

CHALMERS



KANDIDATARBETE VID INSTITUTIONEN FÖR ENERGI OCH MILJÖ

SINGING ARC

KONSTRUKTION AV EN TONGENERANDE
TESLASPOLE

12 Maj, 2017

FÖRFATTARE:

N. BLOMKVIST, G. FALK, N. HÖGLUND
V. LOFTMAN, M. MARNE, D. POPOSKI

HANDLEDARE: R. KARLSSON

EXAMINATOR: J. EHNBERG

Sammanfattning

En musikspelande teslaspole är en typ av transformator som vid hög frekvens transformerar en låg primärspänning till en avsevärt högre sekundärspänning vilket resulterar i urladdningar. Dessa urladdningar kan moduleras till musikaliska toner genom att med frekvensen hos en ton sätta på och stänga av teslaspolen.

För att konstruera en tongenererande teslaspole med variabel urladdningsfrekvens skapades en *Dual Resonant Solid State Tesla Coil*. Primärkretsens resonansfrekvens anpassades till frekvensen hos sekundärkretsen, vilken uppmättes till 121 *kHz*. Anpassningen utfördes genom att seriekoppla kondensatorer med primärspolen. Primärspolen formades som en platt Arkimedes spiral vars induktans kunde stämmas genom att flytta på dess variabla anslutningspunkt.

Resonansfrekvenssignalen genererades av en *Phase Locked Loop* som tog emot självsvängningsfrekvensen från teslaspolen via en antenn och skapade en fyrkantsvåg med samma frekvens. Resonansfrekvensen kombinerades, genom ett nätverk av OCH-grindar, med tonsignalen från en Arduino, som i sin tur styrdes av en mjukvaruklient skriven i C#. Klienten avkodade .midi-filer till toner vars frekvens skickades till Arduinon. Arduinon stängde av och satte på teslaspolen med den frekvens som tonen hade och skapade på så sätt ljud vid dess frekvens.

En H-brygga utnyttjades för att skapa en AC-spänning med hjälp av styrsignalen samt en DC-källa. H-bryggans strömtålighet var den begränsande faktorn för storleken på de genererade urladdningarna. Vid 100 *A* genom primärspolen kunde urladdningar på 11,5 *cm* genereras som spelade upp musikstycken.

Abstract

A musical tesla coil is a form of transformer which at high frequency transforms a low primary voltage into a considerably higher secondary voltage that results in discharges. These discharges can be modulated into musical tones by turning on and off the tesla coil with the frequency of the tones.

In order to construct a musical tesla coil with variable discharge rate a *Dual Resonant Solid State Tesla Coil* was created. The resonant frequency of the primary circuit was matched to the frequency of the secondary circuit, which was measured to $121kHz$. This was achieved by the usage of capacitors connected in series with the primary coil. The primary coil was shaped as a flat Archimedian spiral with the ability of frequency tuning by moving its variable connection point.

The resonant frequency signal was generated by a *Phase Locked Loop*, which received the oscillation frequency from the tesla coil through an antenna and created a square wave with the same frequency. The resonant frequency was combined, through a network of AND-gates, with the tone signal from an Arduino, which in turn was controlled by a software client written in C#. The client decoded .midi-files into an array of tones whose frequency was sent to the Arduino. The Arduino shut off and turned on the tesla coil with the same frequency as the tone and thus creating an audible tone.

An H-bridge was utilized to create an AC-voltage using the control signal together with a DC-source. The ampacities of the H-bridge was however the limiting factor of the magnitude of the discharges which could be generated. At $100A$ through the primary coil, electrical discharges of $11.5cm$ in length could be generated which could play musical pieces.

Förord

Projektgruppen vill tacka Daniel Pehrman som försedde projektet med en egendesignad H-brygga och dess kretsschema, vilket användes under hela arbetet. Daniel har även förklarat för gruppmedlemmar hur specifika delar i kretsschemat fungerar, hjälpt till i felsökande av krets och givit råd och rekommendationer under arbetsgången. Med Daniels assistans förenklades många större delar av arbetet och genom det förenklades arbetsgången.

Gruppen vill även tacka Thomas Hammarström för kunskapen och de råd som förmedlades till gruppen om transformatoregenskaper samt hantering och mätning av utrustningen i högspänningslabbet. Genom Thomas råd kunde experimenten utföras på ett mer ansvarsfullt sätt.

Jörgen Blenow hjälpte gruppen vid olika steg i högspänningslabbet med handledning angående mätuppkopplingar av högspänning samt relaterad teori. Med Jörgens hjälp kunde en teori angående hur hög spänning som byggdes upp i sekundärkretsen att tas fram. Gruppen vill därmed tacka Jörgen för hans bidrag till projektet.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	1
1.2	Utmaningar inför genomförandet	1
1.3	Avgränsningar	2
1.4	Litteraturstudie och verktyg	2
2	Teori	3
2.1	Helhetsbild av en tongenererande teslaspole	3
2.2	Teslaspolen som transformator	4
2.2.1	Transformatorns kopplingsfaktor	4
2.2.2	Teslaspolens spänningstransformering	4
2.3	Primär och sekundärspole	5
2.3.1	Primärspolens geometri och formgivning	5
2.3.2	Primärspolens ström och resistans	6
2.3.3	Primärspolens längd och induktans	6
2.3.4	Sekundärspole	7
2.4	Resonansfrekvens hos en teslaspole	7
2.4.1	Uppmätning av resonansfrekvens	7
2.4.2	Godhetstal och bandbredd	7
2.4.3	Val av resonansfrekvens till primärkretsen	8
2.5	Kondensatorns spänningssupbyggnad vid resonans	8
2.6	Kondensatorns roll hos en teslaspole	9
2.6.1	Foliekondensator	10
2.6.2	Glimmerkondensatorer	10
2.6.3	Keramiska kondensatorer	10
2.7	Generering av styrsignal	11
2.7.1	H-Bryggans funktion som signalväxlare	11
2.7.2	Generering av tonfrekvenser med mikrokontroller	12
2.7.3	Från mjukvara till mikrokontroller	13
2.7.4	Generering av resonansfrekvens	13
2.8	Uppkomst av urladdningar från en teslaspole	14
2.8.1	Spänningsnivå på sekundärsidan	14
3	Metodval och genomförande	15
3.1	Viktiga säkerhetsaspekter	15
3.2	Framtagande av sekundärkretsens resonansfrekvens	15
3.2.1	Framtagande av bandbredd och godhetstalet	16
3.3	Val av primärspole	16
3.3.1	Primärspolens dimensionering	16
3.3.2	Konstruktion av primärspole	17
3.4	Val av kondensator	18
3.5	Syntetisering av ljudsignal	19
3.5.1	Ljuduppspelning med hjälp av Arduino	20
3.6	H-brygga	21
3.6.1	Högeffekttransistorer för H-brygga	21
3.7	Design av styrsignal	22
3.7.1	Modulation av resonansfrekvens	23
4	Resultat	24
4.1	Sekundärkretsens resonansfrekvens, Q-värde och bandbredd	24

4.2	Val av primärspole	24
4.3	Kopplingsfaktor	25
4.4	Kondensatoruppsättningen	26
4.5	Styrsignal från PLL-kretsen	26
4.5.1	Högpasfiltet som används för antensignal	27
4.5.2	Lågpasfiltret för PLL-kretsen	27
4.5.3	PLL-kretsens frekvensområde	27
4.6	H-bryggans signaler	28
4.7	Ljudsignalen från Arduino	29
4.8	Maximala strömmar och urladdningar	29
4.9	Beräknade spänningsnivåer på respektive spole	30
4.10	Uppspelning av musikstycke	30
5	Diskussion	31
5.1	Resonans	31
5.1.1	Överensstämmelse av primär- och sekundärkretsens resonansfrekvens	31
5.1.2	Uppmätning av spänningsnivåer	31
5.2	Signalbehandling	32
5.2.1	Generation av resonanssignal	32
5.2.2	Störningar från elektromagnetiska fält	32
5.3	Teslaspolen under drift	32
5.3.1	Ljuduppspelning	32
5.3.2	Strömbegränsningar	33
5.3.3	Överhettning som begränsande faktor	33
6	Slutsats	34
	Referenser	36

1

Inledning

Nikola Tesla var vetenskapsmannen och grundaren till flera revolutionerande maskiner och tekniker. En av dessa maskiner är teslaspolen, vilken enligt Tesla kunde transportera energi trådlöst [1]. För att realisera sitt påstående utnyttjade Tesla resonansfrekvensen i en RLC-krets på ett sådant sätt att uteffekten maximerades [1],[2]. Tesla använde sig även utav en transformator för att påtagligt öka magnituden på spänningen [3].

Under 100 år har forskning inom området fortsatt och idag är exempelvis användandet av radiovågor en teknik som utvecklats med teslaspolen som utgångspunkt [4]. Istället för att enbart användas till trådlös energiöverföring utvecklades även tekniken till att bland annat skicka information trådlöst [4]. Teslaspolen öppnade alltså dörrarna för många framtida vetenskapsmän och lade en grund som senare förbättrade och förändrade tekniken. Att teslaspolen har haft ett stort inflytande på dagens samhälle går inte att förneka. Det är inte alls omöjligt att teslaspolens tekniker har inspirerat några av de mer betydande uppfinningarna under det senaste seklet [5].

Teslaspolen är en av de uppfinningar som idag inte används kring sitt ursprungligt tilltänkta arbetsområde, utan utnyttjas istället för att bland annat på nära håll demonstrera naturfenomenet blixten. Detta projekt utnyttjar Teslas tekniker för att i underhållnings- och utbildningssyfte spela upp en melodi med de elektriska urladdningarna teslaspolen genererar. En teslaspole kan förenklat ses som en löst kopplad transformator bestående av två spolar, en primärspole, samt en sekundärspole med många fler lindningsvarv relativt primärspolen. Primärspolens tillhörande krets matas med låg spänning och hög ström som i sekundärspolen transformerats upp till en hög spänning medan strömmen är lägre. Teslaspolens kretskomponenter måste vara dimensionerade för att vid drift tåla både sekundärspolens höga spänningar, men även primärspolens höga strömmar. I samband med sekundärspolen sitter ett metallobjekt som ansamlar laddning och kan på så vis liknas en kondensator. När den elektriska fältstyrkan från laddningen blivit tillräckligt stor i metallobjektet sker en urladdning genom luften till jord.

På primärspolens sida finns vanligtvis ett *luftgap* och en kondensator som behöver laddas upp för att det ska gå ström genom spolen. På senare tid har luftgapet kunnat ersättas med halvledarteknik för att justera urladdningsfrekvensen. För att lyckas generera stora urladdningar krävs inte enbart en hög matningsspänning utan även att RLC-kretsen matas vid dess resonansfrekvens. Kretsen kommer därav successivt och periodvist öka sekundärsidans spänning tills en urladdning sker.

1.1 Syfte

Syftet med projektet är att konstruera en teslaspole med variabel urladdningsfrekvens. Denna egenskap ska utnyttjas för att manipulera dess urladdningar så att ett igenkänningsbart musikstycke spelas upp.

1.2 Utmaningar inför genomförandet

Det första steget som behöver genomföras är att undersöka hur en teslaspole fungerar teoretiskt, vilka egenskaper den har samt hur dessa kan påverkas. För att kunna spela toner kommer urladdningsfrekvensen behöva undersökas, då det är genom manipulation av denna som olika ljud uppkommer.

För att kontrollera teslaspolen kommer någon typ av styrkrets som reglerar kraftelektroniken behövas. Styrsignalen som denna ger måste innehålla teslaspolens resonansfrekvens och information om den ton som ska spelas upp.

Vid drift måste även flera aspekter av teslaspolen tas hänsyn till såsom spänningsnivåer och energiförbrukning. Detta för att förhindra att teslaspolen förstörs av felaktig drift genom exempelvis överhettning. Teslaspolen behöver även tåla den driftnivå som krävs för att uppnå det önskade resultat, det vill säga skapa identifierbart musikstycke. Detta innebär att kraftelektroniken måste klara av de strömmar och spänningar som finns i systemet, samt att styrelektroniken inte förstörs eller blir negativt påverkad av de elektromagnetiska störningarna som uppkommer kring en teslaspole. Det praktiska arbetet kräver alltså en förberedande utredning av vilka specifikationer en teslaspole med tillhörande komponenter ska byggas enligt.

1.3 Avgränsningar

Projektet avgränsas till att inte undersöka luftgap eftersom denna metod medför att teslaspolen enbart arbetar vid en förvald frekvens. Frekvensen måste kunna varieras och därför kommer denna metod inte användas.

Teslaspolen avgränsas till att enbart kunna spela en ton åt gången, vilket begränsar antalet igenkänningsbara låtar som kan spelas. Behandlingen av en styrsignal för flera toner är betydligt mer komplex och behandlas inte i rapporten.

Handledare har presenterat tre möjliga metoder för styrning av teslaspolen, dessa metoder var *PLL (Phase Locked Loop)*, *självsvägning* och *direktstyrning*. Projektets tidsbegränsning resulterar i att endast den enligt gruppen bäst lämpade metoden kommer utredas fullt ut, även om alla tre metoder går att använda.

1.4 Litteraturstudie och verktyg

Projektet bearbetades med litteraturstudier där den huvudsakliga informationen hämtades ur vetenskapliga artiklar och inom ämnet anpassad litteratur. Att bygga en teslaspole är ett populärt projekt bland hobbybyggare och därför ställdes extra höga krav på informationen som hämtades ifrån dessa källor, då de flesta inte var vetenskapligt granskade. Litteraturstudien användes för att skapa en god teoretisk bakgrund till konstruktionen. Även datorsimuleringar, beräkningar och bildframtagning gjordes med hjälp av CircuitLab och MATLAB[®] under projektets gång.

2

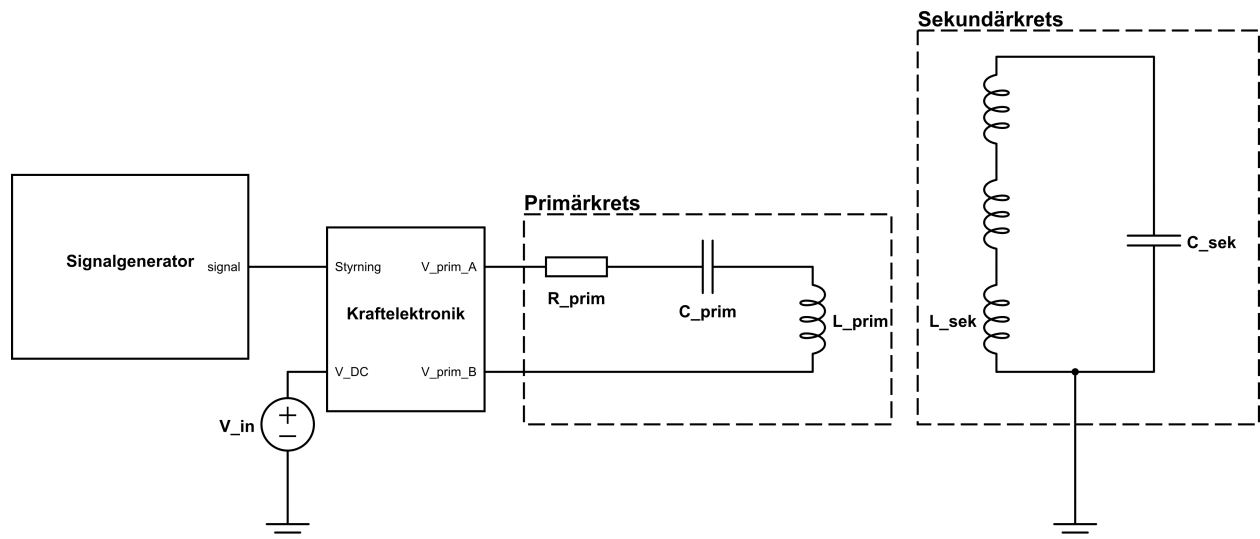
Teori

I detta kapitel redovisas en musikspelande teslaspoles funktion och egenskaper ur ett teoretiskt avseende.

2.1 Helhetsbild av en tongenererande teslaspole

För att en teslaspole ska kunna skapa toner, genererar teslaspolen urladdningar i vissa specifika frekvenser där varje frekvens motsvarar en ton. Musik skapas genom kombinationer av flera olika toner vilket innebär att spolen inte kan använda sig av en enskild frekvens. I klassiska teslaspoler används ett så kallat *luftgap* vilket endast klarar av att arbeta vid en specifik frekvens [6]. På grund av detta krävs en annan metod med möjligheten att variera frekvensen. En lösning är att använda halvledarteknik som gör det möjligt att skapa en konstruktion som kan generera olika toner. Detta i kombination med teslaspolens uppbyggnad med en primär- och en sekundär-krets gör det möjligt att spela upp toner genom spolens urladdningar [7].

En helhetsbild av en teslaspole som använder sig av halvledarteknik, en så kallad SSTC (*Solid State Tesla coil* [8]), visas i figur 1. I bilden visas tydligt likheten mellan en teslaspole och en transformator. Två separata kretsar påverkar alltså varandra genom en magnetisk koppling, där primärsidans krets matas av kraftelektronik som möjliggör tongenereringen, se V_{primA} och V_{primB} i figur 1. Kraftelektroniken drivs av en spänningskälla, V_{in} , och styrs av en signal som innehåller tonen som ska spelas.



Figur 1: En helhetsbild av ett kretsschema för en tongenererande teslaspole som styrs av halvledarteknik. R_{prim} är primärkretsens serieresistans, C_{prim} dess kapacitans och L_{prim} representerar induktansen. Motsvarande beteckningar för induktans och kapacitans finns för sekundärkretsens och betecknas med *sek* i bilden.

En metod för att bestämma uppsättningen av teslaspolens kretskomponenter, se figur 1, samt hur konstruktionen av en teslaspole bör påbörjas är att använda DRSSTC (*Dual Resonant Solid State Tesla Coil*) vilken är en variant av SSTC. Denna metod innebär att resonansfrekvensen på primärsidan i det ideala fallet är lika med sekundärsidans resonansfrekvens [9]. Metoden använder sig av en kondensator på spolens primärsida och genom att använda denna metod konstrueras först en av kretsarna, där den andra kretsen sedan anpassas för att ha en resonansfrekvens som matchar den först konstruerade.

2.2 Teslaspolen som transformator

Som tidigare nämnt kan en teslaspole ses som en förenklad och löst kopplad transformator. Detta innebär att transformator-teori kan appliceras även på en teslaspole.

2.2.1 Transformatorns kopplingsfaktor

Kopplingsfaktor är ett tal mellan noll och ett som beskriver hur väl magnetiskt kopplad en transformator är och benämns vanligtvis med bokstaven k . Om $k = 1$ innebär det att all magnetiskt flöde som genereras i ena spolen fångas upp av den andra spolen. Kopplingsfaktorn kan beräknas genom att mäta upp induktansen på antingen primär- eller sekundärsidan i två olika fall. Om mätningen görs på exempelvis sekundärsidan ska dess induktans mätas upp när primärspolen är kortsluten respektive när den är öppen. k -faktorn kan sedan beräknas enligt

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{sluten}}{L_{öppen}}} \quad , \quad (1)$$

där L_{sluten} är induktansen vid sluten krets och $L_{öppen}$ induktansen vid öppen krets [10], [11].

2.2.2 Teslaspolens spänningstransformering

Spänningen över primär- och sekundärspolen kan beskrivas med tidsvarierande magnetiska flöden och utifrån det uppkommer [12]

$$U_{prim} = N_{prim} \frac{d\Phi_{prim}}{dt} \quad , \quad (2a)$$

där U_{prim} är spänningen över primärspolen skapad av det magnetiska fältet, N_{prim} är antalet lindningsvarv av primärsidan och Φ_{prim} är det magnetiska flödet som kommer från primärspolen. Sekundärsidan efterliknar primärsidan och beskrivs enligt

$$U_{sek} = N_{sek} \frac{d\Phi_{sek}}{dt} \quad , \quad (2b)$$

där U_{sek} är spänningen över sekundärspolen som skapas av det magnetiska fältet från primärspolen, N_{sek} är antalet lindningsvarv av sekundärsidan och Φ_{sek} är den del av det magnetiska flödet som plockas upp av sekundärspolen.

Om kopplingsfaktorn $k \neq 1$ som beräknas enligt ekvation 1 kommer inte all magnetisk flöde från primärspolen att tas upp vid sekundärsidan. Flödet genom sekundärspolen kan då beskrivas som

$$\Phi_{sek} = k \cdot \Phi_{prim} \quad . \quad (3)$$

Spänningen över sekundärspolen kan utifrån detta härledas med hjälp av ekvationerna 2a och 2b till

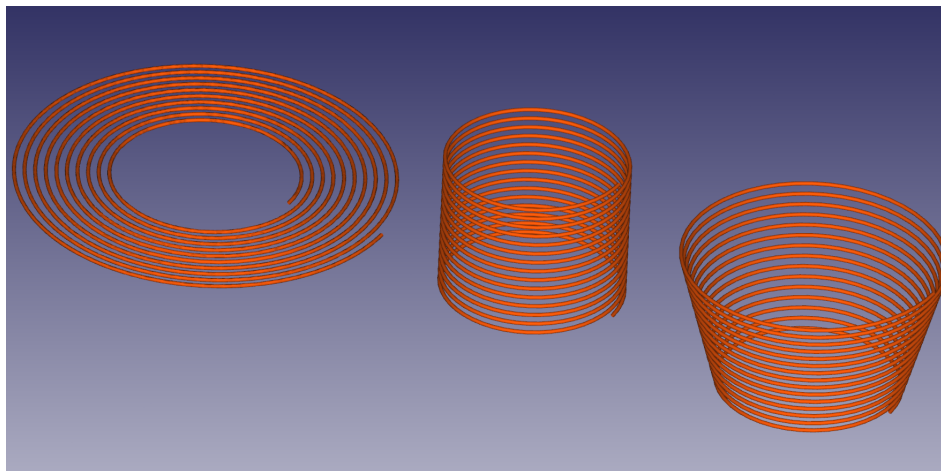
$$U_{sek} = U_{prim} \frac{N_{sek}}{N_{prim}} \cdot k \quad . \quad (4)$$

2.3 Primär och sekundärspole

Den magnetiska kopplingsfaktorn k , som beskriver hur bra spolar är magnetiskt kopplade till varandra, styrs främst av avståndet mellan spolarna [6]. Spolar positionerade för nära varandra medför en risk för urladdning mellan spolarna vilket innebär skaderisk för elektronik, samt att energi går till spillo [13]. För långt avstånd mellan spolar medför däremot en försämrad magnetisk koppling och därmed reduceras mängden energi som överförs [14]. Samtidigt beror det magnetiska flödet hos spolar på storleken av strömmen och spolarnas induktans, där induktansen är starkt geometriberoende [15]. På grund av dessa anledningar är geometrin betydande för spolarnas egenskaper och därför krävs en särskild typ av design på spolarna.

2.3.1 Primärspolens geometri och formgivning

En primärspoles geometri beror på konstruktionsmässiga faktorer och önskad kopplingsfaktor [6]. Några av de geometriska formationerna som kan användas är helix, platt Arkimedes spiral och lutande Arkimedes spiral, se figur 2.



Figur 2: Hur primärspolen kan lindas, från vänster till höger: platt Arkimedeses spiral, helix och lutande Arkimedes spiral.

En viktig aspekt som påverkar k -faktorn är avståndet mellan lindningsvarven i primärspolen. Kortare avstånd mellan lindningar för exempelvis en platt Arkimedes spiral bidrar till en större k -faktor då spolens lindningar kommer närmre sekundärspolen [14], [16]. Lindningsvarvens avstånd kan därför påverka resultatet och om symmetriska avstånd ej erhålls kan det exempelvis medföra att lindningsvarv är för nära varandra och laddning kan förflyttas mellan de två lindningarna [13]. Avståndet kan ses som ett återkommande problem i de tre tidigare nämnda geometriska figurerna då de alla är luftlindade och inte har en fast järnkärna att lindas runt.

Arkimedes spiral är enklast att bygga en stabil konstruktion till, eftersom den inte behöver sväva i luften. Den breder istället ut sig horisontellt men detta medför i sin tur att den har lägst k -faktor [17]. Den lägre k -faktorn som uppkommer vid användning av Arkimedes spiral beror på att lindningarna generellt sett kommer längre ifrån sekundärspolen än vad den gör hos helixen och en lutande Arkimedes spiral.

De olika konstruktionsalternativen kommer också olika nära toppen av teslaspolen vilket kan vara mer riskabelt, då risken att en urladdning slår ner i primärspolen ökar med minskat avstånd. Detta kan medföra skador på systemet [17] men genom att använda en metallring som är kopplad till jord kan urladdningarna ledas bort istället för att träffa primärspolen.

2.3.2 Primärspolens ström och resistans

Storleken på den maximala strömmen som går genom en teslaspoles primärkrets beror på dess totala resistans. Den totala resistansen består av primärspolens resistivitet samt den extra resistans som uppkommer på grund av skinneffekt.

Skinneffekt är en typ av förlust som uppkommer hos en teslaspole. Detta naturfenomen innebär att impedansen i ledningen ökar när frekvensen är hög. Detta sker eftersom strömmen inte utnyttjar hela tvärsnittsarean hos ledaren som den gör vid likspänning [13]. Istället omfördelar sig strömmen på ytan av ledaren med ett visst inträngningsdjup. Desto högre frekvens, desto lägre blir inträngningsdjupet för strömmen i materialet och därmed ökar impedansen [18]. Inträngningsdjupet relaterar sig gentemot frekvensen enligt

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{2\pi f}} \cdot \sqrt{\frac{1}{\mu}} \quad , \quad (5)$$

där δ är trängningsdjup i meter, ρ är materialets resistivitet, μ är permabiliteten för materialet och f är frekvensen. Inträngningsdjup minskar materialförbrukningen för högfrekventa signaler eftersom strömmen fördelar sig inte genom hela ledarens tvärsnitt. Därför krävs ingen solid kabel utan ett rör fungerar minst lika väl. Ledarens ytter- och innerdiameter dimensioneras inte enbart efter inträngningsdjupet utan även efter vilken maxström spolen skall klara av. En kabel med en given tvärsnittsarea klarar en viss ström, beroende på materialet, innan kabeln tar skada. Strömmen en kabel klarar av inom ett visst tidsintervall benämns som en fixeringsström och återfinns i allmänna tabeller [19].

Stora strömmar medför värmeförluster och kan öka risken för att komponenter tar skada vilket medför att det är av intresse att känna till strömmens värde [13]. På sekundärsidan tas förlusterna ej hänsyn till då strömmen där är relativt låg. Istället uppkommer spänningsförluster på sekundärsidan som är relaterade till materialval och den magnetiska påverkan [12]. Genom att använda ett material med en hög ledningsförmåga är det möjligt att minimera ström- och spänningsförlusterna.

2.3.3 Primärspolens längd och induktans

Beräkningarna för en primärspoles längd skiljer sig mellan de olika geometriska formerna den kan anta. Ett möjligt beräkningsätt som kan användas för de tre tidigare presenterade formerna är att addera finita element av rymddiagonaler från ett rätblock [20]. Längden beräknas då enligt

$$l = \sum_{i=1}^n \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2 + \Delta z_i^2} \quad , \quad (6)$$

där l är längden för spolen, Δx och Δy är längden på respektive kateter i det horisontella planet och Δz är längden på den vertikala katetern och n antal iterationer. För exempelvis en platt Arkimedes spiral, se figur 2, är de vertikala elementen Δz lika med noll, då denna konstruktion är platt. Induktansen kan beräknas med kunskap om primärspolens geometri. Med en luftkärnig helixgeometri beräknas induktansen enligt

$$L_{s-helix} = \frac{R_{medel}^2 N^2}{9A + 10H} \quad , \quad (7a)$$

där $L_{s-helix}$ är induktansen för helixspolen i μH , A är radien för ledaren mätt i tum, N är antal lindningsvarv som spolen är uppbyggd av, H är höjden av spiralen och R_{medel} är medelradien för spolen, vilka båda mäts i tum [6], [21]. Vid användning av en Arkimedes spiral beräknas induktansen istället enligt

$$L_{s-arki} = \frac{R_{medel}^2 N^2}{8R + 11W} \quad , \quad (7b)$$

där L_{s-arki} är induktansen för spolen i μH . W beskrivs enligt

$$W = \frac{R_{medel}}{\cos(\theta)} \quad , \quad (7c)$$

som beskriver avståndet mellan inner- och ytterdiameter i tum. Om en platt Arkimedes spiral används är $\theta = 90^\circ$ och genom det får W och R_{medel} samma värde. Om en lutande spiral istället används är θ vinkeln mellan normalen och spolen. R_{medel} är medelradien för spolen i tum och kan beräknas enligt

$$R_{medel} = \frac{\left(\frac{OD-ID}{2}\right) + ID}{2} \quad , \quad (7d)$$

där OD är ytterdiametern för spolen i tum och ID är innerdiametern för spolen i tum [6], [22].

2.3.4 Sekundärspole

För att få tillräckligt hög spänning i sekundärkretsen krävs att antalet lindningsvarv i sekundärspolen är många gånger fler än i primärspolen. Eftersom strömmen sjunker när spänningen transformeras upp kan en tunnare ledare användas. För att minska risken att överslag sker från sekundärspolen till primärspolen bör separationen av spolarna vara så stor som möjligt, avvägt mot att kopplingsfaktorn inte blir för låg. Ytterligare skydd fås genom att den lägst placerade änden av sekundärspolen jordas, så att urladdningar måste ske från toppen av teslaspolen.

2.4 Resonansfrekvens hos en teslaspole

I frekvensberoende RLC-kretsar utvinns maximal uteffekt då kretsen drivs vid resonansfrekvens. Vid den frekvensen är impedansen som lägst och helt reell vilket innebär att strömmen ligger i fas med spänningen. Vid seriekoppling av de reaktiva komponenterna kan resonansfrekvensen beräknas enligt

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad , \quad (8)$$

där f_{res} är resonansfrekvensen för kretsen, L är induktansen för det induktiva objektet och C är kapacitansen hos det kapacitiva objektet.

2.4.1 Uppmätning av resonansfrekvens

En metod som kan användas för att mäta upp en krets resonansfrekvens är att utnyttja magnetfältet som kretsen ger upphov till då en ström flyter genom den. Fälten som genereras kan mätas upp av en prob kopplad till ett oscilloskop. Genom att variera inspänningens frekvens ändras spänningsnivåerna som visas grafiskt på oscilloskopet. Den frekvens som visar högst spänningsnivå är alltså kretsens resonansfrekvens [23]. En annan metod för att mäta upp resonansfrekvens är att använda sig av oscilloskopet och funktionsgenerator för att hitta den frekvens då strömmen och spänningen över spolen ligger i fas.

2.4.2 Godhetstal och bandbredd

Det är svårt att konstruera en teslaspole där primärsidan och sekundärsidan har samma resonansfrekvens med god precision. Om sekundärspolens bandbred runt resonansfrekvensen är stor blir felet mellan sidornas olika frekvenser mindre betydelsefullt [6]. Godhetstalet Q är omvänt proportionellt mot frekvensens bandbredd. Låga värden på Q ger stor bandbredd med nackdelen att toppvärdet som effekten kan uppnå minskar [24]. Att välja mellan en bred bandbredd eller ett högt godhetstal är en avvägning som får avgöras utefter med hur god precision resonansfrekvensen mellan de två kretsarna matchar varandra. Ekvationen

$$Q = \frac{f_{res}}{\Delta f} \quad , \quad (9)$$

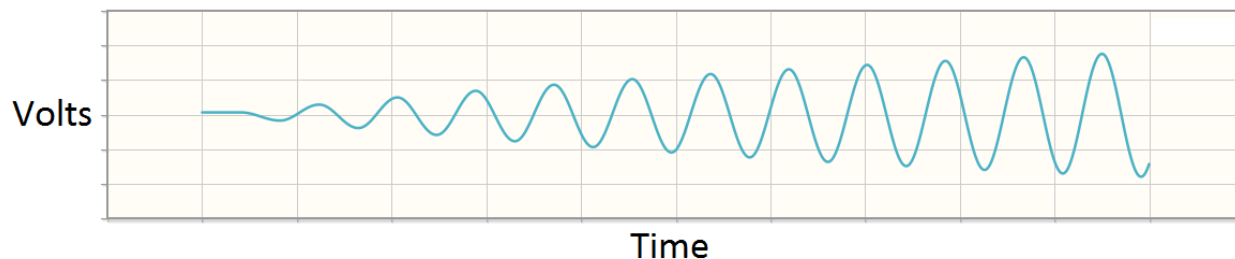
visar förhållandet mellan Q , resonansfrekvens och bandbredden Δf . Per definition är bandbredden det frekvensintervall vilket effekten överstiger hälften av toppeffekten [25].

2.4.3 Val av resonansfrekvens till primärkretsen

Vid tillräckligt stora elektriska fält skiftar luft från en isolator till en ledare vilket ger upphov till en urladdning. Kapacitansen mellan toppen av teslaspolen och jord sjunker vid ögonblicket under urladdning, eftersom luften agerar dielektrikum (elektrisk isolator) för kapacitansen mellan teslaspole och jord, vilket resulterar i en förändring hos resonansfrekvensens värde [10]. För att konstruera en teslaspole som ska bibehålla en stående urladdningsbåge ut i luften bör signalfrekvensen efterlikna den resonansfrekvens som uppkommer vid urladdningar. Det medför att det är svårare att generera en urladdning men då en urladdning uppkommit är det enklare att generera kontinuerliga urladdningar. Om man använder resonansfrekvensen som sekundärkretsen har vid vila är det istället enklare att en urladdning uppkommer men betydligt svårare att generera kontinuerliga urladdningar [22].

2.5 Kondensatorns spänningsuppbyggnad vid resonans

Vid resonans kommer spänningen och strömmen över exempelvis en kondensator att byggas upp med varje period vilket medför svårigheter att veta maximal hanterbar spänning och ström för kondensatorn [26]. Att förstå hur spänningen över en kondensator byggs upp är därför avgörande. Figur 3 visar ett exempel av spänningsuppbyggnad i form av pulsvåger under flera perioder över en kondensator.



Figur 3: Påvisar hur spänningen över en kondensator ökar vid resonansfrekvens över flera perioder.

Spänningsuppbyggnaden över en kondensator i en resonanskrets med en spole beror på vilken matningsspänning och frekvens som används. Till en början ligger matningsspänningens positiva toppvärde över kondensatorn men vid det negativa toppvärdet, efter en halvperiod, har spänningen över kondensatorn ökat till tre gånger den negativa matningsspänningen. Efter en ytterligare halvperiod har spänningen över kondensatorerna ökat till fem gånger matningsspänningen. En av anledningarna till varför detta fenomen uppkommer är på grund av Lenz lag [26], som säger att spänningen över spolen motverkar sin uppkomst och växlar polaritet mellan varje halvperiod. Det medför att spänning som belastar kondensatorn kommer att byta polaritet och öka med två gånger matningsspänningen varje halvperiod [27]. Det innebär att ju fler halvperioder kondensatorn laddas upp, desto högre spänning kommer den vara belastad med. Kondensatorer behöver alltså införskaffas med kännedom om hur hög nominell spänning den klarar av sådan att den inte går sönder vid användning.

Uppladdningstiden för kondensatorn är en viktig parameter då det kan påverka hur ofta en urladdning kan uppkomma. Spänningen fortsätter att byggas enligt Lenz lag och genom det är det möjligt att ställa upp uttrycken

$$N = \frac{U_{kapacitet} - U_{in}}{2 \cdot U_{in}} \quad , \quad (10a)$$

$$t_{uppladdning} = \frac{T_{res}}{2} \cdot N \quad , \quad (10b)$$

vilka beskriver uppladdningstiden för en given matningsspänning, U_{in} , nominell spänningkapacitet, $U_{kapacitet}$ samt periodtid T_{res} . N beskriver hur många halvperioder det tar spänningen över kondensatorerna att uppnå den nominella spänningkapaciteten och $t_{uppladdning}$ beskriver tiden innan spänningen över kondensatorerna överskrider den nominella.

2.6 Kondensatorns roll hos en teslaspole

För att kunna matcha resonansfrekvensen för en teslaspoles primärkrets mot dess sekundärkrets behövs en kondensator. Kondensatorn kopplas i serie med primärspolen, vilket visas i figur 1. Värdet på kondensatorns kapacitans vid resonans kan beräknas enligt

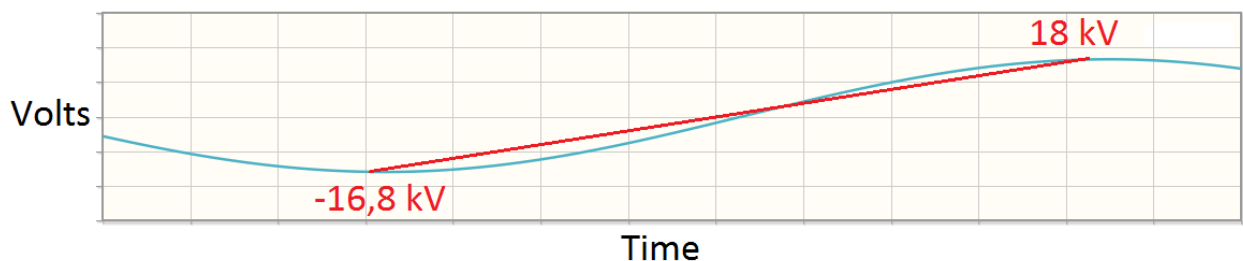
$$C_p = \frac{1}{4\pi^2 f_{res}^2 L_p} \quad , \quad (11)$$

där C_p är kapacitansen för primärkretsen och L_p är induktansen för primärspolen.

Utöver den maximala nominella spänningen kondensatorn behöver klarar av, se 2.5, existerar ytterligare en parameter av stor betydelse, nämligen spänningsderivatan. Specifikt är det den maximala derivatan som är intressant eftersom kondensatorn behöver kunna klara denna [7]. Figur 4 visar när spänningen förändras som mest, vid den maximala nominella spänningen och utifrån detta görs en förenkling om att förändringen mellan maximi och förgående negativa topp kan modelleras som en rät linje med lutning enligt

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad , \quad (12)$$

där $\frac{dV}{dt}$ är den maximala spänningsderivatan och $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ är skillnaden mellan spänningsmaximum och spänningsminimum för den största perioden, se figur 4.

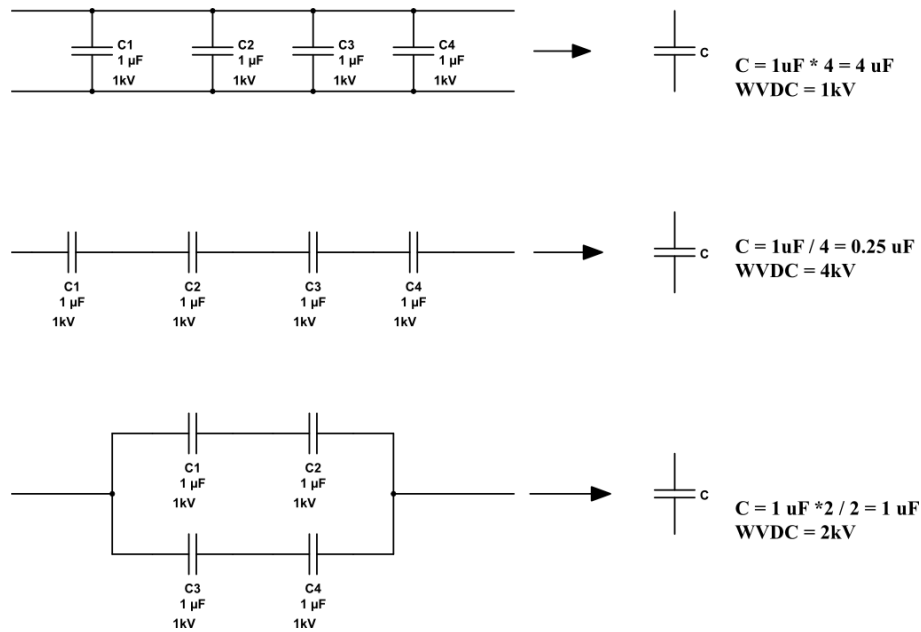


Figur 4: Visar hur spänningen förändras som mest i kondensatorn vid en viss spänningsnivå.

För att klara av en högre nominell spänning än vad kondensatorn klarar av enligt specifikationer är det möjligt att koppla flera kondensatorer i serie med varandra men genom att göra så minskar även kapacitansen [6].

Ofta förekommer en MMC-uppsättning (Multiple Mini Capacitors) i många hobbybyggen av teslaspole, vilken består av en större mängd sammankopplade kondensatorer [28]. MMC-uppsättning är lämplig att använda till teslaspolar på grund av dess uppbyggnad med en mängd kondensatorer som delar belastningen [28]. Det minskar risken för överslag och hela uppsättningen går ej sönder om endast en enskild kondensator förstörs. Om en enskild kondensator förstörs behöver endast den bytas ut [7]. En annan fördel med MMC är att det är billigare att köpa många mindre kondensatorer och koppla ihop dem istället för köpa en större kondensator vilket medför en ekonomisk fördel gentemot andra val. MMC-uppsättningens egenskaper påverkas beroende på vilken typ av kondensator som används.

Figur 5 påvisar hur man kan koppla upp kondensatorerna för att kunna öka den nominella spänningen medan man fortfarande har samma kapacitans. Seriekopplandet är till för att fördela spänningen över kondensatorerna så att spänningen över de individuella kondensatorerna inte ska vara högre än vad de tål. Vid seriekopplande av kondensatorer minskar den totala kapacitansen och kräver därför parallellkopplingar för att öka den totala kapacitansen till det önskade värdet.



Figur 5: Figuren visar hur kapacitansen och den nominella spänningen förändras beroende på hur man kopplar kondensatorerna. I figuren används beteckningen WVDC som står för *Working Voltage Direct Current* och står för den nominella spänningen.

2.6.1 Foliekondensator

Foliekondensatorer som använder olja som dielektrikum och är ett möjligt alternativ av kondensator i teslaspolens primärkrets. Foliekondensatorer klarar av höga spänningsderivator och har en relativt lång livslängde gentemot andra kondensatorer. De finns även i högspänningsalternativ vilket medför att de är lämpliga att använda i en teslapole [6].

2.6.2 Glimmerkondensatorer

Glimmerkondensatorer, eller mica som även är ett etablerat namn för dem, förekommer oftast i högfrekventa samband som exempelvis i en radiokrets. Det finns även varianter som kan användas inom områden med högspänning [6]. Utöver det klarar de av de höga spänningsderivatorna på ett lämpligt sätt och genom det är påfrestningen inte för mycket för dem. Det gör dem till lämpliga kondensatorer att använda i teslaspolar [6]. Relativt foliekondensatorer är glimmerkondensatorer mycket dyrare.

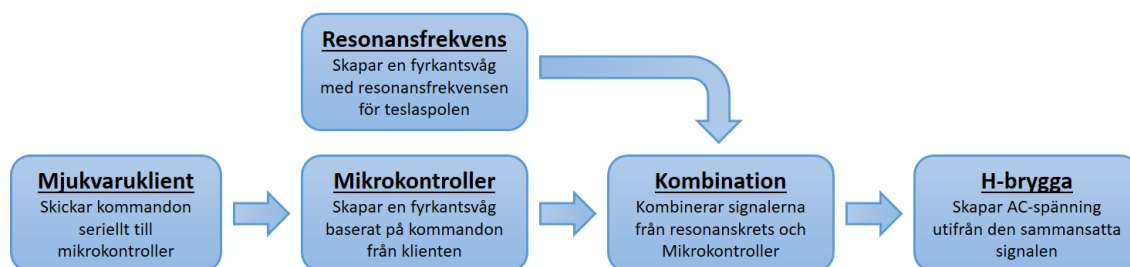
2.6.3 Keramiska kondensatorer

En annan potentiell kondensator för användning i en teslapole är en keramisk skivkondensator. Keramiska kondensatorer klarar i många fall inte av höga spänningarna och det medför att de lätt blir överhettade och går sönder [6]. Teslaspolen arbetar vid höga spänningar och därför är det stor risk att dessa kondensatorer går sönder vid användning i dessa sammanhang. Trots att kostnaden att införskaffa dem är liten behövs utnyttjande av parallell- och seriekopplingar, se figur 5, för att de ska kunna användas som kondensator i en teslapole. Oavsett koppling är det svårt att komma upp i tillräckligt hög nominell spänning [6].

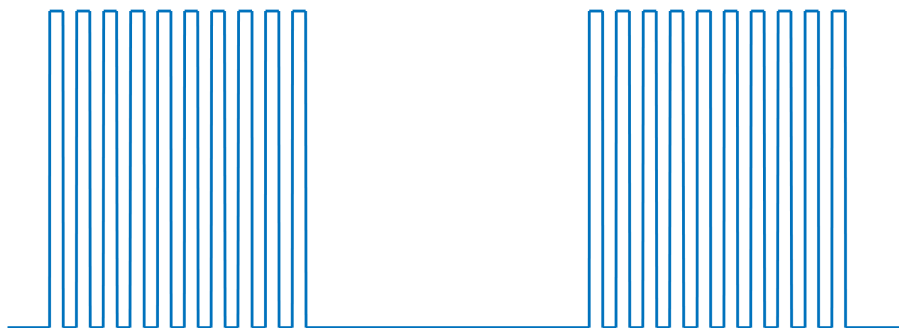
2.7 Generering av styrsignal

Signalgenerator och kraftelektronik, se figur 1, är det som möjliggör att ljud från en teslaspole uppkommer genom att teslaspolen slås på och av med den frekvens som en viss ton har. Detta leder till att det idealt sker en urladdning från teslaspolen vid varje period av ljudet, exempelvis 440 gånger per sekund för att generera tonen A [29].

För att kunna slå på och av teslaspolen i denna hastighet kan en H-brygga utnyttjas, se 2.7.1. H-bryggan behöver matas med en styrsignal som får den att konvertera teslaspolens insignal, matad från en DC-källa, till en AC-spänning. Genom att låta en mjukvaruklient styra en mikrokontroller kan en signal med önskad tonfrekvens genereras, se figur 6. Denna signal kombineras sedan med resonansfrekvensen som skapar den signal som skickas vidare till H-bryggan, se figur 7.



Figur 6: Schema över hur en styrsignal till en H-brygga kan genereras



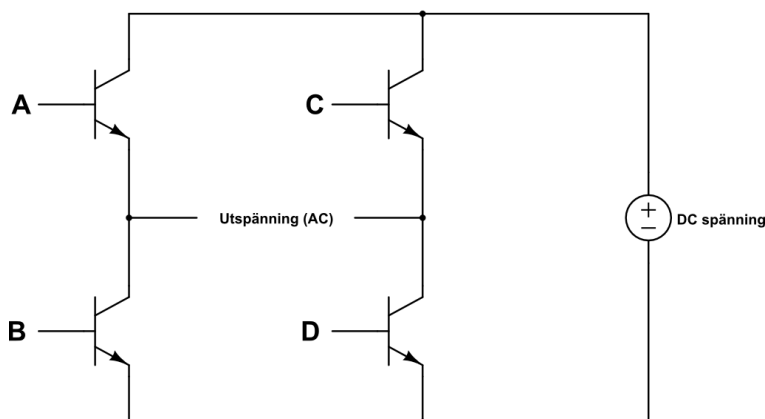
Figur 7: Principiellt utseende på den signal som kommer matas in i H-bryggans styrkrets

2.7.1 H-Bryggans funktion som signalväxlare

En H-brygga är en krets bestående av 4 transistorer kopplade som ett "H", därav namnet, se figur 8. H-bryggan kan skapa en AC-spänning från ett DC-aggregat med styrsignaler [30]. Styrningen av transistorerna i H-bryggan sköts av en mindre drivkrets som generellt finns på samma kretskort. Denna styrkrets tar emot en logisk signal på exempelvis 5 V som elektriskt isolerat kan kopplas till styrkretsen med hjälp av en optokopplare. En optokopplare använder ljus för att överföra signalen istället för en elektrisk koppling för att förhindra att den logiska lågspänningssidan är direkt kopplad till transistorernas högspänningssida.

För att skapa en AC-spänning krävs att transistorerna slås på och av i par. De två paren som måste arbeta tillsammans är A och D, samt B och C, se figur 8. När A och D är ledande kommer utspänningens polaritet att vara positiv på vänster sida i bilden, för att sedan byta polaritet när det är B och C som leder. Det är mycket viktigt att A och B eller C och D aldrig är aktiva samtidigt, detta skulle skapa en kortslutning av spänningsaggregatet [31].

H-brygga



Figur 8: Schematisk bild av en H-brygga

Genom transistorerna kommer det gå stora strömmar till primärkretsen. För att minska risken att transistorerna skall överhettas, och skadas, på grund av de höga strömmarna bör effektförbrukningen i kretsen begränsas. Ett sätt att få ner effekten är att minska pulskvoten hos signalen vilket medför att medelvärdet på strömmen i teslaspolen minskar. En pulskvot är en bråkdel av signalens tidsperiod. Viktigt att påpeka är att om pulskvoten är allt för låg kommer det vara svårt att generera urladdningar, vilket medför att det är relevant att genom tester finna det som passar konstruktionen bäst.

Konstant tid är ett alternativ till att använda pulskvot vid uppspelning av toner för att minska kretsens effektförbrukning. Vid användande av pulskvot kommer den absoluta tiden som teslaspolen är aktiv vid varje tonperiod variera med frekvensen på tonen som spelas. Exempelvis kommer en ton på 1000 Hz med 10 % pulskvot att vara aktiv i $100\ \mu\text{s}$, medan en ton med frekvensen 500 Hz och samma pulskvot är aktiv i $200\ \mu\text{s}$. Om konstant tid istället används kommer pulskvoten att anpassas så att den aktiva tiden är konstant, oavsett frekvensen som spelas upp.

2.7.2 Generering av tonfrekvenser med mikrokontroller

Toner kan genereras av signaler från en mikrokontroller där ett exempel på en sådan är en Arduino. Flera andra typer av mikrokontroller kan användas då deras funktioner till stor del liknar varandra med likvärdigt resultat. Anledningen till att en mikrokontroller fungerar bra till detta ändamål är för att frekvenserna på signalerna som ska genereras är relativt låga. Arduino Uno har en klockfrekvens på 16 MHz [32], vilket ger gott om tid till att generera en signal med frekvens på mellan 0 och 20 kHz [29]. Dessutom har signalerna inte en konstant frekvens, eftersom en tonföljd ska skapas vilket är svårt med en analog krets. Eftersom en mikrokontroller kan programmeras ger det den flexibilitet som krävs för att skapa en sådan tonföljd. Mikrokontrollern kan styras genom ett datorprogram som skickar kommandon exempelvis via USB-kabel.

Den signal som kommer skapas av mikrokontrollern kommer vara en fyrkantsvåg vars frekvens är den samma som tonen som ska genereras. En fyrkantsvåg lämpar sig bäst eftersom H-bryggan förväntar sig en digital signal på 0 eller 5 V . Eftersom syftet är att slå på och av H-bryggan finns det ingen anledning att skicka en signal som har något annat värde än logisk 1 eller 0 (5 respektive 0 V), därför passar en fyrkantsvåg bäst [31].

2.7.3 Från mjukvara till mikrokontroller

För att spela upp en låt med en teslaspole måste låtens tonsekvens finnas tillgänglig. Ett sätt att uppnå detta är att använda en mjukvaruklient som kan läsa av .midi-filer. En .midi-fil är en speciell filtyp som lagrar musik. Till skillnad från majoriteten av andra filtyper sparas inte ljudet direkt i filen, det är istället instruktioner som berättar hur och med vilka instrument musiken ska spelas upp [33]. Mjukvaruklienten kan använda sig av ett så kallat *toolkit* för att avkoda .midi-filen till ett format som är enklare att hantera [34].

Många låtar innehåller olika spår där flera toner spelas samtidigt, exempelvis ackord, vilket inte är möjligt med en tongenererande teslaspole, se 1.3. För att lösa detta används en algoritm som löser alla tonkonflikter genom att alltid välja den ton med högst frekvens, då detta många gånger räcker för att kunna urskilja melodin i en låt.

Själva uppspelningen av en låt kan ske genom att en mjukvaruklient sorterar de toner som ska spelas upp efter ordningen som de förekommer i låten och skickar dem sedan en och en till en mikrokontroller i form av start- och stopkommandon.

2.7.4 Generering av resonansfrekvens

Det används huvudsakligen tre metoder för att generera den del av styrsignalen vars frekvens är samma som resonansfrekvensen, *direktstyrning*, *självsvängning* och *PLL* (*phase locked loop*).

Direktstyrning bygger på att en oscillerande krets, vars frekvens är samma som resonansfrekvensen, konstrueras. Den signal som genereras av denna krets kan sedan matas till H-bryggan. Fördelen med denna metod är att den är relativt enkel och själva oscillatorkretsen är väldokumenterad [35], [36]. En stor nackdel är att kretsen måste ställas in till resonansfrekvensen så precist som möjligt eftersom den saknar någon typ av återkoppling.

Självsvängning innebär att kretsen oscillerar av sig själv. Detta åstadkoms genom att styrkretsen får feedback från huvudkretsen. Återkopplingen stimulerar kretsen som då av sig själv oscillerar i sin egen resonansfrekvens.

PLL är ett styrsätt som liknar självsvängning, men där själva kontrollen av frekvensen sker i en integrerad krets. Metoden skiljer sig också då en PLL jämför fasan på sin egen signal med fasan på en referenssignal och justerar därefter sin egen frekvens. Referenssignalen kan exempelvis komma från en antenn som fångar upp resonansfrekvensen från teslaspolen [37].

Frekvensen i en PLL skapas av en VCO (*Voltage Controlled Oscillator*) vilket är en oscillator som kontrolleras av en DC-spänning. Frekvensen som denna genererar bestäms av externa komponenter och den spänning som matas in till VCO:n. För att skapa en återkoppling används en XOR-operation på den återkopplade signalen och referenssignalen [37].

En PLL använder sig av ett frekvensintervall inom vilket den är mottaglig för en referenssignal. Teslaspolens styrsignal bör vara nära eller lika med resonansfrekvensen för systemet, det är dock svårt att beräkna resonansfrekvensen exakt, vilket gör att den dynamiskt varierbara frekvensen hos en PLL lämpar sig. Centrumfrekvensen för PLLen sätts så nära som möjligt till resonansfrekvensen för systemet, sedan bestäms intervallet sådant att de frekvensvariationer som uppkommer omfattas. Intervallet definieras enligt

$$f = f_0 \pm f_L, \quad (13)$$

där f en specifik frekvens, f_0 är centerfrekvensen som kretsen arbetar kring och f_L är låsintervallet som visar hur stor avvikelse frekvensen hos referenssignalen kan ha och fortfarande låsas av PLLen.

2.8 Uppkomst av urladdningar från en teslapole

Luftens slår över från isolator till ledare när det elektriska fältet överskrider ungefär $3 \cdot 10^6$ V/m, värdet ändras beroende på temperaturen och luftfuktigheten i omgivningen [38]. Spänningen som sekundärkretsen behöver laddas upp till för att uppnå denna elektriska fältstyrka sådant att en urladdning uppkommer, beror på avståndet till objektet som urladdningen slår i. Om en ledare är placerad en millimeter ifrån toroiden krävs inte en lika stor spänning som om samma ledare hade varit en meter ifrån teslapolen. Beräkningar av spänningsnivåerna för olika fall är komplicerade att räkna på för hand, vilket medför att datasimuleringar är ett alternativ.

2.8.1 Spänningsnivå på sekundärsidan

För att räkna ut spänningsnivåer är det möjligt att använda Ohms lag, samt ekvation 4 tillsammans med Q-värdet enligt ekvation 9. Dessa ger tillsammans ekvationerna,

$$U_{prim} = I \cdot \frac{1}{\omega C} \quad (14a)$$

$$U_{sek} = U_{prim} \cdot \frac{N_{sek}}{N_{prim}} \cdot k \cdot Q \quad , \quad (14b)$$

vilka beskriver spänningsnivåerna primär- och sekundärspolen når maximalt då de är perfekt resonansmatchade.

3

Metodval och genomförande

I detta kapitel redovisas projektgruppens arbetsgång från en befintlig sekundärspole till en komplett musikspelande teslaspole. I teoriavsnittet presenterades en mängd olika metoder vilka under genomförandet undersöktes och ställdes mot varandra. Motiveringar till det slutgiltiga valet av metoder presenteras i detta kapitel.

3.1 Viktiga säkerhetsaspekter

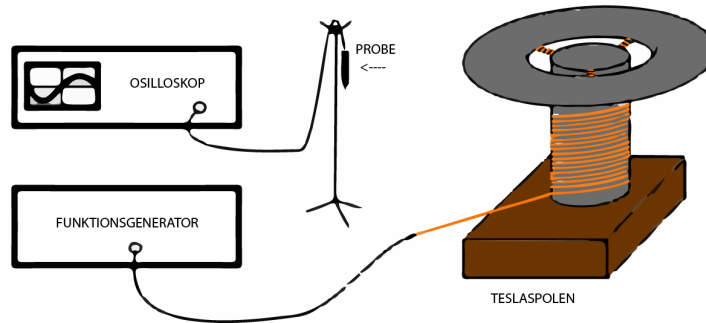
En teslaspole arbetar vid höga spänningsnivåer, upp till flera hundra kilovolt. Spänningsnivåerna innebär att det enbart räcker att röra sig i närheten av en teslaspole i drift för att den ska vara farlig. Det är därför viktigt att innan påbörjandet av konstruktionen ha en väldigt god insikt i hur en teslaspole fungerar och konsekvenserna av eventuella fel i konstruktionen eller den elektriska kretsen. Införskaffning av information och den bakomliggande teorin, framförallt hur urladdningarna genereras, är alltså ur en säkerhetsaspekt ytterst viktig. Konstruktion av en spole som genererar kraftiga urladdningar ska utföras med största försiktighet och en god säkerhetsanalys samt litteraturstudie bör därför vara genomförd innan något test vid farliga spänningsnivåer utförs.

3.2 Framtagande av sekundärkretsens resonansfrekvens

För att kunna ladda upp den nödvändiga energin hos teslaspolen som genererar de önskade urladdningar, krävs det att både primär- och sekundärkretsen arbetar vid samma resonansfrekvens. Det är alltså resonans mellan kretsarna som avgör storleken på urladdningar och därför är denna frekvens avgörande för projektet. Även dimensioneringen av primärsidans komponenter är beroende av resonansfrekvensen hos den befintliga sekundärkretsen och därför bestämdes denna frekvensen först.

För att bestämma resonansfrekvensen hos den befintliga sekundärspolen användes den första metoden som presenterades i avsnitt 2.4. Denna metod var lämplig eftersom alla nödvändiga instrument och komponenter fanns tillgängliga men även på grund av noggrannheten i mätningen gav ett bättre resultat än de andra presenterade metoderna. Denna metod medför att det är möjligt att ta fram Q -värdet för sekundärkretsen vilket är en ytterligare anledning till att denna metod valdes. En nackdel med denna metod är noggrannheten i mätningen samt påverkan av den mänskliga faktorn vid avläsandet. Däremot ändras resonansfrekvensen redan vid små förändringar i omgivningen vilket har betydligt större påverkan jämfört med osäkerheten hos mätinstrumenten. Detta medför att mätosäkerheter hos instrumenten som används försummas.

Mätningen utfördes med hjälp av en funktionsgenerator samt en prob och ett oscilloskop som kopplades upp tillsammans. Proben hängdes i höjd med och på en meters avstånd, ifrån spolens toroid samtidigt som spolen matades med en sinusvåg från funktionsgeneratoren. Proben kopplades till oscilloskopet och registrerade de elektromagnetiska fält som uppkom i spolen. En bild av den slutgiltiga uppkoppling presenteras i figur 9.



Figur 9: Bildrepresentation av uppmätning av resonansfrekvens för den befintliga sekundärkretsen

Genom ett frekvenssvep med hjälp av funktionsgeneratoren kunde spänningsnivåer vid olika frekvenser avläsas på oscilloskopet där resonansfrekvensen var där spänningen hade sitt högsta värde, se 2.4. Avlästa spänningsvärden tillsammans med tillhörande frekvenser fördes in som vektorer i beräkningsprogrammet MATLAB[®] för vidare bearbetning och grafritande.

Den tidigare nämnda nackdelen med mätmetoden framgick tydligt under mätningen då uppkopplingen var mycket känslig för sin omgivning med flera metallskåp och liknande föremål placerade i närheten. Dessa föremål påverkade de elektromagnetiska fält som registrerades av proben och med anledning av detta flyttades mätningen ut till ett stort öppet område.

3.2.1 Framtagande av bandbredd och godhetstalet

Storleken på spänningens värden i uppmätning av resonansfrekvensen var ej det intressanta utan istället var det förhållandet mellan spänningen och frekvensen som var av intresse. Detta förhållande presenteras grafiskt i resultatkapitel 4.1.

I avsnitt 2.4.2 presenteras godhetstalet och bandbredden som koncept samt vikten av att ta reda på dessa. Genom att titta på spänningsvärdena under frekvenssvepet beräknades godhetstalet och bandbredden ut enligt detta teoriavsnitt. Bandbreddsgränsen bestämdes där effekten hade halverats och eftersom $P \sim U^2$ blev gränsen vid $\frac{1}{\sqrt{2}}$ av toppvärdet.

3.3 Val av primärspole

Uppmätningen av sekundärspolens resonansfrekvens möjliggjorde att primärsidans design kunde bestämmas. Skineffekten, se 2.3.1, utnyttjades genom att välja ett rör istället för en solid kabel som ledare, vilket minskar materialförbrukningen, se 2.3.2. Tjockleken på röret valdes utefter skineffektens inverkan och för att klara av de stora strömmarna.

Vid valet av primärspolen jämfördes de tre designerna i 2.3.1. En platt version av Arkimedes spiral ansågs vara det bästa alternativet på grund av dess enkla och stabila konstruktion samt den minskade risken för oönskade urladdningar mellan toroiden och primärspolen. Koppar valdes som ledningsmaterial på grund av dess goda ledningsförmåga samt dess låga pris och stora utbud.

3.3.1 Primärspolens dimensionering

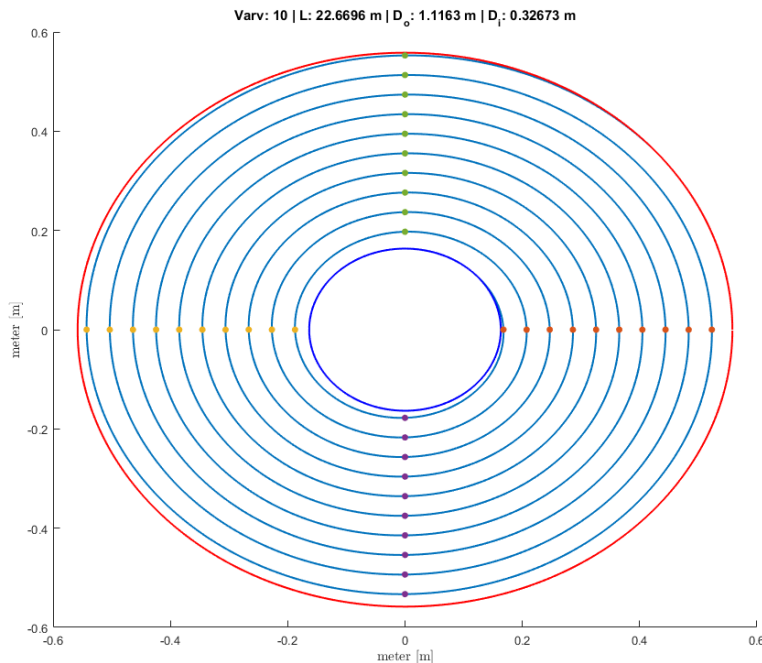
Primärspolens lindningsvarv bestämdes för att storleksmässigt passa den befintliga konstruktionen och för att ge en god marginal för justering av lindningsvarven vid olika driftfall. Längden på spiralen bestäms utefter antalet varv samt avståndet mellan varven. Detta varvavstånd bestämdes till samma mått som diametern

av röret eftersom förhållandet mellan diameter och längd då medför att kapacitansen mellan varven är av låg betydelse, se 2.3.3. En liten diameter på Arkimedes spiralens första varv valdes för att primärspolen inte skulle sticka ut för långt ifrån sekundärspolens kvadratiska plattform, detta eftersom det medför en större risk för att gå sönder och därmed en ökad säkerhetsrisk.

Med hjälp av ekvation 5 för beräkning av inträngningsdjup och med en resonansfrekvens vid 100 kHz bestämdes inträngningsdjupet. Detta gav en indikation på hur röret bör dimensioneras för att inte välja ett för tunt rör. Med en ansatt tvärsnittsarea användes en AWG-tabell (American Wire Gauge) för att titta på märkström men främst fixeringsström, se 2.3.2. I [39] finns fixeringströmmar vid rumstemperatur för olika tvärsnittsareor och tidsintervall.

Då strömmen som primärspolen skulle leda vid drift var svår att uppskatta valdes ett värde som hade god marginal till maxströmmen som den tillgängliga H-bryggan klarade av, se avsnitt 3.6. På så sätt säkerställdes att oavsett vilken ström som skulle krävas var inte materialet i primärspolen den svagaste länken.

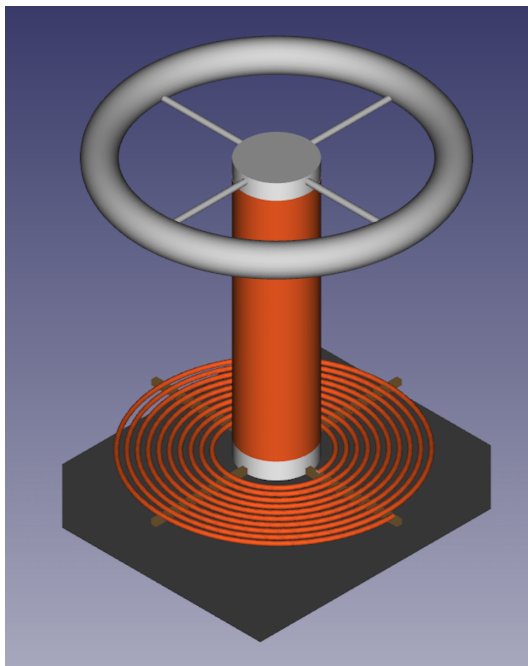
Genom utnyttjandet av MATLAB[®] kunde en design av en Arkimedes spiral skapas, se figur 10, vilken användes för att beräkna spolens längd enligt ekvation 6.



Figur 10: Visualisering av primärspolen samt beräkning av dess längd berorende på antal lindningsvarv och varvavstånd. Arkimedes spiral visualiserad i ljusblå färg, ytterdiameter i röd samt innerdiameter i blå.

3.3.2 Konstruktion av primärspole

Med kända dimensioner för primärspolen, se 3.3.1, kunde ett kopparrör beställas. En Arkimedes spiral kunde därefter konstrueras där fyra fastlimmade träplankor med ingropningar för spolen användes. Beräkningen av ingropningarnas positionering för att uppnå en spiralform, utfördes i MATLAB[®]. Ett kors placerat i mitten av figur 10 representerade träplankorna. Skärningen mellan spiralen och korset visade var träplankornas ingropningar skulle placeras. En slutgiltig representation av det planerade utseendet av teslaspolens primär och sekundärspole presenteras i figur 11



Figur 11: Planerat utseende av primär och sekundärspole

När primärspolen var monterad beräknades dess induktans, se ekvation 7b. Induktansen mättes även upp med en RLC-mätare vilket gav ett något lägre värde. Det praktiskt uppmätta värdet ansågs stämma bättre överens med verkligheten då beräkningarna krävde vissa uppskattningar, vilket medförde att kommande beräkningar utgick efter det uppmätta värdet. För att kunna matcha resonansfrekvenserna användes en variabel kontaktpunkt, i form av en krok för att försöka hitta den induktans som bidrar till den bästa matchningen.

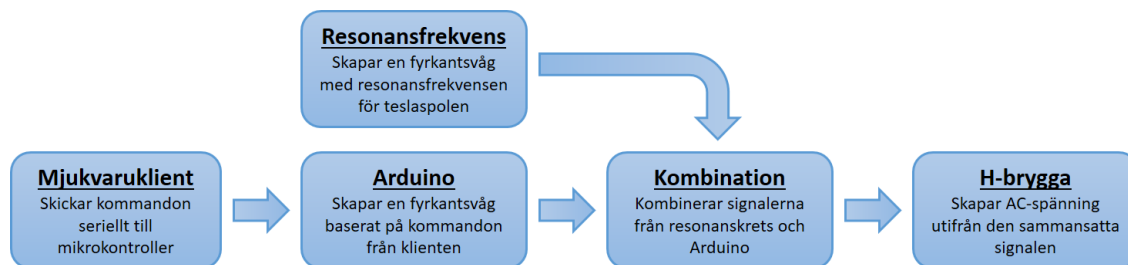
3.4 Val av kondensator

När resonansfrekvensen och primärspolens induktans var uppmätt behövde kondensatorvalet anpassas utefter dessa värden för att uppnå rätt frekvens, se ekvation 11. Vid val av kondensator behövde framförallt de höga spänningarna samt de höga spänningsderivatorna tas i åtanke, se 2.6.

En MMC uppsättning av foliekondensatorer valdes för att uppnå den önskade resonansfrekvensen hos teslaspolen, se 2.6. MMC uppsättningen valdes på grund av dess låga kostnad och flexibla egenskaper där enstaka kondensatorer enkelt kan läggas till, bytas ut, eller tas bort. Fördelen blir då att det enkelt och billigt går att justera uppsättningen utefter vilka värden som behövs jämfört med att köpa en helt ny stor kondensator med önskade egenskaper, vilket även kan vara svårt att hitta. Foliekondensatorer valdes framför andra typer på grund av dess låga kostnad och eftersom de klarar av teslaspolens driftförhållanden.

3.5 Syntetisering av ljudsignal

Signalbehandlingen till teslaspolen innefattar hela kedjan från kommando att spela upp en ton, till den spänning som primärspolen matas med, se 2.7. Denna kedja innefattar ett flertal steg, se figur 12.



Figur 12: Schema över hur en styrsignal genereras från C#-klient till H-brygga

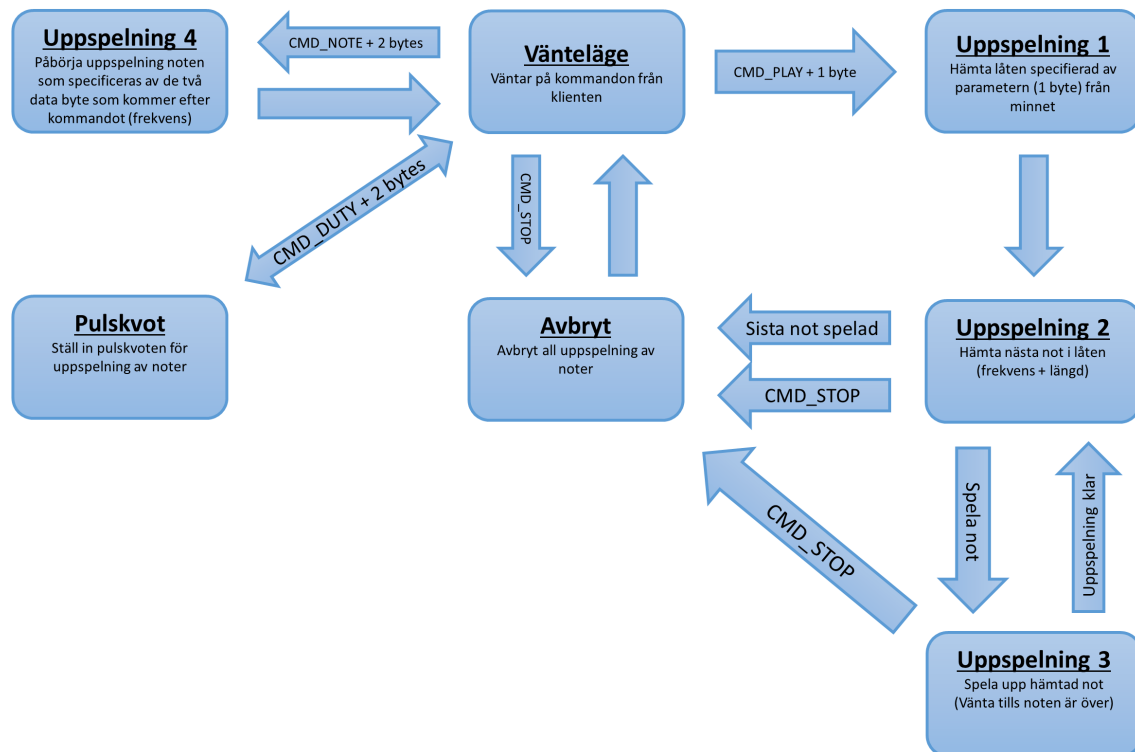
Första steget var mjukvaruklienten som skrevs i programmeringsspråket C#. Detta språk valdes på grund av projektgruppens tidigare kunskaper inom språket. Mjukvaruklienten skickar kommandon till nästa steg i kedjan. Klienten hade möjlighet att styra många parametrar som avgör hur signalen till teslaspolen i slutändan ser ut. Detta innefattar exempelvis frekvens och pulskvot men även mer avancerade funktioner som inläsning av .midi-filer, se 2.7.3 och konstant tid, se 2.7.1.

Nästa steg var en mikrokontroller där Arduino valdes eftersom det var en populär produkt som var relativt enkel att hantera. Arduinon hade även en tillräckligt hög klockfrekvens för att uppfylla dess syfte. Kommunikationen mellan klienten och Arduinon skedde via en dators serieport med hjälp av en USB-kabel.

3.5.1 Ljuduppspelning med hjälp av Arduino

Mjukvaran som skrevs till Arduinon stödde både uppspelning av en förprogrammerad låt samt uppspelning av en valfri ton. Ljuduppspelningen med Arduinon fungerade som så att när den startade befann den sig i ett vänteläge där inget hände tills dess att ett kommando togs emot. Kommandot kunde antingen vara ett kommando som initierade uppspelning av den förprogrammerade låten på Arduinon, eller ett kommando som startade uppspelning av en valfri frekvens. Den valfria frekvensen bestämdes av de två bytes som skickades efter kommandot där de två byten representerade datatypen *int*. Den första byten bestod av de minst signifikanta bitarna (LSB) och den andra de mest signifikanta (MSB). Denna typ av uppspelning användes för att spela upp en .midi-fil, se 2.7.3.

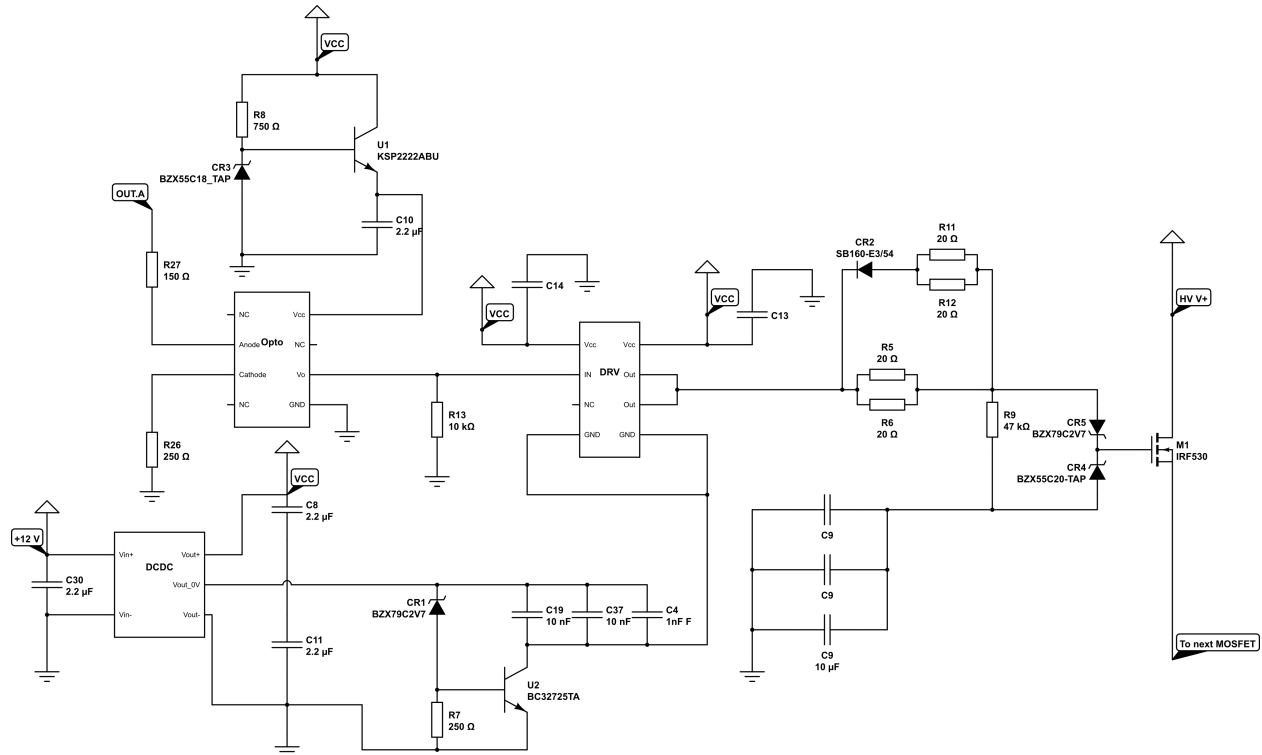
Uppspelningen skedde genom att en fyrkantsvåg genererades med den frekvens som specificerades av den ton som skulle spelas upp. Pulskvoten av fyrkantsvågen kunde varieras mellan 0 och 50 %, där pulskvoten specificerades på liknande sätt som frekvensen. Pulskvoten hade 9 bitars upplösning där värdet 511 motsvarade 50 % och värdet 0 motsvarade 0 % och även här delades datan upp i LSB och MSB. Uppspelningen kunde vid varje tidpunkt avbrytas genom ett kommando från klienten. En förenklad bild av hur programvaran fungerade principiellt kan ses i figur 13.



Figur 13: Visualisering av hur mjukvaran till Arduinon fungerar.

3.6 H-brygga

En H-brygga kan användas för att generera en AC-spänning ifrån en DC-källa, se 2.7.1. H-bryggan konstruerades med MOSFETs med maximal kontinuerlig ström på 93 A, där styrsignalerna var isolerade från kraftelektroniken med hjälp av optokopplare, se figur 14. Schemat visar hur inporten är kopplad till en optokopplare som i sin tur är kopplad till en *gate driver* för förstärkning vilken slutligen är kopplad till en MOSFET.



Figur 14: Kretscha för en av H-bryggans 4 identiska kretsar, vilka används för att driva 4 stycken MOSFET. Figuren används med tillåtelse av skaparen, Daniel Pehrman.

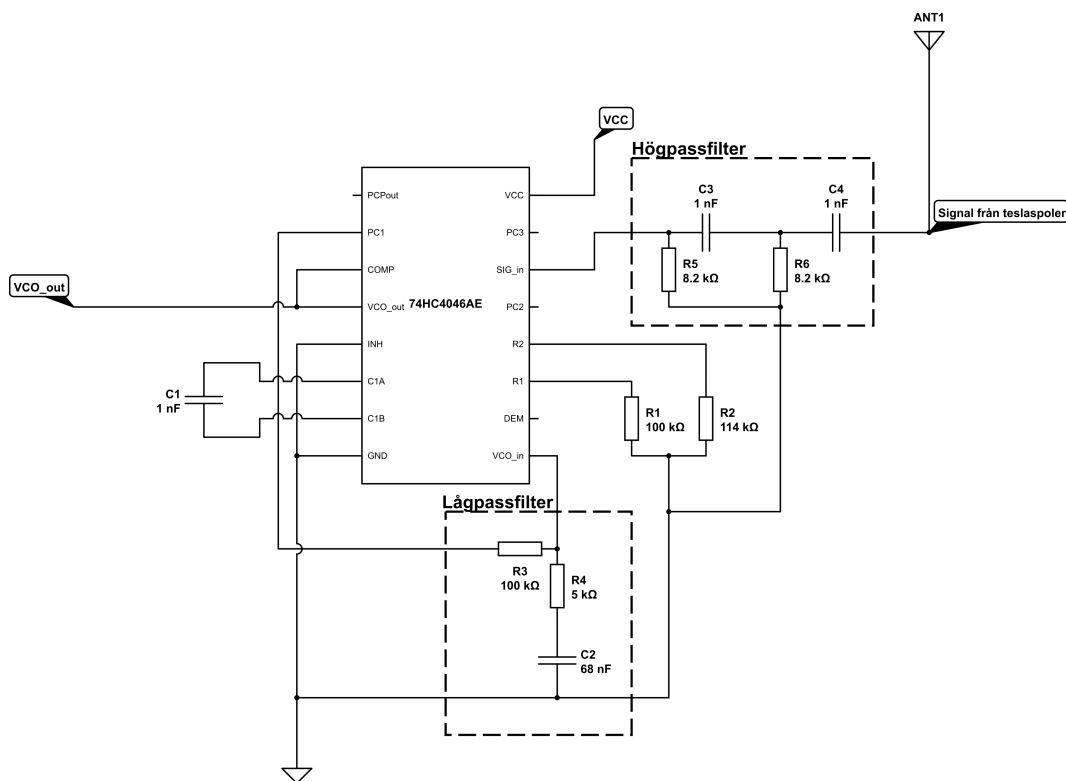
3.6.1 Högeffektstransistorer för H-brygga

Högeffektstransistorerna som H-bryggan innehöll var av kiselkarbid för att klara av de snabbt växlande spänningsnivåerna. Om för långsamma transistorer används skulle det medföra att växlingarna inte kunde göras vid korrekt tidpunkt och därav skulle en kortslutning uppkomma. Vid kortslutning skulle spänningskällan på högspänningssidan av H-bryggan få en direktkoppling genom två av transistorerna och förstöra dem. Av den anledningen användes transistorer av kiselkarbid för att minimera risken för kortslutning.

3.7 Design av styrsignal

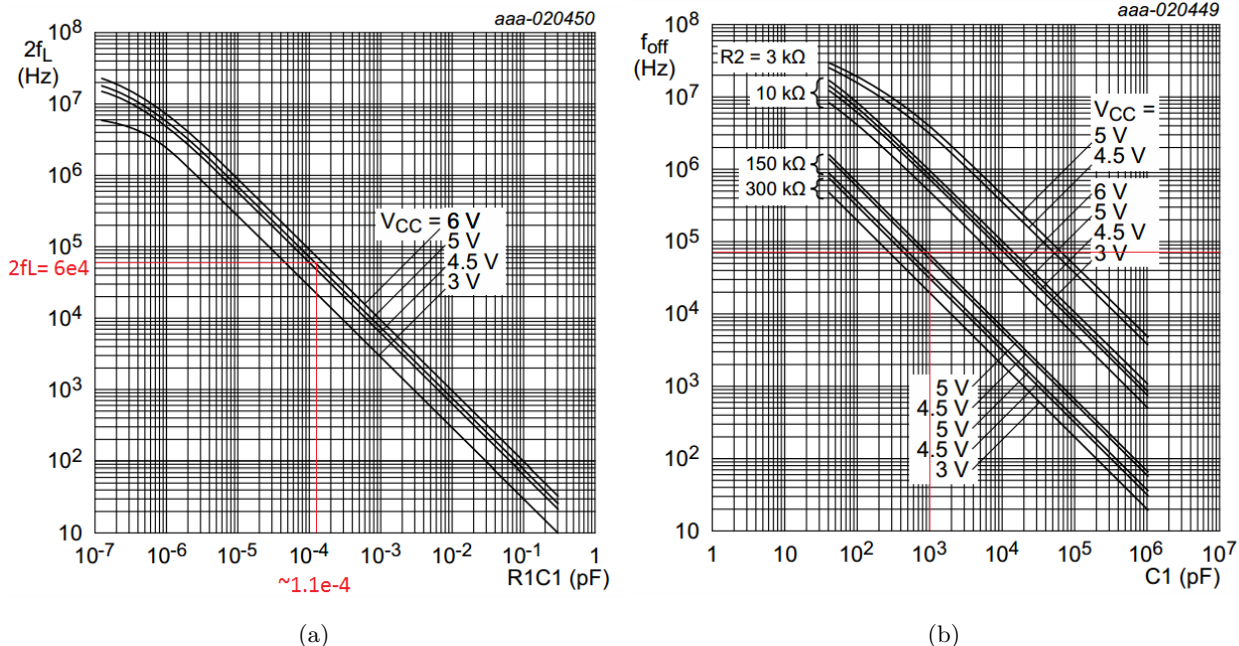
För att skapa signaler kring resonansfrekvensen, se 2.7.4 samt 2.7, krävdes en metod som kunde anpassa styrsignalen efter de förändringar av resonansfrekvens som uppkommer under drift av teslaspolen. Först testades direktstyrning eftersom det till synes var den enklaste metoden. Direktstyrning gav dock inte ett önskvärt resultat då det visade sig vara allt för osäkert och instabilt. Nästa metod som testades var PLL vilken rekommenderades av projektgruppens handledare. Denna metod blev senare det slutgiltiga valet av styrmetod vilket framförallt berodde på att PLL hade den önskvärda förmågan att följa en variabel referenssignal. En tredje potentiell metod var självsvängning, se 2.7.4. Däremot hade projektgruppen tidigare kunskap om denna metod och den nedprioriterades på grund av dess känslighet för störningar.

Med hjälp av PLL-kretsen, se 2.7.4, skapades en signal kring resonansfrekvensen. Produkten som låg till grund denna krets, se figur 15, var en PLL-komponent med produktnummret CD74HC4046AE. Kretsen använde en referenssignal från teslaspolen och innehåller högpas och lågpasfilter samt resistorer som tillsammans med en kondensator bestämmer arbetspunkt.



Figur 15: Representation av PLL-kretsen med markerade områden som visar ej ursprungliga komponenter i kretsen

Kretsen var känslig för variationer hos komponentvärden där olika värden medförde olika karakteristiska drag. För att bestämma komponentvärden gjordes ett val om kretsens arbetsområde. Centerfrekvensen valdes kring resonansfrekvensen med en låsfrekvens på 30 kHz , för att klara förändringar utan att innehålla övertoner. Genom att bestämma centerfrekvens och låsfrekvens, se ekvation 13, kunde värden på resistorerna och kondensatorn senare beräknas med hjälp av graferna i produktbladet, se figur 16.

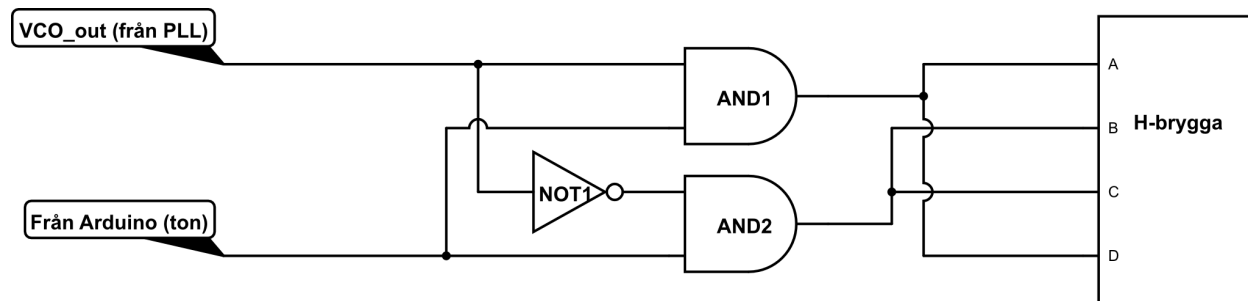


Figur 16: Ungefärliga komponentvärdena hos resistorerna och kondensatorn som definierade arbetspunkten kunde med hjälp av dessa grafer bestämmas för PLL-kretsen. Graferna kommer från produktbladet till PLL-komponenten CD74HC4046AE.

De filter som inrutas i kretsen, se figur 15, är tillagda för att minimera eventuella störningar. Ett av de filter som användes i PLL-kretsen var ett passivt högpasfilter som filterade bort brus från signalen som antennen plockade upp. Det andra filtret var ett första ordningens lågpasfilter. Dess uppgift var att dämpa högre frekvenser från att skickas in i VCO_{IN} eftersom VCO_n inte var stabil för snabbt varierande spänningar. Utan filtret skulle PLLen inte kunna låsa in sig på referenssignalen eftersom återkopplingen skiftar för snabbt.

3.7.1 Modulation av resonansfrekvens

För att modulera styrsignalen till H-bryggan, se 2.7, användes ett kombinatoriskt nät bestående av två AND-grindar, se figur 17. Nätets funktion var att låta Arduinos tonsignal bestämma när signalen med resonansfrekvensen, från PLL-kretsen, skulle släppas igenom till H-bryggan. Eftersom varje transistor i H-bryggan styrdes individuellt behövdes även en inverterad signal så att H-bryggan inte kortslöts, se avsnitt 2.7.1.



Figur 17: Kretsen till det kombinatoriska nätet som slutligen skickar styrsignalen till H-bryggan.

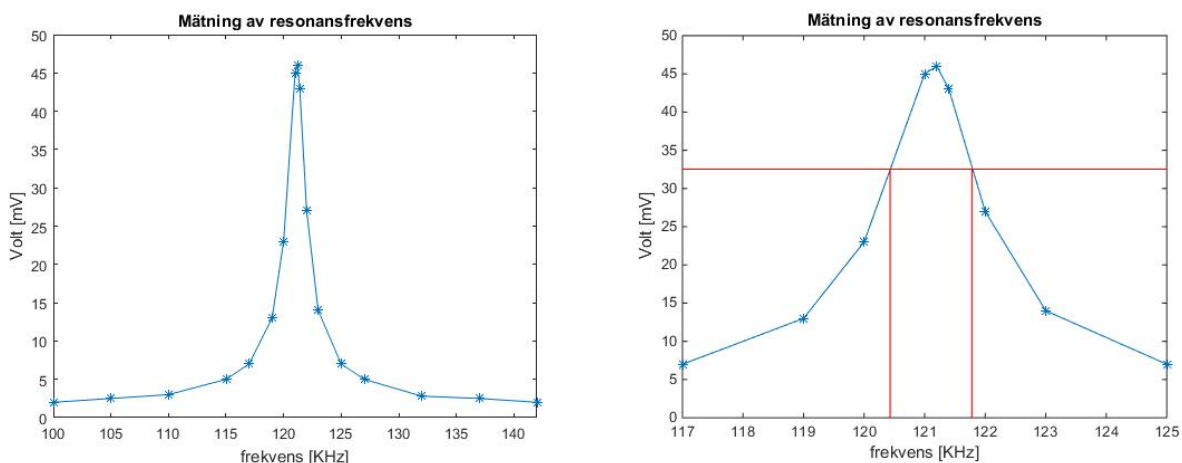
4

Resultat

I detta avsnitt presenteras alla värden från mätningar och beräkningar utförda under projektets gång. Avsnittet innehåller även bilder av konstruktionen och den slutgiltiga teslaspolens urladdningar.

4.1 Sekundärkretsens resonansfrekvens, Q-värde och bandbredd

Sekundärspolens egenskaper uppmättes enligt 3.2. Utifrån den nämnda metoden kunde en resonansfrekvens på 121 kHz mätas upp, se figur 18a, där resonansfrekvens är värdet då ett maximalvärde uppträder. Från experimenten som utfördes kunde figur 18b skapas och utifrån mätvärdena kunde Q-värdet och bandbredden bestämmas. Figurerna påvisar hur den magnetiska fältstyrkans magnitud påverkas beroende på frekvensen, figur 18b visar en förstoring av 18a för att tydligare markera ut bandbredden till $1,35 \text{ kHz}$. Bristen på antalet mätpunkter ger att mätosäkerheten blir relativt stor. Q-värdet erhöles genom insättning av bandbredden i ekvation 9 till 90.

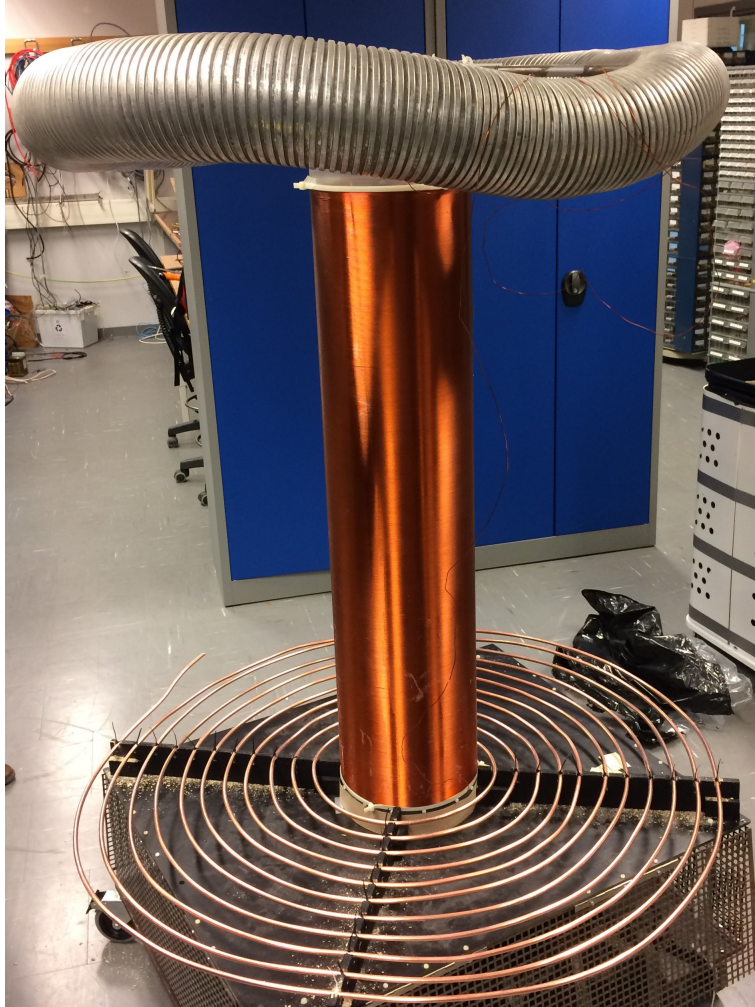


(a) Plot av hela mätserien från resonansmätningen (b) En förstoring där det röda linjerana visar bandbredden

Figur 18: Mätvärdena från uppmätningen av resonansfrekvens som visar spänningstopp vid resonansfrekvensens samt bandbredd.

4.2 Val av primärspole

Primärspolen tillverkades som en liggande Arkimedes spiral med 10 varv, enligt ritningen i figur 10. Den slutgiltiga primärspolen fick 11 varv, då materialet endast gick att köpa i längder om 25 m , en separation mellan varje varv på 32 mm och avståndet mellan innersta till yttersta varvet var 450 mm . Röret valdes att inte kapas då de extra varvet gav möjlighet att variera induktansen ytterligare. En bild av hur den färdiga primärspolen ser ut presenteras i figur 19.



Figur 19: Färdigkonstruerad primärspole

Spolens induktans kunde att varieras genom att flytta anslutningspunkten, och på så sätt välja hur stor del som används. Med hela spolen inkopplad erhöles en maximal induktans på $75 \mu H$.

4.3 Kopplingsfaktor

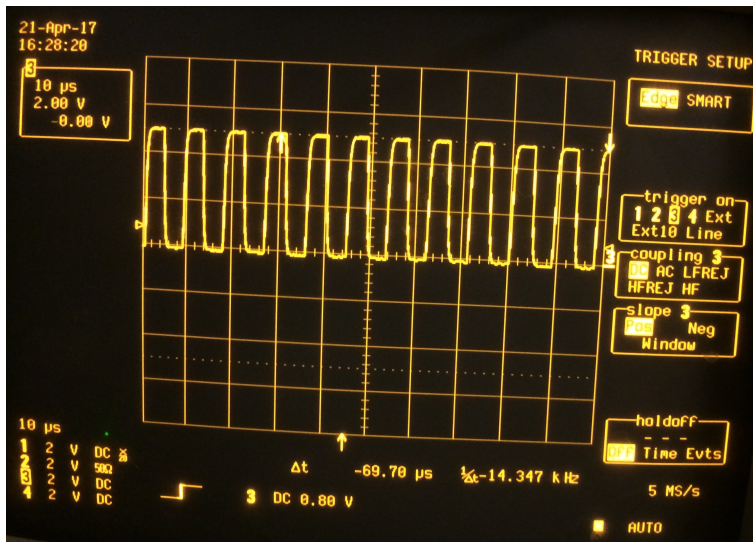
Utifrån den angivna metoden som beskrevs i avsnitt 2.2.1 kunde, genom mätning på sekundärsidan, värdet $49,50 mH$ mätas upp för öppen primärkrets samt värdet $48,65 mH$ för sluten krets. Genom att använda ekvation 1 erhöles en kopplingsfaktor på 0,13.

4.4 Kondensatoruppsättningen

Kondensatoruppsättningen till teslaspolens primärkrets bestod totalt av 24 stycken foliekondensatorer i en MMC-uppsättning, se 3.4. Uppsättningen bestod av tre parallellkopplade seriekopplingar där varje seriekoppling innehöll 8 kondensatorer. I kopplingen var alla kondensatorer av samma modell, PHE450SD6100JR06L2. En kondensator hade enligt specifikationerna ett kapacitansvärde på $100 \text{ nF} \pm 5\%$ och hade en nominell spänning på 2 kVDC . En kondensator tålde även en flank på $1,8 \text{ kV}/\mu\text{s}$ för att klara av de höga spänningsderivatorna. Att åtta stycken av dessa kondensatorer låg i serie medförde att den ekvivalenta nominella spänningen för hela uppsättningen låg på 16 kVDC . Det ekvivalenta kapacitansvärdet på uppsättningen låg kring $37,5 \text{ nF}$.

4.5 Styrsignal från PLL-kretsen

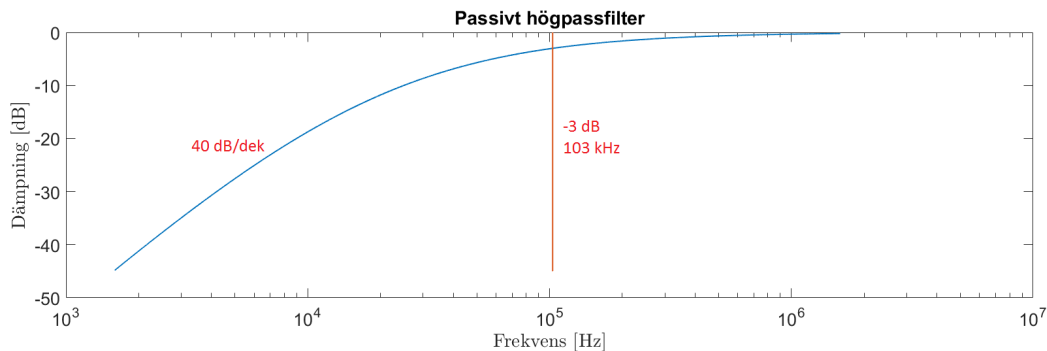
PLL-kretsen generade en fyrkantsvåg med samma frekvens som den signalen som plockats upp genom antennen. Signalen som antennen fångade upp är resonansfrekvensen för sekundärspolen. PLL-signalen hade en frekvens på ca 110 kHz , se figur 20, och en amplitud på 5 V . För att PLL-kretsen skulle fungera korrekt användes två filter, som beskrivs i avsnitt 3.7 och visas i figur 15.



Figur 20: Fyrkantsvåg som generats av PLL-kretsen

4.5.1 Högpasstret som används för antenssignal

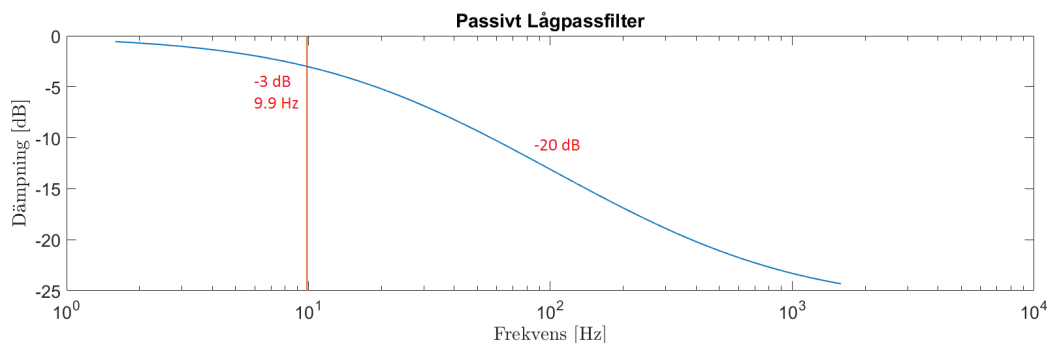
Från figur 21 var det möjligt att se vilka frekvenser som släpptes igenom det passiva högpasstret. Filtret hade en lutning på -40 dB per dekad och brytfrekvens på 103 kHz vilket är utmarkerat i figur 21. Värdet på komponenterna som medförde *Bode*-diagrammets utseende gick att avläsa i figur 15.



Figur 21: Bode-diagram som visar vilka frekvenser som släpps igenom samt hur andra frekvenser dämpas.

4.5.2 Lågpasstret för PLL-kretsen

Värdena på komponenterna utlästes från databladet för PLL-komponenten och utifrån dessa värden kunde ett *Bode*-diagram tas fram. Diagrammet presenterade hur dämpningen av olika frekvenser skedde, se figur 22. Från figuren kunde en lutning på -20 dB per dekad och en brytfrekvens på 10 Hz urskiljas.



Figur 22: Bode-diagram för lågpasstret och visar vilka frekvenser som släpps igenom samt hur andra frekvenser dämpas.

4.5.3 PLL-kretsens frekvensområde

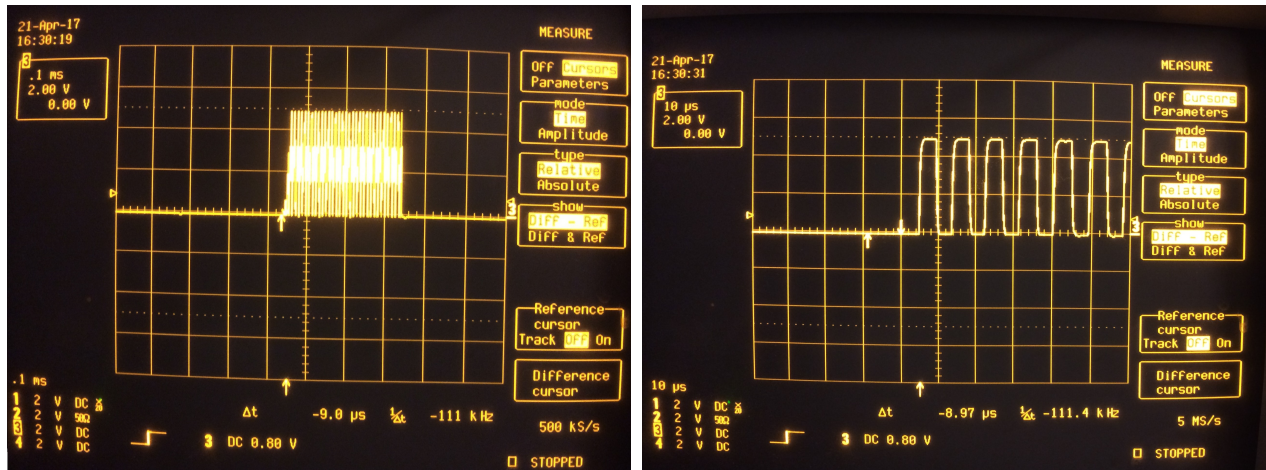
PLL-kretsens komponenter, se figur 15, valdes sådana att arbetsområdet för teslaspolen låg inom det frekvensspann, som definieras av centerfrekvensen tillsammans med avvikelsefrekvensen för PLLen. PLL-kretsens frekvensområde kan ses som

$$f = 107 \pm 24,5 \text{ kHz}, \quad (15)$$

där f representerar de frekvenser som PLLen kan arbeta inom, se även ekvation 13.

4.6 H-bryggans signaler

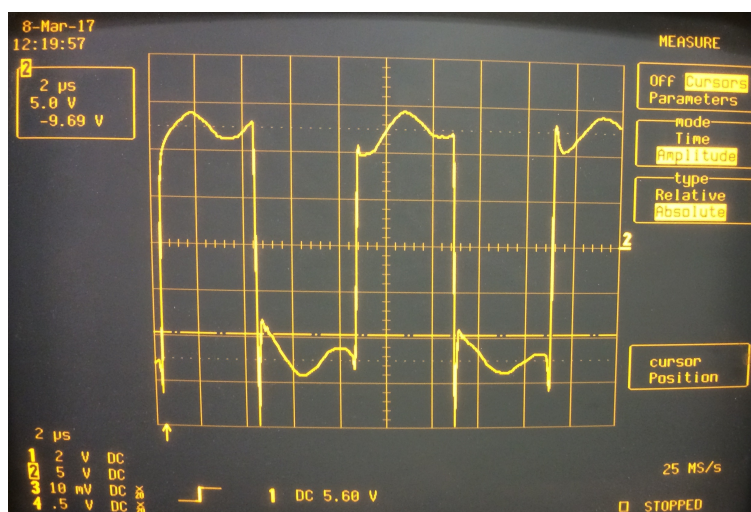
För att skapa styrsignalerna till H-bryggan sattes signalerna från Arduinon och PLL-kretsen ihop med hjälp av ett logiskt nät, se figur 17. Målet var att efterlikna den signal som tidigare visades i figur 7, där signalen bestod av paket innehållande resonansfrekvensen, där varje paket kom med tonens frekvens och hade den längd som bestämdes av pulskvoten. Den faktiska signalen kan ses i figur 23a, där figur 23b är en förstord version som illustrerar att varje paket var uppbyggt av PLL-kretsens signal.



(a) Ett paket med styr signaler från styrkretsen till H-bryggan (b) Förstorad bild som visar att paketet innehåller signalen med resonansfrekvensen

Figur 23: Visar utseendet på styrsignalen som skickas till H-bryggan

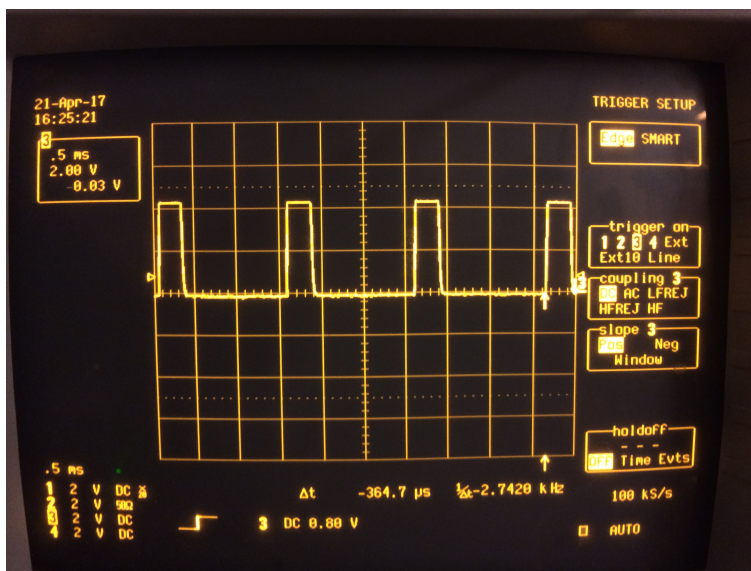
Signalen som skapades av H-bryggan när den tog emot styrsignalerna kan ses i figur 24, där signalen hade samma frekvens som styrsignalen, men med spänningsnivåer från $-V_{in}$ till $+V_{in}$ istället för 0 V till 5 V, samt med vissa övertoner.



Figur 24: Den signal som H-bryggan skapar med hjälp av styrsignalen. Denna signal skickas direkt till teslaspolens primärkrets.

4.7 Ljudsignalen från Arduino

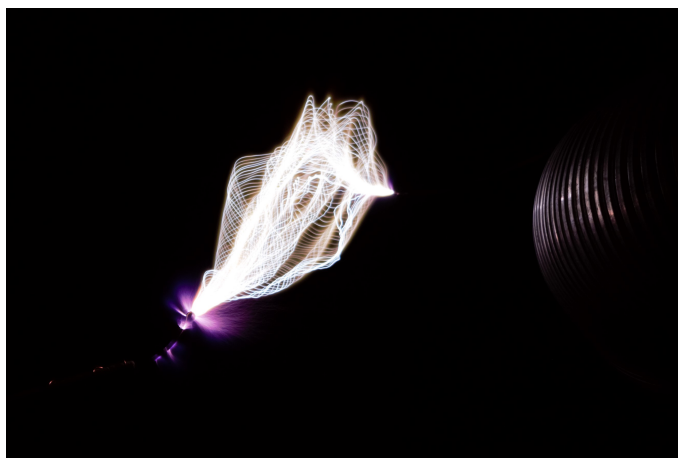
Signalen som Arduino genererade till resten av styrkretsarna, se 2.7, innehåller de toner som skulle spelas upp i teslaspolen. I figur 25 visas en del av en signal med en frekvens på 666 Hz och en pulskvot på ca 20 %, som genererats av Arduino. Vilken ton som genererades av Arduino bestämdes av styrprogrammet på datorn, se 3.5.



Figur 25: 666 Hz ton med ca 20 % pulskvot som genererats av Arduino

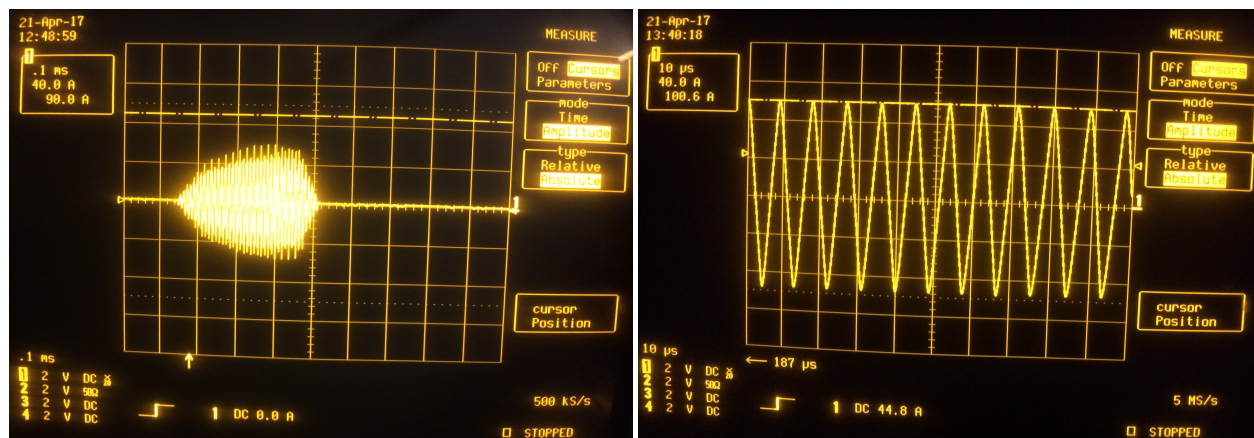
4.8 Maximala strömmar och urladdningar

När H-bryggan matade teslaspolens primärkrets var det möjligt att generera urladdningar av varierande längd, beroende på matningsspänning och pulskvot. Urladdningarna leddes genom en jordad återledare, där urladdningens längd berodde på avståndet mellan teslaspolen och denna återledare, förutsatt att tillräckligt stort elektriskt fält genererades, se 2.8. Maximal längd uppnåddes då strömgränsen för H-bryggan nåddes, vilket var strömtoppar uppemot 100 A , vilka resulterade i $11,5\text{ cm}$ långa urladdningar. I figur 26 kan man se hur det går en urladdning från toroiden till den jordade återledaren.



Figur 26: Urladdning från teslaspolen till jordledaren

Spänningen som uppmättes över primärspolen uppgick till ca $1,6 \text{ kV}$, som tillsammans med en ström på 100 A och en pulskvot på 20% gav en medeleffekt i primärkretsen på 32 kVA , där den aktiva effekten utgjorde ca 1300 W . Vid denna effekt uppmättes temperaturer strax över $100 \text{ }^\circ\text{C}$ på H-bryggans transistorer med hjälp av en värmekamera, efter vilket experimentet avbröts. Strömmens utseende kan ses i figur 27, där 27a visar hur hela strömpulsen ser ut och 27b är en förstoring där man tydligt kan se att strömtopparna når 100 A . Från figur 27a är det möjligt att urskilja hur strömutbyggnaden sker, detta efterliknar det som presenterades i avsnitt 2.5 om hur uppbyggnaden sker och dess utseende.



(a) Strömpuls som går i primärkretsen under drift

(b) Bild där strömtoppar på mer än 100 A kan ses

Figur 27: Visar strömmens utseende under uppbyggnad

4.9 Beräknade spänningsnivåer på respektive spole

Genom att använda ekvationer 14a och 14b kunde de ideala spänningsnivåerna för sekundär- och primärsidan beräknas till $3,7 \text{ MV}$ respektive $3,66 \text{ kV}$. En toppspänning på $3,66 \text{ kV}$ gav ett topp-till-topp värde på $7,32 \text{ kV}$ för spänningen över primärkretsen. Den största spänningsderivatan som kunde betraktas blev då $849 \text{ V}/\mu\text{s}$.

4.10 Uppspelning av musikstycke

När teslaspolen var i drift uppstod urladdningarna i tonernas frekvenser vilket tydligt kan höras. Urladdningarna kunde bara ske med en ljudfrekvens åt gången vilket ledde till att bara en ton kunde spelas på samma gång och ackord kunde inte spelas. Det var inte heller möjligt att kontrollera ljudstyrkan under drift. Styrprogrammet på datorn som gav signalerna till Arduinon läste in midi-filer, se 3.5. Majoriteten av de låtar som testades fungerade men programmets hantering av ackord var inte optimal, vilket innebar att somliga filer inte kunde läsas korrekt.

5

Diskussion

I följande kapitel kommer resultatens rimlighet och de problem som uppstått under projektets gång att diskuteras samt förslag på förbättringar att presenteras.

5.1 Resonans

I ett tidigt skede av projektet upptäcktes vikten av resonansfrekvensen vid arbete med en teslaspole. Den initialt uppmätta resonansfrekvensen ansågs länge vara den enda och korrekta, men med tiden upptäcktes det att frekvensen berodde av många faktorer och var väldigt känslig för spolens omgivning. Detta var ett genomgående problem vid driften av teslaspolen, då små förändringar i omgivningen gav upphov till förändringar på 10-tals kHz i resonansfrekvensen, vilket resulterade i att mycket tid fick läggas på att stämma om primärkretsen till sekundärkretsen varje gång teslaspolen flyttades. Teslaspolens känslighet gällande resonansfrekvens gjorde det svårt att stämma primärkretsen till sekundärkretsen och det resulterade i att överensställningen mellan resonansfrekvenserna inte lyckades tillräckligt bra. Konsekvenserna av detta diskuteras i avsnittet nedan.

5.1.1 Överensstämmelse av primär- och sekundärkretsens resonansfrekvens

Vid jämförelse av den beräknade spänningen från 4.9 och spänningen baserad på längden av de producerade urladdningarna i 4.8 var det tydligt att primär- och sekundärspole inte var perfekt matchade, eftersom den ideala sekundärspänningen var mer än 10 gånger större än den spänning som enligt [40] motsvarar teslaspolens urladdningslängd. Då resonansfrekvenserna inte matchade varandra perfekt sjönk det gemensamma Q -värdet för spolarana och därmed spänningsförstärkningen. Av alla parametrar till ekvation 14b var det dessutom Q -värdet som hade störst osäkerhet, till stor del på grund av dess uppmättningsmetod, se 3.2.1.

5.1.2 Uppmätning av spänningsnivåer

Utöver spänningsnivåernas beräkningar, se 4.9, gjordes också försök till mätningar. För primärsidan användes en högspänningsprob kopplad till ett oscilloskop. Mätningen gav inget pålitligt resultat då den extra belastning som proben gav upphov till var stor nog att påverka primärkretsens resonansfrekvens till den punkt att inga urladdningar kunde observeras.

Till sekundärsidan gjordes försök med ett justerbart kulgap genom vilket urladdningarna kunde ske. Utifrån kopparkulornas avstånd kunde spänningsnivån bestämmas [40]. Däremot gav denna metod inte urladdningar av samma längd som tidigare. Förändringen i sekundärkretsens kapacitiva egenskaper som kulgapet medförde ledde till att den ej var i resonans vid mätningen och inget användbart resultat kunde avläsas.

5.2 Signalbehandling

Signalbehandlingen utgjorde ett större problem än vad som initialt förväntades, vilket ledde till att flera förändringar och anpassningar fick göras under projektets gång. De mest signifikanta problemen diskuteras nedan.

5.2.1 Generation av resonanssignal

Vid valet av PLL-kretsens komplementerande komponenter saknades detaljerade instruktioner för hur dessa skulle väljas. Det som fanns att tillgå var grafer där värden kunde approximeras genom att läsa av axlarna, se figur 16. Detta medförde att PLLens egenskaper sällan hamnade tillräckligt nära målet för att vara användbart, och fick därför göras om. I slutändan fick många komponenter testas istället för att räknas fram, vilket var tidskrävande.

5.2.2 Störningar från elektromagnetiska fält

På grund av de stora elektromagnetiska fälten som skapades vid drift av teslaspolen uppkom det problem med flera olika komponenter i styrkretsen. Vid flera tillfällen stördes PLL, Arduino och dator av fälten vilket ledde till att teslaspolen fick stängas av. Anledningen till att Arduino och PLL stördes var för att de var positionerade under teslaspolen inneslutna i en metalllåda, i hopp om att lådan skulle bidra med tillräckligt skydd. Det visade sig dock att fälten på så kort avstånd från primärspolen var allt för starka, vilket ledde till de kraftiga störningarna.

I ett försök att lösa detta flyttades Arduinon längre bort från teslaspolen, vilket gav viss förbättring, men kunde inte helt förhindra problemen. De kvarvarande problemen uppkom troligen från att de elektromagnetiska fälten inducerade strömmar i anslutningskabeln mellan Arduino och PLL och på så sätt fortsatte att störa ut dem.

Det som slutligen ledde till en mycket förbättrad stabilitet, utan utstörningar, var att elektriskt isolera Arduino och dator från PLL och teslaspole. Detta gjordes med en optisk länk, där Arduino styrde en IR-LED som skickar signalen till en IR-mottagare hos PLLen. Efter att den optiska länken började användas skedde det inte ytterligare funktionsstörningar av styrsystemet.

5.3 Teslaspolen under drift

När teslaspolen arbetade begränsades kvalitén på resultaten av ett flertal faktorer. De mest betydelsefulla begränsningarna diskuteras med förslag på förbättringar tillsammans med resultat som tidigare mätts upp.

5.3.1 Ljuduppspelning

Utifrån de begränsningar som initialt sattes på ljuduppspelningen, se 1.3, fungerade teslaspolen som tänkt. Det kan dock vara möjligt att spela mer än en ton åt gången med en teslaspole [41], men detta kräver mer utveckling av framförallt mjukvaran. Eftersom ljudvågor kan adderas borde även fyrkantsvågorna kunna adderas för att skapa ljud med fler frekvenser samtidigt. Detta är en möjlig aspekt för utveckling av teslaspolens förmåga att spela upp ljud. Det går även att komma runt problemet genom att teslaspolen spelas in vid flera olika tillfällen när den spelar olika spår som sedan kan redigeras i ihop till en video, detta utfördes med lyckat resultat i syfte att användas till presentation.

Vid de längsta urladdningarna var ljudnivån i teslaspolens närhet obehagligt hög. Förmodligen blir det inte mer tilltalande för lyssnaren om en högre effekt används, då detta skulle resultera i en högre ljudnivå. Däremot hade den visuella upplevelsen blivit betydligt bättre.

5.3.2 Strömbegränsningar

Den längsta urladdningarna som kunde uppnås för teslaspolen begränsades främst av strömtåligheten hos H-bryggan som användes. I ett tidigt stadiet av projektet överbelastades transistorerna med för hög ström och fick bytas ut. Av den anledningen konstruerades den nya H-bryggan för att klara av högre strömmar jämfört med den som gruppen tilldelades i början av projektet. Transistorerna i den nya H-bryggan klarade av 93 A enligt produktbladet vilket begränsade inspänningen till teslaspolen. På så sätt begränsades längden av urladdningarna till 11,5 cm, vilket kan jämföras med en liknande teslaspole byggd av Steve Caton och Eric Goodchild där urladdningslängden uppskattas till ca 2 meter vid en ström på 1500 A [42].

Om projektets teslaspole ska förbättras eller om en ny teslaspole ska designas med syftet att skapa längre urladdningar krävs främst att H-bryggan klarar av större strömmar. Detta skulle till exempel kunna åstadkommas med IGBTer (Insulated Gate Bipolar Transistor), vilka är en annan typ av transistor som tål mer ström. Användandet av IGBTer skulle medföra ytterligare problem med styrningen eftersom de har längre stig- och falltid än de kiselkarbidtransistorer som användes i detta projekt [42].

5.3.3 Överhettning som begränsande faktor

Vid drift utvecklades värme i vissa delar av teslaspolen, främst i H-bryggan och kondensatorerna. Vid uppspelning av långa låtar, där låten innehöll få pauser, tillsammans med hög pulskvot eller konstant tid uppkom temperaturer på över 100 °C på transistorerna innan experimentet avbröts, se 4.8. Experimentet avbröts då temperaturen fortfarande var stigande och transistorerna närmade sig snabbt den maximalt tillåtna temperaturen på 175 °C, se [43]. För att försöka sänka temperaturen på transistorerna kopplades en större fläkt tillsammans med H-bryggan. Även kondensatorernas temperatur ökade men detta var inte något problem eftersom kondensatorerna var överdimensionerade. Den maximala spänningsderivatan de hanterade var 849 V/μs trots att det maximalt tillåtna värdet var 1,8 kV/μs och därmed nådde temperaturen aldrig överhettningnivåer.

6

Slutsats

Projektets syfte var att designa, konstruera och utvärdera en musikspelande teslapole. En teslapole har konstruerats och är av typen DRSSTC, vilken kan spela musik från .midi-filer där melodin tydligt kan urskiljas.

Teslaspolens urladdningarna uppmättes till en maximal längd på 11,5 *cm* vid en primärström på 100 *A*, vilket var strömbegränsningen för den konstruerade H-bryggan.

Den begränsande faktorn var H-bryggans strömtålighet, vilken kan förbättras genom användandet av mer strömtåliga komponenter. Ett alternativ till kiselkarbidtransistorerna som användes är IGBTer, som generellt sett är mer strömtåliga. Om projektet skall återupptas i syftet att öka urladdningarnas längd skulle en mer strömtålig H-brygga behöva byggas.

Referenser

- [1] N. Tesla, *Apparatus for transmitting electrical energy*. 1914. URL: http://www.mendeley.com/research/abparatus-transmitting-electrical-energy/?utm%7B%5C_%7Dsource=desktop%7B%5C%7Dutm%7B%5C_%7Dmedium=1.12.3%7B%5C%7Dutm%7B%5C_%7Dcampaign=open%7B%5C_%7Dcatalog%7B%5C%7DuserDocumentId=%7B%5C%7D7Bd2ee8789-3a4a-452f-87ff-f3544aff1933%7B%5C%7D7D (hämtad 2017-05-08).
- [2] M. C. Faleski, “Transient behavior of the driven rlc circuit”, *Am. J. Phys.*, vol. 74, nr 5, s. 429, 2006, ISSN: 00029505. DOI: 10.1119/1.2174032.
- [3] W. John, *Power Transformers: Principles and Applications*, 10. utg. New York: Marcel Dekker Inc, 2002, s. 1–24, ISBN: 0-8247-0766-4.
- [4] W. C. Brown, “The history of power transmission by radio waves”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 32, nr 9, s. 1230–1242, 1984, ISSN: 15579670. DOI: 10.1109/TMTT.1984.1132833.
- [5] O. James, *Prodigal Genius: The Life of Nikola Tesla*. San Diego: The book tree, 2007, s. 1–38, ISBN: 978-1-58509-308-3.
- [6] Tilbury Mitch, *The Ultimate Telsa Coil Design*, 1. utg. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [7] S. Redmond, “Singing tesla coil : building a musically modulated lightning machine”, s. 108–120, 2014. URL: http://roundtable.menloschool.org/issue19/6%7B%5C_%7DRedmond%7B%5C_%7DMS%7B%5C_%7DRoundtable19%7B%5C_%7DFal1%7B%5C_%7D2014.pdf.
- [8] S. Soleyman, “Solid state tesla coils and their uses”, Electrical Engineering och Computer Sciencs, Berkeley, California, USA, tekn. rapport, 2012, s. 1–12. URL: <http://digitalassets.lib.berkeley.edu/techreports/ucb/text/EECS-2012-265.pdf>.
- [9] Loneoceans Laboratories, *Drsttc 1: a table-top musical tesla coil, double resonant solid state (revision 2)*, 2013. URL: <http://www.loneoceans.com/labs/drsttc1/> (hämtad 2017-04-27).
- [10] T. Hammarström, *Mötesanteckningar från rådgivning om transformatorer och högspänning*, Göteborg, 2017.
- [11] G. Barrere, “Measuring transformer coupling factor, k”, tekn. rapport, s. 1–2. URL: <http://exality.com/files/Measuring%20Transformer%20Coupling%20Factor%20k.pdf> (hämtad 2017-05-08).
- [12] C. T. H. Institutionen för Energi och Miljö, “Elteknik”, i, Göteborg, 2016, s. 50–60.
- [13] L. H. Dixon, “Eddy current losses in transformer windings and circuit wiring”, diss., 1988, s. 1–10.
- [14] E. Waffenschmidt, *Qi coupling factor*, 2014. URL: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/coupling-factor.html> (hämtad 2017-03-16).
- [15] J. M. Bostock-Smith, “The jumping ring and lenz’s law—an analysis”, *Phys. Educ.*, vol. 43, nr 3, s. 265–269, 2008, ISSN: 0031-9120. DOI: 10.1088/0031-9120/43/3/002.
- [16] Electronics Tutorials, *Mutual inductance*, 2014. URL: <http://www.electronics-tutorials.ws/inductor/mutual-inductance.html> (hämtad 2017-03-16).
- [17] R. M. Craven, “A study of secondary winding designs for the two-coil tesla transformer”, diss., Doktorsavhandling från Loughborough University, England, 2014, s. 20–31. URL: <https://dspace.lboro.ac.uk/dspace-jspui/handle/2134/14375>.
- [18] H. Wheeler, “Formulas for the skin effect”, *Proc. IRE*, vol. 30, nr 9, s. 412–415, 1942, ISSN: 0096-8390. DOI: 10.1109/JRPROC.1942.232015.
- [19] E. Stauffacher, “Short-time current carrying capacity of copper wire”, *Gen. Electr. Rev.*, vol. 31, nr 6, s. 326–327, 1928.
- [20] R. A. Adams, *Calculus: A complete course*, 8th. Pearson, 2013, ISBN: 9780321781079.
- [21] Kaizer Power Electronics, *Helical coil calculator*, 2007. URL: <http://kaizerpowerelectronics.dk/calculators/helical-coil-calculator/> (hämtad 2017-03-29).
- [22] M. Krbal och P. Siuda, “Design and construction solution of laboratory tesla coil”, s. 4–7, 2015.
- [23] Electronics Tutorials, *Series resonance circuit*, 2014. URL: <http://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/series-resonance.html> (hämtad 2017-03-17).
- [24] K. D. Skeldon, A. I. Grant och S. A. Scott, “A high potential tesla coil impulse generator for lecture demonstrations and science exhibitions”, *Am. J. Phys.*, vol. 65, nr 8, s. 744–754, 1997, ISSN: 00029505. DOI: 10.1119/1.18645.

- [25] D. S. Lerner och H. A. Wheeler, "Measurement of bandwidth of microwave resonator by phase shift of signal modulation", *IRE Trans. Microw. Theory Tech.*, 1960.
- [26] G. L. Johnson, "Solid state tesla coil", Kansas state University, Kansas, USA, tekn. rapport, 2001, s. 1–13. URL: http://www.zetataalk3.com/docs/Electronic/Circuits/Solid%7B%5C_%7DState%7B%5C_%7DTesla%7B%5C_%7DCoil%7B%5C_%7DBy%7B%5C_%7DJohnson%7B%5C_%7D2004.pdf.
- [27] S. Gustavson och C. C. By-sa, "Tuning your onetesla deliberate detuning", *OneTesla*, s. 1–11, 2013. URL: http://weber.itn.liu.se/%7B~%7Dstegu/onetesla/onetesla%7B%5C_%7Dtuning%7B%5C_%7Dguide%7B%5C_%7Ddraft.pdf (hämtad 2017-05-08).
- [28] H. Saad, X. Guillaud, J. Mahseredjian, S. Deneti?re och S. Nguéfeu, "Mmc capacitor voltage decoupling and balancing controls", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, nr 2, s. 704–712, 2015, ISSN: 08858977. DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2338861.
- [29] Seventh String, *Note frequencies*. URL: <https://www.seventhstring.com/resources/notefrequencies.html> (hämtad 2017-03-18).
- [30] D. Divan, "The resonant dc link converter-a new concept in static power conversion", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25, nr 2, s. 317–325, 1989, ISSN: 00939994. DOI: 10.1109/28.25548. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/25548/> (hämtad 2017-04-08).
- [31] G. Ceglia och V. Guzman, "A new simplified multilevel inverter topology for dc-ac conversion", *Power Electron. . . .*, vol. 21, nr 5, s. 1311–1319, 2006.
- [32] Arduino, *Arduino uno and genuino uno*. URL: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> (hämtad 2017-05-08).
- [33] D. Back, *Standard midi file format*, 1999. URL: <http://www.music.mcgill.ca/%7B~%7Dich/classes/mumt306/StandardMIDIfileformat.html> (hämtad 2017-05-09).
- [34] L. Sanford, *C# midi toolkit*, 2007. URL: <https://www.codeproject.com/Articles/6228/C-MIDI-Toolkit> (hämtad 2017-05-08).
- [35] Texas Instruments, *Xx555 timer datasheet*, 2014. URL: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/na555.pdf> (hämtad 2017-05-08).
- [36] Electronics Tutorials, *555 oscillator tutorial*. URL: http://www.electronics-tutorials.ws/waveforms/555%7B%5C_%7Doscillator.html (hämtad 2017-05-08).
- [37] ON och Semiconductor, *Mc74hc4046a phase-locked loop*, 2014. URL: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/MC74HC4046A-D.PDF> (hämtad 2017-05-08).
- [38] J. S. Rigden, *MacMillan Encyclopedia of Physics*. Macmillan Publishing Company, Incorporated, 1997, s. 353, ISBN: 9780028645872.
- [39] W. H. Preece, "On the heating effects of electric currents", *Proc. R. Soc. London*, vol. 36, s. 464–471, ISSN: 0370-1662. DOI: 10.1098/rspl.1888.0006. URL: <http://rspl.royalsocietypublishing.org/content/36/228-231/464.full.pdf> (hämtad 2017-04-08).
- [40] S. International, "Voltage measurement bt means of standard air gap", CEI IEC 60052, tekn. rapport, 2002.
- [41] Uzzors2k, *The polyphonic teslacoil*, 2009. URL: <http://uzzors2k.4hv.org/index.php?page=midiinterrupter> (hämtad 2017-05-08).
- [42] S. Caton och E. Goodchild, *Beastthe 15 kw 7' tall dr (drsstc 5)*. URL: <http://www.goodchildengineering.com/tech-design-blog/drsstc-5-10kw-monster> (hämtad 2017-05-08).
- [43] R. Semiconductor, *Sct3022al*, 2016. URL: <http://www.rohm.com/web/global/datasheet/SCT3022AL> (hämtad 2017-05-08).