



CHALMERS

Induktiv laddning av batteridrivna fordon under drift

Examensarbete inom Högscoleingenjörprogrammet i Elektroteknik

ANDREAS ERIKSSON
SIMON ROHLÉN

Förord

Denna rapport är ett resultat av ett examensarbete på elektroingenjörsprogrammet vid Chalmers Tekniska Högskola. Examensarbetet omfattar 15 hp och utförs vid institutionen för Data och Informationsteknik på Chalmers Tekniska Högskola.

Vi vill tacka vår handledare Sakib Sisteck för stort stöd under examensarbetet. Vi vill även tacka Göran Hult för hjälp under arbetet.

Sammanfattning

Intresset för elbilar och även utvecklingen av dessa har ökat kraftigt de senaste åren. Flera väljer att köpa elbil istället för traditionell bil med förbränningsmotor. Elbilen begränsas dock fortfarande av relativt korta körsträckor och långa laddningstider, båda dessa egenskaper bör utvecklas för att göra elbilen mer konkurrenskraftig. En av de största fördelarna med elbilar gentemot bensindrivna bilar är miljöaspekten, elbilar bidrar generellt med mycket mindre växthusgaser till atmosfären än vad bensindrivna gör.

Detta projekt syftar till att utveckla en induktiv laddningsteknik för batteridrivna fordon under drift, vilket kan minska de negativa aspekterna med laddning och körtid eftersom att elbilen inte behöver stanna för att laddas utan laddningen utförs under körningen. Projektet resulterade i en krets där både ett batteri kunde laddas och en motor kunde drivas samtidigt med energi överförd trådlöst från en primärkrets samt ett system för styrning av spolarna. Kretsen som konstruerades bestod av en primärkrets med en oscillator, förstärkare och en primärspole. Primärkretsen överför energi till en sekundärkrets som sedan laddar ett batteri och driver en motor. Sekundärkretsen består av en sekundärspole, diodbryggan och en spänningsregulator. Efter regulatören kopplades en motor samt en batterikontrollenhet som laddade ett batteri. Styrsystemet konstruerades av en Arduino Uno, ett reläkort samt avståndsgivare. Avståndsgivarna skickar signaler som beror på vilket avstånd sekundärspolen befinner sig från primärspolen till Arduinon, dessa signalerar behandlas av Arduinon som sedan ger signaler till ett reläkort som styr matningen av spolarna från primärkretsen. Arbetet har utförts vid Institutionen för data- och informationsteknik på Chalmers Tekniska Högskola.

Summary

The interest and development of electric cars has increased greatly in the recent years. Many people choose to buy electric cars instead of traditional cars with a combustion engine. But the electric car is still limited with a relative short travel distances and long loading times, both of these traits needs to be developed in order to make the electric car more competitive. One of the greatest advantages of the electric car is the environmental aspect; electrical cars contribute less than cars with combustion engines to the emission of greenhouse gases.

The project aims to develop an inductive charging technology for battery-powered vehicles while driving, a technology that can decrease the negative traits of charging and travel distances since the car would be charged during driving. The project resulted in a circuit where both a battery could be charged and the engine could be operated simultaneously by energy transmitted wireless from a primary circuit and a system to control the coils used to transmit the energy. The circuit constructed consisted of a primary circuit with an oscillator, amplifier, and a primary coil. The primary circuit transfer energy to a secondary circuit which then charges the battery and runs the engine. The secondary circuit consists of a secondary coil, diode bridge and a voltage regulator. After the voltage regulator a motor and a battery control unit which charges a battery was connected. The control system was constructed of an Arduino Uno, a relay card and distance sensors. The distance sensors send signals depending of the distance from the secondary coil to the primary coil to the Arduino. These signals are processed by the Arduino, the Arduino then sends signals to the relay card which controls the feeding of energy to the primary coils. The project was carried out at the Department of Computer Science and Engineering at Chalmers University of Technology.

Innehåll

1. Inledning.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte.....	1
1.3 Mål.....	1
1.4 Avgränsningar	2
1.5 Precisering av frågeställningen.....	2
2. Teoretisk referensram	3
2.1 Volvo	3
2.2 Korea Advanced Institute of Science and Technology	3
2.2 Trådlös energiöverföring via elektromagnetisk induktion	4
3. Relevant teori för arbetet	5
3.1 Trådlös energiöverföring	5
3.2 Maxwells ekvationer.....	5
3.2 Spolar.....	5
3.3 Ömsesidig induktans	6
3.4 Induktiv koppling samt frekvensen och strömmens påverkan	6
3.5 Kopplingsfaktor	7
3.6 Q-värde	7
3.6 Energiöverföring och effektivitet	7
3.7 Voltage controlled oscillator	7
3.8 Phase Locked Loop	7
3.9 74HC/HCT4046A.....	8
3.10 Likriktare	9
3.11 Förstärkare	10
3.12 Operationsförstärkare	11
3.12.1 Slew rate	11
3.12.2 Bandbredd.....	11
3.12.3 Icke-inverterande förstärkarkoppling	12
3.13 Klass B effektförstärkare.....	12
3.14 Filter	13
4. Primärkrets	14
4.1 Hitta optimal frekvens	14
4.2 Oscillator	14
4.3 XR2209CP-F	14
4.4 74HC/HCT4046A.....	15
4.5 74HC/HCT4046A med OP-förstärkare	15

4.6 LM318N med Klass B push-pull förstärkare	17
4.7 LT1206CN8#PBF samt LT1210CT7#PBF med och utan klass B förstärkare. ...	17
4.8 Primärspole.....	17
5 Styrning	18
5.1 Funktionsförklaring	18
5.2 Principskiss.....	18
5.3 Sensorer	19
5.4 Kontrollenhet.....	19
5.5 Reläkort	20
6. Sekundärkrets	21
6.1 Sekundärspole.....	21
6.2 Likriktare	21
6.3 Spänningsregulator	21
6.4 Motor	22
6.5 Batterikontrollenhet.....	22
6.6 Batterier	22
6.6.1 Jämförelse och val av batterier	22
7. Fullständigt system med styrsystem och primärkrets.....	24
7.1 Testbanan med styrsystem och primärkrets med LT1210 och slutsteg.....	24
8 Tester	25
8.1 Frekvensområdes test	25
8.2 Jämförelse av koppling med eller utan klass B förstärkare.	26
8.3 Test av styrsystem	27
8.4 Mätning av ström och spänning samt verkningsgrad hos spänningsregulator vid följande tester	27
8.5 Test av sekundärspolar	27
8.6 Test av olika frekvenser.....	28
8.7 Test av avstånd	28
8.8 Test av dubbla spolar.....	29
8.9 Test av testbana med styrsystem och primärkrets.	30
9 Framtid: lösningar och problem	31
10 Miljöaspekter.....	32
10.1 Magnetfält och Elektriska fält	32
10.2 Allmänna rekommendationer	32
11 Resultat/Slutsats	34
12 Kritisk diskussion	36
13 Referenser.....	37
Bilaga 1.....	39

Bilaga 2.....	40
Bilaga 3.....	43

1. Inledning

Detta projekt är ett arbete vid institutionen för Data- och informations teknik. Projektet avser att utveckla teknik för trådlös laddning av batterier hos eldrivna fordon under drift. Fokus på arbetet kommer att ligga på att identifiera faktorer som påverkar effektivitetsgraden vid induktiv energiöverföring för att sedan optimera tekniken.

1.1 Bakgrund

Elbilens barndom går tillbaka till i slutet av 1800-talet och var till en början den vanligaste typen av personfordon. Elbilen konkurrerades dock ut av bensindrivna bilar under det tidiga 1900-talet på grund av längre körsträckor och snabbare tankningstider [1]. Men i takt med att världens oljereservinar och transportsektorns höga utsläpp har intresset för elbilar och hybridbilar återigen ökat. Emellertid besitter elbilar negativa egenskaper som måste lösas för att kunna göra elbilar ännu mer konkurrenskraftiga. Främsta problemet är att de inte kan användas under långa perioder då de måste laddas ofta på grund av begränsade möjligheter att lagra energi och att körtiden därmed blir begränsad. Flera företag driver nu projekt för att utveckla en teknologi som möjliggör att elbilar med hjälp utav induktiv laddning skall kunna laddas under körning, detta eliminerar de negativa egenskaperna då elbilen skulle kunna köras utan avbrott för laddning.

Induktion upptäcktes av Michael Faraday och Joseph Henry på 1830-talet oberoende av varandra [2]. Induktion innebär att ström induceras i en elektrisk ledare på grund av ett varierande magnetfält i ledarens omgivning. Induktiv laddning används idag till flera olika ändamål till exempel laddning av eltandborstar, laddning av mobiltelefoner och laddning av kontroller till tv-spel. På senare tid har även fordonsindustrin undersökt lösningar för trådlös laddning av elbilar. Fördelar med induktiv laddning är att den eliminerar behovet att ha kablar vilket har flera positiva aspekter och att komponenter kan hålla längre då slit från att kablar kopplas till och från elimineras. En annan fördel är att induktiv laddning möjliggör laddning av elbilar under drift, vilket skulle göra elbilar mer konkurrenskraftiga.

1.2 Syfte

Projektet syftar till att utveckla en laddningsteknik för batteridrivna fordon under drift.

1.3 Mål

Projektet ska leda till en krets som via induktion kan ladda ett batteri och driva en DC motor samtidigt.

1.4 Avgränsningar

Detta projekt avgränsas endast till att behandla energiöverföringen från laddningskretsen till elbilen, elbilens övriga komponenter behandlas inte i detta projekt. Teknik för trådlös kommunikation mellan vägbana och bil i en verklig modell kommer inte att behandlas. Projektet avgränsas även genom att enbart använda en primärkrets. Lindning av spolar kommer inte heller att ingå i arbetet utan dessa kommer att köpas färdigkonstruerade. Vid val av batterier kommer endast de egenskaper som har betydelse för modellen som byggs i detta projekt att utvärderas, batterival för fullskaliga elbilar kommer inte att behandlas.

1.5 Precisering av frågeställningen

Projektet kan delas in i tre stycken deluppgifter:

- Design och konstruktion av sändarenhet bestående av oscillator samt förstärkare.
- Design och konstruktion av mottagarenhet som kan likrikta och ladda batterier.
- Optimera designen av dessa för att få hög effektivitetsfaktor som möjliggör laddning av ett batteri samtidigt som batteriet är belastat och driver fordonet.

Huvuduppgiften med detta arbete är att optimera effektivitet vid energiöverföringen. Det finns flera olika faktorer som påverkar dessa. Målet är hitta dessa faktorer och optimera dem för att nå en hög effektivitetsgrad. Förhållanden att undersöka är frekvens, spolar och avstånd mellan spolarna.

2. Teoretisk referensram

Det finns forskning om liknande tekniker som den i denna rapport. Många har fokuserat på laddningar som utförs när bilen står still och energin överförs från en laddningsplatta i ett garage till exempel. Men det har även utförts forskning och projekt där laddningen sker när fordonet är i drift. Nedan redovisas några av de arbeten som inspiration har tagits från för detta arbete.

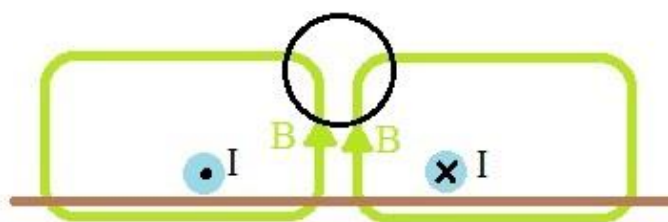
2.1 Volvo

Volvo Car Group har sett över möjligheten att utveckla induktiv laddning hos sina elbilar. I projektet har en laddningsplatta bestående av primärkrets med en spole utvecklats. Laddningsplattan genererar ett magnetfält som bilens sedan kan fånga upp. Denna laddningsplatta laddar dock bara bilen i ett stationärt tillstånd. På senare tid har man även börjat undersöka hur laddning under drift skulle kunna implementeras. Tillsammans med trafikverket ska Volvo undersöka möjligheten att ladda busslinjer i Göteborg. År 2015 planeras att en 300-500 meter lång testladdningsbana ska konstrueras i centrala Göteborg. Testbanan är ett viktigt steg för att visa att tekniken fungerar så man kan få politiker engagerade och satsa pengar på utveckling av tekniken. År 2015 kommer Volvo även öppna en busslinje kallad ElectriCity mellan Chalmers i Johanneberg och Chalmers på Lindholmen för att ge mer kunskap om laddningsteknik hos eldrivna fordon[3].

2.2 Korea Advanced Institute of Science and Technology

I ett projekt som drivs av det sydkoreanska universitetet Korea Advanced Institute of Science and Technology har en färdig produkt skapats där en eldriven buss åker längst en bana på 2,2 km i Seoul Grand Park och laddas induktivt. Den del av banan som är försedd med laddningsenheter är sammanlagt 372,5 m och uppdelad på fyra stycken sektioner. De fyra sektionerna är uppdelade så att en jämn laddning kan hållas längs hela banan. När bussen befinner sig över laddningsenheterna laddas batterierna i bussen och även motorn drivs av den överförda energin [4].

Systemet är konstruerat så att det går två stycken strömförande ledare i laddningsenheten, dessa två ledare är placerade så att strömmen går i motsatt riktning gentemot den ledare som ligger parallellt med denna, se figur (1). Detta gör att fältets styrka formas så att det är starkast vid mitten och att det blir lite läckage vilket är en stor del av detta arbete. De har en verkningsgrad på ca 80 % vilket kan anses som högt i sammanhanget. Det framgår i deras rapporter att formningen av det elektriska fältet har en stor påverkan på den höga verkningsgraden. Systemet matas med en växelspanning med en frekvens på 20 kHz som är systemets resonansfrekvens [5].



Figur 1. Illustrering av form av fält, ström går i ledaren till höger med riktning inåt och i ledaren till vänster med riktning utåt. Detta skapar fält som representeras av de gröna pilarna. Vägbanan representeras av den bruna linjen. Området inom den svarta cirkeln är området där mottagarenheten kan ta emot fältet och inducera en spänning.

För att kunna överföra den effekt som krävs för att driva bussen och ladda batterierna i bussen krävs det höga fältstyrkor, dessa fältstyrkor är högre än vad som är tillåtet att människor utsätts för. Systemet har skyddats genom att installera metallplattor i vägbanan för att minska läckaget av det elektriska fältet och även i botten av bussen för att skydda passagerarna som sitter i bussen mot fältet [6].

2.2 Trådlös energiöverföring via elektromagnetisk induktion

Examensarbetet *Trådlös energiöverföring via elektromagnetisk induktion* av Ali Ansari och Neda Backman för Chalmers behandlar samma frågeställning som i detta projekt och denna rapport kan ses som en fortsättning på Ansari och Backmans arbete. I detta arbete testas olika modeller av primärkretsen, dels en Colpitts oscillator och även Schmitt-trigger oscillator med olika förstärkare. Även olika modeller av spolar konstruerades och testades. Den högsta verkningsgrad som uppmättes i detta arbete var runt 10 % när man matade primärspolarna med 0,5 W via en Colpitts oscillator [7].

3. Relevant teori för arbetet

3.1 Trådlös energiöverföring

I detta arbete kommer energiöverföringen mellan primär och sekundärkretsen att ske via induktion. Induktion skapas då två ledare utsätts för ett varierande magnetfält. Induktion kan härledas matematisk via Maxwells ekvationer.

3.2 Maxwells ekvationer

Maxwells elektromagnetiska ekvationer är partiella differentialekvationer som beskriver elektriska och magnetiska fält.

Gauss lag för det elektriska fältet beskrivs av ekvation (3.1) och säger att den totala laddning som finns innanför en sluten yta är lika med integralen av den elektriska flödestätheten över hela ytan.

$$\oiint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (3.1)$$

Den andra av Maxwells ekvationer är Gauss lag för magnetism och beskrivs av ekvation (3.2). Ekvationen säger att om man tar vilken yta som helst och integrerar magnetfältet över den ytan blir det noll.

$$\oiint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (3.2)$$

Maxwells tredje ekvation är Faradays induktionslag. Den beskrivs i ekvation (3.3) och är den mest intressanta i detta arbete. Ekvationen säger att ett varierande magnetfält skapar ett elektriskt fält. Som konsekvens induceras det en spänning i en elektrisk ledare om den utsätts för ett varierande magnetfält.

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t} \quad (3.3)$$

Den fjärde och sista av Maxwells ekvationer är Ampères lag som beskrivs av (3.4). Ampères lag säger att ett elektriskt fält och en ström kan skapa ett magnetiskt fält.

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 J + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \quad (3.4)$$

3.2 Spolar

En spole är en tråd, oftast bestående av koppar, som är lindad i en spiral (se figur 2). En spoles främsta egenskap är att den kan lagra energi i form av ett magnetiskt fält. När ström flyter genom en elektrisk ledare, till exempel en tråd, skapas ett magnetfält enligt Ampères lag. Förhållandet mellan magnetiskt flöde och strömstyrkan i en krets kallas självinduktans enligt ekvation (3.5) [8].

$$L = \frac{\Phi}{i} \quad (3.5)$$

När man lindar en tråd i en spiral med flera varv får man ut ett starkare magnetiskt fält. Ett viktigt användningsområde för spolar är att de kan överföra energi trådlöst via en induktiv koppling.



Figur 2. Spole som kommer användas i projektet [17]

3.3 Ömsesidig induktans

Ömsesidig induktans skapas när en strömförändring i en spole inducerar en spänning i en annan spole. Den ömsesidigt induktansen är ett mått på koppling mellan två spolar och ges av Neumanns formel. Den ömsesidiga induktansen kan ges av formeln (3.6) [9].

$$M_{12} = N_1 N_2 P_{12} \quad (3.6)$$

I denna formel är M_{12} den ömsesidiga induktansen mellan två spolar. N_1 och N_2 är antalet varv hos respektive spole. P_{12} är kopplingens permeans vilket är det inverterade värdet av reluktansen. Permeansen beror på permeabiliteten av materialet, tvärsnittarean och längden av ledaren. Detta leder till att om avståndet mellan spolarna ökar minskar permeansen och på så sätt även den ömsesidiga induktansen.

3.4 Induktiv koppling samt frekvensen och strömmens påverkan

Induktiv koppling uppstår när två eller flera spolar kopplas induktivt och ett energiflöde uppstår mellan spolarna.

Den inducerade spänningen i den spole som erhåller energi ges av ekvationen (3.7) [10].

$$U = j\omega MI \quad (3.7)$$

Där M är den ömsesidiga induktansen och I är strömmen i spolen som avger energin. Den ömsesidiga induktansen är beroende av avståndet mellan spolarna, om avståndet ökar minskar den ömsesidiga induktansen. Detta gör att den inducerade spänningen minskar om avståndet ökar. För att kompensera detta behövs antingen en högre ström eller högre frekvens.

3.5 Kopplingsfaktor

Kopplingsfaktor k är den del av det magnetiska flödet alstrat av primärspolen som sekundärspolen påverkas av. Kopplingsfaktor definieras enligt ekvation (3.8) där L_1 är primärspolens induktans och L_2 är sekundärspolens induktans. M är den ömsesidiga induktansen.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (3.8)$$

3.6 Q-värde

Godhetstal eller Q-värde är mått på hur underdämpat ett svängningssystem är. Q-värdet kan beskrivas enligt ekvation (3.9)

$$Q = 2\pi \frac{\text{maximalt upplagrad energi}}{\text{energiförlust per period}} \quad (3.9)$$

3.6 Energiöverföring och effektivitet

Godhetstalet för effektivitet U beror på kopplingsfaktor k och spolarnas Q-värde enligt ekvation (3.10).

$$U = k\sqrt{Q_1 Q_2} \quad (3.10)$$

Där Q_1 och Q_2 är primärspolens respektive sekundärspolens Q-värde. k är spolarnas kopplingsfaktor. Den maximala verkningsgraden för energiöverföringen ges sedan av ekvation (3.11)

$$\eta = \frac{U^2}{(1+\sqrt{1+U^2})^2} \quad (3.11)$$

3.7 Voltage controlled oscillator

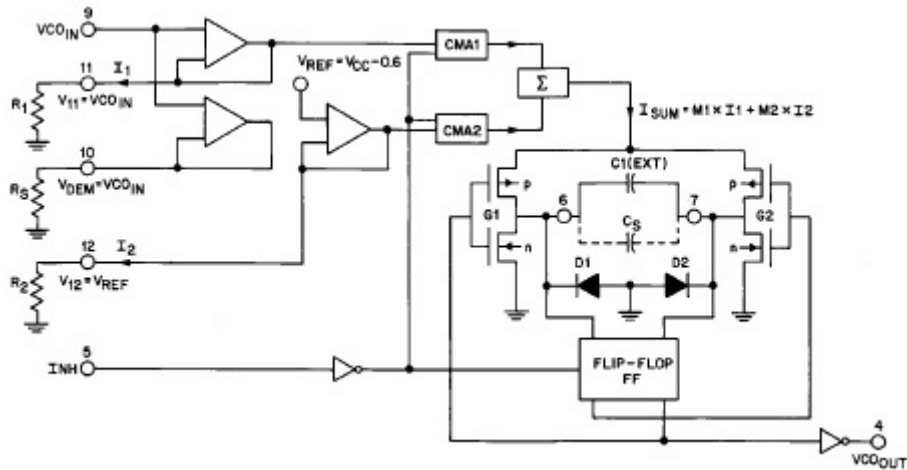
En voltage controlled oscillator (VCO) är en oscillator där självsvängningsfrekvensen kan kontrolleras av inspänningen.

3.8 Phase Locked Loop

Phase locked loop eller phase lock loop (PLL) är en krets som kan reglera en signals frekvens och fas. PLL:en jämför den inkommande signalen med en yttre referenssignal och anpassar den inkommande signalens frekvens och fas utifrån kretsens logik och referenssignalens värden. När rätt fas och frekvens nås låses dessa fast och förblir stabila tills villkoren som styr dem ändras. En PLL kan återskapa frekvenser som är multiplar av den inkommande signalen.

3.9 74HC/HCT4046A

74HC/HCT4046A är en Phase Locked Loop krets men integrerad VCO, den har flera användningsområden men i detta arbete kommer den användas för att ge en signal vars frekvens kan styras med hjälp av den inkommande spänningen. Blockschema för VCO funktionen kan ses i figur (3).



Figur 3. Schema för VCO [18]

Frekvensen f_{osc} på utspänningen ges av ekvation (3.12).

$$f_{osc} = \frac{1}{T_{osc}} \quad (3.12)$$

Tiden mellan oscilleringarna T_{osc} ges av två parametrar, dels av den inneboende utbredningsfördröjningen T_{pd} som kan antas till ett värde mellan 10 ns och 14 ns och rampladdningstiden T_c och ges av ekvation (3.13).

$$T_{osc} = 2 \cdot T_{pd} + 2 \cdot T_c \quad (3.13)$$

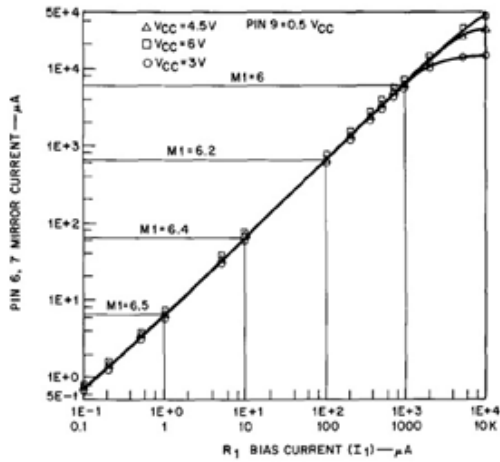
Rampladdningstiden T_c ges av ekvation (3.14).

$$T_c = \frac{((C_1 + C_s) \cdot V_{ramp})}{M_1 \cdot (V_{vco} / R_1) + M_2 \cdot (V_{ref} / R_2)} \quad (3.14)$$

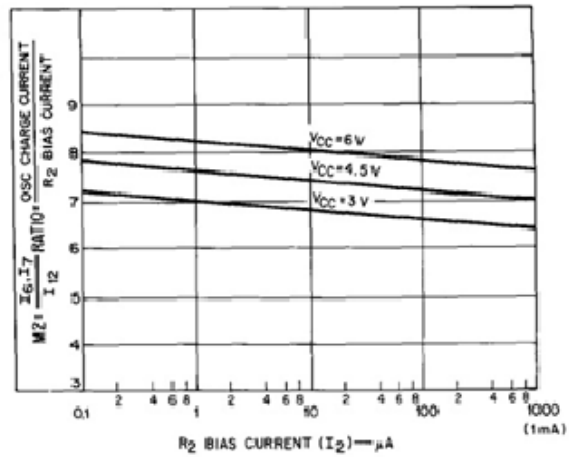
I ekvation (3.10) är C_1 värdet på den spole som placeras mellan ben sex och ben sju och bör enligt datablad ha ett högre värde än 40 pF. C_s är värdet på strökapacitansen mellan ben sex och ben sju och är normalt i storleksordningen runt några pF. R_1 är värdet på den resistor som ansluts mellan ben 11 och jord. R_2 är värdet på den resistor som ansluts mellan ben 12 och jord. V_{ramp} är en funktion av matningsspänningen V_{CC} och ges av ekvation (3.15).

$$V_{ramp} = 0,1 \cdot V_{CC} + 1,3 \quad (3.15)$$

Den interna referensspänningen V_{ref} är lika med $V_{CC} - 0,6$. V_{vco} är spänningen mellan ben nio och jord och är även den spänning som kan användas för att reglera frekvensen, V_{vco} bör vara inom området $1,0 < V_{vco} < 0,9 \cdot V_{CC}$. M_1 och M_2 är multipliceringsfaktorer som med hjälp av strömmarna genom ben 11 (I_1) och ben 12 (I_2) kan utläsas ur graf 1a och 1b.



Graf 1a. M_1 som funktion av ström [18]

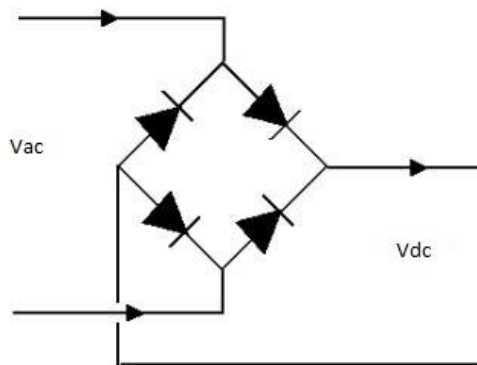


Graf 1b. M_2 som funktion av ström och spänning [18]

Med dessa ekvationer kan frekvensen räknas ut och som en funktion av V_{vco} . Intervallet som frekvensen kan ändras inom ställs främst av resistansen R_1 .

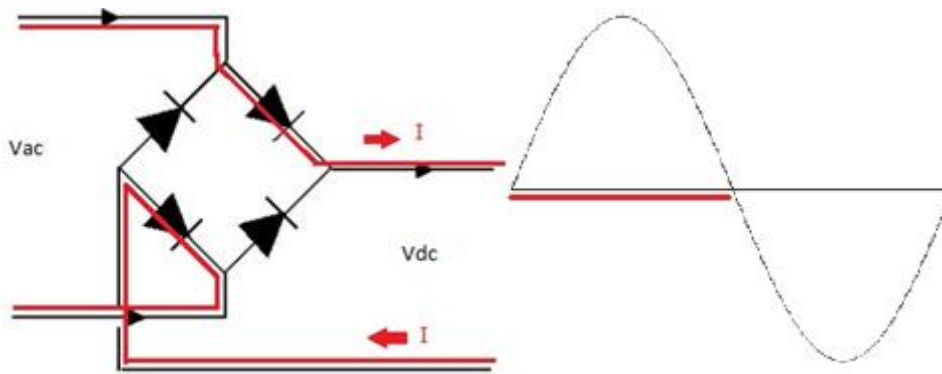
3.10 Likriktare

En likriktare är en komponent som omvandlar en växelspänning till likspänning. Likriktaren konstrueras av fyra stycken dioder som placeras enligt figur 4.

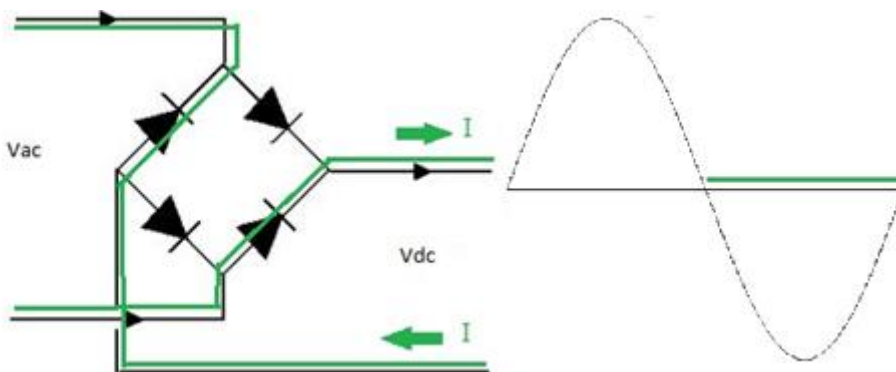


Figur 4. Koppling av likriktare

Likriktaren skapar en likspänning genom att dioderna leder vid olika tillfällen under växelspänningens period, under den period då spänningen har ett positivt värde leder ett diod-par och under den negativa perioden leder det andra paret. Detta illustreras i figur 5 och 6 där de färgade pilarna visar strömmens riktning och väg under de olika perioderna.

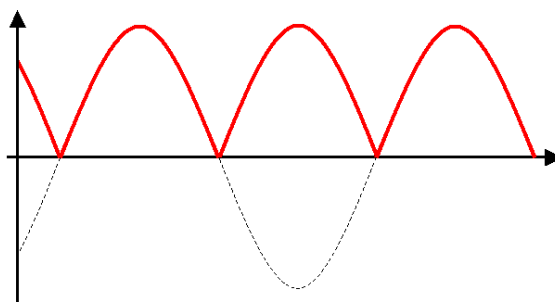


Figur 5. Strömriktning period 1



Figur 6. Strömriktning period 2

Detta skapar en spänning på utsidan som är av formen av inspänningens absolutbelopp och kan ses i figur 7.



Figur 7. Spänning efter likriktare

Den utspänning som generas är inte en jämn likspänning utan har ett högt rippel. Detta rippel kan tas bort genom användning av glättningskondensatorer, ju högre kapacitans på kondensatorerna desto jämnare blir utspänningen.

3.11 Förstärkare

Förstärkare används för att stärka en signal genom att öka signalens amplitud och i så stor grad som möjligt behålla signalens form utan förvrängning.

3.12 Operationsförstärkare

Operationsförstärkare kan ha flera typer av användningsområden beroende på hur de kopplas. Vanligast används de för att förstärka spänningsnivån på en signal. I nedanstående stycken redogörs för egenskaper hos operationsförstärkare som bör tas hänsyn till och en variant av uppkoppling [11].

3.12.1 Slew rate

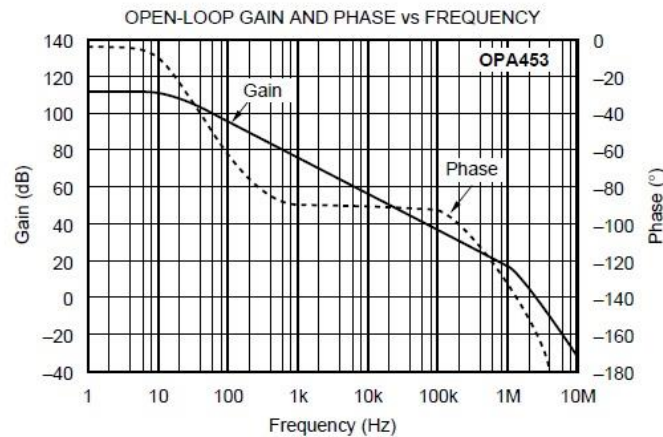
Slew rate är ett belopp som anger hur fort en signal kan förändras på operationsförstärkarens utgång. Om slew rate-värdet för en viss förstärkare är för låg kommer signalen att förvrängas, lägsta slew rate-värdet för en förstärkare kan räknas ut med följande ekvation:

$$\text{slew rate} = 2 \cdot \pi \cdot \hat{U} \cdot F \cdot f \quad (3.16)$$

I ekvation (3.16) är \hat{U} inspänningens toppvärde, F är förstärkningen och f är insignalens frekvens. Slew rate anges oftast i enheten $V/\mu S$ [11].

3.12.2 Bandbredd

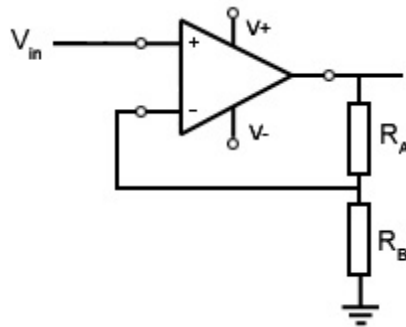
Frekvensområdet där en förstärkare kan behålla en förstärkning på $F \geq 0$ betecknas som bandbredd och typiska värden för operationsförstärkare är i området 1-10 MHz [11]. Som exempel visas i graf 2 karaktärstiken för förstärkaren OPA453.



Graf 2. Karaktärstik OPA453 [19]

3.12.3 Icke-inverterande förstärkarkoppling

I figur 8 visas kopplingsschemat för en icke-inverterande förstärkarkoppling.



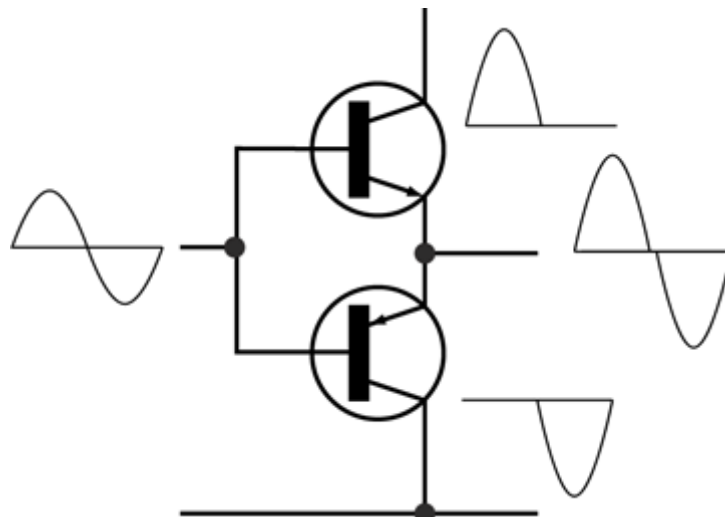
Figur 8. Icke inverterande förstärkarkoppling

Eftersom att spänningen mellan de två ingångarna på förstärkaren är noll blir spänningen över utgången samma som spänningen över R_B vilket kan räknas ut genom spänningsdelning. Ekvation (3.17) ger sambandet mellan förstärkningen F , R_A och R_B [11].

$$F = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{R_A + R_B}{R_B} \quad (3.17)$$

3.13 Klass B effektförstärkare.

Effektförstärkare används efter att spänningen förstärkts av till exempel en operationsförstärkare och har till uppgift att förstärka effekten. Det finns flera typer av effektförstärkare men i denna rapport används endast klass B typen därför behandlas endast denna här. Klass B förstärkare kan ha en maximal verkningsgrad på 78,5 %. Schematisk bild av en klass B förstärkare kan ses i figur 9.

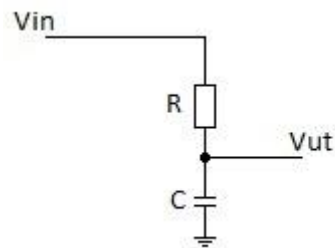


Figur 9. Klass B effektförstärkare [20]

Den är uppbyggd av två stycken transistorer, en NPN och PNP. Transistorerna är kopplade så att de förstärker varsin del av signalen. NPN-transistorn förstärker den positiva halvan av signalen och PNP-transistorn förstärker den negativa halvan av signalen. I och med att man använder två transistorer och att båda halvorna av signalen blir förstärkt har man inte mycket distorsion när man använder denna typ av förstärkare. Det kan dock bli en liten distorsion när signalen byter polaritet och den aktiva transistoren byts ut [11].

3.14 Filter

Ett elektriskt filter används för att ta bort oönskade frekvenskomponenter i en elektrisk signal. I detta arbete kommer ett lågpas-filter att användas, se figur 10.



Figur 10. Koppling lågpas-filter

Brytfrekvens f_c kan räknas ut med följande ekvation:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (3.18)$$

Där R är värdet på resistorn R och C är värdet på kondensatorn C i kopplingen.

4. Primärkrets

I primärkretsen används DC-matning, en oscillator i form av en PLL med VCO och en förstärkare.

4.1 Hitta optimal frekvens

En viktig del av projektet var att ta reda på inom vilket frekvensområde som överföringen skedde effektivast. För att hitta en optimal frekvens användes en signalgenerator av typen 33120A av Hewlett Packard och multimeter av typen 34401A av samma tillverkare. Genom att skicka en signal med olika frekvenser och sedan mäta in och uteffekt erhöles information om frekvensområdet. Testresultat ligger under kapitel 8.1.

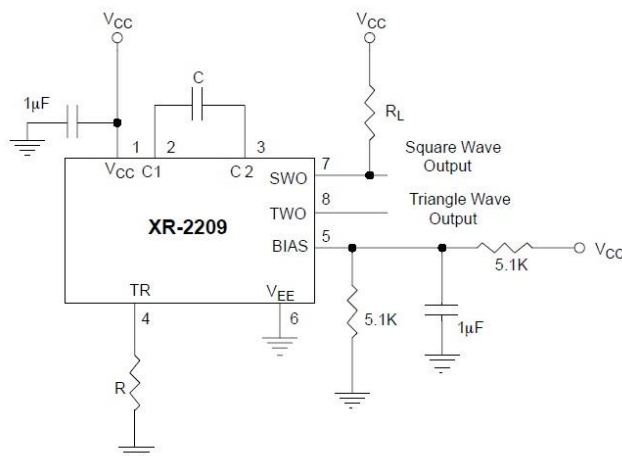
Detta test var viktigt för fortsättningen av arbetet, eftersom att med den givna vetskapen om frekvensområdet kunde komponenter beställas som passade inom detta frekvensområde.

4.2 Oscillator

En oscillator är en elektrisk krets som skapar en repetitiv elektronisk signal som till exempel en sinusvåg eller fyrkantsvåg. Detta sker genom att de omvandlar en likströmssignal till en växelströmssignal. I detta arbete kommer en PLL med VCO att användas. Fördelen med att använda en VCO är att det är enkelt att ändra frekvensen genom att styra och ändra inspanningen.

4.3 XR2209CP-F

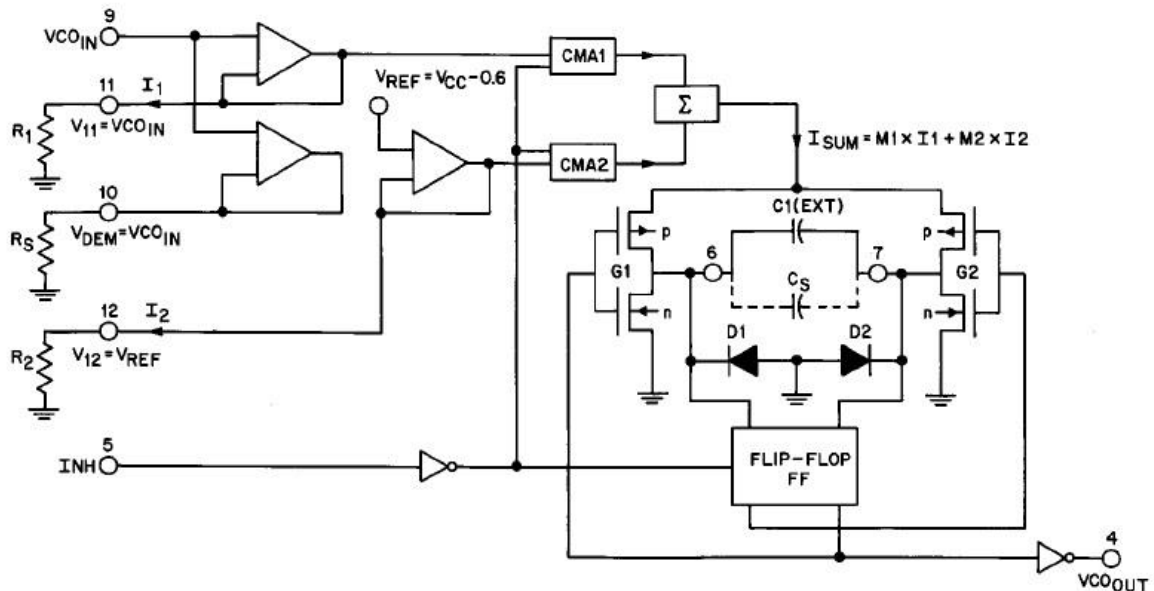
XR2209CP-F från EXAR testades för användning vid framställning av en fyrkantsvåg som via förstärkare skulle kunna skickas till spolarna. XR2209CP-F är en VCO där frekvensen kan styras genom ändring av värdet på resistansen på R och kapacitansen C . Komponenten kopplades upp enligt figur 11. Värdena på R och C varierades för att prova olika frekvenser men det högsta som kunde uppnås var runt 1 MHz. Denna komponent valdes dock att inte fortsättas med mer eftersom att det behövs högre frekvenser för att få effektiv överföring samt de begränsade möjligheterna att justera frekvensen utan att behöva koppla om och byta resistorer och kondensatorer.



Figur 11. Koppling XR-2209 [21]

4.4 74HC/HCT4046A

För att skapa en kontrollerbar växelspänning inom ett frekvensområde runt 1,5 MHz användes en VCO av typen 74HC/HCT4046A. Denna kopplades upp på en kopplingsbräda för att sedan kopplas med andra komponenter enligt figur 12.

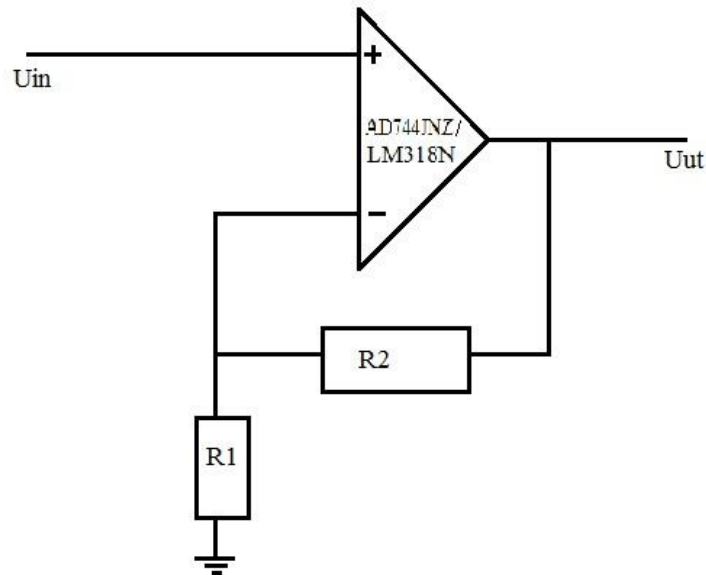


Figur 12. Koppling 74HC/HCT4046A [18]

Värdena på resistorerna R_1 och R_2 samt kapacitansen på C_1 togs fram först genom prov av olika värden. Inspänningarna VCO_{IN} och V_{CC} kontrollerades och justerades med ett nätaggregat och utspänningen lästes av med ett oscilloskop. Med resistans på 4,7 k Ω på resistorerna och 4,7 nH på spolen kunde en fyrkantsvåg skapas med frekvens som kunde justeras från 0,5 MHz till 2,5 MHz. För att kontrollera de teorier och ekvationer som redovisats i avsnitt 3.7 skapades en MATLAB-kod för att verifiera att dessa ekvationer stämmer överens med de resultat som testerna har gett, koden redovisas i bilaga 1. Efter körning i MATLAB kunde det konstateras att teorin stämde bra överens med praktiken och att MATLAB-koden kan användas som hjälp när man skall välja nya komponenter för att få ett annat frekvensområde.

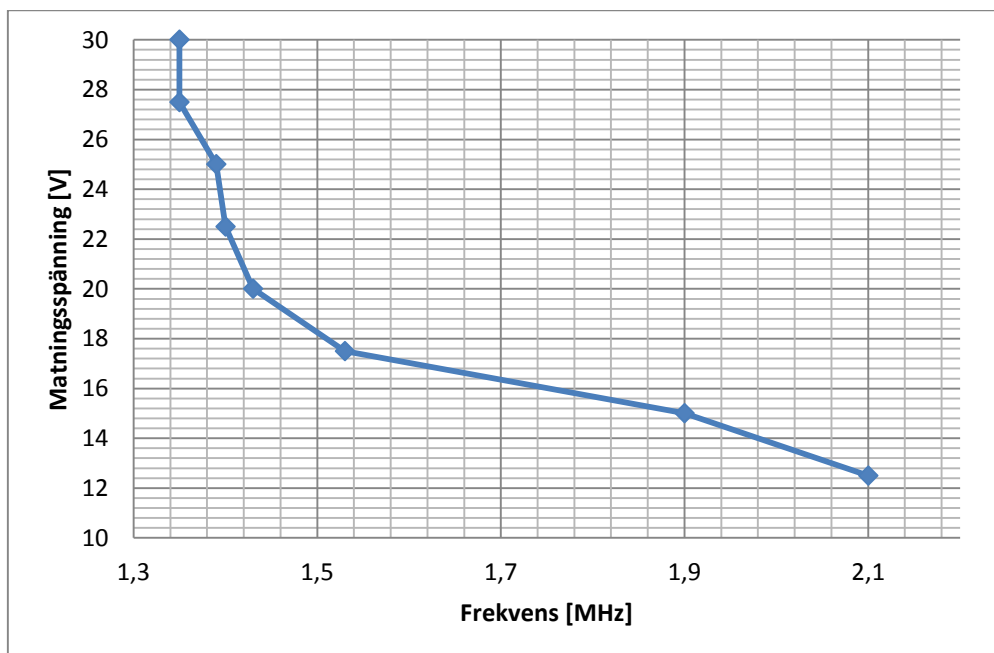
4.5 74HC/HCT4046A med OP-förstärkare

För att förstärka signalen som fås från PLL:en testades initialt OP-förstärkare för att förstärka signalen. Målsättningen var att den fyrkantsvåg med amplitud på 5 volt som fås från PLL:en skall kunna förstärkas till minst 20 V i det frekvensområde som är relevant för arbetet. Fyra stycken OP-förstärkare testades i första omgången varav två gav så undermåliga resultat att de utslöts fort och därför kommer de inte att behandlas mer i denna rapport. De två OP-förstärkare som gav resultat som var acceptabla var Analog Devices AD744JNZ och Texas Instruments LM318N/NOPB, anledningen till att de andra inte ansågs tillräckliga var att de inte klarade av de frekvenser som krävdes. OP-förstärkarna kopplades upp med två stycken resistorer, $R_1 = 10$ k Ω och $R_2 = 22$ k Ω vilket gav en förstärkningsfaktor på 3,2 (se figur 13 för kopplingschema).



Figur 13. Icke inverterande förstärkarkoppling

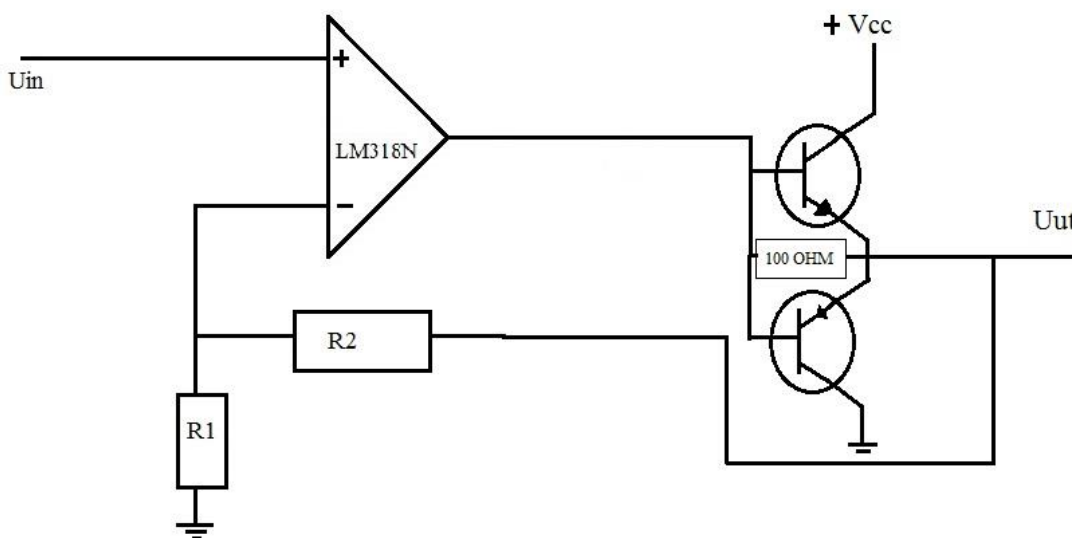
De två olika modellerna kopplades upp tillsammans med PLL:en för att testa hur väl de fungerade. Förstärkarna tog emot en signal från PLL:en och tog emot en 5 V fyrkantsvåg med en frekvens och matningsspänning från ett nätaggregat. Både frekvensen och matningsspänningen varierades för att se hur förstärkarna fungerade vid olika frekvenser och för att se vilken frekvens som är den högsta som förstärkaren kan matas med vid en viss matningsspänning. Matningsspänningen ställdes in på en viss nivå, sen ökades frekvensen tills signalen ut från förstärkaren blev distorderad. Resultatet från testet med LM318N redovisas i graf 3. Signalen från OP-förstärkare AD744JNZ blev distorderad vid 1,25 MHz oberoende av vilken frekvens det var på insignalen.



Figur 3. Frekvens som funktion av matning 1

4.6 LM318N med Klass B push-pull förstärkare

Det märktes att med enbart LM318N som spänningsförstärkare kunde inte tillräckligt med energi föras över eftersom att strömmen från operationsförstärkaren var för låg och därmed fick inte spolen tillräckligt med energi. För att förstärka strömmen konstruerades en klass B enligt figur 14 som kopplades efter operationsförstärkaren. De transistorer som användes var STMICROELECTRONICS NPN-transistor BD139 och MULTICOMPs PNP-transistor BD136. Med denna koppling utfördes ett test för att jämföra kopplingen med förstärkaren och den utan, detta test redovisas i kapitel 8.6.



Figur 14. Koppling operationsförstärkare

4.7 LT1206CN8#PBF samt LT1210CT7#PBF med och utan klass B förstärkare.

Ytterligare två operationsförstärkare testades för att undersöka deras påverkan på effektiviteten. Operationsförstärkaren LT1206CN8#PBF från Linear Technology kopplades till en icke inverterande förstärkare enligt figur 13. Tester utfördes med denna koppling med avseende att undersöka frekvensens och avståndets betydelse på den överförda energin och verkningsgraden. Den kopplades även upp med klass B förstärkare enligt figur 14 för att jämföra skillnaden med eller utan klass B. Samma tester med samma kopplingar utfördes även med operationsförstärkaren LT1210CT7#PBF från Linear Technology för att jämföra den mot LT1206CN8#PBF. Testerna och resultaten redovisas i avsnitt 8.6 och 8.7.

4.8 Primärspole

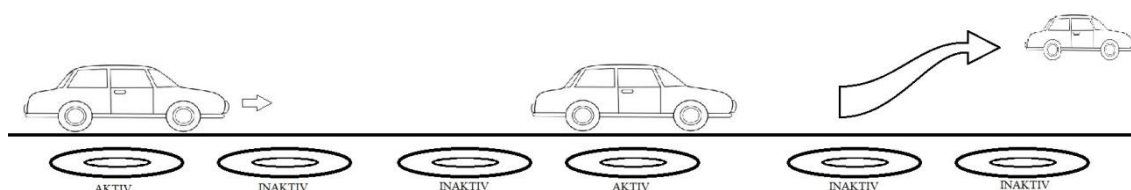
Primärspolarna som används på landningsbanan kommer att vara av modellen WT-505060-20K2-A10-G. Spolarna har en induktans på 24 μH och ett minsta Q på 80. Dessa spolar är de enda som testades eftersom att det var de som fanns tillgängliga och det beslutades att enbart dessa skulle behandlas. De är även fullt kapabla att överföra energin så det sågs ingen nytta att testa andra typer av spolar.

5 Styrning

För att få effektiv energiöverföring är det viktigt att styrningen av spolarna också är effektiv. Endast de spolarna som bidrar till överföring av energi vid ett specifikt tillfälle skall vara aktiva just vid det tillfället. Om andra spolarna är aktiva så bidrar inte de till överföringen till bilen utan endast till systemets förluster. Modellen som byggs i detta arbete är av enklare utformning och funktion än de som skulle kunna användas i en verklig tillämplig med fullskaliga bilar på en riktig vägbanan. Modellen som konstruerades för detta arbete redovisas i detta stycke, även ett prototypförslag för en verklig modell ges senare i kapitel 9.

5.1 Funktionsförklaring

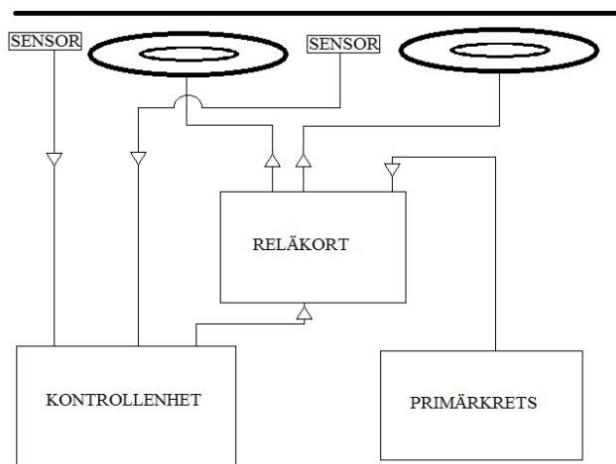
I denna modell var målet att endast den spole som bilen befinner sig över vid ett visst tillfälle skall vara aktiv. När bilen sedan rör sig framåt skall denna spole inaktiveras och nästkommande spole aktiveras då bilen är tillräckligt nära så att energin som överförs från den nästkommande spolen överförs mer effektivt än den spolen innan (se figur 15). Om bilen tas bort från banan skall den senast aktiva spolen släckas efter en viss tid, detta för att inte spolen skall vara aktiv fram tills att strömmen bryts manuellt.



Figur 15. Styrsystemets funktion

5.2 Principskiss

För att uppnå denna funktion krävs flera olika komponenter som samverkar med varandra. Bilen position ges av sensorer som sedan ger en signal till en kontrollenhet. Kontrollenheten behandlar de inkommande signaler och aktiverar eller inaktiverar spolarna. Kontrollenheten kan dock inte kopplas direkt till att styra primärkretsen som skall mata spolarna utan måste kopplas via ett reläkort som kan bryta eller koppla ihop primärkretsen mot spolarna. Se figur 16 för illustration av principskiss.



Figur 16. Principskiss styrsystem

5.3 Sensorer

För att kunna avgöra bilens position krävs sensorer av något slag. Det finns flera modeller av sensorer som skulle fungera till exempel induktiva- och magnetiska sensorer. De som valdes var optiska sensorer av modellen GP2D120 från SHARP, dessa valdes för att de är lätta att använda samt för att de är relativt lättillgängliga. GP2D120 ger en spänning som varierar beroende på vinkeln på den infraröda strålningen som den sänder tas emot, vinkeln varierar på hur långt ifrån objektet som strålningen reflekteras mot befinner sig. Denna funktion gör att dessa sensorer kan användas för att känna av om bilen befinner sig i närhet av en specifik spole. En nackdel med dessa sensorer är att de inte kan urskilja om det är bilen som är i närheten eller om det är något annat. Detta kan dock förbises i projektets modell då tester kommer att ske i en kontrollerad miljö där inga oönskade föremål kommer att befinna sig i närheten av spolarna.

5.4 Kontrollenhet

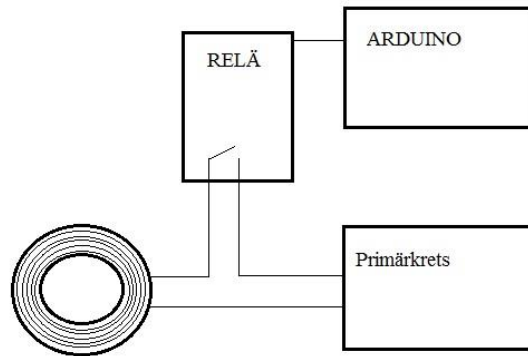
För att kunna behandla signalerna som fås från sensorerna och styra spolarna används en Arduino Uno. Arduino är ett mikrokontrollerkort som bygger på en öppen hårdvara med både digitala och analoga in- och utgångar. Arduino Uno är en specifik modell av Arduino och är en av de vanligaste modellerna, den har 14 digitala in-/utgångar och 6 analoga ingångar. För programmering av Arduino används den avsedda programvaran Arduino IDE som både kompilerar och laddar upp kod till Arduinon. C/C++ är det programmeringsspråk som används för skrivning av kod i programmet.

Till Arduinon kopplas sensorerna in till varsin analog ingång och sex stycken digitala utgångar kopplas vidare till ett reläkort. Sensorernas signaler tas emot av Arduinon och läses av, värdet som avläses ges till en variabel. Värdet ökar ju närmare ett objekt befinner sig en sensor, om värdet överstiger en variabel som kallades *tröskelvärde* så är bilen tillräckligt nära sensorn för att aktivera tillhörande spole. Om värdet på någon av variablerna som tillhör sensorerna överstiger *tröskelvärde* ges en variabel som kallas *placering* ett värde som motsvarar den sensor vars variabel har överstigit värdet till exempel om bilen är nära sensor fem och värdet på den variabeln som tillhör denna sensor är över värdet på *tröskelvärde* så ges variabeln *placering* värdet fem. En funktion som kollar om bilen inte varit tillräcklig nära någon av sensorerna skrevs, en variabel som kallas *n* används för att kolla om ingen sensor varit aktiv under en viss tid. Efter varje gång någon sensors värde överstiger tröskelvärdet nollställs variabeln *n* och om ingen sensors värde överstiger tröskelvärdet ökas *n* med ett vid varje exekvering. Om värdet på *n* överstiger ett visst värde som anges av *tidsvariabel* ges *placering* värdet noll.

En funktion som läser av *placering* används för att aktivera rätt relä. Värdet av *placering* läses och i en switch sats så aktiveras tillhörande relä och alla andra reläer inaktiveras om värdet tillhör någon av sensorerna, om värdet på *placering* är noll inaktiveras alla reläer. Alla reläer är inaktiverade i början av programmets körning fram tills att någon sensor aktiverat. Flödesschema för programmet visas i bilaga 3 samt kod redovisas i bilaga 2.

5.5 Reläkort

Reläkortet används för att bryta eller koppla ström till spolarna. Det styrs genom att varje relä är kopplat till varsin utgång på Arduinon. När reläet tar emot en digital etta i form av en 5 V spänning från Arduinon så går denna till en optokopplare som styr en switch i reläet. Denna switch växlar läge då en digital etta ges från Arduinon och sluter kretsen (se figur 17) och därmed kan en ström flyta genom kretsen vilket gör matning till spolen bli möjlig. När ingen digital etta ges från Arduinon är kretsen öppen och ingen ström kan flyta genom den.



Figur 17. Koppling av reläer

6. Sekundärkrets

Sekundärkretsens uppgift är att ta emot energi från primärkretsen och distribuera mellan batteri och motorn. Från sekundärspolen kommer växelspanning att likriktas med hjälp av en diodbrygga. Glättningsekondensatorer kopplas in efter likriktaren för få en stabilare likspänning. Efter glättningsekondensatorerna kopplas en spänningsregulator som gör om den varierande amplituden på likspänningen till en fast 5 V likspänning. Efter spänningsregulatorn är en motor kopplad samt en batterikontrollenhet.

6.1 Sekundärspole

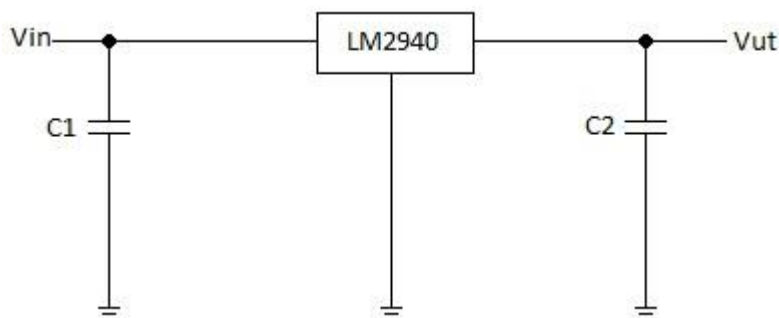
Två typer av sekundärspolar användes, WE 760308201 och WT-505060-20K2-A10-G som även används som primärspole. WT-505060-20K2-A10-G kan läsas om i kapitel 3.8. WE 760308201 har en induktans på $10 \mu\text{H}$ och ett Q-värde på 50. Båda dessa spolar testades för att undersöka hur de olika egenskaperna påverkade överföringen, detta test kan läsas om i kapitel 8.5.

6.2 Likriktare

För att omvandla den inkommande växelspanningen till en likspänning krävs en likriktare. I detta arbete konstruerades en diodlikriktare bestående av fyra stycken schottky-dioder av modellen 1N5817G från tillverkaren ON SEMICONDUCTOR. Dessa dioder valdes för att de är avsedda att användas till att likrikta högfrekventa växelspanningar och är därför lämpliga att använda i detta arbete. Dessa har även ett relativt lågt framspänningsfall på 0,45 V. För att få en jämnare likspänning med mindre rippel kopplades en kondensator efter likriktaren, kapacitansen på denna kondensator är $10 \mu\text{F}$.

6.3 Spänningsregulator

Den likspänning som fås efter likriktaren varierar kraftigt i amplitud vilket inte är önskvärt eftersom att batteriladdningsenheten kväver en spänning mellan 4,5 V och 5,5 V. För att få denna spänning används en spänningsregulator av modell LM2940T-5.0 från tillverkaren TEXAS INSTRUMENTS. Denna regulator kopplas upp enligt figur 18 där $C1 = 0,47 \mu\text{F}$ och $C2 = 22 \mu\text{F}$. Spänningen ut från spänningsregulatorn varierar från 4,75 V och 5,25 V vilket är inom gränsen för vad som batterikontrollenheten klarar. För att spänningsregulatorn skall kunna fungera som avsett krävs att spänningen på ingången är över 6,25 V.



Figur 18. Koppling av spänningsregulator

6.4 Motor

Efter spänningsregulatorn kopplas en DC-motor av modell PPN13LB11C och som kan drivas med en spänning från 3 V till 12 V. Dessa motorer kopplas från Vut på spänningsregulatorn till jord och får därmed en spänning på ca 5 V. Dessa motorer driver ingenting utan används enbart för att se om tillräckligt energi förs över från primärkretsen att axeln på motorn kan börja rotera.

6.5 Batterikontrollenhet

För att skydda batterierna under laddning krävs att en batterikontrollenhet kontrollerar laddningen så inte batterierna blir överladdade, vid överladdning finns en risk att batterierna kan sprängas. Batterikontrollenheten som användes i detta arbete är av modell MCP73855 evaluation board vilket är en färdigmonterad modell av MCP73855 med resistorer, kondensatorer och dioder redan monterade på en bräda. Detta medför att inga övriga komponenter behöver kopplas till denna utan batteriet kan kopplas in direkt på de utgångar som är märkta med VBAT- respektive VBAT+. Batterikontrollenheten ger en fast laddningsspänning till batteriet och har även en funktion som mäter spänningen på batteriet så att laddningen kan avbrytas om spänningen är så hög att batteriet är fulladdat.

6.6 Batterier

Vid val av batteri är det flera olika parametrar som bör ses över till exempel spänning, laddningsspänning, storlek och typ av batteri material. Laddningsbara batterier kan konstrueras av flera olika material. För att hitta den mest lämpade typen jämfördes de fyra vanligaste typerna; nickel-metallhydrid-, nickel-kadmium-, litium-jon- och blybatterier.

6.6.1 Jämförelse och val av batterier

För att välja batterier utfördes inga tester utan information samlades om olika typer av batterier och utifrån den informationen valdes en typ som sedan köptes in.

Blybatterier är bland de vanligaste batterierna idag och används inom många områden. Blybatterierna är oftast billiga och har låg självurladdningsgrad. Dock är denna typ av batterier inte så effektiva när det kommer till specifik energi vilket är ett mått på hur mycket laddning som kan hållas per viktenhet (41 Wh/kg) [12]. De har även i jämförelse med andra batterier långsamma uppladdningstider och tappar sin funktion efter färre laddningscykler [13].

Nickel-kadmiumbatterier håller för många laddningscykler och är relativt billiga. Den specifika energin för denna typ av batterier brukar normalt ligga runt 40 Wh/kg. Självurladdningen hos denna typ av batteri är relativt hög men laddningstiden är relativt kort [14].

Nickel-metallhydridbatterierna är mycket lika nickel-kadmiumbatterierna i sin utformning och har liknande egenskaper. Dock är den specifika energin mellan 30 och 40 procent högre hos dessa men självurladdningen är högre [14].

Litium-jonbatterier har högre specifik energi än de övriga batterityperna (normalt över 100 Wh/kg) och har även lägre självurladdningsgrad, dock måste de övervakas noggrant vid laddning. Om ett litium-jon batteri överladdas finns en risk att det börjar brinna. Detta kan dock motverkas enkelt genom användning av kontrollsystem för laddningen som förhindrar att batterierna blir överladdade och brandrisk inträffar [15].

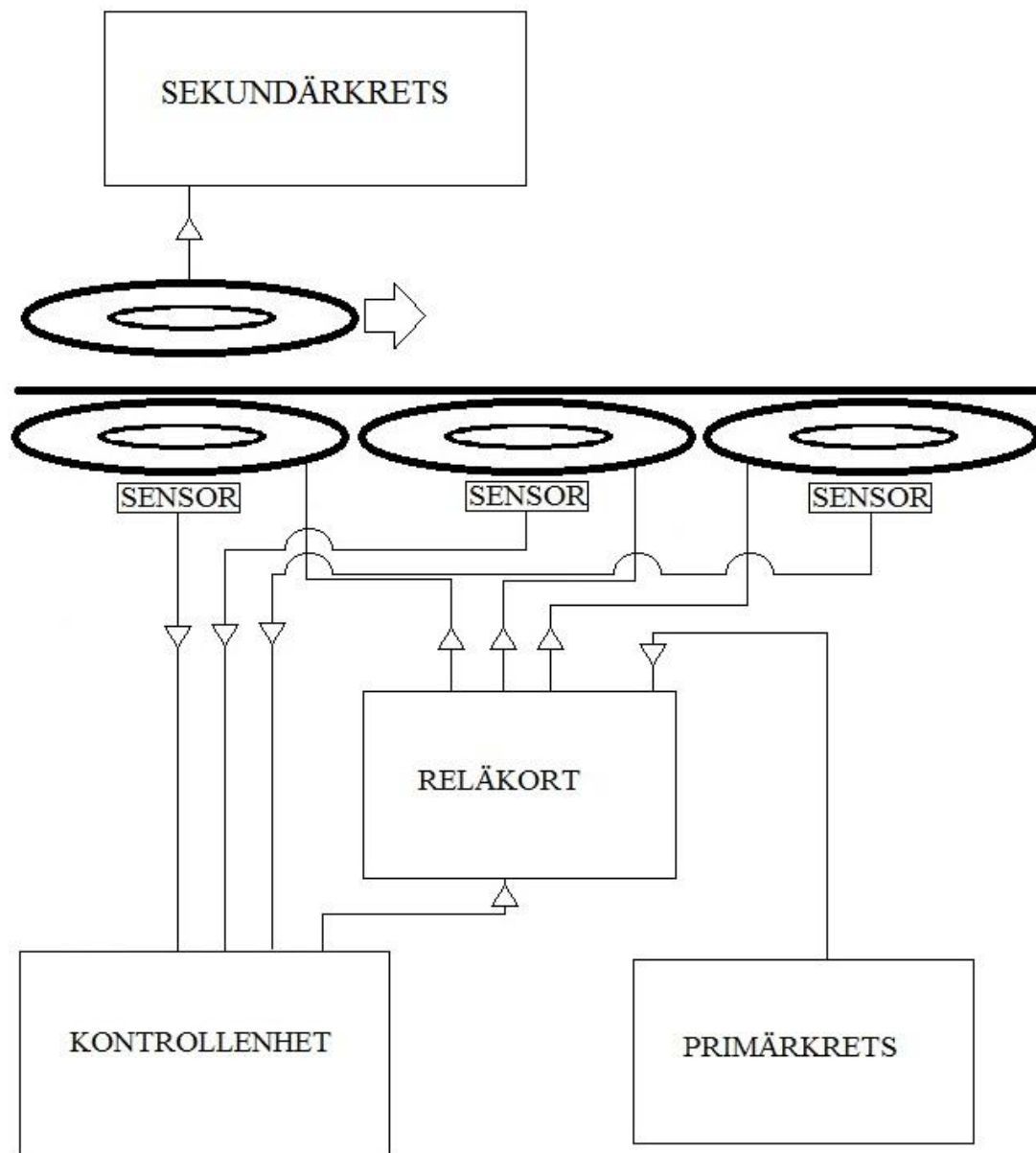
Med denna vetskap valdes att litium-jonbatteri skulle användas eftersom att de har den högsta specifika energin, vilket gör att batteriets storlek blir minsta möjliga. Låg självurladdningsgrad sågs inte som något nödvändigt eftersom att de batterier som används i arbetet enbart kommer att användas i korta perioder och då kommer inte självurladdningen kunna påverka något. Det batteri som valdes var av modellen LIR2450 från MULTICOMP och är av knappcellstyp, det har en nominell spänning på 3,6 V och laddas med 4,2 V. Det har en nominell laddnings kapacitet på 120 mAh och väger 5,2 g.

7. Fullständigt system med styrsystem och primärkrets

Det fullständiga systemets uppgift är att få alla enskilda komponenter och system att verka tillsammans. Primärkretsen skall kopplas via styrsystemet och sekundärkretsen skall kunna matas under förflyttning.

7.1 Testbanan med styrsystem och primärkrets med LT1210 och slutsteg

Tre stycken spolar placerade i rad efter varandra kopplades via reläkortet till primärkretsen. Primärkretsen bestod av LT1210 samt slutsteg. Styrningen av reläerna skedde enligt kapitel 5.4. För att undersöka systemet utfördes ett test som kan läsas i kapitel 8.9 där sekundärspolen fördes över testbanan och matade både motorn och batteriet via sekundärkretsen. Se figur 19 för illustration av systemet.



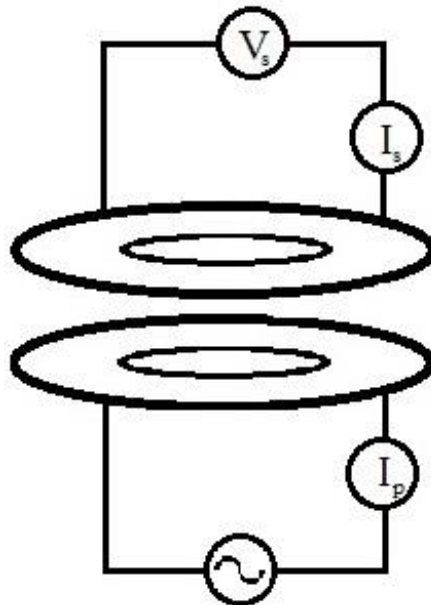
Figur 19. Illustration av fullständigt system

8 Tester

I kommande stycken redovisas resultatet från de tester som utförts.

8.1 Frekvensområdes test

Det första testet som genomfördes var att undersöka vilket frekvensområde som kunde överföra mest energi och som var mest lämpat för spolarna. Detta gav inte en optimal frekvens som resten av arbetet skulle anpassas kring utan snarare en uppfattning om vilket frekvensområde som var mest lämpat för spolarna. Testet utfördes genom att två spolar placerades med ett avstånd på ca 2 mm ifrån varandra. Spänning och ström mättes på båda spolarna med multimetrar. Den ena spolen matades med en växelspanning från en signalgenerator. Kopplingen illustreras i figur 20. Erhållna värden redovisas i tabell 1. Frekvensen ökades succesivt under testet, i början med en lägre frekvens än vad som redovisas i tabell men dessa hade så låg verkningsgrad att det ansågs att de var irrelevanta och därför redovisas de inte.



Figur 20. Illustrering av koppling vid mätning. Mätning av spänning sker vid matning på primärsidan och vid V_s .
Mätning av ström sker vid I_p och I_s .

Avstånd (mm)	Frekvens (Mhz)	Iin (A)	Iut (A)	Vin (V)	Vut (V)	Pin (W)	Put (W)	Verkningsgrad (%)
2	1	0,113	0,099	7,22	6,07	0,8158	0,6009	73,65601942
2	1,1	0,123	0,109	7,3	6,31	0,8979	0,6877	76,59984408
2	1,15	0,129	0,116	7,23	6,4	0,9326	0,7424	79,59942959
2	1,2	0,137	0,123	7,11	6,43	0,9740	0,7908	81,19437001
2	1,25	0,141	0,129	7,01	6,37	0,9884	0,8217	83,13655265
2	1,3	0,147	0,136	6,9	6,32	1,0143	0,8595	84,74021493
2	1,35	0,154	0,144	6,7	6,22	1,0318	0,8956	86,80752084
2	1,4	0,161	0,152	6,5	6,09	1,0465	0,9256	88,4548495
2	1,45	0,166	0,158	6,23	5,9	1,0341	0,9322	90,13904736
2	1,5	0,171	0,163	5,98	5,66	1,0225	0,9225	90,22081402
2	1,55	0,174	0,167	5,78	5,51	1,0057	0,9201	91,49365629
2	1,6	0,177	0,17	5,52	5,25	0,9770	0,8925	91,34733481
2	1,65	0,176	0,168	5,28	5,05	0,9292	0,8484	91,2964876
2	1,7	0,171	0,163	5,05	4,83	0,8635	0,7872	91,16901164
2	1,8	0,159	0,149	4,68	4,5	0,7441	0,6705	90,10643445

Tabell 1. Mätvärden från frekvensområdes 1

Utifrån dessa värden kan det dras en slutsats om att mest effektiv energiöverföring uppstår runt frekvensen 1,5 MHz.

8.2 Jämförelse av koppling med eller utan klass B förstärkare.

För att jämföra vilken koppling som kunde ge mest energi till primärspolen som sedan överfördes till sekundärspolen kopplades en diod via en resistor till sekundärspolen och utifrån ljusstyrkan kunde det visuellt avgöras vilken som gav mest energi. Detta test utfördes för att få en bild om det var mer effektivt att använda det sista förstärkarsteget eller om det blev marginella skillnader och inte för att ta exakta mätvärden vid olika avstånd eller matningsspänningar. Först matades diodkopplingen enbart med operationsförstärkaren och när sekundärspolen var 0,5 mm från primär spolen lös dioden starkt, men redan efter att avståndets ökats till 20 mm gavs inget ljus längre utan signalen var för svag. Sedan utfördes samma test med klass B förstärkaren, när spolarna var nära varandra var skillnaden liten men ändå märkbar. När avståndet sedan ökades mellan spolarna behölls ljusstyrkan mer än vad det gjorde utan slutsteget. Vid ett avstånd på 40 mm avtog ljuset helt med det sista förstärkarsteget vilket indikerade att den överförda energin var starkare med denna koppling.

8.3 Test av styrsystem

Ett test genomfördes för att verifiera att styrsystemet fungerade som önskat. Tre stycken sensorer kopplades till Arduinon. Från Arduinon kopplades tre kablar till reläkortet som i sin tur styrde tre stycken spolar. Spolarna matades med en tidig modell av primärkretsen med klass B förstärkare. Istället för en bil konstruerades en enkel modell som bestod av en sekundärspole och en lysdiod kopplade via en resistor. När modellen fördes över de tre spolarna som var placerade längs en bana med en sensor precis bredvid varje spole skulle lysdioden lysa konstant. Först var värdet på variabeln *tröskelvärde* för lågt och flera sensorer aktiverade samtidigt vilket medför att reläerna var aktiva okontrollerat och det hoppades mellan reläerna. Efter justering av *tröskelvärde* fungerade modellen bra. Dock kommer värdet på *tröskelvärde* som användes i detta test inte fungera lika bra då bilen används, utan då får värdet justeras ytterligare.

8.4 Mätning av ström och spänning samt verkningsgrad hos spänningsregulator vid följande tester

För att kunna beräkna effekterna som primär- och sekundärkretsen ger respektive tar emot behövs information om strömmarna på båda sidorna. På primärkretsen mättes strömmen genom att koppla en multimeter mellan utgången på nätaggregatet och förstärkarkretsen. Det testades även att mäta de strömmar som gick till PLL:en men dessa strömmar var så små att de endast utgjorde någon enstaka procent av den totala strömmen som matades till primärkretsen. Därför togs de inte med i beräkningarna av effekten. På sekundärsidan mättes strömmen efter spänningsregulatorn. Spänningen på nätaggregatet och efter spänningsregulatorn mättes.

En spänningsregulator av den typ som används har en högre verkningsgrad när spänningen in är låg och än när spänningen är hög. Av denna anledning så undersöktes hur verkningsgraden varierar när spänningen in varierar till följd av att avståndet mellan spolarna varierar. Resultatet från detta test var att spänningsregulatorns verkningsgrad var 55 procent när spolarna var 0,1 mm ifrån varandra och ökade linjärt till 65 procent när avståndet var 5 mm. Detta resultat var i princip samma oavsett vilka typer av komponenter som använts i primärkretsen, endast några procent skiljdes och därför redovisas inte resultaten i varje enskilt fall.

8.5 Test av sekundärspolar

För att undersöka sekundärspolens inverkan på effektgraden utfördes tester där WT-505060-20K2-A10-G och WE 760308201 jämfördes för att se vilken som var effektivast. Testet utfördes genom att först koppla WE 760308201 och sedan WT-505060-20K2-A10-G mot primärkretsen där det även jämfördes med och utan slutsteg. Testet utfördes med både LT1210 och LT1206 som operationsförstärkare. Sekundärspolarna kopplades in i sekundärkretsen som matade en motor och laddade ett batteri. Effekten som matades till primärkretsen liksom effekten som sekundärkretsen tog emot mättes. Resultatet från mätningarna redovisas i tabell 2.

Sekundärspole	Förstärkare	Frekvens (Mhz)	Iin (mA)	Vin (V)	Iut (mA)	Vut (V)	Pin (W)	Put (W)	Verkningsgrad (%)
WT-505060-20K2-A10	LT1206	1.30	58	29	78	5	1,682	0,39	23,186
WE 760308201	LT1206	0.96	38	29	41	5	1,102	0,205	18,602
WT-505060-20K2-A10	LT1210	0.95	58	29	62	5	1,682	0,31	18,430
WE 760308201	LT1210	0.95	47	29	37	5	1,363	0,185	13,573
WE 760308201	LT1210 + slutsteg	0,9	40	30	40	5	1,2	0,2	16,666
WE 760308201	LT1210 + slutsteg	0,9	32	30	31	5	0,96	0,155	16,145
WT-505060-20K2-A10	LT1206 + slutsteg	1	30	30	79	5	0,9	0,395	43,888
WE 760308201	LT1206 + slutsteg	0,9	34	30	32	5	1,02	0,16	15,686

Tabell 2. Mätvärden från test av sekundärspolar

8.6 Test av olika frekvenser

För att undersöka frekvensens påverkan på verkningsgraden testades olika frekvenser med de två olika operationsförstärkarna samt med och utan slutsteget. När slutsteget var inkopplat blev signalens frekvens tydlig och frekvenser gick inte att fastställa exakt utan det värde som redovisas är ett ungefärligt medelvärde av de frekvenser som signalen varierade mellan. Resultatet från testerna redovisas i tabell 3. När detta test utfördes var avståndet mellan spolarna runt 0,1 mm.

Förstärkare	Frekvens (Mhz)	Iin (mA)	Vin (V)	Iut (mA)	Vut (V)	Pin (W)	Put (W)	Verkningsgrad (%)
LT1206	1.2	51	30	42	5	1,53	0,21	13,725
LT1206	1.5	48	30	43	5	1,44	0,215	14,930
LT1206	1.6	58	30	63	5	1,74	0,315	18,103
LT1206 + slutsteg	1	28	30	86	5	0,84	0,43	51,190
LT1206 + slutsteg	1.3	28	30	72	5	0,84	0,36	42,857
LT1210	0.9	73	32	86	5	2,336	0,43	18,402
LT1210	1	65	32	75	5	2,08	0,375	18,028
LT1210	1.2	52	32	60	5	1,664	0,3	18,028
LT1210	1.5	53	32	52	5	1,696	0,26	15,330
LT1210 + slutsteg	1	123	32	93	5	3,936	0,465	11,814
LT1210 + slutsteg	1.3	131	32	92	5	4,192	0,46	10,973

Tabell 3. Mätvärden från test av olika frekvenser

8.7 Test av avstånd

Test utfördes för att se verkningsgraden vid olika avstånd. Först var spolarna på varandra sedan ökades avståndet tills sekundärkretsen inte klarade att både ladda batteriet och köra motorn samtidigt. Båda operationsförstärkarna testades samt med och utan slutsteg. Resultatet redovisas i tabell 4.

Förstärkare	Frekvens (Mhz)	Iin (mA)	Vin (V)	Iut (mA)	Vut (V)	Pin (W)	Put (W)	Verkningsgrad (%)
LT1206 0,1 mm	1.6	58	30	63	5	1,74	0,315	18,103
LT1206 2mm	1.6	53	30	52	5	1,59	0,26	16,352
LT1206 3mm	1.6	50	30	38	5	1,5	0,19	12,667
LT1206 4mm	1.6	48	30	33	5	1,44	0,165	11,458
LT1206 5mm	1.6	Laddar ej						
LT1206 0,1 mm + slutsteg	1	28	30	86	5	0,84	0,43	51,190
LT1206 2mm + slutsteg	1	29	30	60	5	0,87	0,3	34,482
LT1206 3mm + slutsteg	1	29	30	42	5	0,87	0,21	24,137
LT1206 4mm + slutsteg	1	Laddar ej						
LT1210 0,1 mm	1	65	32	75	5	2,08	0,375	18,028
LT1210 3mm	1	53	32	51	5	1,696	0,255	15,035
LT1210 4mm	1	51	32	48	5	1,632	0,24	14,705
LT1210 5mm	1	Laddar ej						
LT1210 0,1 mm + slutsteg	1	123	32	93	5	3,936	0,465	11,814
LT1210 2mm + slutsteg	1	136	32	89	5	4,352	0,445	10,225
LT1210 4mm + slutsteg	1	132	32	69	5	4,224	0,345	8,167
LT1210 5mm + slutsteg	1	130	32	50	5	4,16	0,25	6,009
LT1210 6mm + slutsteg	1	Laddar ej						

Tabell 4. Mätvärden från test av avstånd

8.8 Test av dubbla spolar

För att undersöka effekten av dubbla spolar på både primär- och sekundärkretsen utfördes ett test där både primär- och sekundärspolen byttes ut mot två WT-505060-20K2-A10-G spolar som kopplades i serie med varandra. Spolarna var placerade så att de på varje sida var precis bredvid varandra och varje par var placerat direkt ovanför det andra paret. Detta testades enbart med LT1210 med slutsteget eftersom att det enbart var effekten av dubbla spolar som undersöktes. Resultatet redovisas i tabell 5 och kan jämföras värden i tabell 4 för att se effekten av dubbla spolar.

Avstånd (mm)	Frekvens (Mhz)	Iin (mA)	Vin (V)	Iut (mA)	Vut (V)	Pin (W)	Put (W)	Verkningsgrad (%)
0	1	105	32	93	5	3,36	0,465	13,839
0	1.3	130	32	123	5	4,16	0,615	14,783
1	1	108	32	73	5	3,456	0,365	10,561
2	1	102	32	50	5	3,264	0,25	7,659
4	1	104	32	45	5	3,328	0,225	6,760
5	1	Laddar ej						

Tabell 5. Mätvärden från test av dubbla spolar

8.9 Test av testbana med styrsystem och primärkrets.

För att undersöka om styrningen och matningen från primärkretsen var tillräckligt effektiv utfördes ett test där systemet kopplades enligt 7.1 och sekundärspolen fördes över primärspolarna med ett avstånd på cirka 2 mm mellan sekundärspolen och banan. Sekundärspolen var kopplad till sekundärkretsen med både motorn och batteriet inkopplat. När spolen fördes över banan fungerade styrningen av spolarna väl. När sekundärspolen fördes fram över banan ändrades matningen av spole först när sekundärspolen var närmare den nästliggande än föregående. När sekundärspolen befann sig rakt över eller upp till ca 7,5 mm från en primärspole kunde både motorn köras och batteriet laddas men när de ca 7,5 mm överstegs överfördes inte tillräckligt med energi för att varken driva motorn eller ladda batteriet. Först när sekundärspolen kom inom ca 7,5 mm från nästliggande spole överfördes tillräckligt med energin igen. Testbanans totala längd var 150 mm och med en totallängd där både batteriet laddades och motorn kunde köras på 37,5 mm. Detta medför att tillräckligt med energi kunde överföras på ca 25 % av vägbanan.

9 Framtid: lösningar och problem

Att smart laddningsteknik utvecklas är nästan ett måste för att elbilen ska nå sin fulla potential och kunna konkurrera ut dagens bilar drivna på fossila bränslen. Behovet att lagra stora mängder energi i elbilarna gör att de blir stora och otympliga. Om man skulle kunna driva bilen på energi som tillförs från vägbanan skulle problemet med långa laddningstider lösas.

Ett första steg till att börja använda induktiv laddningsteknik skulle vara i kollektivtrafiken. Busslinjer har oftast samma körsträckor därför är det väldigt lämpligt att börja använda tekniken här. Senare kan man gå över till att börja lägga ut det på vissa sträckor på europavägar med mera. Man behöver ej lägga laddningssträckor över hela vägarna eftersom det då troligtvis skulle bli för kostsamt, utan placera dem med ett avstånd ifrån varandra så att laddningen kan behållas fram tills att fordonet åter når en ny laddningssträcka.

Ett problem som elleverantörerna och biltillverkare tillsammans måste lösa är hur man ska kunna ta betalt för den el som förbrukas på vägarna. Det finns olika lösningar på detta problem. Man skulle kunna tänka sig att varje bils laddningsenhet skulle ha en identitet som är registrerad hos elleverantören. Bilen kan sedan ha en elmätare och skicka data till leverantören om hur mycket som har laddats eller förbrukats. Denna kommunikation mellan bil och systemet i vägbanan skulle kunna ske genom att en trådlös koppling sker mellan de två systemen. Bilen kan på så sätt identifiera sig mot systemet och ge information om hur mycket energi som mottagits. De förluster som sker vid överföringen kan mätas genom att även energin som skickas från vägbanan mäts och sedan kan förlusterna fås genom att jämföra den mottagna energin och den skickade. Eftersom att olika mottagarenheter med största sannolikhet kommer att vara olika effektiva, då deras utformning och funktion kommer att variera mellan olika tillverkare, vore det orimligt att betalningen skulle grundas på hur mycket energi som mottagits utan skulle snarare grundas på hur mycket energi som skickats. Dock kan inte betalningen enbart grundas på detta utan snarare justeras utifrån flera faktorer så som om effektiviteten påverkas av utomstående faktorer till exempel om det ligger ett snötäcke på vägbanan. Man måste även införa någon standard så att alla bilar kan synka med både elnätet och med elleverantören oavsett vilket elbolag som försörjer vägen man åker på för tillfället.

Med denna trådlösa kommunikation kan även styrningen av spolarna ske, enheten i vägbanan kan registrera avståndet mellan bilen och olika spolarna i vägbanan och styra av- och påslagning av spolarna med denna information. Bilen kan ge information till vägbanans system och identifiera sig, detta kan förhindra att spolarna sätts på om det kommer andra objekt över spolarna till exempel bilar som inte har denna laddningsteknik. Information om bilens mottagarsystem kan ges till vägbanan och frekvensen på den överförda energin kan justeras för att få maximal effektivitet. Även funktioner som avbryter överföringen bör finnas i vägbanan, överföringen bör avbrytas om effektiviteten är för låg vilket skulle kunna inträffa om vägbanan har vattensamlingar eller snö på sig på grund av vädertillstånd eller om någonting i antingen bilen eller vägbanan är trasigt och överföringen inte fungerar optimalt.

10 Miljöaspekter

Elbilars största fördel är att de minskar förbrukning av fossila bränslen och därmed koldioxidutsläppen. Detta är en del av lösning till att förhindra att de globala koldioxidutsläppen ökar då transportsektorn står för en stor del av utsläppen. Kan man även implementera induktiv eller annan trådlös laddning av elbilar elimineras de största nackdelarna som korta körsträckorna och långa laddningstiderna. Men det finns även risker med användning av induktiv laddning för miljön. Vid induktiv laddning används ett växlande elektromagnetiskt fält. Dessa fält kan påverka människor och miljö ifall de inte regleras och används på ett sätt som är säkert för oss människor.

10.1 Magnetfält och Elektriska fält

Det finns många människor som är oroliga för hur elektromagnetiska fält påverkar oss. Magnetiska fält delas in i statiska eller växlade magnetfält. Människor är anpassade att leva med jordens statiska magnetfält och det finns ingen forskning som har påvisat skadliga effekter av statiska magnetfält som människor normalt utsätts för.

Växlade magnetfält kan skapa elektriska strömmar genom kroppen och påverkar kroppens nervsignaler i olika grad beroende på dess styrka. Forskning har genom åren gjort att man fått en god bild av vilka styrkor på växlade magnetfält som krävs för att göra skada hos människan. Det finns även forskning som tyder på att växlade magnetfält skulle kunna vara cancerframkallande.

Hur elektriska fält påverkar kroppen beror också på dess frekvens. Vid låga frekvenser passerar elektriska fältet genom kroppen utan att något skadas. Men vid högre frekvenser absorberas delar av det elektriska fältet av människokroppen. Vad som kan hända är att den absorberade energin skapar rörelse hos molekyler i kroppen som utvecklar värme. Värmeeffekt börja märkas vid elektriska fält som har en frekvens på över 100 kHz.

För att skydda passagerare i de fordon som befinner sig över ett elektriskt fält så krävs att någon form av avskärmning från fältet är installerat i bilen. En platta i bilens golv gjord av något material med hög permeabilitet skulle kunna skydda passagerarna mot fältet. Tänkbara material är mymetall, permalloy och ferrit.

10.2 Allmänna rekommendationer

Det finns några referensvärden för fält mellan 3 kHz och 10 MHz som är inom samma frekvensområde som induktiv laddning använder. Dessa referensvärden har strålsäkerhetsmyndigheten i sina allmänna råd och grundas på ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) rekommendationer, som är ett internationellt organ som studerar strålningens effekt på människor [16].

Allmän exponering:

Elektrisk fältstyrka (E) = 0,083 kV/m

Magnetisk fältstyrka (H) = 21 A/m

Magnetisk flödestäthet (B) = 27 μ T'

Vid höga frekvenser är även värmeeffekter påtagliga. Där har ICNIRP gett rekommendationer och vilka värden som inte bör överskridas. Energiabsorption mäts i W/kg och kallas SAR, specific energy absorption rate [16].

Allmän exponering för energiabsorption:

Medelvärden över kroppen: 0,08 W/kg

Lokal exponering huvud och bål: 2 W/kg

Lokal exponering övrig kropp: 4 W/kg

11 Resultat/Slutsats

Induktiv laddningsteknik är en aktuell och intressant teknik som troligtvis kommer att användas mycket i framtiden. Man ser idag att mobiler börjar stödja induktiv laddning som ett alternativ till laddning med sladd. Tekniken finns och testas även på fordon men är fortfarande i de flesta fall i utvecklingsstadiet. Målet med projektet var att bygga en modell av en elbil och bilbana där man kan ladda ett batteri och driva en motor samtidigt. Projektet ledde i slutändan till en fungerande krets byggd inom projektbeskrivnings ramar där både ett batteri kunde laddas samtidigt som man driver en DC-motor.

När man ska konstruera en induktiv laddningskrets är det första man bör tänka på det effektbehov som behövs och frekvensområdet man ska arbeta i. Det första testet som gjorde var att undersöka energiöverföringen mellan de två spolarna som senare skulle användas i kretsen. De resultat som gavs från testerna visade på att frekvenser i 1-2 MHz området gav bäst överföring. Det undersöktes i första hand möjligheter att använda oscillatorer där man kunde styra frekvensen. Detta för att enkelt kunna göra tester och hela tiden finjustera överföringen mellan primär och sekundär spole allteftersom kretsen utvecklades. Första oscillatorn som testades i detta projekt har fungerat tillräckligt bra att det har inte funnits något behov av att byta ut den. Dock skulle flera oscillatorer kunna ha testats för att se hur de hade påverkat överföringen.

En utmaning var att hitta en förstärkare som arbetar i det frekvensområdet som gav bäst överföring. Detta är ett måste för att få tillräckligt hög ström för att kunna ladda och driva en motor samtidigt. Många olika förstärkare har testats under projektet. Men till slut hittades två stycken förstärkare som hade de egenskaper som söktes. För att ytterligare förbättra överföringen konstruerades ett förstärkarslutsteg för att öka strömmen i sekundärkretsen. Kretsen med slutsteg gav som väntat högre verkningsgrad. I framtiden bör alternativ till primärkrets undersökas då störst förlusterna skedde i primärkretsen och i överföringen mellan spolarna.

Sekundärkretsen var förhållandevis enkel att konstruera och fungerade direkt. Det finns ej mycket variation i grundkonstruktionen. Det behövs en diodbrygga för att likrikta spänningen samt en kondensator för att jämna ut likspänningen. Sedan en spänningsregulator för att motor och batteri ska få rätt spänning. Men om man ska använda tekniken i en bil eller buss där det inte bara är frågan om att driva en motor och ladda ett batteri måste annan teknik implementeras till exempel teknik för att mäta elförbrukningen och distribuera elen på ett smart sätt i fordonet. Även spänningsregulatorn bör ses över, ett alternativ med lägre förluster skulle vara önskvärt. En buck-boost konverterare skulle kunna ge bättre resultat till exempel.

Styrning av spolarna var också enkelt att konstruera då endast en Arduino, ett reläkort och några fotosensorer behövdes användas. Men för att göra styrning av spolarna på en vägbanan i statsmiljö måste dock annan teknik tillämpas då djur, människor och bilar utan induktivladdningsteknik rör sig på vägarna. Istället får man använda sig av kommunikation mellan vägbanan och bilen så att spolarna bara är aktiva när bilar som kan laddas åker över dem. De skulle ske enorma energiförluster om spolarna var aktiva hela tiden även när inte någon bil åkte över dem.

Vid åtgärder för att förbättra kretsen för att få så hög effektivitetsgrad som möjligt är de främst frekvenser som undersökts. Under projektet har hela tiden frekvenser och spänningar testats för att undersöka vilka som ger mest effektiv överföring. Något annat som det forskas på och som man försöker utveckla teknik för är att kunna styra magnetfält [5]. Detta är något som skulle göra en dramatisk skillnad för överföringen mellan spolarna. Om man kan styra magnetfält skulle man kunna koncentrera de mot bilens spole och förhindra att energi läcker ut. Något annat som spelar roll är typ av spole och även formen på dessa. Men i detta projekt användes bara två typer av pannkakasspoler. Att tillverka spolar efter hur magnetfältet beter sig skulle troligtvis också öka verkningsgraden.

I projektet har även tester med flera än en primär och sekundär spole gjorts. Resultat gav inte några större förbättringar men detta beror främst på att de matades med samma strömkällor. Ifall spolarna hade matats med olika strömkällor hade det troligtvis blivit större skillnad.

12 Kritisk diskussion

Om man haft de erfarenheter och kunskaper som erhållits under projektet gång vid början av projektet skulle mer tid lagts på optimering av primärkretsen. Alternativ till oscillatoren skulle kunnat undersökas mer ingående och se hur andra typer hade påverkat överföringen. En utmaning var att få konstruktionen av primärkretsen att fungera effektivt. Därför kunde inte konstruktionen av hela systemet optimeras så mycket som önskats. En prototyp av en färdig bilbana och en bil med tillhörande sekundärkrets hade även kunna konstruerats om dessa kunskaper funnits vid början av projektet.

13 Referenser

- [1] "electric automobile." *Encyclopaedia Britannica. Encyclopaedia Britannica Online Academic Edition*, 2014 [Online]. Tillgänglig:
<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/182400/electric-automobile>. [Hämtad: 3 jun, 2014].
- [2] T. Eriksson "Induktion" *National Encyklopedin*, 2014 [Online]. Tillgänglig:
<http://www.ne.se/lang/induktion/211235>. [Hämtad: 3 jun 2014].
<http://www.volvocars.com/se/top/about/news-events/pages/default.aspx?itemid=460>
bild från datablad
- [3] A. Robinson, "The Volvo Group studies potential to test electric roads in city" Volvo Groups, 2014 [Online].
Tillgänglig: <http://news.volvogroup.com/2014/05/19/the-volvo-group-studies-potential-to-test-electric-roads-in-a-city/> [Hämtad 3 jun 2014].
- [4] N. P. Suh, "Design of Wireless Electric Power Transfer Technology: Shaped Magnetic Field in Resonance (SMFIR)" *OLEV Technologies*, 2010 [Online].
Tillgänglig: <http://olevtech.com/wp-content/uploads/2012/08/CIRP-Design-2011-Paper33.pdf>. [Hämtad: 2 jun 2014].
- [5] I. S. Suh "Application of Shaped Magnetic Field in Resonance (SMFIR) Technology to Future Urban Transportation" *KOASAS*, 2011 [Online]. Tillgänglig:
<http://koasas.kaist.ac.kr/bitstream/10203/23718/1/-CIRP-Design-2011-Paper34-Suh.pdf>. [Hämtad: 2 juni 2014].
- [6] S. Ahn, et al. "Magnetic Field Design for Low EMF and High Efficiency Wireless Power Transfer System in On-Line Electric Vehicles" *OLEV Technologies*, 2011 [Online]. Tillgänglig: <http://olevtech.com/wp-content/uploads/2012/08/CIRP-Design-2011-Paper35.pdf>. [Hämtad: 2 jun 2014].
- [7] A. Ansari, N. Backman "Trådlös energioverföring via elektromagnetisk induktion" *Chalmers*, 2013 [Online] Tillgänglig:
<http://studentarbeten.chalmers.se/publication/154979-tradlos-energioverforing-via-elektromagnetisk-induktion>. [Hämtad 3 jun 2014].
- [8] D. J. Morin, E. M. Purcell, *Electricity and magnetism*, 3 uppl. Cambridge: Cambridge University Press, 2013, ISBN 978-1-107-01402-2.
- [9] Wikipedia, "Induction" *Wikipedia*, 2014 [Online] Tillgänglig:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Inductance> [Hämtad 3 jun 2014].
- [10] M. Cederlöf, "Inductive Charging of Electrical Vehicles" M.S thesis, Dept. Elect. Eng. Royal Institute of Technology, Stockholm, 2012 [Online] Tillgänglig:
<http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:570953/FULLTEXT01.pdf> [Hämtad 3 jun 2014].
- [11] B. Molin, *Analog elektronik*, 2 uppl. Lund: Studentlitteratur AB, 2009, ISBN 978-91-44-05367-7.

- [12] I. Buchmann, "Lead-based Batteries," *Battery University*, 2014 [Online] Tillgänglig: http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries. [Hämtad: 3 jun 2014].
- [13] "Battery energy -- What battery provides more?" *All About Batteries*, 2011 [Online] Tillgänglig: <http://www.allaboutbatteries.com/Battery-Energy.html>. [Hämtad 3 jun 2014].
- [14] I. Buchmann, "Nickel-based Batteries," *Battery University*, 2014 [Online] Tillgänglig: http://batteryuniversity.com/learn/article/Nickel_based_batteries. [Hämtad: 3 jun 2014].
- [15] I. Buchmann, "Lithium-based Batteries," *Battery University*, 2014 [Online] Tillgänglig: http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries. [Hämtad: 3 jun 2014].
- [16] E. Alexandersson, "Induktiv laddning och häslo -effekter" Swedish ICT Viktoria., Göteborg, 2013.
- [17] TDK, "Tx Coil Units WT505090-20K2-A10-G" *TDK Cooperation of America*, 2013 [Online] Tillgänglig: http://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/TDK%20PDFs/Tx_Coil_Units.pdf. [Hämtad: 5 jun 2014]
- [18] Texas Instruments, "CMOS Phase-Locked-Loop Applications Using the CD54/74HC/HCT4046A and CD54/74HC/HCT7046A" *Texas Instrument*, 2002.
- [19] Burr-Brown Products, "80 V, 50mA Operational Amplifiers" *Burr-Brown Products*, 2003 [Online] Tillgänglig: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/ds/symlink/opa453.pdf>. [Hämtad: 5 jun 2014]
- [20] Wikipedia, "Förstärkare", *Wikipedia*, 2014 [Online] Tillgänglig: http://sv.wikipedia.org/wiki/F%C3%B6rst%C3%A4rkare#mediaviewer/Fil:Electronic_Amplifier_Push-pull.png. [Hämtad: 5 jun 2014]
- [21] Exar, "Xr-2209" *Exar*, 1997 [Online] Tillgänglig: <http://www.farnell.com/datasheets/1564027.pdf>. [Hämtad: 5 jun 2014]

Bilaga 1

Kod för undersökning av frekvens av PLL:

```
C1=4.7*10^-9;
C2=6*10^-12;
M1=6.1;
Vcoin=2;
R1=4700;
M2=7.5;
R2=4700;
Vcc=6;
Tpd=15*10^-9;
Vref=Vcc-0.6;
Vramp=0.1*Vcc+0.13;
I1=Vcoin/R1;
I2=Vref/R2;
Tc=((C1+C2)*(Vramp))/((M1*Vcoin/R1)+(M2*Vref/R2));
Fosc=1/(2*Tc+2*Tpd);
```

Bilaga 2

Kod för körning av Arduino:

```
const int Relay_1 = 0;
const int Relay_2 = 1;
const int Relay_3 = 2;
const int Relay_4 = 3;
const int Relay_5 = 4;
const int Relay_6 = 5;
const int Relay_7 = 6;
const int Sensor_1A = A0;
const int Sensor_2A = A1;
const int Sensor_3A = A2;
const int Sensor_4A = 10;
const int Sensor_5A = 11;
const int Sensor_6A = 12;
const int Sensor_7A = 13;

int Sensor_1 = 0;
int Sensor_2 = 0;
int Sensor_3 = 0;
int Sensor_4 = 0;
int Sensor_5 = 0;
int Sensor_6 = 0;
int Sensor_7 = 0;
int placering = 0;
int n = 0;
int tidsvariabel = 10000;
int troskelvarde = 500;

void setup() {

  pinMode(Relay_1, OUTPUT);
  pinMode(Relay_2, OUTPUT);
  pinMode(Relay_3, OUTPUT);
  pinMode(Relay_4, OUTPUT);
  pinMode(Relay_5, OUTPUT);
  pinMode(Relay_6, OUTPUT);
  pinMode(Relay_7, OUTPUT);
  pinMode(Sensor_1A, INPUT);
  pinMode(Sensor_2A, INPUT);
  pinMode(Sensor_3A, INPUT);
  pinMode(Sensor_4A, INPUT);
  pinMode(Sensor_5A, INPUT);
  pinMode(Sensor_6A, INPUT);
  pinMode(Sensor_7A, INPUT);
}
```

```

void loop() {
  Sensor_1 = analogRead(Sensor_1A);
  Sensor_2 = analogRead(Sensor_2A);
  Sensor_3 = analogRead(Sensor_3A);
  Sensor_4 = digitalRead(Sensor_4A);
  Sensor_5 = digitalRead(Sensor_5A);
  Sensor_6 = digitalRead(Sensor_6A);
  Sensor_7 = digitalRead(Sensor_7A);

  // HITTA PLACERING
  if (Sensor_1 >= troskelvarde){
    placering = 1;
    n = 0;
  }
  else if (Sensor_2 >= troskelvarde){
    placering = 2;
    n = 0;
  }
  else if (Sensor_3 >= troskelvarde){
    placering = 3;
    n = 0;
  }
  else if (Sensor_4 == HIGH){
    placering = 4;
    n = 0;
  }
  else if (Sensor_5 == HIGH){
    placering = 5;
    n = 0;
  }
  else if (Sensor_6 == HIGH){
    placering = 6;
    n = 0;
  }
  else if (n >= tidsvariabel) {
    placering = 0;
  }
  else {
    n++;
  }

  switch(placering){
    case 0:
      digitalWrite(Relay_1, LOW);
      digitalWrite(Relay_2, LOW);
      digitalWrite(Relay_3, LOW);
      break;
    case 1:
      digitalWrite(Relay_1, HIGH);
      digitalWrite(Relay_2, LOW);

```



```
    digitalWrite(Relay_3, LOW);
    break;
case 2:
    digitalWrite(Relay_1, LOW);
    digitalWrite(Relay_2, HIGH);
    digitalWrite(Relay_3, LOW);
    break;
case 3:
    digitalWrite(Relay_1, LOW);
    digitalWrite(Relay_2, LOW);
    digitalWrite(Relay_3, HIGH);
    break;
default:
    digitalWrite(Relay_1, LOW);
    digitalWrite(Relay_2, LOW);
    digitalWrite(Relay_3, LOW);
    break;
}
}
```

Bilaga 3

Flödesschema för styrsystem:

