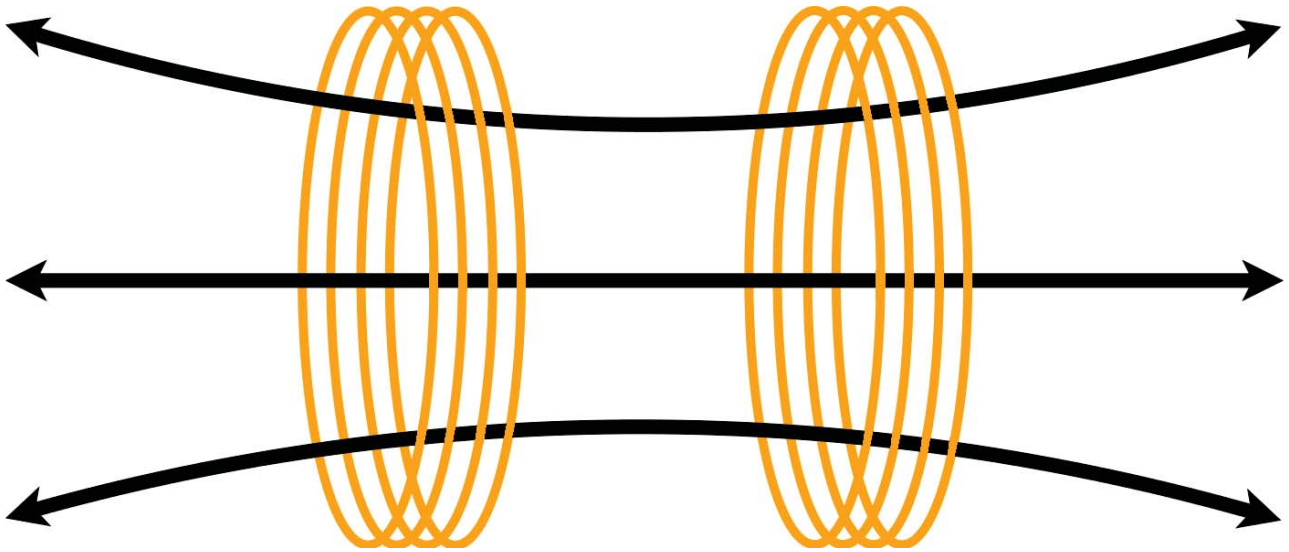




CHALMERS



Trådlös laddning med Qi-standarden

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroingenjör

Mikael Tang

Robin Wendin

Sammanfattning

En ökad användning av portabel elektronik har även ökat efterfrågan på ett nytt, mer bekvämt och effektivt sätt att ladda dess batterier på. Kablar har sedan länge varit det huvudsakliga sättet att överföra information och energi, men de tar mycket plats, trasslar ofta in sig i andra sladdar och kan vara besvärligt när enheter kräver olika typer av kablar för laddning. Genom att överföra energi trådlöst till enheter elimineras onödigt trassel, och det öppnar upp en helt ny värld av möjligheter. Problemet med trådlös energiöverföring, i jämförelse med trådad energiöverföring, är att det medför mer förluster. Därför är målet för detta projekt att göra en djupgående teoretisk undersökning på vilka faktorer som påverkar verkningsgraden, samt mätningar för att stärka den insamlade teorin. Rapporten kommer begränsa sig till att undersöka den mottagande enheten vid trådlös energiöverföring med Qi-standarden. Genom att läsa denna rapport ska läsaren kunna få en djupare inblick på hur trådlös energiöverföring fungerar, känna till metoder för att optimera dess verkningsgrad, samt få en stark teoretisk grund inför utformning av en optimal trådlös mottagarprodukt som använder Qi-standarden.

Abstract

The increasing use of portable electronics increases the demand for a new, more convenient and efficient way to recharge its batteries. Cables have been the main way to transmit information and energy for a long time, but they take a lot of space, tangles with other cables and can be inconvenient when devices require different types of cables for recharging. By transferring energy wirelessly to devices, it eliminates unnecessary clutter and it opens up a whole new world of opportunities. The problem with wireless energy transfer, compared to wired energy transfer, is that wireless energy transfer has higher energy losses during transmission. Therefore, the goal of this project is to make profound theoretical studies on the factors that affect the efficiency, as well as measurements to strengthen the collected theory. The report will limit itself to only examine the receiving device of the wireless energy transfer through the Qi-standard. By reading this report, the reader will attain knowledge about optimizing the efficiency with wireless energy transfer, and gain a strong theoretical foundation for the design of an optimal wireless receiving device using the Qi-standard.

Förord

Rapporten är skriven som en del av examensarbetet på Chalmers tekniska högskola, och undersökningen har i större omfattning gjorts på konsultföretaget Sigma Technology, som också var uppdragsgivaren. Examensarbetet omfattar 15 högskolepoäng och är en fortsatt undersökning på ett tidigare projekt som påbörjades i januari 2015.

Vi skulle vilja tacka Manne Stenberg som har varit vår handledare under arbetets gång, Göran Hult som bidragit med hjälp under mörka tider, Bertil Thomas som varit vår examinator, Alixander Ansari och David Rydén som möjliggjort detta arbete på Sigma Technology, samt Sakib Sisteck som alltid varit där i vått och torrt. Till sist vill vi tacka vänner och familj för att ha stöttat oss i alla dessa år, utan er skulle vi inte ha klarat oss!

Mikael Tang & Robin Wendin

INNEHÅLL

1. Inledning	1
1.1 Syfte	1
1.2 Mål	1
1.3 Avgränsningar	1
2. Metod	2
3. Qi-standarden	3
3.1 Induktiv koppling	3
3.2 Resonanskoppling	3
4. Teori	5
4.1 Induktor	5
4.1.1 Icke-ideal induktor vid olika frekvenser	5
4.2 Förlustfaktorer	7
4.2.1 Virvelströmmar	7
4.2.2 Skinneffekten	8
4.2.3 Närhetseffekten	9
4.2.4 Hysteres	10
4.3 Metoder för minimering av energiförluster	12
4.3.1 Kopplingsfaktor	12
4.3.2 Q-faktor	13
4.3.3 Litztråd	14
4.4 Kommunikation	14
4.4.1 Backscatter modulation	15
4.4.2 Kodningsschema	16
.....	17
4.4.3 Paketerna	17
4.4.4 Pakettyper	18
4.4.5 Faserna	19
5. Kombinerad av trådlösa energiöverföringsstandarder	21
6. Hälsa- och miljöaspekter	22
6.1 Hälsaaspekter	22
6.2 Miljöaspekter	23
7. Egna mätningar	25
7.1 Mätningar med BQ500212AEVM-550 och BQ51013BEVM-764	25
7.1.1 Strömmätning under typisk drift	26
7.1.2 Verkningsgrad	26
7.1.3 Observering av strömmens beteende under hel laddningscykel	26

7.2 Mätningar med LCR-meter	26
7.2.1 Q-värdesmätning på spolar	26
7.2.2 AC-resistansmätning.....	26
7.3 Mätning av verkningsgrad på spolar.....	26
8. Resultat.....	28
8.1 Mätningar med BQ500212AEVM-550 och BQ51013BEVM-764	28
8.1.1 Resultat från observering av strömmens beteende under hel laddningscykel	29
8.2 Resultat från mätningar med LCR-meter.....	30
8.3 Mätning av verkningsgrad på spolar.....	31
9. Framtidsutsikter	33
10. Slutsats/Diskussion	34
Referenser	37
Bilagor.....	40

1. INLEDNING

I dagens moderna samhälle har nästan alla en mobiltelefon och dessa enheter laddas oftast genom en kabel. Tyvärr finns ingen gemensam standardkabel för laddning till alla mobiltelefoner, vilket medför att kabeltillverkningen är onödigt hög. Detta leder till högre kopparutvinning, vilken kan vara en potentiell miljöfara. Det är också opraktiskt att ha med sig en laddare vart man än går för att försäkra laddningsmöjligheter. Det finns flera sätt att undvika dessa problem, och ett av dessa är trådlös laddning genom induktion med Qi-standarden (uttalas "chee") som har tagits fram under senare år.

Qi-standarden är utvecklad av WPC (Wireless Power Consortium) som etablerades 2008 och är idag den största aktören inom trådlös laddning. En annan aktör som också utvecklar en standard inom trådlös laddning är Rezence.

Nackdelen med trådlös laddning, jämfört med trådad laddning, är att det sker större förluster. De faktorer som påverkar förlusterna kommer därför att undersökas i denna rapport.

1.1 SYFTE

I takt med att omvärlden använder sig av mer teknik är det viktigt att förminska energiförlusterna. Efterfrågan på nya och mer praktiska lösningar för laddning av batterier har blivit mer aktuellt, och trådlös laddning är en av dessa. Genom att undersöka förlustfaktorerna vid trådlös laddning kan verkningsgraden optimeras, vilket medför lägre energiförbrukning och är ett steg mot en hållbar framtid.

1.2 MÅL

Huvudmålen med detta arbete är uppdelat i två delar, en teoretisk del och en praktisk del. Det praktiska momentet består av att kunna ladda en godtycklig enhet genom en microUSB-kabel som är kopplad till en mottagarenhet för induktiv laddning. Den teoretiska delen består av att identifiera de faktorer som påverkar verkningsgraden vid induktiv energiöverföring samt optimera verkningsgraden. Dessutom skall kommunikationen mellan sändar- och mottagarenhet enligt Qi-standarden beskrivas utförligt.

Det sekundära målet är att undersöka kombineringsmöjligheter av flera standarder.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

Fokus i denna rapport kommer endast att vara på mottagarsidan. Fåtal mätningar på sändarenheten kommer göras för att bestämma verkningsgrad, men utöver det behandlas inte sändarenheten.

2. METOD

Detta kapitel ämnar ge information om hur arbetsgången på projektet kommer att se ut. Projektet bygger på en förstudie som gjordes i början av 2015 i en projektkurs. Studien gjordes av skribenterna i denna rapport samt två kollegor, och behandlade samma ämne. Det som skiljer projekten är målen.

Information angående kommunikationen mellan mottagar- och sändarenhet kommer att insamlas för att utförligt kunna beskrivas. De faktorer som påverkar verkningsgraden kommer även att undersökas och beskrivas teoretiskt, varefter tester och mätningar kommer att utföras för att stärka och bekräfta dessa.

Parallellt med arbetet kommer även en rapport att skrivas. Nedan visas ett Gantt-schema som är den preliminära arbetsplanen för projektet.

Tabell 1. Visar projektets preliminära arbetsplan.

Back log	Aktivitetsnamn	v.13	v.14	v.15	v.16	v.17	v.18	v.19	v.20	v.21	v.22	v.23	v.24	v.25
1	Skriva projektplanering	■												
2	Samla information	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
3	Beställa material		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
4	Utföra mätningar		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
5	Halvtidsredovisning					■	■	■	■	■	■	■	■	
6	Felsökning				■	■	■	■	■	■	■	■	■	
7	Rapportskrivning			■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
8	Presentationsförberedelser												■	■
9	Slutpresentation													■

I projektet används en utvecklingsmodell från Würth Electronics som består av en sändar- och mottagarenhet kompatibel med Qi-standarden. Sändarenheten som används i projektet är BQ500212AEVM-550, och mottagarenheten som används är BQ51013BEVM-764. Olika typer av tester kommer att utföras på dessa enheter, bland annat undersökning av hur verkningsgraden påverkas av olika laster med mera.

De laster som kommer att användas i mätningarna är följande:

- Sony Xperia Tipo
- Samsung Galaxy S3
- Samsung Galaxy S4
- LG G3

Utrustningen som kommer att användas i projektet är:

- Hewlett Packard 34401A Multimeter
- GW GPC-3030 Spänningsaggregat
- Tektronix TDS 1001B Digital storage oscilloskope
- Hewlett Packard 33120A 15 MHz Function/Arbitrary Waveform Generator

3. QI-STANDARDEN

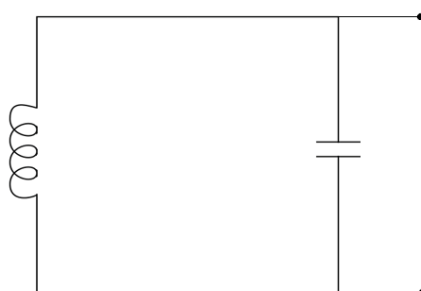
Qi använder sig av frekvenser i intervallet 110 - 205 kHz, och ska kunna leverera upp till 5 W till en last på mottagarsidan. Energiöverföringen sker antingen genom induktion eller resonans. Induktiv laddning kräver att mottagarenheten och sändarenheten har en relativt bra kopplingsfaktor (se kapitlet 4.3.1 Kopplingsfaktor) och kan klara av energiöverföring på ett avstånd upp till 30 mm med WPC's v1.1 specifikationer [1]. Med resonans möjliggör det energiöverföring över större avstånd (upp till 45 mm), men nackdelen är att det medför större förluster i form av EMF-läckage (Electromotive force). För att tillåta användning av resonans krävs att mottagarkretsen dimensioneras så att den har en resonansfrekvens på 100 kHz och 1 MHz, samt att Q-faktorn skall vara över 77 [2].

3.1 INDUKTIV KOPPLING

Genom att ha två spolar tätt intill varandra och låta en tidsvarierande ström flyta i ena spolen, induceras det en spänning i den sekundära spolen. Detta gör att spolarna blir induktivt kopplade med varandra. Genom att använda sig av induktivt kopplade spolar kommer verkningsgraden att vara högre än vid resonanskoppling, förutsatt att avståndet är kort.

3.2 RESONANSKOPPLING

Ifall två spolar har en låg kopplingsfaktor (se kapitel 4.3.1 Kopplingsfaktor) kan kraftöverföringen förbättras väldigt mycket med hjälp av en resonanskoppling. Det finns 2 olika typer av resonanskretsar, en som ger maximpedans och en som ger minimipedans vid respektives resonansfrekvens. Kretsen som ger maximpedans vid resonansfrekvensen är en parallellkoppling mellan en kondensator och en spole. Den andra typen av resonanskoppling är en kondensator i serie med en spole. Dessa två resonanskopplingar används båda vid trådlös energiöverföring med Qi. För att förstå resonansfenomet som sker vid trådlös energiöverföring tas här en parallellkoppling som exempel, se figur 1 [3].



FIGUR 1. VISAR ETT EXEMPEL PÅ HUR EN PARALLELLRESONANSKRETS KAN SE UT.

Vid en parallellresonanskoppling som består av en kondensator och en induktor kan kopplingen börja *oscillera*, eller *ringa*. Detta kan ske när kretsen matas med en tidsvarierande

ström i kretsens resonansfrekvens. Kretsens resonansfrekvens kan beräknas med följande formel:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Där L är induktansen i Henry, C är kapacitansen i Farad och f_r kretsens resonansfrekvens i Hertz.

När kretsen matas med resonansfrekvensen kommer de motsvarande reaktanserna, som bildas av kondensatorn och induktorn, att ta ut varandra. Detta är på grund av att induktorns och kondensatorns reaktanser är varandras motsatser. Kretsens impedans blir då rent reell. Detta innebär också att admittansen (motsatsen till impedansen) blir reell. Vid resonansfrekvensen når alltså kretsen ett impedansmaximum, samtidigt som den får ett admittansminimum.

Eftersom parallellkopplingen har en väldigt hög impedans och en väldigt liten admittans vid dess resonansfrekvens, kan strömmen som kommer från generatoren vara avsevärt mycket mindre än den ström som flyter runt i parallellkopplingen [4]. Den energi som då finns i parallellkopplingen kommer turas om att lagras i magnetfältet och det elektriska fältet som bildas av induktorn respektive kondensatorn. Om kretsen var ideal skulle denna växling aldrig att dö ut. Dock finns inga perfekta komponenter, och förluster kommer alltid att ske i samband med detta. Lagringen av energin som växlas mellan kondensatorn och induktorn kommer så småningom att dö ut på grund av lindningsresistansen i spolen och läckresistansen i kondensatorn. För att bibehålla kretsen i oscillation krävs det därför strömstötter som tillförs i takt med svängningen. Detta kan jämföras med en vanlig gunga, där gungningen fortsätter om den knuffas i takt med svängningen [5].

Placeras en spole i ett oscillerande magnetfält som bildas av spolen i en sändarkrets, kan den mottagande spolen plocka upp energin från fältet, även ifall avståndet är stort. Detta är under förutsättningen att mottagarkretsen har samma resonansfrekvens som sändarkretsen. Samma fenomen går att jämföra med en gitarrsträng. När en gitarrsträng spelas kan samma sträng på en intilliggande gitarr också börja ringa. Detta är på grund av att de har samma resonansfrekvens.

Genom att använda två resonanskretsar går det alltså att överföra energi över större avstånd från ena spolen till den andra, utan att behöva tillföra så mycket energi.

4. TEORI

I detta kapitel kommer en teoretisk förklaring till olika fenomen som sker i samband med trådlös energioverföring att beskrivas. Genom att förstå varför förluster sker vid trådlös energioverföring är det möjligt att reducera dessa, och därmed optimera verkningsgraden. I detta kapitel kommer även andra teoretiska delar att beskrivas, exempelvis kommunikationen mellan sändar- och mottagarenhet.

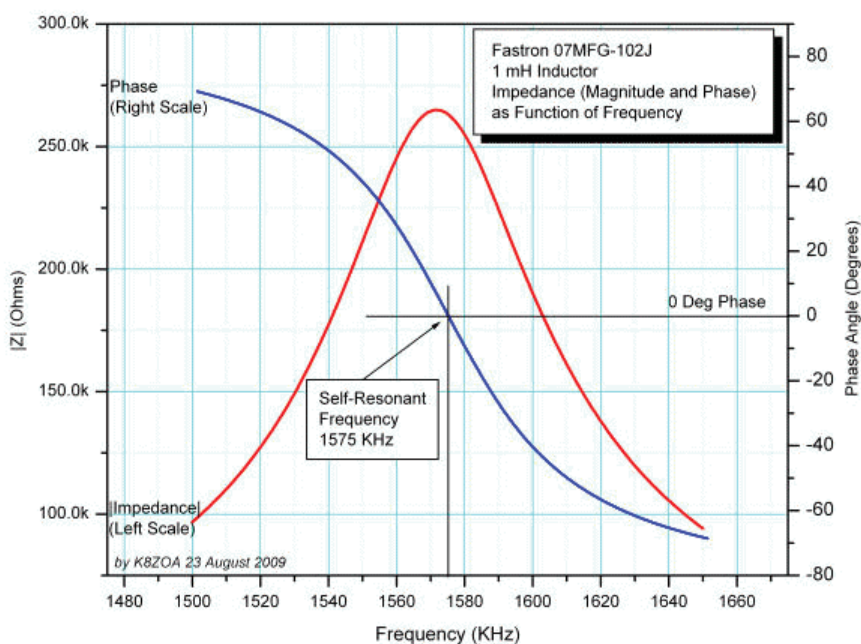
4.1 INDUKTOR

När likström flyter genom en spole så begränsas strömmen enbart av induktorns resistans. Induktorn kan alltså ses som en vanlig resistor vid likström, men vid tidsvarierande ström uppstår en annan typ av motstånd som kallas för reaktans [6]. Induktorn har med andra ord olika egenskaper beroende på den frekvens med vilken strömmen flyter. När frekvensen ändras påverkas faktorer som till exempel impedansen. Genom att förstå dessa ändringar möjliggörs optimeringar på verkningsgraden vid energioverföring. En ideal induktor visar inte de frekvensberoende egenskaperna, varpå en mer djupgående beskrivning av den icke-ideala induktorn krävs.

4.1.1 ICKE-IDEAL INDUKTOR VID OLIKA FREKVENSER

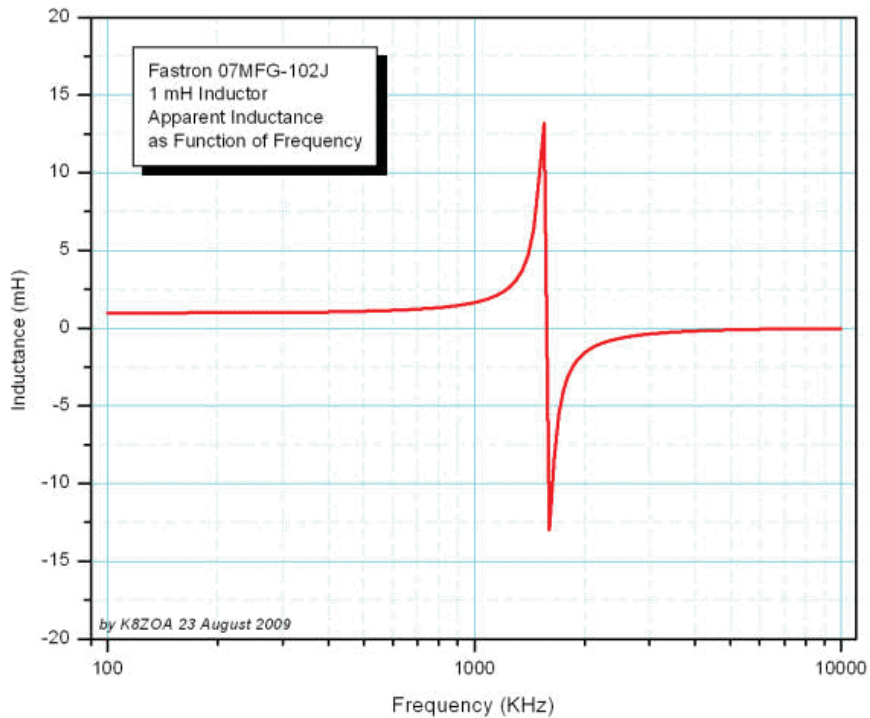
Impedansen i en induktor beskrivs med $Z = R + j\omega L$, och vid likström är den imaginära delen noll, vilket betyder att induktorn beter sig som en vanlig resistor [7].

Vid resonans kommer spänningen att fasförskjutas med -90° vilket medför att ström och spänning hamnar i fas. Detta innebär att den induktiva reaktansen tas ut av en kapacitiv reaktans, och induktorn blir rent resistiv. Det är då impedansen är som högst (se figur 2) [8].



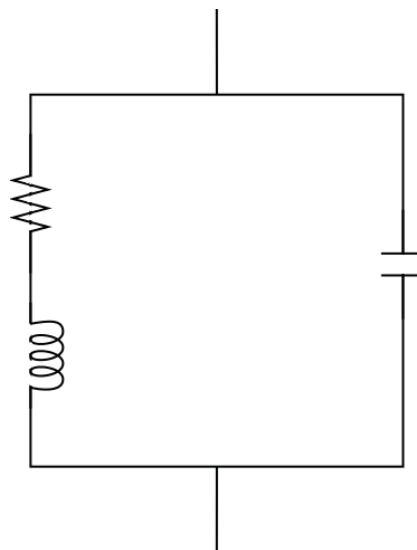
FIGUR 2. VISAR HUR IMPEDANSEN I EN INDUKTOR VARIERAR VID OLIKA FREKVENSER [8].

Vid frekvenser över induktorns resonansfrekvens kommer den att bete sig som en kondensator. Detta betyder att spänningen fasförskjuts ytterligare -90° , och detta fenomen illustreras i figur 3 [8].



FIGUR 3. VISAR HUR EN SPOLES INDUKTANS VARIERAR MED FREKVENSEN [8].

Anledningen till varför spolar beter sig som kondensatorer vid frekvenser över resonansfrekvensen kan förklaras genom att modellera (se figur 4) en riktig induktor.



FIGUR 4. VISAR HUR EN INDUKTOR KAN MODELLERAS MED EN SERIERESISTANS SOM MOTSVARAR TRÅDRESISTANS, OCH EN PARALLELL KAPACITANS SOM MOTSVARAR EN PARASITISK KAPACITANS.

Induktorns impedans ökar med frekvensen, och kondensatorns impedans minskar med frekvensen. Detta är en fundamental vetenskap inom elektronik. Eftersom att induktorn har tätt lindad tråd kommer den även ha kapacitiva egenskaper mellan lindingarna. Vid frekvenser över resonansfrekvensen är impedansen *mellan* lindingarna lägre än impedansen i själva lindingstråden, och därför blir induktorn mer kapacitiv än induktiv. För att minska parasitkapacitanserna som bildas vid höga frekvenser skulle avståndet behöva ökas mellan varje lindingstråd.

Varför det är viktigt att känna till induktorns frekvensberoende beteende är för att flera andra standarder använder högre frekvenser, ofta i megahertz-området, och hänsyn behöver då tas till induktorns egenskaper vid given frekvens. Bland annat uppkommer större kärnförluster och ökad upplevd resistans i lindingarna medförande värmeutveckling, vilket påverkar verkningsgraden vid energiöverföring.

4.2 FÖRLUSTFAKTORER

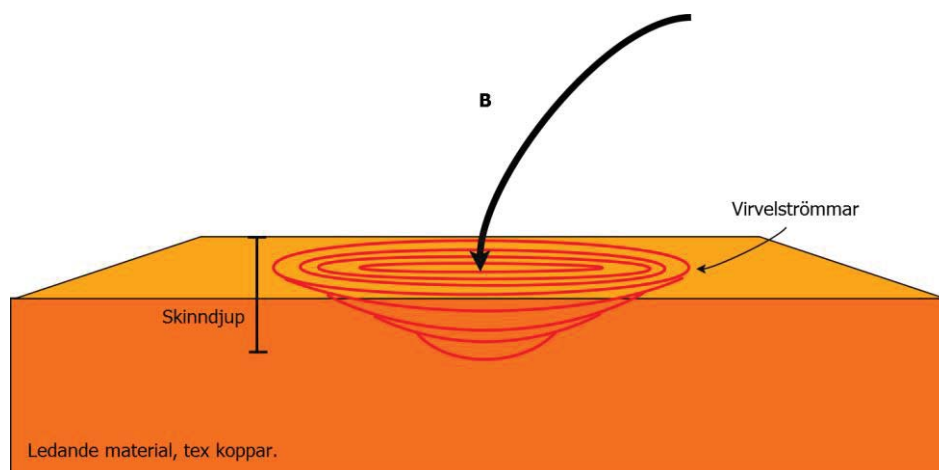
I samband med trådlös energiöverföring med induktion och resonans finns ett antal faktorer som orsakar förluster på vägen. Dessa beror i huvudsak på fysikaliska fenomen som alltid kommer att finnas, och de dominerande faktorerna beskrivs härnäst.

4.2.1 VIRVELSTRÖMMAR

Virvelströmmar är slutna strömkretsar som går som en virvel i ett ledande material, och som bildas vinkelrätt mot ett tidsvarierande magnetfält (se figur 5).

Virvelströmmens djup påverkas av frekvensen. Vid höga frekvenser är djupet, som även kallas skinndjupet, på virvelströmmen som minst, och vid lägre frekvenser är djupet som störst. Frekvensen bestämmer också styrkan på virvelströmmen. Vid hög frekvens blir virvelströmmarna som starkast.

När det magnetiska flödet som genomtränger ledaren varierar snabbare uppstår en högre spänning, vilket medför en starkare virvelström. Densiteten och därmed styrkan på virvelströmmarna avtar exponentiellt med djupet [9]. Detta syns i figur 5.



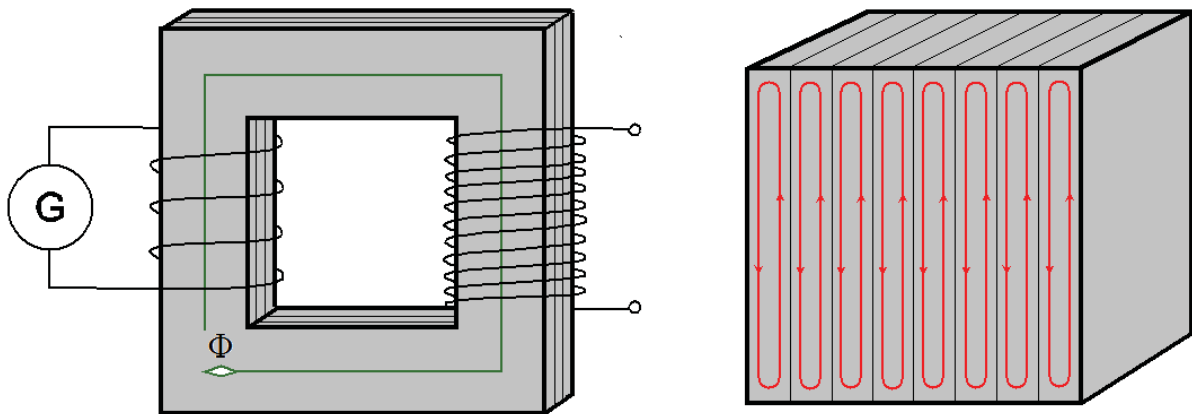
FIGUR 5. VISAR HUR ETT MAGNETFÄLT INDUCERAR VIRVELSTRÖMMAR I ETT LEDANDE MATERIAL.

Djupet på virvelströmmen definieras med hjälp av följande formel:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi * f * \mu * \sigma}}$$

där f är frekvensen, σ är konduktiviteten och μ är permeabiliteten i ledaren [10].

Virvelströmmar är oftast oönskade strömmar, och bidrar till förluster i form av värme. Ett sätt att förminska dessa förluster är att dela upp kärnan i smala lager, och skilja dessa åt med laminering. Detta ser till att virvelströmmarna inte kan bli lika stora. Figur 6 visar hur lagren kan delas upp i en kärna.



FIGUR 6. VISAR HUR VIRVELSTRÖMMAR KAN DELAS UPP TILL MINDRE STRÖMMAR I EN KÄRNA, OCH DÄRMEDE MINSKA DERAS PÅVERKAN.

Anledningen till varför kärnan delas in i flera lager är för att den är väldigt konduktiv. Genom att dela upp kärnan i flera lager delas även virvelströmmarna upp, och de begränsas av lagren. Detta minskar värmeutvecklingen, och därmed förlusterna [11].

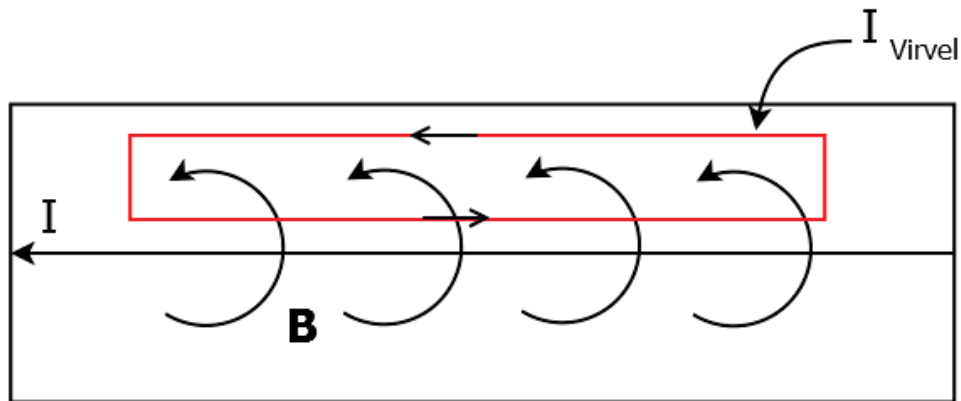
Ibland kan virvelströmmarna vara önskade, till exempel i en induktionsspis. Här används virvelströmmarna för att värma upp kastruller eller stekpannor, och genom att kontrollera dessa virvelströmmar är det möjligt att bestämma den önskade temperaturen. Genom att använda sig av metaller med hög resistivitet och som har relativt hög permeabilitet kommer virvelströmmarna som bildas på metallen att värmas upp snabbare [12]. Induktionsvärmning kan på samma sätt uppstå vid induktiv laddning ifall ett metalliskt föremål placerats på laddningsplattan. För att undvika detta har WPC utvecklat ett säkerhetsprogram (Foreign Metal Detection) som upptäcker metalliska föremål, som i detta fall terminerar kraftöverföringen.

Virvelströmmar ger även upphov till något som kallas för skinneffekten, vilket kommer att förklaras härnäst.

4.2.2 SKINNEFFEKTEN

Fenomenet skinneffekt innebär att strömmen börjar gå längs ytan på en ledare istället för vara jämt fördelad över hela den tvärsnittsarea som utgör ledaren när det är likström. Till följd av att strömmen får en mindre yta att flyta genom ökar också den upplevda resistansen i ledaren. Ju högre frekvens strömmen varierar med, desto mer påtaglig kommer skinneffekten att vara.

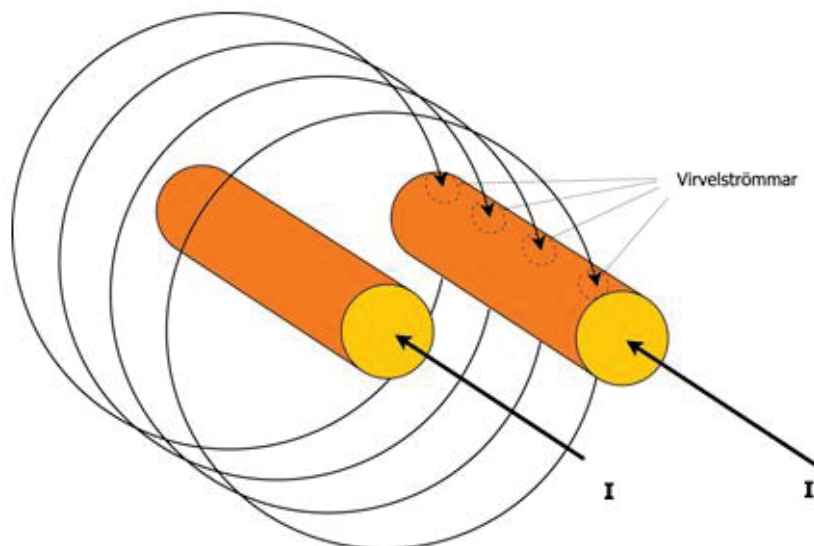
Skinneffekten uppstår på grund av de virvelströmmar som är en följd av ledarens egna magnetfält (se figur 7), och är som starkast i ledarens centrum. Eftersom virvelströmmarna påvisar störst motstånd i ledarens centrum, tvingas huvudströmmen flyta nära ytan på ledaren, därav namnet skinneffekten. Genom att studera figur 7 framgår det att virvelströmmarna förstärker huvudströmmen på ytan av ledaren samtidigt som den motverkar strömmen i centrum av ledaren [13].



FIGUR 7. VISAR HUR VIRVELSTRÖMMAR UPPSTÅR I EN LEDARE. VIRVELSTRÖMMARNA BILDAS AV MAGNETFÄLTEN, SOM I SIN TUR BILDAS AV STRÖMMEN I LEDAREN.

4.2.3 NÄRHETSEFFEKTEN

I en spole är de flesta lindningar omgivna av flertalet andra lindningar. Detta resulterar i att varje lindning genomträngs av flera varierande magnetfält från olika riktningar, vilka ger upphov till virvelströmmar på ytan i lindningarna (se figur 8).



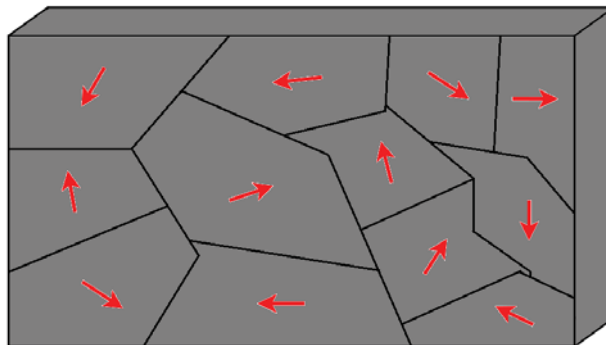
FIGUR 8. VISAR HUR VIRVELSTRÖMMAR INDUCERAS I EN LEDARE PÅ GRUND AV NÄRHETSEFFEKTEN

Dessa virvelströmmar är proportionella mot det magnetfält som inducerade dem, vilket innebär att de är starkare ju närmare den intilliggande ledaren de är. I vissa fall förstärker virvelströmmarna huvudströmmen om de går i samma riktning, men de motverkande virvelströmmarna är av större omfattning så de kommer att uppfattas som en förlust. När en virvelström går i en annan riktning än huvudströmmen kommer denna att uppleva det som ökad resistans i den delen av ledaren, och söker sig därför till delar av ledaren med lägre resistans. Det är denna omfördelning av strömmens utbredning som definierar närhetseffekten, eller på engelska "the proximity effect".

Effekten av detta fenomen är att den upplevda resistansen i de påverkade ledarna ökar i takt med frekvensen. Vid likström existerar inte fenomenet [14].

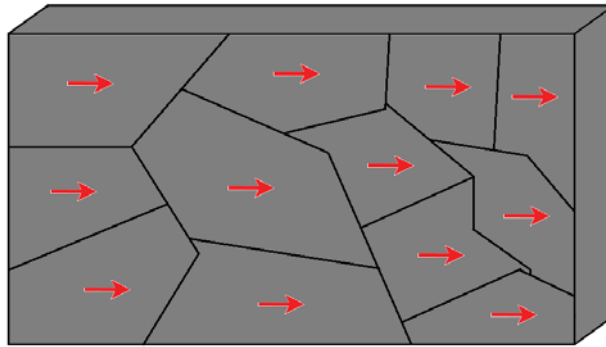
4.2.4 HYSTERES

För att bäst förklara fenomenet hysteres krävs en kort förklaring av egenskaper i magnetiska material. Dessa material består av ett stort antal magnetiska domäner omslutna av väggar och är av mikroskopisk storlek. För att ta ett ferromagnetiskt material som exempel har varje magnetisk domän en egen magnetiseringsriktning, och dessa är helt slumpartade (se figur 9). Detta innebär att de magnetiska domänernas magnetiska kraft kommer att ta ut varandra, vilket innebär att materialet som helhet inte kommer att vara magnetiskt.



FIGUR 9. VISAR DE MAGNETISKA DOMÄNERNAS MAGNETISERINGSRIKTNINGAR I ETT FERROMAGNETISKT MATERIAL.

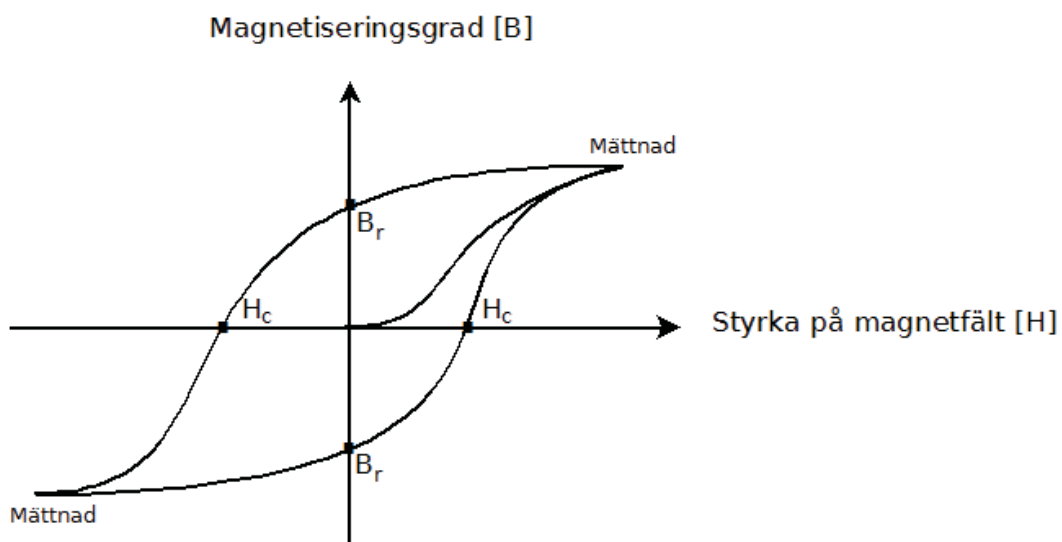
Om materialet genomträngs av ett yttre magnetiskt fält kommer de magnetiska domäner i materialet, som är riktade åt samma håll som det magnetiska fältet, att expandera. Detta resulterar i en förstärkning av det magnetiska flödet. Ifall att det yttre magnetiska fältet är tillräckligt starkt kommer alla magnetiska domäner i materialet även att riktas åt samma håll som magnetfältet. Materialet sägs då vara mättat, och kan inte ytterligare förstärka det yttre magnetiska fältet, även om det yttre magnetiska fältet skulle bli starkare (se figur 10).



FIGUR 10. VISAR DE MAGNETISKA DOMÄNERNAS MAGNETISERINGSRIKTNING I ETT MÄTTAT FERROMAGNETISKT MATERIAL.

Om magnetfältet avlägsnas kommer dock inte alla magnetiska domäner i materialet att återgå till sitt ursprungsläge. Detta innebär att materialet till en viss grad fortfarande kommer att vara magnetiskt i den riktning som det tidigare yttre magnetfältet hade. För att åter avmagnetisera materialet behöver ett magnetiskt fält av motsatt riktning appliceras av styrkan H_c (se figur 11). Ytterligare ökning i styrka av magnetfältet kommer sedan att vända materialets magnetiska domäner i samma riktning som magnetfältet, enligt samma procedur som tidigare beskrivits.

Det kvarstående magnetfält som finns kvar efter att det yttre magnetfältet tagits bort är vad som definierar fenomenet hysteres. I praktiken innebär detta att när det yttre magnetfältet byter håll, kommer det magnetiserade ferro- eller ferrimagnetiska materialets magnetfält att motarbeta det yttre magnetfältet. Detta fortsätter tills att de magnetiska domänerna åter bytt riktning. Detta motarbetande magnetfält är något som uppstår som förluster i systemet, vilket innebär att material med ett litet kvarstående magnetfält efter magnetisering är att föredra i ett induktivt energiöverföringssystem för att minimera hysteresförluster [15].



FIGUR 11. VISAR EN STANDARD HYSTERESLOOP. KURVAN FRÅN ORIGO VISAR MAGNETISERINGSGRADEN FRÅN ETT ICKE TIDIGARE MAGNETISERAT MATERIAL. H_c ÄR STYRKAN PÅ DET YTTRE MAGNETFÄLTET SOM BEHÖVS FÖR ATT MAGNETISERINGEN I MATERIALET SKALL BYTA RIKTNING, OCH B_r ÄR DET KVARSTÅENDE MAGNETFÄLTET EFTER ATT DET YTTRE FÄLTET TAGITS BORT.

4.3 METODER FÖR MINIMERING AV ENERGIFÖRLUSTER

De fysikaliska fenomen som beskrivits ovan beror på naturlagar som inte går att förändra. Dock finns metoder för att reducera förlusterna de medför och optimera verkningsgraden i energiöverföringen, vilka kommer att beskrivas härnäst.

4.3.1 KOPPLINGSFAKTOR

När en spole matas med tidsvarierande ström kommer ett magnetfält att bildas. Om detta magnetfält genomtränger en närliggande spole kommer det att induceras en spänning i denna. Hur mycket av magnetfältet som genomtränger den närliggande spolen beror på hur nära spolarna är varandra, men även hur de är placerade gentemot varandra. Om spolarna har olika dimensioner påverkas kopplingsfaktorn och därmed verkningsgraden. Ifall sändarspolens hela magnetfält genomtränger mottagarspolen kommer kopplingsfaktorn att vara $k = 1$, och när inget magnetfält genomtränger mottagarspolen så är kopplingsfaktorn $k = 0$. Kopplingsfaktorer brukar variera mellan 0,3 och 0,6, förutsatt att spolarna är relativt centrerade och är placerade nära varandra.

Det är mellan spolarna som mest energiförluster sker på grund av att magnetfält avtar exponentiellt i material med låg permeabilitet, och genom att ha en bra kopplingsfaktor kommer dessa förluster att minimeras. Ytterligare en orsak till energiförluster är magnetflöde som inte genomtränger mottagarspolen, utan strålar ut i luften.

Formeln för kopplingsfaktorn syns nedan:

$$k = \frac{L_{1,2}}{\sqrt{L_{1,1}L_{2,2}}}$$

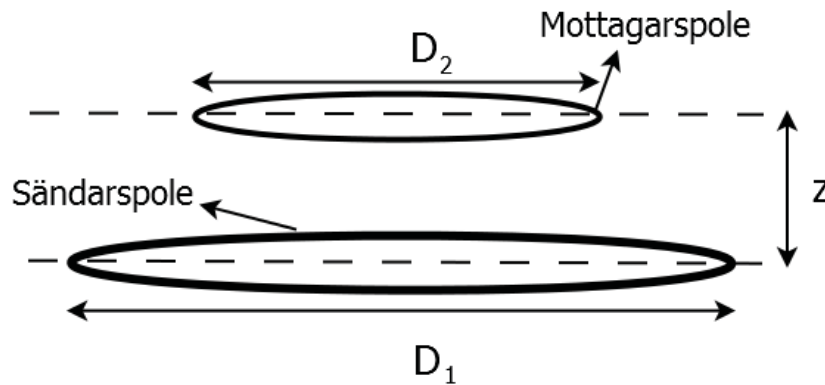
$L_{1,2}$ är kopplingsinduktanser [16] och $L_{1,1}$ och $L_{2,2}$ är självinduktanser. k är kopplingsfaktorn.

Det nämndes förut att olika dimensioner på spolarna påverkar verkningsgraden. Optimalt vore att dimensionerna var samma, men så är sällan fallet. Av designskäl tillverkas oftast tunna spolar i mottagarenheter för att inte ta mycket plats och för att hålla nere mobilens tjocklek, medan sändarspolen inte har dessa restriktioner.

En forskning som universitetet ETH Zürich [17] gjorde visade vilken form på pannkaksspolarerna som gav högst verkningsgrad vid trådlös energiöverföring. Forskningen innefattade 4 olika spolar med olika former: en cirkulär, en rektangulär, och kvadratisk och en segmenterad pannkaksspole (formad som två kvadratiska spolar som sätts ihop, efterliknande en rektangel). Pannkaksspolarerna var endast lindade ett varv med en ledare på 1 mm i diameter. Genom att linda dessa med endast ett varv kan många förlustfaktorer bortses. Resultatet från denna forskning visade att formen inte påverkade kopplingsfaktorn mycket alls. Kopplingsfaktorn för två cirkulära spolar med samma dimensioner och arean $314,2 \text{ cm}^2$ visade en kopplingsfaktor på 0,125. Kopplingsfaktorn för två likadana rektangulära pannkaksspolar med samma area som innan visade en kopplingsfaktor på 0,1. Samma faktor fick de rektangulära pannkaksspolarerna. De segmenterade pannkaksspolarerna visade dock en mycket lägre kopplingsfaktor på 0,051. Slutsatsen som kan dras från denna forskning är att

formen på sändar- och mottagarspolen inte spelar så stor roll för kopplingsfaktor, bara de har samma area. Ett undantag är då de segmenterade pannkaksspolarna.

För att få en så bra koppling som möjligt mellan spolarna har Philips research [18] gjort en forskning som visar hur diametern på pannkaksspolarna och avståndet mellan spolarna påverkar verkningsgraden. Figur 12 illustrerar sambandet mellan dimensioner, avstånd och verkningsgrad.



FIGUR 12. VISAR DIAMETERN PÅ SÄNDAR- SAMT MOTTAGARPOLE OCH ÄVEN AVSTÅNDET MELLAN DEM.

Forskningen säger följande:

Om avståndet mellan spolarna är stort ($\frac{z}{D_1} > 1$) eller om spolarnas diameter skiljer sig mycket ($\frac{D_2}{D_1} < 0,3$) så kommer verkningsgraden att minska kraftigt.

Om istället spolarna har samma dimensioner ($\frac{D_2}{D_1} = 0,5 \dots 1$) och om avståndet mellan spolarna är minimal ($\frac{z}{D_1} < 0,1$) så kan verkningsgraden på energiöverföringen mellan spolarna överstiga 90 %. Testerna gjordes med en spole med kvalitetsfaktor 100.

Anledningen till varför spolar får en bättre verkningsgrad vid närmare avstånd är för att mer magnetiskt flöde genomtränger mottagarspolen. Detta innebär att mindre magnetfält strålar ut i luften, vilket bidrar till bättre verkningsgrad. Även lika dimensioner främjar verkningsgraden.

Forskningen visar att trådlös energiöverföring via induktion inte är lönsam om det är stora avstånd mellan mottagar- och sändarspole [19].

4.3.2 Q-FAKTOR

Spolar beskrivs ofta med en dimensionslös parameter som kallas för Q-faktorn, eller kvalitetsfaktorn (Engelska: Quality factor). Eftersom spolar i verkligheten inte är ideala, betyder det att det alltid sker någon form av förlust, och förlusterna är oftast i form av värme. När ström flyter längs en ledare utvecklas oönskad värme längst ledningen. Detta är på grund av ledningens resistans, vilken ökar med frekvensen. Det utvecklas alltså mer värme ju högre frekvens strömmen har. Detta är en följd av fenomenet skinneffekten och förklaras mer i kapitel 4.2.2 Skinneffekten.

Det är relationen mellan spolens induktans, resistans och strömmens vinkelfrekvens som bestämmer Q-faktorn [20]. Se formeln nedan:

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

där ω är vinkelfrekvensen (rad/sek), L är induktansen i Henry och R resistansen i Ohm.

Eftersom att en induktor lagrar energi i ett magnetfält, och resistans bidrar till förluster så beskriver formeln ovan en relation mellan lagrad energi och resistiva förluster.

Spolarna som byggs i dagsläget strävar efter att ha en så hög Q-faktor som möjligt, men vad som kan förväntas från massproducerade spolar är en Q-faktor på cirka 100. Spolar som har en Q-faktor över 1000 är väldigt svåra att tillverka, och är Q-faktorn under 10 så är den inte så effektiv.

En hög Q-faktor är bra ifall resonans används vid trådlös energiöverföring. När energi överförs genom resonans använder sändaren sig av en specifik frekvens (mottagarkretsens resonansfrekvens), och genom att välja rätt mottagarspole med en hög Q-faktor vid denna frekvens, kommer verkningsgraden att bli högre.

En hög Q-faktor är givetvis bra vid induktiv koppling med Qi-standarden också, men en maximal Q-faktor kan inte uppnås över hela intervallet då denna når en topp vid en specifik frekvens. Ett högre maxvärde på Q-faktorn offras då för en större bandbredd, medförande en god energiöverföring över hela frekvensintervallet [21, 22].

4.3.3 LITZTRÅD

Litztråd används för att minimera förluster i samband växelström och består av flera mindre, tvinnade trådar omslutna av isoleringslack.

Vid växelström tvingas strömmen i ledaren att flyta nära ytan på ledaren på grund av skinneffekten. Genom att tvinna ihop trådarna på ett speciellt sätt tvingas strömmen istället in mot centrum av ledaren, och strömmen som flyter i kabeln blir mer jämnt fördelat. Detta minimerar förluster orsakade av skinneffekten.

Tjockleken på tråden, isoleringslacken som används och de olika sätten att tvinna trådarna på väljs beroende på ändamålet. Detta innefattar det ämnade frekvensomfånget och trådens användningsområde (spole, koaxialkabel eller kraftledning till exempel). Det finns alltså inget givet sätt att tvinna trådarna på.

4.4 KOMMUNIKATION

Litium-jonbatterier, som är den vanligaste typen av batterier för mobiltelefoner idag, är känsliga vad gäller spänningen med vilken den laddas, och om denna spänning blir för hög kan batteriet skadas.

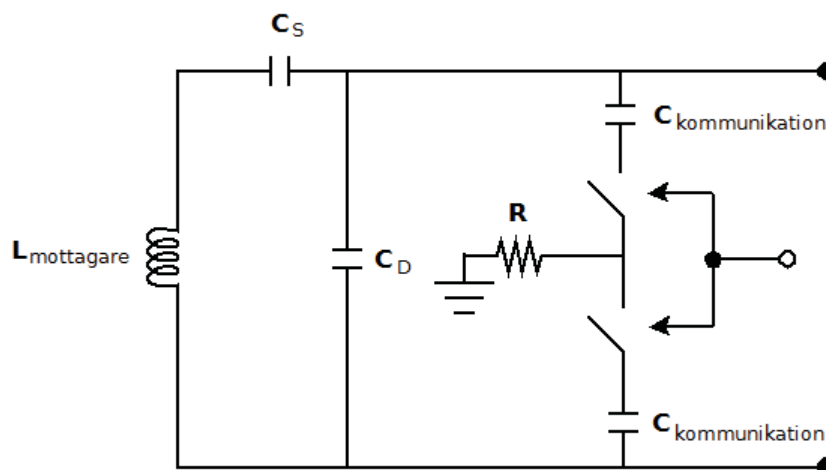
Flertalet fysiska, föränderliga faktorer avgör hur hög spänning som kommer att induceras i mottagarspolen vid induktiv energiöverföring, exempelvis dess position och avstånd relativt sändarspolen. Därför behövs en metod för att säkerställa att spänningen över mottagarenhetens last hålls stabil på 5 V. Av denna anledning låter Qi-standarden

mottagarenheten regelbundet kommunicera med sändarenheten så att den kan reglera sin utmatning för att passa mottagarenhetens önskade spänningsnivå.

4.4.1 BACKSCATTER MODULATION

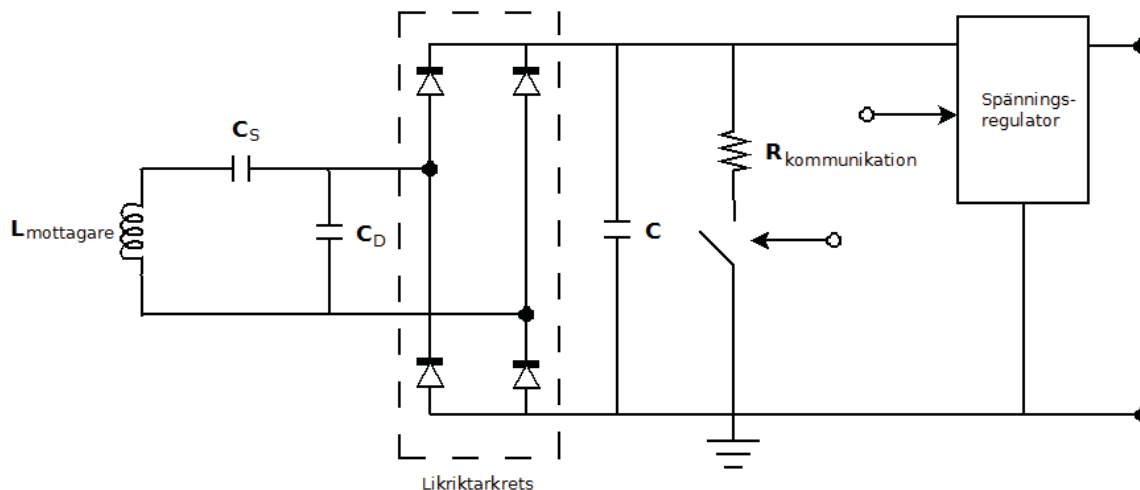
Metoden för kommunikation som används av mottagarenheten inom Qi-standarden kallas för "backscatter modulation", och är i grunden amplitudmodulering av kraftsignalen från sändarenheten. Med denna modulering skickas ett bit-meddelande i form av två olika tillstånd, nämligen HÖG och LÅG, vilka läses av på sändarenheten. Där demoduleras signalen för att kunna anpassa sin utmatning efter mottagarenhetens behov.

För att amplitudmodulera sändarenhetens kraftsignal finns två alternativ att välja från som designer av en mottagarenhet. Antingen används en kondensator i serie med en transistorswitch till jord på vardera änden av mottagarspolen (se $C_{\text{kommunikation}}$ i figur 13). Dessa kondensatorer switchas sedan in och ut i lämpligt mönster (se kapitel 4.4.2 Kodningsschema) för att beskriva det bit-meddelande som skall moduleras. Genom att switcha in kondensatorer kopplade till jord kommer kretsens impedans att förändras, vilket också påverkar sändar- och mottagarenhetens gemensamma induktans och orsakar en amplitudökning på strömmen i sändarenheten. Det är detta läge som definierar tillståndet HÖG. När kondensatorerna istället kopplas från sjunker amplituden åter till normalt läge, LÅG, och stannar där tills kondensatorerna switchas på igen.



FIGUR 13. VISAR ETT KRETSSCHEMA FÖR KAPACITIV BACKSCATTER MODULATION.

Det andra alternativet innefattar en resistor i serie med en transistorswitch kopplad till jord. Istället för att vara kopplad till en spolände är denna resistor inkopplad efter likriktarkretsen (se $R_{\text{kommunikation}}$ i figur 14), men i övrigt är principen densamma för den kapacitiva- och resistiva moduleringen.



FIGUR 14. VISAR ETT KRETSSCHEMA FÖR RESISTIV BACKSCATTER MODULATION.

För att sändarenheten skall kunna identifiera ett meddelande mäts strömmens, spänningens eller bådas amplitud konstant på kraftsignalen. För att kunna skilja på tillstånden HÖG och LÅG kräver Qi-standardens specifikationer att strömmens amplitud på sändarenheten skiljer sig minst 15 mA åt tillstånden emellan, alternativt att spänningens amplitud skiljer sig minst 200 mV åt tillstånden emellan.

4.4.2 KODNINGSSCHEMA

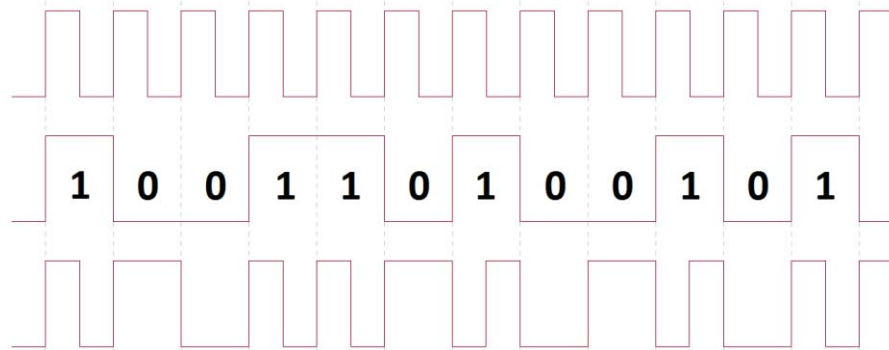
Enligt Qi-standardens skall mottagarenheten använda sig av en så kallad "differential bi-phase encoding scheme" för att modulera de bitar som utgör det meddelande mottagarenheten skickar till sändarenheten. Detta karaktäriseras av att de logiska värden som överförs, nämligen ettor och nollor, representeras av skiften mellan tillstånden HÖG och LÅG snarare än specifika värden på spänningen. Detta är nödvändigt eftersom spänningen skiljer sig åt olika mycket tillstånden emellan beroende på förhållandena i den fysiska kanal med vilken den induktiva energiöverföringen sker, till exempel sändar- och mottagarpolens gemensamma induktans och deras position relativt varandra.

För att skicka bit-meddelandet används en klockpuls inom mottagarenheten med en frekvens på 2 kHz där varje period beskriver en bit ur meddelandet. Högsta tillåtna avvikelse på denna frekvens är 4 %. En logisk etta kommer att realiseras genom att först skifta tillstånd på klockpulsens stigande flank, som utgör starten för en period, och ännu ett skifte på fallande flank i mitten av perioden (se figur 15 och 16). En logisk nolla realiseras av endast ett tillståndsskifte på stigande flank vid periodens början. Vilket tillstånd som mottagarenheten är i vid periodens början är irrelevant.

Klockpuls

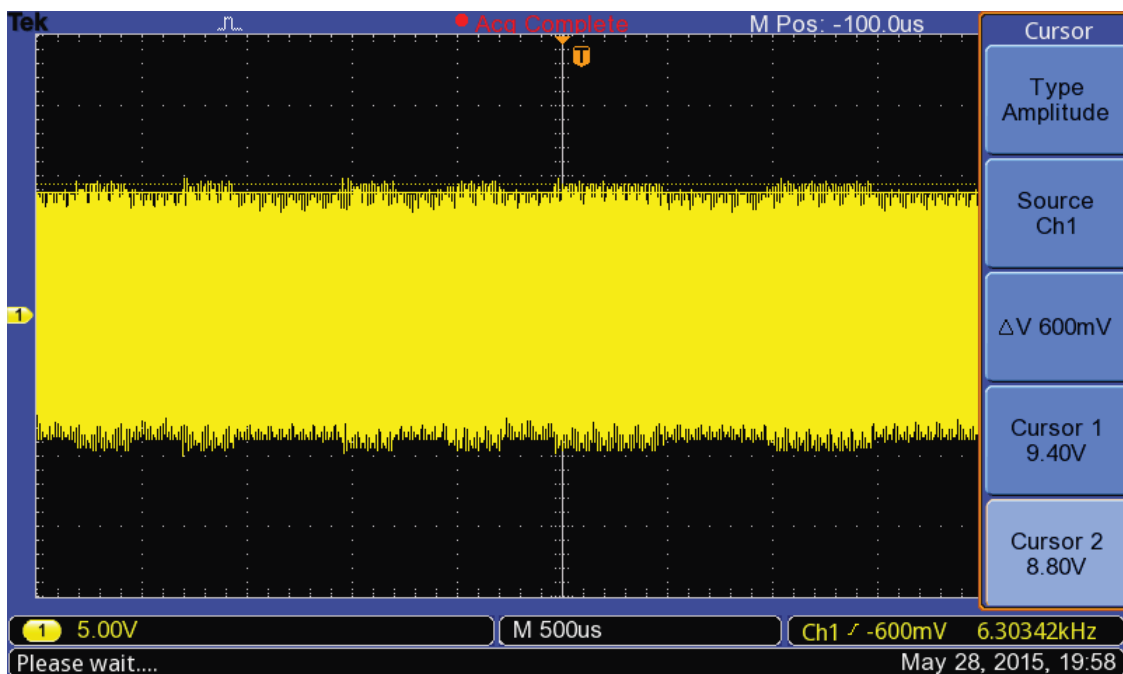
Data

Kodad (BMC)



FIGUR 15. VISAR HUR MODULATIONEN AV DATA SER UT I TAKT MED KLOCKAN.

Överföringen sker seriellt i sekvenser om 11-bitar som består av en startbit (nolla), åtta bitar meddelande med LSB först, en udda paritetsbit och en stoppbit (etta) i den ordningen.



FIGUR 16. VISAR HUR DEN MODULERADE KRAFTSIGNALEN SER UT PÅ SÄNDARENHETEN OCH AMPLITUDEN PÅ TILLSTÅNDET HÖG I RELATION TILL LÅG, MÄTT MED OSCILLOSKOP.

4.4.3 PAKETEN

För att säkerställa att överföringen blir korrekt samt att sändarenheten skall veta vilken typ av paket som skickas från mottagarenheten, skickas inte endast meddelandet, utan som en del av ett större paket. Detta kan liknas vid de kommunikationsprotokoll som används över Internet, till exempel TCP. Paketet som skickas med Qi-standarden består av fyra delar, nämligen:

- **Synkronisering** – Detta är en sekvens av 11-25 ettor, beroende på designerns preferenser, som tillåter sändarenheten att utvinna mottagarenhetens klocka i synkroniseringssyfte.
- **Header** – Består av åtta bitar och beskriver vilken typ av paket som skickas samt meddelandets längd i byte.

- **Meddelande** – Storleken anges av headern, och dess innehåll beror fullständigt på vilken typ av paket det är. Se kapitel 4.4.4 Pakettyper för mer ingående beskrivning av de olika pakettyperna.
- **Kontrollsumma** – Består av 8 bitar och används för att kontrollera ifall det skett något överföringsfel. Beräknas genom att göra en XOR-operation på header-byten och varje enskild meddelande-byte.

För att ett paket skall anses som korrekt mottaget av sändarenheten måste den beräknade kontrollsumman stämma överens med den i paketet mottagna kontrollsumman, det får ej finnas några paritetsfel och åtminstone fyra ettor följt av headerns startbit skall ha hittats i paketets synkroniseringsdel.

4.4.4 PAKETTYPER

Beroende på vad som behöver åstadkommas finns det ett flertal olika pakettyper som mottagarenheten kan välja att skicka till sändarenheten. De olika pakettyperna är:

- **Signalstyrka** – Detta paket beskriver hur god den induktiva kopplingsfaktorn är mellan sändar- och mottagarspole. Meddelandet består av ett åtta-bitars positivt heltal och beräknas med hjälp av formeln:

$$\text{Signalstyrka} = \frac{U}{U_{\max}} * 256$$

där U är ett godtyckligt uppmätt värde på spänningen i mottagarenheten, exempelvis den likriktade spänningen, och U_{\max} är den maximala förväntade spänningen som kan induceras av sändarenhetens ping. Nämnvärt är att värdet 255 är det högsta som kan skickas även om $U = U_{\max}$.

- **Avsluta kraftöverföring** – Detta paket begär avslutad kraftöverföring. Att det är en begäran om avslutad kraftöverföring anges redan i header-elementet, och meddelandets innehåll är ett åtta-bitars värde som antyder anledningen till begäran. Några exempel på sådana anledningar är att batteriet är färdigladdat, att batteriet havererat, att temperaturen, spänningen eller strömmen i mottagarenheten överstigit en av designern av mottagarenheten förutbestämd gräns.
- **Reglerfel** – Detta paket begär en förändring hos strömstyrkan i sändarenheten. Meddelandet som skickas är ett åtta-bitars heltal mellan -128 till +127 där negativa tal innebär en önskad minskning av strömstyrkan, 0 innebär att ingen korrigerings behövs och positiva tal innebär en önskad ökning av strömstyrkan. Ju närmare de yttre gränserna talet är desto större förändring av strömstyrkan begärs. Vad som bestämmer vilket tal som skall skickas, men även vad som skall användas som referenspunkt för bestämning av talet, är helt upp till designern av mottagarenheten. Detta förutsätter dock att designern håller sig inom ramarna för vad som beskrivits ovan. Referenspunkten kan exempelvis vara uppmätt likriktad spänning, ström eller temperatur i mottagarenheten. Vid användning av uppmätt likriktad spänning som referens kan en exempelformel för bestämning av värdet i meddelandet vara:

$$\frac{U_{\text{önskad}} - U_{\text{aktuell}}}{U_{\text{önskad}}} * 127$$

där $U_{\text{önskad}}$ är den önskade spänningen till mottagarenhetens utgång och U_{aktuell} är den aktuella spänningen på likriktarens utgång. Notera dock att om U_{aktuell} blir tillräckligt stor kommer resultatet att bli lägre än -128, och detta kommer få det binära 8-bitars tal att slå om till att bli positivt. Därför bör alla resultat lägre än -128 sättas till exakt -128.

- **Mottagen effekt** – Detta paket beskriver den genomsnittliga effekt som mottages på mottagarenheten. Denna information är nödvändig för sändarenheten för att kunna avgöra ifall någon främmande metall hamnat mellan sändar- och mottagarenhet under drift (Foreign Metal Detection), till exempel mynt eller nycklar. Meddelandet är ett positivt heltal.
- **Laddningsstatus** – Detta paket innehåller en 8-bitars statusuppdatering angående laddningsnivån på batteriet, som utgör lasten till mottagarenheten, i procent där 0 % betyder att batteriet är urladdat och 100 % betyder att batteriet är fulladdat. Om lasten inte är ett batteri skickas värdet 255 (b1111111). Värdena 101-254 är reserverade och får således ej användas i detta meddelande. Endast positiva heltal används.
- **Effektstyrningsfördröjning** – Även detta paket innehåller ett meddelande som utgörs av ett 8-bitars positivt heltal. Värdet av detta tal berättar hur länge i millisekunder som sändarenheten skall vänta med att förändra den utgående strömmen efter ett mottaget paket för reglerfel.
- **Konfiguration** – Detta paket är ett fem byte långt meddelande som innehåller en mängd konfigurationsinställningar, bland annat en maxgräns för den effekt som ligger på likriktarens utgång i mottagarenheten.
- **Identifikation** – I detta paket finns information angående vilken version av Qi-standard som mottagarenheten stödjer, en tillverkarkod samt en identifieringskod som skall vara någorlunda unik och vara minst 20 bitar lång. Denna kod får slumpas men får ej förändras under en och samma laddningssession.
- **Förlängd identifikation** – Detta paket används då identifieringskoden i ett identifikationspaket överstiger fyra byte. Resterande del av identifieringskoden skickas då genom detta paket, upp till åtta byte.

4.4.5 FASERNA

Så länge mottagarenheten får tillräckligt med ström för att vara i drift kommer den att anse sig vara i en av fyra faser. Det är dessa som avgör vilka eller vilket paket den skall skicka till sändarenheten näst. De fyra olika faserna är:

- **Urvalsfasen** – Detta är den första fas som mottagarenheten hamnar i efter att sändarenheten skickat en effektsignal. Ifall den inducerade spänningen är godtyckligt hög efter att den likriktats kommer mottagarenheten att gå vidare in i pingfasen. I annat fall gör den ingenting, vilket kommer att få sändarenheten att stänga av sin effektöverföring på grund av brist på svar från mottagarenheten efter en given tid.
- **Pingfasen** – Ifall mottagarenheten just gått in i pingfasen kommer den, om förutsättningarna och kriterierna för effektöverföring enligt Qi-standard är uppfyllda, att skicka ett signalstyrka-paket och därefter gå vidare till identifikation- och konfigurationsfasen. Om mottagarenheten istället har anledning att neka kraftöverföring, till exempel om batteriet är fulladdat eller om batteriet havererat, kommer ett "avsluta kraftöverförings-paket" att skickas.

- **Identifikation- och konfigurationsfasen** – Det första mottagaren gör efter att ha gått in i denna fas är att skicka ett identifikationspaket och eventuella förlängda identifikationspaket. Därefter skickas upp till sju valfria paket som antingen är ett "effektstyrningsfördröjningspaket" eller ett av de för WPC proprietära paketen. Till sist skickas ett konfigurationspaket följt av att mottagarenheten går in i effektöverföringsfasen.
- **Effektöverföringsfasen** – I denna fas styr mottagarenheten utmatningen från sändarenheten genom att skicka paket för reglerfel, mottagen effekt, laddningsstatus, avsluta kraftöverföring eller ett för WPC proprietärt paket.

Det finns ingen förutbestämd ordning som paketen måste skickas i, men det finns ramar angivna för hur lång tid det får gå från att ett paket skickas tills dess att ett paket av samma typ skickas igen, men även hur lång tid det måste gå mellan varje paket. Se specifikationerna [2] för mer information.

5. KOMBINERING AV TRÅDLÖSA ENERGIÖVERFÖRINGSSTANDARDE

För att anpassa en mottagarenhet till flera standarder inom trådlös energiöverföring måste hänsyn tas till flertalet faktorer. Ifall enheten placeras på en sändarenhet måste den kunna detektera vilken standard som sändarenheten använder sig av. Detta är viktigt bland annat för att de olika standarderna använder olika tekniker och protokoll för kommunikation. Exempelvis använder sig Qi-standarden, som nämnt under kapitel 4.4 Kommunikation, av backscatter modulation för att låta mottagarenheten kommunicera ensidigt till sändarenheten. Rezence, som är en annan standard för trådlös energiöverföring, använder sig av BLE (Bluetooth Low Energy) för kommunikation mellan sändar- och mottagarenhet. Detta är separat radiolänk för att tillåta kommunikation, och för att kunna initiera en laddningssession måste mottagarenheten därför välja rätt teknik och protokoll att kommunicera med. Dessutom måste mottagarenheten besitta hårdvara som tillåter kommunikation med de olika standarderna.

Om kombinerad skall kunna ske av Qi-standarden och Rezence måste även deras olika arbetsfrekvenser beaktas. Qi-standarden använder sig, som nämnt under kapitel 4.4 Kommunikation, av ett frekvensomfång mellan 110 – 205 kHz medan Rezence använder sig av en fast frekvens på $6,78 \text{ MHz} \pm 15 \text{ kHz}$. Då Rezence använder sig av resonans krävs även impedansmatchning mellan sändar- och mottagarenhet för hög verkningsgrad. Mottagarkretsen kommer då ha en hög Q-faktor vid $6,78 \text{ MHz}$, vilket sannolikt kommer orsaka en låg Q-faktor i Qi-standarden frekvensomfång. Qi-standarden använder sig dessutom av två stycken resonansfrekvenser vid 100 respektive 1000 kHz. För att kunna uppfylla båda standardernas specifikationer måste det då finnas en funktion för automatisk impedansanpassning beroende på vilken standard som detekterats av mottagarenheten.

Att de två standarderna använder olika arbetsfrekvenser kan dock fördelaktigen användas för att identifiera vilken standard sändarenheten använder sig av redan vid den första kraftsignal som skickas ut för att låta mottagarenheten identifiera sig. Om mottagarenheten exempelvis mäter frekvensen på den inducerade strömmen till $6,78 \text{ MHz} \pm 15 \text{ kHz}$ kan den veta att sändarenheten är av standarden Rezence. På samma sätt går det att identifiera Qi-standarden ifall frekvensen på den inducerade strömmen är inom dess frekvensomfång. För att lösa impedansanpassningen kan exempelvis transistorer användas för att switcha in lämpliga kondensatorer i mottagarkretsen beroende på vilken standard som detekterats [23].

6. HÄLSO- OCH MILJÖASPEKTER

När nya produkter kommer till marknaden måste de uppfylla vissa krav för att kunna säljas, särskilt om den kan påverka människans hälsa. I detta kapitel kommer magnetfälts påverkan på människokroppen att behandlas, samt hur användningen av koppar påverkar miljön.

6.1 HÄLSOASPEKTER

Människan utsätts för elektromagnetiska fält överallt där det flyter ström, och ju starkare ström som flyter genom en ledning eller som används i en apparat, desto starkare blir fältet. Elektromagnetiska fält kategoriseras som en *icke-joniserande* strålning, vilket innebär att energin som vågorna bär på inte är tillräckligt hög för att jonisera atomer. Joniserande strålning bär på mycket högre energi och frekvens, och exempel på dessa är radioaktiv strålning och röntgenstrålning.

De elektromagnetiska fälten kan delas in i två olika fält; ett elektriskt fält och ett magnetiskt fält. Fälten bildas vinkelrätt mot varandra, och styrkan på dem avtar med avståndet. Det elektriska fältet mäts i V/m och påverkar människokroppen, precis som den påverkar allt annat, genom att influera laddningars fördelning på ytan. Elektriska fält ger även upphov till svaga strömmar som flyter genom kroppen och ner till marken. Magnetiska fält mäts i Tesla och anses, enligt många forskningsrapporter, ha större negativ hälsopåverkan än elektriska fält. Därför kommer endast hälsorelaterad fakta om magnetfält att beskrivas härnäst.

När människokroppen exponeras för magnetfält i låga frekvenser passerar de oftast vävnad, men vid högre frekvenser (100 kHz) kan magnetfälten absorberas och övergå till värme. Detta är samma princip som i en mikrovågsugn. Magnetfält bildar inte bara värme, utan kan även ge upphov till strömmar i kroppen. På samma sätt som magnetfält ger upphov till virvelströmmar i ledare kan virvelströmmar uppstå i vävnad, vilket kan påverka nervsignaler. Kroppsvävnad har dock i regel lägre konduktans i jämförelse med metaller, så det krävs starkare magnetfält för att åstadkomma detta. Magnetfält som överskrider 8 T kan ge nerv- och muskelretningar och orsaka extra hjärtslag, vilket påverkar hälsan negativt under längre exponering [24, 25, 26, 27].

Magnetfälten som människan utsätts för är generellt sett mycket svagare än referensvärdena som de svenska myndigheterna har angett, vilka nämns senare i detta kapitel, och utsätter därför inte människan för några hälsorisker. Kortvarig exponering av starka magnetfält har inte heller någon hälsofarlig påverkan på människokroppen. Till exempel används magnetkameror för att ta snittbilder på kroppen, och magnetkamerors styrka brukar vara 1,5 T eller 3 T [28].

Forskning kring magnetfält har fortfarande inte bevisat hur långsiktig exponering av magnetfält påverkar hälsan, dock har flera oberoende forskning visat att barn som utsatts för magnetfält utöver det normala har en större risk att utsättas för leukemi. Det finns dock inte någon vetenskaplig förklaring till varför.

Det sägs att magnetfält ger upphov till cancer, men faktum är att det kan orsakas av många faktorer vilket kan försvåra tolkning av forskningsresultat. Forskning inom detta fält har pågått i över 30 år och resultaten är långt ifrån entydiga och ibland även motstridiga, därav osäkerheten. På grund av denna osäkerhet används en försiktighetsprincip som innebär

begränsning av onödigt mycket exponering av strålning, om priset och konsekvenserna är rimliga. Detta kan betyda att inte dra högspänningsledningarna bredvid bostäder och skolor, eller att bygga en produkt som emitterar onödigt starkt magnetfält [29].

Referensvärdena för hur starka magnetfält får vara på en arbetsplats varierar från jobb till jobb och länder emellan. Sveriges referensvärden i ett kontor är till exempel 500 μT , medan referensvärdena från ett smältverk är 200 000 μT . Oftast kommer styrkan på magnetfälten aldrig upp till respektive referensvärden. I kontor uppmäts magnetfält vanligen till 0,2 μT vid 50 Hz (50 Hz är ett vanligt förekommande frekvens i kontorsmiljö), och i smältverk uppmäts ofta magnetfälten till 30 000 μT , vilka båda är långt under respektive referensvärden [26].

ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) har gjort en undersökning angående hälsorisker med magnetfält, och de har genom deras undersökning hittat en gräns på magnetfältets styrka där det inte förekommer hälsorelaterade problem [30, 31].

ICNIRPs undersökning omfattar Qi-standardens frekvensomfång (110 kHz – 205 kHz), och tillverkare av Qi-standardens produkter rekommenderas därför att hålla sig inom deras referensramar. Referensnivån för magnetfältstyrka som ICNIRP rekommenderar är 6,25 μT , och i Sverige är det även dessa referensvärden som används.

Hälsorelaterade problem med anknytning till magnetfält i Sverige ansvaras av Strålsäkerhetsmyndigheten, Arbetsmiljöverket, Boverket, Elsäkerhetsverket och Socialstyrelsen. Det är genom riktlinjer från EU som referensvärdena har bestämts [32].

Om en tillverkare vill bygga en produkt måste de se till att produkten inte överskrider de referensvärden som landets myndigheter utfärdar.

6.2 MILJÖASPEKTER

Koppar är en av de mest använda metallerna i världen, och används i elektronik på grund av dess goda konduktivitet. Spolar består till större delen av koppar, och eftersom spolar är en av de större huvudkomponenterna vid trådlös energiöverföring, skall koppars miljöpåverkan här behandlas.

Utvinningen av koppar ger potentiellt stora miljöproblem. Utveckling av gruvor ökar användningen av vatten i närliggande område, vilket i sin tur kan påverka omkringliggande miljö. Om gruvan utvecklas ovanför jord kommer stor del av skogen att avverkas vilket påverkar områdets naturliv. Gruvor under jord kan påverka grundvattenflödet som i sin tur kan leda till översvämningar eller uttorkning. Oavsett om gruvan är över eller under jord kan naturen omkring gruvan påverkas negativt.

Att behandla koppar bidrar också till miljöproblem, och vid behandlingen släpps bland annat svaveldioxid, kvävedioxider, damm och koppar ut i atmosfären, vilket sedan hamnar i naturen efter regn. Under exploateringen (delning av malmen till mindre, mer ekonomiska mängder) och anrikningsprocessen (ökningen av koncentrationen av mineralen) krävs väldigt mycket energi, och för att uppfylla detta behov används ofta fossila bränslen.

När koppar hamnar i marken binder det sig lätt till organiska material och mineraler, vilket gör att de inte bryts ner i jorden, utan ackumulerar i växtligheter och djur. Som följd av detta

kan djur bli kopparförgiftade, vilket kan leda till bland annat leversvikt och även döden. Eftersom koppar inte kan brytas ner i jorden påverkas mikroorganismer och maskars nerbrytningsförmåga, vilket i sin tur saktar ner nedbrytning av organiska material. Detta är ett stort problem för bönder som har sina odlingar nära kopparproduktioner, då kopparberikad och näringsbristande mark gör det svårt för växter att överleva. Detta har bidragit till bristande biodiversitet på kopparberikad mark [33].

Ifall koppar hamnar i vattendrag sprider det sig lätt, och detta är väldigt skadligt för det marina livet. Koppar kan nämligen redan i låga halter påverka gälar och andra viktiga organ i fiskar.

Tekniken för utvinning av koppar har dock utvecklats till att bli mer miljövänlig, och fabriker får mer press på sig att hålla nere de miljöfarliga utsläppen. En positiv miljöaspekt är att koppar inte förlorar kvalitet efter återvinning, men tyvärr hamnar allt för mycket koppar i soptippar och i haven [34, 35].

Forskning har gjorts på när koppar kommer ta slut, och de är långt ifrån entydiga. Vissa säger att koppar kommer att ta slut om 25 år, medan andra säger att koppar kommer räcka mycket längre än så. En anledning till varför osäkerheten är så stor är för att nya metoder för utvinning av koppar alltid utvecklas, och att bara en liten andel av jordens kopparmalm har upptäckts.

7. EGNA MÄTNINGAR

I detta kapitel kommer de mätningar som gjorts att beskrivas. Mätningarna gjordes med olika syften, dels för att bekräfta den insamlade teorin, och dels för att verifiera att utrustningen som användes fungerade som den skulle.

Utvecklingsmodellerna används för att kunna uppfylla ett av huvudmålen – att kunna ladda en godtycklig enhet genom microUSB. För att bekräfta att utvecklingsmodellerna fungerade som de skulle mättes utgångar och ingångar på sändar- och mottagarenhet, och jämfördes sedan med respektive datablad.

Mätningar på spolars parametrar och beteenden vid olika frekvenser gjordes för att verifiera teorin i denna rapport.

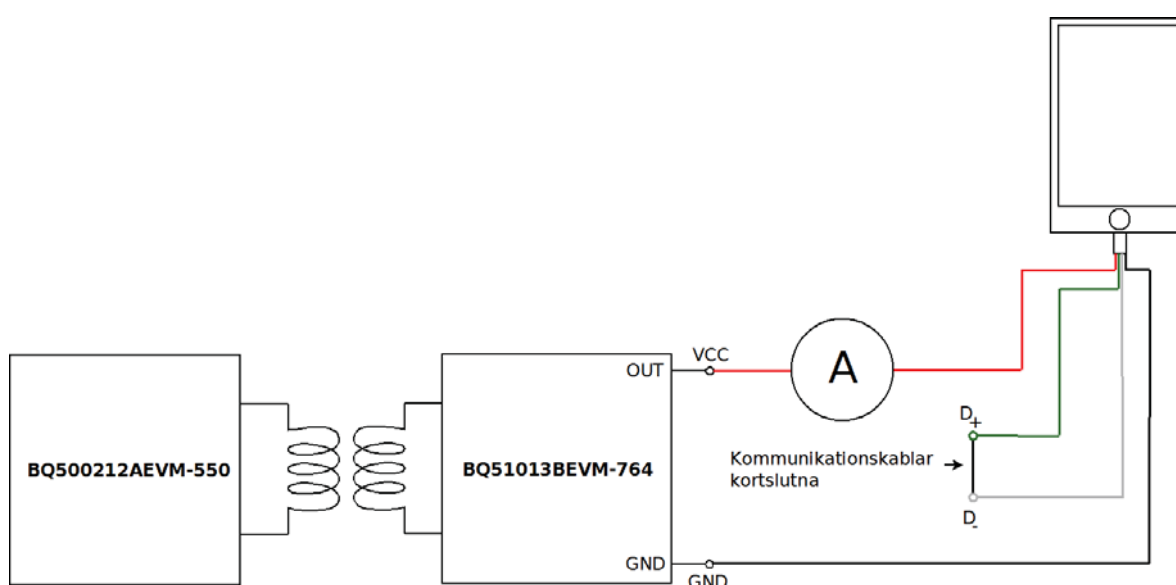
Utrustningen som användes under mätningarna listas i kapitel 2 Metod.

7.1 MÄTNINGAR MED BQ500212AEVM-550 OCH BQ51013BEVM-764

För att på bästa sätt göra mätningar, samt kunna konstruera en enkel prototyp för en mottagare som via en microUSB-kabel kan anslutas till en godtycklig enhet för laddning, användes en utvecklingsmodell baserad på Qi-standarden.

För att förbereda mätningar på denna klipptes en microUSB-kabel upp för att tillåta anslutning mellan utvecklingsmodellens mottagarenhet samt microUSB-ingången på olika mobiler. Kraftkablarna (röd = VCC och svart = GND) kopplades till mottagarenhetens utgång respektive jord, medan de två kommunikationskablarna (grön = D₊ och vit = D₋) kortslöts (se figur 17). Detta lurar mobilen att en dedikerad laddningskabel är ansluten, vilket tillåter en högre ström och därmed snabbare laddning.

Efter mätningarna klipptes en annan microUSB-kabel upp. Detta var för att se ifall kabeln påverkade strömöverföringen.



FIGUR 17. VISAR HUR MOTTAGARENHETEN ANSLUTITS TILL EN MOBIL VIA EN MODIFIERAD MICROUSB-KABEL.

7.1.1 STRÖMMÄTNING UNDER TYPISK DRIFT

Mätningar på strömmen gjordes därefter med ett antal olika mobiler som last, genom att koppla en ampere-meter i serie med en av kraftkablarna inuti en microUSB-kabel. Kabeln anslöts sedan till given mobil. I mätningen användes två olika microUSB-kablar, och utfördes när samtliga mobiler hade en batterinivå på 30 %.

7.1.2 VERKNINGSGRAD

Denna mätning gjordes som en fortsättning på föregående mätning. Samtidigt som strömmen mättes under typisk drift i mottagarenheten, mättes även den likriktade strömmen som sändarenheten drar från nätet. Detta gjordes genom att mäta spänningen över en testpinne vid namn TP19, relativt jord på pinne TP4 med en voltmeter. På testpinne TP19 är spänningens värde alltid densamma som strömmens värde, vilket tillåter enkel strömmätning. Därefter dividerades strömmens värde i lasten på mottagarenheten med den likriktade strömmens värde på sändarenheten för att bestämma systemets överföringsfaktor. Multiplicering med 100 gav då systemets verkningsgrad i procent. Notera att både sändar- och mottagarenhet arbetar med 5 V så ingen hänsyn behövde tas till spänningen vid beräkning av verkningsgraden. Mätningarna utfördes även här när samtliga batterinivåer låg på 30 %.

7.1.3 OBSERVERING AV STRÖMMENS BETEENDE UNDER HEL LADDNINGSCYKEL

Mätmetoden var här densamma som vid "strömmätning under typisk drift", det vill säga med en amperemeter i serie med en av kraftkablarna inuti microUSB-kabeln. Skillnaden var den att strömnivån följdes från det att mobilbatteriet var urladdat tills dess att det var fulladdat. Mobilen i vilken strömmen observerades var Sony Xperia Tipo.

7.2 MÄTNINGAR MED LCR-METER

För att betrakta spolars beteende vid olika frekvenser mättes tre olika spolars Q-värde samt resistans vid olika frekvenser inom Qi-standardens frekvensomfång.

7.2.1 Q-VÄRDESMÄTNING PÅ SPOLAR

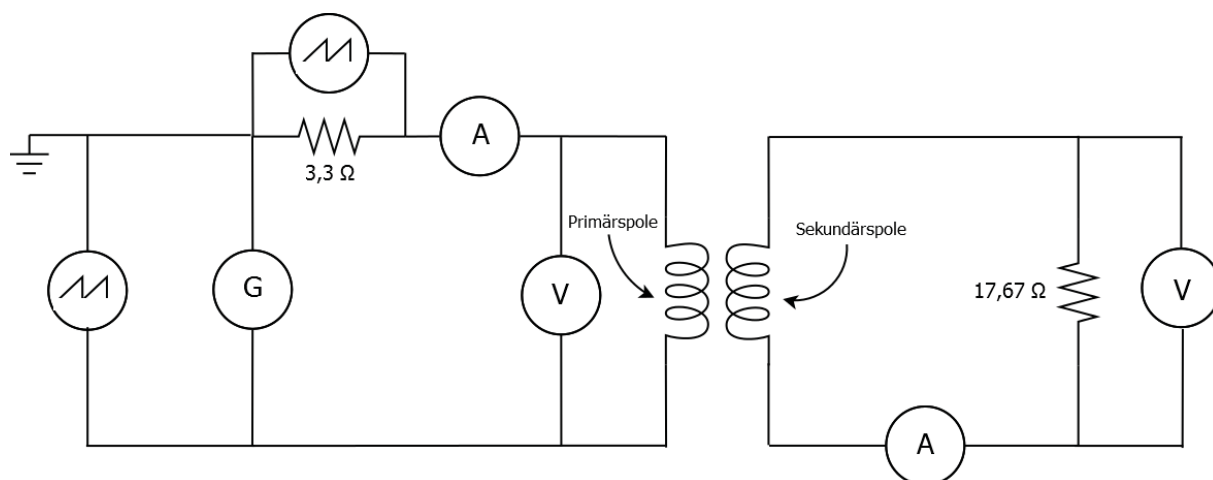
LCR-meterns mätprober kopplades direkt till de enskilda spolarnas trådändar, varvid Q-värdet lästes av med testsignaler av olika frekvenser.

7.2.2 AC-RESISTANSMÄTNING

Likt mätningen ovan kopplades här mätproberna till de enskilda spolarnas trådändar. Spolarnas resistans lästes sedan av med testsignaler av olika frekvenser.

7.3 MÄTNING AV VERKNINGSGRAD PÅ SPOLAR

För att verifiera att de resultat som Philips research gjort (se kapitel 4.3.1 Kopplingsfaktor) så kopplades en simpel sändar- och mottagarkrets upp (se figur 18).



FIGUR 18. VISAR KOPPLINGSSCHEMAT FÖR SÄNDAR- OCH MOTTAGARKRETSEN.

Två runda spolar av samma dimensioner med Q-faktor 100 vid 170 kHz (se tabell 8 under bilagor) och ett till synes obefintligt luftgap emellan användes här som sändar- respektive mottagarspole. Sändarkretsen bestod av en funktionsgenerator (Hewlett Packard-generator), som matade kretsen med 20 V_{pp}, i serie med en 17,67 Ω resistor och en av ovan nämnda spolar. Strömstyrka mättes med multimeter i serie mellan resistorn och spolen, och spänningen mättes med multimeter parallellt över spolen (se figur 18 ovan). För att kunna beräkna den aktiva effekten i primärspolen mättes även fasförskjutning mellan ström och spänning i spolen. Detta gjordes genom att med ett oscilloskop mäta spänningskurvan över resistorn respektive hela kretsen. Då ingen fasförskjutning mellan spänning och ström sker i resistorn återspeglar denna spänningskurva strömmens fas i kretsen. Jämförelse med spolens spänningskurva ger då fasförskjutningen.

På sekundärsidan sker ingen fasförskjutning då spolen i detta fall agerar som spänningsgenerator, så för att beräkna mottagen effekt mättes endast spänning och ström i samma manér som på primärsidan.

Efter mätningen testades en annan primärspole med samma dimensioner som förra, fast med ett annat Q-värde vid samma frekvens (170 kHz). Denna spole hade även en kärna.

8. RESULTAT

Under detta kapitel kommer resultaten från de olika mätningarna att framföras. Resultaten används för att bekräfta den teori som insamlats.

8.1 MÄTNINGAR MED BQ500212AEVM-550 OCH BQ51013BEVM-764

Första testet var en strömmätning på strömmen genom lasten på mottagarsidan. Fyra olika elektriska laster användes, och strömmen mättes med en multimeter (Hewlett Packard 34401A Multimeter). Batteriet på mobilerna var på 30 % när strömmen mättes, och anledningen till varför den nivån valdes var för att strömmen i en litium-jon batteri teoretiskt sett bör vara som högst på den nivån. Resultaten från mätningen visas i tabell 2.

Tabell 2. Visar strömmen som flyter till batteriet genom en icke-proprietär microUSB-kabel.

	Ström [mA]
Sony Tipo	445,600
LG G3	77,800
Samsung Galaxy S3	92,448
Samsung Galaxy S4	114,767

Resultaten skiljer sig väldigt mycket åt. När mätningen gjordes visade endast Sony Tipo och LG G3 att de laddades. Samsungtelefonerna laddade först inte, utan en kort spänningpuls behövde läggas på kommunikationskablarna för att laddningen skulle påbörja. Spänningspulsen togs ifrån 5 V kabeln i USB-kabeln. LG G3 visade att laddningen var ”långsam”, och den föreslog att ladda mobilen genom ett USB-uttag eller genom LG’s medföljande adapter. Sony Tipo visade bäst resultat av de fyra mobilerna.

Samma test gjordes igen fast med Sony Tipos medföljande microUSB-kabel. Resultatet visas nedan.

Tabell 3. Visar strömmen som flyter till batteriet genom Sonys medföljande microUSB-kabel.

	Ström [mA]
Sony Tipo	630,370
LG G3	74,012
Samsung Galaxy S3	92,401
Samsung Galaxy S4	0

Mätningarna från detta test skiljer sig lite ifrån de förra mätningarna, vilket konkluderar att microUSB-kabeln som används spelar en stor roll för strömöverföring. I dessa mätningar fick LG G3 och Samsung Galaxy S3 ungefär samma strömstyrka som förra mätningen, men jämförs Sony Tipo och Samsung Galaxy S4’s värden så är skillnaden stor. Sony Tipo fick en ökad strömstyrka med nästan 185 mA. Samsung Galaxy S4 däremot laddades inte överhuvudtaget, oavsett om en spänningpuls lades på kommunikationskablarna eller ej. Detta tyder på att microUSB-kabeln spelar stor roll för hur mycket ström som överförs.

Mätningen för verkningsgraden på utvecklingsenheterna gjordes härnäst. Mätningarna gjordes med samma microUSB-kablar och samma batterinivå (30 %) som innan. Första testet var med den icke-proprietär microUSB-kabeln.

Tabell 4. Verkningsgraden på utvecklingsenheterna genom trådlös laddning.

	Sony Tipo	LG G3	Samsung Galaxy S3	Samsung Galaxy S4
Ström Primärsida [mA]	613,840	660,310	333,490	404,680
Ström Sekundärsida[mA]	445,600	77,800	92,448	114,767
Verkningsgrad	72,592 %	11,782 %	27,721 %	28,359 %

Genom att mäta strömmen på primärsidan möjliggör det uträkning av verkningsgraden. Verkningsgraden skiljer sig från mobil till mobil, och som tabellen ovan visar så har Sony Tipo den högsta verkningsgraden på 72,59 %. Jämfört med resultaten från mätningarna mellan spolarna (se kapitel 7.3 Mätning av verkningsgrad på spolär) där verkningsgraden endast var cirka 66 %.

Resultat från Sony Tipos medföljande microUSB-kabel visas härnäst.

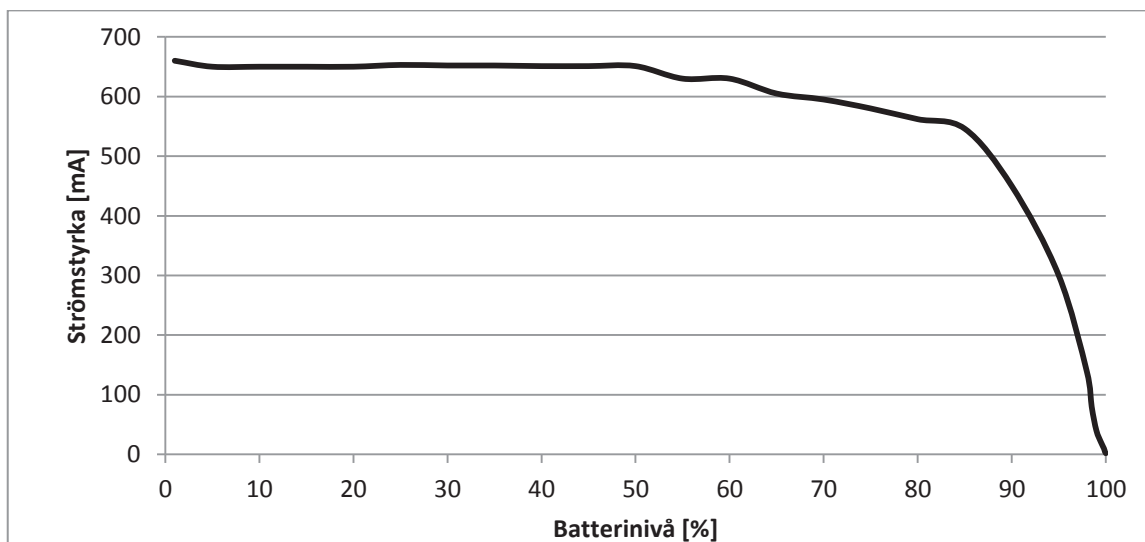
Tabell 5. Verkningsgraden på utvecklingsenheterna genom trådlös laddning.

	Sony Tipo	LG G3	Samsung Galaxy S3	Samsung Galaxy S4
Ström Primärsida [mA]	961,020	528,430	215,400	150,900
Ström Sekundärsida[mA]	630,370	74,012	92,401	0
Verkningsgrad:	65,594 %	14,006 %	42,897 %	0 %

Resultaten från Sony Tipo visade här en mycket högre ström, vilket kommer ladda batteriet snabbare, men hade en sämre verkningsgrad. Samsung Galaxy S3 fick en högre verkningsgrad än förra mätningen samtidigt som strömmen som laddar batteriet nästan är densamma. Verkningsgraden för LG G3 är nästan lika låg som på förra mätningen, och Samsung Galaxy S4 gick inte ens att ladda.

8.1.1 RESULTAT FRÅN OBSERVERING AV STRÖMMENS BETEENDE UNDER HEL LADDNINGSCYKEL

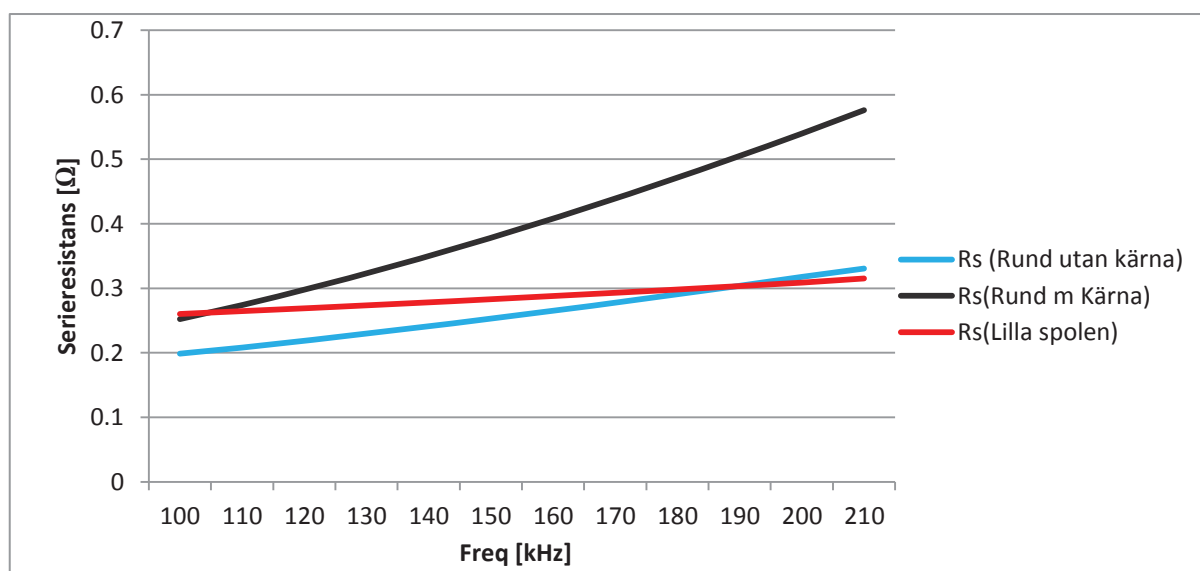
Resultat från denna mätning visar hur strömstyrkan till mobilbatteriet (Sony Xperia Tipo) förändras över en fullständig laddningscykel, det vill säga från urladdat till fulladdat. Grafen över strömmens beteende hittas i figur 19 nedan. Vad som är svårt att se i grafen är att strömstyrkan är 138 mA när batteriet först når 100 %, men fortsätter sjunka ner till 1,87 mA vid fortsatt laddning. Den sjunker aldrig till 0 A.



FIGUR 19. VISAR HUR STRÖMMEN SOM LADDAR LITIUM-JON BATTERIET I SONY TIPO FÖRÄNDRAS.

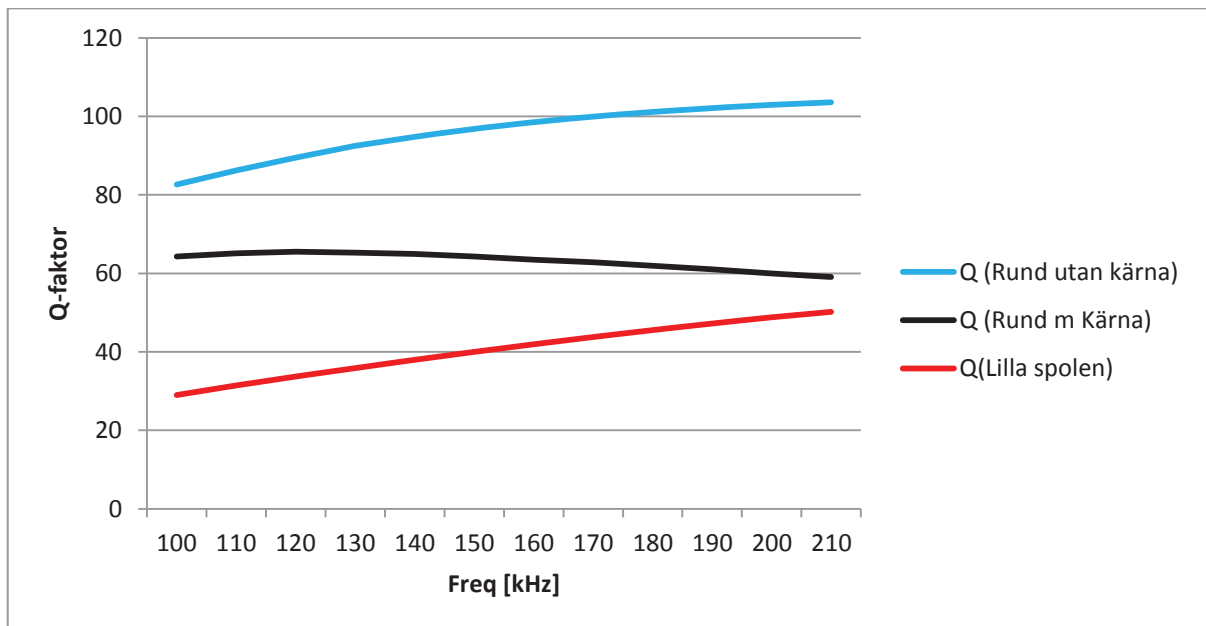
8.2 RESULTAT FRÅN MÄTNINGAR MED LCR-METER

Mätresultaten visade att resistansen ökade med frekvensen, vilket stärker teorin om skinneffekten och närhetseffekten. Mätningarna gjordes inom Qi-standardens frekvensomfång (100 – 210 kHz). Resultaten från mätningarna av de olika spolarna visas i figur 20 nedan och tabell 8 (se Bilagor).



FIGUR 20. VISAR HUR SERIERESISTANSEN I OLIKA SPOLAR VARIERAR MED FREKVENSEN.

Mätningar på Q-faktorn var inte konsekventa. Två spolars Q-värde ökade med frekvensen (röd och blå kurva), medan en spoles Q-faktor minskade i frekvensomfångets övre skikt (svart kurva). Se figur 21 nedan och tabell 9 (se Bilagor).



FIGUR 21. VISAR HUR Q-FAKTORN PÅ OLIKA SPOLAR VARIERAR MED FREKVENSEN.

8.3 MÄTNING AV VERKNINGSGRAD PÅ SPOLAR

Mätresultaten gav en verkningsgrad på 65,966 % i den första mätningen där två identiska spolar (Rund spole utan kärna) med Q-värde 100 (vid 170 kHz) användes. Effekten på primärsidan beräknades med hjälp av att mäta fasförskjutningen mellan ström och spänning, spänningen över samt strömmen genom spolen. Formeln för medeleffekt med sinusformad växelström är $P = U * I * \cos \varphi$. Effekten på sekundärsidan beräknades på samma sätt, bortsett från att det inte var någon fasförskjutning mellan ström och spänning, därav formeln för medeleffekt $P = U * I$. Resultaten visas i tabell 6 nedan.

Tabell 6. Visar spänning, ström, fasförskjutning och effekt för både primär- och sekundärspole. Verkningsgraden visas längst ner i tabellen.

	Primärspole	Sekundärspole
Spänning [V]	2,175	1,530
Ström [A]	0,109	0,087
Fasförskjutning [°]	31,824	0
Effekt [W]	0,237	0,133
Verkningsgrad:	65,966 %	

Philips Research påstår att spolar med samma dimensioner och som har ett Q-värde på 100 skulle kunna ge en verkningsgrad på över 90 %. Detta kunde inte verifieras i mätningarna.

Den andra mätningen som gjordes var med spolen med kärnan som primärspole. Samma frekvens användes. Resultaten visas i tabell 7.

Tabell 7. Visar spänning, ström, fasförskjutning och effekt för både primär- och sekundärspole. Verkningsgraden visas längst ner i tabellen.

	Primärspole	Sekundärspole
Spänning [V]	1,956	1,500
Ström [A]	0,111	0,084
Fasförskjutning [°]	34,269	0
Effekt [W]	0,179	0,126
Verkningsgrad:	70,041 %	

Verkningsgraden för denna mätning var lite högre, även ifall samma spänning och frekvens användes. Primärspolen i detta fall hade en Q-faktor på 62,8 vid 170 kHz och även en kärna.

9. FRAMTIDSUTSIKTER

Trådlös laddning öppnar upp dörrar för en ny värld. En värld där elbilar kan laddas bara genom att stå på en parkering, eller där bärbara datorer laddas genom att ha dem på bordet. En vidare utveckling av kommunikationsprotokollen skulle kunna möjliggöra informationsöverföring från till exempel datorskärmar, datormusar och mobiler trådlöst. Detta skulle eliminera trassel som kablar medför.

Trådlös energiöverföring kan spela en stor roll med att minska växthusgasemissioner från trafiken, då det kan främja användandet av elbilar. Tekniken används redan idag i vissa delar av världen. Bussar som laddas i rörelse genom speciella banor i Sydkorea har blivit en stor succé, och är en del av Sydkoreas plan att minska landets växthusgasutsläpp med 30 % till år 2020 [36]. Detta miljövänliga sätt att transportera människor kan reducera växthusgasemissioner avsevärt mycket.

Tekniken har redan börjat implementeras i restauranger och caféer, där caféer som Starbucks och även snabbmatskedjan McDonald's erbjuder gratis trådlös laddning av telefoner på utvalda lokaler. Om din mobil någonsin har lågt batteri är det bara att gå in i ett café och ladda på över en kopp kaffe [37, 38].

Genom resonans går det att överföra energi över större avstånd, även om det i dagsläget är begränsat. Om detta utvecklas kanske det i framtiden kan implementeras genom att ha en spole i ett rum som ständigt förser elektronik med ström. Genom denna lösning kan all elektronik som har en mottagare i samma resonansfrekvens ta emot energi från sändarspolen, och därmed kan en sladdfri miljö skapas i rummet.

Framtidsutsikterna för denna teknik är nästan oändlig. Det kan inte bara göra världen mer emissionsfri, utan även göra vardagen enklare genom att slippa onödiga sladdar.

10. SLUTSATS/DISKUSSION

I denna rapport har vi tagit upp mycket teori angående de förlustfaktorer som påverkar verkningsgraden mest, med fokus på mottagarsidan av systemet. Efter att ha läst igenom allt går det att se att ingen av dessa faktorer går att avlägsna helt, men det finns metoder för att minimera dem. Vissa av dessa förlustfaktorer måste ges uppmärksamhet innan en mottagarenhet ens börjar byggas. Framförallt gäller det material. Till exempel om det gäller val av material till en kärna i spolen önskas så hög förstärkning som möjligt, men så lågt kvarstående magnetfält som möjligt, det vill säga minimering av hystereseffekten. En ferritkärna skulle då vara ett bra val då det är det material som besitter dessa egenskaper i högst grad med de magnetfältsstyrkor som avses för Qi-standarden. Då detta är något som gjorts mycket forskning om finns det sannolikt inte mycket utrymme för vidare optimering inom området. Dock går det att reducera förlusterna något i kärnan genom att dela upp den i laminerade skikt för att minska utbredningen av virvelströmmar i den, så som ofta görs i transformatorer i exempelvis ställverk.

När det gäller materialval till spolar är koppar det givna valet på grund av dess goda konduktivitet. Silver och grafen har faktiskt högre konduktivitet än koppar, men på grund av pris och framställningssvårigheter blir koppar det mest prisvärda valet. För att reducera skinneffekten har vävning av litztråd hittills visat sig vara det starkaste valet, så även här är vidare optimering svår.

Den förlustfaktor där det finns mest utrymme för förbättring enligt vår uppfattning är kopplingsfaktorn. Här sker stora förluster på grund av att en påtaglig andel av sändarenhetens magnetfält inte genomtränger mottagarspolen. Med andra ord, om en designlösning som försäkras att större andel av magnetfältet genomtränger mottagarspolen uppfinns skulle detta sannolikt dramatiskt förbättra verkningsgraden i energiöverföringen. Många använder idag permanenta magneter i spolarnas centrum för att se till att de centreras bättre gentemot varandra. Detta hjälper självfallet till men det lämnar samtidigt mycket att önska. De material som används i dessa magneter bör då vara paramagnetiska för att inte byta polaritet efter att ha blivit exponerat för ett magnetfält. Nackdelen med paramagnetiska material är att de har låg permeabilitet i relation till ferri- och ferromagnetiska material, som kan förstärka ett magnetfält väldigt mycket. Istället skulle en lösning som centrerar spolarna, utan att innefatta ett paramagnetiskt material, kunna användas. Genom att använda sig av en kärna med hög permeabilitet för att rikta magnetfältet med skulle detta sannolikt ge ett bättre resultat.

Ett förslag på en sådan metod vore att låta gravitationen centrera spolarna genom att använda något spiralformade spolar och gränsytor istället för platta som är standard idag. Detta är inte en beprövad metod, men vår hypotes är att magnetfältet då även riktas mer mot mottagarspolen, vilket skulle innebära mindre läckage av sändarspolens magnetfält och högre verkningsgrad. Problemet här är återigen att denna metod strider mot den design som blivit norm för mobiltelefoner idag, det vill säga tunna och platta.

När designen av mottagarenheter ska bestämmas väljer många, som nämnt i kapitel 4.3.1 Kopplingsfaktor, att använda ovala spolar. Detta ger generellt en bra verkningsgrad även då sändar- och mottagarspole ej är perfekt centrerade gentemot varandra, till priset av att den högsta kopplingsfaktor som går att uppnå minskar något. Så återigen, om en pålitlig metod finns för att centrera spolarna gentemot varandra behöver inte denna uppoffring göras.

Vidare offras även ofta tjockleken på mottagarpolens tråd för att ta mindre plats bakom exempelvis skalet på en mobil, då många mobiltillverkare idag strävar efter så tunna mobiler som möjligt. Optimalt vore att använda tjockare tråd, vilket sänker spolens resistans, och använda två lager tråd för att förbättra dess induktans. Spolen tar då mer plats men dess Q-faktor skulle öka, vilket leder till ökad gemensam induktans med sändarspolen och verkningsgrad.

En slutsats man kan dra efter mätningarna vi gjorde med utvecklingsmodellen BQ500212AEVM-550 och BQ51013BEVM-764 var att verkningsgrad inte enbart påverkas av själva sändar- och mottagarenheterna utan även lasten samt microUSB-kabeln den anslöts med. Resultaten visade mycket stora skillnader vid jämförelse av exempelvis byte av enbart microUSB-kabel, men med samma mobil som last. Verkningsgraden skilde sig exempelvis 15 % i två mätningar med en Samsung Galaxy S3 som last, fast med de olika microUSB-kablarna. Vår hypotes till varför dessa skillnader uppstår är att mobilen kan behöva upprätta en kommunikationslänk till enheten som levererar ström till den för att uppnå maximal laddningshastighet. Dock stödjer inte mottagarenheten BQ51013BEVM-764 USB-kommunikation. En annan anledning kan vara en pin på microUSB-kabeln som mobilen använder för identifiering av laddningskabeln. Mobilen kan då känna av ifall det är en proprietär laddningskabel eller ej, och kan därefter bestämma flödet av ström till batteriet. Förmodligen använder leverantörer detta som en metod för att säkerställa att företagets egna laddningskablar skall ge snabbast laddning och därmed uppmuntra köp av deras laddare.

Efter mätningarna med LCR-meter kunde vi se att resistanskurvorna vid olika frekvenser för de tre spolarna som användes såg väldigt olika ut. Detta beror sannolikt på hur tjock tråden är, hur många lindningsvarv och lager tråd spolen har samt hur litztråden är vävd. Allt detta hör nämligen ihop med skinneffektens och närhetseffektens påverkan på spolarna vid olika frekvenser. Exempelvis ser vi att resistansen i den runda spolen med kärna ökar hastigare än de andra två. Detta översätts till att dess Q-faktor ökar långsammare än de andra två på grund av sambandet $Q = \frac{\omega L}{R}$. Tittar man på kurvan ser man till och med att den i ett frekvensintervall avtar då R ökar proportionellt snabbare än ωL .

Efter verkningsgradsmätningen på de två runda spolarna utan kärna drogs en slutsats att forskningen från Philips research inte stämde enligt angivna parametrar. Vad emellertid inte var angivet i forskningen var effekten som användes i sändarspolen samt dess frekvens. Detta var något som vi valde själva, vilket kan ha påverkat våra resultat i jämförelse med deras.

När detta hade fastslagits gjordes samma test fast med en sändarspole med kärna. Den hade dock i övrigt samma dimensioner som tidigare. Denna spole hade lägre Q-faktor vid given frekvens än den utan kärna, men resultatet visade trots detta cirka 4 % högre verkningsgrad. Detta beror sannolikt på att luftgapet i en av spolarnas centrum ersattes med en kärna som har högre permeabilitet än luft, vilket kompenserade för den lägre Q-faktorn.

Ur ett miljöperspektiv anser vi att trådlös laddning är bättre än trådad laddning av flera anledningar. Om man jämför kopparåtgången i samband med tillverkning av laddningskablar och spolar till trådlös laddning är skillnaden inte stor. Däremot är det generella slitaget på spolar i ett trådlöst laddningssystem avsevärt mycket mindre än på laddningskablar. Detta är på grund av att kablar ofta böjs och kläms i exempelvis väskor, samt att kontakterna blir sämre med tiden då de ofta ansluts och kopplas ifrån mobilen. Detta gör att man mycket oftare

behöver byta ut en laddningskabel i jämförelse med en trådlös laddare, vilket leder till minskad kopparåtgång i samband med trådlös laddning.

REFERENSER

- [1] T. Francesca. (Hämtad:2015, 2 april). *Major Milestone for V1.2 Resonant Specification* [Online]. Tillgänglig: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/blog/86/major-milestones-for-v12-resonant-specification>
- [2] System Description Wireless Power Transfer, Volume I: Low Power Part 1: Interface Definition, 2013.
- [3] Faktabanken (Hämtad: 2015, 25 maj). *Resonanskretsar* [Online]. Tillgänglig: <http://faktabanken.nu/resonans.htm>
- [4] L. Bergström och L. Nordlund, "Ideala komponenter i växelströmskretsar" i *Ellära Krets- och fältteori*, tredje upplagan. Stockholm, Sverige: Liber AB, 2012, s. 255
- [5] B. Molin, "LC-resonanta oscillatorer" i *Analog elektronik*, andra upplagan. Lund, Sverige: Studentlitteratur AB, 2009, s. 390
- [6] L. Bergström och L. Nordlund, "Ideala komponenter i växelströmskretsar" i *Ellära Krets- och fältteori*, tredje upplagan. Stockholm, Sverige: Liber AB, 2012, s. 203-204.
- [7] M. O'Hara, "Modeling Non-Ideal Inductors in SPICE," Newport Components, Milton Keynes, Buckinghamshire, Final Rep, november 1993.
- [8] J. Smith. (2009, augusti 24). *Self-resonant Frequency of an Inductor* (andra upplagan) [Online]. Tillgänglig: http://www.cliftonlaboratories.com/self-resonant_frequency_of_inductors.htm
- [9] Innospection (Hämtad: 2015, 6 april). *Eddy Current Theory* [Online]. Tillgänglig: <http://www.innospection.com/pdfs/Eddy%20Current%20Theory.pdf>
- [10] NDT Resource Center (Hämtad: 2015, 7 april). *Depth of Penetration & Current Density* [Online]. Tillgänglig: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.htm>
- [11] N. Townsend. (2012, september 24). *The Fundamentals in Transformer Losses* [Online]. Tillgänglig: <http://www.engineeringexchange.com/profiles/blogs/the-fundamentals-in-transformer-losses>
- [12] R.E Haimbaugh, "Theory of Heating by Induction," i *Practical Induction Heat Treating*, första upplagan. Materials Park, USA: ASM International, 2001, s. 5-8.
- [13] L. H. Dixon, Jr., "Eddy Current Losses in Transformer Windings and Circuit Wiring," TI, Texas, Dallas, Final Rep., 2003.
- [14] S.W. Amos, "Packet to Push-Pull Operation," i *Newnes Dictionary of Electronics*, Fjärde upplagan. Oxford, UK: Elsevier Science, 1999, s.255.
- [15] D. K. Cheng, "Behaviour of Magnetic Materials," i *Field and Wave Electromagnetics*, andra upplagan. Boston, 1989, s. 259.

- [16] S. Evanczuk. (2013). *Designing in Wireless Power for Portable Products* [Online]. Tillgänglig: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2013/apr/designing-in-wireless-power-for-portable-products>
- [17] R. Bosshard, J. Mühlethaler, J. W. Kolar och I. Stevanovic, "Optimized Magnetic Design for Power Transfer Coils," ETH Zürich, Zürich, Switzerland, 2013.
- [18] E. Waffenschmidt, "Wireless Power for Mobile Devices," Philips Research Europe, Eindhoven, Netherlands, Hämtad: 25 maj, 2015.
- [19] D. Van Wageningen och E. Waffenschmidt (Hämtad: 2015, 8 april). *Transfer Efficiency* [Online]. Tillgänglig: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/transfer-efficiency.html>
- [20] E. Waffenschmidt. (Hämtad: 2015, 10 april). *Qi Quality Factor* [Online]. Tillgänglig: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/quality-factor.html>
- [21] Radio-Electronics. (Hämtad: 2015, 10 april). *Quality Factor / Q Factor Tutorial* [Online]. Tillgänglig: <http://www.radio-electronics.com/info/formulae/q-quality-factor/basics-tutorial.php>
- [22] R. Nave. (Hämtad: 2015, 10 april). *Resonance, Series Resonance, Selectivity and Q of a Circuit* [Online]. Tillgänglig: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/serres.html>
- [23] A4WP Wireless Power Transfer System Baseline System Specification (BSS) V1.2.1, 7/5 2014.
- [24] E. Alexandersson, "INDUKTIV LADDNING OCH HÄLSOEFFEKTER," Viktoria Swedish ICT, Göteborg, Västra Götelands Län, 2013-11-05.
- [25] World Health Organisation. (Hämtad: 2015, 23 april). *What are electromagnetic fields?* [Online]. Tillgänglig: <http://www.who.int/peh-emf/about/WhatisEMF/en/index1.html>
- [26] Strålsäkerhetsmyndigheten. (Hämtad: 2015, 23 april). *Magnetfält och Hälsorisker* [Online]. Tillgänglig: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Broschyr/2009/Magnetfalt-och-halsorisker-low.pdf>
- [27] Arbets- och miljömedicin i Uppsala. (Hämtad: 2015, 23 april). *Elektromagnetiska fält (EMF)* [Online]. Tillgänglig: <http://www.amm uppsala.se/emf>
- [28] Sahlgrenska Universitetssjukhuset. (Hämtad: 2015, 24 april). *Är MR-undersökningen säker?* [Online]. Tillgänglig: http://www.sahlgrenska.se/upload/SU/omrade_4/Radiologi/MR/S%C3%A4kerhet%20f%C3%B6r%20patienter%207.pdf
- [29] Strålsäkerhetsmyndigheten. (Hämtad: 2015, 24 april). *Försiktighetsprincipen* [Online]. Tillgänglig: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/start/Magnetfalt--tradlos-teknik/Forsiktighetsprincipen/>

- [30] J, van der Sanden. (Hämtad: 2015, 24 april). *Electromagnetic Field (EMF) Limits* [Online]. Tillgänglig: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology/emf-limits-icnirp-basic-restrictions.html>
- [31] J. Strandman. (2009, 30 januari). *Strålsäkerhetsmyndighetens allmänna råd om begränsning av allmänhetens exponering för elektromagnetiska fält* [Online]. Tillgänglig: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Forfattning/SSMFS/2008/SSMFS2008-18.pdf>
- [32] Statens Strålskyddsinstitut. (2006, 01 november). *Magnetfält och eventuella hälsorisker* [Online]. Tillgänglig: <http://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/verksamhet/natkoncession/12-mkb-bilaga-412-ssi-magnetfalt.pdf>
- [33] Lenntech. (Hämtad: 2015, 25 april). *Copper* [Online]. Tillgänglig: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/cu.htm>
- [34] Copper Development Association Inc. (Hämtad: 2015, 25 april). *Societal Benefits of Copper* [Online]. Tillgänglig: <http://www.copper.org/environment/>
- [35] K. Karltorp, ”Miljöpåverkan från gruvindustrin,” Andra AP-fonden och AP-fondernas Etikråd. Göteborg, 2008.
- [36] J. S. Kwaak. (2013, 27 augusti). South Korea Tests New Technology for Electric Bus. Tillgänglig: <http://www.wsj.com/articles/SB10001424127887323980604579030340856307338>
- [37] Starbucks. (Hämtad: 2015, 28 maj). Wireless Charging. Tillgänglig: <http://www.starbucks.com/coffeehouse/store-design/wireless-charging>
- [38] Wireless Power Consortium. (Hämtad: 2015, 28 maj). Consumers are loving it: McDonald’s to add 600 Qi wireless charging spots in the UK. Tillgänglig: <http://www.wirelesspowerconsortium.com/blog/96/consumers-are-loving-it-mcdonalds-to-add-600-qi-wireless-charging-spots-in-the-uk>

BILAGOR

Tabell 8. Visar de uppmätta värden från mätningar av serieresistansen i olika spolar.

Freq (kHz)	Rs (Rund utan kärna) [Ω]	Rs(Rund m Kärna)[Ω]	Rs(Lilla spolen)[Ω]
100	0,1985	0,2523	0,2602
110	0,2082	0,2742	0,2645
120	0,2188	0,2975	0,269
130	0,2294	0,3230	0,2734
140	0,2411	0,3500	0,2779
150	0,2529	0,3783	0,2828
160	0,2653	0,4085	0,2878
170	0,2777	0,4391	0,2928
180	0,2909	0,4712	0,2981
190	0,3038	0,5048	0,3034
200	0,3174	0,5399	0,3089
210	0,3307	0,5761	0,3150

Tabell 9. Visar de uppmätta värden från mätningar av Q-faktorn i olika spolar.

Freq (kHz)	Q (Rund utan kärna)	Q (Rund m Kärna)	Q(Lilla spolen)
100	82,60	64,3	29,0
110	86,20	65,1	31,4
120	89,50	65,5	33,6
130	92,50	65,3	35,8
140	94,80	64,9	38,0
150	96,80	64,3	40,0
160	98,50	63,5	41,9
170	99,90	62,8	43,8
180	101,1	61,9	45,5
190	102,1	61,0	47,2
200	102,9	60,0	48,8
210	103,6	59,1	50,2