CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Trådlös kraft-och CAN-bussöverföring med kort räckvidd

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Elektroteknik

Jakob Andersson
Filip Selin

INSTITUTIONEN FÖR ELEKTROTEKNIK
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2020

Kandidatarbete 2020

Trådlös kraft-och CAN-bussöverföring med kort räckvidd

Short range wireless electrical power transfer and CAN bus connection

Kandidatarbete i samarbete med CPAC Systems AB

Jakob Andersson
Filip Selin



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2020

Trådlös kraft-och CAN-bussöverföring med kort räckvidd

© Jakob Andersson, 2020.
© Filip Selin, 2020.

Handledare: Peter Siljehov, CPAC Systems AB
Handledare: Jian Yang, Institutionen för Elektroteknik
Examinator: Jian Yang, Institutionen för Elektroteknik

Kandidatarbete 2020
Institutionen för Elektroteknik
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Förord

Vi vill passa på att uttrycka ett stort tack till Cpac för ett roligt och givande sammarbete under detta examensarbete. Ett särskilt tack till vår handledare Peter Siljehov och Pål Loodberg som givit vägledning och försett oss med nödvändiga resurser för att hjälpa oss nå våra mål. Vi vill även tacka Sakib Sistek på Chalmers som försett oss med en arbetsplats under en väldigt speciell och begränsad period med avseende på tid och resurser. Slutligen, ett stort tack till vår examinator Jian Yang, opponenter och alla andra som på ett eller annat sätt varit involverade i projektet.

Jakob Andersson & Filip Selin, Göteborg, 2020

Sammanfattning

En omfattande analys av trådlös induktiv kraftöverföring och trådlös datakommunikation med Bluetooth och CAN-bus standard genomförs. Målet är att föreslå och konstruera ett trådlöst system med kort räckvidd för en så kallad inertial meassurement unit (IMU) som befinner sig på skopan av en grävmaskin. Denna koppling mellan skopa och övriga grävmaskinen äventyras i nuläget ofta av att jord, grus och vatten med mera hamnar emellan och stör signalen. För att åstadkomma en lösning görs en studie av olika tekniker för trådlös kraftöverföring samt trådlös datakommunikation för att hitta lämpliga tekniker för projektet. Beräkningar, simuleringar och tester utförs sedan på de lämpliga teknikerna för att hitta en slutgiltig design för ett trådlöst system. Resultatet är ett fungerande datakommunikationssystem som använder sig av två stycken Arduino MKR 1010 wifi med Bluetooth och CAN-bus standard samt ett förslag på ett trådlöst induktivt kraftöverföringssystem.

Nyckelord: IMU, Bluetooth, CAN-Bus, WPT, Arduino, Datakommunikation, Trådlös.

Summary

A comprehensive analysis of inductive power transmission and Bluetooth data communication with CAN-bus is performed. The goal is to propose a wireless system for an inertial meassurement unit (IMU) located on the bucket of an excavator whose connection is currently often ~~compromised~~ by dirt, small rocks and water. To ~~achieve this,~~ a study of different techniques for wireless power transmission (WPT) and wireless data communication is performed in order to find suitable techniques for this project. Calculations, simulations and tests are then performed on the suitable techniques to find a final design for the proposed wireless system. The result is a data communication system using two Arduino MKR 1010 wifi units with Bluetooth communication using CAN-bus standard as well as a proposed two coil inductive wireless power transfer (WPT) system.

Keywords: IMU, Bluetooth, CAN-Bus, WPT, Arduino, Data communication, Wireless.

Innehåll

Figurer **xiii**

Tabeller **xv**

1 Inledning **1**
1.1 Bakgrund . . . 1
1.2 Syfte . . . 1
1.3 Avgränsningar . . . 2
1.4 Precicering av frågeställning . . . 2
1.5 Kravspecifikation . . . 2

2 Teoretisk Referensram **3**
2.1 Undersökning av kraftöverföringstekniker . . . 3
2.1.1 Mikrovågor . . . 3
2.1.2 Piezo-element . . . 3
2.1.3 Ultraljud . . . 4
2.1.4 Laser . . . 4
2.1.5 Induktion . . . 4
2.2 Undersökning av trådlös datakommunikation . . . 5
2.2.1 Bluetooth . . . 5
2.2.2 Near-Field Communication . . . 5
2.2.3 Wireless Local Area Network (WLAN) . . . 6
2.2.4 Near-Field Magnetic Induction (NFMI) . . . 6

3 Teori **9**
3.1 Kraftöverföring med induktion . . . 9
3.1.1 Spoldesign . . . 9
3.1.1.1 Q-faktor . . . 10
3.1.1.2 Resonansfrekvens . . . 10
3.1.1.3 Gemensam induktans . . . 10
3.1.1.4 Självinduktans . . . 11
3.1.1.5 Kopplingsfaktor . . . 11
3.1.1.6 Spoles resistans . . . 12
3.1.2 Topologier . . . 12
3.1.2.1 Serie-Serie . . . 13
3.1.2.2 Serie-Parallell . . . 13
3.1.3 AC-DC omvandlare . . . 14

3.2 Datakommunikation med Bluetooth low energy och CAN-bus 15
3.2.0.1 Penetrationsförmåga av material 16

4 Metod **17**

5 Beräkningar **19**

6 Simulering **25**
6.1 Verkningsgrad för olika topologier 25

7 Resultat **29**
7.1 Mätningar spoldesign 30
7.1.1 Induktans 30
7.1.2 Förluster och verkningsgrad 30
7.1.3 Q-faktor och resistans 32
7.1.4 Bekräftelse av koncept 32
7.2 Datakommunikaton med Bluetooth via CAN-bus 34

8 Diskussion och slutsats **37**

Referenser **39**

A Matlab-program **I**

B Kod peripheral-enhet **V**

C Kod central-enhet **IX**

Figurer

3.1 Tre olika topologier, Serie-Serie, Serie-Parallell, Parallell-Parallell. . . 13
3.2 Kopplingsschema för helvågsriktare med glättningskondensator och last. 14
3.3 Gränsnittsbeskrivning för Arduino BLE kommunikation. Hämtad från Arduinos hemsida [28]. 15

5.1 Gemensam induktans som funktion av primärspolens radie, b är sekundärspolens radie vid avståndet 5 mm och 15 varv på respektive spole. Enligt formel 3.4 20
5.2 Verkningsgrad för olika topologier som funktion av antal varv (där varven är lika på både primär- och sekundärspole) på spolarna. . . . 22
5.3 Kopplingsfaktorn i förhållande till avståndet mellan spolarna med en radie på 2cm. 23

6.1 Jämförelse av beräkningar kontra simulering för verkningsgrad vid olika antal varvtal på spolar och serie-serie koppling. 25
6.2 Jämförelse av beräkningar kontra simulering för verkningsgrad vid olika antal varvtal på spolar och serie-parallell koppling. 26
6.3 Simulering av utgående effekt (grön kurva) och ingående effekt (blå kurva) för koppling med SS-topologi med parametrar enligt tabell 6.1 26
6.4 Simulering av utgående effekt (blå kurva) och ingående effekt (grön kurva) för koppling med SP-topologi med parametrar enligt tabell 6.2 27

7.1 Blockdiagram för det tänkta systemet. 29
7.2 Jämförelse av två olika typer av spoldesign och deras kopplingsförmåga. Gul kurva visar två cylinderformade spolar,blå kurva visar två plattformade spolar. 31
7.3 Kretsschema över konceptet. 33
7.4 Flödesschema för datakommunikationssystem via Bluetooth med CAN-bus. Observera att komponenterna i figuren ej är av samma modell som i projektet. 34
7.5 Seriell övervakning av centrala enheten som är kopplad till IMU:n. CAN-bus shield och Bluetooth-länk initieras varefter data läses kontinuerligt från IMU:n som sedan skrivs till peripherala enheten. . . . 35
7.6 Uppkopplad trådlös CAN-kommunikation. Maskinrigg (vänster), Skärm med realtidsuppdatering i Co-Pilot (höger). 36

Tabeller

2.1 Konfigurationsalternativ för kommunikation med NFC. 6

5.1 Lista över parametrar som kommer undersökas i detta avsnitt. 19
5.2 Verkningsgrad för SS-topologi 21
5.3 Verkningsgrad för SP-topologi 21
5.4 Kompleterad lista över parametrar som undersökts i detta avsnitt. . . 24

6.1 Parametrar vid simulering av SS-topologi vid 13 varv. 27
6.2 Parametrar vid simulering av SP-topologi vid 13 varv. 28

7.1 Uppmätt induktans för egentillverkade spolar. 30
7.2 Uppmätt, beräknad och simulerad verkningsgrad för egentillverkade spolar. 31
7.3 Uppmätt verkningsgrad på de fabrikstillverkade spolarna av platt design. 32
7.4 Kopplingslayout för Arduino MKR 1010 wifi och Arduino MKR CAN-shield. Kopplingen ser lika ut på båda sidor av systemet. 34

1
Inledning

I detta avsnitt beskrivs syftet för projektet och bakgrunden till varför det genomförs. Avgränsningar och precisering av mål tas också upp.

1.1 Bakgrund

Cpac Systems är idag en ledande leverantör av elektroniska komponenter och produkter inom områdena konstruktionsfordon, självkörande fordon och sjöfartsindustrin. För just konstruktionsfordon har Cpac utvecklat ett system vid namn Co-Pilot som bland annat används av grävmaskiner där systemet hjälper till att styra maskinen. Co-Pilot visar i realtid hur föraren ska gräva, hur djupt skopan befinner sig i marken, vilken vinkel skopan har samt hur mycket vikt den belastas med. Produkten hjälper till att effektivisera arbetet då behovet av en ytterligare person som utför mätningar och dirigerar föraren elimineras. Ett intelligent system som detta kräver flera givare runt omkring grävmaskinen för att kunna ge tillräckligt precis data, detta inkluderar givare som kallas Inertial Measurement Unit (IMU). På senare tid har dock kopplingen mellan IMU:n på skopan och resten av maskinen blivit något av ett problem för Cpacs kunder. Då en grävmaskin kan byta skopa flera gånger per dag resulterar det i att IMU:n på skopan måste kopplas ihop med det övriga systemet varje gång skopan byts. För tillfället ansluts IMU:n via elektriska kontakter som trycks emot varandra när skopan och fästet på grävmaskinen kopplas ihop. Anslutningen äventyras dock ofta av att jord och vatten hamnar mellan kopplingen vilket kan resultera i delvis eller helt förlorad anslutning mellan maskin och skopa. Utrymmet mellan dessa måste därefter rengöras manuellt innan en ny anslutning kan ske vilket är tidskrävande och ineffektivt för föraren. Detta projekt går därmed ut på att hitta en trådlös lösning på anslutningen mellan skopans IMU och grävmaskinen för att underlätta byte av skopa.

1.2 Syfte

Detta projekt har i avsikt att undersöka olika metoder för trådlös överföring av elektrisk energi och trådlös datakommunikation för att skapa en trådlös IMU. När en lämplig metod för sådan överföring är vald ska den tillämpas och ett koncept ska presenteras.

1.3 Avgränsningar

Projektet avser endast att se över anslutningen mellan IMU:n på skopan och grävmaskinen och kommer därför inte behandla dess funktion då detta redan är etablerat. Konstruktionen som ska skapas är avsedd för just IMU:n på skopan och tar därför inte ta hänsyn till hur andra givare är anslutna till maskinen även om lösningen potentiellt skulle kunna tillämpas även där.

Vidare fokuserar detta projekt främst på överföring av kraft och data, frågor inom robusthet och positionering övervägs men behandlas främst av Cpac. Tekniken ska desutom vara realistiskt implementerbar ur ett ekonomiskt och kommersiellt perspektiv för att Cpac, vid lyckat utfall av projektet, ska kunna använda konceptet.

1.4 ~~Precicering~~ av frågeställning

För att åstadkomma målet om en fungerande trådlös anslutning mellan IMU och grävmaskin behöver särskilda frågor besvaras för att hitta en lösning. Dessa frågor lyder som följande:

- Vilka tekniker existerar idag för trådlös kraftöverföring och dataöverföring?
- Vilka tekniska krav har IMU:n?
- Vilka hinder och begränsningar medför den miljö som grävmaskinen arbetar i?
- Vilken teknik är mest lämpad för sådana begränsningar och krav?
- Är den valda metoden realistiskt genomförbar vid en implementation?

1.5 Kravspecifikation

I systemet finns olika krav som ska beaktas vid design och konstruktion av en lösning på problemet.

1. Fysiska begränsningar
   (a) Dimmensioner på koppling ska anpassas till en radie på max 22.55mm.
   (b) Precisionen på positionering av kopplingen i x-och y led skall tolerera avvikelser på ca 2 mm.
   (c) Avstånd mellan kopplingen ska klara ca. 5-6 mm.
   (d) Överföringen ska klara av störningar i form av jord, vatten, småstenar med mera som kan hamna emellan kopplingen.
2. Kraftöverföring
   (a) Effektöverföring: 1,5W (120mA @ 12V)
   (b) Matningspänning: 6-32V
3. Datakommunikation
   (a) Önskad överföringskapacitet > 500kbit/s
   (b) Tvåvägskomunikation för CAN-bus standard ska realiseras.

2
Teoretisk Referensram

Trådlös kraftöverföring eller WPT (Wireless Power Transmission) är en teknik som fått allt mer uppmärksamhet på senare tid [1]. Ökad utveckling av praktisk elektronik har kraftigt ökat efterfrågan på ett sätt att överföra energi till olika enheter utan behovet av strömförande kablar. Mobiltelefoner, biomedicinska implantat, fordon och sensorer är bara några exempel på områden där WPT blivit aktuellt [1] [2]. Under lång tid har en rad olika metoder för att åstadkomma WPT med både lång eller kort räckvidd har vuxit fram. Detta avsnitt avser att övergripande gå igenom olika tekniker inom WPT och trådlös datakommunikation som är relevanta för just detta projekt och genom att undersöka dess för-och nackdelar avgöra huruvida tekniken skulle passa vårt system. En djupare analys kommer även göras för den teknik som antas vara bäst lämpad.

2.1 Undersökning av kraftöverföringstekniker

Denna sektion kommer ge en övergripande introduktion till de olika kraftöverföringsteknikerna som har setts över under projektet.

2.1.1 Mikrovågor

Mikrovågor är en sorts elektromagnetisk strålning inom frekvensintervallet 1 GHz till 300 GHz som kan användas för att föra över energi trådlöst [14]. Denna teknik grundar sig på att en oscillator producerar mikrovågor inom en önskad frekvens som sedan skickas via en riktningsantenn. En riktningsantenn används för öka effektiviteten och minska störningar i en specifik riktning, detta behövs då mikrovågor har kortare räckvidd och sämre penetrationsförmåga jämfört med signaler av lägre frekvenser. Dessa mikrovågor strålas mot en mottagarantenn som konverterar den elektromagnetiska energin till DC-spänning som används för önskat bruk [15]. Kraftöverföring via mikrovågor har främst föreslagits att användas vid långa avstånd då tekniken tar relativt stor plats, är dyrare än andra WPT-tekniker samt kräver mycket kunskap för att tillverka. Tekniken har däremot visat sig ha en hög verkningsgrad på upp mot 95% i vissa uppmätta fall [16].

2.1.2 Piezo-element

Piezo-element eller piezo-elektrisk givare är en komponent som används för att skapa elektrisk energi från mekanisk stress såsom tryckningar, acceleration eller tempera-

turförändringar. De används i dagsläget främst för mätningar av olika slag då de har en relativt låg utgångseffekt på cirka 2 mW/cm^3 och endast genererar en elektrisk energi när de är under en mekanisk stress [17][18].
Tekniken skulle potentiellt kunna ta till vara på skakningar som förekommer i en grävmaskin eller artificiellt skapade skakningar/ljudvågor för att skapa elektrisk energi. Detta medför att IMU:n kan få en fristående energiförsörjning utan ett sändarsystem på grävmaskinen om de naturliga skakningarna kan tas till vara på. Alternativt att piezo-elementen får en extern kraft i form av ultraljud (se kapitel 2.1.3) för att skapa energi trådlöst.

2.1.3 Ultraljud

Trådlös kraftöverföring via ultraljud kan användas i samband med piezo-element där en sändare omvandlar elektrisk energi till ljud eller vibrationer som sedan skickas trådlöst och påverkar ett piezo-element på mottagarsidan. Piezo-elementet skapar sedan elektrisk energi med hjälp av dessa ljud eller vibration. Ultraljud arbetar i frekvenser över 20kHz och har därmed bättre penetrationsförmåga än signaler med högre frekvenser, ultraljud kan även ta sig igenom elektriskt ledande material och ger ingen elektromagnetisk störning [19]. Då denna teknik arbetar vid relativt låga frekvenser kan det däremot vara ett problem att få över tillräckligt med energi för att driva IMU:n och tillhörande dataöverföringssystem.

2.1.4 Laser

Trådlös kraftöverföring via laser har likheter med solpaneler där solens ljusenergi omvandlas till elektrisk energi via fotovoltaiska effekten. Detta skulle kunna utnyttjas genom att på sändarsidan omvandla elektrisk energi till laserstrålar som sedan strålas mot en mottagare som gör om strålningen till elektrisk energi via den fotovoltaiska effekten [20]. Det finns däremot flera problem som måste överkommas med den här tekniken, det måste vara fri sikt mellan sändare och mottagare och laserstrålen behöver riktas in väldigt precist för att energi ska överföras. Avståndet mellan sändare och mottagare kan däremot vara långt om dessa krav uppfylls. Det kan även vara farligt för omgivningen då laser, även vid låga effekter, kan göra människor eller djur blinda om de träffas av lasern. Det är även svårt att realisera en fungerande produkt då det kräver avancerad teknologi för att få en intensiv stråle som dessutom är tillräckligt precist inriktad.

2.1.5 Induktion

Induktion är en av de äldsta och mest använda principerna för trådlös kraftöverföring idag [3]. Principen bygger på att två åtskilda spolar, en sändarspole (primärspole) och en mottagarspole (sekundärspole) länkas samman med hjälp av elektromagnetiska fält. Genom att skapa förändringar (till exempel en AC spänning) i fältet induceras en ström i mottagarspolen som kan omhändertas och användas för kraftförsörjning. Detta kallas elektromagnetisk induktion och är den enklaste typen av kraftöverföring med magnetfältkoppling. Med hjälp av en förstärkarkrets vid sändarsidan och en tillhörande mottagarkrets till sekundärspolen kan en billig WPT-

konstruktion skapas. Nackdelen med denna teknik är att avståndet för överföringen är kraftigt begränsad till några få centimeter.

En annan variant på magnetfältkoppling anpassad för längre avstånd (ca 30cm) kallas magnetisk resonans. I denna metod införs kondensatorer på både mottagarsida och sändarsida för att skapa en LC-resonanskrets. Om kretsarnas resonansfrekvens matchar varandra fokuseras kraftöverföringen till just den frekvensen och möjliggör längre överföringsavstånd. För att optimera kraftöverföring av denna typ behöver därför vissa anpassningar göras. Då resonansfrekvensen har direkt inverkan på överföringens prestanda innebär detta att effekten, vid missanpassad frekvens kan minska även om avståndet mellan spolarna skulle minska. En ytterligare aspekt som bör tas i åtanke för båda induktionstekniker är spolarnas design. Här pratar man om spolens kvalitetfaktor (Q-värde) och kopplingsfaktor (K-värde) som har direkt inverkan på kraftöverföringen och påverkas av spolens form och storlek. Ytterligare anpassningar behöver därför göras vid design av spolen för att optimera prestanda[3].

2.2 Undersökning av trådlös datakommunikation

Trådlös datakommunikation är inget nytt, men ett ämne som bara fortsätter att utvecklas och optimeras [5] [10]. Stora framsteg, som tidigare ansågs vara omöjliga har gjorts inom till exempel radiokommunikation och sattelitkommuniation. En mängd olika tillämpningar som mobiltelefoner, fordon och säkerhetssystem är idag ofta till stor del eller helt och hållet beroende av trådlös kommunikation [5] [13]. I denna rapport undersöks olika tekniker som potentiellt skulle kunna passa vårt system och-eller om det går att integrera med WPT-tekniker.

2.2.1 Bluetooth

Bluetooth är en typ av standard för datakommunikation via radiovågor. Tekniken arbetar inom det licensfria 2,4 GHz bandet och har på senare år fokuserat mycket på lågeffekt teknologi (Bluetooth Low Energy, BLE). Bluetooth använder sig av vad som kallas frekvenshoppning vilket är en metod för att sända data på flera olika frekvenser som gör tekniken säker och mindre känslig för störningar. Bluetooth LE stödjer datahastigheter från 125 Kb/s till 2 Mb/s och effekter mellan 1-100 mW [6].

2.2.2 Near-Field Communication

Near field communication eller NFC, är en teknik som ofta används för trådlös kommunikation mellan mobila enheter på korta avstånd av några centimer. Tekniken baseras på en standard som kallas RFID (radio frequency identification) och använder sig av högfrekventa magnetfält för utbyte av data [7]. NFC brukar beskrivas som ett gränssnitt för trådlös kommunikation som kan arbeta i olika lägen. Dessa lägen beror på om de kommunicerande enheterna generar sitt eget magnetfält eller fångar upp kraft från en annan enhets magnetfält. Dessa tillstånd kallas aktiva eller

passiva enheter och innebär att NFC har tre olika lägen vid vilka gränssnittet kan arbeta.

Tabell 2.1: Konfigurationsalternativ för kommunikation med NFC.

Enhet A	Enhet B	Enhet C
Aktiv	Aktiv	RF-fält (radio frequency) genereras av den enhet som vill skicka data medans enheten som väntar på att ta emot data ej generar något. På så sätt turas enheterna om att generera RF-fält.
Aktiv	Passiv	RF-fält genereras endast av enhet A.
Passiv	Aktiv	RF-fält genereras endast av enhet B.

NFC integreras ofta i olika WPT system beroende på ekektronikens syfte och tillämpning. Problem som ofta uppstår med tekniken, speciellt inom datakommunikation är hur man undviker olika EMI (Electro magnetic interference) störningar [8][9]. De integrerade kretsarna kan utsöndra elektromagnetiska vågor som försämar prestanda och leda till både förlorad data samt förluster i kraftöverföring [9].

2.2.3 Wireless Local Area Network (WLAN)

WLAN, mer känt som Wifi är ytterligare en radiobaserad kommunikationteknik som skapades för att frångå de konventionella kopplingarna med kablar i byggnader. WLAN arbetar med väldigt höga hastigheter på flera Mbit/s och används idag för att ansluta datorer och elektroniska enheter på ett bestämt nätverk i både privata och offentliga sammanhang så som hemmet, flygplatser, stationer och andra så kallade hotspots [11]. .

Efter WLANs etablering i samhället började arbetet för ytterligare variationer på trådlösa nätverk med olika tillämpningsområden, hastigheter och egenskaper. Dessa varainter refereras till som WxAN. Som ett komplement till WLAN växte snabbt en ny variant fram som kallas WPAN (Wireless Personal Area Network). Som namnet antyder inriktar sig tekniken på mindre nätverk i exempelvis hemmen. En tidig typ av WPAN teknik är Bluetooth, dock är Bluetooths hastighet begränsad i förhållande till exempelvis live-video överföring vilket har lett till utveckling av andra WPAN system under åren [11].

2.2.4 Near-Field Magnetic Induction (NFMI)

NFMI är en kommunikationsteknik med kort räckvidd som avnänder sig av den tidigare nämnda WPT-tekniken om magnetäfltkoppling med resonans. NFMI modulerar dessa magnetfält för att skapa en typ av NFC-kommunikation mellan enheter av denna typ. Den största fördelen med denna teknik är dess robusthet och penetrationsförmåga i till exempel vatten, jämfört med de högfrekventa radiobaserade teknikerna. Utöver detta har dessutom NFMI väldigt låg energikonsumtion (i klass med BLE) och hög säkerhet då kommunikationen är nästintill osynlig utanför dess avsedda räckvidd [12].

Begränsningar hos NFMI uppstår i dess förmåga att skicka data i flera riktningar och på längre avstånd. Precis som vid kraftöverföringen med magnetisk induktion ställs krav på spolarnas placering gentemot varandra. För att optimera detta krävs bättre och fler spolar vilket tar upp mer plats och ställer ytterligare krav på design. En viktig aspekt för NFMI är att tekniken är relativt outforskad jämfört med radio och ställs fortfarande inför flera utmaningar innan bredare integrering i samhället är möjligt [12].

3
Teori

Av de undersökta tekniker väljs induktion som den primära metod för kraftöverföring. Detta på grund av att tekniken redan är väl etablerad på marknaden och medför goda förutsättningar för tillämpning i vårt system. För datakommunikation undersöks Bluetooth Low Energy (BLE) närmare då tekniken även här är medför goda förutsättningar och dessutom tidigare använts i andra av Cpacs system. Flera olika aspekter så som spoldesign och potentiella störningar av tekniken måste beaktas för att åstadkomma önskat resultat. Detta avsnitt avser att behandla dessa aspekter.

3.1 Kraftöverföring med induktion

För kraftöverföring med induktion bör flera frågor undersökas och besvaras för att optimera prestanda i just vårt system. Detta inkluderar vilken typ av magnetisk fältkoppling vill man använda, hur spolen ska designas och hur omgivningen kan komma att påverka konstruktionen.

3.1.1 Spoldesign

En av de viktigaste aspekterna vid induktion är design av spolen. En mängd olika varianter på former, storlekar, kärnor och material finns tillgängliga och bör undersökas för att anpassas till vårt system. Den första frågan som undersöks är formen av spolen. Här kommer även storleken på konstruktionen spela en viktig roll då en av de främsta faktorer vid spoldesign är dess storlek, mer specifikt dess yttre diameter. Vid konstanta värden på övriga parametar, ökar kopplingsfaktorn när den yttre diametern ökar [4].

För låg effekt WPT har formen av spolen också visat sig vara en viktig faktor i design. Olika former ger olika prestanda angående kraft, precision och avstånd. De vanligaste varianter på former är cirkulär och rektangulär. Fördelen med en rektangulär att den tolererar längre avstånd mellan spolarna men är istället mer känslig när det gäller precision mellan spolarnas position. I detta system väljer vi att använda en cirkulär spole. Detta på grund av cirkulära spolars förmåga att jämnt distribuera kraft i alla riktningar, dess goda tolerans i postionanpassning samt att det ger möjlighet att maximera spolens storlek eftersom monteringsytan är cirkulär [4].

3.1.1.1 Q-faktor

Q-faktor eller godhetstalet används som ett mått på hur hög kvalité en spole har vid en viss frekvens där ett högt Q indikerar en bättre spole då det sker mindre energiförluster samt bättre oscillation. Det viktigaste som bestämmer Q-faktorn hos en spole är dess inre resistans, desto lägre resistansen är desto högre Q-faktor kommer erhållas. Detta innebär att när en spole designas måste resistansen hållas nere. Formeln för Q-faktorn är enligt följande:

$$Q = \frac{wL}{R} = \frac{2\pi fL}{R} \tag{3.1}$$

Där f är resonansfrekvensen, L är spolens induktans och R är spolens inre resistans. Det ska också tas i beaktning att en spole med högre Q-faktor gör att kretsens komponenter är av större betydelse då Q-faktorn även kan definieras enligt[25]:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f} \tag{3.2}$$

Där f_r är resonansfrekvensen där den högsta amplituden erhålls och Δf är bandbredden när $Amp = \frac{Amp_{max}}{\sqrt{2}}$. Detta innebär att en lägre Q-faktor ger än större bandbredd och att komponenternas värden i kretsen inte är av lika stor betydelse som vid en hög Q-faktor.

3.1.1.2 Resonansfrekvens

Resonansfrekvens är en speciell frekvens där impedanserna och admittanserna i en krets tar ut varandra när kretsen matas med en AC-spänning vid den bestämda resonansfrekvensen. Detta gör att den teoretiska spänningen som byggs upp vid spolen kan vara mycket högre än den inmatade spänningen .
Resonansfrekvensen bestäms enligt [26]:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{3.3}$$

L är spolens induktans och C är kretsens kapacitans.

3.1.1.3 Gemensam induktans

Gemensam induktans (M) är principen när två spolar befinner sig nära varandra och magnetfältet i primärspolen inducerar en spänning i sekundärspolen. Den gemensamma induktansen beror på hur spolarna är placerade mot varandra, är spolarna nära varandra kommer sekundärspolen påverkas kraftigare av magnetfältet från primärspolen och det skapas därmed en högre spänning. Den gemensamma induktansen mellan två spolar med ett varvs lindning kan beräknas med följande formler[21]:

$$M_0 = \frac{2\mu_0\sqrt{ab}}{m}[(1 - \frac{m^2}{2})K(m) - E(m)] \tag{3.4}$$

Där μ_0 är permeabiliteten i vakuum, a är primärspolens radie, b är sekundärspolens radie. K(m) samt E(m) är de elliptiska integralerna av första och andra ordningen av m, där m är definierat som:

$$m = \sqrt{\frac{4ab}{(a+b)^2 + d^2}} \tag{3.5}$$

d är avståndet mellan primärspolen och sekundärspolen. Om spolarna består av flera varv får M_0 multipliceras med antal varv på primärspolen N_1 samt antal varv på sekundärspolen N_2.

$$M = M_0 N_1 N_2 \tag{3.6}$$

3.1.1.4 Självinduktans

Självinduktans definieras som fenomenet när ett magnetfält i en krets inducerar en spänning i samma krets. Självinduktansen består av en inre induktans och en yttre induktans och dessa beräknas enligt.

$$L_{inre} = \mu_0 \frac{a}{4} \tag{3.7}$$

Där μ_0 är permeabiliteten i vakuum och a är spolens radie i meter. Den yttre induktansen beräknas sedan.

$$L_{yttre} = \mu_0 \frac{2a - r}{2}[(2 - m)K(m) - 2E(m)] \tag{3.8}$$

Här består r av koppartrådens radie i meter, K(m) och E(m) är elliptiska integraler där m beräknas enligt.

$$m = \frac{4a(a - r)}{(2a - r)^2} \tag{3.9}$$

Sedan adderas den inre och yttre induktansen vilket ger L_0, L_0 kan sedan multipliceras med antal varv på spolen i kvadrat vilket ger den totala självinduktansen [22].

$$\begin{gathered} L_0 = L_{inre} + L_{yttre} \\ L = L_0 N^2 \end{gathered} \tag{3.10}$$

3.1.1.5 Kopplingsfaktor

Kopplingsfaktorn (k) definierar hur stor del av det magnetiska flöde som en spole har gemensamt med en annan spole. En perfekt koppling mellan två spolar skulle resultera i en kopplingsfaktor = 1, då skulle sekundärspolen ta del av hela det magnetfält som primärspolen skapar. En kopplingsfaktor = 0 skulle innebära att spolarna är helt frånskilda av varandra [24]. Kopplingsfaktorn beror på spolarnas design samt avståndet mellan varandra, ju längre avstånd mellan spolarna desto lägre blir kopplingsfaktorn. Kopplingsfaktorn och den gemensamma induktansen är beroende av varandra enligt formeln:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \tag{3.11}$$

Där M är den gemensamma induktansen, L1 och L2 är självinduktansen i primär- och sekundärspolen.

3.1.1.6 Spoles resistans

Även spolens resistans behöver tas i beaktning vid beräkning av spolar, en spole med låg resistans är ideal då detta resulterar i högre Q-faktor enligt formel 3.1. Spolens resistans påverkar även beräkningen av verkningsgraden och utgående effekt. Resistansen i en spole vid AC-spänning beräknas enligt följande formler [23].

$$R_{DC} = \frac{1}{\sigma \pi r_0^2} \tag{3.12}$$

R_{DC} är spolens resistans vid en matning av DC-spänning där σ är konduktiviteten för koppar och r_0 är koppartrådens radie.

En annan faktor som behöver tas i beaktning är skinneffekten som uppstår vid AC-spänning. Skinneffekten gör att strömtätheten är störst vid ledarens yta men minskar mot centrum av ledaren. Strömmen går därmed främst mellan ytan på ledaren och en nivå som kallas skinndjupet som beror på frekvensen av AC-spänningen. Skinndjupet blir mindre desto högre frekvens som används, skinneffekten behövs för att beräkna resistansen vid växelström och det görs enligt nedan.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \tag{3.13}$$

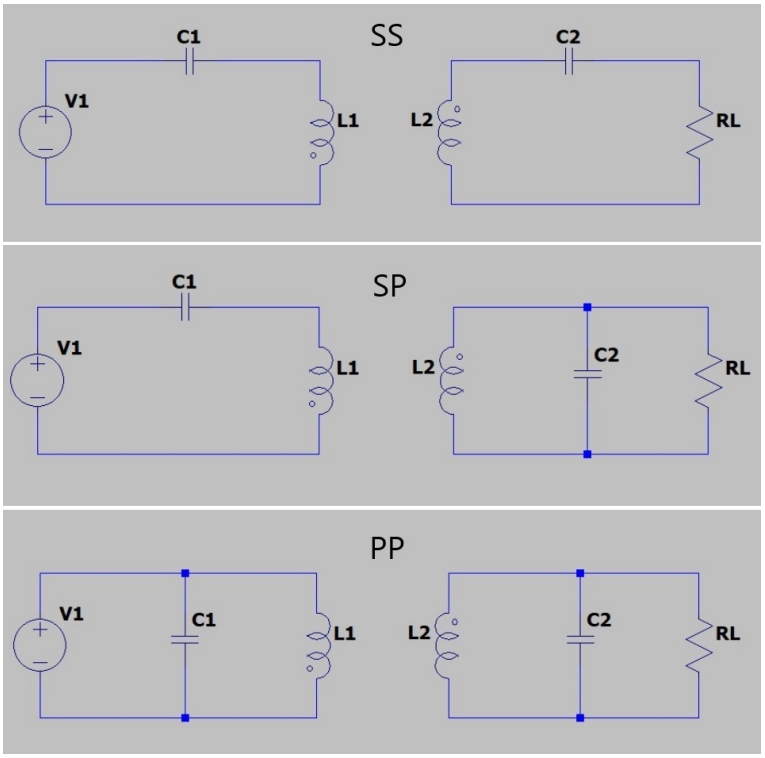
Dessa två formler kan sedan användas för att beräkna resistansen vid växelström där d är diametern på koppartråden och l är längden på koppartråden.

$$R_{AC} = l R_{DC} \left[\frac{1}{4} + \frac{d}{4\delta} \right] \tag{3.14}$$

3.1.2 Topologier

Ytterligare en faktor vid magnetisk resonans är kretsens design. Här finns tre vanliga varianter på kondensatorns placering i kretsen med olika egenskaper och prestanda. De tre varianterna som kan ses i figur 3.1 är serie-serie (SS), serie-parallell (SP) och parallell-parallell(PP)[27].

I figuren ovan är V1 spänningskällan, L1 och L2 är induktansen för sändar respektive mottagarspolen och RL är lasten för mottagarkretsen. C1 och C2 är kapacitansen för kretsarna som sätts för att få fram den önskade resonansfrekvensen. Från dessa kretsar går det att beräkna den ingående och utgående effekten samt verkningsgraden för respektive koppling.



Figur 3.1: Tre olika topologier, Serie-Serie, Serie-Parallell, Parallell-Parallell.

3.1.2.1 Serie-Serie

Vid Serie-Serie-koppling kan följande formler användas för att beräkna den ingående och utgående effekten (lasteffekten).

$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{V_{in}^2(R_2 + R_L)}{R_1(R_2 + R_L) + w^2M^2} \\ P_L &= \frac{w^2M^2V_{in}^2R_L}{[R_1(R_2 + R_L) + w^2M^2]^2} \end{aligned} \tag{3.15}$$

Ingående och utgående effekten kan sedan användas för att beräkna kretsens verkningsgrad.

$$\eta = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{w^2M^2R_L}{(R_2 + R_L)[R_1(R_2 + R_L) + w^2M^2)]} \tag{3.16}$$

I ovan formler står R1 och R2 för spolarnas inre resistans, ω är vinkelfrekvensen ($\omega = 2\pi f$) och M är den gemensamma induktansen.

3.1.2.2 Serie-Parallell

Beräkningen av ingående och utgående effekten samt verkningsgraden för en Serie-Parallell-koppling är lite mer komplex jämfört med Serie-Serie och innefattar fler variabler och formler.Beräkningen är därför uppdelad i olika steg för att göra formeln mer översiktlig. Först är formler för att få fram två variabler, a och b.

$$\begin{aligned} a &= L_2 - \frac{R_L^2 C2}{1 + w^2 R_L^2 C_2^2} \\ b &= R_2 + \frac{R_L}{1 + w^2 R_L^2 C_2^2} \end{aligned} \tag{3.17}$$

Sedan används a och b för att få fram sändarkretsens impedans ($Z_{in} = R_{in} + jX_{in}$) där R_{in} är sändarkretsens resistans och jX_{in} är sändarkretsens reaktans.

$$\begin{aligned} R_{in} &= R_1 + \frac{w^2 M^2 b}{b^2 + w^2 a^2} \\ X_{in} &= wM\Big(\frac{L_1}{M} - \frac{1}{w^2 M C_1} - \frac{w^2 a M}{b^2 + w^2 a^2}\Big) \end{aligned} \tag{3.18}$$

Till sist kan a och b tillsammans med R_{in} och jX_{in} användas för att få fram kretsens ingående och utgående effekt.

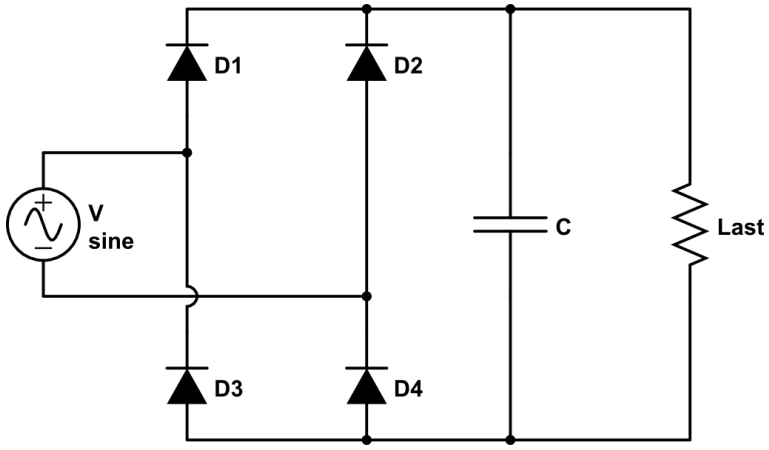
$$\begin{aligned} P_{in} &= \frac{V_{in}^2 R_{in}}{R_{in}^2 + X_{in}^2} \\ P_L &= \frac{V_{in}^2 w^2 M^2 (b - R_2)}{(R_{in}^2 + X_{in}^2)(b^2 + w^2 a^2)} \end{aligned} \tag{3.19}$$

Den ingående och utgående effekten används därefter för att beräkna verkningsgraden för en Serie-Parallell-koppling.

$$\eta = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{w^2 M^2 (b - R_2)}{R_{in}(b^2 + w^2 a^2)} \tag{3.20}$$

3.1.3 AC-DC omvandlare

För att omvandla växelspänning till likspänning finns det flera olika tekniker att använda sig av. Här presenteras en teknik i form av en helvågslikriktare som använder dioder för att omvandla spänningen.

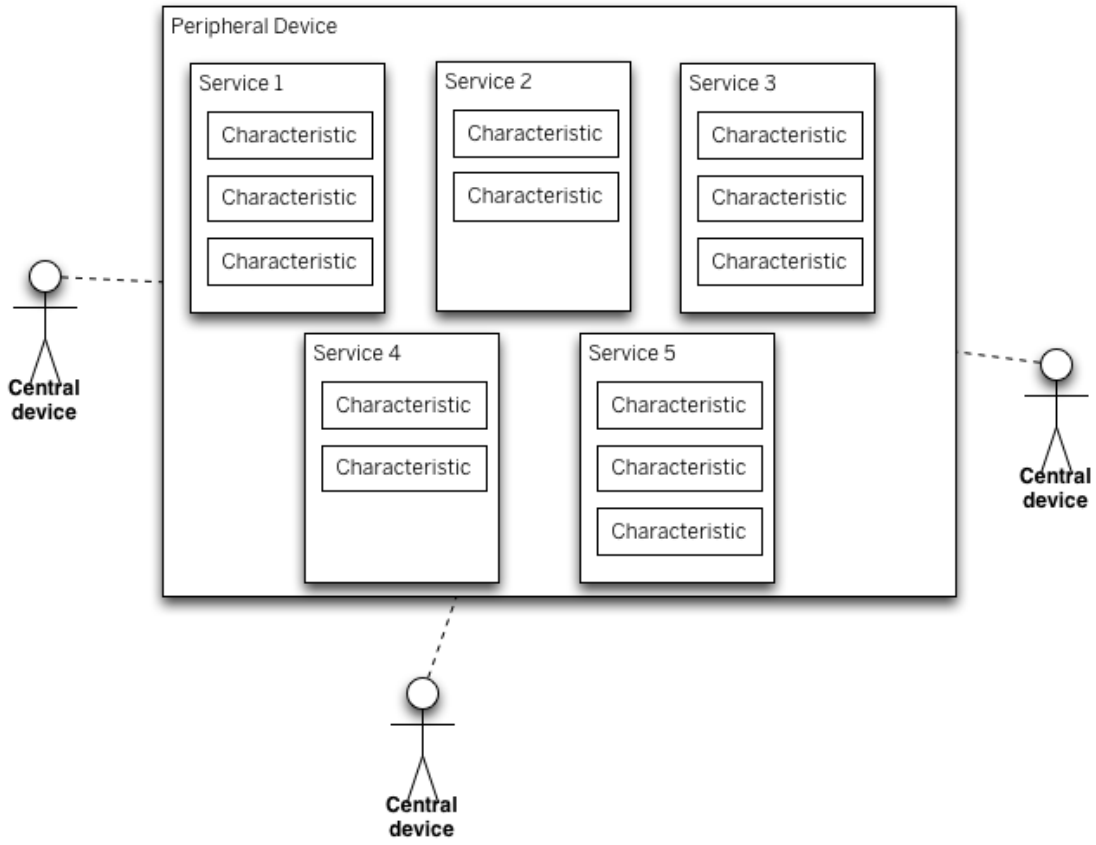


Figur 3.2: Kopplingsschema för helvågsriktare med glättningskondensator och last.

Helvågslikriktarens dioder gör att strömmens riktning alltid är densamma genom kretsen och växelspänningens negativa perioder blir därmed positiva. För att sedan jämna ut de positiva perioderna används en glättningskondensator. Glättningskondensatorn håller spänningen uppe mellan perioderna och fungerar likt ett batteri för att ge en jämn spänning till lasten.

3.2 Datakommunikation med Bluetooth low energy och CAN-bus

Ardunino NANO 33 BLE har en inbyggd Bluetooth-enhet som stödjer både BLE och Bluetooth. Här kan biblioteket ArduinoBLE användas för att ställa in Arduinon som en så kallad central enhet eller peripheral enhet för att upprätta en Bluetoothlänk kapabel till att både läsa och skriva data mellan de olika enheterna [28].



Figur 3.3: Gränsnittsbeskrivning för Arduino BLE kommunikation. Hämtad från Arduinos hemsida [28].

En peripheral enhet består av en samling services som i sin tur innehåller olka characteristics. Arduino beskriver detta gränsnitt som en slags anslagstavla där centrala enheter kan läsa av services och hämta/skriva data från olika characteristics. Med Arduinos BLE-bibliotek kan denna kommunikation konfigureras på olika sätt anpassat till användarens syfte, exempelvis för tvåvägskommunikation som kontinuerligt

uppdaterar datan i characteristics [28].

3.2.0.1 Penetrationsförmåga av material

Bluetooth har många fördelar i form av hög datahastighet och säker överföring men möter en del problem i vissa omgivningar. Ett bra exempel på detta är Bluetooths penetrationsförmåga genom vatten (som ofta kan förekomma i arbetsmiljöer för grävmaskiner). Vattens elektromagnetiska egenskaper har kraftig inverkan på radiosignalers penetrationsförmåga vilket resulterar i stora förluster i signalstyrkan [29].

Avståndskapaciteten för överföring med radiosignaler genom vatten kan uppskattas enligt [30]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{f\pi\mu\sigma}} \tag{3.21}$$

Där f är radiosignalens frekvens, μ är den magnetiska permabiliteten som kan antas vara lika med permabiliteten i vakuum och σ är konduktiviteten för vatten. Om man för detta projektet räknar med frekvens för dataöverföringen på på 2.4GHz (Bluetooth) skulle det innebära en avståndskapacitet på ca. 19 cm i sötvatten ($\sigma \approx$ 0,003) och ca 5mm i saltvatten ($\sigma \approx 4$). I saltvatten innebär det ett avstånd väldigt nära det som angivits i kravspecifikationen men i denna beräkning antas avståndet täckas av endast saltvatten vilket väldigt sällan kommer vara fallet i den miljö grävmaskinen arbetar i. Istället handlar det oftast om fuktig jord eller grus vilket minskar begränsningarna i överföringskapaciteten.

Liknande kan dämpningen av signalen beräknas genom [30]:

$$\alpha = 0.0173\sqrt{f\sigma}\ dB/m \tag{3.22}$$

4
Metod

Projektets inledande fas består främst av informationsökning och teknikanalys. Först behöver en kravspecifikation för IMU:n och en beskrivning av övriga systemet införskaffas. Denna information införskaffas genom olika möten med Cpac och inkluderar monteringsyta, avståndskrav, material samt tekniska aspekter som kommunikationsstandarder och elektriska krav. När en förståelse för de olika krav och funktioner systemet erhåller har upprättats, kan en analys av olika tekniker inledas där varje teknik jämförs mot respektive krav och huruvida implementerbar tekniken är i systemet. I detta projekt inleds först en analys av olika tekniker för kraftöverföring, dock måste kunskap om olika tekniker för datakommunikation hållas i åtanke för att avgöra kompatibilitet med kraftöverföring.

När en översiktlig analys av möjliga tekniker utförts kan en djupare studie göras av en eller några få tekniker som anses vara lämpliga för systemet. Denna studie bör mer noggrant utforska vilka begränsningar och möjligheter tekniken medför samt vilka tekniska egenskaper som kan vara särskilt viktiga vid implementering. I samband med denna fördjupning utförs beräkningar som verifieras med simuleringar och mätningar i laborationssal för att fastställa vilken design som ger bäst resultat. Ett program i Matlab (bilaga A) byggs upp för att utföra alla nödvändiga beräkningar med de formler som införskaffats under teknikfördjupningsstuiderna. Med detta program kan en del slutsatser dras för kopplingen och spolens design som sedan kan verifieras och undersökas vidare med simuleringar i LTspice och mätningar i laborationsmiljö. För datakommunikationen byggs ett system upp för testning där huruvida väl meddelanden kan överföras kontrolleras.

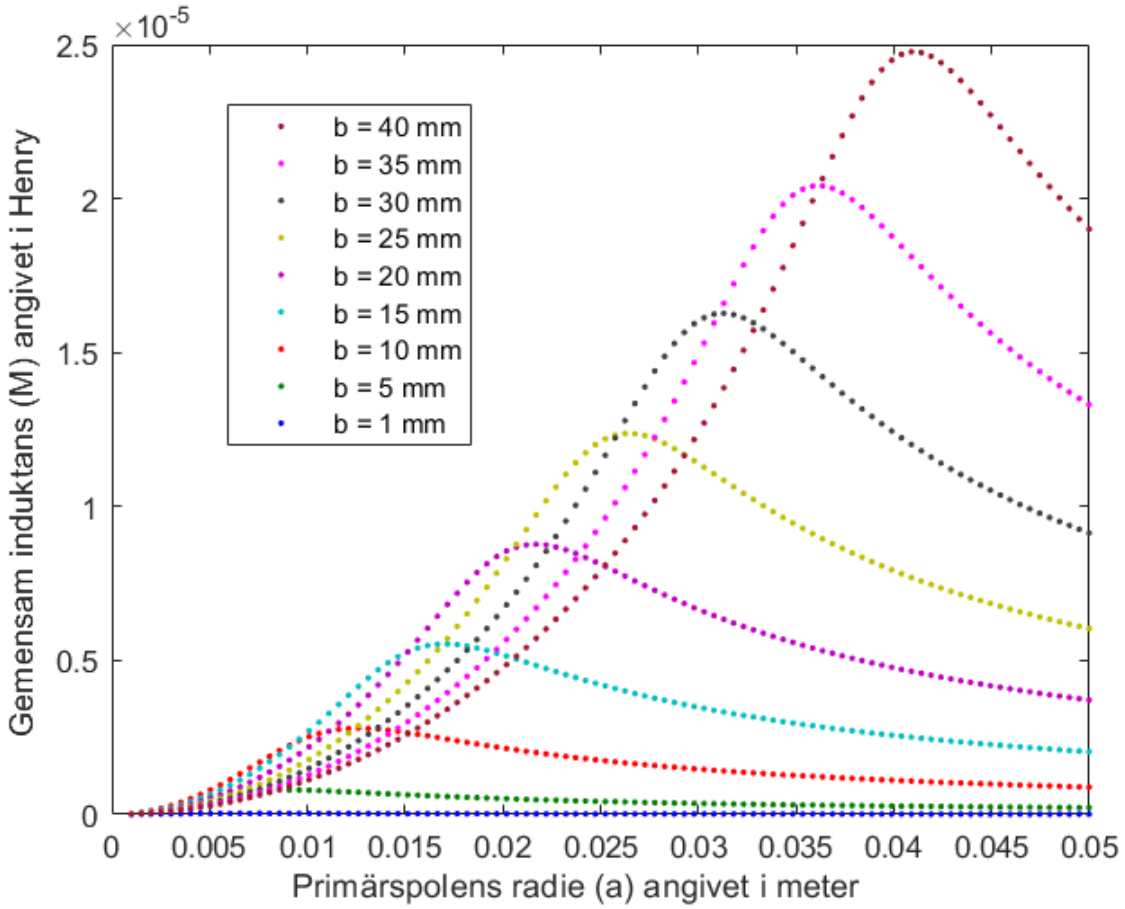
5
Beräkningar

För att tillverka en fungerande sändar- och mottagarspole så finns det flera parametrar att ta hänsyn till, nedan följer en tabell med parametrar som redan är satta samt parametrar som kommer beräknas i detta avsnitt.

Tabell 5.1: Lista över parametrar som kommer undersökas i detta avsnitt.

Parameter	Värde
$f_{resonans}$	$500kHz$
σ_{koppar}	$58.14 * 10^6$
$d_{avstånd}$	$5mm$
$r_{koppartråd}$	$0.28mm$
$r_{sändarspole}$	?
$r_{mottagarspole}$	?
M_0	?
L_0	?
R_0	?
R_L	50Ω
η_{SS}	?
η_{SP}	?
N_1	?
N_2	?
L_1	?
L_2	?
R_1	?
R_2	?
C_1	?
C_2	?
V_{SS}	$5W@?V$
V_{SP}	$5W@?V$
k	?
Q_1	?
Q_2	?

För att börja ta reda på de okända parametrarna kan storleksförhållandet mellan spolarna beräknas för att få en så hög gemensam induktans som möjligt i kretsen. Då kravspecifikationen visar ett bestämt avstånd mellan spolarna på 5-6 mm kan formel 3.4 användas för att beräkna den gemensamma induktansen.



Figur 5.1: Gemensam induktans som funktion av primärspolens radie, b är sekundärspolens radie vid avståndet 5 mm och 15 varv på respektive spole. Enligt formel 3.4

Det som kan urskiljas från bilden är att den gemensamma induktansen är som störst då mottagarspolen är lite mindre än sändarspolen. Då mottagarspolen endast ska vara någon millimeter mindre än sändarspolen kan det antas att spolarna kan vara lika stora. Då maximalt utrymme som kan användas för projektet har en radie på 2.25 cm används en spole som är lite mindre än det fysiska utrymmet. Radien sätts därmed till 2cm vilket resulterar i en gemensam induktans på 37.76nH när spolarna har ett varv enligt formel 3.4. Därmed $r_{sändarspole} = 2cm$, $r_{mottagarspole} = 2cm$ och $M_0 = 37.76nH$.

När storleken på spolarna är bestämda kan spolarnas egna induktans samt resistans vid ett varv beräknas enligt formel 3.10 och 3.14. Detta resluterar i att båda spolarna har en induktans på $0.1146\mu H$ samt en resistans på 0.0154Ω vid ett varv. Därmed $L_0 = 0.1146\mu H$ och $R_0 = 0.0154\Omega$.

Det som sedan ska beräknas är antalet varv på sändar och mottagarspole. De kommer i sin tur sätta värdet på de resterande parametrarna då induktansen och resistansen hos spolarna är beroende av antal varv, samt att kapacitansen är beroende av induktansen för att uppnå resonansfrekvens. För att bestämma antal varv jämförs verkningsgraden för olika topologier vid olika varvtal på sändar och mottagarspole. Verkningsgraden visas i två tabeller nedan för respektive topologi.

Tabell 5.2: Verkningsgrad för SS-topologi

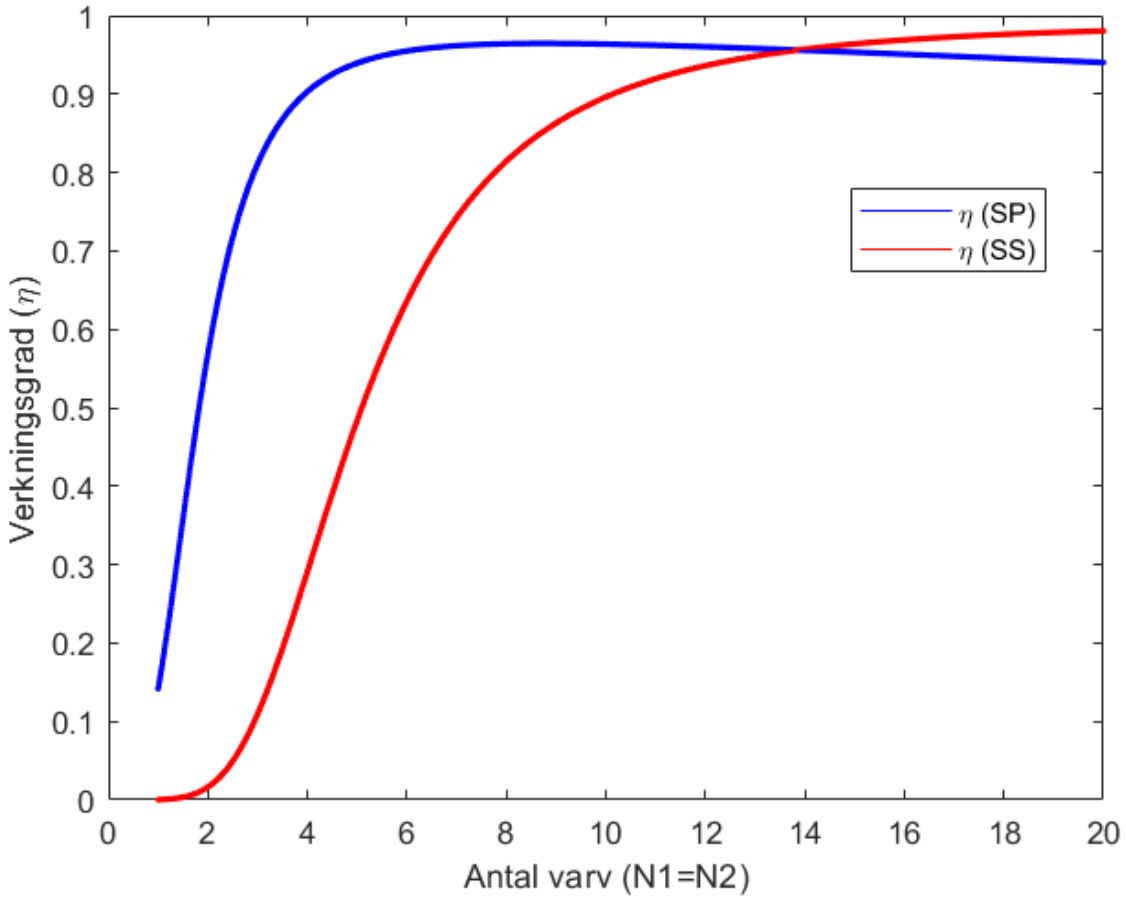
Varvtal	1	5	10	15	20
1	0.0003	0.0071	0.0240	0.0465	0.0719
5	0.099	0.4837	0.6726	0.7608	0.8115
10	0.4171	0.8102	0.8963	0.9281	0.9446
15	0.6443	0.9053	0.9487	0.9639	0.9717
20	0.7691	0.9417	0.9672	0.9760	0.9804

Tabell 5.3: Verkningsgrad för SP-topologi

Varvtal	1	5	10	15	20
1	0.1417	0.1439	0.1442	0.1443	0.1444
5	0.8877	0.9395	0.9468	0.9487	0.9499
10	0.7720	0.9378	0.9637	0.9727	0.9772
15	0.6077	0.8817	0.9343	0.9533	0.9631
20	0.4671	0.8106	0.8926	0.9238	0.9402

Från tabellerna framgår det att SS-topologin behöver flera varv för att uppnå en hög verkningsgrad medan SP-topologi kan uppnå hög verkningsgrad redan vid mindre varv. Det går även att urskilja att en hög och stabil verkningsgrad erhålls när spolarna är ungefär lika stora. Vid SS-topologi borde spolarna ha ett varvtal på 15-20 för att ha bra verkningsgrad samtidigt som spolarna inte blir för för stora. Med SP-topologin är det tillräckligt med 10 varv. Vid SP-topologien går dessutom verkningsgraden ner vid allt för många varv på spolarna. Nedan följer även en förtydligande bild över SS- och SP-topologiernas verkningsgrad när spolarna har lika

många varv. Här ser man tydligt att SP tidigt erhåller en stark och stabil verkningsgrad som sjunker sakta med högre varvtal medan SS-topologin endast jobbar bättre vid höga varvtal. För att förenkla vid simuleringar och tester beräknas resterande parametrar för spolar vid 13 varv som kommer användas vid både SP- och SS-topologi.



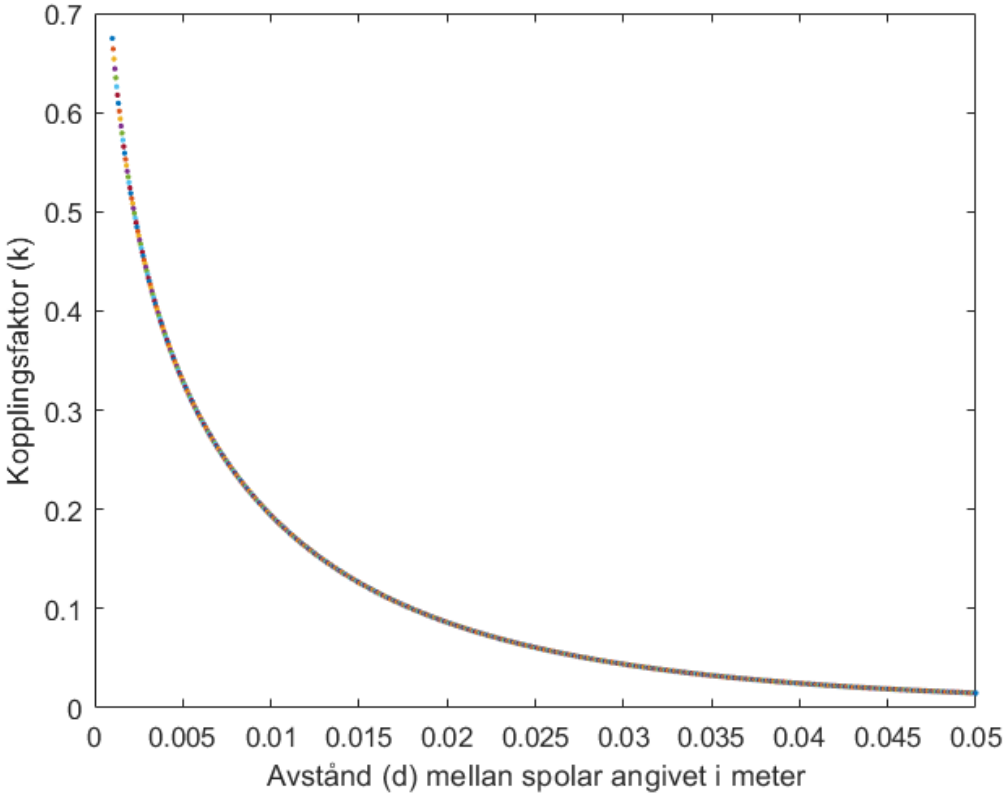
Figur 5.2: Verkningsgrad för olika topologier som funktion av antal varv (där varven är lika på både primär- och sekundärspole) på spolarna.

Vid varvtalen $N_1 = N_2 = 13$ ger det följande värden
$L_1 = L_2 = 19.37\mu H$
$R_1 = R_2 = 0.1996\Omega$
$C_1 = C_2 = 5.23nF$
$\eta_{SS} = 94.82\%$
$\eta_{SP} = 95.81\%$

Enligt kravspecifikationen framgår det att minimalt 1.5W behöver skickas över exkluderat dataöverföringen. Målet blir då att föra över 2.5W, dels för att komponenterna ska få tillräckligt med kraft men även för att systemet ska kunna tolerera en liten felplacering. Formel 3.15 används för att beräkna spänningen för att uppnå 2.5W vid SS-topologi vid 13 varv på spolen, den beräknas till 6.5V. För att beräkna

spänningen för att uppnå 2.5W vid SP-topologi vid 13 varv används formel 3.19 vilket resulterar i en spänning på 8.4V. Därmed $V_{SS} = 6.5V$ samt $V_{SP} = 8.4V$.

Kopplingsfaktorn kan beräknas enligt formel 3.11 för att undersöka hur bra kopplingen är mellan spolarna. Då avståndet mellan spolarna är 5mm i det här projektet ger det en kopplingsfaktor på 0.33 vilket är en relativt bra koppling.



Figur 5.3: Kopplingsfaktorn i förhållande till avståndet mellan spolarna med en radie på 2cm.

Även Q-faktorn kan beräknas för spolarna med formel 3.1, då spolarna är identiska teoretiskt resulterar detta i en Q-faktor på 305 för båda spolarna. Detta är en relativt hög Q-faktor vilket ger oss en bandbredd på 1.64 kHz enligt formel 3.2. Komponenterna i kretsen kommer därav vara av större betydelse för att hålla resonansfrekvensen inom bandbredden.
Alla okända parametrar från tabellen som introducerades i början av detta kapitel är nu framtagna och färdigställt enligt nedan.

Tabell 5.4: Kompleterad lista över parametrar som undersökts i detta avsnitt.

Parameter	Värde
$f_{resonans}$	$500kHz$
σ_{koppar}	$58.14 * 10^6$
$d_{avstånd}$	$5mm$
$r_{koppartråd}$	$0.28mm$
$r_{sändarspole}$	$2cm$
$r_{mottagarspole}$	$2cm$
M_0	$37.76nH$
L_0	$0.1146\mu H$
R_0	0.0154Ω
R_L	50Ω
N_1	13
N_2	13
L_1	$19.37\mu H$
L_2	$19.37\mu H$
R_1	0.1996Ω
R_2	0.1996Ω
C_1	$5.23nF$
C_2	$5.23nF$
η_{SS}	94.82%
η_{SP}	95.81%
V_{SS}	$2.5W@6.5V$
V_{SP}	$2.5W@8.4V$
k	0.33
Q_1	304
Q_2	304

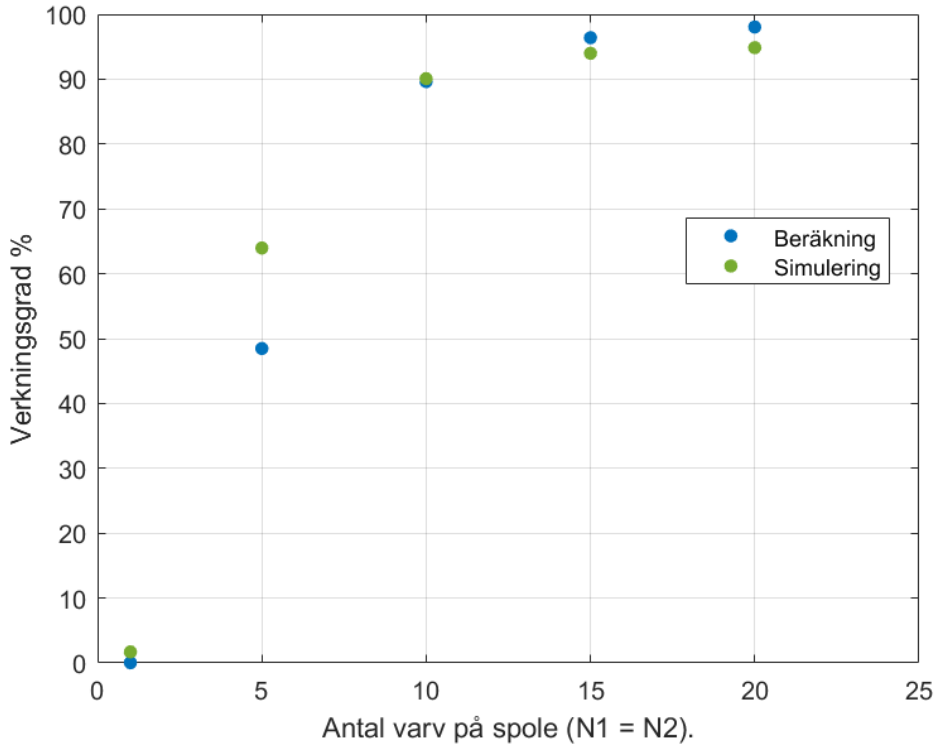
6

Simulering

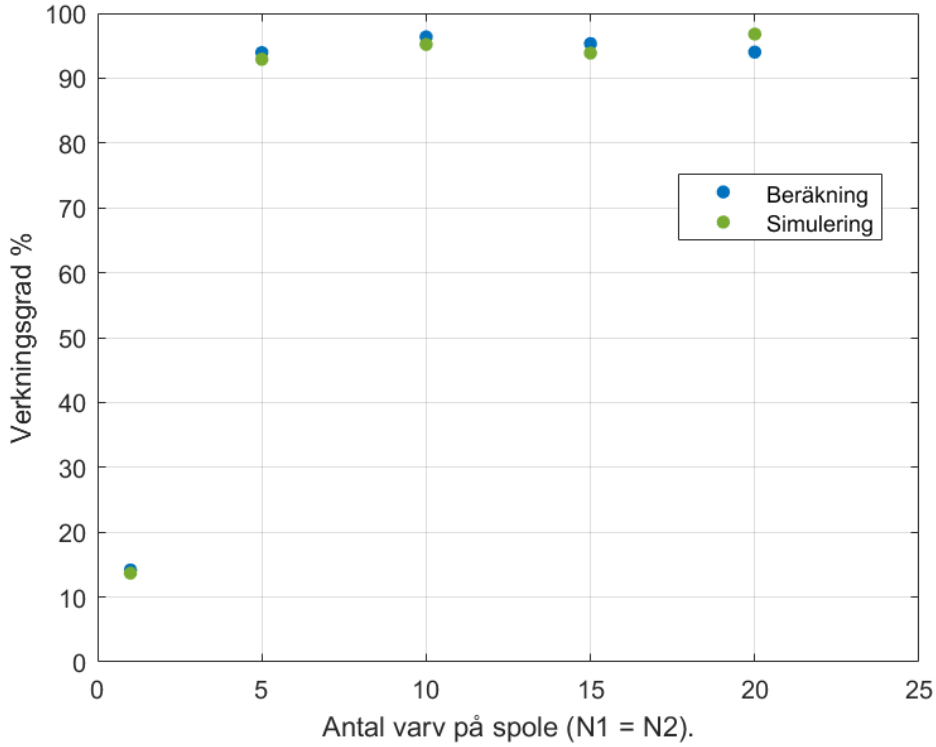
För att undersöka hur de olika parametrar vid spolens design påverkar överföring har simuleringar gjorts för att försöka verifiera beräkning av kopplingens verkningsgrad.

6.1 Verkningsgrad för olika topologier

Från beräkningarna kan värden på kopplingsfaktor, induktans och resistans för olika spolar användas för att simulera överföringens verkningsgrad vid olika kopplingstopolgier i LTspice.

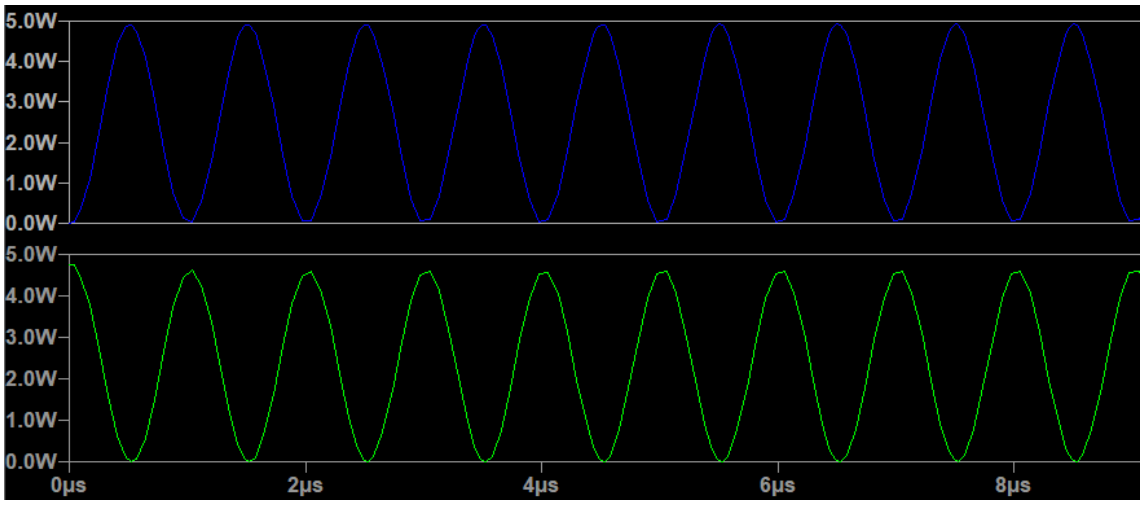


Figur 6.1: Jämförelse av beräkningar kontra simulering för verkningsgrad vid olika antal varvtal på spolar och serie-serie koppling.



Figur 6.2: Jämförelse av beräkningar kontra simulering för verkningsgrad vid olika antal varvtal på spolar och serie-parallell koppling.

I figur 6.1 ser vi att simulering följer en relativt god motsvarighet gentemot beräkningar, särskilt vid högre varvtal. Simulering av SP-topologin i 6.2 visar en ännu starkare korrelation med beräkningarna. De mindre avvikelser som går att urskilja kan bero på variationer i hur LTspice utför sina beräkningar och om ytterligare faktorer tas i åtanke.



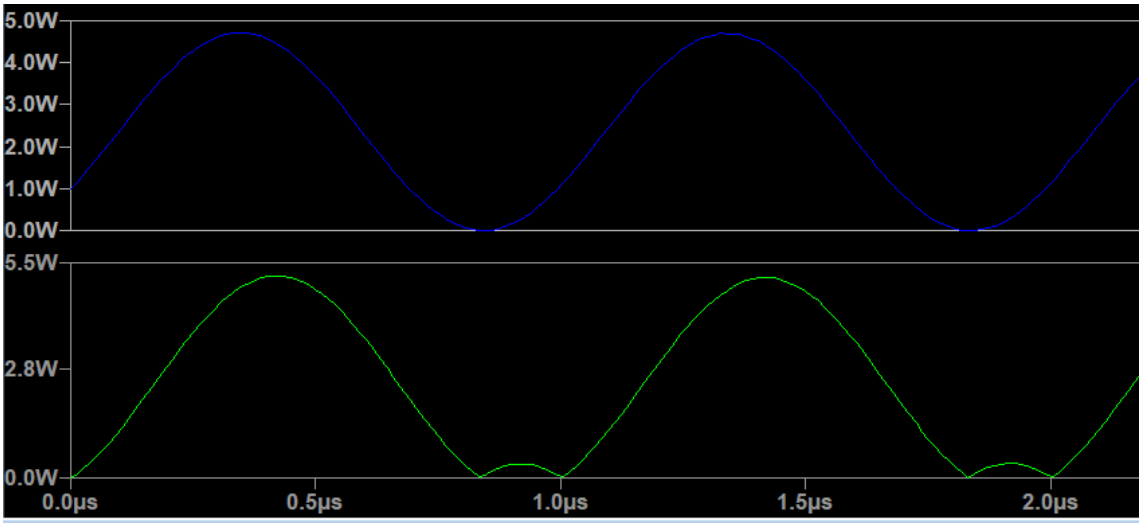
Figur 6.3: Simulering av utgående effekt (grön kurva) och ingående effekt (blå kurva) för koppling med SS-topologi med parametrar enligt tabell 6.1

.

Tabell 6.1: Parametrar vid simulering av SS-topologi vid 13 varv.

Parameter	Värde
$Frekvens$	$500kHz$
Vin	$6.5V$
C_1	$5.23nF$
C_2	$5.23nF$
L_1	$19.37\mu H$
L_2	$19.37\mu H$
R_1	0.1996Ω
R_2	0.1996Ω
R_L	50Ω
$Kopplingsfaktor$	0.33

I figur 6.3 görs en enkel simulering på en potentiell spole för systemet där utgående effekten studeras. Från simuleringen ser vi en verkningsgrad på 93% och en utgående effekt på 2.29W. Detta stämmer väl överens med de beräkningar som gjordes i förra avsnittet där beräknad verkningsgrad var 94.82% och en ingående spänning på på 6.5V gav en effekt på 2.5W.



Figur 6.4: Simulering av utgående effekt (blå kurva) och ingående effekt (grön kurva) för koppling med SP-topologi med parametrar enligt tabell 6.2

.

Tabell 6.2: Parametrar vid simulering av SP-topologi vid 13 varv.

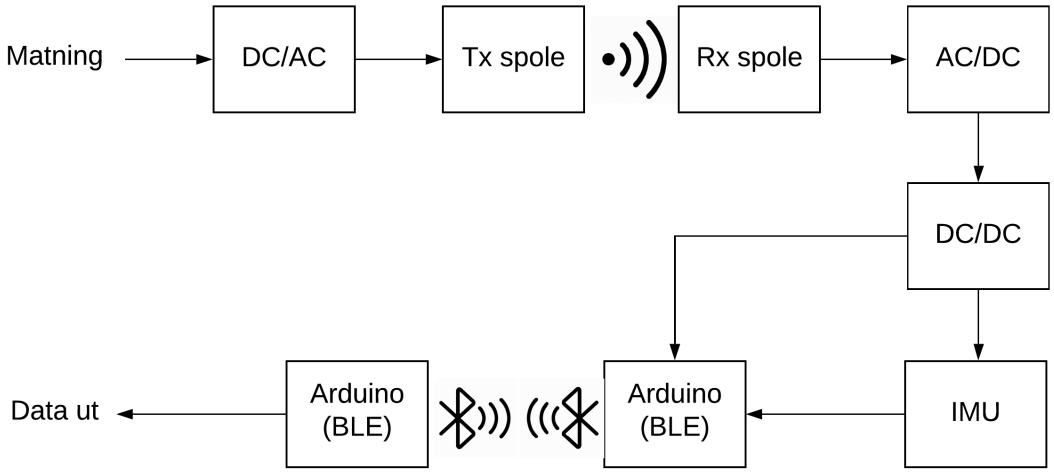
Parameter	Värde
$Frekvens$	$500kHz$
Vin	$8.4V$
C_1	$5.23nF$
C_2	$5.23nF$
L_1	$19.37\mu H$
L_2	$19.37\mu H$
R_1	0.1996Ω
R_2	0.1996Ω
R_L	100Ω
$Kopplingsfaktor$	0.33

Det görs även en simulering av utgående effekt och verkningsgrad för SP-topologi vilket kan beskådas i figur 6.4. Till skillnad från SS-topologin så ser vi något som ser ut som en distortion på den ingående signalen, detta beror sannolikt på att reaktiv effekt reflekteras tillbaka från lasten. För att motverka en del av reflektionen så höjdes lasten till 100Ω, detta förbättrade resultatet en aning men en distortion kan fortfarande urskiljas. Från simuleringen ser vi en verkningsgrad på 91% och en utgående effekt på 2.31W. Dessa värden stämmer mindre bra med beräkningarna jämfört med SS-simuleringen. Den beräknade verkningsgraden var 95.81% och den utgående effekten vid en ingående spänning på 8.4V var beräknad till 2.5W. Från detta kan vi dra slutsatsen att beräkningarna inte tar hänsyn till den reflektion som framkom i LTSpice.

7

Resultat

För att avgöra hur systemet slutgiltiga design bör se ut har mätningar och tester utförts på spoldesign och datakommunikation. Nedan följer även en överskådlig bild tillsammans med en beskrivning över hur det tänkta systemet ser ut med kraftöverföringen tillsammans med dataöverföringen. Systemet kunde däremot inte realiseras i sin helhet då en DC/AC-omvandlare (oscillator) med tillräckligt hög uteffekt vid önskad frekvens inte fanns att tillgå, detta resulterade i att IMU:n drivs av den trådlösa kraftöverföringen men inte Arduinon.



Figur 7.1: Blockdiagram för det tänkta systemet.

För kraftöverföringen sker matningen från grävmaskinen och går vidare till en DC/AC-omvandlare, detta för att få en AC-spänning vid den önskade frekvensen. AC-spänningen går sedan till sändarspolen (Tx) där kraften förs över trådlöst till mottagarspolen (Rx). Då spänningen är i AC-form vid mottagarspolen används en likriktare som AC/DC-omvandlare för att skapa en DC-spänning. För att sedan ge en stabil matningsspänning till IMUn och Arduinon, oavsett placering av sändarspolen och mottagarspolen, används en DC/DC-omvandlare i form av en spänningsregulator. Vid dataöverföringen kommer IMU:n på grävskopan konstant skicka data som den lägger ut på CAN-bussen. Arduinon tar emot datan, packeterar och skickar den via Bluetooth till Arduinon på grävmaskinens sida. Datan packeteras sedan upp och läggs åter ut på CAN-bussen på grävmaskinens sida.

7.1 Mätningar spoldesign

Mätningar på olika spolar och dess överföringsförmåga har mätts i laborationsmiljö för att verifiera beräkningar och simuleringar samt undersöka vilken design som bör användas i systemet. Ett system har därefter skapats för att bekräfta konceptet.

7.1.1 Induktans

Cylinderformade spolar på 13 varv konstruerades för att kunna jämföras mot beräkningarna, även platta spolar på 13 varv konstruerades för att kunna jämföra de tillverkade spolarna mot varandra. Inga beräkningar har däremots gjort på de platta spolarna. Induktansen mättes upp genom att löda fast en kondensator på 10nF på spolarna. De kopplades sedan upp mot en spektrum-analysator där det gick att urskilja vid vilken frekvens maximal förstärkning uppnåddes. Då maximal förstärkning skedde vid en viss frekvens kunde spolens induktans beräknas enligt formel 3.3. De platta och cylinder-formade spolarnas induktans uppmättes och jämförs med beräkningarna nedan.

Tabell 7.1: Uppmätt induktans för egentillverkade spolar.

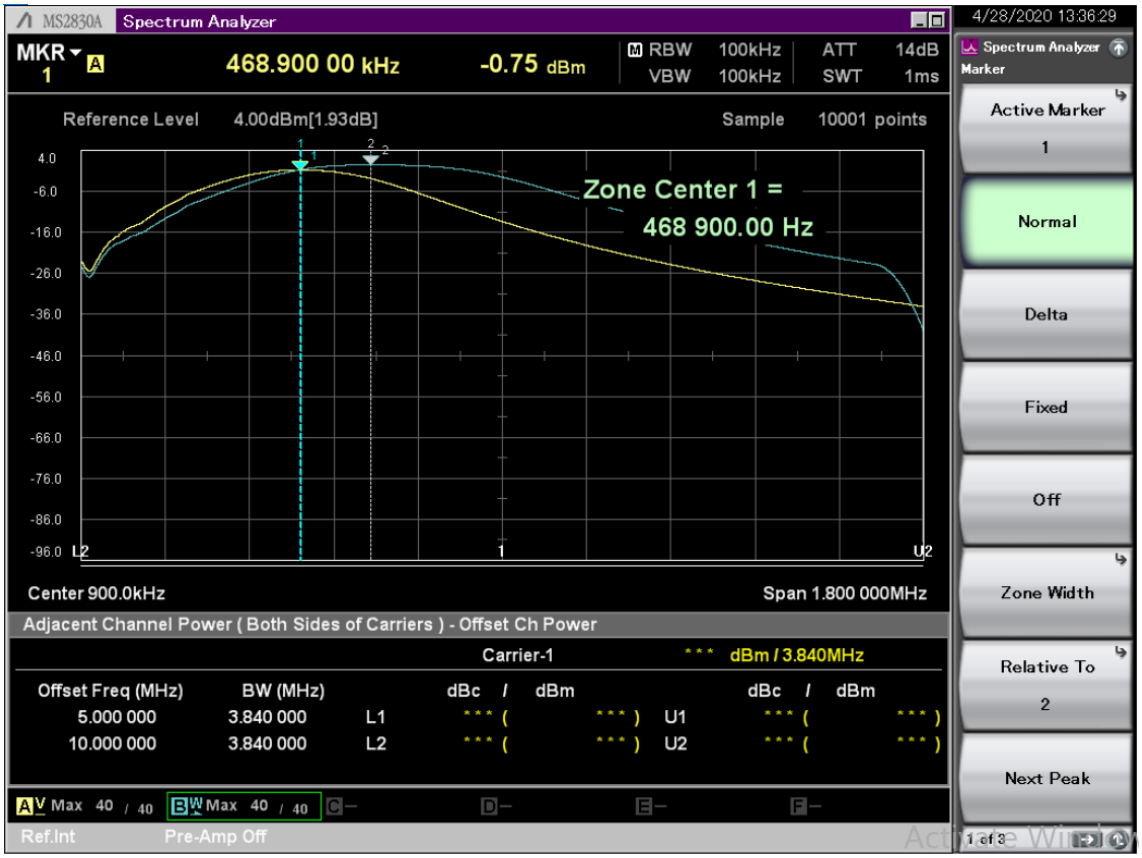
Design	Frekvens, max förstärkning	Uppmätt induktans	Beräknad induktans
Cylinder 1	510 300	$9,73\mu H$	$19.37\mu H$
Cylinder 2	528 480	$9,07\mu H$	$19.37\mu H$
Platt 1	668 520	$5,67\mu H$	-
Platt 2	668 700	$5,66\mu H$	-

Det som kan urskiljas är att den uppmätta och beräknade induktansen för de cylinderformade spolarna inte överstämmer med varandra. Detta kan bero på flera faktorer varav några är att de egentillverkade spolarna inte är konstruerade med den precision som hade behövts för att uppnå beräkningarnas värden. Några av de identifierade faktorerna är att radien på de egentillverkade spolarna inte har en konstant radie på exakt 2cm, vissa av spolarnas varv korsar även varandra vilket kan ha en påverkan på induktansen. En annan faktor är att beräkningarna för induktansen inte tar hänsyn till att dimensionen på spolen ändras när flera varv läggs på, beräkningarna antar därmed att en spole med 20 varv har samma dimensioner som en spole med ett varv. En undersökning gjordes därför med en spole på endast tre varv för att se om den beräknade induktansen stämde bättre överens med den uppmätta. Induktansen på spolen med tre varv beräknades till $1.03\mu H$ och uppmättes till $0.73\mu H$ vilket fortfarande visar en klar skillnad mellan beräkningarna och uppmätta resultat, men felmarginalen har minskat.

7.1.2 Förluster och verkningsgrad

Förluster och verkningsgrad för de olika topologierna testades med de egentillverkade cylinderformade spolarna och de platta spolarna. Spolarna placerades med ett avstånd på 5mm mellan varandra och kopplades upp till spektrum-analysatorn för

att urskilja vilka av de platta och cylinderformade spolarna som hade minst förluster vilket kan beskådas i bilden nedan.



Figur 7.2: Jämförelse av två olika typer av spoldesign och deras kopplingsförmåga. Gul kurva visar två cylinderformade spolar,blå kurva visar två plattformade spolar.

Mätningen visar att de cylinderformade spolarna har en förstärkning på -0.75 dBm medan de platta har en något bättre förstärkning på 0.45 dBm. Därmed borde de platta spolarna ha en bättre verkningsgrad än de cylinderformade då förlusterna är mindre.

Spolarna i 7.2 kopplades därefter upp mot ett signalgenerator med en AC-spänning vid resonansfrekvensen för att vidare undersöka verkningsgraden genom att studera ingående och utgående effekt vid olika topologier.

Tabell 7.2: Uppmätt, beräknad och simulerad verkningsgrad för egentillverkade spolar.

Design och topologi	η uppmätt	η beräknad	simulerad
Cylinder SS	$5,5\%$	94.82%	93%
Cylinder SP	$10,3\%$	95.81%	91%
Platt SS	$6,6\%$	-	-
Platt SP	$44,7\%$	-	-

Resultatet visar stora avvikeser i verkningsgrad gentemot beräkningar och simuleringar vilket dels beror på konstruktionen och induktansavvikelserna som tidigare beskrivits. Däremot går det att urskilja en bra korrelation med beräkningarna i figur 5.2 som tyder på att vid 13 varv ger SP-topologi en bättre överföring än SS-topologi. Det gick inte att urskilja någon distortion på ingången vid SP-topologi vilket simuleringarna i 6.4 visade på varav mätningarna stämde bättre överens med beräkningarna än simuleringarna. Vidare går det även urskilja att de platta spolarna har en bättre verkningsgrad än de cylinderformade vilket stämmer överens med de resultat som framkom i mätningar med spektrum-analysatorn.

Då de egenkonsturerade spolar hade kraftiga brister i konstruktionen testades fabrikstillverkade spolar för att undersöka verkningsgraden och se om den ökade. De fabrikstillverkade spolarna är av platt design och består av två lager där varje lager har 10 varv vilket resulterar i 20 varv totalt. De har en induktans på $24\mu H$, radie på 2,15cm och en av spolarna har en ferit-kärna med tillhörande platta som sköld. Spolen utan ferit-kärna används som sändarspole medan spolen med ferit-kärna används som mottagarspole.

Tabell 7.3: Uppmätt verkningsgrad på de fabrikstillverkade spolarna av platt design.

Topologi	η
SS	95%
SP	$74,1\%$

Att SS-topologi är bättre än SP vid 20 varv stämmer överens med de beräkningarna som gjordes i figur 5.2 vilket bevisas i dessa mätningar. Den uppmätta verkningsgraden för de frabrikstillverkade spolarna är även mycket högre än de egentillverkade och är därmed väl lämpade för projektet.

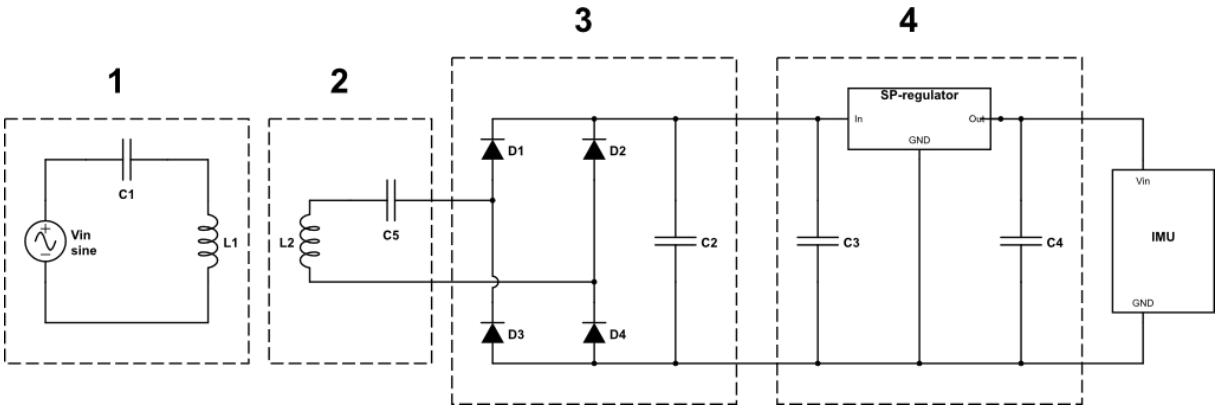
7.1.3 Q-faktor och resistans

Från mätningar kan ett ungefärligt värde på bandbredden för de egentillverkade spolarna tas fram och därmed kan Q-faktorn och resistansen beräknas enligt formel 3.1 samt 3.2. Bandbredden uppmättes till cirka 220kHz för båda de cylinderformade spolarna vilket ger en Q-faktor på 2.3 samt en resistans på 13.8Ω. Detta skiljer oerhört mycket från de beräknade värdena på 0.1996Ω samt Q-faktorn på 304. Då Q-faktorn till stor del är beroende av resistansen och induktansen så kan slutsatsen att det är resistansen tillsammans med induktansen i spolarna som till störst del har påverkat de dåliga resultaten som uppmätts på de egentillverkade spolarna.

7.1.4 Bekräftelse av koncept

Då en DC/AC-omvandlare (oscillator) med tillräckligt hög uteffekt vid önskad frekvens inte fanns att tillgå valdes det att konceptet skulle bevisas genom att använda en våggenerator tillsammans med en förstärkare samt de fabrikstillverkade spolarna. Förstärkaren kunde endast förstärka en insignal på 20kHz vilket var långt från

den önskade frekvensen på 500kHz. Detta resulterade i att det krävdes en effekt på 102W (19.8V vid 5.14A) för att försörja IMU:n.

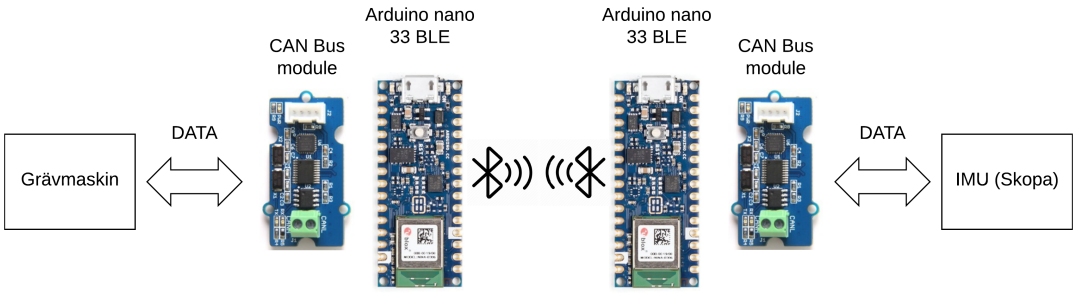


Figur 7.3: Kretsschema över konceptet.

I figur 7.3 kan kretsen som användes för att bevisa konceptet skådas. Ruta ett består av sändarspolen, en kondensator och spänningskällan. Ruta två är mottagarspolen med tillhörande kondensator, den följs av ruta tre som innehåller likriktaren med en glättningskondensator (C2). Ruta fyra innehåller en spänningsregulator som ger en jämn spänning till IMU:n, två kondensatorer (C3, C4) används även för att filtrera bort kvarstående rippel från likriktaren.

7.2 Datakommunikaton med Bluetooth via CAN-bus

Ett system för trådlös trådlös datakommunikation (envägskommunikation) togs fram med hjälp av två stycken Arduino MKR 1010 wifi med varsin Serial transceiver CAN bus module. Detta system kan läsa data från IMU:n via CAN-modulen och skicka vidare denna data via en bluetoothlänk mellan båda Arduinos för att sedan återigen skriva ut data på CAN-bus till grävmaskinen enligt figur 7.4. Ett tvåvägskommunkationssystem realiserades däremot inte.



Figur 7.4: Flödesschema för datakommunikationssystem via Bluetooth med CAN-bus. Observera att komponenterna i figuren ej är av samma modell som i projektet.

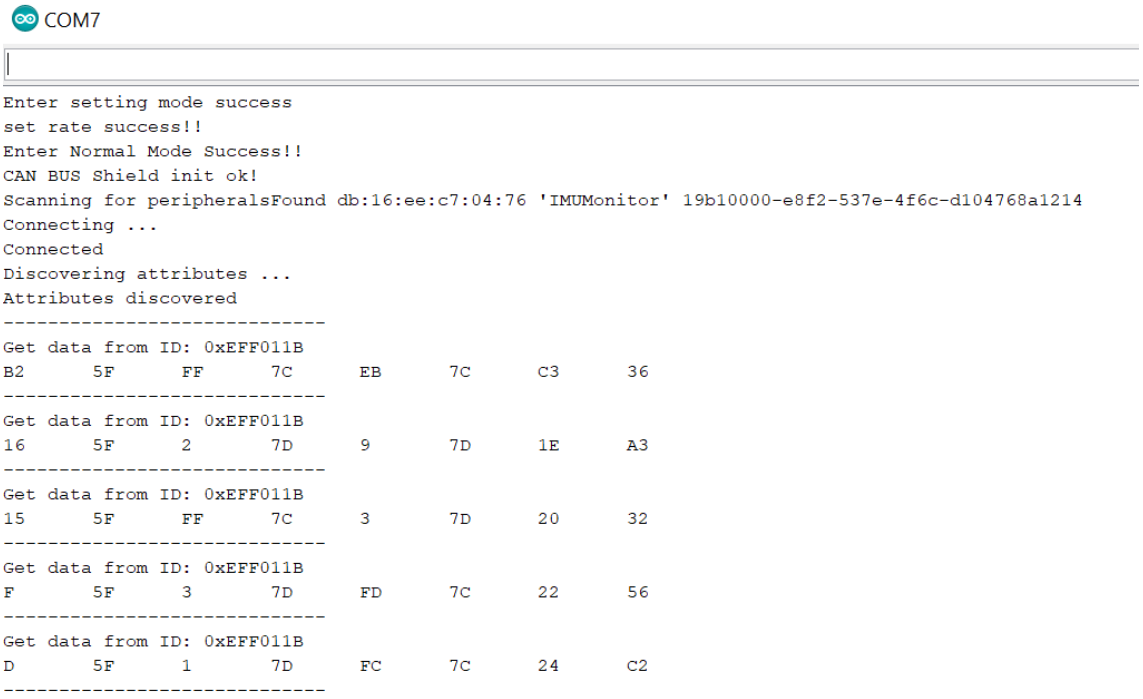
Den Arduino som sitter på grävmaskinens sida ställs in som en peripheral enehet med en tillhörande karakteristik för läsning och skrivning av data, samtidigt ställs Arduinon på IMU:ns sida in som en central enhet. Den centrala enheten läser data från IMU:n och skriver vidare till karakteristiken på grävmaskinens sida. I detta projekt kopplas en Arduino MKR 1010 wifi ihop med CAN-shield enligt följande tabell.

Tabell 7.4: Kopplingslayout för Arduino MKR 1010 wifi och Arduino MKR CAN-shield. Kopplingen ser lika ut på båda sidor av systemet.

Pin namn	Arduino	CAN-shield
CS	D3	D3
INT	D7	D7
SCK	D9	D9
MOSI	D8	D8
MISO	D10	D10
GND	GND	GND
VCC	+5V	Vin

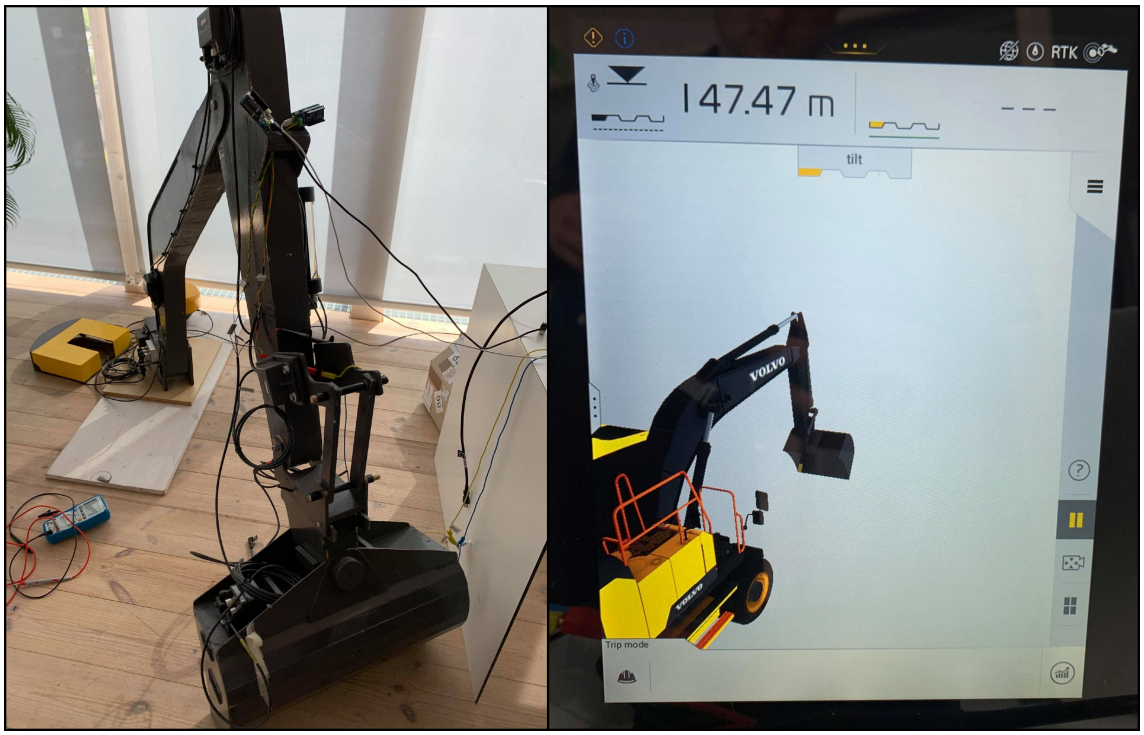
Programmet inleds med att initiera CAN-bus shielden till 500kbps. Efter detta initieras BLE och en skriv och läsbar karakteristik skapas, en anslutning mellan peripheral och central enhet upprättas därefter. När en anslutning har slutförts inleder centralenheten läsning från IMU:n via CAN-bussen. CAN-id som består av datatypen long på fyra bytes delas upp i fyra individuella bytes för att packas ihop med

datan som består av åtta skilda bytes. Den ihoppackade datan skrivs via karakteristiken till peripheralenheten som packar upp datan, lägger ihop de fyra första byten till en long för att återskapa CAN-id och datan läggs i en buffert. Datan skickas sedan ut på CAN-bussen på grävmaskinens sida. I ett senare test upptäcktes att en del meddelanden gick förlorade vid överföringen. Detta berodde på att BLE:n hos Arduino MKR-enheten ej skrev till karakteristiken tillräckligt snabbt. Problemet kringgås genom att upprepa läsning från IMU:n och spara ner tre separata meddelanden i varsin buffert innan de sedan skrivs via BLE var för sig. Se bilaga B och C för fullständig kod. På liknande sätt skulle en tvåvägskommunikation kunna upprättas för konfiguration av IMU:n på skopan. Det genom att sätta upp ytterligare en karakteristik på den perihpherala enheten som istället laddar upp data på en karakteristik som den centrala enheten på skopan läser av och sedan skickar vidare till IMU:n via CAN-bussen.



Figur 7.5: Seriell övervakning av centrala enheten som är kopplad till IMU:n. CAN-bus shield och Bluetooth-länk initieras varefter data läses kontinuerligt från IMU:n som sedan skrivs till peripherala enheten.

Det gjordes ett skarpt test av dataöverföringen genom att koppla upp systemet mot en maskinrigg på Cpacs kontor, därefter kunde dataöverföringen testas och i realtid undersökas huruvida datan kommer över på korrekt sätt. Maskinriggen med tillhörande display som visualriserar skopans position kan skådas i figur 7.6 och kopplas upp enligt konceptet i figur 7.4. Testet anses lyckat då skopans rörelser på displayen matchar skopans rörelser i verkligheten.



Figur 7.6: Uppkopplad trådlös CAN-kommunikation. Maskinrigg (vänster), Skärm med realtidsuppdatering i Co-Pilot (höger).

8

Diskussion och slutsats

I detta projekt har olika metoder för trådlös kraftöverföring samt trådlös datakommuniktion undersökts i avsikt att skapa en produkt som kan utnyttja de fördelar en trådlös koppling kan medföra och implementera detta i grävmaskiners koppling med skopa och tillhörande elektronik. Efter en översiktlig analys gjordes en djupare studie av trådlös kraftöverföring med induktion och trådlös datakommunikation med Bluetooth.

En bild av hur ett system för trådlös kraftöverföring med induktion skulle kunna konstrueras skapades relativt snabbt men efter allt mer fördjupning av ämnet konstaterades att tekniken har väldigt lite begränsningar i hur djupt man kan gå inom optimering och förståelse. Därför behövde mindre fokus ägnas åt att uppfylla kravspecifikationen och mer fokus till att istället försöka bevisa ett fungerande koncept. Dessutom behövde nya avgränsningar och beslut göras för att komma vidare i projektet. Dessa avgränsningar gäller främst spoldesign då detta är ett ämne som är extremt brett och har ett stort utbud av olika studier med olika resultat och slutsatser. Exempel på detta dök upp gällande beräkningen av spolens resistans och induktans, vid induktansen gav de formler vi använt i Matlab ej bra korrelation med vad som faktiskt mättes upp i laboration medan andra formler och verktyg online gav resultat väldigt likt de uppmätta. Ytterligare ett exempel på avgränsning som gjordes vid teknikfördjupningen var exkluderandet av teori om feritkärnor och litz-tråd. Feritkärnor har flera studier som visar på ökad överföringsförmåga men inkluderades inte i detta projektet då denna ökning ej ansågs tillräckligt signifikant samt att de dessutom är relativt dyra. I ett liknande projekt hade litz-tråd varit intressant att undersöka då det signifikant hade kunnat minska resistansen på spolarna vid högre frekvenser. En kraftig minskning av resistansen hade kunnat resultera i att egentillverkade spolar blir tillräckligt effektiva för att använda i ett projekt.

Övrigt gav beräkningarna relativt goda resultat i korrelation med simuleringarna. De största avvikelserna uppstod vid mätning på de egentillverkade spolarna som inte alls nådde upp till de simulerade och beräknade värden på till exempel verkningsgrad. Detta beror till störst del i brister vid konstruktion av spolarna. På grund av tidsbrist och begränsad tillgång till laborationamiljö blev möjligheterna till väl konstruerade spolar väldigt påverkade. Vid bättre omständigheter hade mer tid och resurser ägnats åt att konstruera spolar och mätmiljö med mer exakta dimensioner och formgivning för att få bättre och mer pålitliga mätresultat. Det hade även varit möjligt att jämföra teoretiska värden med mätningar och vid stora korrelationer

mellan dessa gå tillbaka och undersöka andra teoretiska tillvägagångssätt för att uppnå bättre teoretiska värden.

Efter till en början översiktlig analys av olika tekniker för trådlös datakommunikation fanns flera tekniker med hög potential för vad som ville åstadkommas. NFMI hade exempelvis goda egenskaper för en robust lösning med bra kompatibilitet med kraftöverföringssystemet men till slut valdes Bluetooth som den teknik att gå vidare med. Detta pågrund av sin höga överföringshastighet och att tekniken är väl etablerad på marknaden vilket gav goda förutsättningar i detta projektet. Den största utmaningen för Bluetooth i detta sammanhang är penetrationsförmåga genom vatten. Detta undersöktes och räknades på noga och slutsatsen blev att det endast kan komma att bli ett problem i situationer där systemet helt omsluts och äventyras av saltvatten då maximalt avstånd för dataöverföring i sådana förhållanden beräknades till ca 5mm, vilket är ungefär det avstånd som anges i kravspecifikation. Dessa situationer ansågs vara väldigt specifika samt ej tillräckligt frekventa i verkligheten och valdes därför att förbises. Därmed har ett system för trådlös datakommunikation med CAN-bus via BLE konstruerats med hjälp av två stycken Arduino MKR 1010 wifi enheter. På grund av tidsbrist och begränsningar i testmöjligheter är BLE länken i nuläget inställd för endast envägskommunikation från skopa till grävmaskin men koncept för hur tvåvägskommunikation kan upprättas genom mindre modifieringar av koden. Systemet testades på en maskinrigg med lyckat resultat. Med mer tid till förfogande hade även datahastighetet varit intressant att mäta upp för att säkerställa att kravet uppnås.

Sammanfattningsvis har koncept för både trådlös kraftöverföring och datakommunikation tagits fram. Kraftöverföring med magnetisk resonans har potential att kunna förse IMU med tillräckligt energi för att operera enligt förväntat. Resultaten visar att två platta spolar med samma form och storlek samt höga varvtal är mest optimalt för maximal kraftöverföring. En viktig faktor är konstruktion av spolen som bör ske med hög noggrannhet och extra övervägande gällande användning av litz-tråd och ferritkärnor kan behöva läggas i åtanke om kraftöverföringen ej mäter tillräckliga nivåer. Ett system för trådlös datakommunikation med CAN-bus (envägskommunikation) har presenterats med hjälp av två Arduino enheter och BLE-teknik. Datahastighet har ej mätts upp men vid test har data överförts med tillräckligt hög hastighet för att i realtid uppdatera grävskopans position. Slutligen, koncept för hur ett komplett trådlöst system åt IMU:n kan realiseras har undersökts och en fungerande prototyp är inom räckhåll.

Litteraturförteckning

[1] H. Atallah, "*Design of compact high efficient WPT system utilizing half ring resonators (HRRs) DGS for short range applications*,"IEEE, jun. 2013, doi:10.1109/NRSC.2018.8354360

[2] V. Choudhary, S. Singh, V. Kumar och D. Prashar, "*Wireless Power Transmission: An Innovative Idea*,"International Journal of Educational Planning Administration, Delhi, Indien, 2249-3093, no. 3, vol. 1, 2011. [Online]. Tillgänlig: `https://www.ripublication.com/ijepa/ijepav1n3_2.pdf`, hämtad: 2020-05-25.

[3] *Magnetic Resonance Method of Wireless Power Transfer Technology for Industrial Equipment,".* [Online]. Tillgänglig: `product.tdk.com/info/en/techlibrary/developing/wireless/index.html?fbclid=IwAR0_55d2qCPc2JuN17B7cxsbsIKmIjG81ttn4wmu2H4mySVXHjA7aQCyGso`.

[4] S. Chatterje, A. Lyer, C. Bharatiraja, I. Vaghasia and V. Rajesh, *Design Optimisation for an Efficient Wireless Power Transfer System for Electric Vehicles,"* Science Direct, vol. 117 jun. 2017, doi:10.1016/j.egypro.2017.05.223

[5] F. Vasconcelos, L. Figueiredo, A. Almeida and J. C. Ferreira, "*SMART sensor network: With Bluetooth low energy and CAN-BUS,"* 2017 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI), Bari, 2017, pp. 217-223, doi: 10.1109/SOLI.2017.8120997.

[6] "*Radio Versions,"* 2020. [Online]. Tillgänglig: `https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth-technology/radio-versions/`, Hämtad: 2020-05-26.

[7] Communication system providing near field communication (NFC) transaction features and related methods, av D. Ryan W. Moosavi (2011, 29 mars). US10223743B2 [Online]. Tillgänglig: `https://patents.google.com/patent/US10223743B2/en`, hämtad: datum.

[8] S. Hong, S. Jeong, S. Lee, B. Sim, H. Kim and J. Kim, *Ä Dual Resonance Near Field Communication Coil for EMF Reduction in Near Field Communication and Wireless Power Transfer Dual Coil System,"* 2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal Power Integrity (EMC+SIPI), New Orleans, LA, USA, 2019, pp. 644-647, doi: 10.1109/ISEMC.2019.8825221.

[9] G. Monti et al., *"EMC and EMI issues of WPT systems for wearable and implantable devices,"* in IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 67-77, First Quarter 2018, doi: 10.1109/MEMC.0.8339550.

[10] R. Kramer and M. D. Katz, "*Short-Range Wireless Communications: Emerging Technologies and Applications",* Hoboken, New Yersey, USA: Wiley, 2009.

[Online]. Tillgänglig: https://books.google.se/books?hl=sv&lr=&id=EeMlJlNMpW0C&oi=fnd&pg=PR7&dq=wireless+short+range+communication&ots=1Emna-WwYD&sig=R5DLPf8MpYTKSLNCpAeUN-BqzHM&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false, hämtad: 2020-05-26.

[11] M. Heddebaut, V. Deniau and K. Adouane, Ïn-vehicle WLAN radio-frequency communication characterization,"in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 5, no. 2, pp. 114-121, June 2004, doi: 10.1109/TITS.2004.828172.

[12] A. Pal and K. Kant, *NFMI: Connectivity for Short-Range IoT Applications,"* in Computer, vol. 52, no. 2, pp. 63-67, Feb. 2019, doi: 10.1109/MC.2019.2892862.

[13] A. Bensky, "*Short-range Wireless Communication",* 3 uppl. Kidlington, Oxford, United Kingdom: Newnes, 2019. [Online]. Tillgänglig: https://books.google.se/books?hl=sv&lr=&id=TtCmDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=wireless+short+range+communication&ots=jhedYAI8RD&sig=B7BVVd0OGg_ruqP6r-qTs67HVzE&redir_esc=y#v=onepage&q=wireless%20short%20range%20communication&f=false, hämtad: 2020-05-26.

[14] J. Lucas, Åhat Are Microwaves?"2018 [Online]. Available: https://www.livescience.com/50259-microwaves.html, Accessed on: May 26, 2020.

[15] M. M. El Rayes, G. Nagib, W. G. A. Abdelaal, *Ä Review on Wireless Power Transfer,"* 2017, doi: 10.14445/22315381/IJETT-V40P244

[16] S. Kumar, et al., "Wireless power transmission – a prospective idea for future", Undergraduate Academic Research Journal (UARJ), ISSN 2278-1129, Vol. 1, Issue 3, 2012.

[17] Electronicsforu, Åhat Is A Piezoelectric Sensor?"2019 [Online]. Available: https://www.electronicsforu.com/resources/learn-electronics/piezoelectric-sensor-basics, Accessed on: May 26, 2020.

[18] E-Peas, "Vibrations."[Online]. Available: https://e-peas.com/types/energy-harvesting/vibration/, Accessed on: May 26, 2020.

[19] R. V. Taalla, M. S. Arefin, A. Kaynak and A. Z. Kouzani, *Ä Review on Miniaturized Ultrasonic Wireless Power Transfer to Implantable Medical Devices,"* in IEEE Access, vol. 7, pp. 2092-2106, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2886780.

[20] F. Dimroth, *Fraunhofer,"* 2020. [Online]. Tillgänglig: https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/photovoltaics/iii-v-and-concentrator-photovoltaics.html, hämtad: 2020-06-04.

[21] G. Ghibaudo, R. M. Duarte, G. K. Felic, *"Analysis of the Coupling Coefficient in Inductive Energy Transfer Systems."* Hindawi Publishing Corporation), vol. 2014. 17 Jun. 2014, doi:10.1155/2014/951624

[22] M. Nisshagen, E. Sjöstrand, Åireless power transfer using resonant inductive coupling,"examensarbete för masterexamen, Institution för energi och miljö, Chalmers tekniska högskola, Göteborg, Sverige, 2017. [Online]. Tillgänglig: https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/253228, hämtad: 2020-05-26.

[23] X. Liu, C. Xia, X. Yuan,. *Study of the Circular Flat Spiral Coil Structure Effect on Wireless Power Transfer System Performance.* 2018 Jiangsu Province Laboratory of Mining Electric and Automation, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China, Energies 2018, 11, 2875, doi: 10.3390/en11112875

[24] Wireless Power Consortium, "Qi Coupling Factor."[Online]. Available: https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/magnetic-induction-technology/how-it-works/coupling-factor.html, Accessed on: May 26, 2020.

[25] ElectronicsTutorials, Series Resonance Circuit."[Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/series-resonance.html, Accessed on: May 26, 2020.

[26] ElectronicsTutorials, Series Resonance Circuit."[Online]. Available: https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/serie-resonance.html, Accessed on: May 26, 2020.

[27] I. Sîrbu and L. Mandache, *"Comparative analysis of different topologies for wireless power transfer systems,"* 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe), Milan, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/EEEIC.2017.7977863.

[28] Arduino, ÄrduinoBLE Library."[Online]. Available: https://www.arduino.cc/en/Reference/ArduinoBLE, Accessed on: May 26, 2020.

[29] Qureshi, Umair Mujtaba et al. *"RF Path and Absorption Loss Estimation for Underwater Wireless Sensor Networks in Different Water Environments."* Sensors (Basel, Switzerland) vol. 16,6 890. 16 Jun. 2016, doi:10.3390/s16060890

[30] A. Pozzebon, *Bringing near field communication under water: short range data exchange in fresh and salt water,"* 2015 International EURASIP Workshop on RFID Technology (EURFID), Rosenheim, 2015, pp. 152-156, doi: 10.1109/EURFID.2015.7332401.

A

Matlab-program

Matlab-program för beräkning av kraftöverföring och spoldesign.

```
%%Program berakna spole
%-------------------------------------------------------------------
%Inputs
N1 = 13; %Varv pa sandarspole
N2 = 13; %Varv pa mottagarspole
f = 500*10^3; %Frekvens som ska anvandas (Hz)
rwire = 0.00028; %Radien pa koppartraden (m)
a = 0.02; %Radie sandarspole (m)
b = 0.02; %Radie mottagarspole (m)
d = 0.005; %Avstand mellan spolarna (m)
V = 8.5; %Inspanning (V)
RL = 50; %lastresistans

%Fasta parametrar
Sigma = 58.14*10^6; %Konduktiviteten hos koppar
u0 = 4*pi*10^-7; %Magnetiska konstanten
w=2*pi*f; %Vinkelfrekvensen

%-------------------------------------------------------------------
%Gemensam induktans
m1 = sqrt((4*a*b)/((a+b)^2+d^2));
[K1,E1] = ellipke(m1^2);

%Gemensamma induktansen vid ett varv
M0 = ((2*u0*sqrt(a*b))/m1)*((1-(m1^2)/2)*K1-E1)

M = M0*N1*N2 %Totala gemensama induktansen med x varv

%-------------------------------------------------------------------
%Resistans spole
Atrad = pi*rwire^2; %Arean pa koppartraden
la = 2*pi*a; %Langden pa koppartraden
lb = 2*pi*b; %Langden pa koppartraden

%Skin depth
Delta = 1/sqrt(pi*f*u0*Sigma);
```

```
%Resistans for ett varv trad
Rdca = 1/(Sigma*pi*rwire^2)
Raca = (la*Rdca)*(1/4+2*rwire/(4*Delta))

Rdcb = 1/(Sigma*pi*rwire^2)
Racb = (lb*Rdcb)*(1/4+2*rwire/(4*Delta))

%Resistansen for x antal varv
R1 = Raca*N1
R2 = Racb*N2

%-------------------------------------------------------------
%Sjalvinduktans
Linnera = u0*a/4; %Inre induktans
Linnerb = u0*b/4;

m2a = 4*a*(a-rwire)/(2*a-rwire)^2;
m2b = 4*b*(b-rwire)/(2*b-rwire)^2;

[K2a,E2a] = ellipke(m2a);
[K2b,E2b] = ellipke(m2b);

%Yttre induktans
Loutera = u0*((2*a-rwire)/2)*((2-m2a)*K2a-2*E2a);
Louterb = u0*((2*b-rwire)/2)*((2-m2b)*K2b-2*E2b);

%Induktans for ett varv
L0a = (Linnera+Loutera)
L0b = (Linnerb+Louterb)

%Induktans med x varv
L1 = L0a*N1^2
L2 = L0b*N2^2


%-------------------------------------------------------------
%Verkningsgrad och utgaende effekt
C1 = 1/(L1*w^2)%Kondensatorns varde
C2 = 1/(L2*w^2)

%Serie-serie-koppling

%Ingaende effekt
PinSS = (V^2*(R2+RL))/(R1*R2+w^2*M^2)
%Utgaende effekt
PLSS = (w^2*M^2*V^2*RL)/(R1*(R2+RL)+w^2*M^2)^2

EffSS = PLSS/PinSS %Verkningsgrad Serie-Serie-koppling
```

```
%Serie-Parallell-koppling
A = L2 - RL^2*C2/(1+w^2*RL^2*C2^2);
B = R2 + RL/(1+w^2*RL^2*C2^2);

RinSP = R1 + w^2*M^2*B/(B^2+w^2*A^2);

XinSP = w*M*(L1/M-1/(w^2*M*C1)-w^2*A*M/(B^2+w^2*A^2));

%Ingaende effekt
PinSP = V^2*RinSP/(RinSP^2+XinSP^2)
%Utgaende effekt
PLSP = V^2*w^2*M^2*(B-R2)/((RinSP^2+XinSP^2)*(B^2+w^2*A^2))

EffSP = PLSP/PinSP %Verkningsgrad Serie-parallell-koppling

%Parallell-Parallell-koppling
Ax = M*(L1/M-1/((w^2*M*C1)-w^2*A*M/(B^2+w^2*A^2)));
Br = R1 + w^2*M^2*B/(B^2+w^2*A^2);

RinPP = Br/(w^2*C1^2*(Br^2+w^2*Ax^2));
XinPP = -1/(w*C1)-w*Ax/(w^2*C1^2*(Br^2+w^2*Ax^2));

%Utgaende effekt
PLPP = V^2*RL*M^2*(B-R2)^2*(1/RL^2+w^2*C2^2)/
(C1^2*(RinPP^2+XinPP^2)*(B^2+w^2*A^2)*(Br^2+w^2*Ax^2))
%Verkningsgrad
EffPP = RL*M^2*(B-R2)^2*(1/RL^2+w^2*C2^2)/
(RinPP*C1^2*(B^2+w^2*A^2)*(Br^2+w^2*Ax^2))

%-------------------------------------------------------------
%Q-faktor
Q1 = (w*L1)/R1
Q2 = (w*L2)/R2

%-------------------------------------------------------------
%Kopplingsfaktor
k = M/sqrt(L1*L2)
```

B

Kod peripheral-enhet

Arduino-program för peripheral-enhet. Tar emot data via BLE som läggs ut på CAN-bussen.

```
#include <ArduinoBLE.h>
#include <SPI.h>
#include "mcp_can.h"

BLEService IMUService("19B10000-E8F2-537E-4F6C-D104768A1214");
// BLE IMU Service

// BLE IMU Characteristic - custom 128-bit UUID - 12 byte
BLECharacteristic IMUCharacteristic("19B10001-E8F2-537E-
4F6C-D104768A1214", BLERead | BLEWrite | BLENotify, 12);
const int SPI_CS_PIN = 3;

MCP_CAN CAN(SPI_CS_PIN); // Set CS pin



void setup() {
  Serial.begin(115200);
  //while(!Serial);

  //Aktivera BLE
  while (!BLE.begin())
  {
    Serial.println("starting BLE failed!");
    delay (1);
  }
  Serial.println("Starting BLE ok!");

  BLE.setLocalName("IMUMonitor");
  BLE.setAdvertisedService(IMUService);
  IMUService.addCharacteristic(IMUCharacteristic);
  BLE.addService(IMUService);

  BLE.advertise();
  Serial.println("Bluetooth device active,
  waiting for connections...");
```

```
  Serial.println("BLE IMU Peripheral");

// Activate CAN-Bus
 while (CAN_OK != CAN.begin(CAN_500KBPS)) {
 // init can bus : baudrate = 500k
      Serial.println("CAN BUS Shield init fail");
      Serial.println(" Init CAN BUS Shield again");
      delay(100);
  }
  Serial.println("CAN BUS Shield init ok!");
}

void loop() {
  unsigned char buf[12]; //Buffert for CAN ID and CAN data
  unsigned char temp[8] = {0,0,0,0,0,0,0,0};
  //Temporary storage for CAN data
  unsigned char temp2[4]; //Temporary storage for CAN ID
  unsigned long canId;

  // listen for BLE peripherals to connect:
  BLEDevice central = BLE.central();

  // if a central is connected to peripheral:
  if (central) {
    Serial.print("Connected to central: ");
    // print the central's MAC address:
    Serial.println(central.address());

    // while the central is still connected to peripheral:
    while (central.connected()) {

      //Read data sent from central to the characteristic
      IMUCharacteristic.readValue((unsigned long *) &buf, 12);

      if (!( (temp[0] == buf[0]) && (temp[1] == buf[1]) &&
      (temp[2] == buf[2]) && (temp[3] == buf[3]) &&
      (temp[4] == buf[4]) && (temp[5] == buf[5]) &&
      (temp[6] == buf[6]) && (temp[7] == buf[7]) )) {

        //Unpack CAN id from buffert
        temp2[3] = (buf[8]);
        temp2[2] = (buf[9]);
        temp2[1] = (buf[10]);
        temp2[0] = (buf[11]);
        canId = * (long *)temp2;
        Serial.println("------------------------------");
        Serial.print("Get data from ID: 0x");
        Serial.println(canId, HEX);
```

```
        //Unpack data from buffert
        for (int i = 0; i < 8; i++) { // print the data
            Serial.print(buf[i], HEX);
            Serial.print("\t");
            temp[i] = buf[i];
        }

        Serial.println();
      }
      CAN.sendMsgBuf(canId, 0, 8, temp);
    }
    // When the central disconnects, print it out:
    Serial.print(F("Disconnected from central: "));
    Serial.println(central.address());
  }
}
```

C

Kod central-enhet

Arduino-program för central-enhet. Läser av data från CAN-bussen som skickas via BLE.

```
#include <ArduinoBLE.h>
#include <SPI.h>
#include "mcp_can.h"

const int SPI_CS_PIN = 3;     //Set CS-pin
MCP_CAN CAN(SPI_CS_PIN);

void setup() {
  Serial.begin(115200);
 while(!Serial);
    while (CAN_OK != CAN.begin(CAN_500KBPS))
    // init can bus : baudrate = 500k
    {
        Serial.println("CAN BUS Shield init fail");
        Serial.println(" Init CAN BUS Shield again");
        delay(100);
    }
   Serial.println("CAN BUS Shield init ok!");

  // initialize the BLE hardware
  if (!BLE.begin())
  {
  Serial.println("starting BLE failed!");
  while (1);
  }

  // start scanning for peripherals
  Serial.print("Scanning for peripherals");

  BLE.scanForUuid("19b10000-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214");
}

void loop() {
  // check if a peripheral has been discovered
  BLEDevice peripheral = BLE.available();
```

```
  if (peripheral) {
    // discovered a peripheral, print out address,
    // local name, and advertised service
    Serial.print("Found ");
    Serial.print(peripheral.address());
    Serial.print(" '");
    Serial.print(peripheral.localName());
    Serial.print("' ");
    Serial.print(peripheral.advertisedServiceUuid());
    Serial.println();

    // stop scanning
    BLE.stopScan();

    readIMU(peripheral); //Data loop
   // peripheral disconnected, start scanning again
    BLE.scanForUuid("19b10000-e8f2-537e-4f6c-d104768a1214");
  }
}

void readIMU(BLEDevice peripheral) {
    unsigned long canId;
    unsigned long canId1;
    unsigned long canId2;
    unsigned char buf[12];  //Buffert for CAN-id and CAN-data
    unsigned char buf1[12];  //Buffert for CAN-id and CAN-data
    unsigned char buf2[12];  //Buffert for CAN-id and CAN-data
    unsigned char temp[4];  //Temporary storage for CAN-id
    unsigned char temp1[4];  //Temporary storage for CAN-id
    unsigned char temp2[4];  //Temporary storage for CAN-id

    unsigned char len = 0;  //data length


  // connect to the peripheral
  Serial.println("Connecting ...");
    if (peripheral.connect()) {
      Serial.println("Connected");
    } else {
      Serial.println("Failed to connect!");
      return;
    }

  // discover peripheral attributes
  Serial.println("Discovering attributes ...");
    if (peripheral.discoverAttributes()) {
      Serial.println("Attributes discovered");
    } else {
      Serial.println("Attribute discovery failed!");
```

```
    peripheral.disconnect();
    return;
  }

// retrieve the IMU characteristic
BLECharacteristic IMUCharacteristic = peripheral.characteristic
("19B10001-E8F2-537E-4F6C-D104768A1214");
if (!IMUCharacteristic) {
  Serial.println("Peripheral does not have IMU
  characteristic!");
  peripheral.disconnect();
  return;
} else if (!IMUCharacteristic.canWrite()) {
  Serial.println("Peripheral does not have a writable IMU
  characteristic!");
  peripheral.disconnect();
  return;
}

while (peripheral.connected()) {
  // while the peripheral is connection
  if(CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive())
  // check if data coming
  {
          CAN.readMsgBuf(&len, buf);
          // read data,  len: data length, buf: data buf

          canId = CAN.getCanId(); //Read canId
          *(long *)temp = canId;  //Store CAN-id in array

         //copy CAN-id to message buffert.
          buf[8] = temp[3];
          buf[9] = temp[2];
          buf[10] = temp[1];
          buf[11] = temp[0];

          Serial.println("------------------------------");
          Serial.print("Get data from ID: 0x");
          Serial.println(canId, HEX);
          for(int i = 0; i<len; i++)    // print the data
          {
                Serial.print(buf[i], HEX);
                Serial.print("\t");
          }

 if(CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive())
 // check if data coming
 {
       CAN.readMsgBuf(&len, buf1);
```

```
        // read data,  len: data length, buf: data buf

        canId1 = CAN.getCanId(); //Read canId
        *(long *)temp1 = canId1;  //Store CAN-id in array

       //copy CAN-id to message buffert.
        buf1[8] = temp1[3];
        buf1[9] = temp1[2];
        buf1[10] = temp1[1];
        buf1[11] = temp1[0];

        Serial.print("Get data from ID: 0x");
        Serial.println(canId1, HEX);
        for(int i = 0; i<len; i++)    // print the data
        {
             Serial.print(buf1[i], HEX);
             Serial.print("\t");
        }

}

if(CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive())
// check if data coming
{
     CAN.readMsgBuf(&len, buf2);
     // read data,  len: data length, buf: data buf

     canId2 = CAN.getCanId(); //Read canId
     *(long *)temp2 = canId2;  //Store CAN-id in array

     //copy CAN-id to message buffert.
     buf2[8] = temp2[3];
     buf2[9] = temp2[2];
     buf2[10] = temp2[1];
     buf2[11] = temp2[0];

     Serial.print("Get data from ID: 0x");
     Serial.println(canId2, HEX);
     for(int i = 0; i<len; i++)    // print the data
     {
            Serial.print(buf1[i], HEX);
            Serial.print("\t");
     }

 }

  IMUCharacteristic.writeValue(buf, 12);
  //Write first CAN-message to bluetooth characteristic
  IMUCharacteristic.writeValue(buf1, 12);
```

```
      //Write second CAN-message to bluetooth characteristic
      IMUCharacteristic.writeValue(buf2, 12);
      //Write third CAN-message to bluetooth characteristic
      Serial.println();

    }
  }
  Serial.println("Peripheral disconnected");

}
```