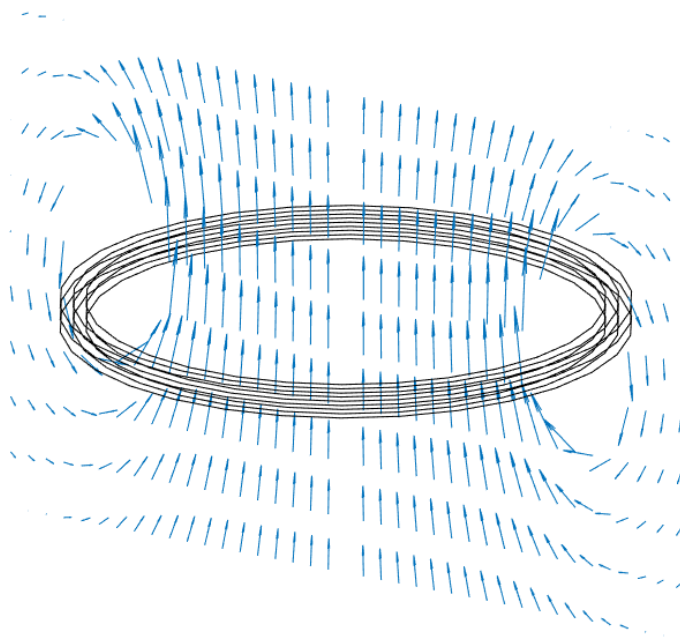
runt hela spolen får vi Biot-Savarts lag (2.2), som säger att den totala magnetiska flödestätheten, $\mathbf{B}(\mathbf{R}_2)$, i $\mathbf{R}_2$ följer

$$\mathbf{B}(\mathbf{R}_2) = \frac{\mu_0 i_1}{4\pi} \int_{spole} \frac{d\mathbf{l}_1 \times \mathbf{R}_{12}}{|\mathbf{R}_{12}|^3}, \quad (2.2)$$

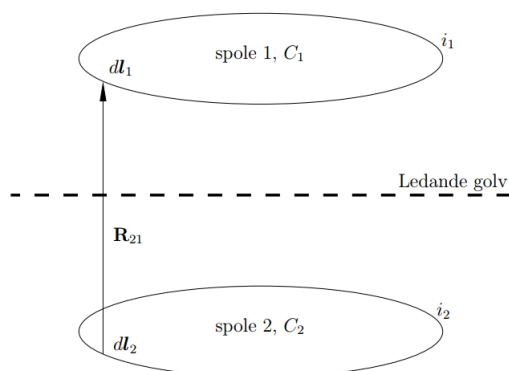
med beteckningar som i (2.1). Om spolen dessutom har flera varv kan det totala magnetfältet i en punkt fås genom superposition från varje slinga. På så sätt kan den magnetiska flödestätheten, $\mathbf{B}$, beräknas i flera punkter och det magnetiska flödet åskådliggöras som i figur 2.2. Detta gäller i ett magnetostatiskt fall. I fallet då det går växelström genom spolen kommer magnetfältet växla riktning. Vid förändringen av riktningen finns en viss tröghet. Vid frekvenser så att våglängden är mycket större än $|\mathbf{R}_{12}|$ kan detta dock ses som kvasistatiskt och räkna med Biot-Savarts lag [14].

2.1.2 Virvelströmmar och induktans

Om en spole matad med växelström placeras ovanför ett icke ferromagnetiskt ledande underlag, inducerar det resulterande magnetfältet virvelströmmar i underlaget enligt Faradays lag [14]. Dessa strömmar ger i sin tur upphov till ett magnetfält som enligt Lenz lag motverkar det ordinarie magnetfältet [14]. Vi kan modellera det som att spolen speglas i underlaget enligt figur 2.3. Magnetfälten blir då motriktade varandra och repellerar varandra.



Figur 2.2: Den magnetiska flödestätheten kring en strömförande spole med nio varv. Pilarnas längd och riktning motsvarar täthet och riktning i respektive punkt. Modellerat i Matlab.



Figur 2.3: En spole C_1 ovanför ett ledande underlag och dess virtuella spegelbild, C_2 , i det ledande planet. Vektorn $\mathbf{R}_{21}$ går mellan två infinitesimala spolelement, $d\mathbf{l}_1$ och $d\mathbf{l}_2$. Genom spolarna går strömmarna i_1 respektive i_2 .

2.1.3 Kraft mellan två spolar

Med en spegelbild i underlaget kan det ses som att vi har två spolar. Detta illustreras i figur 2.3 där vi ser två spolar med strömmarna i_1 respektive i_2 . Då kan vi använda Ampères kraftlag (2.3) mellan två

strömförande ledare för att räkna ut kraften, $\mathbf{F}_{21}$, på spole 1 som

$$\mathbf{F}_{21} = -\frac{\mu_0}{4\pi} i_1 i_2 \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\mathbf{l}_1 \cdot d\mathbf{l}_2 \cdot \mathbf{R}_{21}}{|\mathbf{R}_{12}|^3}, \quad (2.3)$$

där C_1 och C_2 är respektive spole och $d\mathbf{l}_1$ och $d\mathbf{l}_2$ är ett infinitesimalt element av respektive spole. I fallet då en av spolarna är en tänkt spole i det ledande golvet antas $i_1 = -i_2$. Då kan vi skriva om (2.3) till (2.4) enligt

$$\mathbf{F}_{21} = \frac{\mu_0}{4\pi} i_1^2 \oint_{C_1} \oint_{C_2} \frac{d\mathbf{l}_1 \cdot d\mathbf{l}_2 \cdot \mathbf{R}_{21}}{R_{21}^3}. \quad (2.4)$$

Som vi ser från (2.4) och symmetrin i figur 2.3 kommer $\mathbf{F}_{21}$ vara riktad uppåt och proportionerlig till i_1^2 och den totala längden på ledarna. Den totala längden på ledarna är i sin tur direkt proportionerligt mot antal varv, N , i spolarna. Således kommer kraften, $\mathbf{F}$, på den reella spolen ovanför det ledande underlaget följa

$$\mathbf{F} \propto N \cdot i^2 \cdot \text{GEOMETRI}_{\text{faktor}}, \quad (2.5)$$

där $\text{GEOMETRI}_{\text{faktor}}$ är en faktor som beror på geometrin hos spolen och avståndet från det ledande underlaget [14].

2.1.4 Materialegenskaper

Främst tre materialegenskaper påverkar kraften i (2.4). En av materialegenskaperna är permeabiliteten, $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$, där μ_0 är permeabiliteten för vakuum och μ_r är den relativa permeabiliteten. I samband (2.4) är $\mu = \mu_0$ vilket approximativt kan användas om $\mu_r \approx 1$, detta gäller till exempel för koppar, aluminium, luft och vatten [8].

I ämnen med hög relativ permeabilitet blir den magnetiska flödestät-

heten, $\mathbf{B}$, tätare som vi ser i (2.2). På så sätt kan ämnen med hög permeabilitet användas för att leda och fokusera magnetfältet [14]. Ämnen med hög permeabilitet är ofta också ferromagnetiska, vilket är en annan viktig materialegenskap. En ferromagnet som befinner sig i ett magnetfält fungerar som en egen magnet. På så vis kan det ferromagnetiska materialet leda och förstärka magnetfältet [9].

Den tredje materialegenskapen som är intressant i sammanhanget är resistiviteten hos de ämnen som kommer leda strömmar. I fallet med en spole och ett ledande underlag kommer det både gå strömmar igenom spolen samt genom underlaget. Med låg resistans behövs mindre spänning för att driva en hög ström och det medför att värmeförlusterna i tråden minskar. Koppar har en resistivitet på $1,67 \text{ n}\Omega\text{m}$ och aluminium $2,65 \text{ n}\Omega\text{m}$ [8]. Koppar har alltså 59 % bättre ledningsförmåga.

2.1.5 Skineffekt

Skineffekten gör att högfrekventa elektromagnetiska vågor begränsas till ytskiktet av ledare. Djupet på detta ytskikt kallas för inträngningsdjupet, δ , som beräknas i ekvation (2.6). Inträngningsdjupet för en ledare beror på vinkelfrekvensen, ω , ledningsförmågan, σ , och permeabiliteten, μ , enligt

$$\delta \approx \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu}}. \quad (2.6)$$

Inträngningsdjupet medför att resistansen blir högre i spolen då strömmen endast går i ytan av ledaren. Dessutom ställer skineffekten krav på tjockleken av det ledande underlaget så att magnetfältet inte kan tränga igenom underlaget. I det fallet då magnetfältet tränger igenom bottenytan omvandlas det inte till en repellerande kraft [14].

2.2 Värmeutveckling i spole

Värmeutvecklingen i en ledare beror på ledarens resistans, R , och hur stor ström, I , som går genom ledaren. Efter att spolen lyfts upp i luften utförs inget ytterligare arbete och all effekt omvandlas till värme. Värmeeffekten, P_Q , följer (2.7) enligt

$$P_Q = RI^2. \quad (2.7)$$

Värmeöverföringen till omgivningen innebär att en del av värmen leds bort från spolen. Hur snabbt värmen leds bort respektive hur mycket värme som leds bort beror på omgivningens värmeledningsförmåga respektive värmekapacitivitet. Den massa, m , av ett ämne som krävs för att ta upp värmeeffekten, P_Q , under en viss tid, Δt , utan att temperaturen höjs mer än ΔT kan bestämmas från samband (2.8) enligt

$$m = \frac{P_Q \cdot \Delta t}{c \cdot \Delta T}, \quad (2.8)$$

där c är den specifika värmekapacitiviteten för ämnet. Den specifika värmekapaciteten för luft, olivolja och vatten är 1,01, 1,65 respektive 4,19 kJkg⁻¹K⁻¹ [8].

2.3 Resonans

Då en elektrisk krets försätts i resonans kan det skapas strömmar eller spänningar över de ingående komponenterna med högre amplitud än vad som matats med. Resonans i en krets sker då reaktansen, den imaginära delen av impedansen, summeras till noll. För att uppnå resonans krävs det att både induktiva och kapacitiva komponenter finns i kretsen, som då blir en så kallad RLC-krets. De induktiva och kapacitiva komponenternas reaktanser är beroende av frekvensen, ω . Vid resonansfrekvensen, ω_0 , är de reaktiva komponenternas reaktanser

lika stora och enligt (2.9) gäller då att

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}, \quad (2.9)$$

där L är den induktiva komponentens induktans och C är den kapacitiva komponentens kapacitans. Ekvation (2.9) kan omvandlas till (??) för att lösa ut ω_0 enligt

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.10)$$

Kretsens induktiva och kapacitiva komponenter kan kopplas antingen parallellt eller seriellt. Vid resonans blir den totala impedansen i en seriekrets minimal medan impedansen i en parallellkrets blir maximal. På så sätt kan kretsen och dess komponenter dimensioneras så att kretsen sätts i resonans vid önskad frekvens.

En ideal resonanskrets har ingen resistiv karakteristik men i verkligheten måste den tas hänsyn till. Kretsens resistans, R , påverkar hur dess överföringsfunktion ser ut. I en ideal seriell resonanskrets har överföringsfunktion endast en skarp topp placerad vid resonansfrekvensen ω_0 . Då en resistans införs i kretsen gör detta dock att den skarpa toppen avtar i höjd och ökar i bredd. Detta ger upphov till att kretsen istället kommer ha ett frekvensintervall där den befinner sig i resonans, dess så kallade bandbredd. Som ett mått på hur ideal kretsen är används begreppet kvalitetsfaktor, Q , som ses i (2.11) enligt

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (2.11)$$

Från ekvation (2.11) kan även kretsens bandbredd, B , beräknas i (2.12) enligt

$$B = \frac{\omega_0}{2\pi Q}. \quad (2.12)$$

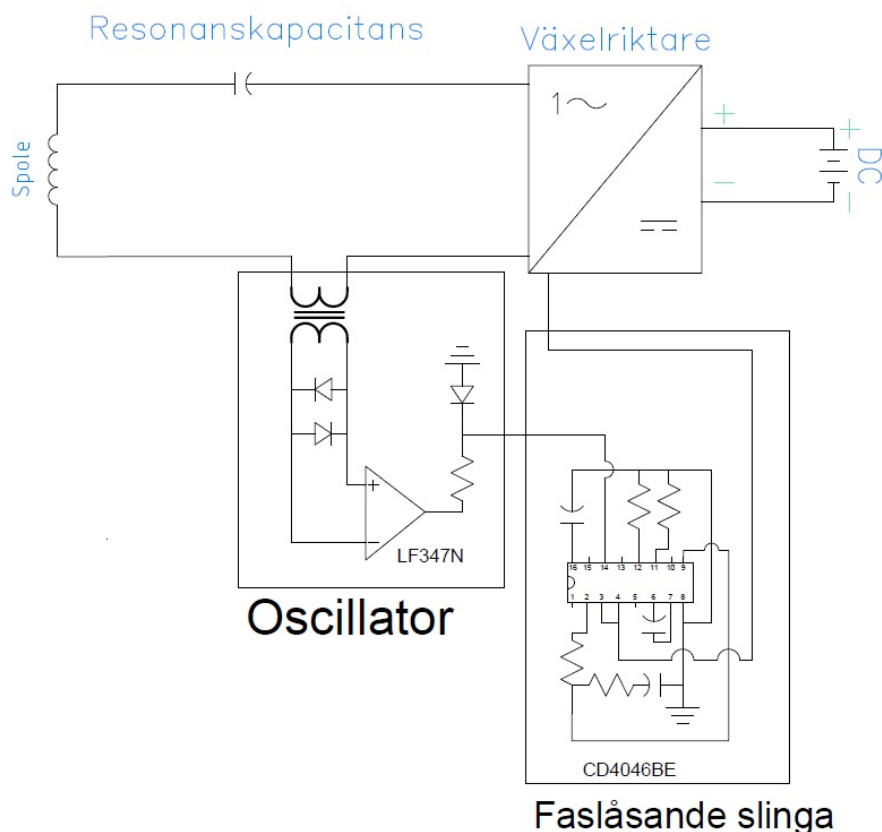
Ett fenomen som är viktigt att ta hänsyn till i säkerhetsperspektiv är att det byggs upp en hög spänning över den kapacitiva komponenten i en serieresonanskrets. Spänningen, V , i (2.13) kan leda till stora urladdningar enligt

$$V = QV_0, \tag{2.13}$$

där V_0 representerar den matande spänningen [8].

2.4 Oscillator

En oscillator kan användas till att reglera styrfrekvensen för att försätta en RLC-krets i resonans. För att realisera en oscillator kan en strömtransformator, en komparator och en faslåsand slinga användas. Oscillatorns kretsschema kan urskiljas i figur 2.4.



Figur 2.4: Kretsschema för oscillator och faslåsande slinga. De används till att sätta en RLC-krets i resonans.

En strömtransformator är en mättransformator som medför att höga strömmar omvandlas till låga strömmar som kan mätas. I detta fall blir den en strömkälla till en komparator. Då en trådlindad ferritring placeras runt en kabel skapas ett magnetfält som inducerar en ström i tråden. Denna ström är proportionell mot matningsströmmen [8].

För att skapa en fyrkantsvåg och begränsa spänningen används två dioder som leder i varsin riktning. Dioderna är i sin tur kopplade till en operationsförstärkare som realiserar genom IC-kretsen *LF347N* [15]. Denna jämför de spänningar som läggs över respektive ingång. Då den positiva ingången är större än den negativa jämfört med referensspänningen, ges en positiv spänning ut och vice versa. För att skapa en signal bestående av ettor och nollor, motsvarande då spänningen är positiv eller negativ, används en diod som släcker ut den

negativa spänningen. Utsignalen blir då en fyrkanstvåg som svänger med resonansfrekvensen. Oscillatorn kommer då att svänga in sig på resonansfrekvensen eftersom det erhålls störst spänningar då. Detta medför att signalen kan skickas till en växelriktare så att resonansfrekvensen kan ställas in. Fördelen med denna oscillator är att om impedansen ändras så leder det till att även frekvensen ändras så att resonans uppnås.

En nackdel med denna krets är att den behöver en startpuls. Det är för att skapa en sådan som en faslåsande slinga används. Detta kan realiseras genom IC-kretsen *CD4046B* som ses i figur 2.4 [16]. Utan insignal kommer denna krets att ge ifrån sig en grundfrekvens eller startfrekvens. Både start- och slutfrekvens kan dimensioneras med hjälp av omkringliggande resistorer och kondensatorer. Vid inkoppling av insignal kommer kretsen att återigen komparera dessa två frekvenser i en sluten slinga. Detta pågår tills dess att den spänningskontrollerade oscillatorn kan styras till resonansfrekvensen som sedan matas in i växelriktaren.

3

Metod

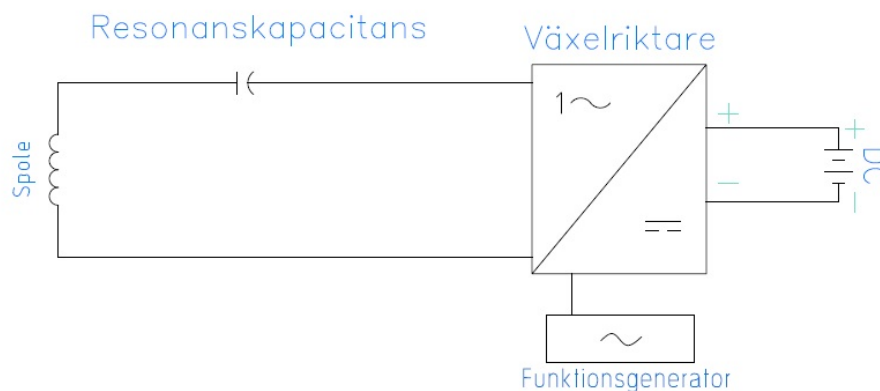
Projektets syfte var uppnått då det kunde bestämmas huruvida en hoverboard kunde realiseras med hänsyn till värmeutveckling och lyftkraft. Då det inte tidigare har konstruerats en fungerande hoverboard som använder sig utav spolarna för att generera lyftkraft, behövde en utförlig undersökning göras. Undersökningen behövde behandla de ingående komponenterna i hoverboarden. Större delen av projektet gick åt till att optimera spolarna genom experiment. Tillvägagångssättet för projektet grundades därmed i praktiska undersökningar och mätserier.

För att kunna besvara de problem som projektet innefattade och bedriva de experiment som behövdes var första steget att konstruera en test-rigg. Med denna konstruerad fortskred projektet genom att undersöka hur lyftkraften var beroende av olika parametrar.

Under experimenten har spolarna befunnit sig i resonans och resonansfrekvenserna kunde beräknas efter det att spolarnas induktans var bestämd. Detta utfördes genom att spolarna kopplades i serie med en känd kapacitans. Då spolarna svävade precis ovanför kopparplattan kunde frekvensen justeras tills att den matande strömmen var maximal. Utifrån denna frekvens beräknades spolarnas induktans enligt ekvation (2.9) och med en bestämd induktans kunde resonansfrekvenserna sedan bestämmas enligt ekvation (2.10).

3.1 Test-rigg

Testriggen som ses i figur 3.1 bestod av ett spänningsaggregat som matade spänning i ett intervall av 0-30 V och ström i ett intervall av 0-200 A. Aggregatet var kopplat till en växelomriktare som skapade en fyrkantsvågformad växelspanning. Omriktaren kopplades till en frekvensgenerator vilket gjorde att frekvensen manuellt kunde varieras. Denna installation medförde dock en strömbegränsning på 120 A och därför begränsades spänningsaggregatets strömmatning till 120 A under alla laborationer.



Figur 3.1: Kretsschema av test-riggen. Ett spänningsaggregat var kopplat till en växelriktare vars frekvens bestämdes av en funktionsgenerator. En resonanskapacitans kopplades i serie med en spole för att försätta kretsen i resonans.

Testriggen utvecklades med hjälp av en oscillatorkrets. Denna underlättade vid experiment, då resonansfrekvensen inte längre behövdes ställas in manuellt. Framförallt underlättade oscilatorn mätningarna vid på- och avlastning av hoverboarden, då oscilatorn anpassar resonansfrekvensen vid laständringar.

3.2 Optimering av nyttolast

Vissa parametrar behövde undersökas för att kunna implementera den spole som passade bäst för en hoverboard. För att successivt komma närmare en konstruktion av den mest effektiva spolen undersöktes parametrar enskilt. Flertalet experiment utformades därmed för att kunna konstatera hur olika variabler påverkade spolen och vad som var bäst lämpat för en hoverboard.

Den mest effektiva spolen var den spole som klarade av att lyfta mest last utöver dess egna vikt, alltså dess nyttolast. För att kunna jämföra olika spolar med varandra var det viktigt att bibehålla en konstant höjd som spolen svävade vid. På grund av asymmetrier i spolarnas geometri och variationer i höjd under körning kunde höjden ej mätas med god noggrannhet. Därför konstruerades ett test för att bestämma hur mycket nyttolast en spole klarade av att lyfta. Detta utfördes med hjälp av att placera ett pappersark under spolen. Då arket kunde förflyttas friktionsfritt i horisontalled, det vill säga då ingen del av spolen var i kontakt med varken pappret eller underlaget, definierades spolen som svävande under testförhållandena.

3.2.1 Spolens geometri

För att undersöka det optimala förhållandet mellan spolens radie och varvtal valdes en bestämd trådlängd som alla spolar lindades med. Spolarnas nyttolast jämfördes därpå med varandra över ett antal olika frekvenser, och spolen med den mest gynnsamma varvtal-radie-kvoten kunde bestämmas. Enligt ekvation (2.5), som säger att lyftkraften minskar med höjden, konstruerades spolarna till att ha så låg höjd som möjligt.

3.2.2 Ledande underlag

För att hitta det mest optimala underlaget för hoverboarden behövde aluminium och koppar jämföras. En viktig aspekt i denna jämförelse var att inträngningsdjupet ej fick påverka mätresultaten. Så länge inträngningsdjupet var mindre än tjockleken på den tunnaste plattan kunde de olika tjocka koppar- och aluminiumplattorna rättvist jämföras med varandra. Därför beräknades först inträngningsdjupet i respektive material teoretiskt innan försöken.

3.2.3 Styrning av magnetfält

Då magnetfält har lättare att ta sig genom material med hög permeabilitet undersöktes det om fältet kunde styras tätt inpå spolen med hjälp av material med denna egenskap. För att testa huruvida magnetfältets utspridning påverkade flödet, och i sin tur lyftkraften, användes små plattor av ferromagnetiskt material. På så sätt kunde spolens magnetfält koncentreras nedåt mot underlaget. För att maximera nyttolasten testades ferritplattorna i fem olika konstellationer. Konstellationerna valdes som de möjliga kombinationer av ferritplattor som gick att bygga tätt inpå spolen och ansågs vara intressanta att undersöka.

3.2.4 Nyttolastens strömberoende

En undersökning av strömmens påverkan på spolens nyttolast behövde utföras för att kunna avgöra om en stor ström skulle dirigeras till en spole, eller om det var fördelaktigt att köra mindre strömmar genom ett antal spolar vid realisering av hoverboarden. Därför utfördes en mätserie där spänningsaggregatet strömbegränsades i steg om fem ampere, från 60 ampere ner till 20 ampere. Detta för att verkställa hur nyttolasten var beroende av den ström som passerade genom spolen.

3.3 Kylningssystem

För att dämpa värmeutvecklingen i spolarna behövdes ett kylningssystem konstrueras. Då tidigare tester med en datorfläkt som kylningssystem utfördes, visade det sig att luft ej var ett tillräckligt bra kylningsmedium. Därför utfördes experiment som testade huruvida olje- och vattenkylning fungerade bättre som kylningssystem för hoverboarden. Dessa kylningsmedium valdes på grund av deras tillgänglighet.

3.4 Konstruktion av prototyp

För att undersöka hur projektet kunde skalas upp användes resultaten från tidigare test för att bestämma om fler än en spole skulle användas. Om detta var fallet behövde det undersökas hur spolarna skulle placeras och kopplas på hoverboarden. Detta kunde bestämmas genom att jämföra en spoles nyttolast med nyttolasten då två likadana spolar monterades på samma bräda. Likaså jämfördes nyttolasten då de två spolarna kopplades seriellt respektive parallellt.

4

Resultat

För att undersöka om en realisering av en hoverboard var möjlig, utfördes experiment både på att optimera nyttolasten men även på hur värmeutvecklingen i spolen kunde kontrolleras.

4.1 Optimering av nyttolast

För att uppnå maximal nyttolast för en spole gjordes fyra olika mätserier över nyttolast för att se hur den påverkades av systemets olika parametrar. De parametrar som testades var spolens geometri, frekvens och strömmen genom spolen.

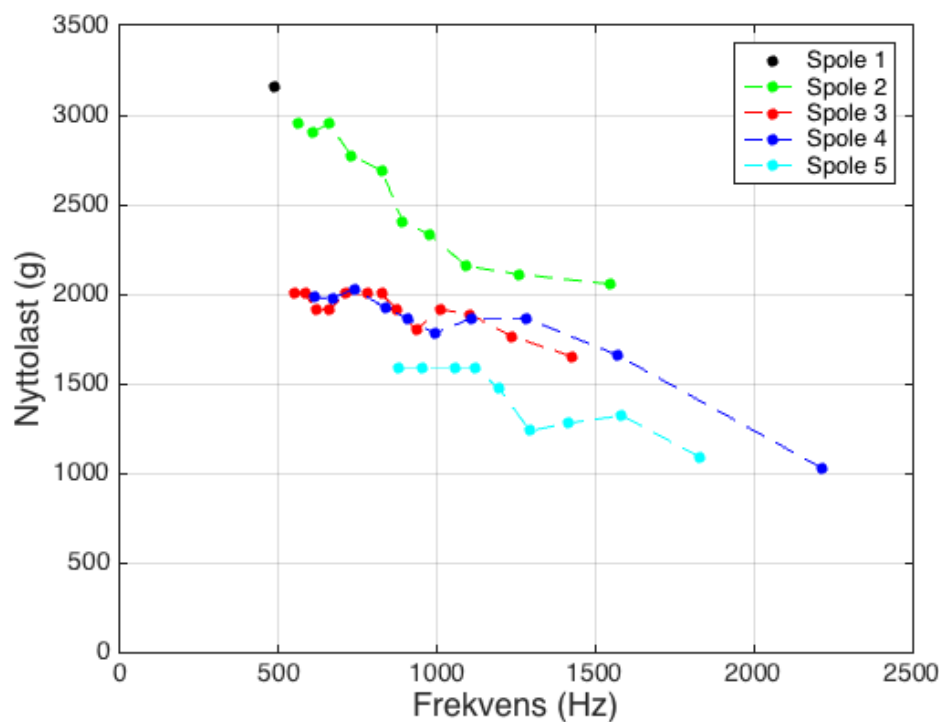
4.1.1 Spolens geometri

Alla sex spolar i tabell 4.1 testades för nyttolast över ett frekvensintervall som bestämdes av de kondensatorer som seriekopplades med spolarna. De olika spolarna hade olika förhållanden mellan varvtal och diameter, vilket skulle visa hur en längd koppartråd, 20 m, kunde utnyttjas mest effektivt. Resultatet visas i figur 4.1, där det syns att alla spolar hade högre nyttolast vid låga frekvenser. Det syns även att spole 1 och spole 2 hade högre nyttolast än de andra spolarna. I tabell 4.1 visas det att spole 1 och spole 2 har ett högt förhållande mellan varvtal och diameter. En lägre frekvens och ett högre varvtal-diameter-förhållande gav alltså generellt en högre nyttolast.

Tabell 4.1: Specifikationer för testade spolrar.

Namn	Diameter spole (mm)	Varv	Diameter koppartråd (mm)
Spole 1	100	57	1,5
Spole 2	150	44	1,5
Spole 3	200	32	1,5
Spole 4	250	24	1,5
Spole 5 *	90,155,175,255	9	1,5
Spole 6	210	22	2

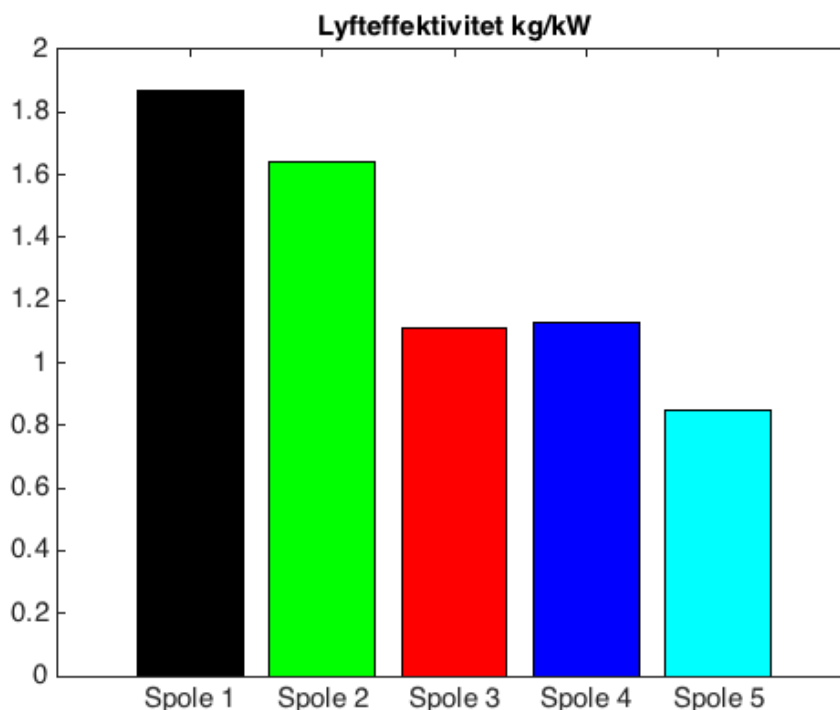
* Spole 5 bestod av fyra seriekopplade spolrar med olika diametrar inuti varandra.



Figur 4.1: Uppmätt nyttolast vid olika frekvenser för de testade spolarna. Spolarna varierade i geometri för att bestämma optimala varvtal-diameter-förhållande. Det syns se att nyttolasten är högre vid låga frekvenser. Det kan även ses att spole 1 och spole 2 lyfter större nyttolast än de andra spolarna.

Komplikationer uppstod då spole 1 skulle testas. Eftersom den hade en liten diameter var det svårt att balansera vikterna på spolen. Därför kunde nyttolasten endast mätas för en frekvens vilket kan ses i figur 4.1. Mätpunkten för spole 1 följer dock trenden att lägre frekvens och större varvtal-radie-förhållande gav en hög nyttolast.

Frekvensintervallet som spolarna testades över, översteg inte den frekvensen då inträngningsdjupet begränsar strömmen i koppartråden. Vid en högre frekvens hade strömmen begränsats till ytskiktet av tråden vilket hade ökat resistansen, detta beräknades med (2.6). Ineffekt vid alla mätningar dokumenterades och kunde användas till att beräkna en lyfteffektivitet, som mättes i kg/kW, se figur 4.2. Det visas också att spole 1 och spole 2 var bättre för att optimera lyftkraften med avseende på ineffekt. Spole 6 inkluderas ej i figurerna då den uppmätta ingående effekten ej var pålitlig.



Figur 4.2: Lyfteffektivitet vid maximal uppmätt lyftkraft för de testade spolarna i figur 4.1. Det syns att spole 1 och spole 2 har högst lyfteffektivitet.

4.1.2 Ledande underlag

Aluminium jämfördes med koppar för att bestämma vilket underlag som gav upphov till störst nyttolast. Dessa två material valdes på grund av en hög ledningsförmåga samt god tillgänglighet. Testerna ut-

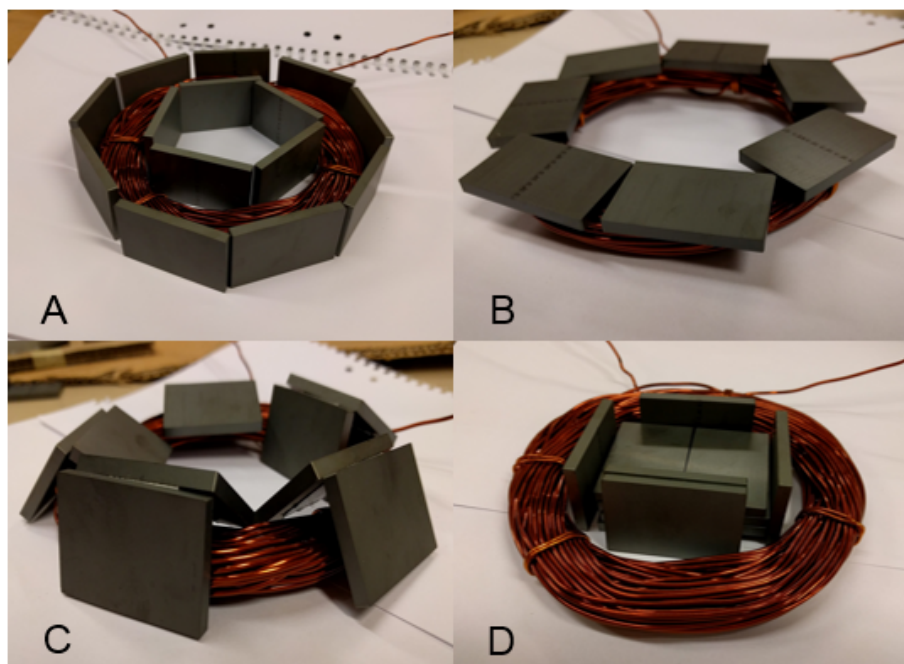
fördes på spole 6 med konstant ineffekt, se tabell 4.2. Spole 6 användes på grund av att denna var den enda spole som fanns tillgänglig vid detta skede i projektet. Genom (2.6) kunde det fastställas att underlagets tjocklek inte utnyttjades till fullo i något av försöken, med avseende på inträngningsdjup. En rättvis jämförelse mellan olika tjocklekar på underlaget kunde därför genomföras. Resultatet i tabell 4.2 visade att koppar som ledande yta är att föredra över aluminium, då nyttolast ska maximeras.

Tabell 4.2: Resultat för mätningar på nyttolasten då koppar och aluminium användes som underlag.

Material	Nyttolast (g)	Tjocklek (mm)
Koppar	2337	4
Aluminium	2223	8,5

4.1.3 Styrning av magnetfält

För att undersöka hur ferrit påverkar nyttolasten användes fem konstellationer av ferritplattor som visas i figur 4.3. Dessa konstellationer valdes för att undersöka hur magnetfältet på ett så effektivt sätt som möjligt skulle riktas mot det ledande underlaget. I figuren representerar A en ferritkonstellation bestående av inner- och ytterring. Konstellation B visar ett tak av ferritplattor, C visar en konstellation av ett triangulärt tvärsnitt och D en kärna. Ytterligare ett test med en kombination av A och B gjordes som härafter kallas konstellation AB.



Figur 4.3: Konstellationer av ferritplattor som undersöktes för att optimera nyttolasten.

För att kunna jämföra mot en referens gjordes även ett kontrolltest utan ferritplattor, resultatet visas i tabell 4.3. Alla sex mätningar gjordes på spole 2 med konstant ingående effekt. Detta på grund av att denna spole visade sig vara fördelaktig i tidigare tester på spolens geometri då den både gav en hög nyttolast samt gick att balansera vid mätningar.

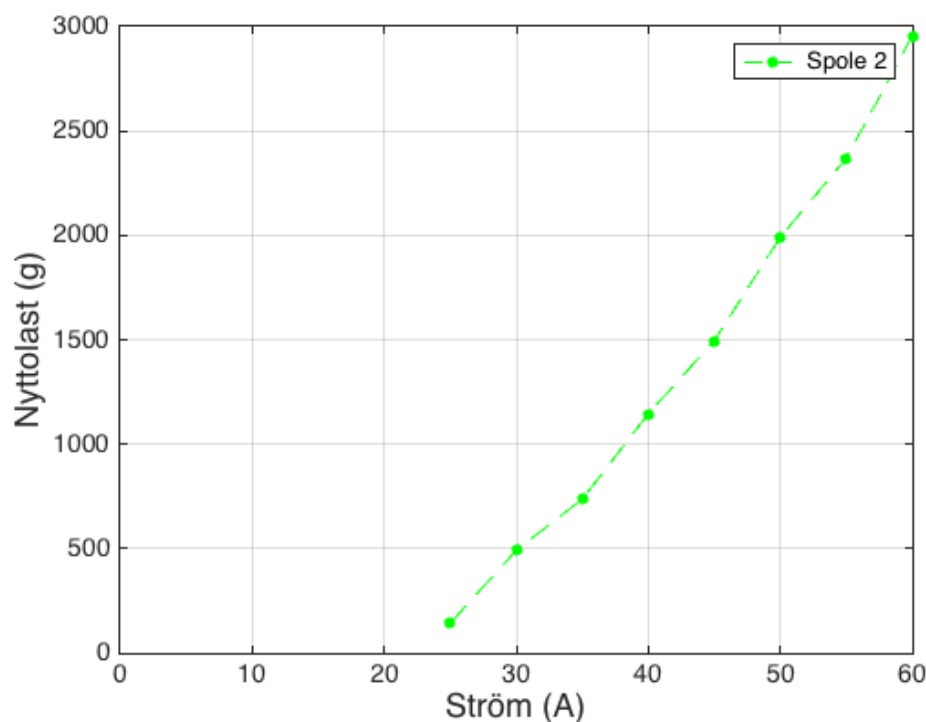
Tabell 4.3: Nyttolast för fem olika ferritkonstellationer och ett kontrolltest.

Ferritkonstellation	Nyttolast (g)	Vikt ferrit (g)
Kontrolltest	1910	0
A, Inner- och ytterring	2259	480
B, Tak	2035	216
AB, Inner- och ytterring med tak	2571	696
C, Triangulärt tvärsnitt	2675	384
D, Kärna	1490	394

Resultatet visade att det viktigaste vid användning av ferritplattor var att rikta maximal mängd av magnetfältet så att det omsluter spolen. Detta kan man se tecken på då ett tak adderas till konstellation B som då lyckas öka spolens nyttolast ytterligare i konstellation AB. Enbart tak-konstellationen ensam gav inte någon särskild ökning gentemot kontrolltestet. Det syns även att konstellation C är mycket bra då den åstadkommer en liknande omslutning som konstellation AB fast kräver färre ferritplattor och därmed mindre extra vikt. Maximalt ökade nyttolasten med ungefär 40 % genom användning av ferrit.

4.1.4 Nyttolastens strömberoende

Strömmen från strömaggregatet begränsades i steg om 5 ampere mellan 25 och 60 A. Spolen som användes i testet var spole 2 ty denna visat sig fördelaktig gällande nyttolast samt balansering av vikter. Resultatet visas i figur 4.4 och demonstrerar att nyttolasten har ett linjärt beroende av strömmen. Detta stämmer inte överens med ekvation (2.5) som säger att lyftkraften är proportionell mot strömmen i kvadrat. I (2.5) är det dock den totala lasten, det vill säga med spolens egenvikt inräknad, och inte enbart nyttolasten vilket är det som visas i figur 4.4.



Figur 4.4: Nyttolastens strömberoende, uppmätt med spole 2. Strömmen begränsades i steg om 5 ampere mellan 25 och 60 A.

4.2 Kylningssystem

Vatten och rapsolja testades som kylningsmedium för att se om dessa kunde kontrollera spolens temperatur bättre än luft. I försöket sänktes en provspole ned i kylningsvätskan, och tiden mättes till det att spolen nådde 120 °C. Denna temperatur valdes som måltemperatur för att det skulle ta lång tid nog för att minimera den mänskliga faktorn i tidtagandet. Ett kontrolltest gjordes även då ingen vätska användes för att kyla spolen. Då försöket med vatten som kylningsmedium ej gav upphov till temperaturer högre än 65 °C valdes denna temperaturen som sluttemperatur i mätningen. Resultaten kan ses i tabell 4.4. Från detta resultat fastställdes det att vatten är det bäst lämpade kylmediet av de alternativ som undersöktes. Detta stämmer överens med teoriavsnittet om värmeutvecklingen i spolen som sa att vatten

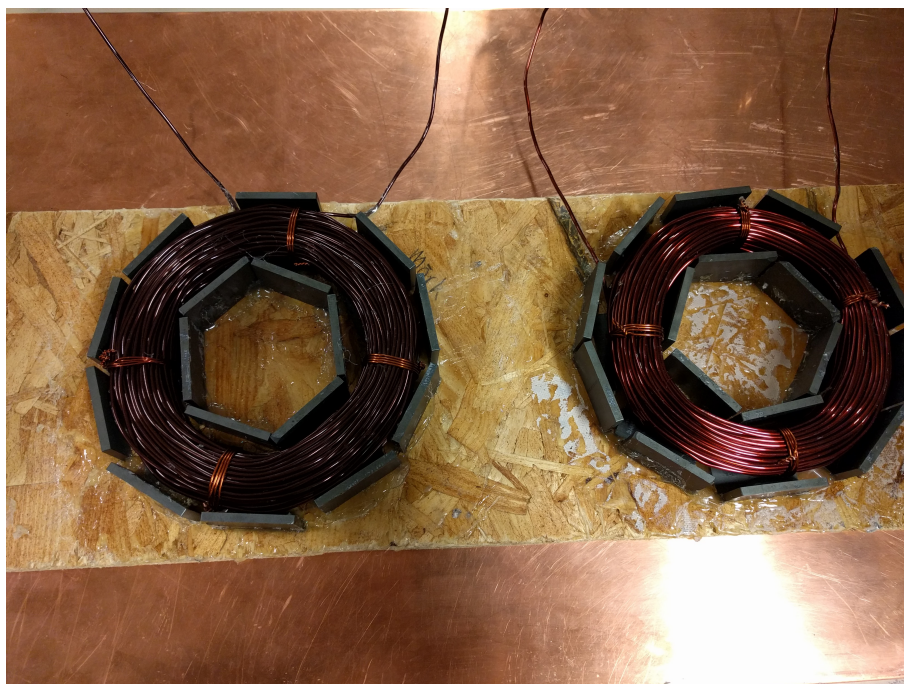
hade avsevärt bättre värmekapacitivitet. Vatten har även en fördel då den latent energi är högre jämfört med olja och vatten, vilken gör att extra energi krävs för att förångas vattnet.

Tabell 4.4: Värmeutveckling vid användning av olika kylningsmedier. Vatten höll lägre temperatur en längre tid en luft och rapsolja.

Kylningsmedium	Temp. Start (°C)	Temp. Slut (°C)	Tid (s)	Genomsnittlig värmeutveckling (°C/s)
Luft	25	120	13,5	7,04
Vatten	25	65	160	0,34
Rapsolja	25	120	62	1,53

4.3 Konstruktion av prototyp

Resultaten från projektets olika mätningar och tester ledde till konstruktionen av en prototypbräda, se figur 4.5, med dimensioner och parametrar enligt tabell 4.5.



Figur 4.5: En prototypbräda som konstruerats. Denna består av två spolar med en ferritkonstellation bestående av inner- och ytterring med tak, monterade på en bräda av trä. Prototypen visas underifrån.

Till de två spolarna valdes det att använda en tjockare tråddiameter. Detta för att minimera resistansen och på så vis kunna öka mängden varv samt därmed behålla en ström stor nog för att få en hög nyttolast. En lägre resistans ger även upphov till en skarpare resonanstopp. En så liten spoldiameter som möjligt valdes, i enlighet med resultaten från figur 4.1, med undre begränsning att det fortfarande skulle gå att rulla spolen ordentligt. Två spolar monterades på brädan för att öka den totala nyttolasten, göra den stabilare och för att utnyttja mer av den tillgängliga effekten. Individuella test gjordes först på spolarna A och B utan ferrit, och resultat från detta ses i tabell 4.6. Ferrit monterades även på plattan för att ytterligare öka nyttolasten. Den ferritkonstellation som användes var en kombination av A och B, se figur 4.3. Denna konstellation valdes trots att den ej var den mest fördelaktig då den var enklare att implementera på hoverboarden. Spolarna kopplades parallellt eftersom att en större nyttolast kunde uppnås då, trots en högre uppmätt lyfteffektivitet vid seriekoppling, se tabell 4.6. Då spolarna kopplades parallellt halverades induktanserna, som summerades vid seriekoppling. Detta ledde till att de parallellkopplade spolarna testades vid en mycket högre resonansfrekvens än vid seriekoppling, något som har visat sig ge lägre nyttolast.

Tabell 4.5: Specifikationer för den färdiga prototypbrädan.

Antal spolar	2, parallellkopplade
Ferritkonstellation	Inner- och yttering med tak
Nominell inre radie spolar (mm)	50
Nominell yttre radie spolar (mm)	75
Avstånd centrum-centrum (mm)	250
Varv spole A*	89
Varv spole B*	94
Tråddiameter (mm)	2
Total ström (A)	120
Spänning (V)	55,4
Aktiv ineffekt (W)	6648
Nyttolast (kg)	16
Lyfteffektivitet (kg/kW)	2,406

* Spole A och spole B lindades med samma trådlängd, varvtalen varierar på grund av att dessa var olika hårt lindade.

Tabell 4.6: Nyttolast vid test av prototypbrädans spolar, separat och sammankopplade, utan ferrit. Spole A och B kopplade parallellt gav störst nyttolast, men gav sämre lyfteffektivitet.

Spole	Nyttolast (kg)	Ineffekt (kW)	Ström in (A)	Lyfteffektivitet (kg/kW)
Spole A	6	2,6	60	2,3
Spole B	6	2,6	60	2,3
Spole A och B (parallellt)	11,4	6	120	1,9
Spole A och B (seriellt)	6,5	2,8	46	2,3

Från resultatet syntes det att prototypbrädan med ferrit hade en lyfteffektivitet på cirka 2,4 kg/kW och att den lyfte cirka 8kg per spole, se tabell 4.5. Detta ledde till att brädan vid en uppskalning skulle kunna ge en tillräcklig stor nyttolast till att lyfta en person. Det skulle krävas ungefär 10-15 spolar för att uppnå detta och motsvarande en ingående effekt mellan 35 och 50 kW.

5

Diskussion

Utifrån projektets resultat kommer det här att diskuteras kring huruvida dessa bevisade om det var möjligt att konstruera en hoverboard eller ej. Aspekter som metodval, mätosäkerheter samt framtida utvecklingar av projektet kommer även att diskuteras.

Genomgående för projektet har kylning varit en stor utmaning. Då projektet begränsades av vissa praktiska förhållanden, som den fysiska ytan på en hoverboard samt en tidsbegränsning, behövde ett någorlunda simpelt kylningssystem utvecklas. Resultatet från tester visade tydligt att det behövdes en annan kylningsmetod än endast luft. Av de lättillgängliga medium som enkelt kunde testas visade sig vatten ha en överlägsen kylningsförmåga, vilket är en ganska vanligt förekommande kylningsstrategi. Den vattenkylning som implementerades på hoverboarden bestod av två behållare av silvertejp fyllda med vatten som omslöt vardera spole. Eftersom hoverboarden svävade på en låg höjd kunde inte en tjockbottnad behållare användas till att omsluta spolarna då denna hade minskat brädans fria lyfthöjd. På grund av det sättet som vattenkylningen implementerades gavs inget rum till att kontinuerligt byta ut vattnet. Detta är en viktig faktor i de flesta vattenkylningssystem eftersom det effektiviserar kylningen. Om detta hade kunnat implementeras på hoverboarden hade det möjliggjort en längre användningstid. Dessutom gav vattenbehållarna inte plats för en stor volym vatten, vilket även detta försämrar vattenkylningen då en mindre volym vatten kan uppta mindre värme. Däremot hade en större volym vatten samt ett monterat pumpsystem med radiator ökat hoverboardens egenvikt och därmed minskat nyttolasten.

Vad resultatet även visade var att en fungerande hoverboard krävde en stor tillförd elektrisk effekt, se avsnitt 4.3. Vad detta medför är att om hoverboarden skall drivas med hjälp av batterier kommer det först och främst krävas en stor batterikapacitet. Dessutom, eftersom hoverboarden är så effektkrävande, kommer åktiden vara kort.

Vid realisering av en hoverboard skulle det krävas en stor ström att fördela över flera parallellkopplade spolar. Seriekopplade spolar är troligen inte aktuellt då den spänning som skulle behövas för att driva en tillräcklig ström genom seriekopplade spolar är mycket stor. En så stor spänning är svår att bygga upp samt farlig att handskas med om man ska stå på hoverboarden.

Angående nyttolastens strömberoende avviker våra resultat från teorin, då våra test visar på ett linjärt beroende medan teorin säger att utvecklad kraft skall vara proportionell mot strömmen i kvadrat. I ekvation 2.5 ingår det en faktor som är beroende av spolens geometri samt dess avstånd från underlaget. Det betyder alltså att det avvikande linjära beteende som våra resultat visar kan bero på hur spolen är designad. Just avståndet till det ledande underlaget visade sig genom hela projektet vara något som påverkade nyttolasten hos spolarna påtagligt. Under tidiga stadier av projektet då spolar med olika geometrier konstruerades märktes en signifikant skillnad i nyttolast mellan spolar som var olika höga, alltså att de översta varven på vissa spolar hade ett större avstånd till underlaget än på andra spolar. Spolar med högre höjd, och därmed med varven mindre koncentrerade nära underlaget, visade signifikant lägre nyttolast än spolar med samma mängd koppartråd fast med lägre höjd och som var mer kompakta. Därav konstruerades de sex spolar som användes till de viktiga experiment i projekten med en låg höjd.

Från tabell 4.3 syns det tydligt att en introduktion av ferrit som styrning av magnetfältet gav en positiv inverkan på nyttolasten, vilket även överensstämmer med teorin. Dessutom visar resultatet att konstellationer som omsluter spolen, och på så sätt riktar mer av det magnetiska fältet nedåt mot underlaget, ger ytterligare positiv inverkan på nyttolasten. En specialdesignad ferritkonstellation där plattorna hade

omslutit en större del av spolen, och framförallt koncentrerat och riktat fältet nedåt, hade troligtvis kunnat öka nyttolasten ytterligare. De rektangulära ferritplattor som fanns tillgängliga i projektet hade inte en lämplig form för att kunna omsluta en cirkulär spole.

5.1 Mätosäkerhet

Vi har valt att inte beräkna mätosäkerhet för varje enskilt mätredskap eftersom den mänskliga faktorn främst vid nyttolasttesten har påverkat experimenten i en större grad. Dessutom, utifrån syftet, är mätosäkerhetsberäkningar på varje enskilt mätredskap inte nödvändigt vid en undersökning om en hoverboard kan konstrueras. Metoden som användes för att belasta spolarna i nyttolastsmätningar gav upphov till stora mätosäkerheter, delvis på grund av den låga upplösning på den viktsats som användes och delvis på grund av balanseringsproblem i test-riggen. Som belastning användes tråklossar, på grund av att materialvalet ej påverkar spolens induktans, med massa från 50 till 600 gram. Detta innebar att mätosäkerheten vid vissa mätningar uppgick till 5 procent, då mätningarna resulterade i siffror i storleksordningen 1000 gram. En något felplacerad belastning kunde innebära att spolen vid en kantpunkt skapade friktion mot pappersarket, vilket ledde till att försöket ej godkändes.

Då vi ej i alla försök försäkrade oss om att kretsen var helt i resonans, var den ström som aggregatet matade med inte alltid pålitlig. Den ström som aggregatet visar på dess display är endast aktiv effekt, vilket ej skulle stämma ifall kretsen skulle konsumera eller producera reaktiv effekt. Något som vi kunde ha använt oss av för att verifiera värdena hade varit att koppla in kretsen till ett oscilloskop. Då hade det kunnat gå att observera spänningen över spolen och den över kondensatorerna. På så sätt hade det gått att urskilja när kretsen var i resonans genom att se när dessa spänningar tar ut varandra, alltså att den resterande spänningen är noll. Genom att bygga en oscillator, som genom en komparator styr frekvensen så att kretsen hela tiden befinner sig i resonans, kunde detta problem minskas.

Spolens värmeutveckling innebar också en stor mätosäkerhet. Då samtliga nyttolastförsök gjordes med luft som kylningsmedium, kunde värmeutvecklingen ej kontrolleras tillräckligt för att få stabila mätresultat, se tabell 4.4. Då värmen i koppartråden ökade medförde det att dess resistans ökade, vilket i sin tur minskade strömmen som passerade genom denna. Detta ledde till att nyttolasten avtog kraftigt under mätningarna, som ibland tog uppemot en minut att genomföra.

5.2 Metodik

Metodiken för projektet grundades i praktiska undersökningar och mätserier. Ett annat tänkbart scenario hade varit att utgå från teoretiska beräkningar och fortsättningsvis simulera utifrån dessa. Med denna metodiken hade en färdig hoverboard först kunnat simuleras så att den uppnått den optimala nyttolasten innan den realiserades. Detta hade troligvis hjälpt vid optimeringen av nyttolasten eftersom det hade krävts färre tidskrävande praktiska experiment. Simuleringar hade inte heller behövt vara begränsade av test-riggen. Då skulle till exempel ett helt frekvensintervall kunnat testats istället för enstaka mätvärden. Dock hade själva simuleringen varit tidskrävande att konstruera. Dessutom hade vissa fenomen varit problematiska att simulera jämfört med att genomföra praktiskt, som till exempel hur värmeutvecklingen beter sig.

Med den metodik som användes blev vissa tester på nyttolast besvärliga att utföra. Framförallt var det som tidigare nämnt svårt att balansera viktsatsen. Ett alternativt tillvägagångssätt att mäta nyttolast på hade varit genom att mäta den magnetiska flödestätheten. Detta hade kunnat utföras genom att använda en gaussmeter, vilket är ett mätinstrument som kan mäta den magnetiska flödestätheten. Alternativt en mättransformator, likt den i oscillatoren, som kan mäta den spänning som induceras, vilken är proportionellt mot flödestätheten. Denna metod hade dessutom kunnat fungera som en verifiering av de resultat som uppnåddes då brädan belastades med vikter. En nackdel med denna metod är dock att flödestätheten varierar med ti-

den. Detta medför att mätvärdet på flödet kan fluktuera, beroende på vart mätningen sker i spolen. Sådana mätningar hade haft en stor mätosäkerhet. Det hade även inneburit svårigheter vid realiseringen av denna mätmetod då spolen svävar vid olika höjd beroende på dess resonansfrekvens. Denna höjd skulle då behövt vara konstant för alla de olika mätningarna.

5.3 Alternativa lösningar

En annan intressant lösning att undersöka hade varit att konstruera en hoverboard likt den Lexus skapat, alltså med användning av supraleddare. Möjligtvis hade en större nyttolast då kunnat utvinnas ur hoverboarden. Om det i framtiden hade gått att kyla supraleddare med ett mer hanterbart medium än flytande kväve, eller om detta fenomen kunde uppnås vid högre temperaturer, vore detta en bättre lösning för en hoverboard än elektrodynamisk suspension. I så fall skulle det ha ett bättre kylsystem och dessutom ej behöva en så stor ingående elektrisk effekt. Däremot behöver en sådan hoverboard en specialdesignad räls med magneter som riktar fältet så att hoverboarden drivs framåt. Elektrodynamisk suspension kräver endast ett ledande underlag vilket det teoretiskt borde vara lättare att bygga ett transportsystem eller en skatepark utav.

Även Hendos variant på en hoverboard med roterande permanentmagneter hade varit intressant att jämföra med vårt projekt, då denna lösning bygger på tekniker snarlika projektets. Med Hendos lösning hade problemet med kylning till större del försvunnit, då värmeutvecklingen i dess elmotorer med all sannolikhet är lägre än vad som uppmätts i spolarna under projektet. Batterierna på Hendos bräda driver fyra elmotorer och den klarar av att lyfta en vuxen person, vilket betyder att en mycket högre lyfteffektivitet fås för deras hoverboard än vår.

5.4 Vidare utveckling

Projektet innefattade flertalet variabler som påverkade hoverboarden på olika sätt. Ytterligare tester hade kunnat utföras för att optimera hoverboarden. För vidare optimering hade det till exempel kunnat utföras en undersökning om nyttolasten fortsatte att öka med lägre frekvens eller inte. Detta kunde, på grund av begränsad tillgänglig kapacitans, inte realiseras under projektet. Det hade varit intressant att se vid vilken frekvens för spolen som strömmen började få likströmskaraktär, detta för att undersöka om, och till vilken gräns, nyttolasten försätter att öka med minskad frekvens.

5.5 Övriga användningsområden

En intressant aspekt att undersöka är om denna metod, att få en nyttolast att sväva, kan appliceras inom andra områden. Det skulle troligtvis kunna underlätta vid situationer där tunga objekt behövs flyttas horisontellt. Då ingen friktion förekommer kan man tänka sig att vissa situationer blir mer energieffektiva.

6

Slutsats

Spolens värmeutveckling leder till att en kylningsanordning måste konstrueras för att hoverboarden skall kunna köras en längre stund. Våra tester visade att det går att reducera spolens värmeutveckling kraftigt genom att använda ett kylmedium annat än luft.

Vid stora strömmar, upp emot 120 A, uppnåddes en hög lyfteffektivitet, upp emot 2,4 kg/kW, genom optimering av spolarna. Trots den höga lyfteffektiviteten som uppnåddes krävdes en väldigt stor ingående elektrisk effekt.

Våra resultat tyder alltså på att det går att konstruera en hoverboard som svävar med hjälp av elektrodynamisk suspension. Om en effekt-tålig växelriktare konstrueras samt om värmeutvecklingen kan styras, är det möjligt att en hoverboard kan realiseras.

På grund av ovan nämnda problem skulle hoverboarden bli stor till ytan, få begränsad användningstid och endast kunna användas på en yta speciellt avsedd för hoverboarden. Detta medför att en realisering av våra resultat inte skulle medföra tillräcklig funktionalitet, i jämförelse med Marty Mcflys hoverboard, för att dessa brister skall kunna förbises.

Litteraturförteckning

- [1] BBC News, "Levitating magnetic hoverboard unveiled", *BBC News*, augusti 2015. [Online]. Tillgänglig: <http://www.bbc.com/news/technology-33785285>, 2016-05-16.
- [2] O. Beckman, "Meissnereffekten", *National Encyklopedin*, januari 2016. [Online]. Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/meissner-effekten>, 2016-05-16.
- [3] O. Beckman, "Lenz lag", *National Encyklopedin*, januari 2016. [Online]. Tillgänglig: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/lenz-lag>, 2016-05-16.
- [4] D.G. Henderson, "Magnetic levitation of a stationary or moving object," US Patent 14/069,359, Abbrev. september 18, 2014. [Online]. Tillgänglig: <http://www.google.com/patents/US20140265690>, 2016-05-17.
- [5] D. Wynn and N. Hill, "Review of potential radical future transport technologies and concepts", *EU Transport GHG: Routes to 2050*, juni 2010. [Online]. Tillgänglig: <http://goo.gl/eySq97>, 2016-05-16.
- [6] D. M. Wroughton, G. Comenetz, P. H. Brace and J. C. R. Kelly E. C. Okress¹, "Electromagnetic Levitation of Solid and Molten Metals," *Journal of Applied Physics*, vol. 23, no. 5, p. 8, maj 1952. [Online]. Tillgänglig: <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/jap/23/5/10.1063/1.1702249>, 2016-05-16.

- [7] T. Kawasaki, T. Yagai, T. Hamajima and M. Tsuda, "Improvement of Levitation Force Characteristics in Magnetic Levitation Type Seismic Isolation Device Composed of HTS Bulk and Permanent Magnet," *Journal of Physics*, vol. 97, s. 6, 2008. [Online]. Tillgänglig: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/97/1/012104/pdf>, 2016-05-16.
- [8] C. Nordling, J. Österman, *Physics Handbook*, 8 uppl. Lund, Sverige: Studentlitteratur AB, 2012.
- [9] C. Kittel, "Superconductivity" i *Introduktion to Solid State Physics*, 8 uppl. New York: Wiley & Sons, 2005, s. 259-298.
- [10] M. Prigg, "Lexus shows off hoverboard but admits it will only run on special tracks", *Daily Mail*, augusti 2016. [Online]. Tillgänglig: <http://goo.gl/pvhbtH>, 2016-05-16.
- [11] C. Pineau, "Interview of the Chief visionnary of Hoverboard : Greg Henderson", *Les connectés*, februari 2015. [Online]. Tillgänglig: <http://goo.gl/L20VMQ>, 2016-05-17.
- [12] Hobbyking, "Turnigy nano-tech 3300mah 10S 65 130C Lipo Pack", *Hobbyking*. [Online]. Tillgänglig: http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/__19137__Turnigy_nano_tech_3300mah_10S_65_130C_Lipo_Pack.html, 2016-05-16.
- [13] *AUIRLS3036-7P: HEXFET Power MOSFET*, München: Infineon Technologies AG, 2015; <http://www.infineon.com/dgdl/auirls3036-7p.pdf?fileId=5546d462533600a4015355bed38b158a> [Hämtad: 2016-05-16].
- [14] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2 uppl. Edinburgh, England: Pearson Education, 2014, s. 235, 249-250, 283-284, 310, 327, 338-341, 369-371
- [15] *LF147/LF347: Wide Bandwidth Quad JFET Input Operational Amplifiers*, National Semiconductor, 2000; <https://www.national.com>

[//www.elfa.se/Web/Downloads/ta/_e/czLFx47_Data_E.pdf](https://www.elfa.se/Web/Downloads/ta/_e/czLFx47_Data_E.pdf)
[Hämtad: 2016-05-16].

- [16] *CD4046B Types: CMOS Micropower Phase-Locked Loop*, Dallas: Texas Instruments, 2003; https://www.elfa.se/Web/Downloads/_t/ds/cd4046b_eng_tds.pdf [Hämtad: 2016-05-16].