

Induktionsladdning & Trådlös Kommunikation på Havsbotten

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet Elektroingenjör

NIKLAS ROOS, DAVID SCHULTZE

Institutionen för Signaler och System
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2016

Induktionsladdning & Trådlös Kommunikation på Havsbottnen

Examensarbete inom Högscoleingenjörprogrammet Elektroteknik

NIKLAS ROOS
DAVID SCHULTZE

Institutionen för Signaler och System
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2016

Förord

Vi som har arbetat med examensarbetet går på programmet Elektroteknik på Chalmers Tekniska högskola på institutionen Signaler och System. Rapporten som presenteras innefattar hur vi har gått tillväga för att bygga vårt projekt och hur vi har resonerat kring byggandet. Projektet har utförts på företaget Broccoli Engineering AB och vi vill tacka de på företaget som har hjälpt oss att uppnå de resultat som finns. Björn Bergholm, som har varit vår handledare på företaget, Amela Kobaslic, som har hjälpt oss vid behov, och även Fredrik Bülow som har funnits till hands då vi har fastnat i projektet. Vi vill även tacka Mats Hellberg på Linear Technology då han hjälpt oss att få vårt system att fungera. Och sist men inte minst Manne Stenberg som varit vår handledare från Chalmers som hjälpt oss med vår rapport.

Sammanfattning

I dagsläget finns det många anledningar att använda batterier på havsbotten, för just detta projekt är anledningen att samla mätdata som inte ska behöva skickas med ledning till land utan tas upp av ett skepp på ytan av havet. Detta medför att man på något sätt måste ladda dessa batterier som är placerade på botten. Projektet har utförts på företaget Broccoli AB som även har presenterat problemet och bett om en undersökning av en alternativ lösning från vad som finns i dagens läge. Den lösning som undersöktes i projektet var att med hjälp av induktion ladda dessa batterier och trådlöst skicka den uppsamlade datan. Denna rapport innehåller information om hur ett system byggts upp för att överföra energi trådlöst med hjälp av induktion i havsvatten och hur trådlös kommunikation ska ske i havsvatten. Havsvattnets påverkan på systemets prestanda har undersökts och resultatet blev att vid en frekvens på 100kHz så är inverkan på energiöverföringen i havsvatten nästan obefintlig. Resultatet av detta är att man kan konstruera ett laddningssystem med frekvensen 100 kHz som fungerar tillfredställande i havsvatten. Till detta resultat visas bland annat verkningsgrad för systemet och laddningstid, vilka är huvudmålen i projektet. Rapporten innehåller inte information om skeppets förmåga att från ytan kunna hitta de placerade batterierna på botten och docka med laddstationen.

Abstract

There are lots of reasons for someone to use batteries on the sea bottom, but for this project the reason is to collect data from stations on the bottom without having to use cables all the way to land but instead having a ship on the surface collecting the data. But by having batteries it is a must to be able to charge them. This project has been accomplished at Broccoli AB which also has presented the problem that is supposed to be examined and analyzed to reach an alternative solution for what is used in the current situation. The solution that will be analyzed in the project is to, with the help of inductive solenoid coils, charge the batteries and to send information wireless through seawater to gather the collected data from the underwater stations. The effect of the seawater on the systems performance will be examined and the results will be displayed in the report. There will be detailed information for what components that were used in the project and why they were used. However, what kind of data that will be sent through the wireless communication will not be taken into consideration and so will not the ships ability to follow and find the underwater stations. The results of this report shows that the system will work under water and what the drawbacks of the system are.

Innehållsförteckning

| | |
|---|----|
| Beteckningar | 1 |
| 1. Inledning | 2 |
| 1.1. Bakgrund | 2 |
| 1.2. Syfte | 2 |
| 1.3. Avgränsningar | 2 |
| 1.4. Precisering av frågeställning | 3 |
| 2. Teori och teknisk bakgrund | 4 |
| 2.1 Induktion | 4 |
| 2.1.1 Teori bakom induktorn | 4 |
| 2.1.2 Resonans | 4 |
| 2.1.3 Skinn-effekten | 5 |
| 2.1.4 Virvelströmmar | 5 |
| 2.1.5 Havets förlusteffekter på induktion | 5 |
| 2.2 Spolar | 6 |
| 2.3 Likriktning | 7 |
| 2.4 Arduino | 8 |
| 2.5 Växelriktning | 8 |
| 2.6 Batteriladdning | 9 |
| 2.7 Kommunikation i havsvatten | 10 |
| 3. Metod | 12 |
| 4. Prototyp för undervattensladdning | 13 |
| 4.1 Arduino UNO rev3/Arduino Motor Shield | 14 |
| 4.2 Spolar | 15 |
| 4.2.1 Primärspole | 16 |
| 4.2.2 Sekundärspole | 16 |
| 4.3 Batteri & Laddning | 16 |
| 4.3.1 Batteri | 16 |
| 4.3.2 Spänningsregulator | 17 |
| 4.4 Slutgiltig prototyp | 18 |
| 5. Undervattenskommunikation | 19 |
| 6. Mätningar | 21 |
| 6.1 Mätningar av spolar | 21 |
| 6.2 Trådlös Kommunikation | 23 |
| 6.3 Laddning & energiöverföring | 24 |
| 7. Resultat | 26 |

| | | |
|-----|--|----|
| 7.1 | Resultat för hela systemets verkningsgrad..... | 26 |
| 7.2 | Resultat för kommunikationen..... | 30 |
| 8. | Miljöaspekter..... | 31 |
| 9. | Diskussion..... | 32 |
| 10. | Referenser..... | 34 |
| 11. | Bilagor | 36 |

Beteckningar

Hz – Antal svängningar per sekund

AC – Växelspänning

DC – Likspänning

μ – Permeabilitet (H/m) magnetiska egenskapen hos ett material

μ_0 – Permeabilitet (H/m) magnetiska egenskapen i vakuum

ϵ – Permittivitet (F/m) ett mått på hur ett elektriskt fält påverkar och påverkas av ett elektriskt isolerande material

σ – Ledningsförmåga (S/m)

ω – Vinkelfrekvens (rad/s)

Φ – Magnetflöde (Weber, Wb)

δ – Skinndjupet (m)

α – Dämpningskonstant (neper/m, Np/m)

Arduino – kretskort

Primärsida – Sida som spänning matas till

Sekundärsida – Sida som tar emot spänning

1. Inledning

1.1. Bakgrund

I den norska oljeindustrin har man en hel del oljeledningar som går från oljeplattformar in till fastlandet. Dessa rör från oljeriggar är gjorda av järn som rostar. I nuläget har man korrosionsgivare till dessa rör för att veta när de behövs bytas ut. Korrosionsgivarna ström försörjs av ett stort batteripack på havsbotten som man efter en viss tid behöver byta ut eftersom de inte är laddningsbara. Informationen från givarna hämtas även manuellt med kabel upp till ett fartyg.

En fråga som då kom till Björn Bergholm, VD på Broccoli, var om det fanns något bättre sätt att utföra informationshämtning från givarna och energitillförseln. Trådlös laddning kom då upp som en idé för att lösa problemet, som samtidigt kunde tanka information från korrosionsgivarna på oljeledningarna.

1.2. Syfte

Syftet med projektet är att lättare kunna ladda dessa givare med hjälp av induktion samt skicka/ta emot data trådlöst istället för en fysisk "parkoppling" och på så sätt spara tid och pengar. Projektet delas upp i två delmål. Det ena delmålet är induktionsladdning i havsvatten och det andra är trådlös kommunikation i havsvatten.

1. Induktionsladdning

1. Att kunna ladda via induktion i havsvatten.
2. Undersöka dimensioner och precision för induktionsladdningen samt verkningsgrad beroende på avstånd mellan primär- och sekundärsida.

2. Kommunikation

1. Skicka data trådlöst genom havsvatten (ta emot data från givaren med ett visst kommunikationsprotokoll) samt undersöka hur havsvatten påverkar datahastighet.
2. Att kunna sätta givaren i "laddningsläge" när man är i närheten. (kommunikation mellan de båda induktionsmodulerna)
3. Vem som helst ska inte kunna sätta igång laddningen (ska behövas "ID")

Dessa punkter är uppdelade i rangordning för vilka delmål som är viktigast att uppnå för ett givande projekt. Det främsta målet är dock att skapa ett fullt fungerande system.

1.3. Avgränsningar

- Komponenter så som givare, växelriktare, överströmsskydd, likriktare införskaffas som färdiga moduler.
- Mindre fokus på givarens funktioner.
- Skeppets förmåga att följa rörledningen och hitta undervattensstationerna ignoreras helt i detta projekt.
- Ledningarna ner till induktionsmodulen på botten från skeppet är inte en del av projektet så dess förluster och egenskaper ignoreras.

1.4. Precisering av frågeställning

- Hur väl fungerar induktion i havsvatten?
- Hur påverkas laddningen av avstånd?
- Hur skickas informationen trådlöst genom vatten? (RF?, ultraljud?)
- Vilket avstånd blir kritiskt för vårt val av kommunikation?
- Hur bra fungerar hela systemet i havsvatten?

2. Teori och teknisk bakgrund

Teorin bakom de olika delarna i det kompletta systemet skiljer sig åt. Det delas i denna del upp i *växelriktning, induktion, spolrar, likriktning, kommunikation och batteriladdning*.

2.1 Induktion

2.1.1 Teori bakom induktorn

När en induktor blir utsatt för en tidsvarierande ström uppstår ett magnetfält runt induktorn, flödestätheten för magnetfältet har beteckningen B och enheten (Wb/m^2). Det magnetiska flödet i magnetfältet har beteckningen ϕ och enheten (Wb). Sambandet mellan det magnetiska flödet och den inducerade spänningen som kan uppstå i en närliggande ledare eller spole kan ses i ekvation 2.1 nedan. Detta samband kallas Faradays lag som säger att den inducerade spänningen beror på det tidsvarierande magnetiska flödet. Detta medför att man får en ökad spänning vid ökad variation av magnetflödet. Det negativa tecknet i ekvationen förutsätter att man har satt ut en referensriktning på den inducerade spänningen och det magnetiska flödet. Det är Lenz lag som säger att det magnetiska flödets ökning i exempelvis en spole alltid motverkas av strömmen som börjar gå i spolen, via denna ström i spolen genereras ett magnetfält som motverkar det ursprungliga magnetfältet [13].

$$e(t) = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

Biot-Savarts lag säger att det magnetiska flödet är proportionerligt mot strömmen. Vilket betyder att det bara är en konstant som skiljer emellan dessa två storheter. Det man kan göra då är att kombinera ekvationen för självinduktans, Biot-Savarts lag och antal varv på en spole för att få fram ett slutgiltigt samband som visas nedan i ekvation 2.2 [13].

$$\begin{aligned} \text{Självinduktans } e(t) &= -L \frac{di}{dt} \\ i \propto \phi &\Rightarrow \Phi = k \cdot i \\ e(t) &= -\frac{d\phi}{dt} = -k \frac{di}{dt} = -L \frac{di}{dt} \Rightarrow \\ L &= N \cdot k \Rightarrow \\ N \cdot \phi &= L \cdot i \end{aligned} \quad (2.2)$$

2.1.2 Resonans

Resonans kan förbättra en energiöverföring mellan två spolrar avsevärt vid längre avstånd mellan spolarna. Detta sker genom en oscillerande effekt som förstärker magnetfältet runt om spolarna där energin överförs. Oscillationen uppstår vid resonansfrekvens då kondensatorn och spolen växelvis lagrar energin i sina respektive fält. Resonansfrekvensen kan räknas ut via ekvationen 2.3 nedan. Kondensatorn lagrar energin i sitt elektriska fält medan spolen lagrar energin i sitt magnetiska fält. Oscillationen som uppstår skulle utan förluster kunna fortgå oändligt länge, det som gör att oscillationen avtar är förluster så som lindning resistanser samt läckresistans i kondensatorn [8].

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.3)$$

2.1.3 Skinn-effekten

Effekten strömförträngning ("Skinn-effekten") uppstår när magnetfältet alstras inuti koppartrådarna och på så sätt tränger ut flödet av strömmen ut i kanterna. Detta ger upphov till en högre resistans i ledaren eftersom ytan som strömmen flyter igenom är mindre, detta leder till förluster orsakad av skinneffekten. Enligt ekvation 2.2 så ökas magnetfältet med en ökad frekvens detta leder till att man får en större skinneffekt när frekvensen ökas. Detta fenomen ger stora förluster när kopparkardelernas storlek börjar bli större än skinndjupet som beräknas enligt *ekvation 2.4* nedan. I detta projekt används litztråd för att litztråden har många kardeler som minskar diametern för varje kardel vilket försvagar skinneffekten eftersom strömmen inte trängs ut mot ytan av ledaren lika lätt [16].

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}} \quad (2.4)$$

2.1.4 Virvelströmmar

Skineffekten har en direkt koppling till detta fenomen på grund av det faktum att de mindre magnetfälteten som uppstår inuti ledaren också inducerar strömmar. Dessa strömmar trycks utåt mot ytan av ledaren bort ifrån centrum. Dessa strömmar kallas virvelströmmar och resulterar i värme eftersom arean strömmen flyter igenom minskar. Då ökar resistiviteten i ledaren och större förluster sker[16].

2.1.5 Havets förlusteffekter på induktion

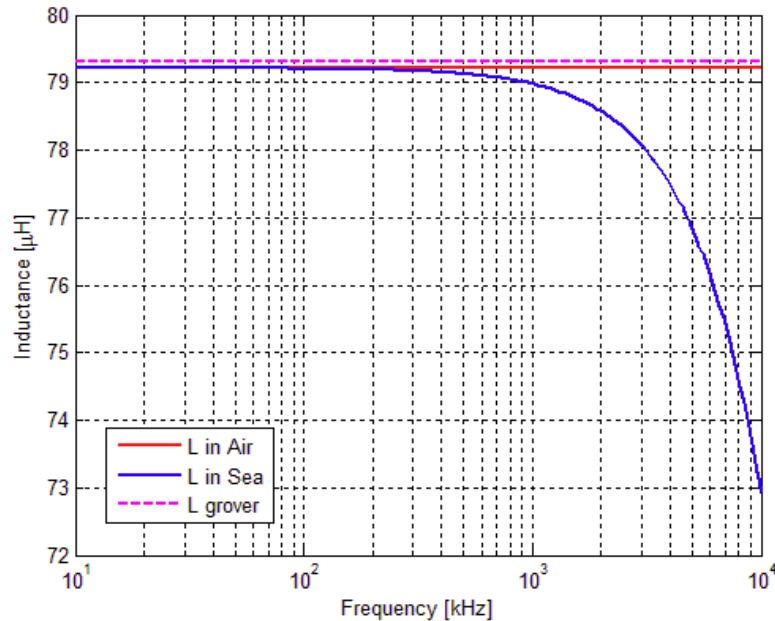
Det som påverkar förlusterna i havsvatten är salthalten som indirekt är konduktiviteten (σ) och den dielektriska egenskapen (ϵ) som kan påverka det magnetiska fältet hos spolen. Förlusterna förstärks av ökad frekvens på grund av salthalten, den dielektriska egenskapen som vatten har ger mestadels polariseringseffekter som förändrar fältets utseende[5][10][9].

Den faktiska förlusten som uppstår i havsvatten är att det induceras virvelströmmar i havsvattnet istället för att de induceras i sekundärsidan. Detta leder till en minskad överföring av magnetflödet och minskad överföring av energin. För att få fram ett mått på hur dämpningen av magnetfältet utspelar sig i havsvatten kan man utgå ifrån att när sambandet nedan i *ekvation 2.5* stämmer är havsvatten en god ledare. När detta samband är uppfyllt kan man utgå ifrån *ekvation 2.6* som har en exponentiell koppling till dämpningen av magnetfältet. I teorin längre ned kan man läsa om liknande förluster som gäller för kommunikationen där dämpning i havsvatten redovisas. Att de är liknande förluster beror på att båda systemen utnyttjar elektromagnetiska fält på olika sätt [5][9][17].

$$\frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon} \gg 1 \Rightarrow \quad (2.5)$$

$$\alpha = \sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma} \quad (2.6)$$

Man kan se i *figur 2.1* nedan att i luft får man inte alls samma minskning av induktansen som vid havsvatten. Detta beror på skineffekten där virvelströmmar blir till värme i havsvattnet vid höga frekvenser ekvationen för denna förlust kan ses i ekvation 2.6. Enligt en vetenskaplig artikel är dämpningen av radiosignalen i havsvatten 37 gånger större vid frekvensen 200 MHz än i sötvatten [9][10].



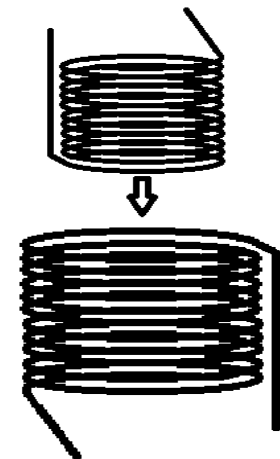
Figur 2.1 En graf som visar minskningen av induktansen i havsvatten och luft. (5)

2.2 Spolar

Det finns många delar i teorin bakom hur en spole och dess magnetfält påverkas av olika krafter som beskrivs i föregående del av kapitlet. Men för att beräkna den teoretiska modellen av en spoles induktans används ekvation 2.7 [1].

$$L_{inre} = \frac{\mu \cdot \pi \cdot D^2 \cdot N^2}{4l} \quad (2.7)$$

I denna formel kan permeabiliteten μ ha samma värde som permeabiliteten luft eftersom det har samma permeabilitet som saltvatten med bara några decimalers skillnad [19]. Detta inte en reflektion av verkligheten om det finns en ferritkärna som påverkar induktansen både i sekundär- och primärspolen. Denna påverkan av ferritkärnan kan dock snabbt bli mättad om tillräckligt höga strömmar flödar genom en transformator. En följd blir att magnetflödet runt spolen minskar och därifrån minskar även induktansen.



Figur 2.2 Visuell beskrivning av hur de fysiska spolarna används mot varandra.

Detta kan leda till olinjära induktanser som istället för att bero på antal varv och kärnmaterial börjar bero på storleken av strömmen [20][21].

Som kärna används, som nämns tidigare, en ferritstav. Detta för att uppnå ett starkare magnetiskt flöde och fält hos spolarna. Denna ferritstav agerar som en kärna för båda spolarna då de är i "laddningsläge" och omsluter varandra på så sett som visas i *figur 2.2* och även senare i *kapitel 4* i *figur 4.4*. Denna ferritkärna påverkar spolarnas induktans drastiskt vilket innebär att teoretiska formler för solenoidspolarnas induktans i luft inte stämmer överens med verkligheten. En enkel omvandling av *ekvation 2.8* gör att den ökade induktansen då istället beräknas med följande samband [4].

$$L_{inre} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_{ferrit} \cdot \pi \cdot area \cdot N^2}{l} \quad (2.8)$$

där μ för luft har ändrats till ferrit.

När spolarna är sammankopplade och bildar en transformator genererar de tillsammans en ny induktans som kan beräknas med följande ekvation [12]:

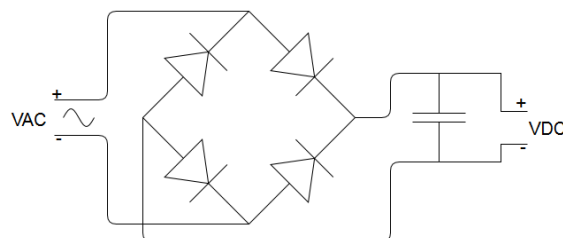
$$L_T = L_1 + L_2 + 2L_M \quad (2.9)$$

I denna ekvation motsvarar L_T den totala induktans som skapas i spolarna, L_1 & L_2 är primär- och sekundärspole och sist L_M är den "ömsesidiga" induktansen (mutual inductance) som uppstår mellan de båda spolarna.

För att överföra energin via spolarna med mindre förluster seriekopplas en resonanskondensator till primärspolen för att kompensera bort den reaktiva effekten. Dessa kondensatorer väljs efter att spolarnas verkliga induktans är testade och bestäms med hjälp av *ekvationen 2.3* för resonansfrekvens [8].

2.3 Likriktning

Efter att energiöverföringen mellan de båda spolarna har skett ligger den inducerade AC-spänningen över sekundärsidan. Det första som behöver göras då är att likrikta denna spänning med en halvågslikriktare. För att jämna ut det rippel som genereras efter halvågsliktaren används en glättningskondensator parallellt med likriktaren [7]. Detta visas i *figur 2.3*.



Figur 2.3 Schema för halvågslikriktaren

2.4 Arduino

Arduino UNO rev3 är det kretskort som ska implementeras i projektet för den logik som behövs. Det används då det har en låg strömförbrukning, är flexibelt, enkelt att programmera och är kompakt. Det behövs i projektet ett Arduino-kort till var del av systemet, d.v.s. en till primärsidan och en till sekundärsidan. Dessa två kretskort arbetar med kommunikationskopplingen mellan de båda delsystemen där kortet på sekundärsidan skickar data samtidigt som det kort på primärsidan tar emot data. Utöver att ta emot data tar Arduinot på primärsidan även hand om en klockpuls som behövs till den tilläggsmodul, Arduino motor shield, som arbetar med frekvensmodulationen i systemet. Denna klockpuls från Arduinot behövs för att bestämma frekvensen hos tilläggsmodulen.

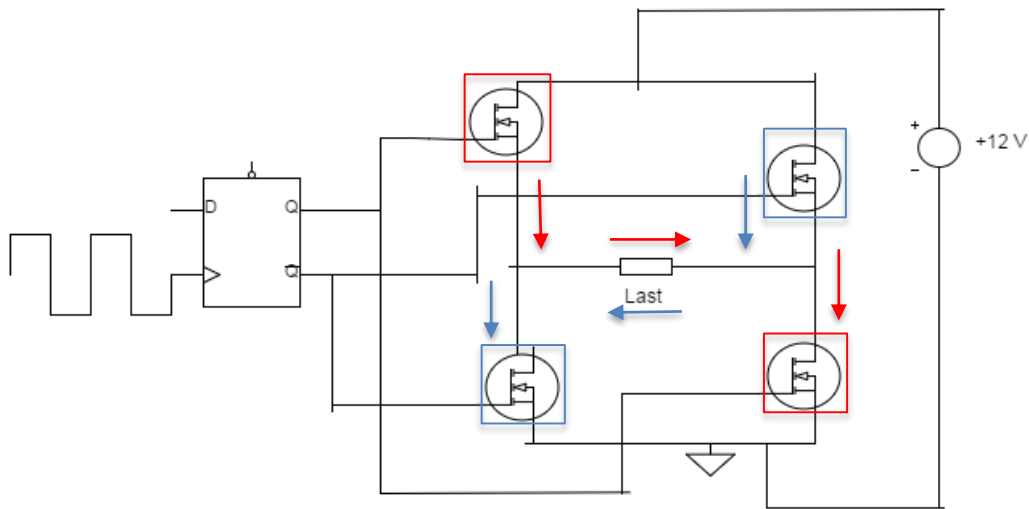
Arduino Motor Shield med innehållande H-brygga används i konstruktionen av den anledning just att den kan skapa en fyrkantsvåg med hög frekvens samtidigt som den kan leverera hög ström till primärspolen att man kan ladda batteriet tillräckligt snabbt. Denna H-brygga ska enligt datablad kunna hantera en utström på max 2A.

Till kommunikationen används två RF-moduler som enkelt kopplas in till Arduinot. Dessa ska enligt datablad kunna skicka data i luft ca 40 meter och kunna ta emot en signal med total dämpning på -105dB.

2.5 Växelriktning

För att uppnå så bra verkningsgrad för överföringen av energi mellan spolar måste en relativt hög frekvens användas, någonstans i kHz- upptill MHz-området [2]. Detta gäller för överföring i både luft som vatten vid frekvenser mellan 0~150kHz. Högre frekvenser påverkar vattnet induktansen hos spolen betydligt mycket mer än vad luft gör [3]. Därför borde 100kHz vara frekvensområdet för detta projekt då det uppfyller både kravet för påverkan av vattnet hos induktansen samt att det tillhör kHz-området för att uppnå hög verkningsgrad. För att uppnå denna växelriktning skaffas en modul till Arduinot som genererar en fyrkantspuls med hjälp av en H-brygga.

H-bryggan är uppbyggd av 4 transistorer och en oscillator som alternerar frekvensen för 2 transistorer åt gången för att på så sätt låta strömmen alternera vid lasten vilket alstrar en växelspänning som kan användas till primärspolen. Det man ser i *figur 2.4* nedan är vilken riktning strömmarna har när man sätter på respektive transistor par för H-bryggan.



Figur 2.4. H-bryggans funktion för att generera växelström.

2.6 Batteriladdning

Batteriladdningen består av en spänningsregulator som är anpassad för just vårt batteri som gör att batteriet inte kan bli överladdat samt att det levererar en mer konstant spänning och ström än vad som kan uppnås av enbart överföringen med spolarna. Denna regulator behöver anpassas för antalet battericeller i batteriet vilket för 12V är 6 stycken celler [15].

För att kunna mäta laddningstiden utgår man från de olika procentuella nivåerna för batteriet i tabell 2.1 vid mätning av laddningstiden. Som kan ses i tabellen nedan representerar detta nivåerna för de flesta 12-volts blybatterier [14].

Tabell 2.1

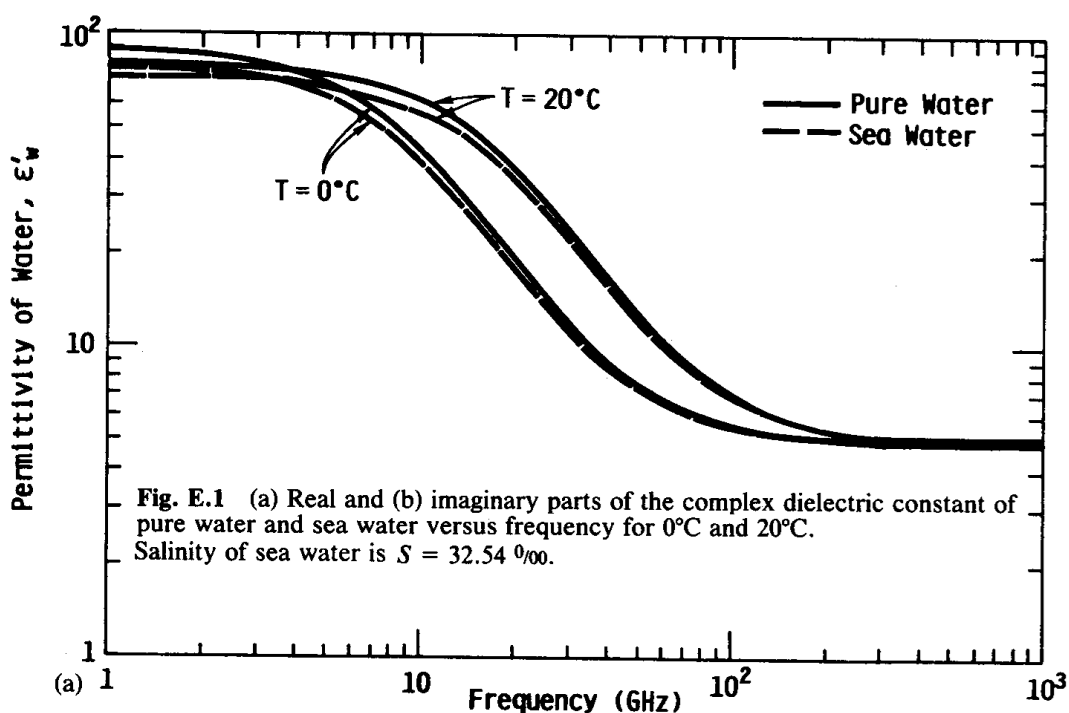
| Batterinivå [%] | Batterinivå [V] |
|-----------------|-----------------|
| 100 | 12,9 |
| 75 | 12,5 |
| 50 | 12,15 |
| 25 | 11,9 |
| 0 | 11,4 |

Vid laddning stämmer dessa spänningsnivåer inte eftersom man behöver en högre spänning än de redovisade spänningarna vid respektive batterinivå i tabellen 2,1 för att kunna ladda batteriet. För att starta en snabbladdning kan man ladda med ca 14,4V max beroende på batteri och under kontinuerlig laddning, ca 13,8V. För att inte skada eller slita på batteriet i onödan ska man helst inte hamna under 25% av batterinivån, d.v.s. 11,9V eftersom att syra halten vid denna batterinivå gör att korrosion av blyplattorna ökar [14].

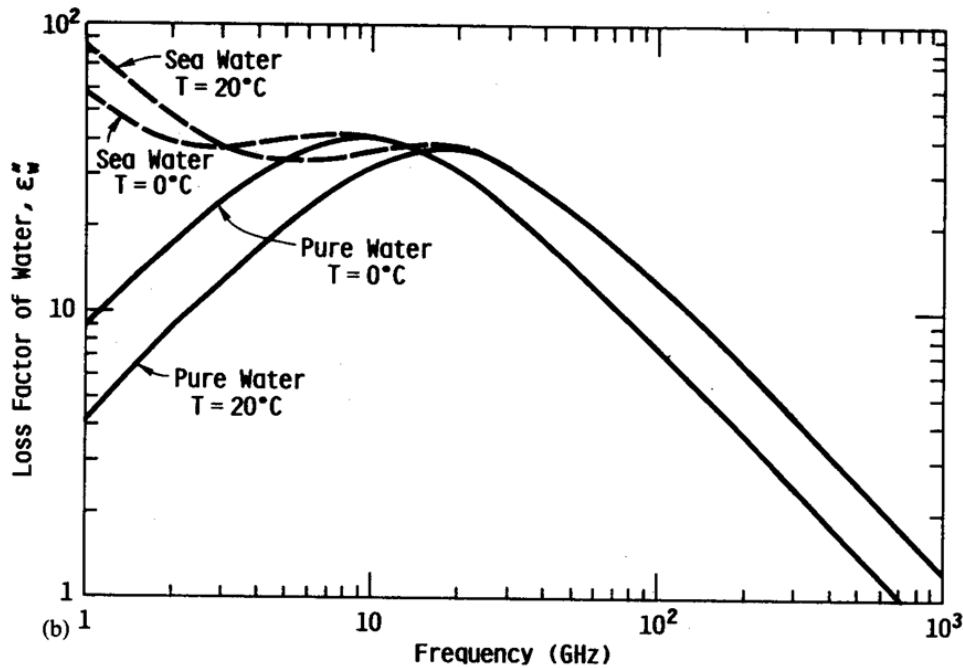
2.7 Kommunikation i havsvatten

Egenskaperna hos havsvatten påverkar utbredningen av radiovågor på ett dämpande sätt vid en hög frekvens på radiovågen. Denna effekt blir väldigt påtaglig vid en frekvens över 100 kHz och över denna frekvens sjunker kommunikationsmöjliga avstånd avsevärt. Vid en frekvens på 25 MHz kan man få en dämpning på 242,6 dB/m vilket begränsar avståndet mellan antennerna för att få till en fungerande informationsöverföring [10].

Permittiviteten (ϵ) för havsvatten är 74 F/m för en frekvens högre än 100kHz. Detta påverkar utbredning av vågen på ett polariserande sätt. De elektromagnetiska fälten polariseras av vattenmolekylerna detta betyder att de kan förskjuta de elektromagnetiska fälten fast utan att påverka signalen på ett negativt sätt. *Figur 2.5* nedan visar att om man utnyttjar gigahertz-området för att sända en signal minskar den dielektriska konstanten till en lägre nivå. Detta gör att den polariserande effekten som den dielektriska egenskapen har hos vatten minskas. Detta medför även att impedansen ökar i vattnet vid ökad frekvens, som i sin tur leder till att impedans skillnaden minskar mellan luft och havsvatten. När missanpassningen minskar mellan luft och havsvatten leder det till mindre reflektioner mellan luften och havet.[10]



Figur 2.5 Figur över hur permittiviteten minskar vid gigahertzområdet i havsvatten. (18)



Figur 2.6 Beskriver en signals förluster i havsvatten och sötvatten.

I figur 2.6 kan man se den imaginära delen av den dielektriska konstanten som är förlustfaktorn för havsvatten och sötvatten. Det som kan tolkas ur denna graf är att konduktiviteten i havsvatten har en dämpande effekt på elektromagnetiska vågor vid hög frekvens [10].

Det som påverkar radiosignalen negativt är den högre ledningsförmåga som det blir i havsvatten i och med salthalten, detta ger en dämpande effekt på radiosignalen. I *ekvation 2.10* kan man se att vid ökad frekvens får man en ökad dämpning av signalen på grund av ledningsförmågan i havsvattnet. Det som får havsvatten att ha en högre konduktivitet beror på joner. Dessa joner leder bort ström från signalen vilket leder till värmeförluster [10][22].

$$Avstånd = \frac{1}{\omega \cdot \sqrt{\frac{\mu \cdot \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right)}} \quad (2.10)$$

(Avstånd vid en dämpning av 3dB)

3. Metod

Projektet går ut på att bygga ett fungerande system som uppfyller de krav och målsättningar som finns. Med andra ord används en praktisk metod för att ett komplett och färdigt projekt ska kunna presenteras i rapporten. För prototypen är tanken att endast själva spolarna och RF-antennerna ska sänkas ner i vattnet, detta för att slippa lägga onödigt med resurser och tid på att göra hela systemet vattentätt. För att åstadkomma vattentäta delar lackeras dessa med hammarlack då det är ett väldigt slitstarkt lack som kan motstå saltvatten.

Primär- och sekundärspole byggs på plats för att enkelt kunna justera varv och eventuell storlek. Dessa tillsammans med en kondensator jobbar i sin resonansfrekvens. Då det inte finns några krav eller specifikationer för hur spolarna är utformade valdes två stycken solenoidspolar där den ena spolen "penetrerar" och omsluter den andra som kan ses i nästa kapitel i *figur 4.4*. För att inte behöva ändra antalet varv ofta tillverkas två sekundärspolar, en med lika många varv som primärspolen och en med fler varv än primärspolen för att generera en spänningsökning. Detta också för att när spolarna väl är lackerade kan inte antalet varv ändras. Alltså är de mätningarna som utförs när spolarna ligger under vatten bestämda då varvtalet inte längre går att ändra på.

Många delar såsom oscillator, överströmsskydd, spänningsregulator m.m införskaffas som färdiga moduler för att inte slösa tid med att "uppfinna hjulet flera gånger". Metoden för att samla in data består av att mäta ström och spänning på primär- och sekundärsidan på induktionsmodulen. Denna mätning utförs i medierna luft och saltvatten för att sedan kunna sammanställa datan och jämföra dessa.

Vårt system skall vara anpassat för en laddningsström av ca 2A vilket påverkar de framtida val av komponenter som används för att uppnå projektets mål.

För att åstadkomma en växelspanningskälla och ett kommunikationssystem är tanken att använda två Arduino-kort som programmeras i Arduinos egna programvara "Arduino". Det som implementeras i denna kod för primär delens sida är programmerandet av en fyrkantsvåg, som växelriktas med hjälp av en extern modul till Arduinot som innehåller en H-brygga. Kommunikationssystemet programmeras med hjälp av ett bibliotek som kallas virtualwire i Arduinoprogrammet. Till de två Arduino korten skall en radiosändare och radiomottagare köpas in. Då vilken information som skickas via den trådlösa kommunikationen är satt som avgränsning valdes den aktuella batterinivån som informationen att skicka.

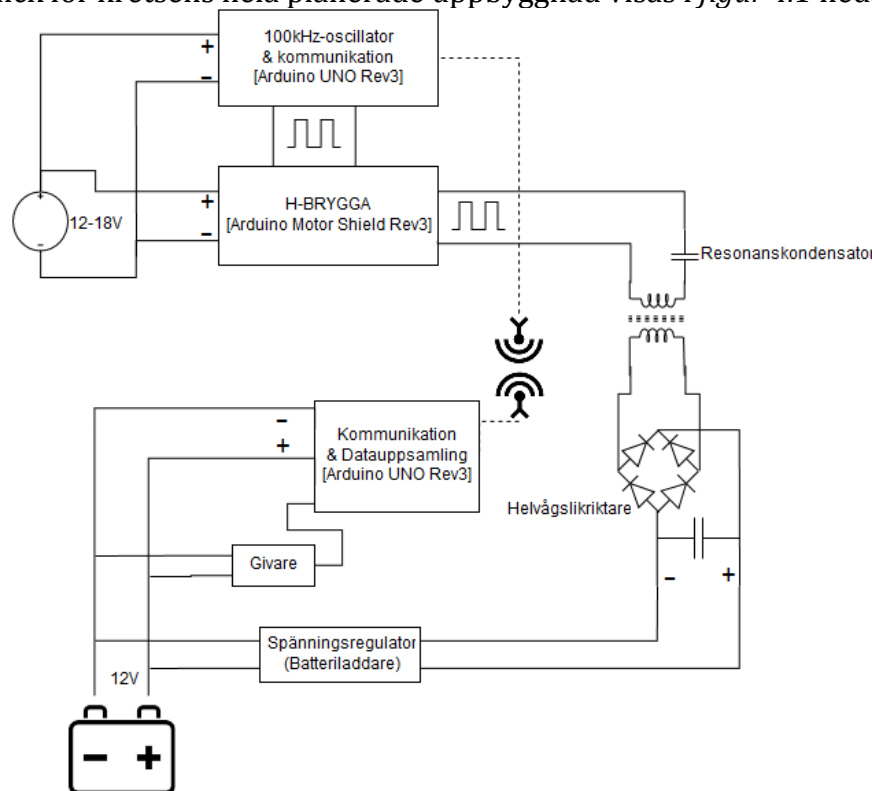
4. Prototyp för undervattensladdning

Detta kapitel är till stor del sammankopplat till *kapitel 6* då flera mätningar påverkar prototypens uppbyggnad och prestanda.

Matningsspänningen till systemet är en DC-spänning på 12-18V som då måste göras om till en AC-spänning upp till ca 100kHz. Till detta ändamål användes en H-brygga som styrs av en klockpuls från Arduinot som är justerbar upp till 16MHz för att tester av olika frekvenser blir enkla att utföra. H-bryggan matas samtidigt med 12-18V och har en maxbegränsning på 2A som utström. En H-brygga används för att generera en fyrkantsvåg då den till skillnad mot många andra metoder kan använda både en hög frekvens samtidigt som den kan sända ut en hög utström.

Energiöverföringen i systemet utförs med två stycken solenoidspolar där den ena spolen "omtäcker" den andra. Dessa spolar agerar tillsammans som en transformator. Det finns många olika metoder för att konstruera spolarna på men för just detta ändamål används solenoidspolar. Det beror på att det då blir enkelt och praktiskt för projektets ändamål att ovanifrån föra in i en primärspole in i en sekundärspole. Till dessa spolar används litztråd med anledningen för att minska förlusterna som beror på skinneffekten. Eftersom att koppartråden är uppdelad i 120 små kardeler minskar diametern avsevärt för varje kardel vilket gör att skinndjupet för frekvensen 100kHz är mycket större än diametern på kardelen. En ytterligare fördel är att slippa tänka på att trådarna berör varandra eftersom tråden är lackad och på detta sätt undvika kortslutning vid lindning.

En överblick för kretsens hela planerade uppbyggnad visas i *figur 4.1* nedan.



Figur 4.1 ett överskådligt schema för hur systemet är uppbygg

Primärsidan (översta delen i schemat) består av ett Arduino till för kommunikation och samtidigt kunna skapa en frekvens till H-bryggan. H-bryggan i sig används för att skapa en AC-spänning och är anpassad som modul till Arduinot. Resonanskretsen där dom ingående komponenterna är en spole och en kondensator arbetar med spänningsöverföring där primärspolen är en egentillverkad spole med en ferritkärna.

Sekundärsidan (underst i schemat) har först och främst en halvålslikriktare som likriktar AC-spänningen från spolen. Ett Arduino finns även på denna sida som är till för att samla data och sända detta till Arduinot på primärsidan. Ett blybatteri används till matningen av Arduinot och det är detta batteri som ska laddas. Till det används en spänningsregulator för att inte överladda batteriet. En noggrannare beskrivning av de använda komponenterna följer i detta avsnitt. Givaren som visas i schemat skall inte implementeras utan den data som ska samlas in är batteriets spänningsnivå. Men för att förtydliga att det ska samlas data har den använts i kretsschemat.

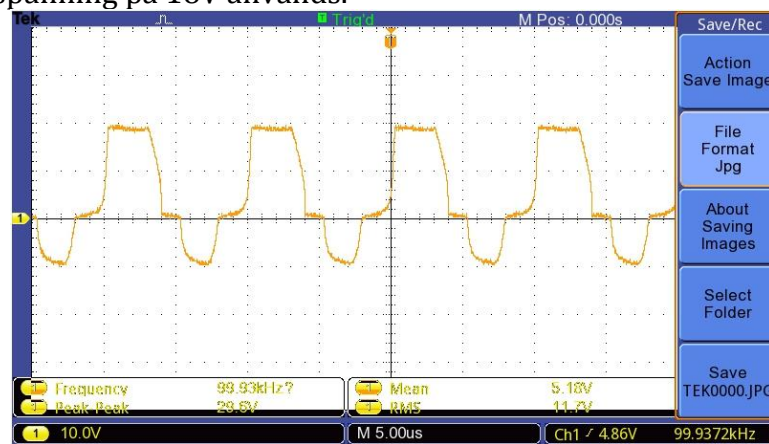
De olika delarna som är presenterade beskrivs ingående i fortsättningen av kapitlet.

4.1 Arduino UNO rev3/Arduino Motor Shield

På primärsidan är kortets uppgift i första hand att generera en tillräckligt hög frekvens för H-bryggan att alternera i, dvs. ca 100kHz vilket enkelt går att ändra i koden som är skriven som kan ses i *Bilaga A*. Den andra funktionen är att ta emot data vilket görs med hjälp av en RF-modul som kommunicerar mellan de båda kretskorten. Denna modul kan ses i *kapitel 5, figur 5.1*. Den mottagna datan kan visas på datorn som Arduinot är kopplat till.

Sekundärsidans Arduino skall arbeta med att samla data angående batteriets spänningsnivå och skicka detta som en procentuell nivå med hjälp av en RF-modul som visas i samma figur som modulen på primärsidan. De koder som har skrivits till dessa kretskort kan ses i *Bilaga A*.

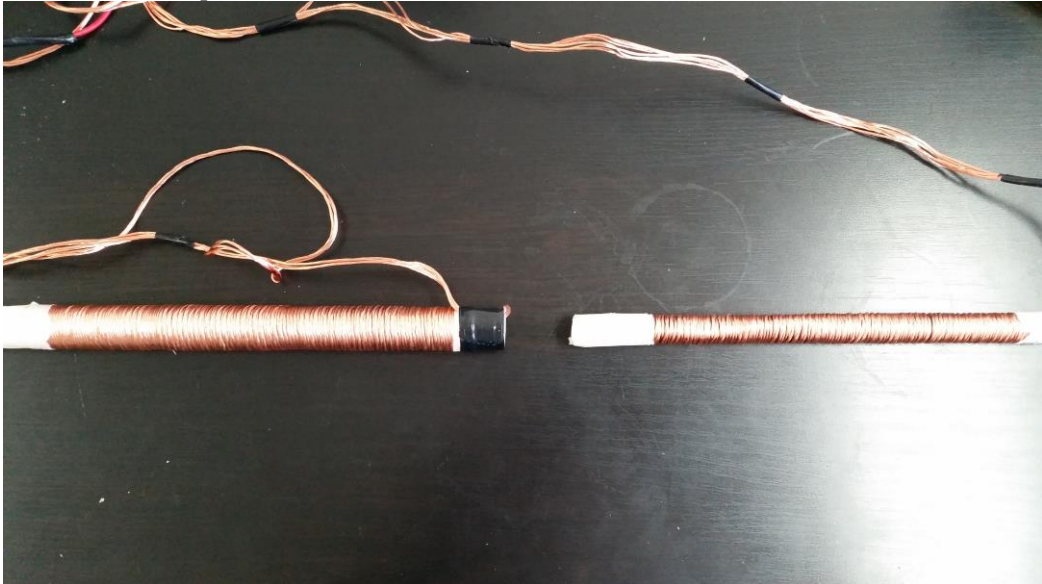
Den fyrkantsvåg som genereras i H-bryggan, (Arduino Motor Shield), visas i *figur 4.2* där en inspänning på 18V används.



Figur 4.2 Grafen visar utsignalen som genereras i H-bryggan där en klockpuls från Arduinot bestämmer frekvensen samt en separat matning på 18V.

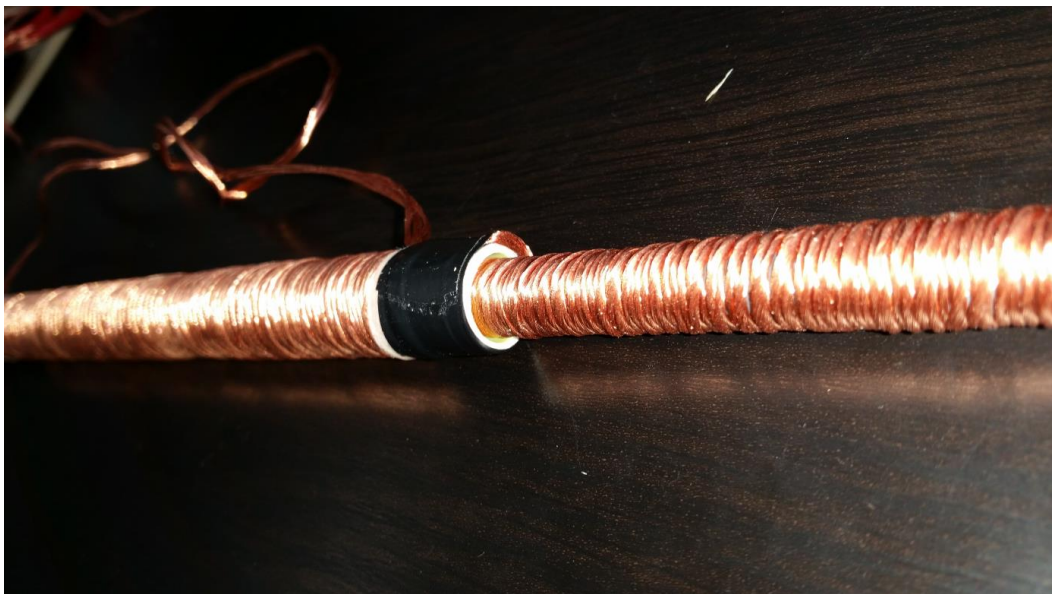
4.2 Spolar

Spolarna som lindas skall ha en begränsad storlek eftersom att ferritkärnan som används är 20cm lång med en diameter på 10mm. För att göra primärspolen så stor som möjligt lindas tråden runt hela längden av kärnan så som kan ses i *figur4.3* nedan där de färdiglindade spolarna visas. För att de säkert ska hålla i saltvatten målas spolarna med hammarlack.



Figur 4.3 Prototyp av de tillverkade spolarna där sekundärspolen kan ses till vänster och primärspolen kan ses till höger.

I nästa figur kan man även se hur de byggda spolarna passar till varandra.



Figur 4.4 Här visas hur primärspolen åker in i sekundärspolen

4.2.1 Primärspole

Primärspolen består av en ferritkärna med den relativa permeabiliteten 110 H/m samt en lindning av litztråd med 66 varv med enkellindning. Ferritstaven i spolen hjälper till att rikta magnetfältet för att få så bra energiöverföring som möjligt. Diametern för ferritkärnan är 9,9mm. Litztråden i sig är ca 1mm i diameter så enkelt avrundat blir den totala ytterdiametern för spolen ca 12mm. Då diametern på spolen mäts mellan mittpunkterna av litztråden blir då den normerade diametern 11mm. Längden på spolen är 180 mm

4.2.2 Sekundärspole

Som beskrivs i *kapitel 3* har två sekundärspolar tillverkats, detta för att det inte går att ändra antalet varv efter att de är lackerade med hammarlack. De är lindade runt varsitt VP-rör med 13mm i innerdiameter för att primärspolen tillsammans med lindningstråden ska få plats inuti röret. Detta gör att ytterdiametern på den lindade spolen blir 17mm, där normerad diameter är 16mm, vilket ger ett glapp på 2.5 mm, ($16\text{mm}-11\text{mm}/2$ för att få ut avståndet på varje sida av spolen), mellan primär- och sekundärsida. Specifikationer av de bägge spolarna visas i tabellen nedan.

Tabell 4.1

| | Sekundärspole 1 | Sekundärspole 2 |
|---------------|-----------------|-----------------|
| Varv | 68 | 109 |
| Längd [mm] | 180 | 200 |
| Diameter [mm] | 16 | 16 |

För att jämföra den teoretiska skillnaden på induktansen för luft- & ferritkärna beräknas resultaten med *ekvation 2.7* och *ekvation 2.8* för de olika permeabiliteterna. Då saltvatten i princip har samma permeabilitet som luft används luft i ekvationen.

Luftkärna ⇒

$$L_{\text{primär}} = 2,89\mu\text{H}$$

$$L_{\text{sekundär},1} = 7,76\mu\text{H}$$

$$L_{\text{sekundär},2} = 16,94\mu\text{H}$$

Ferritkärna ⇒

$$L_{\text{primär}} = 106\mu\text{H}$$

$$L_{\text{sekundär},1} = 235\mu\text{H}$$

$$L_{\text{sekundär},2} = 585\mu\text{H}$$

Som visas i resultatet ovan skiljer det sig otroligt mycket mellan de olika sorters kärnorna. Spolarnas riktiga värden mäts med hjälp en RCL-mätare som visas i *kapitel 6*.

4.3 Batteri & Laddning

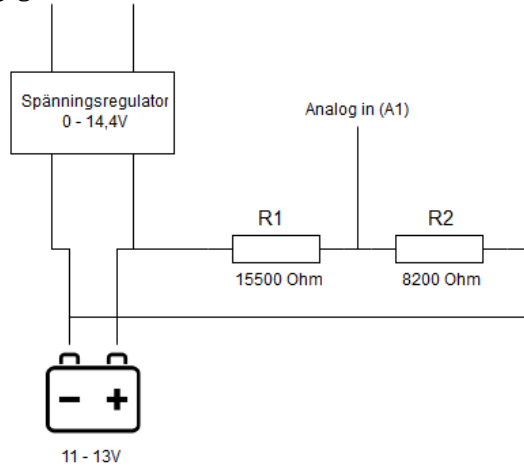
4.3.1 Batteri

Batteriet som används är ett blybatteri på 12V, 4Ah. Detta valdes för smidigheten och flexibiliteten hos blybatterier. Batteriets spänningsnivå ska läsas in i Arduinot på sekundärsidan och skickas via den trådlösa kommunikationen. Enligt koden som är skriven till Arduinot på sekundärsidan finns ett linjärt samband där 11,4-13V motsvarar 0-100%, 13-13,9V motsvarar att batteriet är under laddning där meddelandet "in charge" skickas. Allt över 13,9V betyder att batteriet är fullt laddat där meddelandet "fully charged" skickas. Koden kan ses i

bilaga A. Då Arduinots analoga ingångar kan hantera spänningar mellan 0-5V, som tolkas som 0-1023 bitar av Arduinot, har spänningsdelning gjorts där 14,4V in ska motsvara 5V till den analoga ingången. Tillsammans med följande ekvation kan man få fram de resistorer som behövs för spänningsdelningen:

$$V_{UT} = V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \Rightarrow \{ R_1 = 15,5k\Omega, R_2 = 8,2k\Omega \} \quad (4.1)$$

Lösningen kan ses i *figur 4.5* nedan.



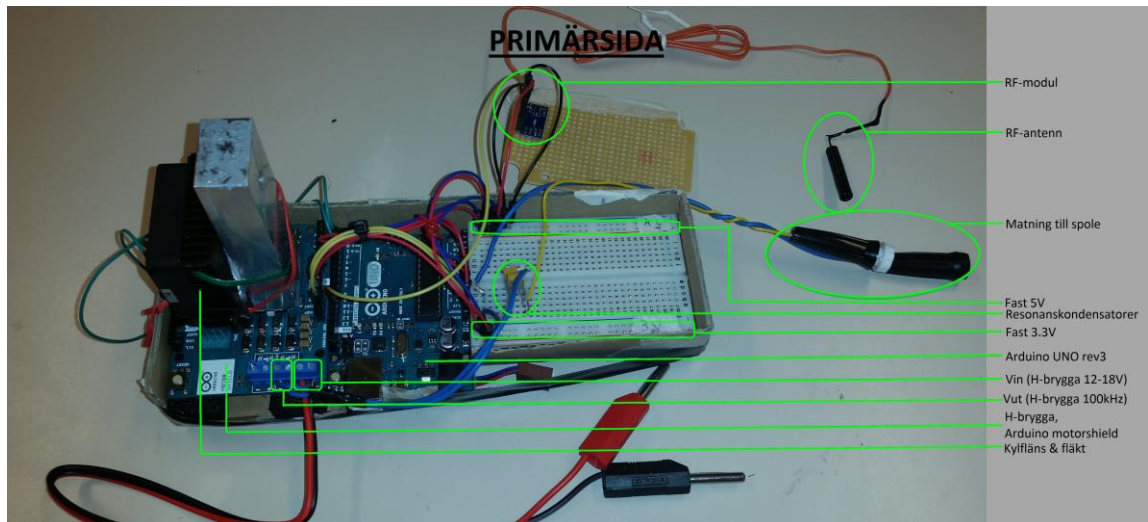
Figur 4.5 Krettschema för spänningsdelningen till Arduinots analoga ingång.

4.3.2 Spänningsregulator

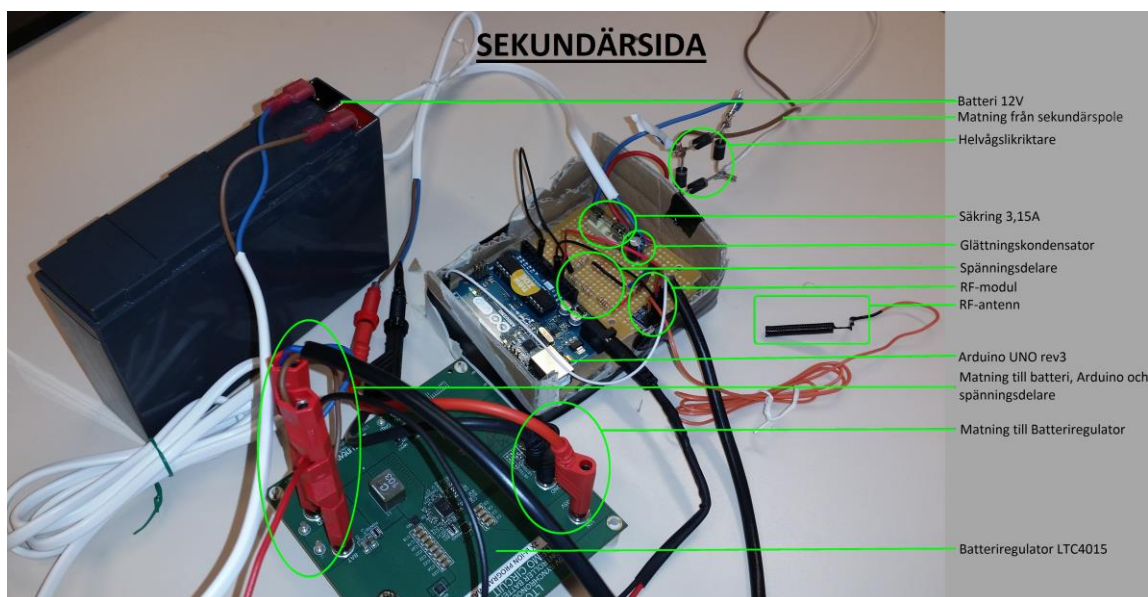
Spänningsregulatorn som används för laddningen av batteriet är en färdig modul i form av ett demokort som Linear Technology tillhandhåller och är baserad på chippet LTC-4015. Detta kretskort kan matas med max 35 Volt och 8 Ampere på V_{in} . Kretsen är uppbyggd av en "buck- converter" som konverterar ner spänningen från V_{in} till en fixerad laddningsspänning för batteriet på batteriutgången. Utöver utgången till batteriet och V_{in} kan man även koppla en last på en separat ingång(sys) som kan matas från inspänningen (V_{in}) eller från själva batteriet. Demokortet ställdes in enligt databladet för ett blybatteri med sex celler och en fixerad spänningsladdning. Detta gjordes genom att löda bort 0-ohmiga resistorer på kortet så att de stämde överens med databladets tabell. Verkningsgraden vid en ström på 1 ampere skall vara 85% enligt en graf i databladet.

4.4 Slutgiltig prototyp

Det system som är den färdiga prototypen består av alla delar som nämnts tidigare i detta kapitel. Delarna som används är bestämda utifrån teoribaserade argument samt från de resultat som visat sig under mätningar som beskrivs senare i *kapitel 6*. Nedan visas den kretslayout som gjorts under projektets gång.



Figur 4.6 Kretslayout för den färdiga prototypen av primärsidan med alla ingående komponenter beskrivna. Primärspolen används inte i denna bild men ska under körning vara inkopplad i de blå och gula kablarna.



Figur 4.7 Kretslayout för den färdiga prototypen av sekundärsidan med alla ingående komponenter beskrivna. Sekundärspolen används inte i denna bild men ska kopplas in på den bruna och vita kabeln överst i bilden.

Ett noggrannare kopplingschema kan ses i *bilaga D* där det visas vilka ben som är ihopkopplade med varandra samt vilka storlekar på komponenter som använts.

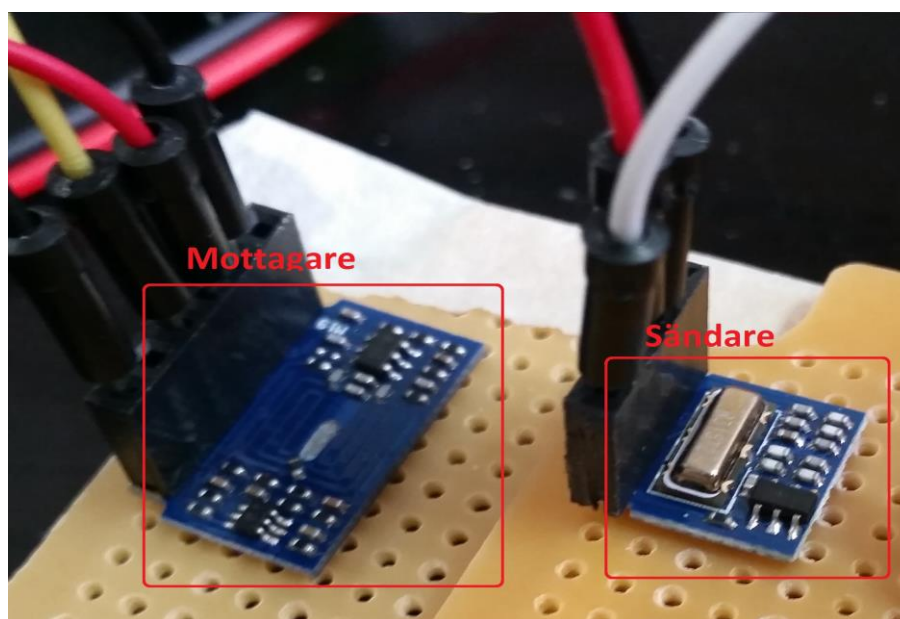
5. Undervattenskommunikation

Vid konstruktion av kommunikationssystemet kom man fram till att det inte kan vara för låg frekvens pga. att det då skulle bli för stora antenner att konstruera på ett smidigt sätt i projektet och inte för hög frekvens eftersom dämpningen av signalen då skulle vara väldigt hög beroende på konduktiviteten i havsvattnet och dess dielektriska egenskaper. Projektet är heller inte beroende av en datahastighet som kräver WI-FI, därför skall frekvensen vara 315 MHz och enligt *ekvation 2.10* ska det vara en dämpning på 3dB vid avståndet 1,765 cm vilket är ett avstånd man kan ha i konstruktionen [11][9].

Systemet för kommunikationen är uppbyggt av två moduler som visas i figuren nedan, en sändare och en mottagare som är kompatibel med Arduino på både primär och sekundärsidan. Det som motiverade detta beslut att använda ett kommunikationssystem baserat på radiovågor är att det finns flertal fördelar med det. En fördel med radiovågsöverföring gentemot ultraljudsbaserad kommunikation är datahastigheten, som vid ultraljud är mycket lägre. Ultraljud kan också störa havslevande varelser med sitt ljud och trots att det fungerar på mycket längre avstånd än radiovågor påverkas signalen av föroreningar i vattnet medan radiovågor inte påverkas av dessa föroreningar. Slutsatsen är att man i detta projekt använder sig av en radiobaserad kommunikationslösning eftersom avståndet inte är stort mellan sändar- och mottagarsidan [9].

Enligt databladet är känsligheten för mottagaren -105 dB och det avstånd som kan upprätthålla kommunikation är 40 meter. För att beräkna avståndet som är möjligt i saltvatten tas de teoretiskt uträknade värdena avståndet 1,765 cm som har dämpning -3dB i saltvatten. Eftersom mottagaren kan tyda en signal med dämpningen -105dB ska det teoretiskt gå att skicka data med avståndet 61,775cm i saltvatten.

$$\frac{\text{total dämpning}}{\text{dämpning per enhet}} \cdot \text{avstånd} = \frac{105\text{dB}}{3\text{dB}} \cdot 1,765\text{cm} = 61,775\text{cm}$$



Figur 5.1 Sändare och mottagare av RF-frekvenser som jobbar vid 315MHz

Informationen som ska skickas sänds ut under tiden batteriet laddas och uppdateras för varje minut för att se den aktuella laddningsstatusen och den batterinivå som batteriet har.

6. Mätningar

Ett flertal mätningar för att ta reda på effekter, strömmar och verkningsgrader är utförda på systemet. Data sammanställs och jämförs för att se vad som kan förbättras i systemet och vad som behöver ändras samt vad som redan är optimalt. Dessa mätningar ligger till grund för resultatet för projektet. De flesta mätningarna utförs i både luft och saltvatten för att jämföra dessa mätningar i resultatet.

6.1 Mätningar av spolar

Spolarnas riktiga induktans stämmer förmodligen inte överens helt med de teoretiskt uträknade värdena då det är mycket som påverkar dess induktans i praktiken. Till exempel hur tätt och exakt tråden är lindad runt kärnan och därför utförs tester och verifieringar. Med en RCL-meter kan parametrarna för spolarna enkelt mätas upp vid testfrekvensen 100kHz.

Resultatet av detta blev följande:

$$L_{\text{Primär}} = 189\mu\text{H}$$

$$L_{\text{Sekundär},1} = 214\mu\text{H} \text{ (med primärspole och ferritkärna iförd)}$$

$$L_{\text{Sekundär},2} = 351\mu\text{H} \text{ (med primärspole och ferritkärna iförd)}$$

Ytterligare mätningar gjordes på sekundärspolarna för att veta vad de har för induktans utan ferritkärnan.

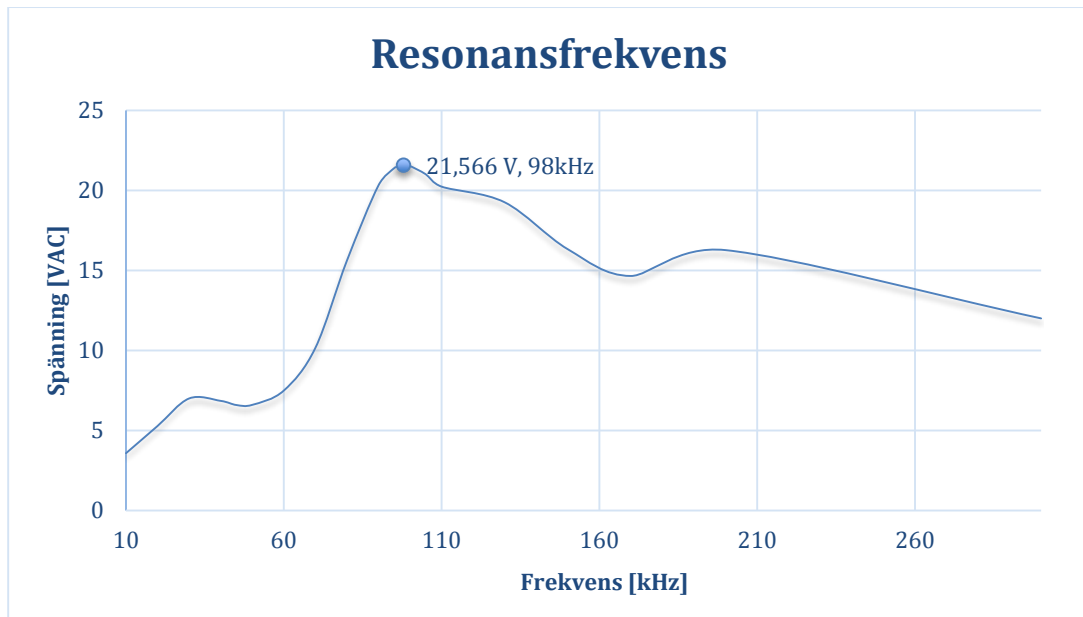
$$L_{\text{Primär}} = \text{Ej uppmätt}$$

$$L_{\text{Sekundär},1} = 10,0\mu\text{H} \text{ (utan primärspole och ferritkärna iförd)}$$

$$L_{\text{Sekundär},2} = 15,6\mu\text{H} \text{ (utan primärspole och ferritkärna iförd)}$$

Spolarnas riktiga induktans stämmer inte helt och hållet utefter de uträknade värdena i avsnitt 4. Sekundärspole nummer 2 har en induktans som skiljer sig uppemot $230\mu\text{H}$ från det uträknade värdet med ferritkärnan, vilket är förvånansvärt mycket. Däremot skiljer sig inte värdena utan ferritkärnan iförd särskilt mycket. Detta kan troligtvis bero på att spolarna påverkar varandra i en större utsträckning än vad formlerna är utformade för då de inte är anpassade för att ha ett påverkande element utöver kärnan. Ett luftgap på ungefär 2mm finns mellan ferritkärnan och sekundärspolarna som också påverkar den totala permeabiliteten i kärnan vilket gör att den minskar. Då luft har ungefär samma permeabilitet som vatten skall detta inte påverka spolens induktans i märkbar utsträckning när den förs ner i vatten. Det problemet behöver inte heller tas hänsyn till för primärspolen då den är tätt lindad runt ferritkärnan. Dessa värden blir de värden som används i framtida beräkningar och för att anpassa kretsen.

Användning av *ekvation 2.3* ger då följande resultat. $(2 \cdot \pi \cdot 100000)^2 \cdot 189 \cdot 10^{-6} = 13,4 \cdot 10^{-9}$. Detta ger resonanskondensatorn $C = 13,4\text{nF}$ vid 100kHz, vilket är den frekvens som man bör försöka hålla sig omkring. Då denna exakta storlek på kondensator inte finns väljs ett liknande värde, enklast blev 13nF av typen keramiska kondensatorer av flerskiktstyp. För att verifiera detta utförs tester. Dessa tester är dock utförda endast för att få reda på energiöverföring vid olika frekvenser och använder en signalgenerator som spänningskälla. Detta reflekterar inte storleken på de verkliga strömmar och spänningar som används senare i det riktiga systemet.



Figur 6.1 Testerna är utförda med en matningsspänning på 10VAC (fyrkantsvåg) från en signalgenerator och mätta på sekundärspolens plus- och minusben. Punkterna i grafen visar resonansfrekvensen 98kHz för spolarna i projektet. Testerna är utförda med sekundärspole 1.

Som kan ses i grafen är den högsta spänningen vid 98kHz. Alltså är resonansfrekvensen nästan exakt vid det beräknade värdet, 100kHz.

De första mätningarna som utfördes, som var anpassade efter detta resultat, med last på systemet, lyckades dock inte då ingen spänning överfördes mellan sekundär- och primärsidan. Efter tester och diskussion upptäcktes att detta beror på att kondensatorerna som används för att generera den resonansfrekvensen som beskrivs tidigare i avsnitt 6.1 är helt fel. Denna kapacitans stämmer inte längre när man sätter en last på systemet (laddningsläge). Detta beror högst troligt på att den ferritkärna som används har blivit mättad på ett sådant sätt som beskrivs i *kapitel 2.2*. Detta uppstår då det finns en last på systemet vilket betyder att en ökad ström överförs. Den RCL-metern som användes vid resonansmätningen har inte tillräckligt hög ström för att kunna mäta kärnan, men det riktiga systemet har. Därav genereras de olika beroendena för induktansen och de olika resultaten. Den induktans som resonanskondensatorn var anpassad till under resonanstestet är primärspolens induktans ($189\mu H$) men det skapas även en ömsesidig induktans mellan sekundär- och primärspolen som också påverkar detta resultat. Denna ömsesidiga induktans beskrivs i *kapitel 2* och förklaras i *ekvation 2.9*.

Den totala induktansen hos spolarna har nu ändrats och den nya kapacitans som behövs för att uppnå resonans är ca $167nF$ istället för $13nF$. Detta innebär att den induktans som uppstår i spolarna under last egentligen är ca $15\mu H$ istället för $189\mu H$. Den ömsesidiga induktans som nämns ovan, $15\mu H$, är med tester av primärspole och sekundärspole 2. Den nya ömsesidiga induktansen med sekundärspole 1 blir ca $11\mu H$. De Resultatet visas i *tabell 6.1*.

Tabell 6.1

| | Primär- med Sekundärspole 1 | Primär- med Sekundärspole 2 |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Beräknad induktans [μH] | 189 | 189 |
| Ny gemensam induktans [μH] | 11 | 15 |
| Beräknad resonanskap. [nF] | 13,4 | 13,4 |
| Ny resonanskap. [nF] | 230 | 167 |

Slutsatsen som kan dras av detta är att den nya induktansen som uppstått är ömsesidig induktion mellan spolarna samt den mättade effekt som uppstår i ferritkärnan vid höga strömmar.

6.2 Trådlös Kommunikation

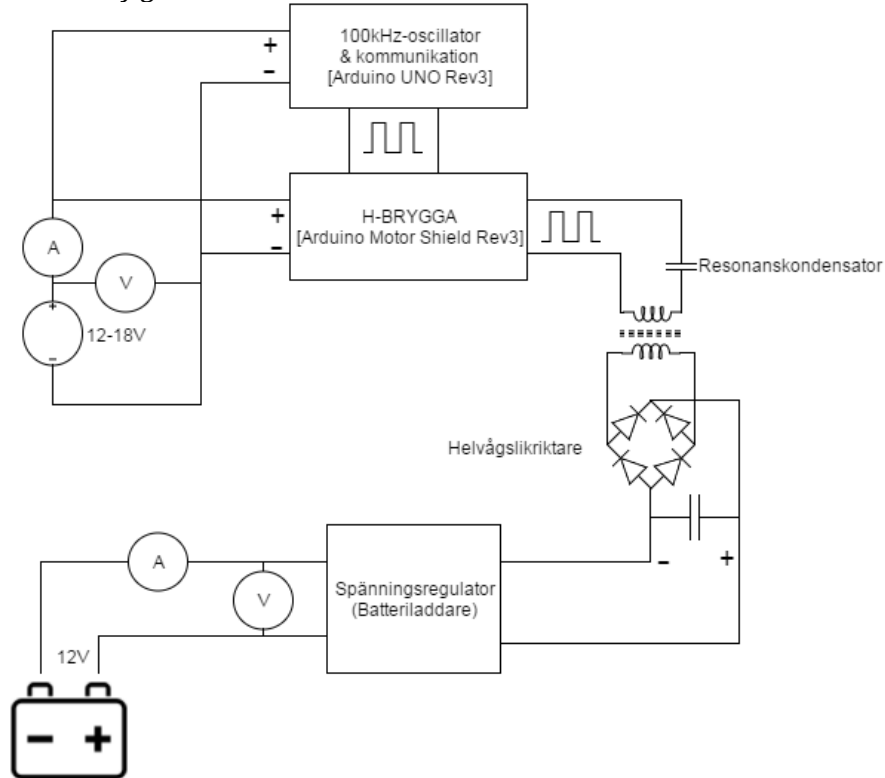
Den information som sänds mellan de båda Arduinokorten skickas med hjälp av 2 stycken RF-moduler som är anpassade för att ta emot en dataström och skicka den trådlöst med 315MHz som även nämns i *kapitel 5*. För att programmera de båda kretskorten används ett färdigt bibliotek, virtualwire, som med enkla kommandon kan anpassa den dataöverföringshastigheten som kan uppnås i saltvatten. Koden som är skriven till detta kan ses i *bilaga A*.

Efter implementationen av koden testades överföringen först i luft och det verkar fungera som förväntat. I testet skickades data var tionde sekund för att minska väntetiden mellan den överförda datan. Ett problem som uppstod under testningarna som utfördes på kommunikationen var att testerna gav resultat trots att en av antennerna var under vatten. Det konstaterades att det måste läcka radiovågor från sändaren som gör att kommunikationen sker via luft. Detta skulle kunna lösas genom att skärma av sändarkretsen mha en Faradays bur som kan skärma av den elektromagnetiska signalen. Detta testades och man fick skärmat av sändarmodulen mer med en del störningar av signalen dock inte tillräckligt för att radiosignal inte skulle utbreda sig via luften.

En mätning utfördes för att se vilken effekt Arduinot på sekundärsidan drar för att kunna uppskatta hur länge batteriet kan driva sekundärsidan. Strömmen som Arduinot drog var 0,058 - 0,06A vid 12,05V vilket är en effekt på ca 720mW.

6.3 Laddning & energioverföring

I detta delkapitel följer mätningar utförda för hur systemet fungerar under laddningstillstånd både i luft och i saltvatten. Mätningarna har gått till på så sätt som beskrivs i *figur 6.2* nedan.



Figur 6.2 kretsschema för hur systemet är kopplat under laddning.

För att inte få onödiga spänningsfall och störningar kopplas sekundärsidans Arduino bort och på så sätt fås ett mer noggrant resultat i testerna. Det första resultat som uppnåtts är spänningsförlusterna som uppstår i saltvatten. När mätningar utfördes utan last i luft uppgick spänningen till sekundärsidan uppemot 45V medan det i saltvatten endast nådde 31V med sekundärspole 2. För sekundärspole 1 gick spänningen från 33V i luft ner till 16V i saltvatten.

När mätningar av laddningen skedde upptäcktes att den maximala ström som kan överföras i systemet minskar drastiskt under tiden som H-bryggan blir varm. Den maximala ström som nås när H-bryggan levererar konstant ström är endast 0,51A till batteriet med en spänning på 13,3V. Då systemet är designat för 1,5-2A för att få så snabb laddning som möjligt blev detta käppen i kugghjulet som drar ner hela systemet. Efter enkla justeringar med kylflänsar och fläktar kan en ström på 0,8A flyta till batteriet istället vilket är bättre men fortfarande inte det önskade värdet. Detta, med *sekundärspole nummer 2*. Med *sekundärspole nummer 1* blir strömmen istället ca 0,6 A. Strömöverföringen blir alltså bättre med *sekundärspole 2*, den med fler antal varv. Däremot blir verkningsgraden sämre med denna spole som kan ses i *kapitel 7*.

Efter att batteriet är fullt laddat uppgår spänningen till 12,915V över polerna. Detta stämmer väldigt bra med den generella uppskattningen för blybatterier som beskrivs i *kapitel 2.6*. Detta används som grund för att det teoretiskt borde stämma att de andra nivåerna i *tabell 2.1* också är korrekta för den procentuella batterinivån då detta inte går att mäta på ett praktiskt sätt.

Hur lång tid det tar för batteriet att laddas med denna ström blir nästa experiment. Laddningstiden för hela systemet mäts under en lång period. Samtidigt antecknas spännings- och strömnivåer från mätinstrumentet (Hewlett Packard 34401A Multimeter) för analysering av hur laddningen beter sig under laddcykeln. För att ladda ur batteriet mellan mätningarna används ett effektmotstånd på 25 W. Laddningsmätningen börjar då batteriet har en spänning på 11,9V, d.v.s. 25%, fram till dess att spänningsregulatorn stänger av laddningen. Testet utförs först i luft och sedan saltvatten och beskrivs i *kapitel 7*, samt visas som tabeller i *bilaga B*.

En mätning med frekvensen 200 kHz utförs momentant för att få ut verkningsgraden för systemet i saltvatten och luft. Resultatet kan hittas i *bilaga C* och redovisas i *kapitel 7*.

Ett snabbt test för att uppskatta hur länge systemet kan vara igång tills batteriet når 25% gjordes på Arduinot. Det drog ca 60mA vid en spänning på 12V \Rightarrow 0,72mW. Detta är då den verkliga effektförbrukningen som Arduinot kommer att dra då systemet är igång.

7. Resultat

I detta kapitel presenteras resultaten från de mätningar som gjorts i tidigare kapitel, främst resultat för laddning då det är projektets huvudsyfte.

7.1 Resultat för hela systemets verkningsgrad

Efter ett flertal mätningar i *luft* vid olika nivåer på batteriet och olika matningsspänningar, mellan 12-18V, fås en normerad verkningsgrad för de två olika sekundärspolarna.

$$\eta_1 = \frac{V_{ut} \cdot I_{ut}}{V_{in} \cdot I_{in}} = 65,8\%$$

$$\eta_2 = \frac{V_{ut} \cdot I_{ut}}{V_{in} \cdot I_{in}} = 55,0\%$$

Under tester i saltvatten upptäcktes däremot en motsatt effekt. Spänningsfallet för spole 1 blev så högt i saltvatten att endast 0,135A överfördes till batteriet. Verkningsgraden blev i detta test endast 22,5%. Med sekundärspole 2 kom man en snabb stund upp i över 1A. Efter dessa mätningar i saltvatten fick man då istället följande resultat.

$$\eta_1 = \frac{V_{ut} \cdot I_{ut}}{V_{in} \cdot I_{in}} = 22,5\%$$

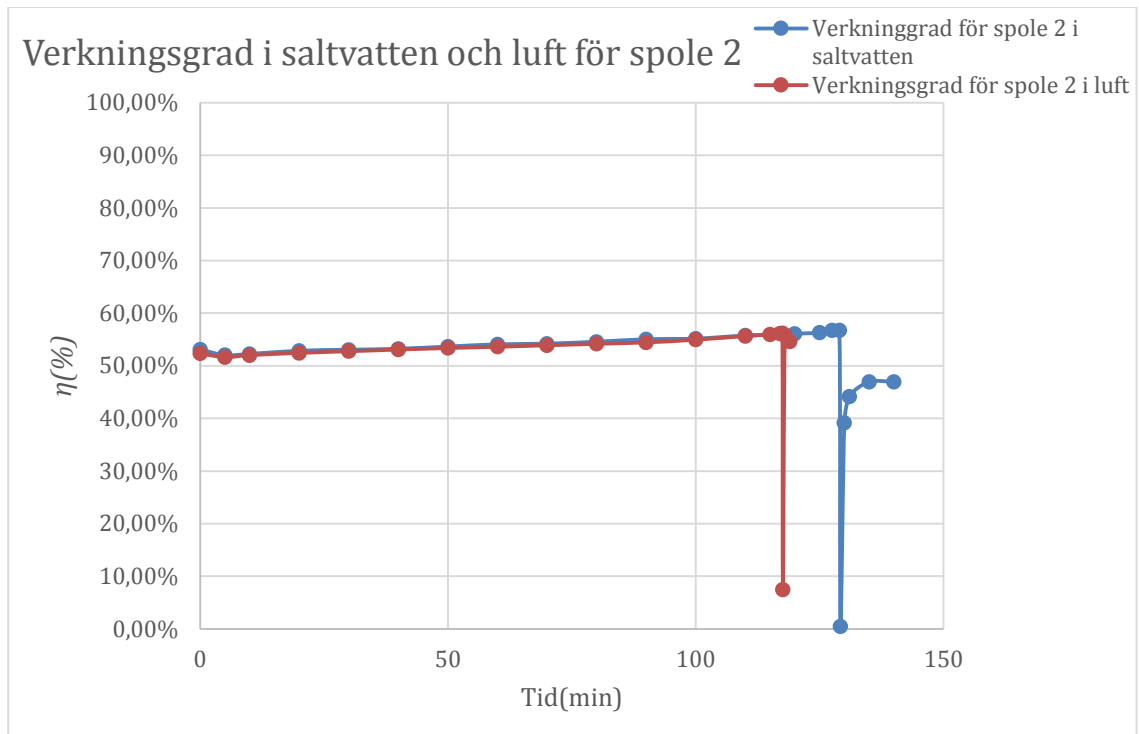
$$\eta_2 = \frac{V_{ut} \cdot I_{ut}}{V_{in} \cdot I_{in}} = 54,4\%$$

För att illustrera teorin bakom förlusterna som uppstår vid högre frekvens i saltvatten ökades frekvensen till 200 kHz med ändrad resonanskondensator värde för spolarna där sekundärspole 2 användes. Detta ledde till följande resultat som visar att de teoretiska förluster som beskrivs i *kapitel 2* stämmer överens med nedan resultat för systemet, där verkningsgraden är lägre vid mätningen i saltvatten. Mätvärdena för detta resultat finns i *bilaga C*.

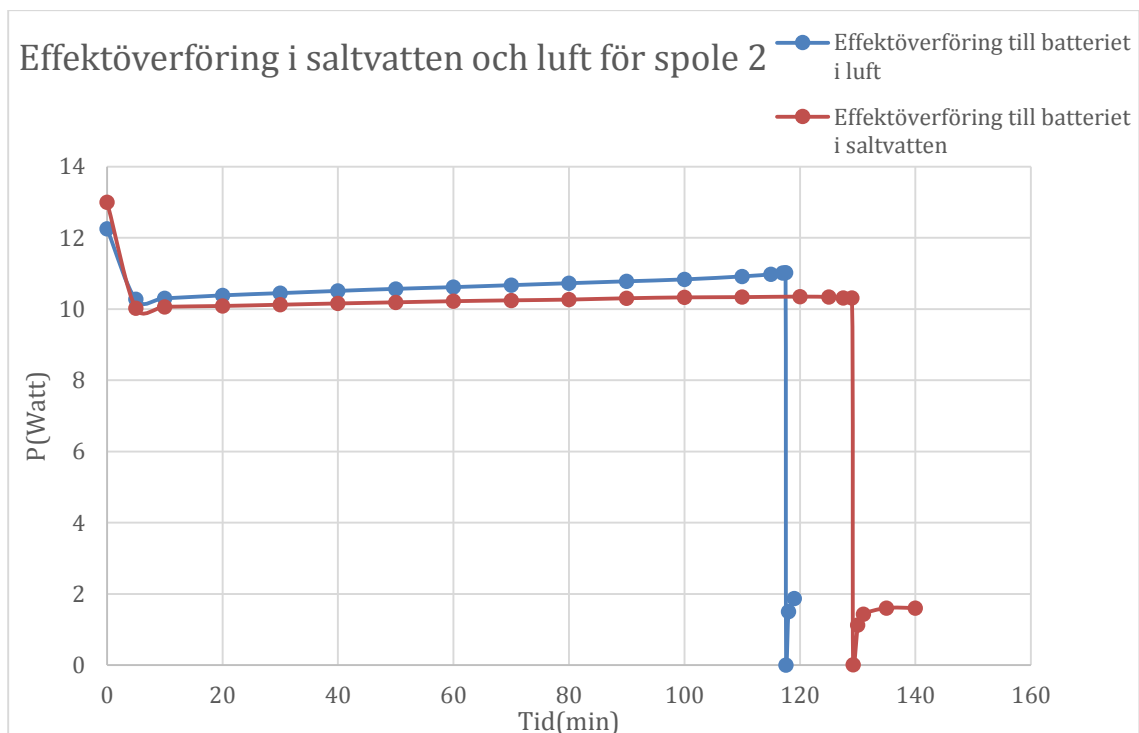
$$\eta_{\text{luft}} = \frac{V_{ut} \cdot I_{ut}}{V_{in} \cdot I_{in}} = 53,9\%$$

$$\eta_{\text{saltvatten}} = \frac{V_{ut} \cdot I_{ut}}{V_{in} \cdot I_{in}} = 43,1\%$$

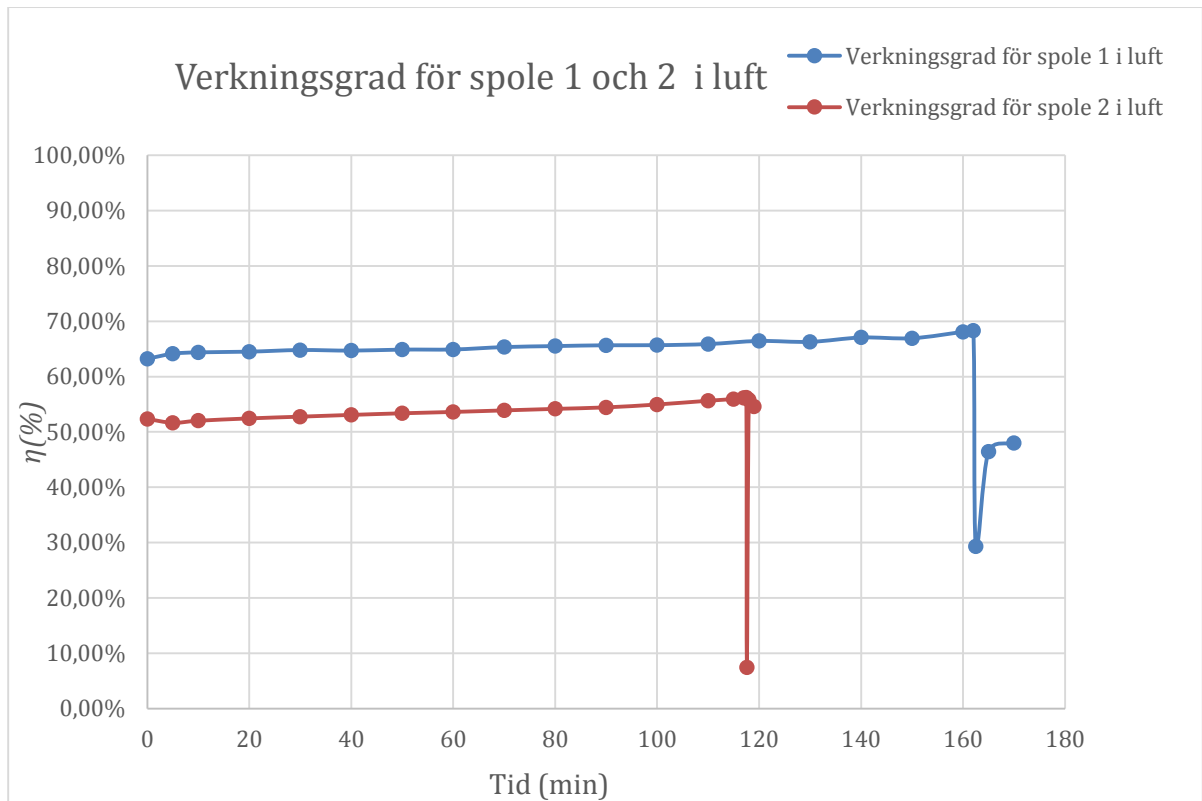
I de grafer som visas nedan presenteras de resultat som uppgick från mätningar av hela laddningssessioner.



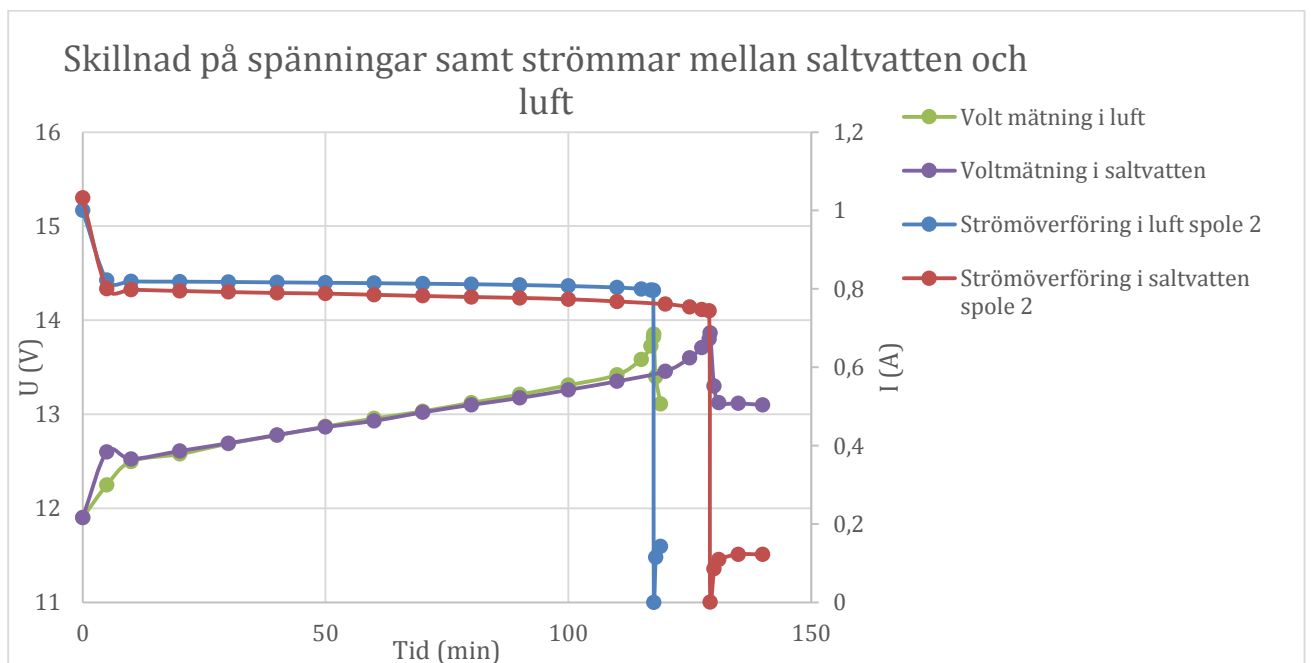
Figur 7.1 Resultat av verkningsgraden på primärspolen tillsammans med sekundärspolen 2. Dippen som syns i grafen visar den tidpunkt där batteriregulatören stängde av huvudladdningen och satte systemet i "underhållsladdning"



Figur 7.2 Skillnad i effektöverföring mellan saltvatten och luft. Dippen som syns i grafen visar den tidpunkt där batteriregulatören stängde av huvudladdningen och satte systemet i "underhållsladdning"



Figur 7.3 Skillnad i verkningsgrad mellan de två tillverkade sekundärspolarna. Dippen som syns i grafen visar den tidpunkt där batteriregulatorm stängde av huvudladdningen och satte systemet i "underhållsladdning". Då den överförda strömmen för spole 1 är betydligt mycket mindre än den hos spole 2 tar det, trots att verkningsgraden har ökat med mer än 10%, längre tid att ladda batteriet fullt.



Figur 7.4 Här kan man se att man inte får ett spänningsfall för laddningsspänningen då regulatorm reglerar detta på samma sätt i saltvatten och luft men det överförs inte samma ström i saltvattnet vilket förlänger laddningstiden under den mätningen.

Som kan tolkas ur graferna blir verkningsgraden för systemet inte sämre i vatten så länge sekundärsidan får tillräckligt hög spänning för att kunna driva spänningsregulatorn (över ca 15V). Sekundärspole 1 fick så pass höga spänningsförluster i saltvatten att den inte fungerade alls. Därefter uteblev mätningarna helt för den spolen i saltvatten och slutsatsen blir enkelt att sekundärspole 2 är den spole som behövs för att driva systemet under vatten. Med detta som grund för resultaten fås följande värden efter laddningsmätning.

Tabell 7.1 Skillnad mellan saltvatten och luft vid laddning av batteriet.

| Sekundärspole 2 | I saltvatten | I luft |
|------------------------|-------------------------|------------------------|
| Laddningstid | 2h9min (25%-91%) | 1h57min30s (25%-90%) |
| Verkningsgrad (medel) | 54,4% | 53,9% |
| Laddningsström (medel) | 792mA | 0,823mA |
| Laddningsspänning | 12,5V-13,865V (25%-91%) | 12,5V-13,85V (25%-90%) |

Tabellen visar endast resultat från 25%- ca 90%. Detta för att efter denna ungefärliga nivå sätter spänningsregulatorn batteriet i underhållsladdning, d.v.s. den matar endast batteriet med en låg ström för att på så sätt inte överladda det. Tabeller för mätningarna som presenteras i graferna ovan kan hittas i *bilaga B*.

Batteriet borde efter laddning kunna driva systemet i ca 50 timmar innan det når en nivå på 25% igen. Detta har inte testats i praktiken men batteriet har $4Ah \Rightarrow 12 \cdot 4 \cdot 75\% = 36Wh$ (från 100% till 25%). Enligt mätningar drar Arduinot $720mW$ vilket i sin tur leder till $36Wh/0,72W=50h$.

7.2 Resultat för kommunikationen

Mätningarnas resultat från den trådlösa kommunikation som använts visas nedan. Resultatet av överföringen i luft med en datahastighet på 4800 bits/s visas i *figur 7.4* nedan.

```
setup
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 4 %
Message recieved: 7 6 %
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 5 %
Message recieved: 7 6 %
Message recieved: 7 5 %
```

Figur 7.5 Överförd data mellan Arduino-korten som presenterar batterinivån. Mätningarna är utförda i luft med ca 5 meter avstånd mellan korten.

Figur 7.4 visar nivån som batteriet har vid aktuell tidpunkt. Vid just detta test hade batteriet en spänningsnivå på 12,54V vilket stämmer bra överens med verkligheten. Då testerna av kommunikation inte kunde utföras i vatten till projektets slut saknas denna information och det enda som kan presenteras är det teoretiska avståndet konstruktionen klarar av i saltvatten. Den är beräknad till 61,775cm som beskrivs i *kapitel 5*.

8. Miljöaspekter

I många av valen genom projektet har miljöaspekter tagits i beaktning och hur vissa delar kan påverka miljön både positivt och negativt. Det var även en av de övervägande orsakerna till valet av kommunikation mellan radiovågor och ultraljud då radiovågor inte har någon påverkan alls på havslevande varelser. Ultraljud kan ha en förmåga att störa fiskarter och olika valar. Att överföra energi kommer inte att ha någon direkt påverkan på miljön, förutom möjligtvis värme som bildas i spolarna och i resten av systemet. Däremot har den hammarlack som använts till att göra spolarna och RF-antennerna vattentäta och slittåliga en direkt skadlig effekt på levande organismer och bör absolut inte användas direkt i havet. Då projektet fortfarande befinner sig på forskningsstadiet har detta dock inte tagits hänsyn till då inga levande organismer finns i testmiljön.

Blybatteriet kan ha en skadlig effekt på det omliggande vattnet om det skulle gå sönder då det finns både giftigt bly och frätande svavelsyra som kan läcka ut i havsvattnet. Ett blybatteri bör då inte användas i ett system som ska fungera i praktiken men precis som för hammarlacken har detta förbisetts då fördelarna med blybatteriet övervägde detta problem.

9. Diskussion

Under projektets gång har strukturen av projektet ändrats utefter vad som är möjligt att uppnå på utsatt tid. Detta har påverkat kretsens utseende och prestanda kraftigt och många delar som använts går att förbättra, optimeras eller bytas ut helt och hållet. Exempelvis finns mellan spolarna ett glapp på ca 2,5mm, detta går att förbättra avsevärt med bättre utrustning och bättre material. Dessutom är spolarna lindade för hand vilket skapar ett slarvigt resultat även om spolarna ser bra och optimerade ut. Med större precision skulle överföringen mellan spolarna kunna öka uppemot en så bra verkningsgrad som 90-95%.

Resultaten som har uppnåtts under projektet gjorde oss lite besvikna då vi i slutspurten av projektet upptäckte att H-bryggan inte kan leverera den utlovade ström som beskrevs i databladet. Den blev mindre än hälften, och detta med väldigt mycket kylning. Alltså hade laddningstiden kunnat halveras utan problem med en bättre H-brygga. Men att ladda batteriet så snabbt som möjligt är inte det enda viktiga i praktiken även om detta var ett av våra huvudmål. För att inte behöva ladda batteriet lika ofta, behöver systemet bli mer energieffektivt. Detta kan åstadkommas med ganska enkla kommandon och "sleepmodes" till Arduinot men då tiden rann ut för projektet hann vi inte gå in mer noggrant på detta. Dessutom använder Arduinot i detta läge processorkraft till processer som vi inte använder till projektet och om man då vill vara extra ambitiös kan man endast använda IC-kretsen på Arduinot (ATmega328) och själv bestämma exakt vilka funktioner som ska användas till den. Man kan då, åtminstone teoretiskt, komma ner till en så låg effektförbrukning som några μW . Detta hade gjort att systemet går att driva i flera år med det batteriet som används.

Men det var intressant att se att verkningsgraden för systemet inte ändrades på ett märkbart sätt i saltvatten jämfört med luft vid just den valda frekvensen men att det vid en fördubblad frekvens blev mycket större förluster. De teorier vi hittade om just frekvensberoende effekter i saltvatten stämmer då mycket bra även i våra tester.

Tyvärr blev inte de batterinivåer som är skrivna i koden helt verkliga. Det som är skrivet i koden ger att så fort spänningen på batteriet är över 13 volt är batteriet under laddning men detta är inte helt sant med vår spänningsregulator, fick vi reda på efter våra tester. Laddningsspänningen lägger sig alltid ca 0,35V över batteriets befintliga nivå. Alltså om batteriet skulle ha 12,5V kommer laddningsspänningen att vara ca 12,85V och vid denna nivå kommer koden endast att visa att batteriet är ungefär 95% laddat och inte att det är satt till "in charge". Alltså finns inga sådana direkta spänningsgränser för när batteriet är under laddning. Dessutom laddar inte spänningsregulatorn batteriet fullt ut på en gång utan laddar det endast upp till 90-95% och sedan sätts underhållsladdning igång.

Kommunikationen fungerade som den var tänkt fast tester kunde inte genomföras i saltvatten eftersom radiovågorna läckte ut från någonstans i luft via antingen DC matningen till sändarmodulen eller via själva kretskortet. Eftersom detta var slutskedet av projektet hann vi inte mäta vart radiovågorna läcker ut från sekundärsidan samt att vi inte hittade ett oscilloskop som klarade frekvensen 315 MHz. För att testa kommunikationssystemet fullt ut hade man behövt bygga en vattentät konstruktion av hela sekundärsidan, så att man på så sätt kan sänka ner

hela systemet som det är tänkt. Detta skulle kunna vara ett nytt projekt för att kunna testa systemet fullt ut i havsvatten.

10. Referenser

1. Knight, D. W. (2016) (Retrieved 2016-05-27). Solenoid Inductance Calculation. Retrieved from <http://www.g3ynh.info/zdocs/magnetics/Solenoids.pdf>
2. Mishriki, F. (2012) (Retrieved 2016-05-31). Frequency range and wireless power systems – what works best? Retrieved from <http://g3rbj.co.uk/wp-content/uploads/2015/11/The-Effect-of-dielectric-inside-a-coil-4.pdf>
3. Payne, A. (2015) (Retrieved 2016-05-31). The effect of dielectric inside an inductance coil. Retrieved from <http://g3rbj.co.uk/wp-content/uploads/2015/11/The-Effect-of-dielectric-inside-a-coil-4.pdf>
4. McGillis, D. (2012). Calculating the Inductance of a Ferrite Rod-Cored Coil and Selecting a Wire Size.
5. Bana, V., Anderson, G., Xu, L., Rodriguez, D., Phipps, A., & Rockway, J. D. (2013). Characterization of Coupled Coil in Seawater for Wireless Power Transfer A NISE funded Applied Research Project. *SSC Pacific*, (September).
6. Eagle199393. (n.d.) (Retrieved 2016-04-25).. *Wireless communication Arduino RF*. Retrieved from <http://www.instructables.com/id/Wireless-communication-Arduino-RF/?ALLSTEPS#intro>
7. Molin, B. (2013). *Analog elektronik* (2:4 ed.). Studentlitteratur AB. s. 434
8. Bergström, L., & Nordlund, L. (2012). *Ellära Krets- och fältteori* (3rd ed.). s. 248-258
9. Domingo, M. C. (2012) (Retrieved 2016-05-31). Magnetic induction for underwater wireless communication networks. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60(6), 2929–2939. <http://doi.org/10.1109/TAP.2012.2194670>
10. Hattab, G., El-Tarhuni, M., Al-Ali, M., Joudeh, T., & Qaddoumi, N. (2013) (Retrieved 2016-05-31). An underwater wireless sensor network with realistic radio frequency path loss model. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2013. <http://doi.org/10.1155/2013/508708>
11. Shaneyfelt, T., Joordens, M. A., Nagothu, K., & Jamshidi, M. (2008) (Retrieved 2016-05-31). RF communication between surface and underwater robotic swarms. *Automation Congress, 2008. WAC 2008. World*, 1–6. Retrieved from http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4699051
12. Youbok, L. (2003) (Retrieved 2016-05-27). *Antenna Circuit Design for RFID Applications*. Microchip Technology Inc. Retrieved from <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00710c.pdf>

13. Bergström, L., & Nordlund, L. (2012). *Ellära Krets- och fältteori* (3rd ed.). s. 359-372
14. CTEK Sweden AB. (2004) (Retrieved 2016-05-27). *Batterier och Laddning*. Retrieved from http://xpnd.se/pdf/Batterier_laddning_rev4.pdf
15. Tudor AB. (hämtad 2016-05-31). *Allt du bör veta om startbatterier*. Retrieved from <http://sbof.se/PDF/batterihandbok.pdf>
16. L. H. Dixon, Jr "Eddy Current Losses in Transformer Windings and Circuit Wiring," TI, Texas, Dallas, Final Rep 2003.
17. Amanogawa. (Retrieved 2016-05-31). *Electromagnetic Waves in Material Media*. Retrieved from <http://www.amanogawa.com/archive/docs/EM7.pdf>
18. FT Ulaby, RK Moore, and AK Fung, Artech House in Appendix E (1986). *Microwave Remote Sensing, Active and Passive: Volume III, From Theory to Applications*. s. 2023
19. Wikipedia. (2016) (Retrieved 2016-05-31). *Permeabilitet*. Retrieved from <https://sv.wikipedia.org/wiki/Permeabilitet>
20. Electronics Tutorials. (n.d.) (Retrieved 2016-06-03). *Inductance of a coil*. Retrieved from <http://www.electronics-tutorials.ws/inductor/inductance.html>
21. All About Circuits. (n.d.) (Retrieved 2016-06-03). *Permeability and Saturation*. Retrieved from <http://www.allaboutcircuits.com/textbook/direct-current/chpt-14/permeability-and-saturation/>
22. Laqua Horiba Scientific. (n.d.) (Retrieved 2016-06-03). *Ions in Water and Conductivity*. Retrieved from <http://www.horiba.com/application/material-property-characterization/water-analysis/water-quality-electrochemistry-instrumentation/the-story-of-ph-and-water-quality/the-basis-of-conductivity/ions-in-water-and-conductivity/>

11. Bilagor

Här tillkommer bilagor som har hänvisats till i projektet. Produkt/komponentlista finns även med i detta kapitel

Bilaga A

Kod skriven till Arduino på primärsidan:

```
#include <VirtualWire.h>
#include <stdio.h>

const int led_pin = 6;
const int transmit_pin = 13;
const int receive_pin = 11;
const int transmit_en_pin = 8;
int n=0;
void setup()
{
  delay(1000);
  Serial.begin(9600); // Debugging only
  Serial.println("setup");

  //-----H-bridge-----
  //-----
  pinMode(2, OUTPUT); //PWMA set to constant high
  digitalWrite(2, HIGH);
  pinMode(3, OUTPUT); //the direktion of the current in the H-bridge
  TCCR2A = 0x23 ;
  TCCR2B = 0x09 ; // mode 7, clock prescale by 1
  OCR2A = 160-1 ; // 160=100kHz clock periods = 10us per cycle
  OCR2B = 0 ;
  TCNT2 = 0 ;

  //-----data-com-----
  //-----
  // Initialise the IO and ISR
  vw_set_tx_pin(transmit_pin);
  vw_set_rx_pin(receive_pin);
  vw_set_ptt_pin(transmit_en_pin);
  //vw_set_ptt_inverted(true); // Required for DR3100
  vw_setup(2400); // Bits per sec
  //Serial.begin(9600);
  vw_rx_start(); // Start the receiver PLL running
}

void loop(){
  uint8_t buf[VW_MAX_MESSAGE_LEN];
  uint8_t buflen = VW_MAX_MESSAGE_LEN;
  while(vw_get_message(buf, &buflen)){ //only writes message when receiving
    int i;
    digitalWrite(led_pin, HIGH); // Flash a light to show received good message
    // Message with a good checksum received, print it.
    Serial.print("Message recieved: ");

    for (i = 0; i < buflen; i++){
      Serial.print((char)buf[i]);
      Serial.print(' ');
    }
    Serial.println();
    digitalWrite(led_pin, LOW);
  }
  OCR2B = 80; //duty cycle = 50% of 16MHz/160 (100kHz)
}
```

Kod skriven till Arduino på sekundärsidan:

```
#include <VirtualWire.h>
#include <stdlib.h>

//float BatSensor = 5;
int SensorValue = 0;
int SensorValueNotInCharge = 0;
int level=0;
char levelToChar[3];
const int led_pin = 11;
const int transmit_pin = 1;
const int receive_pin = 0;
const int transmit_en_pin = 3;
const int break_charge_pin = 12;
int msg[30];

void setup()
{
  // Initialise the IO and ISR
  vw_set_tx_pin(transmit_pin);
  vw_set_rx_pin(receive_pin);
  vw_set_ptt_pin(transmit_en_pin);
  //vw_set_ptt_inverted(true); // Required for DR3100
  vw_setup(2400); // Bits per sec
  //Serial.begin(9600);
}

byte count = 1;

void loop(){

  char mode_charge[9]={'l','n',' ','c','h','a','r','g','e'};
  char mode_full[13]={'F','u','l','l','y',' ','c','h','a','r','g','e','d'};

  SensorValue = analogRead(1)/*-781*/;
  //Serial.println(SensorValue);
  if (SensorValue >= 923){ //923/142 bits = 13.0V
    if (SensorValue > 930 && SensorValue < 1019){ //1019/237 =14.35V 930/165bits = 13.31V
      vw_send((uint8_t *)mode_charge,9);
      vw_wait_tx(); // Wait until the whole message is gone
      delay(20);
    }
    else if (SensorValue >= 1019){ //239bits = over 14.35V = fully charged
      vw_send((uint8_t *)mode_full,13);
      vw_wait_tx(); // Wait until the whole message is gone
      delay(20);
    }
  }
  if(SensorValue > 923){
    SensorValueNotInCharge = 923;
  }
  else if (SensorValue <= 781){ //781 bits = 11.0V
    SensorValueNotInCharge = 781;
  }
  else {
    SensorValueNotInCharge = SensorValue;
  }

  level = (100*(SensorValueNotInCharge-781))/(142);

  String str;
  str = String(level);
  str.toCharArray(levelToChar,4);
```

```

char msg[5] = {levelToChar[0],levelToChar[1],levelToChar[2],'%'}; //send 3 chars + "%"
vw_send((uint8_t *)msg, 5);
vw_wait_tx(); // Wait until the whole message is gone
delay(1000); //send data every second.
}

```

Bilaga B

Tabell 11.1 visar mätvärden tagna under laddning av batteriet med sekundärspole 1. Testet är utfört i luft

| Tid (min) | Vin (VDC) | Iin (ADC) | Effekt (W) | Vbat (VDC) | Ibat (VDC) | Effekt (W) | Verkningsgrad (%) | Batterinivå (%) |
|-------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------------|-----------------|
| innan start | 18 | | | 11,88 | | | | 25 |
| 0 | 18 | 0,91 | 16,38 | 12,11 | 0,855 | 10,35405 | 0,632115385 | |
| 5 | 18 | 0,84 | 15,12 | 12,48 | 0,777 | 9,69696 | 0,641333333 | |
| 10 | 18 | 0,832 | 14,976 | 12,57 | 0,767 | 9,64119 | 0,643776042 | |
| 20 | 18 | 0,828 | 14,904 | 12,65 | 0,76 | 9,614 | 0,645061728 | |
| 30 | 18 | 0,824 | 14,832 | 12,73 | 0,755 | 9,61115 | 0,648000944 | |
| 40 | 18 | 0,82 | 14,76 | 12,8 | 0,746 | 9,5488 | 0,646937669 | |
| 50 | 18 | 0,814 | 14,652 | 12,87 | 0,7386 | 9,505782 | 0,64877027 | |
| 60 | 18 | 0,81 | 14,58 | 12,934 | 0,7316 | 9,4625144 | 0,649006475 | |
| 70 | 18 | 0,8 | 14,4 | 13 | 0,7237 | 9,4081 | 0,653340278 | |
| 80 | 18 | 0,793 | 14,274 | 13,06 | 0,716 | 9,35096 | 0,655104386 | |
| 90 | 18 | 0,785 | 14,13 | 13,123 | 0,707 | 9,277961 | 0,656614367 | |
| 100 | 18 | 0,78 | 14,04 | 13,191 | 0,699 | 9,220509 | 0,65673141 | |
| 110 | 18 | 0,77 | 13,86 | 13,26 | 0,6886 | 9,130836 | 0,658790476 | |
| 120 | 18 | 0,76 | 13,68 | 13,33 | 0,6818 | 9,088394 | 0,664356287 | |
| 130 | 18 | 0,75 | 13,5 | 13,414 | 0,667 | 8,947138 | 0,662750963 | |
| 140 | 18 | 0,73 | 13,14 | 13,515 | 0,652 | 8,81178 | 0,670607306 | |
| 150 | 18 | 0,72 | 12,96 | 13,675 | 0,6343 | 8,6740525 | 0,669294174 | |
| 160 | 18 | 0,68 | 12,24 | 13,89 | 0,6 | 8,334 | 0,680882353 | |
| 162 | 18 | 0,67 | 12,06 | 13,94 | 0,591 | 8,23854 | 0,683129353 | 94,3 |
| 162,5 | 18 | 0,05 | 0,9 | 13,2 | 0,02 | 0,264 | 0,293333333 | |
| 165 | 18 | 0,11 | 1,98 | 13,135 | 0,07 | 0,91945 | 0,464368687 | |
| 170 | 18 | 0,13 | 2,34 | 13,13 | 0,0855 | 1,122615 | 0,47975 | |

Tabell 11.1 Visar mätvärdena tagna under laddning av batteriet med sekundärspole 1 i luft.

Tabell 11.2 Visar mätvärdena tagna under laddning av batteriet med sekundärspole 2. Testet är utfört i luft.

| Tid (min) | Vin (VDC) | Iin (ADC) | Effekt (W) | Vbat (VDC) | Ibat (ADC) | Effekt (W) | Verkningsgrad (%) | Batterinivå (%) |
|-------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------------|-----------------|
| innan start | 18 | | | 11,9 | | | | 25 |
| 0 | 18 | 1,3 | 23,4 | 12 | 1 | 12,25 | 0,523504274 | |
| 5 | 18 | 1,105 | 19,89 | 12,498 | 0,8221 | 10,2746058 | 0,516571433 | |
| 10 | 18 | 1,1 | 19,8 | 12,577 | 0,819 | 10,300563 | 0,520230455 | |
| 20 | 18 | 1,1 | 19,8 | 12,687 | 0,8185 | 10,3843095 | 0,524460076 | |
| 30 | 18 | 1,1 | 19,8 | 12,776 | 0,8177 | 10,4469352 | 0,52762299 | |
| 40 | 18 | 1,1 | 19,8 | 12,87 | 0,8166 | 10,509642 | 0,53079 | |
| 50 | 18 | 1,1 | 19,8 | 12,955 | 0,8157 | 10,5673935 | 0,533706742 | |
| 60 | 18 | 1,1 | 19,8 | 13,031 | 0,8146 | 10,6150526 | 0,536113768 | |
| 70 | 18 | 1,1 | 19,8 | 13,122 | 0,8132 | 10,6708104 | 0,538929818 | |
| 80 | 18 | 1,1 | 19,8 | 13,21 | 0,8119 | 10,725199 | 0,541676717 | |
| 90 | 18 | 1,1 | 19,8 | 13,309 | 0,8099 | 10,7789591 | 0,544391874 | |
| 100 | 18 | 1,095 | 19,71 | 13,418 | 0,8073 | 10,8323514 | 0,549586575 | |
| 110 | 18 | 1,09 | 19,62 | 13,584 | 0,8036 | 10,9161024 | 0,556376269 | |
| 115 | 18 | 1,09 | 19,62 | 13,725 | 0,7997 | 10,9758825 | 0,559423165 | |
| 117 | 18 | 1,09 | 19,62 | 13,82 | 0,797 | 11,01454 | 0,561393476 | |
| 117,5 | 18 | 1,09 | 19,62 | 13,85 | 0,796 | 11,0246 | 0,561906218 | 90 |
| 117,6 | 18 | 0,001 | 0,018 | 13,4 | 0,0001 | 0,00134 | 0,074444444 | |
| 118 | 18 | 0,15 | 2,7 | 13,11 | 0,115 | 1,50765 | 0,558388889 | |
| 119 | 18 | 0,19 | 3,42 | 13,1 | 0,1426 | 1,86806 | 0,546216374 | |

Tabell för laddning av sekundärspole 2 i saltvatten

Tabell 11.3 Visar mätvärdena tagna under laddning av batteriet med sekundärspole 2. Testerna är utförda i saltvatten.

| Tid (min) | Vin (VDC) | Iin (ADC) | Effekt (W) | Vbat (VDC) | Ibat (VDC) | Effekt (W) | Verkningsgrad (%) | Batterinivå (%) |
|-------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------------|-----------------|
| innan start | 18 | | | 11,9 | | | | 25 |
| 0 | 18 | 1,36 | 24,48 | 12,6 | 1,032 | 13,0032 | 0,531176471 | |
| 5 | 18 | 1,07 | 19,26 | 12,525 | 0,8 | 10,02 | 0,520249221 | |
| 10 | 18 | 1,07 | 19,26 | 12,61 | 0,798 | 10,06278 | 0,522470405 | |
| 20 | 18 | 1,06 | 19,08 | 12,692 | 0,7947 | 10,0863324 | 0,528633774 | |
| 30 | 18 | 1,06 | 19,08 | 12,78 | 0,792 | 10,12176 | 0,530490566 | |
| 40 | 18 | 1,06 | 19,08 | 12,863 | 0,7896 | 10,1566248 | 0,532317862 | |
| 50 | 18 | 1,055 | 18,99 | 12,93 | 0,788 | 10,18884 | 0,536537125 | |
| 60 | 18 | 1,05 | 18,9 | 13,02 | 0,785 | 10,2207 | 0,540777778 | |
| 70 | 18 | 1,05 | 18,9 | 13,1 | 0,782 | 10,2442 | 0,542021164 | |
| 80 | 18 | 1,045 | 18,81 | 13,173 | 0,7793 | 10,2657189 | 0,545758581 | |
| 90 | 18 | 1,04 | 18,72 | 13,26 | 0,777 | 10,30302 | 0,550375 | |
| 100 | 18 | 1,04 | 18,72 | 13,35 | 0,7736 | 10,32756 | 0,551685897 | |
| 110 | 18 | 1,03 | 18,54 | 13,457 | 0,768 | 10,334976 | 0,557442071 | |
| 120 | 18 | 1,025 | 18,45 | 13,6 | 0,761 | 10,3496 | 0,56095393 | |
| 125 | 18 | 1,02 | 18,36 | 13,71 | 0,754 | 10,33734 | 0,563035948 | |

| | | | | | | | | |
|-------|----|------|-------|--------|--------|-----------|-------------|----|
| 127,5 | 18 | 1,01 | 18,18 | 13,8 | 0,7475 | 10,3155 | 0,567409241 | |
| 129 | 18 | 1,01 | 18,18 | 13,865 | 0,7436 | 10,310014 | 0,567107481 | |
| 129,2 | 18 | 0,16 | 2,88 | 13,3 | 0,001 | 0,0133 | 0,004618056 | 91 |
| 130 | 18 | 0,16 | 2,88 | 13,123 | 0,086 | 1,128578 | 0,391867361 | |
| 131 | 18 | 0,18 | 3,24 | 13,116 | 0,109 | 1,429644 | 0,441248148 | |
| 135 | 18 | 0,19 | 3,42 | 13,1 | 0,1225 | 1,60475 | 0,469225146 | |
| 140 | 18 | 0,19 | 3,42 | 13,11 | 0,1225 | 1,605975 | 0,469583333 | |

Bilaga C

Tabell för laddning av sekundärspole 2 i saltvatten och luft

Verkningsgrad i luft med frekvens 200kHz

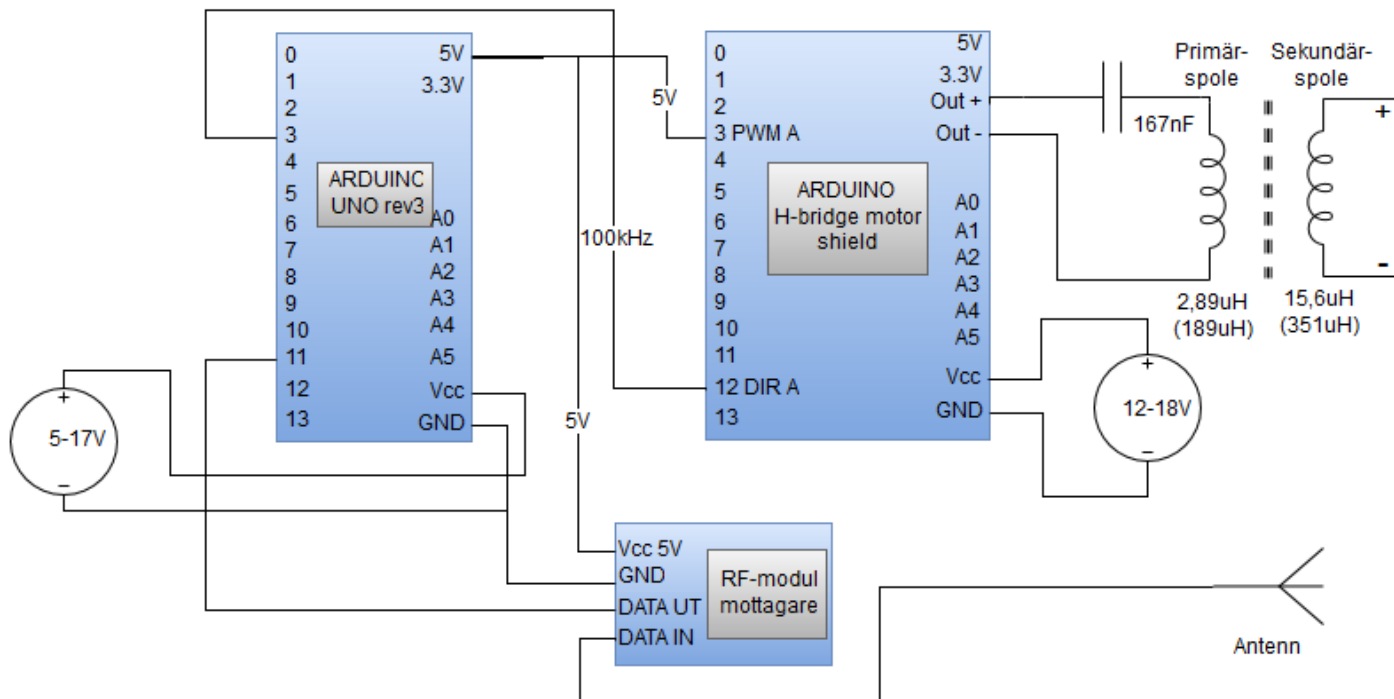
| Vin (VDC) | Iin (ADC) | Effekt (W) | Vbat (VDC) | Ibat (ADC) | Effekt (W) | Verkningsgrad (%) | Batterinivå (%) |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------------|-----------------|
| 18 | 0,22 | 3,96 | 13 | 0,163 | 2,13367 | 53,88% | 90 |

Verkningsgrad i saltvatten med frekvens 200kHz

| Vin (VDC) | Iin (ADC) | Effekt (W) | Vbat (VDC) | Ibat (ADC) | Effekt (W) | Verkningsgrad (%) | Batterinivå (%) |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|-------------------|-----------------|
| 18 | 0,19 | 3,42 | 13 | 0,113 | 1,47465 | 43,12% | 90 |

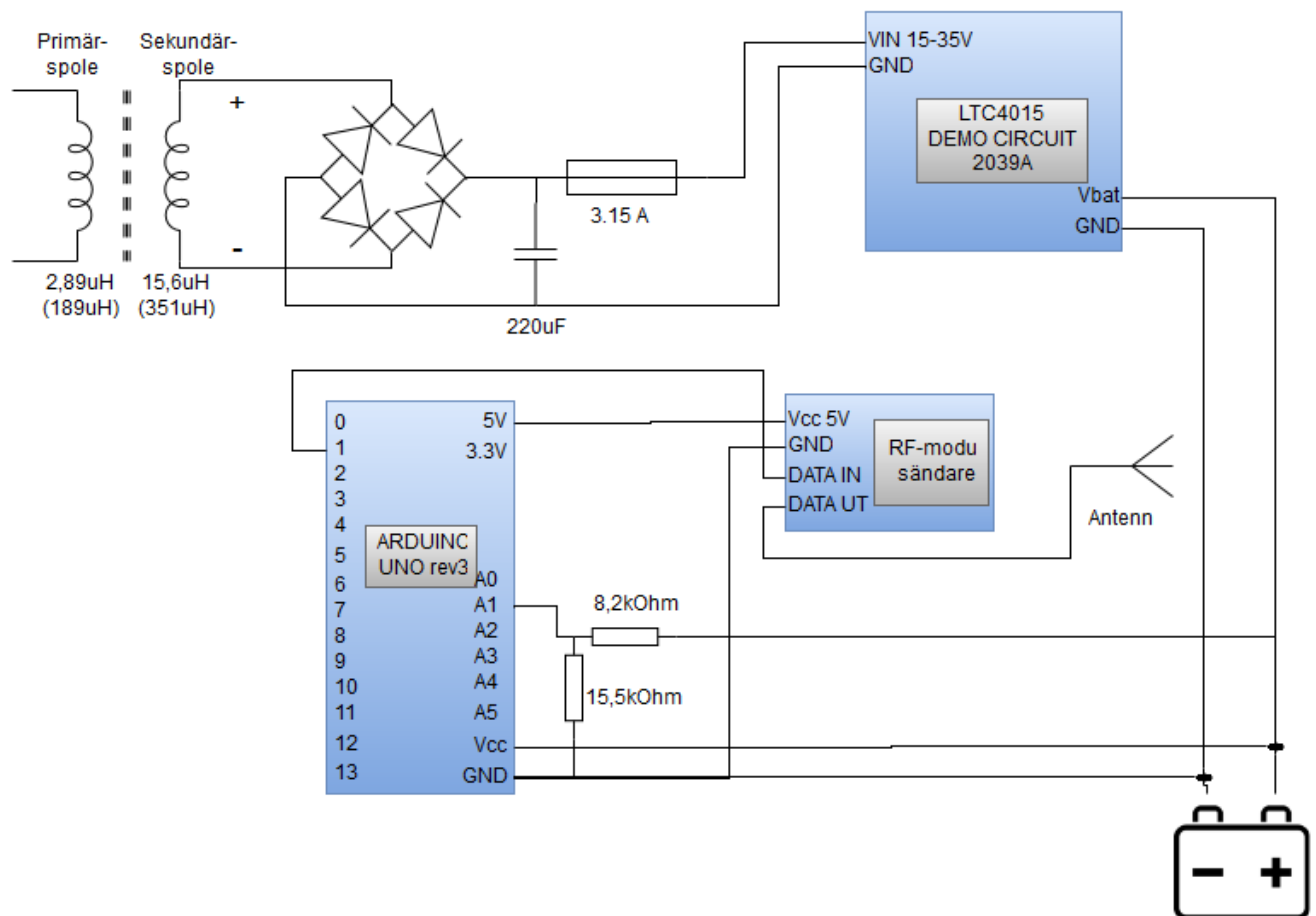
Bilaga D

Primärsida



Figur 11.1 Kopplingsschema för primärsidan som beskriver hur kopplingar i kretsen är dragna.

Sekundärsida



Figur 11.2 Kopplingsschema för sekundärsidan som visar exakt hur kretsen är kopplad

Bilaga E

Komponentlista

- Arduino UNO rev3
- Arduino Motor Shield A000079
- Panasonic UP-VW1220P1 (batteri)
- Mini RF-sändare-mottagare modul 315MHz Link Kit för Arduino
- Schottky diode 3A DO-201AD
- Litztråd BLOCK
- Effektmotstånd 10 ohm 25 W
- Keramiska kondensatorer av flerskiktstyp för resonanskondensatorerna