



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

EasyCharging: Muligheter og videreutvikling av induksjons-ladekonsept for små kjøretøy

EasyCharging: Possibilities and further development of inductive charging concept for small vehicles

Jenny Lassegunnarsdatter Kjetså
Maskin, prosess- og produktutvikling

EasyCharging: Muligheter og videreutvikling av induksjonsladekonsept for små kjøretøy

Av

Jenny Lassegunnarsdatter Kjetså



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Mastergradsarbeid i Maskin, prosess- og produktutvikling

RealTek, NMBU

Våren 2019

Forord

Denne gradsoppgaven representerer en avslutning på mitt 5-årige studie innenfor maskin, prosess- og produktutvikling ved RealTek, NMBU. Gradsoppgaven er påbegynt og avsluttet våren 2019 med et omfang på 30 studiepoeng.

Høsten 2018 ble det, i samarbeid med Mina Bjerke, gjennomført et forprosjekt for utvikling av en ladeløsning for elektriske scootere for utendørs bruk. Dette forprosjektet dannet grunnlaget for denne gradsoppgaven, og jeg vil takke Mina for ideen og godt samarbeid gjennom høsten.

Det har dukket opp utfordringer underveis i prosessen som har krevd involvering av andre personer, og deres deling av kunnskap og innsikt har vært til uvurderlig hjelp. Jeg vil først og fremst takke min hovedveileder, førsteamanuensis Jan Kåre Bøe, som har vært en god støttespiller gjennom hele prosessen. Jeg vil også rette en stor takk til Senioringeniør Tom Ringstad for deling av sin tid, kunnskap og lokaler, og som har hatt en sentral rolle i organisering, planlegging og gjennomføring av forsøkene. Andre som fortjener en takk er hovedverkstedet ved RealTek for at jeg fikk låne lokaler og verktøy, elektroingeniør og elektriker Kristian Jordhøy Blystad for både oppklaringer og gode faglige diskusjoner,

Jeg vil også takke mamma, pappa, søster Julie og samboer Ståle for all deres støtte, omsorg og bistand gjennom studietiden. Sist, men ikke minst, vil jeg takke medstudenter på mastersalen i Urbygningen for utveksling av latter, frustrasjon og motiverende samtaler.

Ås, 14.05.2019

Jenny Lassegunnarsdatter Kjetså

Sammen drag

Elektrifisering av transportsektoren er et positivt miljøbidrag, og det er viktig å støtte denne utviklingen ved å legge til rette for at overgangen fra fossilt brennstoff skal bli så behagelig som mulig. Et lite, men viktig, bidrag vil være å utvikle gode og brukervennlige ladeløsninger. Trådløse ladesystemer innehar denne fordelene. For mobiltelefoner har en induktiv ladeløsning blitt standardisert og kommersialisert, og de store bilprodusentene jobber aktivt for å utvikle en løsning som kan benyttes for biler. Men midt mellom disse produktkategoriene finnes et tilsynelatende hull i markedet, nemlig induktiv opplading av små kjøretøy.

Gradsoppgaven bygger på et forprosjekt gjennomført i emnet «TIP 300 – Konsept og produktrealisering» høsten 2018, hvor en tidlig konseptutredning av brukervennlige ladeløsninger for elektriske rullestoler for utendørs bruk konkluderte med at en induktiv opplading ville vært å foretrekke. Arbeidet blir utvidet til å omhandle flere ulike små kjøretøy, og hovedmålsettingen for gradsooppgaven er å utrede, kartlegge og analysere teknologi som kreves for en mest mulig optimal overføring av strøm og opplading av batterier for mindre kjøretøyer gjennom induksjon. Gradsarbeidet vil være et videre forprosjekt, og visjonen det jobbes mot er et produkt som skal være en sikker, robust og brukervennlig ladeløsning som lader opp små, elektriske kjøretøy ved bruk av elektromagnetisk induksjon.

For oppbygging av konseptutviklingen har IPD blitt anvendt som overordnet metodikk. I tillegg er målrettet prosjektstyring benyttet til prosjektplanlegging. Andre metoder oppgaven baserer seg på er litteraturstudium til informasjonsinnhenting, SCAMPER som er benyttet til å fremprovosere kreativ tenkning når løsningsalternativer skal utformes, og Pughs seleksjonsmatrise er benyttet for å få en systematisk vurdering av de genererte alternativene. Videre er modularisering brukt for å finne potensielle løsninger for utformingen av produktet.

For å komme i mål med et vellykket prosjekt er det utformet et prosessdiagram over arbeidsprosessen med ulike prosesstrinn inndelt i faser. De fasene som berøres i gradsooppgaven er utredning, utvikling, og konstruksjon og design. For å strukturere arbeidet og sørge for nødvendig progresjon inngår de ulike prosesstrinnene i en arbeidsplan med milepæler.

I utredningsfasen er det sett nærmere på grunnleggende fysisk teori, og det er gjort teoretiske og praktiske undersøkelser på eksisterende induksjonssystemer for å kartlegge komponenter, teknologi og funksjoner som potensielt kan adapteres til utviklingen av ønsket produkt. Den innhentede informasjonen ble benyttet i utviklingsfasen hvor det ble sett nærmere på ønskede egenskaper, krav og funksjoner for produktet. Da et induksjonsladesystem er komplekst å utvikle ble det besluttet å se nærmere på enkelte løsningsalternativer gjennom enkel eksperimentering. Eksperimenteringen har avdekket utfordringer knyttet til utvikling av ladesystemet, og resulterte i konkrete anbefalinger for videre testutvikling.

Gradsarbeidet har resultert i en utredning av eksisterende induksjonssystemer gjennom dekomponering og litteraturstudium av enkelte systemer, og planlegging og gjennomføring av enkle laboratorieforsøk som tilrettelegger for videre utviklingstrinn med forslag til

forsøksprotokoll, utstyr og behandling av måleresultater. Det er også blitt lagt frem et videreutviklet konseptdesign for en bredere anvendelse, med dimensjonene 400 mm x 400 mm x 6 mm. Kostnadene knyttet til utviklingsprosessen, inkludert forprosjektet, er beregnet til 897 639 NOK.

Videre arbeid vil omhandle skisserte oppfølgingsforsøk for å kunne utvikle et optimalisert ladesystem, og analyser av tilegnet måledata. Videre vil en kartlegging av påvirkningen av elektromagnetisk stråling være nødvendig.

Abstract

Electrification of the transport sector is a positive environmental contribution, and it is important to support this development by making the transition from fossil fuel as comfortable as possible. A small but important contribution will be to develop practical and user-friendly charging solutions. Wireless charging systems have this advantage. For mobile phones, an inductive charging solution has been standardized and commercialized, and the major car manufacturers are working actively to develop a solution that can be used for cars. Between these product categories, there is an apparent hole in the market, namely inductive charging of small vehicles.

This thesis is based on a preliminary project conducted in autumn 2018 within the course “TIP 300 – Concept and Product Realization”. In this course an early concept study of user-friendly charging solutions for electric outdoor wheelchairs found that an inductive charger is preferable. This work is being expanded to address several different small vehicles, and the main objective of this thesis is to investigate, map and analyse the technology required for the most optimal transmission of power and charging of batteries for smaller vehicles through induction. This thesis project is a pilot study with the vision of creating a safe, robust, and user-friendly charging solution for small electric vehicles using electromagnetic induction.

For the concept development process, IPD has been used as the overall methodology. In addition, targeted project management has been used for project planning. The thesis utilizes several methods such as SCAMPER which is used to provoke creative thinking in the design process, Pugh’s selection matrix for generating a systematic assessment of the alternatives, and a literature study for gathering secondary information.

In order to achieve a successful project, a diagram of the work process was created featuring different steps divided into phases. The phases that are affected in the thesis are investigation, development, construction and design. To structure the work and ensure the necessary progression, the various process steps are included in a work plan with milestones.

In the investigation phase, basic physical theory is studied, and theoretical and practical studies have been made on existing induction systems to map components, technology and functions that could potentially be adapted to the development of the desired product. The information obtained was used during the development phase, where the desired properties, requirements and functions of the product were looked at. Since an induction loading system is complex to develop, some solutions were examined using simple experimentation. The experiment has revealed challenges related to the development of the charging system and resulted in specific recommendations for further test development.

This thesis has resulted in an investigation of existing induction systems through decomposition and literature study of some systems, and planning and implementation of simple laboratory tests that facilitate further development steps with proposals for test protocol, equipment and treatment of measurement results. A further developed concept design for a wider application has also been presented, with the dimensions 400 mm x 400 mm x 6 mm. The costs associated

with the development process, including the preliminary project, are estimated at NOK 897 639.

Further work will deal with outlined follow-up experiments to be able to develop an optimized charging system, and an analysis of measurement data. Furthermore, a survey of the influence of electromagnetic radiation will be necessary.

Innhold

Forord	I
Sammendrag	III
Abstract	V
Innhold	VII
1. Innledning	1
1.1. Historisk utvikling av elektromagnetisme	1
1.2. Miljøvennlig energi	4
1.3. Trådløse ladesystemer	5
1.4. Idébeskrivelse	6
1.5. Tidlig utviklings- og designprosess	6
1.6. Markeds- og realiseringsmuligheter	8
1.7. Oppdragsbeskrivelse	8
1.8. Problemstillinger og fokuspunkter	9
1.9. Teknologiske flaskehalsar	9
2. Prosjektplanlegging	10
2.1. Prosjekt målsettinger	10
2.1.1. Hovedmål	10
2.1.2. Delmål	10
2.2. Tids- og arbeidsplan med milepæler	10
2.3. Begrensninger for arbeidet	11
3. Terminologi og metodebeskrivelser	13
3.1. Terminologi og begreper	13
3.1.1. Forkortelser og begreper	13
3.1.2. Symboler og enheter	13
3.1.3. Grafiske symboler	14
3.1.4. Formler	15
3.2. Metodebruk og løsningsverktøy	17
3.2.1. Integreert produktutvikling	17
3.2.2. Målrettet prosjektstyring	21
3.2.3. Pughs metodikk	22
3.2.4. SCAMPER	23
3.2.5. Modularisering	24
3.2.6. Litteraturstudie	24
3.2.7. Programvarer	25
3.3. Kvalitetssikring	25
3.4. Prosesstrinn	28

4.	Teori og teknologiutredning	31
4.1.	Grunnleggende fysisk teori.....	31
4.1.1.	Elektrisitet	31
4.1.2.	Magnetisme.....	34
4.1.3.	Elektromagnetisme.....	35
4.2.	Elektroteknikk	35
4.2.1.	Elektriske ledere.....	36
4.2.2.	Induktans	36
4.2.3.	Kapasitans	37
4.2.4.	Faseforskyvning	37
4.2.4.	Aktiv og reaktiv effekt	37
4.3.	Elektromagnetisk effektoverføring	38
4.4.	Eksisterende induksjonssystemer	42
4.4.1.	Elektriske tannbørster	42
4.4.2.	Koketopper.....	42
4.4.3.	Mobillader.....	43
4.4.4.	Kontaktløse smartkort	44
4.4.5.	Andre bruksområder	44
5.	Dekomponering (reverse engineering).....	45
5.1.	Praktiske undersøkelser	45
5.1.1.	Qi induksjonslader	45
5.1.2.	Koketopp.....	47
5.1.3.	Lader til elektrisk tannbørste	50
5.2.	Resultater	51
6.	Produktspesifisering.....	52
6.1.	Produktmålsettinger.....	52
6.1.1.	Hovedmål.....	52
6.1.2.	Delmål.....	52
6.1.3.	Krav.....	52
6.2.	Rangering av viktige produktegenskaper	52
6.3.	Metriske grensespesifikasjoner.....	54
6.4.	Metrisk grovspefisering for basismodul	55
7.	Konseptgenerering	57
7.1.	Funksjonsanalyse.....	57
7.2.	Vurdering av delfunksjoner	59
7.3.	Funksjonsalternativer med skisser	61
7.3.1.	Induktortype	61

7.3.2. Antall induktorer i basismodul.....	62
7.3.3. Beskytte induktor mot støtskader.....	63
7.3.4. Overføringskjerne for optimalisering av overføring.....	64
7.3.5. Elektrisk kompatibilitet.....	65
7.3.6. Fysisk kompatibilitet.....	66
7.3.7. Elektromagnetisk induksjon.....	67
7.3.8. Sklisikker konstruksjon.....	68
7.4. Eksterntesting	69
7.4.1. Testmålsettinger	69
7.4.2. Valg av testpopulasjon	70
7.4.3. Kommunikasjonsform.....	70
7.4.4. Resultater	70
7.4.5. Resultatolkning	70
7.5. Egenscreening.....	71
7.5.1. Utvikling av seleksjonsmatrise	71
7.5.2. Egen konseptscreening.....	73
7.5.3. Foretrukne løsningsalternativer.....	78
8. Forsøk	79
8.1. Orienterende forsøk	79
8.1.1. Forsøksmålsettinger	79
8.1.2. Instrumentering	79
8.1.3. Forsøkstrinn	80
8.1.4. Forsøksbetingelser	81
8.1.5. Resultater	81
8.1.6. Resultatolkning	82
8.1.7. Resultatoppsummering	83
8.2. Effektilpasning	83
8.2.1. Forsøksmålsettinger	83
8.2.2. Instrumentering	84
8.2.3. Forsøkstrinn	84
8.2.4. Forsøksbetingelser	85
8.2.5. Resultater	85
8.2.6. Resultatolkning	86
8.2.7. Resultatoppsummering	87
8.3. Magnetisk resonans	87
8.3.1. Forsøksmålsettinger	87
8.3.2. Instrumentering	87

8.3.3. Forsøkstrinn	88
8.3.4. Forsøksbetingelser	89
8.3.5. Resultater	89
8.3.6. Resultatoppsummering	90
8.3.7. Resultatoppsummering	90
8.4. Oppfølgingsforsøk	90
9. Robusthet, modularisering og materialer	92
9.1. Robusthet	92
9.2. Form, estetikk og modularisering	92
9.3. Tidlig materialdrøfting	93
9.4. Produktets livssyklus	94
10. Tidlig produktarkitektur	96
10.1. Konseptdesign	96
10.1.1. Sammenstilling	96
10.1.2. Design av komponenter	98
10.2. Visjonsbasert produktarkitektur	102
10.2.1. Sammenstilling	102
10.2.2. Design av komponenter	104
11. Produksjon og økonomi	107
12. Prosessevaluering og diskusjon	109
13. Konklusjon	111
13.1. Resultater og anbefalinger	111
13.2. Anbefalinger og videre arbeid	111
14. Litteratur og referanser	113
14.1. Skriftlige kilder	113
14.2. Nettkilder	114
15. Vedlegg	I

1. Innledning

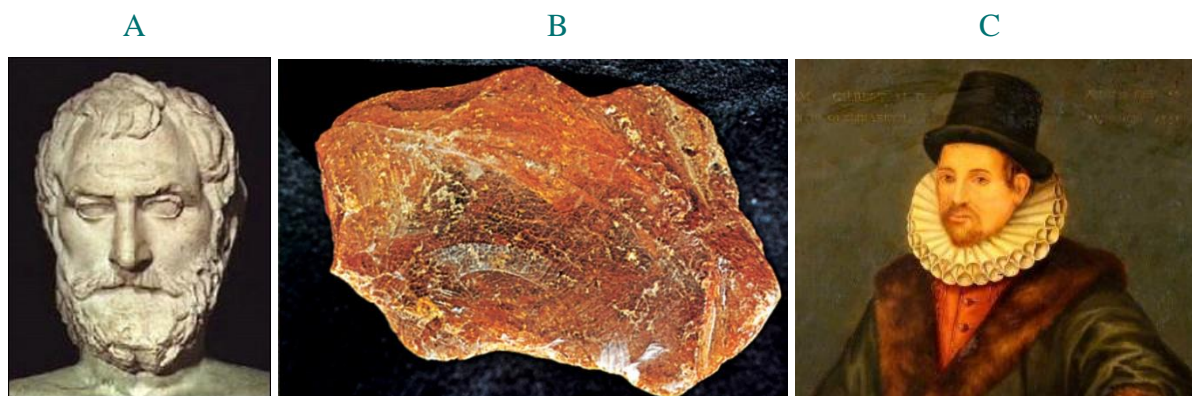
Om lag 33 % av CO₂-utslippet i Norge kommer fra veitrafikk, og utgjør i dag (2019) ca. 8,8 millioner tonn (1). Med de miljøutfordringene verden står overfor i dag er det nødvendig med tiltak for å minske dette utslippet. Sett fra et bærekraftperspektiv vil transportsektoren være nødt til å omlegges til ren energi i henhold til FNs bærekraftsmål. For at dette skal bli en realitet er flere nødt til å henge seg på utviklingen angående elektrifisering av kjøretøy, og det er nødvendig å legge til rette for at elektrisk energi skal være attraktivt for sjåførene.

1.1. Historisk utvikling av elektromagnetisme

Gjennom de siste århundrene har elektrisitet spilt en stadig større rolle, og mennesker har gjort seg tilnærmet avhengig av det. Samfunnet er omringet av elektriske apparater og hjelpemidler som forenkler hverdagen, og det påvirker og styrer i stor grad både matlaging, kommunikasjon og til dels transport. For å få en bredere forståelse av elektrisitet og magnetisme, og deres betydning for dagens tilværelse, vil det være nødvendig å se nærmere på den historiske utviklingen av nettopp disse fenomenene.

Elektrisitet

Elektrisitet har eksistert gjennom hele universets eksistens, og har blant annet kommet til syne gjennom lyn. Da det ble liv på jorda ble også elektriske signaler i kroppen, som nervesignaler, til. En av de første vitenskapsmennene som begynte å studere elektrisitet, som vi kjenner til, er grekeren Thales fra Milet (625-547 fvt.). Thales undersøkte tiltrekning, og fant ut at gnidning skaper elektrisitet. Han eksperimenterte med å gni ull eller pels på en bit med rav, og på denne måten kunne ravet holde oppe en fjær frem til ladningen forsvant (1). «Elektron» er det greske navnet for rav, og ordet «elektrisitet» har sitt utspring fra det (2).



Figur 1.1: A. Thales fra Milet (3), B. rav som er opphavet til ordet "elektrisitet" (4), C. Gilbert (5).

Det var ikke mye utvikling i kunnskapsnivået om elektrisitet før William Gilbert (1544-1603) begynte sine undersøkelser. Han er den første vi kjenner til som vitenskapelig studerte elektrisitet. Gilbert oppdaget at gjenstander kunne tiltrekkes eller frastøtes fra andre gjenstander gjennom elektrisk ladning, og fant dermed ut at det fantes to former for elektrisitet. Det var mange vitenskapsmenn som ble nysgjerrige på elektrisitet på 1700-tallet. Både Stephen Gray (1666-1736), Francis Hauksbee (1666-1713), Joseph Priestley (1733-1804) og George Adams

(1750-1795) forsøkte å bli klokere på fenomenet. De undersøkte hvordan ladning kan overføres fra et stoff til et annet, hvordan produsere større mengder elektrisk ladning, og hvordan elektrisitet kunne brukes i maskiner til forskning eller underholdning. Men det neste store gjennombruddet kom med Charles Augustine de Coulomb (1736-1806) som ble en av de første til å måle elektrisk ladning, og hvordan ladning oppførte seg. Etter å ha eksperimentert gjennom flere år kom han frem til Coulombs lov, som viste avhengigheten mellom elektrisk kraft, elektriske ladninger og avstanden mellom ladningene (6).

De tidligere oppdagelsene omhandlet for det meste elektrostatikk, mens utviklingen av elektrodynamikken startet med to italienerne, Luigi Galvani (1737-1798) og Alessandro Volta (1745-1827). Begge utviklet ulike typer elektriske celler. Galvani så på rykninger i døde dyr ved å sette nervene deres i kontakt med to metaller. Han mente at det eksisterte en egen type elektrisitet fra dyr, såkalt «dyreelektrisitet». Volta på sin side kalte elektrisitet for «metallelektrisitet», og mente at det bare kunne komme av kontakt mellom metaller, og at det var det som skjedde i Galvanis forsøk. Volta utviklet Voltas søyle, og det blir sett på som det første galvaniske batteriet. Etter denne oppdagelsen tar utviklingen for alvor fart. Hans Christian Ørsted (1777-1851), en dansk fysiker og kjemiker, oppdaget at elektrisitet påvirket retningen på et kompass han tilfeldigvis hadde på bordet. I samme tidsperiode så Jean-Baptiste Biot (1774-1862) og Félix Savart (1791-1841) på kraftvirkningen mellom to elektriske strømmer, og Biot-Savarts lov ble formulert. André Marie Ampere (1775-1831) fant ut at tiltrekningskraften mellom to parallelle ledere det flyter strøm i var proporsjonal med strømmen, og Georg Ohm (1787-1854) fant sammenhengen mellom strøm, spenning og motstand (7).

Magnetisme

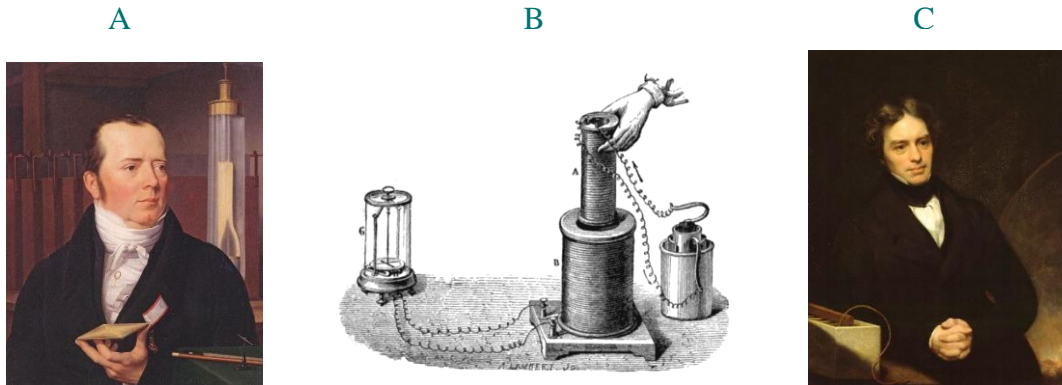
Oppdagelsen av «ledesteiner», magnetiske steiner, har også vekt stor nysgjerrighet siden de ble oppdaget av grekerne for over 2000 år siden. Ordet «magnetisme» er oppkalt etter Magnesia i Hellas, etter oppdagelse av steinene. Kineserne var de første til å dra nytte av magnetisme da de oppfant kompasset. Ellers er det flere av de samme innflytelsesrike personene nevnt i delkapittelet om elektrisitet som har hatt stor innvirkning på oppdagelsene rundt magnetisme.

Etter at kompasset kom til Europa i det 13. århundret var Gilbert den første kjente vitenskapsmannen som tok tak i det, og beskrev det i boka *De Magnete*. Gilbert oppdaget at metallbiter kunne magnetiseres ved å gni de mot en magnet, i tillegg til kraftvirkningen mellom magnetiske poler som gav tiltrekning og frastøtning. Han kalte polene på en magnet sydpol og nordpol, og oppdaget at han ved å dele en magnet satt igjen med to magneter med hver sin sydpol og nordpol. Med andre ord fant han ut at magneter er dipoler. Coulomb eksperimenterte også med magneter, og han fant at samme lov gjaldt for kreftene mellom magnetpoler som for elektriske ladninger. Det var derimot Ørsted som stod for gjennombruddet med å finne sammenhengen mellom elektrisitet og magnetisme.

Elektromagnetisme

Etter Ørsteds oppdagelser om at en fritthengende magnet la seg på tvers av en strømførende leder, tok Michael Faraday (1791-1867) steget videre. Faraday undret om en magnet kunne gi opphav til elektrisk strøm, i og med at elektrisk strøm har magnetisk virkning. I 1831 presenterte

Faraday resultatene av sine eksperimenter, og han har fått æren for oppdagelsen av elektromagnetisk induksjon. Han klarte å påvise at det ble induisert en spenning i en elektrisk leder dersom lederen beveget seg i et magnetfelt eller i nærheten av en annen, strømførende elektriske leder.



Figur 1.2: A. Ørsted (8), B. Faradays induksjonseksperiment med to spoler (9), C. Faraday (10).

Parallelt med Faradays eksperimenter i Storbritannia kom Joseph Henry (1797-1878) frem til samme resultat, men på grunn av at Faraday publiserte sine resultater har han fått mer anerkjennelse for sine oppdagelser. Faradays resultater la grunnlaget for senere utvikling av elektromotoren, transformatoren og dynamoen, og i tillegg fant han ut noen år senere at den elektriske ladningen mellom to ledende materialer er avhengig av dielektrikumet mellom dem. Faraday la grunnlaget for utvikling av flere av de viktigste elementene i et elektrisk nett, og blir sett på som en pionér innen moderne elektroteknikk (11).



Figur 1.3: Faradays lab, hvor han gjennomførte sine eksperimenter som førte til store oppdagelser (12).

Oppdagelsen av induksjon skulle vise seg å åpne flere muligheter. To tyske fysikere, Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) og Johan Friedrich Gauss (1777-1855) viste at induksjon kunne brukes til å overføre meldinger mellom to bydeler i 1833. I 1836 utviklet Nicholas Callan (1799-

1864) induksjonsspolen, og forstod at forholdet mellom vindingene i primær- og sekundærspolene var av betydning for den induerte spenningen. Det ble i tidsperioden 1830-1870 gjort flere forsøk med prøving og feiling for å forbedre induksjonsspolene. Forsøkene førte til at grunnleggende prinsipper for transformatorer ble oppdaget. James Clerk Maxwell (1831-1879) utarbeidet en matematisk fremstilling av Faradays feltteorier. Franske Antoine Hippolyte Pixii (1808-1835) var en instrumentmaker som også ble fascinert av Faradays eksperimenter med induksjon. Han tok forsøkene videre og bygde en generator med vekslende spenning, det som i dag kalles vekselstrøm. Med innspill fra Ampere ble generatoren utvidet til å inneholde en roterende bryter som likerettet strømmen. Noen år senere ble den første likestrømsmotoren utviklet av belgiske Zénobe Théophile Gramme (1826-1901), og engelskmennene Lucien Gaulard (1850-1888) og John Gibbs (1834-1912) patenterte den første kommersielle likestrømstransformatoren i 1881.

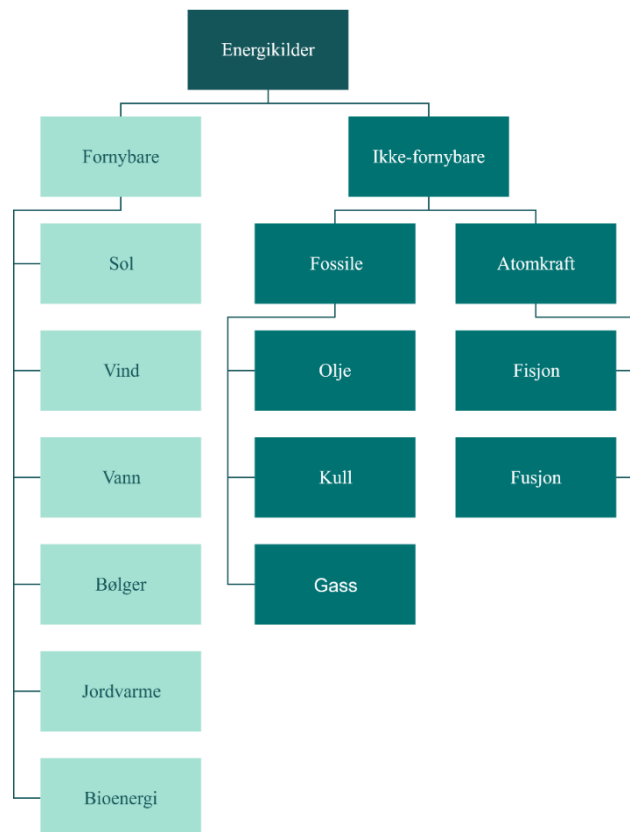
Maxwell forutså at radiobølger ville bli anvendelig i 1864, og Heinrich Hertz (1857-1894) viste i 1888 et bevis på radiobølger ved hjelp av en radiosender. Denne oppdagelsen gav serbokraten Nikola Tesla (1856-1943) troen på at trådløs overføring av elektrisk energi høyst sannsynlig var mulig å få til. Før han gikk løs på dette prosjektet utviklet han grunnlaget for vekselstrømsprinsippet med trefase, den første induksjonsvekselstrømsmotoren, og Tesla-coilen. Tesla-coilen var en kompakt, høyfrekvent strømtransformator, og ble senere svært viktig i utviklingen av radio- og fjernsynsteknologi. Underveis i sitt arbeid med sterkstrøms elforsyning og strømmnettbasert elektroteknikk fant Testa ut at han skulle bygge et radiotårn kalt «Tesla Tower». Tårnet skulle brukes til å sende radiomeldinger, bildesignaler og værvarsler, og han hadde et ønske om å forsyne hele verden med trådløs elektrisk energi ved bruk av jordens resonansfrekvens som han mente ville virke over alle avstander. Teslas prosjekt gikk ikke som planlagt, og det ble skrinlagt inn mot første verdenskrig (12).

Idéen om trådløs overføring av elektrisk energi døde ikke med Tesla, men utviklingen fortsatte. Gjennom 1960-tallet ble det gjort flere undersøkelser med bruk av mikrobølger, der målet var å oppnå trådløs effektoverføring. William C. Brown (1916-1999) klarte å lage et apparat som mottok radiofrekvenser og omdannet det til likestrøm, men apparatet var lite effektivt. Senere begynte man å se på om induksjon kunne egne seg for trådløs overføring av elektrisk energi. Don Otto prøvde i 1972 å utvikle et induksjonssystem med sendersiden montert i veien og mottakersiden montert på det aktuelle kjøretøyet. Flere forsøk med induktive koblinger med hensikt å overføre elektrisk energi til kjøretøy eller batteri har blitt gjort frem til i dag. Utviklingen ble rettet mot busser på 1980-tallet, og på 1990-tallet begynte man å lade opp elektriske tannbørster med induksjon. I 2006 startet undersøkelser med å bruke elektrisk resonans kobling istedenfor induktiv kobling, og undersøkelser med både induktiv og resonans kobling er i stadig utvikling den dag i dag (13).

1.2. Miljøvennlig energi

Hvor strømmen kommer fra er et viktig moment når det er snakk om miljøvennlighet i forhold til elektriske kjøretøy. Bruken av strømmen medfører ingen utslipp, da strøm i seg selv er en ren form for energi (14). Man er derfor nødt til å se på opprinnelsen til energien som blir brukt,

og det er i denne sammenheng ønskelig med miljøvennlige energikilder. For selv om et kjøretøy i seg selv ikke har store utslipp, så kan energien være fremstilt fra en uren energikilde. Man kan se på det som at utslippene blir flyttet fra kjøretøyet til kraftverket. Men denne utslippsforflytningen trenger ikke kun by på problematikk. Dersom mesteparten av utslippene er konsentrert rundt kraftverkene vil det lettere være muligheter for rensing, i tillegg til at de lokale miljøpåvirkningene som støy og utslipp vil være redusert. I Norge er det flere grunner til at elektrifisering av kjøretøy kan være gunstig, og en av grunnene er at 98 % av norsk kraftproduksjon er basert på vannkraft (15). Det er stadig utvikling av miljøvennlige energikilder, og det er ønskelig at denne utviklingen fortsetter i alle land i fremtiden. Per nå er de mest vanlige miljøvennlige energikildene vannkraft, vindkraft og solenergi.



Figur 1.4: Oversikt over ulike energikilder. (Egen figur, basert på (16)).

1.3. Trådløse ladesystemer

Tanken om trådløs opplading ved bruk av induksjon er ikke ny – som tidligere nevnt drev Tesla med eksperimenter som omhandlet dette på slutten av 1800- og starten av 1900-tallet. Til tross for at det er mange år siden Tesla holdt på har ikke utviklingen for alvor skutt fart før de siste tiårene. Fordelen med å separere strømforsyningen fra det elektriske apparatet er utnyttet for elektriske artikler som mobilladere, TV (17) (18), PC (19) og induksjonskoketopper. I tillegg til hverdags-artikler har trådløs opplading vært brukt innen medisinsk utstyr. Innen mobilladere har trådløs opplading blitt så utbredt at det er utviklet en egen standard, Qi, av Wireless Power Consortium (20).

Tabell 1.1: Fordeler og ulemper ved å gå over fra tradisjonell ladekabel til trådløs opplading.

Fordeler	Ulemper
<ul style="list-style-type: none"> • Lavere risiko for elektrisk støt • Slipper kabel • Brukervennlig • Flere elektroniske apparater kan bruke samme lader • Tåler et tøffere miljø (for eksempel støv- og vannavstøtende) • Mindre slitasje på det elektroniske apparatet, da ikke ladeinngangen vil bli brukt 	<ul style="list-style-type: none"> • Lavere effektivitet • Lavere oppladingshastighet • Kan føre til økt varmedannelse • Mer kostbart å utvikle • Komplekst å implementere i eksisterende produkter som ikke støtter induksjonslading

Det dukker til stadighet opp artikler om arbeid med utvikling av induksjonsladere nasjonalt og internasjonalt for elsykler (21), elbiler (22) (23) (24), elektriske ferjer (25) og elektriske busser (26). I Norge satser det amerikanske selskapet Momentum Dynamics (27) på taxibransjen (28), og det norske selskapet Wireless Power & Communication AS retter seg mot offshore (29).

Det er ikke vanskelig å se for seg at fremtiden blir mer trådløs enn vi er vant med i dag, og tilgjengeligheten til strømforsyning vil kunne minske rekkeviddeangsten enkelte kjenner på. Det er ønskelig å få senket terskelen for å ta i bruk små, elektriske kjøretøy av hensyn til miljøet, og en forenklet ladeprosess vil være et viktig steg i denne retningen.

1.4. Idébeskrivelse

Stadig flere kjøretøy blir elektrifisert, samtidig som samfunnet beveger seg i en automatisert retning. Det vil derfor være ønskelig å legge til rette for at håndtering av elektriske kjøretøy skal kunne foregå på en brukervennlig måte. Som det fremkommer av de foregående delkapitlene utvikles det til stadighet trådløse ladesystemer for ulike, små elektriske artikler samtidig som det forskes mye på trådløse ladesystemer for biler. Det er svært lite informasjon angående utvikling av trådløs opplading for små, elektriske kjøretøy. Denne produktgruppen havner tilsynelatende mellom to forskningsområder.

Ideen er å utvikle et induktivt oppladingssystem rettet mot små, elektriske kjøretøy. Det er ønskelig at produktet skal kunne gi personer med funksjonsnedsettelse mulighet til å lade opp sine egne kjøretøy uten hjelp, og at produktet skal bidra til færre hindringer for brukere med overgang til elektriske kjøretøy. Ved å legge til rette for en fordelaktig overgang til ren energi, er det nærliggende å tro at flere personer vil se på elektriske kjøretøy som et naturlig valg. Dette vil være et lite, men positivt bidrag for å hankses med de miljøutfordringene verden står overfor i dag.

1.5. Tidlig utviklings- og designprosess

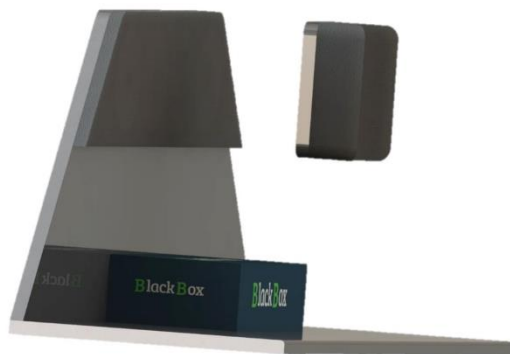
Ideen til EasyCharging som ladesystem til elektriske rullestoler for utendørs bruk dukket opp i hovedkurset TIP300 Konsept og produktrealisering høsten 2018 av medstudent Mina Bjerke. Ideen baserte seg på et tidligere prosjekt Bjerke var delaktig i våren 2015 i kurset IND220 Innovasjonsbedrift. Bjerke mfl. utviklet den gang ChargePod SB, en ladestasjon for elektriske

kjøretøy med hovedfokus på elbiler. ChargePod SB er en mekanisk ladestasjon som benytter en arm for å automatisk koble laderen til elbilen.



Figur 1.5: Ideen til EasyCharging er basert på prosjektet ChargePod SB (30).

I hovedkurset TIP300 ble det gjennomført tidligutredning av en konseptløsning for et induksjonsladesystem for små kjøretøy (EasyCharging), spesielt tiltenkt elektriske rullestoler med manuell styring for utendørs bruk.



Figur 1.6: EasyCharging, induktiv ladeløsning, konseptutviklet i TIP300 (31).

Det ble i kurset blant annet undersøkt og rangert hvilke egenskaper produktet burde inneha, og det ble foretatt en funksjonsanalyse. I tillegg ble det gjennomført en enkel markedsundersøkelse blant potensielle brukere, pårørende og ergoterapeuter for å få et innblikk i hva disse kunne ønske seg i et produkt som EasyCharging og om det i det hele tatt er behov for et slikt produkt. Tilbakemeldingene var stort sett gode, men det var bred enighet blant respondentene om at løsningen burde være mobil. Da denne informasjonen ble innhentet mot slutten av prosjektperioden var det begrenset med tid for å utvikle en optimal løsning. I tillegg er det gjennomført grove kostnadskalkulasjoner, og der kom det frem at EasyCharging ikke er økonomisk lønnsomt å produsere per i dag grunnet høye utviklingskostnader og variable enhetskostnader i form av material- og produksjonskostnader. Med grep som utvidet produktmarked og kundegruppe, en mellomplate som kan fungere uavhengig av kjøretøytype og optimalisering av antall spoler og spoledesign, kan EasyCharging potensielt likevel bli en realitet. I hovedkurset ble EasyCharging kun konseptutviklet, og det gjenstår derfor mye arbeid før en eventuell prototype kan se dagens lys. Prosjektet fra hovedkurset danner dermed grunnlaget for denne masteroppgaven.

1.6. Markeds- og realiseringsmuligheter

Det fremkom av markedsundersøkelsen om EasyCharging i forprosjektet i TIP300 at det var interesse for produktet. Denne markedsundersøkelsen rettet seg mot potensielle kunder av et induksjonsladesystem for elektriske rullestoler. Gjennom grove forundersøkelser av samfunnsutvikling og trender, ble det konkludert med at enkle og tidsbesparende løsninger er en trend man ser mye av i forskning, utvikling og salg av nye produkter eller tjenester. Ved å rette fokuset direkte mot det elektriske markedet er det ofte et mål at produktene skal klare seg mest mulig på egenhånd. Trådløse systemer er blitt kommersialisert for opplading av små elektriske artikler, og det jobbes stadig mot samme løsning for elbilmarkedet. Men etter alt å dømme er det et hull i markedet for små kjøretøy, og dette hullet vil EasyCharging ha mulighet til å fylle.

For at EasyCharging skal kunne bli en realitet er løsningen nødt til å kunne adapteres til flere markeder. Dette er nødvendig for at flere produkter kan belastes for utviklingskostnadene. I tillegg kan det føre til en effektivisering av produksjonsmetodene ved flere produserte produkter, og gi et bedre grunnlag for forhandling om kvantumsrabatter ved innkjøp av materialer. Ladesystemet EasyCharging kan potensielt tilpasses mange ulike produktgrupper, både til privatmarkedet, gjennom samarbeid med produsenter av små elektriske kjøretøyer, eller bedrifter som benytter seg av store antall små elektriske kjøretøyer i sin daglige drift.

Potensielle produktgrupper EasyCharging kan tilpasses for innenfor privatmarkedet er små kjøretøy som kan lades opp med bruk av vanlig husholdningskontakt. Det kan blant annet være elsykler, elektriske sparkesykler, elbiler for barn, el-moped/elektrisk scooter, mopedbiler, snøfreser, roboter og segway. Før det blir gjort tilpasninger av produktet bør det bli gjennomført en omfattende markedsanalyse med hensikt å avdekke hvilke markeder og målgrupper som kan være mest lønnsomme, og rangere de ulike produktgruppene lønnsomhetspotensial med bakgrunn i analysen. Målgruppens geografi, demografi og psykografi må kartlegges for optimal markedsføring av EasyCharging. Men man kan allerede si at det er ønskelig at produktet selges i land med ren produksjon av elektrisk energi, og med et klima oppladingsprosessen kan fungere optimalt i.

En god løsning for å sikre lønnsomhet for EasyCharging vil være å få til et samarbeid med produsentene av de nevnte elektriske kjøretøyene, og kunne få EasyCharging til å bli et medfølgende ladesystem ved salg av produktene. Ladesystemet bør enten inngå som standardlader, eller at produktene blir produsert med integrert sekundærspole som støtter EasyCharging-systemet. En annen samarbeidsmulighet er å få bedrifter som kjøper store kvantum av elektriske kjøretøy til å inngå en avtale om kjøp og bruk av EasyCharging for ettermontering på produktene. Noen konkrete eksempler på potensielle kunder vil være Posten, som bruker mopedbiler produsert av Paxster, eller selskaper med store lagerbygninger som bruker gaffeltruck. Etersom elsykler og elektriske sparkesykler er i stadig fremmarsj, er det en mulighet at også bysykler vil elektrifiseres i fremtiden, og her kan fastmonterte utgaver av EasyCharging være mulig å ha på bysykkelparkeringene.

1.7. Oppdragsbeskrivelse

Mastergradsarbeidet vil bygge på studier av tilgjengelig litteratur knyttet til elektriske ladesystemer, spesielt induksjonssystemer, samt visse elementer fra det forutgående konsept-

utredningsarbeidet (EasyCharging av Kjetså & Bjerke, 2018), der det teoretiske og teknologiske utredningsgrunnlaget skal styrkes ytterligere, og det vil bli gått videre til mer eksperimentell utvikling.

Den overordnede metodiske tilnærmingen for utrednings- og utviklingsprosessene i prosjektarbeidet vil baseres på integrert produktutvikling (IPD), med Pughs metodikk, SCAMPER og funksjonsanalyser, spesifiserings- og beregningstrinn mv., for å utvikle en mest mulig solid basis for ladeelement og systemutvikling, samt optimalisere designet både teknisk og funksjonelt.

Det vil også bli gjennomført litteraturstudium knyttet til grunnlagsteori, kartlegging av eksisterende løsninger, samt konsepttesting gjennom avgrensede forsøk på laboratorium for å utrede teknologien som kreves, samt gjennomføre nødvendige beregninger (virkningsgrad og effekt) og analyser. I et større bærekraftighetsperspektiv vil man også undersøke hva en induksjonsovergang vil kunne. Den valgte produktløsningen vil modelleres i 3D og systemform.

1.8. Problemstillinger og fokuspunkter

I mastergradsarbeidet er det satt opp følgende problemstillinger og fokuspunkter:

1. Hvilke tekniske løsninger og systemer eksisterer allerede (både kommersielle og konseptuelle), hvilke områder brukes de på, hvilke egenskaper har de og hvordan kan de tilpasses?
2. Hvilke system- og designmessige faktorer vil være avgjørende for å kunne utvikle og tilpasse et godt og fleksibelt mobilt ladesystem?
3. Hvilken fysisk og teknisk utforming (materiale, antall viklinger, form og tykkelse) bør spolene ha for å kunne oppnå en høyest mulig virkningsgrad?
4. Hvilken utforming vil gjøre sekundærsiden egnet for flere typer små kjøretøy? Vil induksjonsladesystemet ha potensiale for andre bruksområder, og eventuelt hvilke?
5. Er det noen uheldige konsekvenser ved bruk av induksjonslading som man må vite om og ta hensyn til (HMS)?

1.9. Teknologiske flaskehalser

- Relativt nytt teknologiområde der det bare finnes begrenset bakgrunslitteratur.
- Utvikle enkle forsøk med basis i eksisterende utstyr ved RealTek.
- Fakultetet råder kun over enkelt forsøksutstyr.

2. Prosjektplanlegging

For å sørge for god arbeidsflyt gjennom hele prosjektperioden er det nødvendig å kartlegge hva man skal oppnå med prosjektet, hvordan det kan oppnås og hvor lang tid hver del av prosjektet skal ta.

2.1. Prosjekt målsettinger

For å starte på planleggingen er det nødvendig å definere hva som er hensikten med prosjektet. Dette gjøres ved å formulere målsettinger.

2.1.1. Hovedmål

Hovedmålsettingen for mastergradsarbeidet er:

«Å utrede, kartlegge og analysere teknologi som kreves for en mest mulig optimal overføring av strøm og opplading av batterier for mindre kjøretøyer gjennom induksjon. Videreutvikle og dokumentere konseptgrunnlag både for mindre kjøretøyer og en potensielt bredere anvendelse gjennom beregning, enkle forsøk, og designe tidlige produktløsninger med forslag til praktisk oppfølging.»

2.1.2. Delmål

Det er definert delmål for å forenkle planleggingen av prosjektet, og sikre at hovedmålet kan oppnås med best mulig anvendelse av ressurser. Delmålene for prosjektet er:

1. Beskrive bakgrunnen, definere problemstillinger for masterarbeidet, og bestemme og beskrive metode.
2. Utrede relevant teori og teknologi med tilhørende gjennomgang av eksisterende induksjonssystemer, og tilegne tilstrekkelig kunnskap for tekniske beslutninger og beregninger på et senere stadium.
3. Utvikle tekniske grensespesifikasjoner, og gjennomgå potensielle systemløsninger.
4. Klargjøre forsøksplan, og realisere og dokumentere tidligtesting av konseptgrunnlaget.
5. Utvikle og designe tidlige produktløsninger/konseptløsninger.
6. Utvikle tekniske anbefalinger og anbefalinger for videre utviklingsforsøk.
7. Utforme og fullføre rapport.

2.2. Tids- og arbeidsplan med milepæler

For å illustrere planleggingen av prosjektet på en god måte er det tatt i bruk en tids- og arbeidsplan med milepæler, se Tabell 2.1. Planen gir en visuell fremstilling av hva som skal gjøres i prosjektet, og når det skal gjøres. Det gir også en indikasjon på når det blir hektiske perioder i løpet av prosjektet. Bruk av dette presentasjonsverktøyet gir raskt oversikt over aktiviteter som kan gjøres parallelt, og det gjør det lettere å se hvilke aktiviteter som er avhengig av å gjøres i en bestemt rekkefølge.

Tabell 2.1: Tidsplan for dette prosjektet med aktiviteter som skal gjøres over hvilke uker. Milepæler markert med lilla.

Aktiviteter og milepæler	Uker																			
	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
Bestemme tema for oppgaven og definere problemstillinger																				
Innhente relevant bakgrunnsinformasjon om elektrisitet, magnetisme og bruk av induksjon																				
Bestemme og beskrive metoder som skal brukes for å løse oppgaven																				
Planlegge prosjektet																				
Utredning av grunnleggende teori																				
Utredning av eksisterende induksjonsteknologi																				
Redegjøre for produktets grensespesifikasjoner																				
Kartlegge systemdesignmuligheter																				
Planlegge og lage forsøksplan																				
Gjennomføre tester, og analysere resultater																				
Design tidlige produktløsninger																				
Utforme tekniske anbefalinger og anbefalinger for videre forsøk																				
Utforme prosjektrapport																				
Ferdigstille prosjektrapport																				

2.3. Begrensninger for arbeidet

- Forsøk vil begrenses til bruk av tilgjengelig utstyr ved RealTek, og dette vil sette måleutstyrsbegrensninger.
- Hovedvekt vil bli lagt på teknologiutredning og enklere orienterende forsøk.
- Sekundærsiden/Batterisiden vil ikke vurderes, det vil kun bli tatt enkle betraktninger med hensyn til ladedelen.
- Det vil ikke bli gått nærmere inn i elektriske styringskomponenter, da dette krever spesialkompetanse.

- Det vil ikke bli foretatt omfattende patentsøk da utviklingsprosessen er på et så tidlig stadium.

3. Terminologi og metodebeskrivelser

Terminologi og metode som skal benyttes i oppgaven beskriver hvordan problemstillingen vil bli undersøkt, og gir et innblikk i hva de ulike metodene yter til helheten av rapporten.

3.1. Terminologi og begreper

For å gjøre rapporten enstydig for leseren vil forkortelser, begreper, notasjoner og beregningsformler som er benyttet i rapporten presenteres oversiktlig og kortfattet i tabeller.

3.1.1. Forkortelser og begreper

Tabell 3.1: Forklaring på forkortelser og begreper som blir brukt i denne rapporten.

Forkortelse/Begrep	Forklaring
Akronym	Forbokstavene i flere ord med sammenheng som danner et ord og leses som ett ord (32)
Evt.	Etter vår tidsregning
Fvt.	Før vår tidsregning
HMS	Helse, miljø og sikkerhet
IPD	Integrert produktutvikling
LED	Lysemitterende diode
Mfl.	Med flere
NMBU	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
RealTek	Fakultet for realfag og teknologi
SI	Det internasjonale enhetsystem
Spole	Ledningssløyfe
Visjon	Bilde av en fremtidig, ønsket (ideell) tilstand (33)

3.1.2. Symboler og enheter

Tabell 3.2: En oversikt over symboler, konstanter og SI-enheter som blir brukt i denne rapporten.





Symbol	Betydning	Enhet (SI)
A	Areal	m ²
B	Magnetisk feltstyrke/Magnetisk flukstetthet	Tesla (T)
C	Kapasitans	F
d	Avstand mellom ladninger	m
e	Elementærladningen	C
\vec{E}	Elektrisk feltstyrke	(V/m)
f	Frekvens	Hertz (Hz)
F_e	Elektrisk kraft	Newton (N)
F_m	Magnetisk kraft	N
I	Strømstyrke	Ampere (A)
k_e	Proporsjonalitetskonstant/Coulombkonstant	Nm ² /C ²
l	Lengde	m
L	Induktans/Induktivitet	H
M	Gjensidig induktans	H
N	Antall	-
P	Effekt	Watt (W)
q	Ladning	Coulomb (C)
Q	Ladning på positivt ladd leder i kondensator	C

Tabell 3.2 forts.: En oversikt over symboler, konstanter og SI-enheter som blir brukt i denne rapporten.


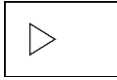



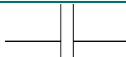

Symbol	Betydning	Enhet (SI)
r	Radius	Meter (m)
R	Resistans	Ohm (Ω)
t	Tid	Sekund (s)
T	Periode	s
U	Spenning	Volt (V)
U_L	Induktansspenning	V
U'_L	Målt induktansspenning	V
U_R	Resistansspenning	V
U'_R	Målt resistansspenning	V
U_S	Total påtrykt spenning	V
v	Hastighet	m/s
W	Arbeid	Joule (J)
X_C	Kapasitiv reaktans	Ohm (Ω)
X_L	Induktiv reaktans	Ohm (Ω)
Z	Impedans	Ohm (Ω)
ϵ_0	Tomromspermittiviteten	$C^2/(Nm^2)$
ϵ_r	Relativ permittivitet	$C^2/(Nm^2)$
\mathcal{E}	Elektromotorisk spenning, ems	V
β	Vinkel	Grader
η	Virkningsgrad	-
θ	Vinkel	Grader
μ	Permeabilitet	H/m
μ_0	Vakuumpermeabiliteten/Den magnetiske konstanten	H/m
ρ	Resistivitet	Ωm
φ	Vinkel	Grader
Φ_m	Magnetisk fluks	Wb
Φ_{net}	Elektrisk fluks	(Nm^2/C)

3.1.3. Grafiske symboler

Tabell 3.3: En oversikt over hvilke grafiske symboler som vil bli brukt i denne rapporten.

Symbol	Betydning
	Amperemeter
	Voltmeter
	Wattmeter
	Signalgenerator

Tabell 3.3 forts.: En oversikt over hvilke grafiske symboler som vil bli brukt i denne rapporten.

Symbol	Betydning
	AC spenningskilde
	Forsterker
	Induktor
	Induktorer koblet sammen med jernkjerne
	Motstand
	Kondensator
	Lyspære

3.1.4. Formler

Tabell 3.4: En oversikt over formler som blir brukt i denne rapporten.

Betydning	Formel	Indeks
Ladning	$q = Ne$	[4.1.1.]
Coulombs lov	$F_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$	[4.1.2.]
Elektrisk feltstyrke	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$	[4.1.3.]
Gauss' lov	$\phi_{net} = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dA = \oint_S E_n dA = \frac{q}{\epsilon_0}$	[4.1.4.]
Spenning	$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q}$	[4.1.5.]
Spenning	$dU = \frac{-\vec{F} \cdot d\vec{l}}{q} = \frac{-q\vec{E} \cdot d\vec{l}}{q} = -\vec{E} \cdot d\vec{l}$	[4.1.6.]
Elektrisk strømstyrke	$I = \frac{q}{t}$	[4.1.7.]
Frekvens	$f = \frac{1}{T}$	[4.1.8.]

Tabell 3.4 forts.: En oversikt over formler som blir brukt i denne rapporten.

Betydning	Formel	Indeks
Ohms lov	$R = \frac{U}{I}$	[4.1.9.]
Elektrisk arbeid	$W = UIt$	[4.1.10.]
Energioverføring	$W = RI^2t$	[4.1.11.]
Effekt	$P = \frac{W}{t}$	[4.1.12.]
Elektrisk effekt	$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R}$	[4.1.13.]
Virkningsgrad	$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}}$	[4.1.14]
Magnetisk flukstetthet	$B = \frac{F_m}{qv}$	[4.1.15.]
Magnetisk flukstetthet	$B = \frac{F_m}{Il}$	[4.1.16.]
Biot-Savarts lov	$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$	[4.1.17.]
Magnetisk fluks	$\phi_m = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$	[4.1.18.]
Lorentz-kraft	$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$	[4.1.19.]
Faradays lov	$\mathcal{E} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n}dA = -\frac{d\phi_m}{dt}$	[4.1.20.]
Indusert ems i spole	$\mathcal{E}_{tot} = N\mathcal{E}$	[4.1.21.]
Resistans i leder	$R = \frac{\rho l}{A}$	[4.2.1.]
Induktans	$L = \frac{\mu N^2 A}{l}$	[4.2.2.]
Induktiv reaktans	$X_L = 2\pi fL$	[4.2.3.]

Tabell 3.4 forts.: En oversikt over formler som blir brukt i denne rapporten.

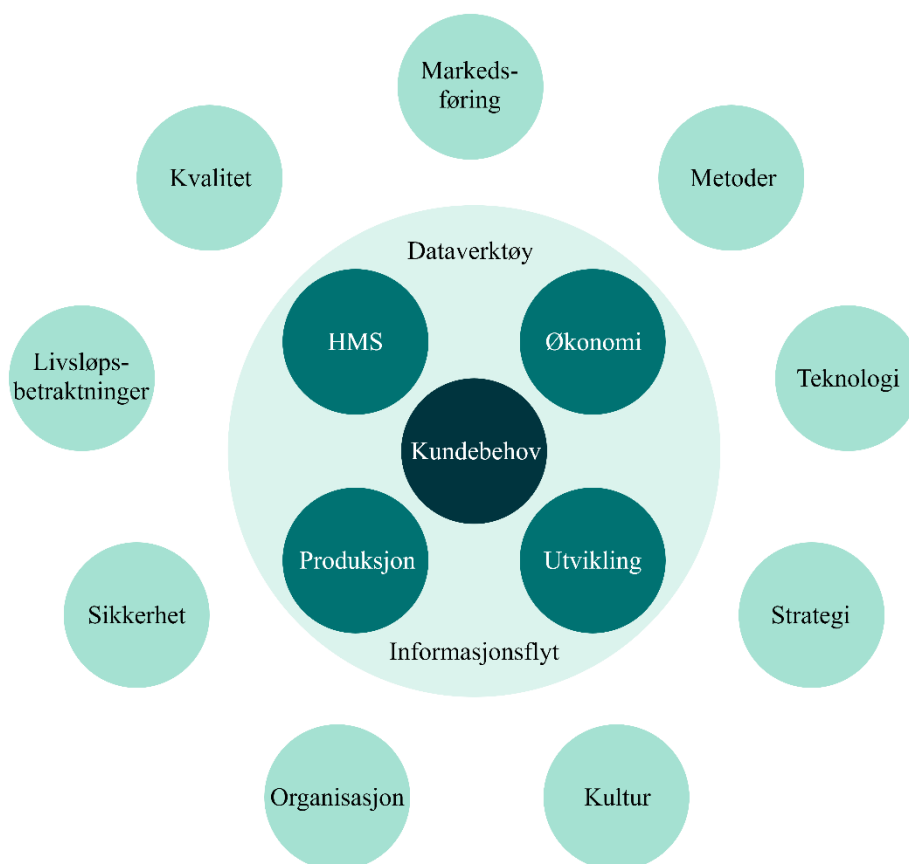
Betydning	Formel	Indeks
Kapasitans	$C = \frac{Q}{U}$	[4.2.4.]
Kapasitans i parallellplatekondensator	$C = \frac{Q}{U_{21}} = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$	[4.2.5.]
Kapazitiv reaktans	$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$	[4.2.6.]
Cosinussetningen	$U'_L{}^2 = U'_S{}^2 + U'_R{}^2 - 2U'_S U'_R \cos(\varphi)$	[4.2.7.]
Forhold mellom vindinger og indusert spenning	$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$	[4.3.1.]
Gjensidig induktans, ideell trafo	$M = \sqrt{L_1 L_2}$	[4.3.2.]
Gjensidig induktans	$M = k\sqrt{L_1 L_2}$	[4.3.3.]
Resonansfrekvens	$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$	[4.3.4.]
Serieresonans	$Z = R$	[4.3.5.]
Parallellresonans	$Z = \frac{X_C X_L}{X_C + X_L}$	[4.3.6.]
Lastmotstand	$R_i = R_L$	[8.2.1.]

3.2. Metodebruk og løsningsverktøy

Mastergradsarbeidet vil gjennom bruk av anerkjente metoder sikre at nødvendige avgjørelser blir tatt på bakgrunn av relevant, innhentet informasjon og at viktige aktiviteter i utviklingsarbeidet ikke blir glemt og foretas i en naturlig rekkefølge. Flere metoder kombinert minimerer hver enkelt metodes svakheter. Det er dermed viktig å få koblet metodene sammen på en hensiktsmessig måte for å få en optimal utviklingsprosess.

3.2.1. Integrert produktutvikling

Produktutvikling er en sammensatt aktivitet, hvor blant annet idégenerering, målsetting, organisering, planlegging og metodevalg inngår. Integrert produktutvikling (IPD) er en produktutviklingsmetodikk som fokuserer på tverrfaglig tilnærming til utviklingsprosessen, og IPD er dette mastergradsarbeidets overordnede metodikk (34) (35) (36). Fagområdene utvikling, produksjon, HMS og økonomi knyttes sammen ved hjelp av informasjonsflyt og dataverktøy. Ved å jobbe på denne måten kan man se til at ressurser blir brukt på en mest mulig effektiv måte, og man sikrer at viktige momenter i arbeidet ikke blir oversett. Man kan si at målet med IPD er at man i hele utviklingsprosessen kjenner til konsekvensene av alle valg man foretar seg, og integreringen av fagområder fører til en kontinuerlig konsekvensutredning.



Figur 3.1: IPD tar utgangspunkt i kundebehov og markedskrav. Ved hjelp av informasjonsflyt og dataverktøy integreres de fire fagområdene i kjernen, og alle beslutninger som tas underveis i utviklingsprosessen tar hensyn til kjernen.

Figur 3.1 illustrere hvordan IPD bør påvirke ulike aspekter ved utviklingsarbeidet. I utviklingsarbeidet er det kundebehovet og markedskravene det jobbes ut ifra, da det ikke er hensiktsmessig å produsere et produkt det ikke er behov for. I større virksomheter er det ofte egne ekspertteam innenfor hvert område, men for å følge retningslinjene i IPD er det viktig at de ulike teamene kommuniserer og deler informasjon underveis i prosessen. Det bør være god informasjonsflyt også blant de som ikke arbeider internt i prosjektet, men for eksempel med leverandører eller andre berørte parter. For å øke effektiviteten og potensielt inntektsgrunnlaget er det viktig at organisasjonen er klare på rollefordeling, ansvarlighet og har en god gruppedynamikk. En kultur som fremmer kreativitet og har fokus på motivasjon, psykologi og adferd styrker utviklingsarbeid. Alle involverte bør kjenne til virksomhetens strategi, og når både forretningsidé, markedsstrategi, konstruksjonsstrategi og produksjonsstrategi bestemmes bør alle områder i kjernen implementeres og diskuteres. For en best mulig utviklingsprosess bør også virksomheten følge med på teknologiske trender, forskning og utvikling som kan påvirke produktet, produksjonen eller markedsføringen. I tillegg blir metodevalg påvirket av kjernen, med tanke på prosedyrer, verktøy eller kommunikasjonsmidler som skal tas i bruk. Kvalitet og sikkerhet i alle ledd i utviklingen må også vurderes tverrfaglig, og under livsløpsbetraktninger av produktet må virksomheten tenke over alt fra råvareutvinning til vedlikehold av produkt og avfallshåndtering sett i lys av HMS, økonomi, produksjon og

utvikling på lik linje som de andre nevnte områdene som er berørt. Praktisk bruk av IPD og hvordan metoden vil brukes i arbeid med denne oppgaven beskrives i Tabell 3.5.

Tabell 3.5: Hovedelementene i IPD og hvordan IPD vil brukes i praksis i gjennomføringen av mastergradsarbeidet.

Hovedelementer i IPD	Beskrivelse av hovedelement	Implementering av IPD i mastergradsarbeidet
Kundebehov og markedskrav	Forstå kunders behov gjennom deres tanker om fremtidige produkter, og tilbakemeldinger om eksisterende produkter. Kan gjøres ved bruk av markedsundersøkelser, og konsepttesting i begrensede grupper. Riktig kartlegging og analyse av undersøkelsene kan gi redusert risiko og utviklingstid.	Mastergradsarbeidet tar utgangspunkt i et forprosjekt gjennomført i emnet TIP300, hvor det ble gjennomført en småskala markedsundersøkelse om interesse for produktet, rettet mot elektriske rullestoler. I tillegg tas det utgangspunkt i relevant FoU på området. Det vil også bli sett nærmere på lignende systemers egenskaper for å undersøke om noe kan implementeres i ønsket produkt.
Produktutviklingsprosessen	Sette av nok tid og øvrige ressurser, da tidsbruk og kvalitet kan ses på som kilder til konkurransefordeler. Tilpasse antall utviklingsprosjekter i samme periode i forhold til tilgjengelige ressurser.	Gjennom planlegging av dette prosjektets milepæler, aktiviteter og tidsbruk vil målrettet prosjektstyring bli brukt i tråd med IPD. I tillegg vil IPD følges under utvikling av prosessdiagram og de ulike prosesstrinnene vil bli fulgt. Det vil også bli valgt ut ulike metoder som vil bli brukt og tilpasset oppgavens formål for å sikre best mulig kvalitet på arbeidet.
Produktutviklingsgrupper og team	Involvere alle berørte parter tidlig i prosessen, for å se ting fra et større perspektiv, unngå flere produksjonsproblemer, og for å kunne jobbe med flere aktiviteter parallelt. Sørge for god kommunikasjonsflyt, og trofaste arbeidere.	Tidlig kontakt med veileder for å utveksle tanker og meninger om oppgavens form og innhold. I tillegg kontakte relevante fagmiljø ved NMBU tidlig i prosessen for å innhente kompetanse som kan komme til nytte underveis i gradsarbeidet, spesielt med tanke på forsøksgjennomføring og eventuelt produksjonsmetoder.

Tabell 3.5 forts.: Hovedelementene i IPD og hvordan IPD vil brukes i praksis i gjennomføringen av mastergradsarbeidet.

Hovedelementer i IPD	Beskrivelse av hovedelement	Implementering av IPD i mastergradsarbeidet
Prosessdesign	Tenke på nødvendig produksjonsverktøy, produksjonslinjer, framstilling, produksjonsrammer og begrensninger i arbeidet med design av produktet. På denne måten sikres produktets egenskaper og ytelse, det er gunstig økonomisk, og tanker rundt oppskalering av produksjon er ivaretatt.	Det vil bli tatt designmessige hensyn i utviklingen av produktet. Dette vil blant annet gjøres i en designorientert funksjonsanalyse.
Prosjektkostnader	Det er viktig å holde utviklingskostnadene så lave som mulig for at produktet kan selges til en akseptabel pris i markedet. Teammedlemmene bør tidlig få komme med innspill om realistiske tids- og kostnadsestimater og eventuelle kostnadsbesparende ideer. I tillegg bør dataverktøy brukes til å analysere kostnadsprognosene, og disse bør brukes aktivt i beslutningstagninger gjennom hele utviklingsprosessen.	Beslutninger som tas i prosjektet vil vurderes med hensyn til kostnader. I tillegg vil mer erfarne personer kontaktes med tanke på produktets gjennomførbarhet eller ved kritiske veiskiller, for å spare tid eller unngå blindveier i utviklingsprosessen.
Robust design	Fokus på kvalitet i konstruksjon og utforming av produktet, og bruk av utprøvde og pålitelige teknologier. Ta hensyn til eventuelle risikoer, og ikke utføre for omveltende designforandringer. Få prøvd ut produktet, både internt og hos en ekstern kvalitetssikrer, og troverdige levetidsundersøkelser.	Det vil bli utført eksperimenter for å finne en optimal overføringsløsning, i tillegg til at en funksjonsanalyse vil sikre at ulike hensyn er ivaretatt.
Dataverktøy	For å samle data, håndtere innsamlet data, gjøre analyser, kombinere materiale fra ulike deler av prosessen, og arbeide med en digital produktmodell bør dataverktøy benyttes for en mer effektiv utviklingsprosess. Ved bruk av dataverktøy er det lettere å gjøre endringer, og å sikre god informasjonsflyt.	Det vil bli brukt dataverktøy til databehandling i arbeid med prosjektet. I tillegg vil digital produktmodell utformes ved bruk av CAD-verktøyet Solid Works.

Tabell 3.5 forts.: Hovedelementene i IPD og hvordan IPD vil brukes i praksis i gjennomføringen av mastergradsarbeidet.

Hovedelementer i IPD	Beskrivelse av hovedelement	Implementering av IPD i mastergradsarbeidet
Effektiv utviklings-tilnærming	Sikre et godt fagmiljø med kvalifiserte og motiverte medarbeidere, gjerne med team som har arbeidet godt sammen tidligere. Gi ansvar som sikrer eierskapsfølelse, og sikre at alle teammedlemmer jobber mot felles mål med klare planer og strategier.	Eierskapsfølelsen ivaretas gjennom selvstendig ansvar for oppgaven. I tillegg vil nødvendig kompetanse etterstrebes gjennom litteraturstudium. Eksterne personer med relevant kompetanse eller erfaring vil kontaktes. Mål, planer og strategi fastsettes gjennom bruk av målrettet prosjektstyring i tråd med IPD.
Kontinuerlig forbedring	Kontinuerlig gjennomgå aktiviteter knyttet til utviklings- og designprosessen, stille seg selv spørsmål hvordan og hvorfor ting gjøres som de gjør og være åpen for endringer dersom det er nødvendig. Sørg for tilstrekkelig opplæring og kompetanseutvikling hos de ansatte, benytte tekniske hjelpemidler og formalisere metoder for å øke produktiviteten.	Kontinuerlig vurdere hva som skal gjøres, hvorfor det skal gjøres, hvordan det skal gjøres, og hvordan det eventuelt kan gjøres bedre. I tillegg til kontinuerlig egenvurdering vil aktivitetene knyttet til prosessen diskuteres jevnlig i samråd med veileder.

Ved å arbeide etter hovedelementene beskrevet i Tabell 3.5 er ønsket at undertegnede oppnår større effektivitet, lavere gjennomføringstid og bedre læringseffekt enn ved bruk av tradisjonell produktutviklingsmetodikk.

3.2.2. Målrettet prosjektstyring

Målrettet prosjektstyring (37) er en utbredt prosjektstyringsmetode for planlegging og gjennomføring av pso-prosjekter. Pso-prosjekter står for person-, system- og organisasjonsutviklingsprosjekter, og dette mastergradsarbeidet inngår i denne definisjonen. Retningslinjene i målrettet prosjektstyring gjelder for prosjekter som har som mål å løse en definert engangsoppgave, krever ulike ressurser og har begrenset tid. For å løse en engangsoppgave, som et prosjekt er, må man bruke tid på å analysere seg frem til arbeidet som må gjøres for å nå målet, og i hvilken rekkefølge aktivitetene skal gjøres. Målrettet prosjektstyring vil i dette gradsarbeidet bli brukt i planleggingsprosessen i kombinasjon med IPD, da dette er metoder

som komplementerer hverandre godt. Praktisk bruk av målrettet prosjektstyring er presentert i Tabell 3.6.

Tabell 3.6: Hovedelementene i målrettet prosjektstyring, og hvordan metoden vil anvendes i mastergradsarbeidet.

Hovedelementer	Beskrivelse av hovedelement	Implementering i mastergradsarbeidet
Planlegging	Drøfte og fastsette formål og omfang for prosjektet, og bestemme konkrete hovedmål, delmål og milepæler.	Undertegnede vil innhente relevant bakgrunnsinformasjon, og bruke dette for å få en bredere forståelse av prosjektet og lettere kunne definere konkrete mål og begrensninger for arbeidet. For å få så konkrete mål som mulig vil det bli fastsatt både prosjektmål, produktmål, forsøksmål og mål for eksterntesting, med tilhørende delmål. I tillegg vil milepæler for prosjektet som helhet defineres.
Organisering	Estimere bruk av ressurser og få oversikt over aktiviteter som kompletterer milepælene.	Det vil bli lagt en plan for aktiviteter som må gjøres for å nå de fastsatte milepælene og hvor mye tid de ulike aktivitetene forventes å trenge. Dette vil presenteres i en tids- og arbeidsplan. I tillegg vil relevante personer med ønsket kompetanse kontaktes, spesielt med tanke på forsøksgjennomføring.
Oppfølging	Analysere situasjonen man er i, velge tiltak og gjennomføre tiltakene.	Kontinuerlig følge med på hvordan undertegnede ligger an i forhold til tids- og arbeidsplanen, og vurdere om noe må flyttes på eller endres, eller om flere eksterne personer må kontaktes. Hyppige møter med veileder vil også sørge for jevnlig vurdering og analysering av arbeidet.

En utfordring med målrettet prosjektstyring er å estimere tiden som går med til de ulike aktivitetene som må gjøres. Ved bruk av målrettet prosjektstyring blir man oppmerksom på vanlige fallgruver, som typisk er altfor grov planlegging og overoptimistiske tids- og kostnadsestimater. Det er lurt å ha kortsiktige og kontrollerbare mål for å unngå fallgruvene.

3.2.3. Pughs metodikk

I denne oppgaven vil Pughs seleksjonsmatrise bli brukt til å evaluere ulike alternativer opp mot hverandre. Seleksjonsmatrisen gir et inntrykk av hva som er viktig ved et produkt, og kan være et godt hjelpemiddel når man skal foreta et veiskille for produktet. Ved bruk av seleksjonsmatrisen setter man opp kriterier som en løsning på et gitt problem bør inneha, og hvor viktig de ulike kriteriene er. Hvert løsningsalternativ blir gitt en viss poengsum for hvert kriterium, som representerer graden av tilfredsstillelse for kriteriet. På bakgrunn av denne metoden kan det bli lettere å avgjøre hvilke(n) løsning(er) som er verdt å ta med videre i utviklingsarbeidet (38).

Tabell 3.7: Eksempel på tabellarisk fremstilling av Pughs seleksjonsmatrise.

Kriterium	Alternativ	Alternativ 1		Alternativ 2	
		Score	Vektet score	Score	Vektet score
Kriterium 1 (20 %)		X ₁₁	Y ₁₁	X ₂₁	Y ₂₁
Kriterium 2 (30 %)		X ₁₂	Y ₁₂	X ₂₂	Y ₂₂
Kriterium 3 (5 %)		X ₁₃	Y ₁₃	X ₂₃	Y ₂₃
Kriterium 4 (25 %)		X ₁₄	Y ₁₄	X ₂₄	Y ₂₄
Kriterium 5 (20 %)		X ₁₅	Y ₁₅	X ₂₅	Y ₂₅
Total vektet score		-	ΣY ₁	-	ΣY ₂

Tabell 3.7 viser hvordan Pughs seleksjonsmatrise blir brukt i denne oppgaven. Hvert alternativ blir gitt en score (X) for hvor mye de tilfredsstillende de ulike kriteriene. Kriteriene er vektet med en gitt prosentdel, og den vektete scoren (Y) blir regnet ut og er scoren som tas med til total score. Ved bruk av Pughs seleksjonsmatrise er det dermed lett å finne ut hvilke løsninger som bør ses nærmere på, eller hvilke fokusområder man bør ha i videre utvikling.

3.2.4. SCAMPER

Alex F. Osborn har utviklet en taktisk metode for idégenerering som kalles SCAMPER (39). Metoden går ut på at man som utvikler stiller seg spesifikke spørsmål omkring produktet man ønsker å utvikle, og at man på denne måten kan komme frem til løsninger man ellers ikke ville tenkt på. Nøkkelord man skal ha i tankene underveis i prosessen er hvorfor, hvor, når, hvem, hva og hvordan. De ulike trinnene i metoden vil få brukeren til å utfordre sine allerede etablerte tanker, og resultatene kan potensielt føre til mer optimaliserte og gjennomførte produkter både med tanke på bruksområdene til produktet, prosjektplanlegging, kundesegmenter, produktoppbygning, økonomi og markedsføring.

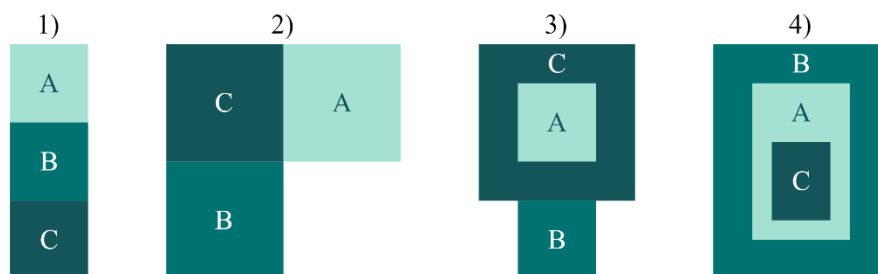
Tabell 3.8: Forklaring av akronymet SCAMPER.

Trinn	Betydning
Substitute (Substituere)	Undersøke om produktet eller prosessen kan endres eller brukes i andre sammenhenger enn det gjør per nå.
Combine (Kombinere)	Undersøke om produktet får flere bruksområder eller kan forbedres ved å kombinere det med flere produkter eller ideer.
Adapt (Tilpasse)	Undersøke om produktet kan tilpasses andre formål.
Modify (Modifisere)	Undersøke om endringer i for eksempel form, størrelse, farge eller design kan gjøre produktet bedre.
Purpose (Hensikt)	Undersøke om produktet kan være av interesse for andre kundegrupper eller markeder.
Eliminate (Eliminere)	Undersøke om produktet kan forenkles, ved å se om noen komponenter er overflødige og kan fjernes uten å endre produktets hovedfunksjon(er).
Rearrange (Omorganisere)	Undersøke om endring av rekkefølge eller sammensetning kan forbedre produktet.

I mastergradsarbeidet vil SCAMPER bli brukt jevnlig ved å alltid stille spørsmål rundt det som blir gjort. Ved prosjektplanleggingen vil metoden bli brukt for å kartlegge ulike aktiviteter som kan gjøres for å nå milepælene. Metoden vil også bli brukt for å generere løsninger til funksjonsalternativene som vil fremkomme av en funksjonsanalyse, og når det blir sett nærmere på eksisterende løsninger om noe kan implementeres i dette prosjektet. Metoden vil også trekkes aktivt frem for å fremprovosere kreativ tenkning ved ulike deler av prosessen.

3.2.5. Modularisering

Modularisering er en teknikk som brukes for å kunne se hvordan produktet kan organiseres (40). Det vil si at man går systematisk til verks for å undersøke ulike sammensetninger for produktets deler, og på denne måten kan konsepter og ideer genereres. I tillegg til at ulike deler kan settes sammen på ulike måter, kan også et produkt settes sammen med et likt produkt på ulike måter, gitt at produktet er laget som en modul. Delene eller produktet kan systematisk settes sammen lineært, vinkelrett, delvis integrert eller integrert, se Figur 3.2.



Figur 3.2: 1) Lineær sammensetning, 2) vinkelrett sammensetning, 3) delvis integrert sammensetning og 4) integrert sammensetning.

I mastergradsarbeidet vil modularisering både bli brukt i utvikling av en modul, og under kartlegging av hvordan de ulike modulene kan settes sammen for ulike bruksområder.

3.2.6. Litteraturstudie

Tekstmateriale som anses som relevant for oppgaven er brukt i litteraturstudie. Litteraturstudie er brukt for innhenting av nødvendig kunnskap og dermed danne det faglige grunnlaget for gradsoppgaven. I tillegg kan man gjennom litteraturstudie som metode dykke dypt inn i et tema, og se på aktuell forskning på emnet og ulike problemstillinger knyttet til det. På denne måten kan man få et større perspektiv på emnet man fordyper seg i, og få bredere teoretisk forståelse.

Det har i arbeid med oppgaven blitt brukt fagbøker som har vært pensum i emner ved NMBU, og utdelte kompendier. For å utvide horisonten og få tak i flere og mer spesifikke referanser er det gjennomført litteratursøk i følgende databaser og søkemotorer:

- Universitetsbiblioteket Oria
- Nasjonalbiblioteket
- Brage Bibsys
- Ås bibliotek, Ski bibliotek og Horten bibliotek
- Google

Fremgangsmåten for søkingen har vært ved å finne ord som er nok beskrivende til at relevante resultater dukker opp. Søkordene har blitt nedskrevet, synonymer funnet, og ved å finne

enkelte relevante referanser har det fungert å plukke opp ord og uttrykk i teksten for å få flere treff av samme type. Nedenfor følger en liste over brukte søkeord.

- Inductive charg*
- Wireless power transfer
- Wireless charg*
- Electric vehicle charg*
- Trådløs lading
- Elektromagnetisk induksjon
- Inductice coupling
- Magnetic resonant coupling
- Cordless charg*
- Induction coil charg*

«*» betyr at søket omfatter alle ord som starter med «charg», og dermed dukker for eksempel både «charging», «charger» og «charge» opp i søkeresultatene.

3.2.7. Programvarer

I tråd med IPD vil det bli brukt ulike programvarer for å forenkle arbeidet og integrere ulike fagområder. Programvarene som vil bli brukt er presentert i Tabell 3.9.

Tabell 3.9: Programvarer som vil bli brukt i gradsarbeidet.

Program	Bruksområde
Microsoft Office Word	Referansehåndtering og tekstbehandling
Microsoft Office Excel	Diagramverktøy
Draw.io 2019 v.10.6.5 (online) (41)	Figurbehandling
Microsoft Paint	Bilde- og figurbehandling
SolidWorks Student Edition 2018	CAD-verktøy
Granta Design, CES Edupack 2018	Materialdatabase

3.3. Kvalitetssikring

Det settes særlige krav til både rapportering, arbeidsmetode og produkt i arbeid med denne gradsoppgaven. Kravene er viktig å forholde seg til med tanke på sikkerhet og for å sikre troverdigheten til arbeidet som helhet.

Rapport

Teorien som oppgaven baserer seg på blir stort sett hentet fra skriftlige kilder som har vært gjennom intern kontroll av et forlag før utgivelse. I tillegg blir det forsøkt så godt det lar seg gjøre å kryssjekke at flere referanser inneholder lik informasjon, da dette styrker troverdigheten. Usikkerheter knyttet til teori skal komme klart frem av oppgaveteksten. Figurer og bilder som fremkommer i rapporten er fremstilt av undertegnede med mindre annet kommer tydelig frem av figurtekst. Microsoft Word sitt referansesystem er blitt brukt til å håndtere referanser i tråd med ISO 690, og formler baserer seg på *Gieck engineering formula* (44) og Tekniske tabeller (45).

Produkt

Når man utvikler et produkt er det viktig at både forbrukere og utviklere har en klarhet i hva som forventes av produktet. Her er både kvalitetssikring av arbeidsprosessen og bruk av kvalitetsdokumentasjon viktig. Kvalitetsdokumentasjon er for eksempel samsvarserklæringer og dokumenterte tekniske spesifikasjoner, og at godkjente elektriske produkter oppnår CE-merking. CE-merking er et synlig merke på produktet, og med merkingen følger markedsadgang til EØS-området (42).



Figur 3.3: CE-merking kan gis til elektriske produkter, og betyr at produktet tilfredsstillende alle minstekrav innen HMS som er definert av EØS-avtalens synkronisering av norske og europeiske myndigheter (43).

Ved å forholde seg til gjeldende lover, forskrifter og standarder gjennom alle trinnene i prosessen sikrer utviklere og produsenter seg mot strafferettslig ansvar som følge av feil ved produktet. I tillegg vil brukeren kunne føle seg trygg på at sikkerheten er ivaretatt. Lover, forskrifter og standarder som vil overholdes ved utvikling, planlegging, gjennomføring, vurdering og oppfølging av induksjonsladeren for små kjøretøy fremkommer av Tabell 3.10.

Tabell 3.10: Lover, forskrifter og standarder som berøres i arbeidet med gradsarbeidet.

Identifikasjon	Tittel	Kommentar
LOV-1929-05-24-4 (El-tilsynsloven) (44)	Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr	Omhandler alt elektrisk utstyr.
LOV-1976-06-11-79 (prodctrl) (45)	Lov om kontroll med produkter og forbrukertjenester (produktkontrollloven)	Omhandler HMS i forhold til produksjon og bruk av produkt.
LOV-2002-06-14-20 (Brann- og eksplosjonsvernloven) (46)	Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver	Omhandler HMS rettet mot forebygging av brann i alle virksomhetens faser.
LOV-1981-03-13-6 (forurl) (47)	Lov om vern mot forurensninger og om avfall (forurensningsloven)	Omhandler avfallshåndtering og forurensning.
LOV-2000-05-12-36 (stvl) (48)	Lov om strålevern og bruk av stråling (strålevernloven)	Omhandler strålingskilder, herunder elektriske og magnetiske felt.
LOV-2005-06-17-62 (aml) (49)	Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (arbeidsmiljøloven)	Omhandler alle virksomheter med arbeidstakere.

Tabell 3.10 forts.: Lover, forskrifter og standarder som berøres i arbeidet med gradsarbeidet.

Identifikasjon	Tittel	Kommentar
FOR-2017-10-10-1598 (50)	Forskrift om elektrisk utstyr	El-tilsynsloven §§10, 11 og 13a
FOR-1996-12-06-1127 (Internkontrollforskriften) (51)	Forskrift om systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid i virksomheter	El-tilsynsloven §§3, 9 prodctrl §8 forurl §52b stvl §§11,12 aml §3-1
FOR-1998-11-06-1060 (FEL) (52)	Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg	El-tilsynsloven §2
FOR-2017-10-10-1597 (53)	Forskrift om elektromagnetisk kompatibilitet	El-tilsynsloven §§10, 11, 13a
ISO 128	Tekniske tegninger	-
ISO 690	Information and documentation — Guidelines for bibliographic references and citations to information resources	-
NS-EN ISO 9000	Ledelsessystemer for kvalitet – Grunntrekk og terminologi	Overordnet kvalitetssikringsstandard.
NS-EN ISO 9001	Systemer for kvalitetsstyring - Krav	Spesielt relevant er kapittel 7 «Realisering av produkt».
NEK EN 61000	Elektromagnetisk kompatibilitet (EMC) - Del 3-2 - Grenseverdier for utsendelse av harmoniske strømmer (utstyr med inngangsstrøm opp til og med 16 A per fase)	-
NS 9431	Klassifikasjon av avfall	-
IP (54)	Tetthetsgrad i forhold til støv og vann.	-

Informasjonen i Tabell 3.10 viser at det er en sammenheng mellom lovene og forskriftene. Denne sammenhengen illustreres i Figur 3.4. Både lover og forskrifter er juridisk bindende, mens standarder er frivillig å bruke. Under følger en mer forklarende oversikt over lover, forskrifter og standarders rolle. Direktiver fra EU er ikke tatt med i denne sammenhengen, da direktivene gir krav som må implementeres i det nasjonale lovverket i form av lov eller forskrift.



Figur 3.4: Forskrifter og standarder er underordnet lover.

Lover (55)

I Norge er det Stortinget som vedtar eller endrer lover, og lover er rangert høyest i det norske regelverket. Lover er definisjoner av rettigheter og plikter en må forholde seg til. Som det fremkommer av Tabell 3.10 henviser forskriftene til lovene. Det er fordi lovene ofte er generelle bestemmelser, og de utdypes i forskrifter.

Forskrifter (56)

Forskrifter er en bestemmelse som er underordnet lover. Forskriftene fungerer ofte som en detaljering og konkretisering av enkelte paragrafer i en eller flere lover. Det er ofte forskrifter som brukes for å finne hvilke regler som gjelder for et bestemt tilfelle.

Standarder (57)

Standarder er en mer detaljert beskrivelse enn forskriftene. Standarder utarbeides ofte etter bransjens ønske. Ved å følge en standard sørger man for at alle lover og forskrifter vedrørende produktet blir fulgt. I tillegg sørger det for felles systemer for produkter og tjenester uavhengig av landegrenser. Dette resulterer i at produsenter kan komme til på flere markeder og kunder får større valgfrihet.

3.4. Prosesstrinn

Arbeidsprosessen til prosjektet vil følge av IPD (34), og kan betraktes som veien man skal gå for å komme i mål med et vellykket prosjekt. Ved å ha en klar tanke om hvordan hele prosessen skal foregå fra start, vil man kunne ha en mer effektiv arbeidsgang. På denne måten kan man si at god planlegging av hele utviklingsprosessen fungerer som en intern kvalitetssikring.



Figur 3.5: De ulike trinnene som inngår i arbeidsprosessen.

Arbeidsprosessen består av fem ulike trinn, se Figur 3.5. Hvert trinn må tilfredsstillende utviklers kriterier før neste steg påbegynnes. Trinnene vil bli beskrevet nærmere i de påfølgende avsnitt.

Utredning

Hensikten med utredningstrinnet er å generere produktideer som kan være en god investering for virksomheten. Dette trinnet danner grunnlaget for utviklingsprosjektet. Ved god utredning er man godt rustet til fremtidige utfordringer, da man allerede har forutsett at det er en viss risiko for at ulike scenarioer inntreffer. Etter utredningsfasen er det ønskelig at virksomheten sitter igjen med informasjon om kundebehovene, markedskravene, kostnadskalkyler som viser at det vil være mulig å gå i overskudd ved å produsere og selge produktet, risikoer knyttet til prosjektet, om det er mulig å oppnå noen konkurransefordeler, og et estimat av ressursbruk.

Konseptutvikling

Etter utredningen vil det være nødvendig å konkretisere informasjonen som er innhentet til å omhandle selve produktets egenskaper, krav og funksjoner. I konseptutviklingsfasen skal ulike

konseptalternativer genereres, og det skal tas avgjørelser rundt hvilken retning produktet skal ta videre. Det vil i denne fasen være gunstig å lage en prototype for å teste at ulike systemer eller egenskaper fungerer som planlagt.

Konstruksjon og design

I konstruksjons- og designtrinnet skal konseptet som ble valgt i tidligere trinn resultere i et produktdesign som tilfredsstillende fastsetter egenskaper, krav og funksjoner. Det vil i dette trinnet bli laget tekniske tegninger, og bli produsert en komplett prototype for å teste produksjonsmetoder. Dersom alle kriterier er godkjent vil fullskalaproduksjon starte.

Realisering

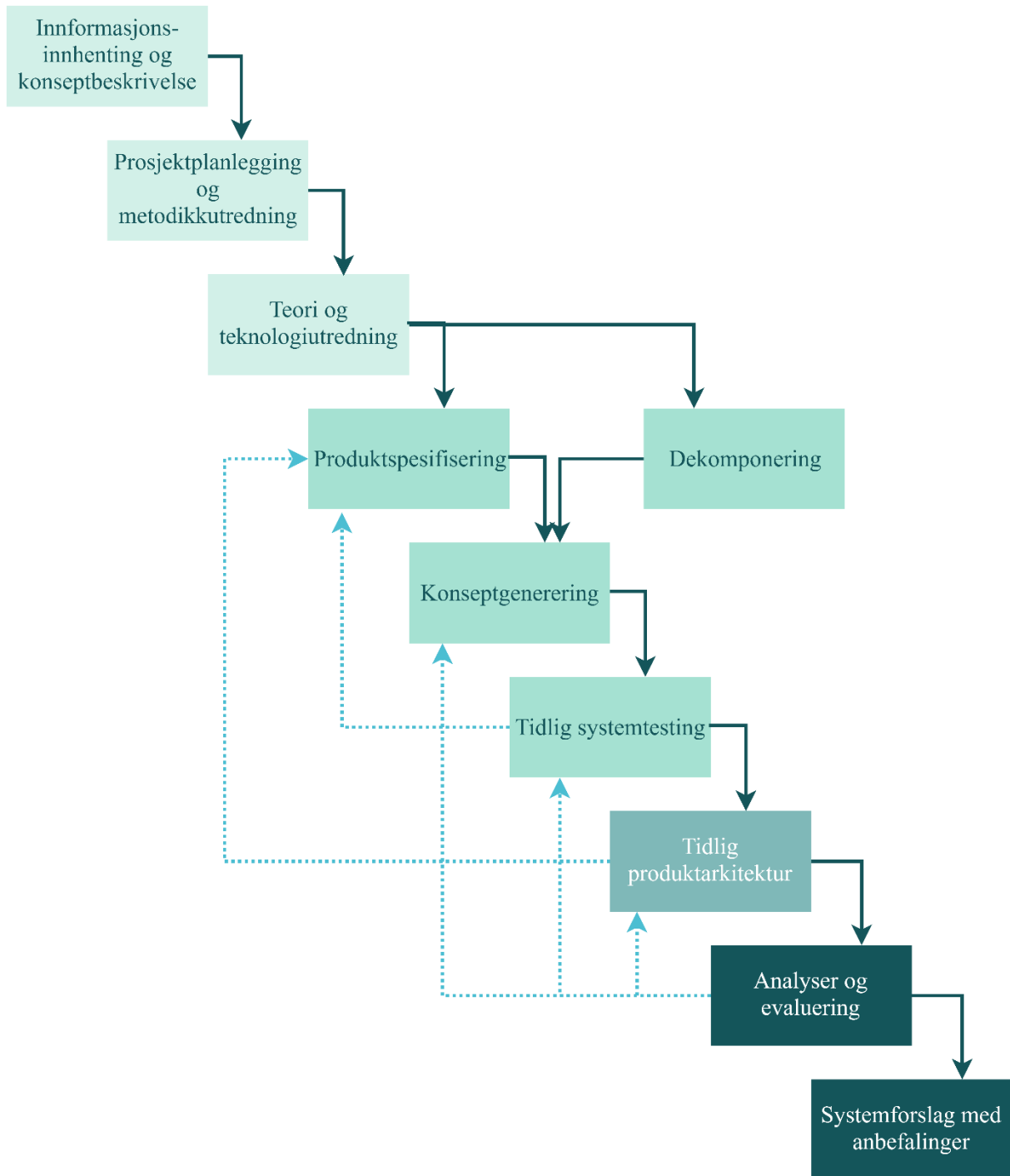
Hensikten med realiseringstrinnet er å få produktet ut på markedet. Det er på dette trinnet man finner ut om produktet tilfredsstillende dekker kundebehovene og markedskravene, gjennom generert salg og inntektskommelse.

Evaluering

Evaluering av produktet og prosessen vil foregå gjennom hele prosjektperioden, men dette trinnet er lagt til for å vise at prosessen ikke er ferdig når produktet er kommet på markedet. Tilbakemeldinger fra kunder og erfaringer tilegnet ved oppskalering av produksjon vil være til hjelp for å kontinuerlig forbedre produktet, og sikre at det tilfredsstillende dekker kundens og markedets krav for å kunne overleve lengst mulig på markedet. Lærdom fra erfaringer gjort i prosjektet kan bli dratt nytte av i senere prosjekter.

Prosessdiagram for mastergradsarbeidet

Gjennom mastergradsarbeidet vil det bli lagt størst vekt på utredning, konseptutvikling, konstruksjon og design, og evaluering. Utviklingsprosessen for arbeidet, med tilhørende trinn, er illustrert i Figur 3.6. For å sikre at sluttresultatet av prosessen blir så godt som mulig er det lagt inn tilbakekoblinger fra enkelte prosessstrinn tilbake til trinn på et tidligere nivå, illustrert med stiplede linjer. Det å kunne ha muligheten til å gå tilbake i arbeidsprosessen er viktig for kontinuerlig utvikling av produktet, da informasjon på et sent tidspunkt i prosessen kan være av betydning for arbeidet gjort i et tidligere trinn. Selv om arbeidsprosessen i Figur 3.6 har et sluttsteg, er prosessen fremdeles ikke ferdig. Systemforslaget vil måtte gjennomgå flere tester før en eventuell realisering kan finne sted.



Figur 3.6: Illustrasjon av systemutviklingsprosessen. De stiplede linjene symboliserer iterasjonssyklus, og indikerer at ettersom det fremkommer ny informasjon bør deler av prosessen gjøres igjen for å sikre at vurderinger blir tatt på et godt nok grunnlag. Jo flere ganger iterasjonene kan gjennomføres, desto mer optimalisert og robust blir systemet.

4. Teori og teknologiutredning

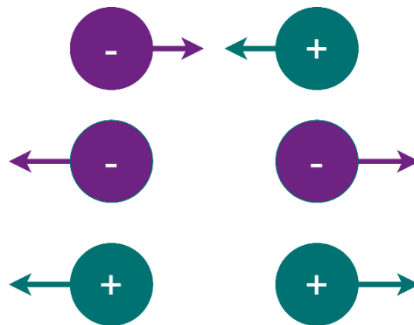
Det er nødvendig å forstå teorien og teknologien som ligger bak et induktivt ladekonsept for å ha et grunnlag å basere fremtidige vurderinger i utviklingsprosessen på.

4.1. Grunnleggende fysisk teori

Den grunnleggende fysiske teorien vil baseres på (58) og (59).

4.1.1. Elektrisitet

Mellom to elektrisk ladde partikler er det elektriske krefter som kommer av positive ladninger og negative ladninger. Kraften mellom ulike ladninger tiltrekker hverandre, mens kraften mellom like ladninger frastøter hverandre.



Figur 4.1: Forskjellige ladninger tiltrekker hverandre, og like ladninger frastøter hverandre.

Atomer består av nøytroner, protoner og elektroner. Et proton og et elektron har nøyaktig like stor ladning, kalt elementærladningen, men protonet er definert som positivt ladd og elektronet som negativt ladd. Elementærladningen er en kvantifisering av ladning, og all målt ladning er gitt som et antall av elementærladninger. Elementærladningen har en eksakt verdi som blir gjeldende fra 20. mai 2019 (60), og er satt til

$$e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$q = Ne \quad [4.1.1.]$$

Enheten for ladning er coulomb (C), og total ladning q er produktet av antall ladninger N og elementærladningen e . Nøytronet har ingen ladning og befinner seg i atomkjernen sammen med protonet. Kraftene mellom de ulike ladningene gjør at atomet blir holdt sammen, og elektriske krefter gjør også at flere atomer kan holdes sammen. Den elektriske kraften F_e mellom to ladde partikler som står i ro, den elektriske Coulomb-kraften, er gitt av Coulombs lov:

$$F_e = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad [4.1.2.]$$

I Coulombs lov er q_1 og q_2 to ladninger med en avstand r . k_e er en proporsjonalitetskonstant, kalt coulombkonstanten, og er satt til

$$k_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \times 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}$$

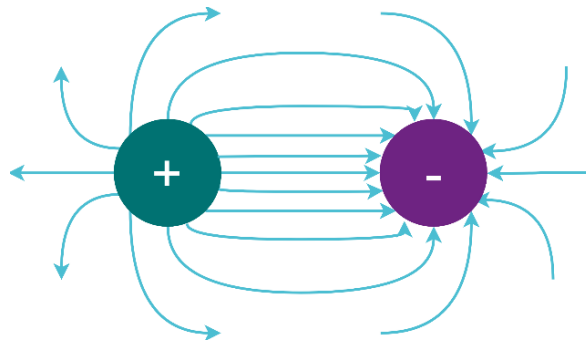
Hvor ϵ_0 er en konstant, og kalles tomromspermittiviteten eller vakuums permittivitet.

$$\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \frac{\text{C}^2}{\text{Nm}^2}$$

I et område hvor det virker elektriske krefter er det et elektrisk felt. Størrelsen på det elektriske feltet kalles elektrisk feltstyrke og er definert som

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \quad [4.1.3.]$$

Hvor den elektriske feltstyrken \vec{E} er forholdet mellom den elektriske kraften \vec{F} og ladningen q . Elektrisk feltstyrke oppgis som regel i V/m (volt per meter). For å illustrere styrken på, utbredelsen av og retningen til det elektriske feltet, brukes ofte elektriske feltlinjer.



Figur 4.2: Det elektriske feltet beveger seg ut fra positive ladninger og inn mot negative ladninger. Positive ladninger kan dermed ses på som en kilde, og negative ladninger som en sluk. Jo tettere feltlinjene er plassert, jo sterkere er det elektriske feltet.

For å kvantifisere elektrisk feltstyrke ser man på antall feltlinjer gjennom en lukket flate S (Gaussflate). Dette kalles elektrisk fluks ϕ , og er definert av Gauss' lov.

$$\phi_{net} = \oint_S \vec{E} \cdot \hat{n} dA = \oint_S E_n dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad [4.1.4.]$$

Gauss lov sier at netto fluks ut er proporsjonal med ladningen q innenfor flate S . Når det elektriske feltet flytter en ladning fra a til b , utfører det et arbeid som fører til en endring i potensiell energi. Dette arbeidet per ladningsenhet kalles elektrisk potensialforskjell eller spenning U og måles i volt (V).

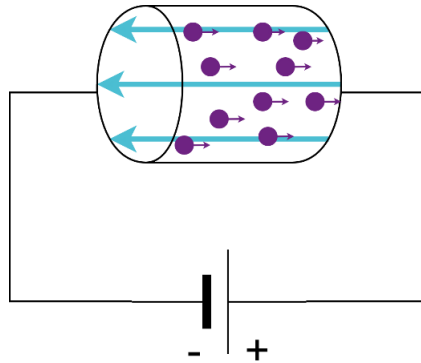
$$U_{ab} = \frac{W_{ab}}{q} \quad [4.1.5.]$$

$$dU = \frac{-\vec{F} \cdot d\vec{l}}{q} = \frac{-q\vec{E} \cdot d\vec{l}}{q} = -\vec{E} \cdot d\vec{l} \quad [4.1.6.]$$

Elektriske ledere er bygd opp av atomer med ett eller flere elektroner med en løs binding til atomet, og som dermed kan frigjøres lett. Disse elektronene kalles valenselektroner. Dersom lederen blir koblet til en spenningskilde i en lukket krets vil det elektriske feltet flytte ladde partikler, og lederen vil overføre elektrisk strøm. Elektrisk strømstyrke I måles i ampere (A), og kan defineres som:

$$I = \frac{q}{t} \quad [4.1.7.]$$

Det vil si ladning q målt i coulomb (C) som passerer et tverrsnitt av lederen per tidsenhet t målt i sekunder (s). I og med at positive ladninger kan betraktes som en kilde og negative ladninger kan betraktes som en sluk, vil det elektriske feltet bevege seg i motsatt retning av elektronene som tiltrekkes av den positive polen på spenningskilden. Positiv strømretning er definert til å være samme retning som det elektriske feltet i lederen, se Figur 4.3.



Figur 4.3: Positiv strømretning går fra positiv til negativ pol, mens elektronenes bevegelse vil være mot den positive polen.

Strøm deles opp i likestrøm og vekselstrøm. Når de ladde partiklene har en nettoforflytning i samme retning med konstant strømstyrke, kaller vi det likestrøm (DC). Ved vekselstrøm (AC) endres retningen med en frekvens f (måles i Hz). I vanlige husholdninger er det enfaset vekselstrøm med 50 Hz en får ut av stikkontakten. Frekvens kan defineres som den inverse av tiden mellom to ganger en hendelse som opptrer regelmessig inntreffer.

$$f = \frac{1}{T} \quad [4.1.8.]$$

Elektronene som beveger seg når det går strøm, møter på motstand i form av lederens atomer. Denne motstanden kalles resistans R , og størrelsen har fått navnet ohm (Ω). Resistansen er definert til å være forholdet mellom spenningen over lederen og strømmen gjennom lederen, og dette gir Ohms lov:

$$R = \frac{U}{I} \quad [4.1.9.]$$

Ved å sette sammen uttrykkene gitt av [4.1.7.] og [4.1.5.] får vi gitt at det elektriske arbeidet W er:

$$W = UIt \quad [4.1.10.]$$

Setter vi spenningen vi får av [4.1.9.] inn i [4.1.10.] får vi uttrykket:

$$W = RI^2t \quad [4.1.11.]$$

Det vil si at den elektriske energioverføringen er proporsjonal med kvadratet av strømmen. Energioverføring per tidsenhet kalles effekt P , og enheten for effekt er watt (W). Dette gir uttrykket:

$$P = \frac{W}{t} \quad [4.1.12.]$$

Det er vanlig å skrive effekt P i elektrisk sammenheng på følgende former

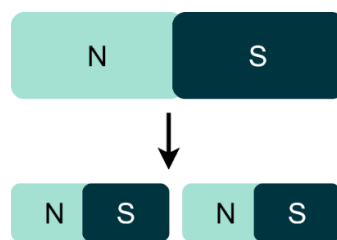
$$P = UI = RI^2 = \frac{U^2}{R} \quad [4.1.13.]$$

Forholdet mellom tilført effekt og avgitt effekt kalles virkningsgrad η , og er et enhetsløst tall mellom 0 og 1.

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}} \quad [4.1.14]$$

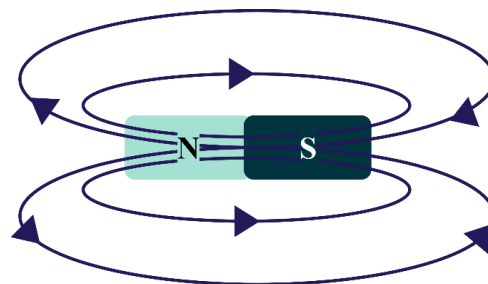
4.1.2. Magnetisme

Magnetiske ladninger deles inn i sydpol og nordpol. Ladningene skiller seg fra elektriske ladninger ved at det kun eksisterer magnetiske dipoler, ikke monopoler.



Figur 4.4: Ved å dele en magnet i to får man to nye magneter, med hver sin nord- og sydpol.

På samme måte som med elektriske ladninger tiltrekkes ulike magnetiske poler hverandre, mens like poler frastøter hverandre. I områdene hvor det virker magnetisk kraft er det magnetiske felt. Magnetiske felt kan på like linje med elektriske felt illustreres ved bruk av feltlinjer. Magnetiske feltlinjer har ingen kilder eller sluk, men er lukkede kurver.



Figur 4.5: Illustrasjon av magnetiske feltlinjer. Retning på de ytre feltlinjene er fra nordpol til sydpol, mens retningen på de indre feltlinjene er fra sydpol til nordpol.

De magnetiske feltlinjene viser retningen og styrken på det magnetiske feltet. Styrken kan ses på som tettheten av feltlinjene. Magnetisk feltstyrke B , også kalt magnetisk flukstetthet, måles i tesla (T) og kan defineres som

$$B = \frac{F_m}{qv} \quad [4.1.15]$$

Det vil si at magnetisk flukstetthet er kraften F_m som virker på en partikkel med elektrisk ladning q som beveger seg med hastighet v . Fra likning [4.1.15.] finner vi at den magnetiske flukstettheten som befinner seg rundt en strømførende ledning med lengde l og strøm I påvirket av kraft F_m er

$$B = \frac{F_m}{Il} \quad [4.1.16.]$$

Biot-Savarts lov gir at verdien til den magnetiske flukstettheten i et punkt i magnetfeltet rundt en lang rett leder er

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad [4.1.17.]$$

For strømelement $Id\vec{l}$ ved posisjon \vec{r} .

Retningen til magnetisk flukstetthet er den samme retningen som det magnetiske feltet har, og partikkelen beveger seg vinkelrett på feltet. Magnetisk fluks ϕ_m måles i Weber (Wb). Gitt av den magnetiske flukstettheten, kan magnetisk fluks skrives som

$$\phi_m = \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad [4.1.18.]$$

4.1.3. Elektromagnetisme

En kraft som virker på ladning q i både elektrisk felt \vec{E} og magnetfelt \vec{B} kalles Lorentz-krafta, og kan ved hjelp av [4.1.3.] og [4.1.15.] skrives som

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad [4.1.19.]$$

Faradays induksjonslov sier at det vil induseres en elektromotorisk spenning i en krets når den magnetiske fluksen endrer seg. Elektromotorisk spenning \mathcal{E} kalles den drivende spenning, og er spenningsforskjellen mellom tilkoblingspunktene til en ubelastet spenningskilde. Faradays induksjonslov sier også at et tidsvarierende magnetfelt alltid henger sammen med et tidsvarierende elektrisk felt (og motsatt). Faradays lov er dermed en viktig beskrivelse av energioverføring ved induksjon.

$$\mathcal{E} = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dA = -\frac{d\phi_m}{dt} \quad [4.1.20.]$$

Retningen er gitt av Lenz' lov, som sier at strømmen vil ha en retning som gjør at kreftene som oppstår vil motsette seg forandring. Dersom den elektromotoriske spenningen blir indusert i en tett viklet spole med N viklinger, blir den induserte elektromotoriske spenningen

$$\mathcal{E}_{tot} = N\mathcal{E} \quad [4.1.21.]$$

4.2. Elektroteknikk

Teknikken bak anvendelsen og fremstillingen av elektrisk energi kalles elektroteknikk, og kunnskaper om elektroteknikk er nyttig for å skjønne hva som skjer i elektriske kretser og hvorfor ulike komponenter er nødvendig. Elektroteknikken bygger på den fysiske teorien fra kapittel 4.1, og informasjonen som fremkommer baseres på (61) og (62).

4.2.1. Elektriske ledere

Det er en resistans i alle ledere, og den er bestemt av resistiviteten ρ til materialet lederen er laget av, lengden l , og tverrsnittet A av lederen.

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad [4.2.1.]$$

Elektriske ledere kan deles inn i superledere, metalliske ledere, halvledere, isolatorer og elektrolytter. Inndelingen tar utgangspunkt i situasjonen ledningene skal foregå på i en gitt situasjon (63). Elektriske ledere blir blant annet brukt til å lede strøm mellom ulike komponenter, som induktorer (for eksempel spoler), og for å føre strøm fra strømmett til elektrisk apparat.

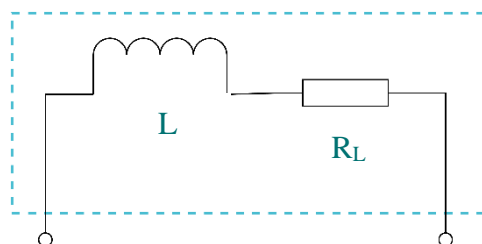
4.2.2. Induktans

En spole er en topolet komponent som er å finne i elektriske kretser for å oppvise en induktans eller for å skape et magnetfelt. Spolen er bygd opp av en elektrisk leder som er viklet sammen, uten elektrisk berøring mellom vindingene. Når spolen blir tilført elektrisk strøm vil den oppføre seg som en permanentmagnet og bygge opp et magnetfelt. Den elektriske størrelsen for induktans eller induktivitet, L , måles i Henry H. Induktiviteten for en jevnt viklet, sylindrisk spole kan skrives

$$L = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad [4.2.2.]$$

Hvor μ er produktet av absolutt permeabilitet og relativ permeabilitet målt i H/m, N er antall vindinger, A er arealet m^2 og lengden l målt i m. Fenomenet som gjør at magnetfeltet rundt lederen vil endres dersom man varierer strømstyrken kalles selvinduksjon. Mens når det er snakk om to spoler, og endring i strøm i den ene spolen endrer den induserte spenningen i den andre spolen, kaller vi det gjensidig induktans.

I utgangspunktet kan magnetfeltet en spole genererer være uendelig sterkt, men i praksis vil resistansen sette en grense for hvor mye spolen tåler før den brenner opp. I kretser med induktans er det ikke rent induktive belastninger, da den elektriske lederen også har en viss resistans. For å ta hensyn til dette er det vanlig å betrakte en spole som en induktans med en indre resistans som markeres på utsiden. Se Figur 4.6.



Figur 4.6: En spole kan forenklet betraktes som en komponent med en ren induktans L og en ledningsresistans R .

Når vekselspenning blir koblet til den induktive belastningen vil det både oppstå faseforskyvning mellom spenning og strøm, i tillegg til at induktiv reaktans X_L vil opptre

sammen med resistansen R. Den induktive reaktansen vil også opptre som en strømbegrensende faktor. Induktiv reaktans har også enheten Ohm, og er avhengig av frekvensen og induktansen:

$$X_L = 2\pi fL \quad [4.2.3.]$$

4.2.3. Kapasitans

En kondensator er en elektrisk komponent som lagrer ladning/energi. Den lagrede energien blir avgitt tilbake til kretsen ved en senere anledning. En parallellplatekondensator består av to plater med motsatt rettet ladning med et dielektrikum mellom seg. Mellom platene oppstår et elektrisk felt. Kapasiteten en kondensator har til å ta opp ladning kalles kapasitans C og måles i farad (F). Definisjonen til kapasitans er

$$C = \frac{Q}{U} \quad [4.2.4.]$$

Hvor Q er ladningen er på den positivt ladde lederen i coulomb, og U er spenningen mellom de to lederne i volt. I en parallellplatekondensator er kapasitansen C uavhengig av ladning og spenning og skrives:

$$C = \frac{Q}{U_{21}} = \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad [4.2.5.]$$

Hvor ϵ_0 er tomromspermittiviteten, ϵ_r er permittiviteten til dielektrikumet, A er platenes areal og d er avstanden mellom platene. En kondensator kan bli brukt i induktive kretser for å minimere energitap, ved at den kompenserer for reaktiv effekt som ikke kan omsettes til arbeid. Kondensatoren kan også bli brukt til å glatte ut vekselspenningen ved å kontinuerlig slippe ut litt av den opplagrede ladningen når den blir tilført mer ladning.

På samme måte som at det opptre en induktiv reaktans X_L i spolen, vil det i en kondensator under vekselstrøm opptre en kapasitiv reaktans X_C . Den kapasitive reaktansen er også strømbegrensende, og kan skrives som:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad [4.2.6.]$$

4.2.4. Faseforskyvning

I vekselstrømskretser som inneholder både resistive belastninger, kondensatorer og induktanser vil det som regel være en faseforskyvning mellom strøm og spenning. Ved vekselstrøm og resistive belastninger vil strøm og spenning nå sine topp- og nullpunkter samtidig, og vil ligge i fase. Men dersom vi har en vekselstrømskrets med en ideell spole, uten resistans, vil spenningen være 90° faseforskjøvet før strømmen. Men siden spoler alltid har en viss resistans vil faseforskjellen være mellom 0° og 90° . I kapasitive kretser vil strømmen ligge 90° før spenningen. I en krets vil derfor induktansen og kapasitansen motvirke hverandre.

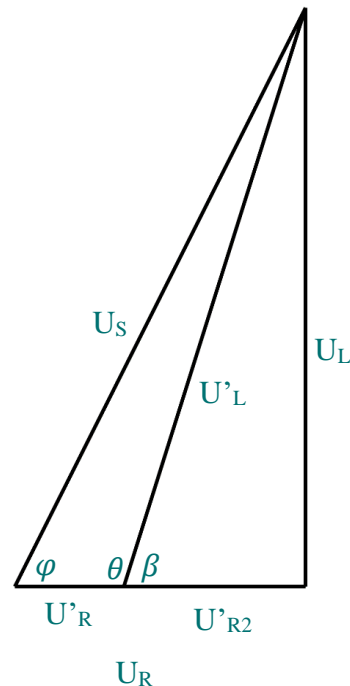
4.2.4. Aktiv og reaktiv effekt

Faseforskyvning fører også til at man får en aktiv effekt P og en reaktiv effekt Q i kretsen. Den reaktive effekten kan ikke utnyttes i en krets, og omsetter ikke et arbeid. På tross av dette trekker den reaktive effekten strøm. Det er dermed ønskelig å ha så lav andel reaktiv effekt som mulig,

og ha så stor andel aktiv effekt som mulig. Aktiv effekt er effekten som utfører arbeidet i kretsen, og det er kun den resistive delen som kan utvikle aktiv effekt. Tilsynelatende effekt er den effekten det ville vært i kretsen dersom det ikke hadde vært for faseforskyvningen. Reaktiv, aktiv og tilsynelatende effekt kan bli funnet ved hjelp av målinger og beregninger. Et nyttig hjelpemiddel er spennings trekanten illustrert i Figur 4.7. Da vil spenningene U_S , U'_L og U'_R kunne måles. Grunnen til at verdiene merkes er fordi spolen ikke kun har en induktiv komponent men også resisitiv, og de egentlige verdiene for U_R og U_L må derfor beregnes fra målingene. Ved hjelp av de målte verdiene, spennings-trekanten og trigonometriske funksjoner vil de ulike spenningsandelene kunne beregnes. Cosinussetningen kan bli brukt når lengdene av trekanten er kjent, men ikke vinklene. Cosinussetningen med de målte spenningene blir

$$U'^2_L = U^2_S + U'^2_R - 2U_S U'_R \cos(\varphi) \quad [4.2.7.]$$

Cos φ kalles effektfaktoren, da denne faktoren kan multipliseres med strøm og spenning for å angi størrelsen på den aktive effekten.

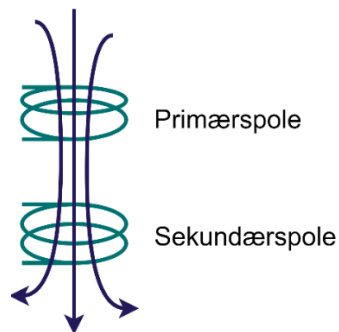


Figur 4.7: I induktive kretser er det en faseforskyvning, og spennings trekanten illustrerer forholdet mellom resistansspenningen U_R , induktansspenningen U_L og total påtrykt spenning U_S . Ved bruk av spennings trekanten og trigonometri kan de ulike spenningene beregnes.

4.3. Elektromagnetisk effektoverføring

En induksjonslader skal lade opp batterier ved hjelp av elektromagnetisk induksjon, hvor elektrisk energi skal overføres mellom to induktorer. Primærsiden genererer et varierende magnetfelt, og med sekundærspolen plassert i magnetfeltet vil det bli indusert en elektro-

motorisk spenning. Den induerte elektromotoriske spenningen kan bli brukt til å lade opp et elektrisk apparat.

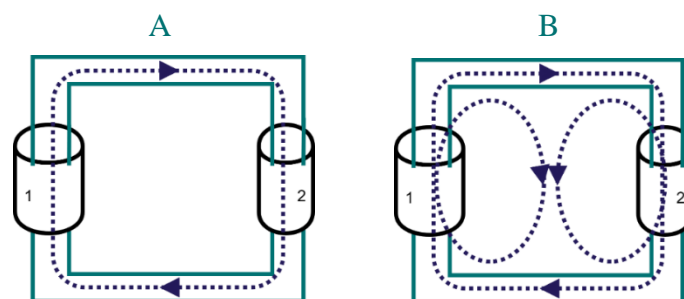


Figur 4.8: Magnetfeltet går fra primærspolen til sekundærspolen, og det indueres en ems i sekundærspolen.

Induksjonslading bygger på transformatorprinsippet. En transformator, ofte kalt trafo, brukes for å endre spennings- eller strømnivået i en vekselstrøm til et høyere eller lavere nivå. Dette skjer ved hjelp av elektromagnetisk induksjon. En trafo består av en primærvikling, en sekundærvikling og en kjerne av ferromagnetisk materiale som kobler viklingene sammen. Primærviklingens oppgave er å generere et magnetfelt som inducerer en spenning i sekundærviklingen. Grunnen til at viklingene er sammenkoblet med en kjerne er for å lede magnetismen bedre og for å forhindre unødige tap til omgivelsene. Kjernen er dermed av et materiale med høy permeabilitet. Forholdet mellom antall vindinger i de to viklingene og induert spenning er

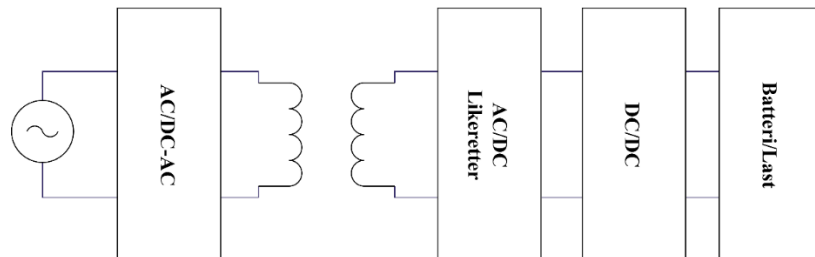
$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} \quad [4.3.1.]$$

Formel [4.3.1.] beskriver en ideell trafo. I praktisk anvendelse har trafoer noe tap. Induksjonslading fungerer på samme måte som en trafo, men ofte uten en jernkjerne og med en viss avstand mellom spolene. Med dette scenarioet vil det forekomme et flukstap grunnet imperfekt kobling mellom spolene, og dette kan sammenlignes med en trafo med løst koblede spoler. Ved utvikling av en lader basert på induktiv energioverføring er det ønskelig at flukstap og varmedannelse er så lite som mulig.



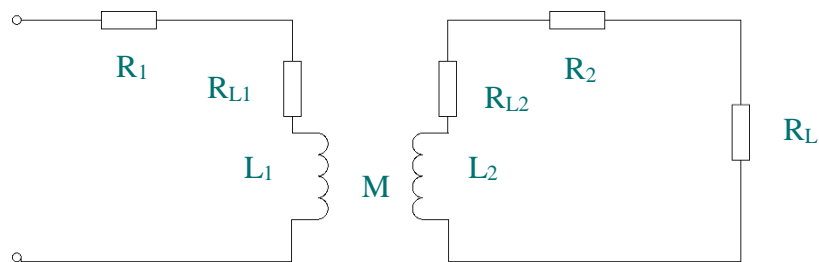
Figur 4.9: A. En ideell trafo hvor magnetfeltet følger kjernen. B. Trafo med løs kobling medfører et flukstap.

Figur 4.10 viser en forenklet modell av et induksjonsladesystem. På primærsiden vil AC-strømmen gå gjennom en likeretter og omformes til DC-strøm. Deretter økes spenningsnivået i en DC/DC-omformer, før strømmen går gjennom en vekselretter som omgjør strømmen fra DC til AC. Denne AC-strømmen genererer et magnetfelt, og strømmen induseres i sekundærsiden. Fra sekundærspolen likerettes den induserte strømmen før spenningen reduseres til et akseptabelt nivå for batteriet som skal lades.



Figur 4.10: Forenklet forklaringskoblingsskjema for effektoverføring ved bruk av elektromagnetisk induksjon.

En mer praktisk tilnærmet forenkling av systemet, uten fokus på reguleringsystemet er illustrert i Figur 4.11.



Figur 4.11: Forenklet modell av induktiv kobling til induksjonsopplading.

I Figur 4.11 er spolene forenklet på samme måte som i Figur 4.6, og byttet ut med en ren induktans L_1 og L_2 og en indre motstand R_{L1} og R_{L2} . Motstandene R_1 og R_2 representerer de øvrige tapene i kretsen. Omformingen på sekundærsiden av systemet er sammen med batteriet angitt som R_L .

Det induktive oppladingssystemet kan betraktes som en ikke-ideell trafo. Gjensidig induktans i en ideell trafo er gitt av:

$$M = \sqrt{L_1 L_2} \quad [4.3.2.]$$

Med de løst koblede spolene vil det være koblingstap i kretsen, og den gjensidige induktansen kan skrives som:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2} \quad [4.3.3.]$$

hvor k er en dimensjonsløs koblingskoeffisient mellom 0 og 1. Dersom koblingskoeffisienten er 1 er det sterk kobling og en fysisk kontakt mellom spolene, mens 0 tilsvarer dårlig kobling

og/eller større avstand mellom spolene. Det er ønskelig for systemet at koblingskoeffisienten er så høy som mulig da den påvirker den gjensidige induktansen. En måte å få bedre koblinger, er å ha samme størrelse på primærspolen og sekundærspolen, og at avstanden mellom primær- og sekundærsiden er mindre enn diameteren til spolene (64).

Magnetisk resonanskobling

Forskjellen mellom induktiv kobling og magnetisk resonans er at det legges inn en eller flere kondensatorer i systemet. Hvis en spole og en kondensator kobles sammen, enten i serie- eller parallellkobling, vil det oppstå resonans ved en bestemt frekvens (65). Resonans er at systemet vil svinge med høyere amplitude enn ved andre frekvenser, og frekvensen som gir resonans kalles systemets egenfrekvens (66). Resonansfrekvensen i kretsen oppstår når reaktansen til kondensatoren og induktoren er like store.

Dersom man setter [4.2.3.] og [4.2.6.] lik hverandre, finner man resonansfrekvensen (uavhengig av om kondensatoren og induktoren er koblet i serie eller parallell):

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad [4.3.4.]$$

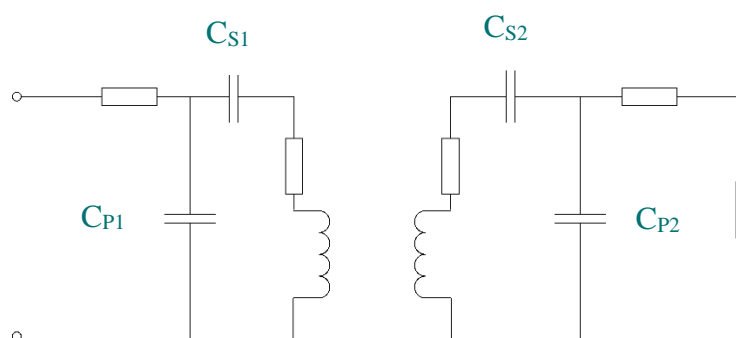
Impedansen til systemet blir påvirket av hvordan kondensatoren og induktoren blir koblet. For seriekobling vil impedansen være minimal, siden X_C og X_L vil være faseforskjøvet 180° og dermed utligne hverandre. Serieresonansen blir lik motstanden i ledningene.

$$Z = R \quad [4.3.5.]$$

Ved parallellkobling av kondensator og induktor vil impedansen være stor.

$$Z = \frac{X_C X_L}{X_C + X_L} \quad [4.3.6.]$$

En kondensator vil settes inn både på primær- og sekundærsiden. På primærsiden vil kondensatoren maksimere spenningen over spolen, og på sekundærsiden vil kondensatoren sørge for at koblingen passer best mulig med magnetfeltet som primærsiden genererer.



Figur 4.12: Kobling med fire mulige måter å legge inn kondensator på begge sider. Øvrig notasjon samsvarer med notasjon gitt av Figur 4.11.

Kondensatoren kan også brukes for å kompensere for den store andelen med reaktiv effekt i systemet, og på denne måte optimalisere koblingen mellom spolene. Med kompenseringskondensator på begge sider vil det være fire ulike måter kondensatorene kan kobles på. De ulike

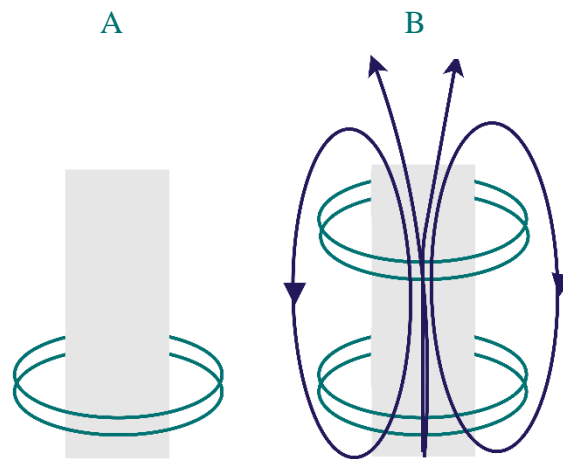
koblingene er serie-serie (SS), serie-parallell (SP), parallell-serie (PS) og parallell-parallell (PP). De ulike scenarioene er illustrert i Figur 4.12.

4.4. Eksisterende induksjonssystemer

Induksjonsteknologi har flere ulike bruksområder. Ved å se nærmere på hvordan teknologien anvendes i andre systemer er det muligheter for å tilegne seg kunnskaper om systemene.

4.4.1. Elektriske tannbørster

Elektriske tannbørster har blitt ladet ved hjelp av elektromagnetisk induksjon siden 90-tallet (67). Det at tannbørstene som regel befinner seg på badet, er mye av grunnen til dette. Badet har ofte høy luftfuktighet og det er kort vei til vannkilder, noe som potensielt kan utgjøre skade på elektriske artikler. Ved opplading gjennom elektromagnetisk induksjon er ikke elektronikken i produktet og laderen direkte eksponert for omverdenen, noe som beskytter elektronikken mot vann og støv.

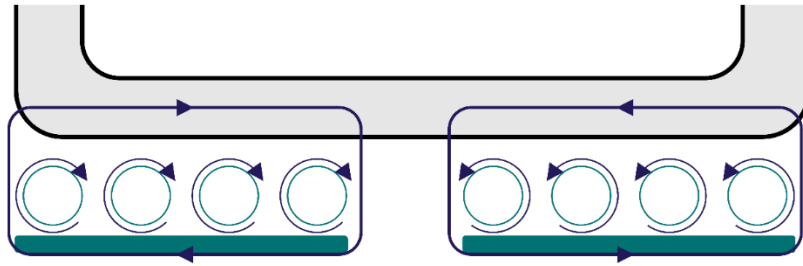


Figur 4.13: A. Primærsiden av ladesystemet. Primærspolen omslutter en jernkjerne. B. Primær- og sekundærsiden av ladesystemet koblet sammen. Sekundærspolen omslutter den samme jernkjernen.

Som det fremkommer av Figur 4.13 består ladeenheten av en primærspole, og sekundærspolen befinner seg i tannbørsten. Flere tannbørsteprodusenter ønsker å øke virkningsgraden ved å tilføre en jernkjerne i primærspolen som er lang nok til at jernkjernen deles med sekundærspolen når tannbørsten blir plassert i ladeenheten. Ladeenheten sammen med tannbørsten etterligner dermed en transformator.

4.4.2. Koketopper

I de fleste koketopper som selges i dag blir det brukt induksjonsteknologi. Kokekar lagd av magnetisk materiale blir oppvarmet ved hjelp av et elektrisk generert magnetfelt. Det blir som regel brukt flate kobberspoler som induktorer. Når spolen påtrykkes en høyfrekvent vekselstrøm, settes det opp et varierende magnetfelt som når kokekarets bunn. Kokekaret varmes dermed opp grunnet hysteres og friksjonsvarme. Magnetfeltet når gjennom en beskyttende glassplate som ikke påvirkes, da den ikke er lagd av magnetisk materiale. Men den kan allikevel indirekte bli varmet opp gjennom varmen fra kokekaret (68).

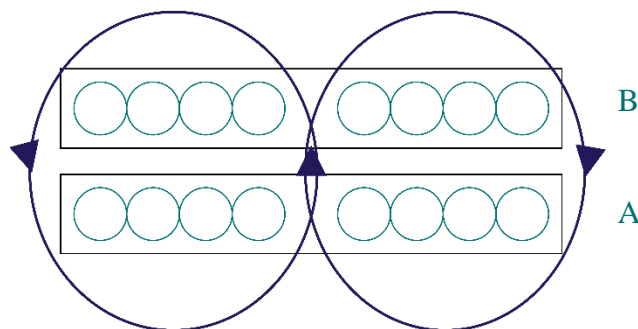


Figur 4.14: Illustrasjonen viser tverrsnittet av en flat spole og et kokekar. Induksjonsteknologien i en koketopp bygger på at hver vinding lager et magnetfelt konsentrisk rundt lederen, og dette til sammen utgjør et magnetfelt som går inn i kokekaret og forårsaker virvelstrømmer og magnetisk hysteresis i kokekarets bunn. I og med at magnetfeltet kan betraktes som lukkede kurver vil ferrittklosser under spolen sørge for at magnetfeltet tar korteste vei «hjem».

Det finnes flere ulike oppbygninger og sammensetninger av induksjonskoketopper. Det er både koketopper med avgrensede kokesoner med én induktor per sone, og koketopper med utvaskede grenser i form av mange, mindre induktorer hvor induktorene med størst arealoverlapp med kokekaret skrur seg på. Dette kan ses på som en mikromodulteknologi. Mikroinduktorene viser en mer fleksibel bruk av induksjonsteknologi enn bruk av enkel spole (69).

4.4.3. Mobillader

Det blir stadig mer vanlig at smarttelefoner produseres med støtte for trådløs opplading. Det har blitt utviklet en standard kalt Qi, som er den mest vanlige, og blant annet benyttes av Apple og Samsung i deres telefoner. På innsiden av smarttelefonen blir en mottakerspole koblet til batteriet, og primærspolen er i en basestasjon koblet til strømmettet som telefonen kan bli lagt på.



Figur 4.15: Tverrsnitt av spolene i telefonen og basestasjonen. Primærspolen (A) genererer et magnetfelt som inducerer en strøm i sekundærspolen (B).

Qi-standarden har inkludert både induktiv kobling og magnetisk resonanskobling, og bruker en eller flere flate spoler til overføring. Spolene er utviklet til å overføre 5 W, og til å fungere optimalt ved 5 mm avstand, men fungerer ved større avstand selv om det medfører et større tap (70). Den øvrige teknologien baserer seg på den generelle utredningen gjort i kapittel 4.3.

4.4.4. Kontaktløse smartkort

Studentkort, bankkort, nøkkelkort og kort for kollektivtransport er eksempler på kort som ofte er smartkort. Ved hjelp av induksjonsteknologi kan kortene utføre sin funksjon uten fysisk kontakt. Det finnes to ulike standarder for utvikling av smartkort. Den ene standarden (ISO 14443 (71)) tillater kommunikasjonsavstand på opptil 10 cm mens den andre standarden (ISO 15693 (72)) tillater avstand opp til 50 cm.



Figur 4.16: På innsiden av et kontaktløst smartkort er det en sekundærspole det induseres en strøm i, som videre gir energi til en mikrochip hvor informasjonen ligger.

Smartkortene har ikke noe batteri, men når de er i nærheten av en basestasjon de er ment for (betalingsterminal, dørlås, kopimaskin o.l.) vil en spole på innsiden av kortene sørge for at det induseres en strøm ved hjelp av magnetisk resonanskobling. Denne strømmen vil bli likerettet i kortet før den blir anvendt i kortets elektronikk (73). Når kortet har blitt «ladet opp» oppstår en radiokobling mellom kortet og basestasjonen, og de utveksler kryptert informasjon for det bestemte bruksområdet.

4.4.5. Andre bruksområder

Induksjonsteknologi blir anvendt i flere systemer og produkter enn de som er nevnt i foregående underkapitler, men som det ikke vil bli gått nærmere inn på. Dette er blant annet Clamp Meters, en type amperemeter som måler strømmen som går gjennom en leder uten å være i fysisk kontakt med lederen. Clamp Meters holdes rundt lederen, og beregner strømmen gjennom magnetfeltet som ligger rundt lederen (74). Det er også brukt induksjon i sveisearbeid, hvor magnetfeltet blir brukt til oppvarming av arbeidsstykket (75). Induksjonsteknologi benyttes også i induksjonsmotorer (76), generatorer (77) og medisinsk utstyr (78).

5. Dekomponering (reverse engineering)

Ved å plukke fra hverandre komponenter i tre eksisterende løsninger og analysere funksjonen de utgjør, er det muligheter for å tilegne seg kunnskaper om systemene og oppbygningen som kan benyttes i utviklingen av eget produkt.


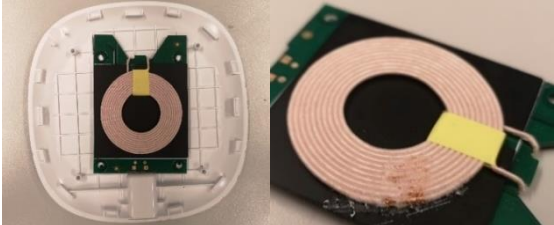

5.1. Praktiske undersøkelser

Det er valgt å se nærmere på en mobillader, en koketopp og en tannbørstelader. Komponentene de tre løsningene består av vil bli gjort rede for i dette delkapittelet. De mindre, elektriske komponentene vil ikke utredes.



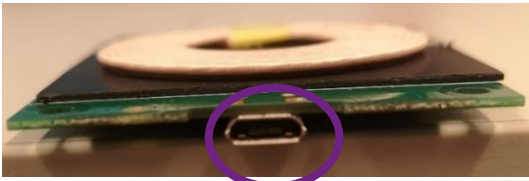

5.1.1. Qi induksjonslader

For å undersøke en Qi induksjonslader i praksis er det benyttet en Belkin BOOST UP trådløs Qi-ladestasjon som er kjøpt på Clas Ohlson i februar 2019 (78).

Tabell 5.1: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på en Qi-ladestasjon.

Komponent	Beskrivelse
<p>Topplate</p>  <p><i>Figur 5.1: Topplatens overside og underside.</i></p>	<p>En plastplate med enkelt og tidløst design. Topplaten er laderens ansikt utad. Ringen i midten er trolig lagd for å indikere hvor spolen i platen ligger, og det dermed er best overføring. I tillegg gir ringen platen et mer stilfullt design, så den er trolig tiltenkt både en praktisk og estetisk funksjon.</p>
<p>Spole</p>  <p><i>Figur 5.2: Spolen i Qi-ladestasjonen, og nærbilde av kobberet under belegget.</i></p>	<p>Induktor i form av én enkelt flat spole. Spolen består av kobbertråd med 10 vindinger og med mange kobbertråder viklet sammen i hver vinding. Hver vinding er tildekket med et belegg lagd av isolerende materiale, som trolig forhindrer kobling mellom vindingene.</p>
<p>Materialet under spolen</p>  <p><i>Figur 5.3: Det er et materiale mellom spolen og platen.</i></p>	<p>Det er lagt inn et materiale som minner om skumgummi under spolen som overlapper med spolens areal. Denne skumgummien demper støtbelastning mot spolen som kan forekomme når de elektriske artiklene som skal lades legges på platen. Både spolen og øvrig elektronikk blir dermed bedre beskyttet.</p>

Tabell 5.1 forts.: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på en Qi-ladestasjon.

Komponent	Beskrivelse
<p>Plate</p>  <p><i>Figur 5.4: Plastplate under skumgummien.</i></p>	<p>Under skumgummien er det en stor plate lagd av et plastmateriale. Dette materialet er en dårlig leder, og funksjonen er trolig å beskytte resten av kretsen mot magnetisk stråling. Platen er montert på kretskortets bakside.</p>
<p>Kretskort</p>  <p><i>Figur 5.5: Kretskortet i ladestasjonen.</i></p>	<p>Kretskortet blir brukt til å montere elektriske komponenter, og for å koble dem sammen. Det grønne er et isolerende materiale som er på kortets frem- og bakside. Mellom dette isolerende materialet er det flere lag med kobber som utgjør ledende baner mellom de ulike tilkoblingspunktene. På kretskortet er det montert både kondensatorer, motstander, transistorer og bryter.</p>
<p>Strøminngang</p>  <p><i>Figur 5.6: Tilkoblingspunktet for strømledningen er markert med lilla ring.</i></p>	<p>Strøminngangen hvor ladeledningen fra strømnettet blir tilkoblet ladekonstruksjonen.</p>
<p>LED-diode</p>  <p><i>Figur 5.7: Lysdioden er markert med lilla ring.</i></p>	<p>Denne LED-dioden fungerer som en ladestatusindikator, og lyssignalerne den sender gir brukeren informasjon om den elektriske artikkelen som lades er tilstrekkelig koblet til laderen, og når batteriet er fulladet.</p>

Tabell 5.1 forts.: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på en Qi-ladestasjon.

Komponent	Beskrivelse
<p>Bunnplate</p>  <p><i>Figur 5.8: Ladestasjonens bunnplate.</i></p>	<p>Bunnplaten til Qi-ladestasjonen er lagd av et plastmateriale. Kretskortet er montert til bunnplaten, så denne holder hele systemet på plass.</p>
<p>Sklimatte</p>  <p><i>Figur 5.9: Avtagbar sklimatte festet til bunnplaten.</i></p>	<p>For at ladestasjonen skal oppleves stabil er det montert på en matte lagd av et materiale som forhindrer at konstruksjonen skal skli. Dette minsker faren for at konstruksjonen ved et uhell skal falle ned på gulvet når en elektrisk artikkel skal lades opp, eller dersom man kommer borti ladeledningen.</p>

5.1.2. Koketopp

For å få et praktisk innblikk i teknologien bak en induksjonskoketopp, vil komponentene i en Witt WIF 601 FC kartlegges (79).

Tabell 5.2: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på en induksjonskoketopp.

Komponent	Beskrivelse
<p>Topplate</p>  <p><i>Figur 5.10: Glassplate med definerte kokesoner.</i></p>	<p>Topplaten til koketoppen er laget av et glasskeramisk materiale. Tykkelsen på platen er ca. 5 mm. Topplaten er festet til bunnplaten, og beskytter elektronikken som befinner seg på innsiden.</p>
<p>Spoler</p>  <p><i>Figur 5.11: Det var fire flate spoler i koketoppen.</i></p>	<p>Induktoren i koketoppen er en flat spole. Koketoppen består av fire kokeområder, og dermed fire flate spoler. Spolene består av flere vindinger, og flere kobbertråder er viklet sammen i samme vinding.</p>

Tabell 5.2 forts.: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på en induksjonskoketopp.

Komponent	Beskrivelse
<p>Plastklosser</p>  <p><i>Figur 5.12: Mellom spolene og topplaten er det lagt inn plastklosser.</i></p>	<p>Det er montert tre plastklosser på toppen av hver spole. Plastklossene gjør at topplaten ikke hviler direkte på spolene, og de fungerer dermed beskyttende ovenfor spolene. I tillegg skaper de en avstand som beskytter elektronikken mot kortslutning ved for rask fjerning av kokekar.</p>
<p>Ferritt</p>  <p><i>Figur 5.13: På undersiden av hver spole er det ferrittbiter.</i></p>	<p>På spolenes underside er det montert noen biter med ferritt. Ferritten leder feltet tilbake til spolen, og hindrer at det sprer seg videre nedover til øvrig elektronikk.</p>
<p>Temperatursensor</p>  <p><i>Figur 5.14: I midten av hver spole er det en temperatursensor.</i></p>	<p>Temperatursensoren måler systemets temperatur. Denne informasjonen kan blant annet benyttes til å regulere motstandsverdi, og kan ha en sikkerhetsmessig funksjon i form av at systemet kan være innstilt på å slås av hvis temperaturen overstiger en viss verdi.</p>
<p>Plater</p>  <p><i>Figur 5.15: Plater på hver side av spolen.</i></p>	<p>Spolene er dekket til med plater på oversiden (mot glassplaten) og på undersiden. Platen på undersiden gir støtte til fjæringen som befinner seg på undersiden, i tillegg til å fungere som et feste.</p>
<p>Spiralfjærer</p>  <p><i>Figur 5.16: Spiralfjærer plassert under hver spole.</i></p>	<p>Under hver spole befinner det seg en spiralfjær. Disse fjærene beskytter spolene mot den belastning det er å få et kokekar plassert over seg.</p>

Tabell 5.2 forts.: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på en induksjonskoketopp.

Komponent	Beskrivelse
<p>Vifte</p>  <p><i>Figur 5.17: Viftens overside og underside.</i></p>	<p>Det er montert en kjølevifte inni konstruksjonen. Vifta er i systemet for å kjøle ned elektronikken så den ikke skal ta skade eller brenne opp av varmen som genereres. Figur 5.17 viser også «vegger» som fører lufta videre fra vifta til kjølerillene.</p>
<p>Kjøleriller</p>  <p><i>Figur 5.18: Kjølerillene som er plassert midt på kretskortet.</i></p>	<p>Lufta fra vifta blir ført til kjølerillene ved hjelp av noen konstruerte «lettvegger» av samme materiale som platene. På hver av kjølerillene er det montert transistorer. Dette er nok taktisk gjort da spesielt transistorene genererer mye varme når de arbeider. Med andre ord hjelper kjølerillene til med å holde temperaturen på elektronikken innenfor et akseptabelt nivå.</p>
<p>Kretskort</p>  <p><i>Figur 5.19: Hovedkretskortet kobler flere elektriske komponenter.</i></p>	<p>Alle de elektriske komponentene i koketoppen er tilkoblet hovedkretskortet. På kretskortet er det montert både kondensatorer, motstander, transistorer, mikrokontroller, relé og flere spoler som jobber for at systemet skal fungere som ønsket.</p>
<p>Styringskort</p>  <p><i>Figur 5.20: Styringskortet i kokeplata.</i></p>	<p>Styringskortet er et eget kretskort som er koblet til hovedkortet. Ved hjelp av styringskortet kan brukeren gi informasjon til systemet ved bruk av knapper, som styringskortet meddeler til hovedkortet. Styringskortet fungerer også som en indikator som ved hjelp av et digitalt display angir varmen på de ulike platene i form av et tall fra 1-9.</p>
<p>Bunnplate</p>  <p><i>Figur 5.21: Kretskortet er festet til bunnplaten.</i></p>	<p>Bunnplaten er lagd av plast, og har som funksjon å holde alle komponentene i systemet på plass. Alle de tidligere nevnte komponentene er skrudd fast til bunnplaten, enten direkte eller indirekte.</p>


5.1.3. Lader til elektrisk tannbørste

Komponentene i laderen til en elektrisk tannbørste fra merket Oral B vil kartlegges for å få et innblikk i hvordan den er utviklet (80).

Tabell 5.3: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på laderen til en elektrisk tannbørste.

Komponent	Beskrivelse
<p>Ytterkonstruksjon</p>  <p><i>Figur 5.22: Ytterkonstruksjonen til tannbørsteladeren.</i></p>	<p>Ytterkonstruksjonen til ladestasjonen er relativt stor i forhold til elektronikken som befinner seg på innsiden. Dette er trolig fordi konstruksjonen både skal fungere til oppbevaring av børstehoder, den skal holde tannbørsten på plass, og for at elektronikken skal bli beskyttet.</p>
<p>Deksel</p>  <p><i>Figur 5.23: Dekselet som holder spolen på plass.</i></p>	<p>På innsiden av ytterkonstruksjonen ligger et deksel med spolen på innsiden. Dekselet fungerer som en beskyttelse av spolen, og som støtte til tannbørsten som skal plasseres inni ved opplading. Innsiden av dekselet er dekket av et silikonbelegg som beskytter elektronikken mot vann- og fuktskader.</p>
<p>Spole</p>  <p><i>Figur 5.24: Utsnitt av spolen.</i></p>	<p>Spolen befinner seg inni dekselet. Spolen består av flere vindinger. Alle vindingene har tilnærmet lik diameter.</p>
<p>Vegglader</p>  <p><i>Figur 5.25: Veggladeren inneholder det meste av elektronikken til ladekonstruksjonen.</i></p>	<p>I veggladeren sitter hovedelektronikken til ladesystemet. Her foregår både kommunikasjon og regulering av strøm og spenning som skal tilføres batteriet.</p>

Tabell 5.3 forts.: Resultatene som er funnet gjennom å foreta reverse engineering på laderen til en elektrisk tannbørste.

Komponent	Beskrivelse
Sammenkobling mellom lader og tannbørste  <p><i>Figur 5.26: Sekundærspolen blir plassert på innsiden av primærspolen ved opplading.</i></p>	Da dette var eneste fullverdige ladesystem som kunne undersøkes, med både sender og mottaker, ble muligheten benyttet til å se nærmere på spolenes plassering i forhold til hverandre. Som det fremkommer av Figur 5.26 blir sekundærspolen plassert på innsiden av primærspolen for å optimalisere kontakten mellom spolene.

5.2. Resultater

Gjennomgangen av de eksisterende systemene gav nyttig informasjon om hvordan produsentene har løst ulike funksjoner. Funksjonene og løsningene som ses på som relevante for denne oppgaven, og dermed blir tatt med til videre undersøkelser, er sammenfattet i Tabell 5.4.

Tabell 5.4: Funksjoner og funksjonsløsninger som fremkom av dekomponeringen.

Funksjon	Løsninger
Støtdemping	<ul style="list-style-type: none"> • Skumgummi • Spiralfjærer
Induktor	<ul style="list-style-type: none"> • Flat spole • Vanlig spole
Holde elektronikk på plass	<ul style="list-style-type: none"> • Montere all elektronikk til bunnplaten
Beskytte elektronikk	<ul style="list-style-type: none"> • Romslig ytterkonstruksjon • Hovedelektronikk plassert på utsiden av konstruksjonen • Spole dekket med silikon
Holde elektronikk på akseptabelt temperaturnivå	<ul style="list-style-type: none"> • Vifte og kjøleriller • Temperatursensor
Statusindikator	<ul style="list-style-type: none"> • Lysdiode på primærsystem • Digitalt display • Lysdiode på sekundærsystem
Rette feltet	<ul style="list-style-type: none"> • Ferrittklosser
Starte systemet	<ul style="list-style-type: none"> • Knapper • Automatisk start ved tilstrekkelig kontakt
Sammenkobling av spoler	<ul style="list-style-type: none"> • Primær- og sekundærspolen blir plassert over hverandre • Sekundærspolen blir plassert inni primærspolen

6. Produktspesifisering

For å sikre at produktutviklingen går i ønsket retning er det nødvendig å vurdere hvordan tiltenkt sluttprodukt bør være for å ha noe konkret å jobbe mot.

6.1. Produktmålsettinger

For at produktet skal ha mulighet til å hevde seg i markedet, er det nødt til å kunne skille seg ut og leve opp til potensielle kunders forventninger. Dette er dermed hvor hovedfokuset skal ligge. Da det ikke er foretatt en omfattende markedsundersøkelse for det ønskede produktet, vil målsettingene basere seg på informasjonen som ble innhentet under markedsundersøkelsen gjort i forprosjektet samt trender og utvikling i markedet generelt, som fremkom i kapittel 1.

6.1.1. Hovedmål

Hovedmålsettingen beskriver de overordnede produktkravene som tenkt sluttprodukt skal tilfredsstillere:

«Produktet skal være en sikker, robust og brukervennlig ladeløsning som lader opp små, elektriske kjøretøy ved bruk av elektromagnetisk induksjon.»

6.1.2. Delmål

1. Produktet skal starte opplading av batteriet uten unødig arbeid fra bruker.
2. Produktet skal tåle forventede påkjenninger.
3. Produktet skal ikke utøve noen helserisiko.
4. Produktet skal kunne tilpasses flere typer små kjøretøy.

6.1.3. Krav

Med utgangspunkt i produktmålsettingene er det definert ønskede krav og egenskaper produktet bør oppfylle.

- Produktet må kunne brukes fra strømmettet gjennom vanlig husholdningskontakt.
- Produktet skal ha ingen eller positiv påvirkning på batteriets kapasitet og levetid.
- Produktet skal ha tilnærmet lik oppladingshastighet som kjøretøyenes standardlader.
- Produktet skal ha automatisk ladestart ved tilstrekkelig nærhet til elektrisk kjøretøy.
- Produktet skal være mobilt.
- Produktet må være stabilt, og ikke skli mot underlaget.
- Produktet må tåle å bli brukt utendørs.
- Produktet skal tåle vann, støv, grus og møkk (i henhold til IP65).
- Produktet skal tåle kollisjoner med kjøretøyet.
- Produktet skal avsette minst mulig negativt klimaavtrykk gjennom hele livssyklusen.
- Produktet må kunne integreres i allerede eksisterende små elektriske kjøretøy.

6.2. Rangering av viktige produktegenskaper

For å sikre at ressursene blir brukt riktig i utviklingen av produktet, er det nødvendig å rangere de ulike kravene og egenskapene det er ønskelig at produktet skal tilfredsstillere. Ved bruk av Pughs metodikk får man en pekepinn på hvilke egenskaper og krav som bør være i hovedfokus, og hvilke man kan implementere dersom tid, pris, kompetanse og utstyr tillater det. Hvert krav eller egenskap vil få en score fra 1-5 etter hvor viktig de anses å være, se Tabell 6.1.



Figur 6.1: Poengskala med tilhørende viktighet som produkttegenskapene vurderes mot.

Tabell 6.1: Rangering av produkttegenskaper med vektning etter poengskalaen gitt i Figur 6.1.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse for vektning
Brukervennlighet	Hvor enkelt og intuitivt produktet er å anvende.	4	Det er viktig at produktet krever lite egeninnsats av brukeren, ellers faller mye av poenget med produktet bort.
Brukssikkerhet	Sikkerhet knyttet til bruk, montering og demontering.	5	Produktet skal være og oppfattes trygt å bruke. Produktet må tåle kollisjoner med kjøretøy og å bli tråkket på.
Bærekraftig	At produktet har en minst mulig negativ påvirkning på miljøet.	4	Det er ønskelig å oppnå så små negative klimaavtrykk som mulig. Dette er viktig for markedsføring, og produktets langsiktighet på markedet.
Driftssikkerhet	Sikkerhet knyttet til omgivelsene produktet forventes brukt i.	4	Det er forventet at produktet skal tåle norske temperaturvariasjoner, vann, støv, grus og møkk.
Estetisk utforming	Produktet har et tiltalende design.	3	Produktet skal ikke være sjenerende, men estetikk bør ikke gå på bekostning av produktets pris.
Fleksibilitet	Hvor enkelt produktet kan tilpasses ulike kjøretøy, med tanke på produktarkitekturen.	4	Produktarkitekturen må ta hensyn til at produktet skal kunne anvendes på flere ulike typer kjøretøy. Dette kan være avgjørende for produktets kostnader.
Funksjonalitet	Produktet utfører sine hovedfunksjoner på en tilfredsstillende måte.	5	Det er svært viktig at produktet tilfredsstiller dets hovedfunksjoner, da det er på grunn av disse at brukeren har kjøpt produktet.
Kostnader	Tilvirkningskostnadene holdes så lave som mulig.	4	Det er viktig at tilvirkningskostnadene holdes lave slik at produktet er konkurransedyktig på pris. Men det bør ikke gå på bekostning av produktets funksjonalitet.

Tabell 6.1 forts.: Rangering av produkttegenskaper med vektning etter poengskalaen gitt i Figur 6.1.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse for vektning
Levetid	Produktet har så lang levetid som mulig.	2	Det er ønskelig at produktet har tilnærmet levetid som kjøretøyet det skal betjene, men det er ikke avgjørende.
Modulerbar	Hvor enkelt produktet kan tilpasses ulike kjøretøy, i form av induksjons-systemet.	4	Det kan være avgjørende for produktets kostnader, og dermed pris, at utviklingskostnadene kan deles på flere produkter. Dette kan tilfredsstilles best ved å ha et modulbasert system som kan fungere på flere ulike kjøretøy.
Størrelse	Produktet er så lite som mulig.	2	Det er ønskelig at produktet ikke er så stort at det opptar for mye plass og er vanskelig å flytte på, men det bør ikke gå på bekostning av produktets pris.
Vedlikehold	Hvor enkelt en kan bytte ut deler, eller reparere produktet.	1	Vedlikehold og reparasjoner bør utføres av kompetent personell, og ikke av bruker selv.
Vekt	Produktet har så lav vekt som mulig.	3	For at produktet skal kunne flyttes av bruker, er det ønskelig at det veier lite nok til at de fleste voksne mennesker kan kunne bære det. Men vekt bør ikke gå på bekostning av produktets pris.

6.3. Metriske grensespesifikasjoner

Det er ønskelig at produktet skal passe til ulike små kjøretøy, og de ulike kjøretøyene kommer i ulike størrelser og med ulik batterikapasitet. Derfor er det nødvendig å se nærmere på variasjonsbredden for de tiltenkte kjøretøyene for å lettere kunne vurdere utformingen av ladeløsningen. Små kjøretøy blir i denne oppgaven definert til kjøretøy som inngår fra definisjon av elektrisk drevet kjøretøy for transport i forskrift om krav til sykkel til og med definisjon av moped i kjøretøyforskriften. Det vil kun bli undersøkt utvalgte modeller av ulike kjøretøy. Selv om tanken er at ladeløsningen skal kunne brukes til flere typer kjøretøy enn de som fremkommer av Tabell 6.3 er det antatt av robotstøvsuger er minst og elektrisk mopedbil er størst, og det er kun plukket ut enkelte typer kjøretøy mellom disse ytterpunktene.

Tabell 6.2: Definisjoner gitt av forskrifter for ønskede elektriske kjøretøy. (81) (82)

Definisjon etter forskrift	Egenvekt		Lengde		Bredde	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
Elektrisk drevet kjøretøy	-	70 kg*	-	120 cm	-	85 cm
Moped	-	350 kg**	-	-	-	-

* Inkludert batterienes masse

** Ikke medregnet batterienes masse

Tabell 6.3: Variasjonsbredde blant små kjøretøy (83) (84) (85) (86) (87) (88) (89) (90).

Tilhørende tabeller fra hvert kjøretøy er presentert i vedlegg.

Kjøretøy	Batterikapasitet (Wh x antall batterier)		Bakkeklaring (cm)		Bredde (cm)		Lengde (cm)	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.	Min.	Maks.
	Robotstøvsuger	-	-	2	3	34	45	34
Segway	310	382	-	-	55	84	26	67
Elbil for barn	84	120	-	-	68	101	102	145
Elsykkel	400	630	-	-	-	-	-	-
Elektrisk rullestol	288	960 x 2	6	12	48,5	79	93	165
Elektrisk moped	1200	1200 x 2	-	-	65,7	75	164	200
Elektrisk mopedbil	5100	3240 x 6	-	-	118	119	224	232

6.4. Metrisk grovspesifisering for basismodul

Med bakgrunn i informasjonen innhentet i foregående delkapittel blir det satt spesifisert grenseverdier produktet skal utformes etter. Dersom produktet bestemmes å bli plassert under kjøretøyet kan det ikke være høyere enn den lavestebakkeklaringen for å kunne benyttes til alle nevnte kjøretøy. Men det er antatt at robotstøvsugere o.l. kan plasseres manuelt på ladeløsningen. Produktet kan heller ikke være bredere enn det smaleste kjøretøyet, eller lenger enn det korteste kjøretøyet. Akseptabel ladeeffekt er definert på bakgrunn av antatt oppladings-hastighet og med bakgrunn i at én basismodul skal kunne lade opp det minste batteriet som er undersøkt.

Tabell 6.4: Metriske størrelser det vil jobbes ut ifra når produktet utvikles.

Metrisk størrelse	Verdi
Vektbelastning	450 kg
Ladeeffekt	50 W
Høyde	<6 cm
Lengde	>26 cm
Bredde	>34 cm

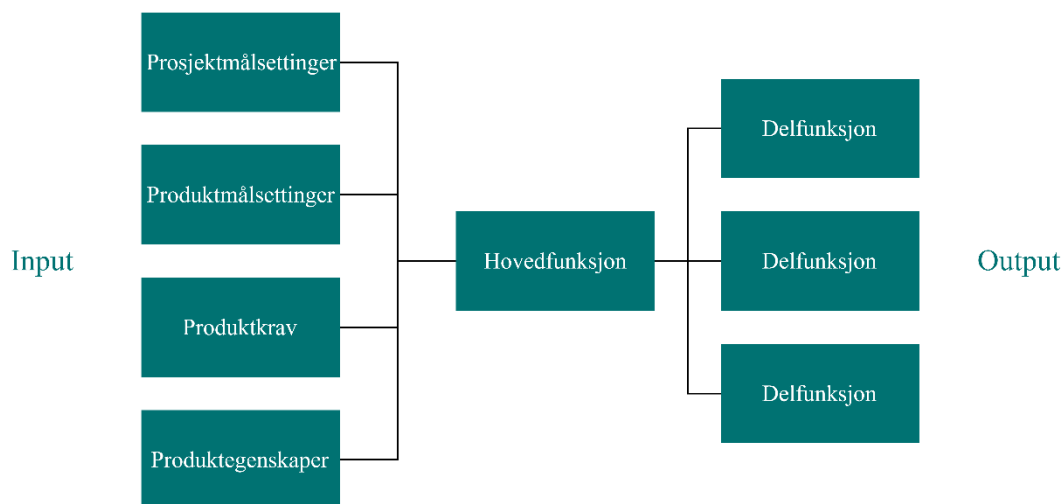
Ved at basismodulen kan gi en ladeeffekt på 50 W vil oppladingshastigheten på de minste kjøretøyene bli akseptabel. Det er også antatt at sekundærsiden av ladesystemet kan regulere mottatt strøm og spenning til riktige verdier, slik at basismodulen kan brukes til både mindre og større kjøretøy enn den nøyaktig er beregnet for.

7. Konseptgenerering

Gjennom konseptgenereringen vil man se etter løsninger som tilfredsstillende produktspesifiseringene. Ved å fremprovosere ulike løsninger åpnes blikket, og flere muligheter vil kunne føre til et mer gjennomtenkt produkt.

7.1. Funksjonsanalyse

Prosjekt målsettingene, produkt målsettingene og produktkravene og -egenskapene beskriver hva som er forventet av et ønsket, fremtidig produkt. Disse opplysningene utgjør inputen i funksjonsanalysen. De nevnte forventningene kan omformes til ulike funksjoner det er ønskelig at ladesystemet skal inneha. I funksjonsanalysen vil ladesystemets hovedfunksjoner defineres, og dermed dekomponeres til delfunksjoner som til sammen svarer til hovedfunksjonen. Dekomponeringen gjør det lettere å få en oversikt over hvilke muligheter en ladeløsning kan ha.

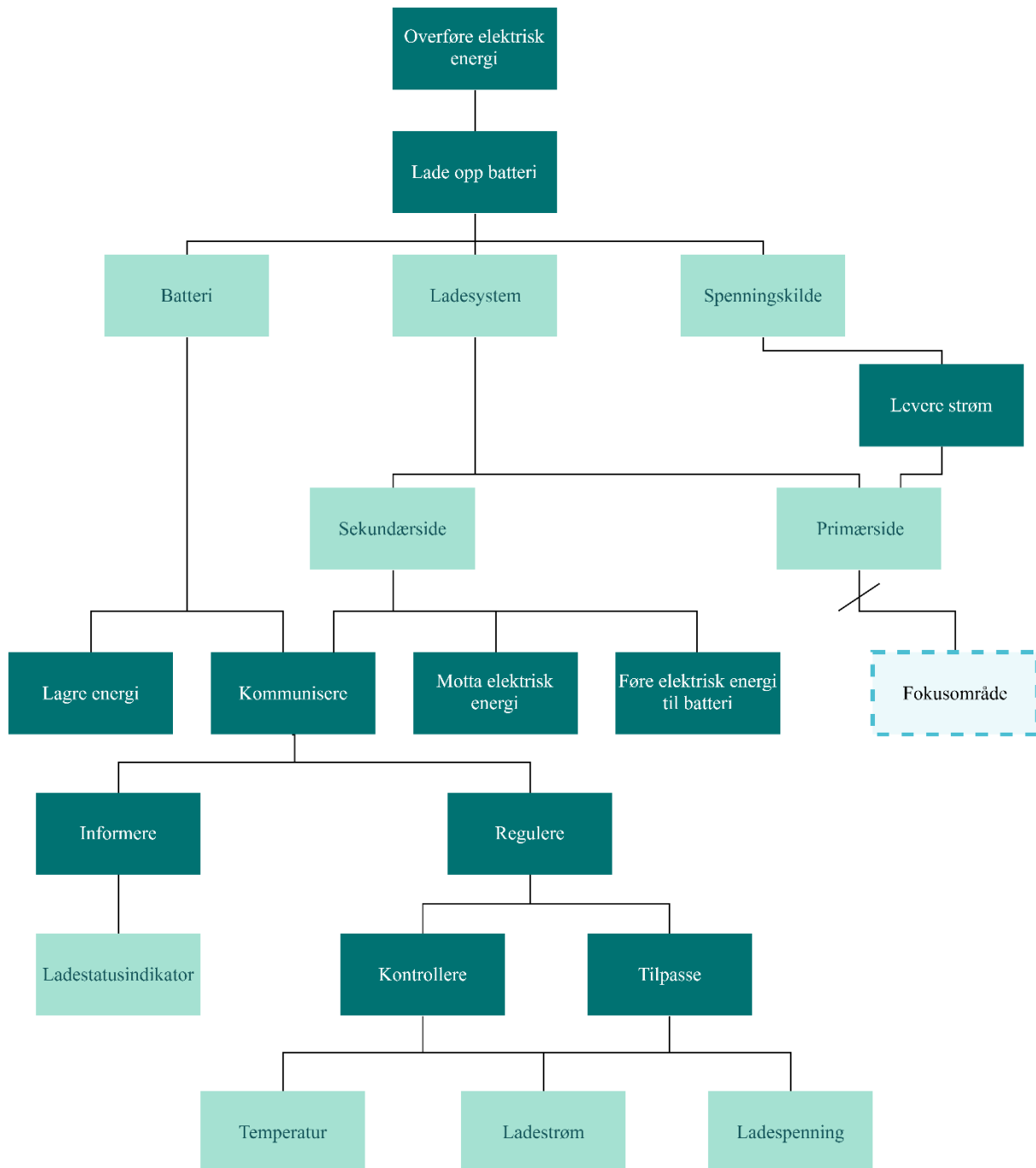


Figur 7.1: Oversikt over hvilken informasjon som er tilgjengelig ved funksjonsanalysen, og hva det er ønskelig å få ut av analysen.

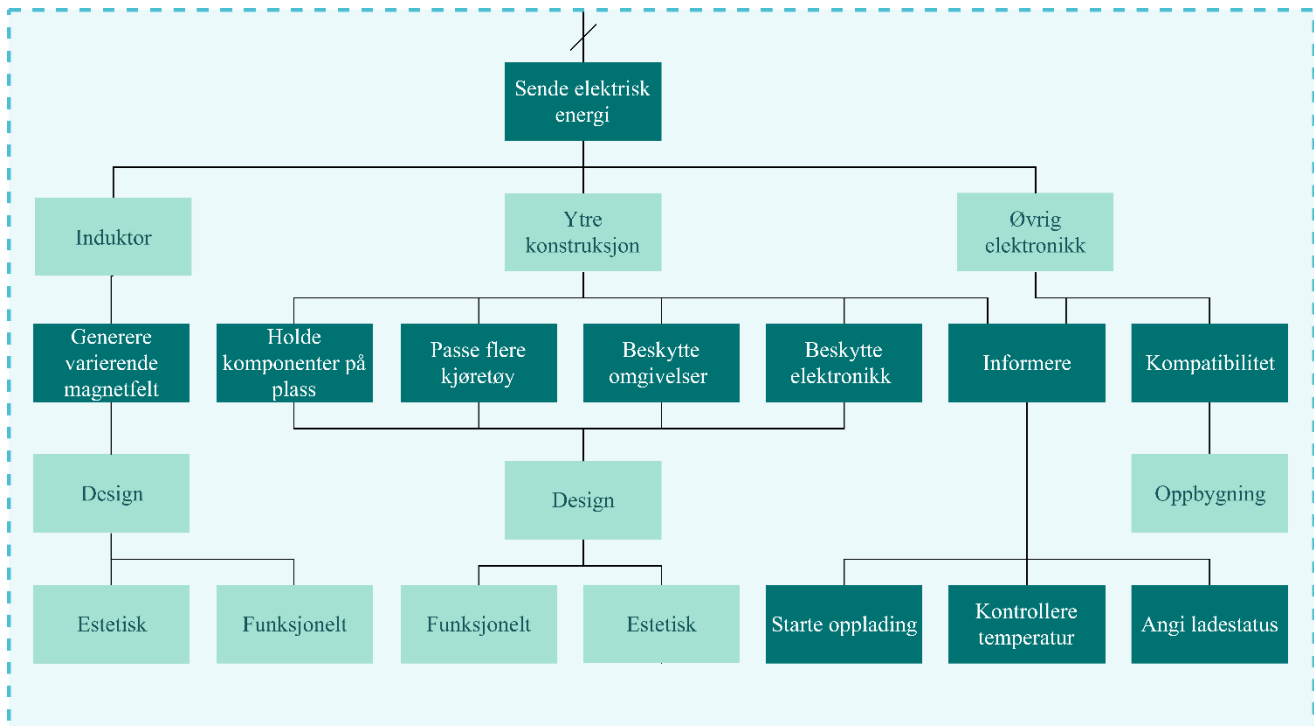
Delfunksjonene som fremkommer av Figur 7.3 og Figur 7.4 er i tillegg til å svare til hovedfunksjonen også et resultat av dekomponeringen av tre eksisterende induksjonssystemer som ble foretatt i kapittel 5.



Figur 7.2: Betydningen av de grafiske elementene som blir brukt i funksjonsanalysen. A indikerer at det er snakk om funksjon, B indikerer at det er snakk om et løsningsmiddel, C angir fokusområdet for oppgaven og D indikerer at analysen fortsetter til/fra et annet sted i analysen.



Figur 7.3: Funksjonsanalyse for induksjonsladekonseptet. Funksjoner av høyere nivå er øverst i analysen, og lavere nivåer av funksjoner er nedover. Hensikten med analysen er å definere delfunksjoner som kan vurderes å bli implementert i ladeløsningen. Løsningsmidlene er tatt med i funksjonsanalysen for å gi en bedre oversikt over hvor i ladekonseptet de ulike funksjonene er tiltenkt. Ladesystemets primærside er dette mastergradsarbeidets fokusområde, og analysen for denne siden er fremstilt i Figur 7.4.



Figur 7.4: Funksjonsanalysen fortsetter fra Figur 7.3. I dette mastergradsarbeidet vil primærsiden til ladeløsningen være fokusområdet. Figuren viser hvilke funksjoner som er tiltenkt de ulike løsningsmidlene som inngår i systemet.

Det er gjort ulike forenklinger i funksjonsanalysen. Blant annet er løsningsmidlene som inngår i fokusområdet kun omtalt som induktor, ytre konstruksjon og øvrig elektronikk. Denne forenklingen er tatt med bakgrunn i problemstillinger, fokusområder og begrensninger gjort tidligere i masterarbeidet.

7.2. Vurdering av delfunksjoner

For å finne ut hvilke funksjoner det er ønskelig å fokusere på i videre utviklingen av produktet er delfunksjonene som fremkom i Figur 7.4 gjentatt i Tabell 7.1 med tilhørende vektning og begrunnelse for vektning.



Figur 7.5: Poengskala med tilhørende viktighet som delfunksjonene vurderes mot.

Ved å vurdere de ulike delfunksjonene etter viktighet blir det generert en prioriteringsliste for hvilke funksjoner som skal implementeres i produktet. Dersom funksjonen anses som veldig viktig eller svært viktig vil den ha høy prioritet i utviklingen, mens delfunksjoner som anses som viktig eller litt viktig vil implementeres dersom økonomien og øvrige ressurser strekker til, eller dersom en markedsundersøkelse på et senere stadium i utviklingsprosessen fastslår at delfunksjonen er viktig for det potensielle kundesegmentet.

Tabell 7.1: Delfunksjonene vektet etter poengskala gitt av Figur 7.5.

Delfunksjon	Vekting	Begrunnelse
Induktor		
Generere varierende magnetfelt	5	En av systemets hovedfunksjoner, og er dermed svært viktig.
Estetisk design	1	Induktorens estetiske design blir sett på som uviktig, da den trolig ikke vil være synlig.
Funksjonelt design	4	Det blir sett på som veldig viktig å finne et design som optimaliserer effektoverføringen og dermed fører til økt virkningsgrad.
Ytre konstruksjon		
Holde komponentene på plass	4	Det er veldig viktig at alle komponenter blir holdt på plass. Resultater fra tidligere undersøkelser viser at det er normalt at ytterkonstruksjonen tar seg av denne funksjonen, men dersom det fremkommer at det ikke er det beste alternativet vil det bli brukt et annet løsningsmiddel med samme funksjon.
Estetisk design	2	Det er ønskelig at konstruksjonen ikke vekker avsky hos kundene, men det blir ikke sett på som en avgjørende funksjon for produktet og er derfor ansett som litt viktig.
Funksjonelt design	4	Produktets design bør utformes med bakgrunn i hvordan funksjonene kan løses best mulig.
Beskytte elektronikk	5	Det er svært viktig at elektronikken blir beskyttet for et mest mulig robust produkt med tilstrekkelig levetid og minst mulig brannfare.
Beskytte omgivelser	5	Det er svært viktig at produktet lever opp til lover og regler som er definert med bakgrunn i stråling. Det er også ønskelig at produktets konstruksjon ikke er i fare for brukere.
Passe til flere typer små kjøretøy	4	Det er gunstig om produktet designes med bakgrunn i den metriske grovspeifiseringen for å kunne brukes til flere kjøretøy, da dette er kostnadsbesparende.
Angi ladestatus	3	Det er ønskelig at ladestatusen blir synliggjort for at brukeren skal kunne vite om ladeprosessen går riktig for seg, og når kjøretøyet er ferdig oppladet.
Øvrig elektronikk		
Kompatibel med flere elektriske enheter samtidig	2	Det er en bonus om både kjøretøy og andre elektriske artikler i tilstrekkelig nærhet kan lades opp på samme tid, men det er ikke avgjørende for produktet og bør ikke gå på bekostning av

Tabell 7.1 forts.: Delfunksjonene vektet etter poengskala gitt av Figur 7.5.

Delfunksjon	Vekting	Begrunnelse
Øvrig elektronikk		
Kontrollere temperatur	5	Av sikkerhetsmessige og levetidsmessige årsaker vil det være svært viktig at elektronikken operer innenfor akseptabelt temperaturnivå.
Starte opplading	4	Oppladingen av produktet må kunne startes på en brukervennlig måte for at produktet skal kunne anses som hensiktsmessig.

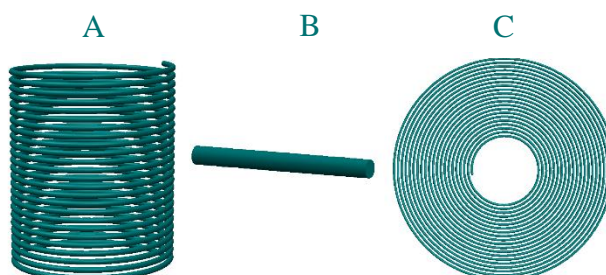
Det fremkommer av Tabell 7.1 at ladeløsningens viktigste funksjoner er å generere et varierende magnetfelt mens elektronikk og omgivelser blir beskyttet. Ladeløsningen bør utvikles og utformes etter hvordan funksjonene kan ivaretas, uten å ta for mange hensyn til det estetiske. Det kan være en fordel om funksjoner som å angi ladestatus og kompatibilitet mot flere enheter implementeres, men dette bør ikke gå på bekostning av andre funksjoner.

7.3. Funksjonsalternativer med skisser

Det ble i funksjonsanalysen ikke implisert en spesifikk teknisk løsning til de ulike delfunksjonene for å holde alle muligheter av funksjonsløsninger åpne. Det vil i dette delkapittelet utformes ulike løsningsalternativer for delfunksjonene, basert på eksisterende induksjonsladekonsepter og undertegnedes egen oppfatning av hvilke løsninger som bør ses nærmere på. Adaptering av eksisterende løsningsalternativer kan være både lettere og billigere å implementere enn mindre anerkjente løsninger. På den annen side kan mindre kjente løsninger som tilfredsstillende behovet være et konkurransefortrinn for produktet dersom det viser seg å fungere bedre. Informasjonsinnhenting baserer seg derfor på dekomponeringen gjort i kapittel 5, og undersøkelser gjort av andre produktet som kan ha delvis overlappende delfunksjon. Styrker og svakheter ved løsningsalternativene som blir generert vil også fremkomme, og benyttes videre i utviklingen.

7.3.1. Induktortype

For å skape et varierende magnetfelt trengs det en induktor i form av en elektrisk leder. Det finnes flere ulike induktorer som kan benyttes til dette formålet.



Figur 7.6: A. Heliksspole, med vindinger plassert i både lengderetning og bredderetning. B. En enkel, rett leder. C. Spiralspole, hvor vindingene bygger seg utover i bredderetning.

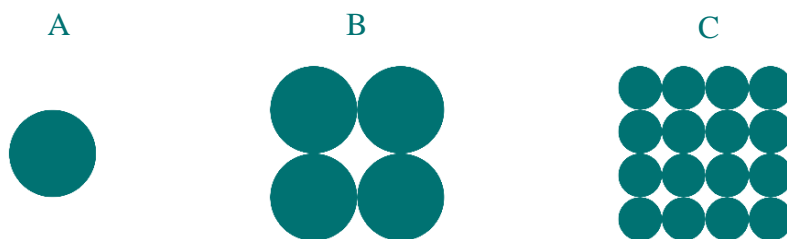
Figur 7.6 A illustrerer en spole med vindinger med tilnærmet lik diameter, hvor vindingene ligger konsentrisk over hverandre. En rett leder genererer også et magnetfelt rundt seg, og er illustrert i Figur 7.6 B. Figur 7.6 C illustrerer en flat spole («pancake coil») hvor vindingene har felles sentrum, men ligger på utsiden av hverandre med stadig større diameter. Fordeler og ulemper ved de ulike løsningene fremkommer av Tabell 7.2.

Tabell 7.2: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene for induktortyper.

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.6 A: Heliksspole	Magnetfeltet går gjennom midten av spolen, og er svakt på utsiden. Mye brukt, lett å få tak i spoler.	Risikerer stor avstand mellom ytterpunktene av vindingene på primær- og sekundærspolen.
Figur 7.6 B: Rett leder	Billig og enkelt å få tak i, da rette ledere er mye brukt.	Magnetfeltet går konsentrisk rundt lederen, det kan derfor bli vanskelig å få en effektiv overføring. Har lavere induktivitet enn spoler.
Figur 7.6 C: Spiralspole	Magnetfeltet går gjennom midten av spolen. Kan oppnå større flateareal for overlapping med sekundærsiden.	Kan være vanskelig å få tak i riktig dimensjonerte flate spoler, men fullt mulig. Vanskelig å kombinere hensiktsmessig med jernkjerne, da de ikke oppnår stor arealoverlapp.

7.3.2. Antall induktorer i basismodul

Hvor mange induktorer basismodulen skal bestå av er et valg som bør tas for å oppfylle funksjonen om funksjonelt design av løsningen, da den rette kombinasjonen av induktorer vil antas å påvirke virkningsgraden til systemet.



Figur 7.7: Illustrasjon av A. én induktor, B. flere induktorer eller C. flere mikroinduktorer.

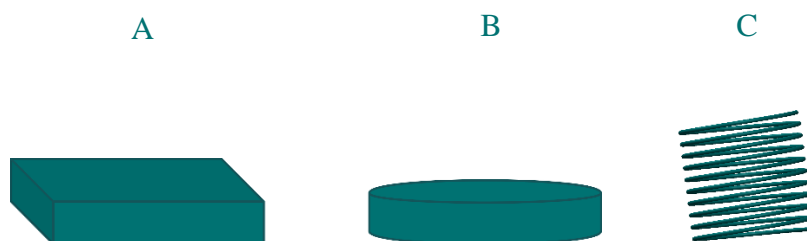
De ladeløsningene som ble dekomponert i forrige kapittel hadde begge én induktor i laderen. Men det er flere eksempler på ladeløsninger med flere induktorer. Det er trolig ikke en enkel fasit, og det må derfor gjøres vurderinger på hva som er mest hensiktsmessig for akkurat denne løsningen.

Tabell 7.3: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene for antall induktorer i basismodulen.

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.7 A: Én induktor	Enkel å eksperimentere med, og enkelt å fremstille.	Gjør systemet mer sensitivt for parkering av kjøretøy, og krever dermed større presisjon av bruker.
Figur 7.7 B: Flere induktorer	Kan muligens overføre mer energi, og det kan føre til at en basismodul dekker et større område i x-y-planet og minsker antall basismoduler for større kjøretøy. Kan lade flere mottakere samtidig.	Mer krevende å eksperimentere med enn én induktor. Krever mer av regulering mot mindre kjøretøy. Risikerer å få et større tap til omgivelsene, da flere induktorer kan ha et større arbeidsområde som kan medføre dårligere overlapp med sekundærspolen.
Figur 7.7 C: Mange, mindre induktorer	Kan gi større parkeringsfrihet av kjøretøyet, da de induktorene med størst arealoverlapp kan overføre mens de med minst arealoverlapp kan være avslått.	Krever flere koblinger, mer komplekst å lage.

7.3.3. Beskytte induktor mot støtskader

Når ladeløsningen er i bruk vil det potensielt skje et sammenstøt med kjøretøyet, noe som kan gjøre skade på elektronikken. I tillegg vil det være en belastning når ladeløsningen settes ned på et underlag. Det er derfor ønskelig å forhindre at disse påkjenningene skal gjøre skade på elektronikken ved å skape en demping i systemet.



Figur 7.8: Illustrasjon av A. Plastklosser, B. Skumgummiplate, C. Spiralfjærer.

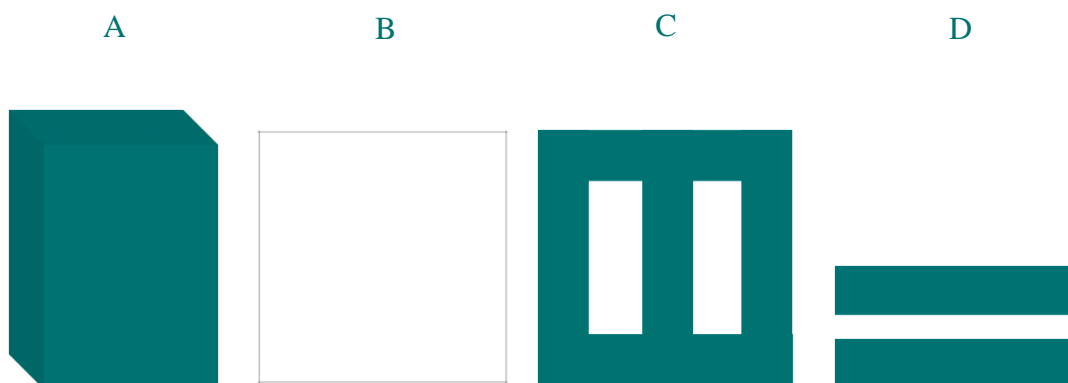
Det er flere løsninger som kan bli tatt i bruk for å skape demping i systemet. Løsningene illustrert i Figur 7.8 er inspirert av dekomponeringen gjort i forrige kapittel. Figur 7.8 A viser plastklosser som kan bli montentert i overkant av induktorene. Løsning fra Figur 7.8 B er hentet fra Qi-ladere, hvor spolen var montert til en skumgummiplate. Spiralfjæringen vist i Figur 7.8 C er hentet fra koketoppen hvor hver induktor hvilte på hver sin spiralfjæring.

Tabell 7.4: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene for beskyttelse av induktor mot støtskader.

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.8 A: Plastklosser	Billig og enkelt å utforme og implementere.	Gir ikke så mye demping i seg selv, men gir en avstand til ytterkonstruksjon som beskytter dersom ytterkonstruksjonen blir deformert.
Figur 7.8 B: Skumgummiplate	Enkelt å montere og fremstille.	Gir begrenset med demping mot store sammenstøt.
Figur 7.8 C: Spiralfjær	Lett tilgjengelig å kjøpe inn. God dempingeffekt.	Krever større konstruksjon i høyden.

7.3.4. Overføringskjerne for optimalisering av overføring

I og med at induksjonslading baserer seg på transformatorens oppbygning, i tillegg til at enkelte materialer overfører magnetisme bedre enn luft, er det nærliggende å tro at en kjerne vil forbedre virkningsgraden til systemet. Med kjerne menes her overføringsmaterialet mellom primær- og sekundærsiden.



Figur 7.9: A. Delvis kjerne, B. luftkjerne (ingen fysisk kjerne), C. Fullverdig kjerne. D. Splittet kjerne.

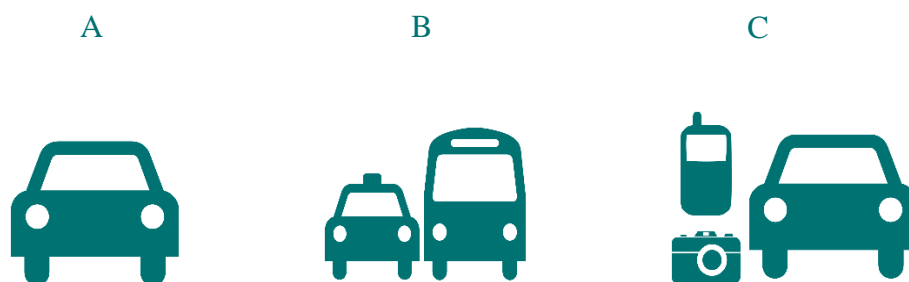
Kjernen presentert i Figur 7.9 A er inspirert av teknologiutredningen av prinsippet bak elektrisk tannbørste. Kjernen er i det gitte tilfellet plassert i rommet mellom vindingene, både på primær- og sekundærsiden. Figur 7.9 B illustrerer en luftkjerne, som vil si at all den magnetiske overføringen går gjennom luft. I Figur 7.9 C vises en fullverdig transformator-kjerne som går gjennom og på utsiden av induktorene i magnetfeltets bane. Men det kan også være en mulighet å splitte kjernen i to, og ha en del i primærsiden og en del i sekundærsiden, vist i Figur 7.9 D. Fordeler og ulemper ved de ulike løsningene fremkommer av Tabell 7.5.

Tabell 7.5: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene for overføringskjerne mellom primær- og sekundærsiden til ladesystemet.

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.9 A: Delvis kjerne	Kan ha opptil flere tusen ganger høyere permeabilitet enn den relative, og kan på denne måte konsentrere feltet og minske tapet.	Kan oppstå virvelstrømmer i jernet som kan føre til større tap. I tillegg kan jernkjerne kreve større nøyaktighet av bruker.
Figur 7.9 B: Luftkjerne	Oksygen er et paramagnetisk stoff som kan lede magnetisme (91).	Oksygen fører ikke magnetfeltet veldig godt, og det er nærliggende å anta at magnetismen vil avta brått ved økt avstand.
Figur 7.9 C: Fullverdig kjerne	Avgir svært lite tap til omgivelsene.	Vanskelig å implementere i en trådløs ladeløsning som krever at primær- og sekundærsiden er adskilt.
Figur 7.9 D: Splittet kjerne	Kan potensielt oppnå forbedret magnetisk overføring, i tillegg til at kjernen kan bli fordelt mellom primær- og sekundærsiden.	Uvisst om tanken fungerer i praksis, eller om luftgapet stopper den magnetiske overføringen og dermed hindrer indusering i sekundærsiden.

7.3.5. Elektrisk kompatibilitet

Det er nødvendig å gjøre en vurdering angående hva det er ønskelig at laderen skal kunne lade opp. Dette er en funksjon som ble vurdert til «litt viktig» tidligere i kapittelet, men det er ønskelig å se nærmere på hvordan dette kan påvirke produktet i tilfellet scenariet blir en «bivirkning» av valg av elektrisk overføringssystem.



Figur 7.10: Illustrasjonene symboliserer A. Ett kjøretøy, B. Flere kjøretøy, C. Ett kjøretøy og flere mindre elektriske artikler.

I Figur 7.10 A illustreres at ladeløsningen skal ha den hensikt å lade opp ett lite kjøretøy, og ikke påvirkes av andre elektriske artikler. Det er også en mulighet at laderen utvikles for å kunne lade opp flere kjøretøy samtidig, illustrert i Figur 7.10 B. Figur 7.10 C viser en mulighet for å

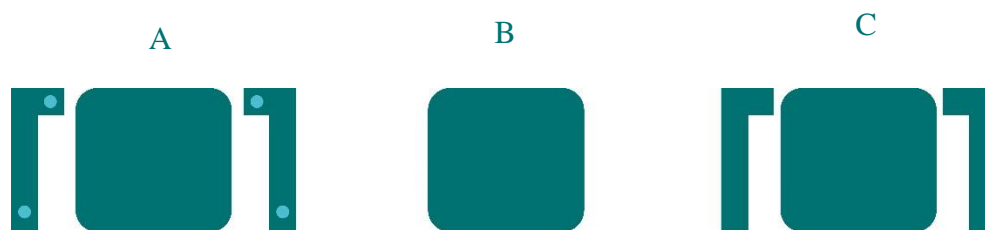
kunne lade opp et kjøretøy i tillegg til flere, små elektriske artikler som befinner seg i tilstrekkelig nærhet til ladeløsningen. Fordeler og ulemper ved de ulike løsningene fremkommer av Tabell 7.6.

Tabell 7.6: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene for elektrisk kompatibilitet.

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.10 A: Ett kjøretøy	Trenger kun å fokusere på at ladeløsningen skal ha ett siktepunkt for det magnetiske feltet.	Begrenset bruksområde for ladeløsningen.
Figur 7.10 B: Flere kjøretøy	Positivt for brukere med flere små kjøretøy, eller bedrifter.	Mer komplekst å utvikle. Krever større plass for at alle kjøretøyene kan være innenfor tilstrekkelig rekkevidde.
Figur 7.10 C: Ett kjøretøy og mindre elektriske artikler	Positivt for bruker at laderen kan ha flere bruksområder.	Mer komplekst å utvikle.

7.3.6. Fysisk kompatibilitet

For at ladesystemet skal kunne anvendes på flere ulike typer små kjøretøy, vil en mulighet være å tilrettelegge for dette gjennom den fysiske utformingen av produktet. Det blir her sett nærmere på ulike løsningsalternativer for å tilfredsstille dette.



Figur 7.11: A. Fastmonterte spor som angir stoppunkt i lengde- og bredderetning. B. Ingen spor, kun ladekonstruksjonen. C. Justerbare spor som angir stoppunkt i lengde- og bredderetning.

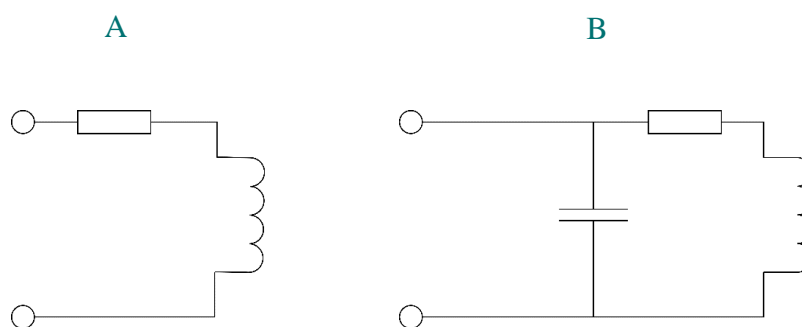
Med fastmonterte spor, gitt av Figur 7.11 A, menes at det monteres hindringer i gulvet rundt ladeløsningen for å guide føreren av kjøretøyet korrekt i forhold til ladeløsningens midtpunkt. Løsningen illustrert i Figur 7.11 B vil si at det ikke skal legges fysisk til rette for flere ulike kjøretøy. Figur 7.11 C viser en løsning med justerbare spor, for eksempel at sporene er som en skuff man trekker ut og inn av ladeløsningen etter behov.

Tabell 7.7: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene for fysisk kompatibilitet rettet mot flere ulike kjøretøy..

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.11 A: Fastmonterte spor	Hjelper bruker med å sikte. Veldig robust løsning, som er enkel å utvikle.	Lite fleksibelt, tungvint for bruker å justere dersom brukeren innehar flere kjøretøy som skal benytte ladeløsningen. Opptar i tillegg mye gulvplass.
Figur 7.11 B: Ingen spor, kun ladekonstruksjon	Veldig fleksibelt, gjør at ladeløsningen kan benyttes til flere ulike kjøretøy uten at bruker må gjøre noen innstillinger.	Gjør det vanskelig å sikte for brukeren. Dette kan gjøre at spolekoblingen ikke blir optimal, og reduserer overføringsevnen.
Figur 7.11 C: Justerbare spor	Fleksibel løsning som hjelper brukeren med å sikte.	Mer komplekst enn de to andre løsningene. Opptar plass når den er utslått, og krever arbeid av bruker for å justere.

7.3.7. Elektromagnetisk induksjon

Den elektromagnetiske overføringen kan, som tidligere utredet, forekomme ved ulike elektriske koblinger. Det er i denne oppgaven fokusert på induktiv kobling og magnetisk resonanskobling, da dette er de to koblingene som er mest utbredt når det kommer til trådløs opplading.



Figur 7.12: A. Induktiv kobling illustrert med en RL-krets. B. Magnetisk resonanskobling illustrert med en RLC-krets.

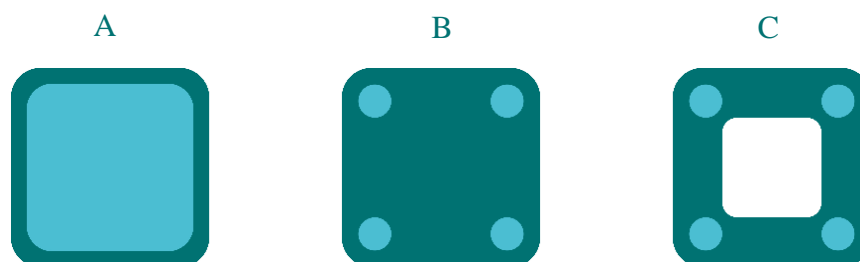
Figur 7.12 er svært forenklede modeller, da koblingene i praksis inneholder langt flere komponenter og komponentene kan kobles på utallige måter. Det vil derfor her bli sett på induktiv kobling og magnetisk resonanskobling som prinsipp.

Tabell 7.8: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene knyttet til elektromagnetisk induksjon.

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.12 A: Induktiv kobling	God overføringsevne over korte avstander. Enkelt å implementere.	Overføringsevnen avtar trolig brått med økt ladeavstand. Dette begrenser muligheten for stor parkeringsfrihet.
Figur 7.12 B: Magnetisk resonanskobling	Kan lade enheter med ulikt effektbehov samtidig. Kan trolig ha en akseptabel virkningsgrad over noen centimeters avstand.	Begrenset ladeavstand, og antakelig lavere toppnivå for virkningsgrad. Komplekst system å utvikle og implementere.

7.3.8. Sklisikker konstruksjon

Med bakgrunn i at ladeløsningen skal utvikles til å være både sikker for elektriske komponenter, omgivelser og bruker er én av løsningene for ytterkonstruksjonen at holder seg stabil og på samme sted under opplading. Det er derfor fremkommet ulike løsningsforslag som belyser dette aspektet ved sikkerhet.



Figur 7.13: A. Sklimatte, B. Bolte fast konstruksjonen, C. Fastmontert rammeverk.

Av dekomponeringen i forrige kapittel fremkom det ulike løsninger på denne funksjonen. Én av løsningene var en sklimatte montert på ladeløsningens underside, som baserer seg på friksjonen mot underlaget. En annen løsning er illustrert i Figur 7.13 B, hvor hele konstruksjonen boltes fast til underlaget. Et tredje foreslått løsningsalternativ er et rammeverk som boltes fast til underlaget som ladekonstruksjonen plasseres inni ved bruk. Fordeler og ulemper ved de ulike løsningene fremkommer av Tabell 7.9.

Tabell 7.9: Fordeler og ulemper ved de ulike løsningsalternativene for en sklisikker konstruksjon.

Funksjonsalternativ	Fordeler	Ulemper
Figur 7.13 A: Sklimatte	En sklimatte vil kunne gi en mobil konstruksjon, og er lett å anskaffe.	Ladeløsningen vil fortsatt ha en veltefare.
Figur 7.13 B: Bolte fast	Konstruksjonen vil helt sikkert ikke forflytte seg ved bruk eller andre sammenstøt.	Utgjør en permanent konstruksjon, noe som strider mot funnene gjort i markedsundersøkelsen i forprosjektet.
Figur 7.13 C: Fastmontert rammeverk	En semipermanent løsning. Kan gi mersalg, da kunden trenger en ramme per sted laderen skal brukes for å være sklisikker.	Opptar gulvplass, selv når laderen ikke er plassert i rammen. Rammen utgjør en permanent konstruksjon.

7.4. Eksterntesting

Gjennomføring av en eksterntest med personer som innehar kunnskap innenfor fagfeltene som inngår i et eller flere av delfunksjonene kan gi fruktbare resultater i form av løsninger og synspunkter man selv ikke har tenkt på.

7.4.1. Testmålsettinger

For å få mest mulig ut av eksterntesten er det formulert hovedmål og delmål. Målsettingene gjør det lettere å fokusere på det som skal undersøkes, og velge bort det som ikke skal fokuseres på.

Hovedmål

Det overordnede målet for eksterntesting er definert til:

«Undersøke en ekspertgruppes synspunkt på de foreslåtte elektriske delfunksjonsløsningene, og tanker rundt induksjonsladedekonseptet som helhet»

Delmål

1. Finne ut hva ekspertgruppen mener om induksjonsladesystemet, og om dette er noe de ser for seg at har en mulighet i markedet.
2. Kartlegge hvilke utfordringer ekspertgruppen ser for seg kan oppstå underveis i utviklingen av konseptet, og hvilke anbefalinger de har rundt eksperimentering.
3. Undersøke hvilke formeninger ekspertpanelet har om delfunksjonene og de foreslåtte delfunksjonsløsningene.
4. Få oversikt over ekspertgruppens andre tanker og formeninger rundt konseptet eller produktet.

7.4.2. Valg av testpopulasjon

Det er ønskelig at testgruppen skal fungere som en ekspertgruppe, og inneha kunnskap om ett eller flere fagområder som blir berørt i utviklingen av induksjonsladedekonseptet. På nåværende stadium i utviklingen er det ønskelig at de valgte ekspertene har kunnskaper innenfor elektronikk. Ekspertgruppen er presentert i Tabell 7.10.

Tabell 7.10: Presentasjon av ekspertgruppen.

Navn	Tittel	Fagfelt
Kristian Jordhøy Blystad	Elektroingeniør og elektriker	Elektronikk
Tom Ringstad	Senioringeniør	Elektronikk

Som det fremkommer av Tabell 7.10 er det få eksperter med i eksterntesten. Dette kommer av at det ikke hovedsakelig er subjektive meninger som skal avdekkes, heller objektive meninger basert på deres faglige kunnskap som eksperter på emnet.

7.4.3. Kommunikasjonsform

Det er i eksterntesten valgt å foreta samtaler med personer som er eksperter på emnet. Dette er en åpen kommunikasjonsform, og fordelen dette medfører er friheten til å kunne stille oppfølgingsspørsmål, og å kunne bevege seg frem og tilbake mellom ulike tema og spørsmål som skulle dukke opp. Det er ønskelig at ekspertene ikke skal føle stort press på å være delaktig, men at det skal være en uformell atmosfære og at samtalen på denne måten kan føre til fruktbare resultater og løsninger (92).

7.4.4. Resultater

Ekspertene det ble snakket med mente at det ville være et marked for en ladeløsning for små, elektriske kjøretøy. Blant annet kan det være interessant å rette seg mot industri hvor de ansatte kan slippe å plugge inn en lader, men bare parkere kjøretøyet ved en ladestasjon. Utfordringer det bør tenkes på er hvor mye systemet tåler – både elektrisk og fysisk. Det er i tillegg lurt å tenke på hvordan man kan oppnå høyest mulig virkningsgrad samtidig som ladeløsningen skal være brukervennlig, siden det mest sannsynlig blir en viss avstand mellom spolene. Strålefare ved bruk av induksjon vil også være av interesse å finne ut av. Kan være lurt å legge hovedelektronikken på utsiden av ladekonstruksjonen, da dette kan gjøre konstruksjonen mindre. Når reguleringssystemet skal utvikles vil det være nødvendig å se på DC-vern som kan oppdage feil ved opplading. Anbefaler å eksperimentere med både induktiv kobling og magnetisk resonanskobling. Det bør også ses nærmere på hvor skjørt systemet blir for avstand, både fordi kjøretøyene vil ha ulik bakkeklaring og fordi det vil kunne forekomme skjev-parkering. Når det kommer til induktortype bør både heliksspole og spiralspole undersøkes. Burde gå for prøve-og-feile-metoden i form av eksperimentering for det som skal finnes ut, da det er svært komplisert å beregne alt.

7.4.5. Resultattolkning

På et så tidlig stadium i utviklingsprosessen er det mye som må undersøkes, og hva resultatet blir til slutt er fremdeles åpent. Eksperimentering bør ha fokus på å finne et system som ikke er for sårbart for avstander, og å optimalisere virkningsgraden til systemet.

7.5. Egenscreening

For å vite hvilke funksjonsløsninger som skal undersøkes nærmere ved eksperimentering, hvilke funksjonsløsninger som skal forkastes, og hvilke funksjonsalternativer som skal implementeres i produktet vil det bli foretatt en selektering ved hjelp av Pughs seleksjonsmatrise. Vurderingen vil bli tatt på bakgrunn av egne undersøkelser gjort tidligere i kapitlet, teoriutredningen, dekomponeringen av eksisterende induksjonssystemer og resultatene fra eksterntesten.

7.5.1. Utvikling av seleksjonsmatrise

De ulike funksjonene og tilhørende løsninger vil vurderes på bakgrunn av ulike kriterier og ulik vektning av de forskjellige kriteriene.



Figur 7.14: Poengskala som representerer grad av oppfyllelse av kriterium.

Det vil derfor lages separate seleksjonsmatriser hver funksjon. Kriteriene som løsningene vil vektes ut ifra blir nærmere forklart nedenfor.

Induktortype

Kriteriene som induktortype vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriet vil bli vektlagt er:

- Gjennomførbarhet: Vektes 50 %. Hvor enkelt det er å anskaffe induktoren for testing, da det er en begrenset tidsramme for gradsoppgaven. Høy gjennomførbarhet tilsvarer høy score.
- Kostnader: Vektes 30 %. Hvor mye det koster å anskaffe induktorer til testing, da det er en begrenset kostnadsramme for gradsoppgaven. Lave kostnader tilsvarer høy score.
- Virkningsgrad: Vektes 20 %. Hvor stor andel tilført effekt som overføres fra primærinduktor til sekundærinduktor. Vil vurderes på bakgrunn av det teoretiske grunnlaget. Høy antatt virkningsgrad tilsvarer høy score.

Antall induktorer i basismodul

Kriteriene som antall induktorer i basismodul vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriet vil bli vektlagt er:

- Gjennomførbarhet: Vektes 40 %. Hvor enkelt det er å anskaffe flere identiske induktorer for testing, da det er begrenset tidsramme for gradsoppgaven. Høy gjennomførbarhet tilsvarer høy score.
- Kostnader: Vektes 25 %. Hvor mye det koster å anskaffe induktorene til testing, da det er en begrenset kostnadsramme for gradsoppgaven. Lave kostnader tilsvarer høy score.
- Kompleksitet: Vektes 35 %. Hvor komplekst det er å utforme forsøksoppsett, anskaffe øvrige instrumenter, og ha kontroll på alle variabler som spiller inn på eksperimentet. Lav kompleksitet tilsvarer høy score.

Støtdemping

Kriteriene som valg av funksjonsløsning for støtdemping vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriet vil bli vektlagt er:

- Funksjonalitet: Vektes 40 %. I hvilken grad løsningsalternativet oppfyller sin funksjon som er å beskytte elektronikken mot støtskader. Høy funksjonalitet tilsvarer høy score.
- Størrelse: Vektes 15 %. Hvor stor plass løsningen vil oppta i ladekonstruksjonen, da det vil være begrenset med plass, gitt av grovspesifikasjonene det arbeides etter. Liten størrelse tilsvarer høy score.
- Integrerbar: Vektes 20 %. Hvor enkelt det er å integrere funksjonsalternativet i en ladeløsning. Lett integrerbar løsning tilsvarer høy score.
- Robusthet: Vektes 15 %. Hvorvidt funksjonsalternativet tåler kollisjoner og andre støt uten selv å bli ødelagt. Høy robusthet tilsvarer høy score.
- Kostnader: Vektes: 10 %. Hvor mye det koster å anskaffe funksjonsløsningen. Lave kostnader tilsvarer høy score.

Overføringskjerne

Kriteriene som valg av overføringskjerne vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriet vil bli vektlagt er:

- Funksjonalitet: Vektet 40 %. Hvor godt kjernen leder magnetisme, og optimaliserer overføringsprosessen. Høy funksjonalitet tilsvarer høy score.
- Gjennomførbarhet: Vektet 15 %. Hvor enkelt det er å anskaffe kjerner for testing. Høy gjennomførbarhet tilsvarer høy score.
- Kostnader: Vektet 15 %. Hvor mye det koster å anskaffe kjerner for testing. Lave kostnader tilsvarer høy score.
- Brukervennlighet: Vektet 30 %. Det er ønskelig at sluttproduktet skal være enkelt for bruker å anvende.

Elektrisk kompatibilitet

Kriteriene som valg av elektrisk kompatibilitet vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriet vil bli vektlagt er:

- Kompleksitet: Vektet 30 %. Hvor komplekst det er å utvikle og eksperimentere med løsningen. Lav kompleksitet tilsvarer høy score.
- Gjennomførbarhet: Vektet 30 %. Hvor enkelt det er å anskaffe nødvendig testutstyr. Høy gjennomførbarhet tilsvarer høy score.
- Nødvendighet: Vektet 40 %. Hvor nødvendig løsningen anses å være for produktet. Veldig nødvendig tilsvarer høy score.

Fysisk kompatibilitet

Kriteriene som valg av fysisk kompatibilitet vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriet vil bli vektlagt er:

- Kompleksitet: Vektet 15 %. Hvor komplekst det er å anvende og tilvirke løsningsalternativet. Lite komplekst tilsvarer høy score.

- Funksjonalitet: Vektet 50 %. Hvor godt løsningsalternativet oppfyller funksjonen om å tilpasses ulike, små kjøretøy. Høy funksjonalitet tilsvarer høy score.
- Fleksibilitet: Vektet 35 %. Hvor fleksibelt løsningsalternativet gjør ladeløsningen. Høy fleksibilitet tilsvarer høy score.

Elektromagnetisk induksjon

Kriteriene som valg av elektromagnetisk induksjonskobling vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriene vil bli vektlagt er:

- Ladeavstand: Vektet 20 %. Hvor stor distanse det kan være mellom primær- og sekundærsiden uten store effekttap. Stor distanse tilsvarer høy score.
- Kompleksitet: Vektet 30 %. Hvor kompleks det er å utforme forsøksoppsett og ha kontroll på alle variabler som spiller inn på eksperimentet. Lav kompleksitet tilsvarer høy score.
- Virkningsgrad: Vektet 10 %. Hva den maksimale virkningsgraden for systemet kan være. Høy virkningsgrad tilsvarer høy score.
- Gjennomførbarhet: Vektet 40 %. Hvor enkelt det er å anskaffe nødvendig utstyr til eksperimenter. Høy gjennomførbarhet tilsvarer høy score.

Sklisikker konstruksjon

Kriteriene som valg av funksjonsløsning for sklisikkerhet vil bli vurdert på, og i hvilken grad kriteriene vil bli vektlagt er:

- Fleksibilitet: Vektet 25 %. Hvorvidt funksjonsløsningen åpner for flytting av ladeløsningen. Høy fleksibilitet tilsvarer høy score.
- Stabilitet: Vektet 25 %. Hvorvidt funksjonsløsningen opprettholder sin funksjon ved sammenstøt. Høy stabilitet tilsvarer høy score.
- Gjennomførbarhet: Vektet 20 %. Hvor enkel funksjonsløsningen kan implementeres i produktet. Høy gjennomførbarhet tilsvarer høy score.
- Sikkerhet: Vektet 30 %. Hvor sikker funksjonsløsningen er for brukeren. Høy sikkerhet tilsvarer høy score.

7.5.2. Egen konseptscreening

De ulike løsningsalternativene vil i de påfølgende avsnitt bli vurdert for videre arbeid.

Induktortype

Valg av induktortype påvirker i stor grad systemets overføringsevne, som er hovedfunksjonen til produktet. Det er derfor viktig å gjøre en vurdering på hvilke induktortyper som kan egne seg for eksperimentering, og potensielt til anvendelse i ladeløsningen.

Tabell 7.11: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av induktortype.

Alternativ / Kriterium	Heliksspole		Rett leder		Spiralspole	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Gjennomførbarhet (40 %)	5	2	5	2	4	1,6
Kostnader (30 %)	4	1,2	5	1,5	4	1,2
Virkningsgrad (30 %)	4	1,2	2	0,6	5	1,5
Total vektet score	-	4,4	-	4,1	-	4,3

Hvilken induktortype som skal velges for ladeløsningen bør nok eksperimenteres med for å bestemme. Gjennomførbarheten er satt høyt for samtlige løsningsalternativer, siden både heliksspole og rett leder er å oppdrive på universitetet. Heliksspoler er relativt enkelt å fremstille på egenhånd dersom det blir nødvendig. Spiralspolen er brukt i både kokeplater og eksisterende mobilladere, og spolene fra kokeplaten som ble dekomponert blir ansett som godt egnet for eksperimentering. Den rette lederen kommer dårlig ut på virkningsgrad da feltet vil gå konsentrisk rundt lederen, noe som vil være ugunstig for virkningsgraden da mye effekt vil gå tapt til omgivelsene med mindre sekundærinduktoren omslutter den rette lederen.

Antall induktorer i basismodul

Antall induktorer som skal inngå i basismodulen kan påvirke ladesystemets ytelse, men også kompleksitet og dermed kostnader for utvikling som medfører høyere markedspris for produktet. Dersom det skal inngå flere induktorer i modulen vil disse induktorene kobles sammen, for deretter å kobles sammen med flere induktorer når ladesystemet skal skaleres opp. Dette må derfor vurderes nøye før et endelig valg kan bli tatt.

Tabell 7.12: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av antall induktorer som skal inngå i basismodulen.

Alternativ / Kriterium	En		Flere		Mikroinduktorer	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Gjennomførbarhet (40 %)	5	2	3	1,2	2	0,8
Kostnader (25 %)	5	1,25	4	1	2	0,5
Kompleksitet (35 %)	5	1,75	3	1,05	2	0,7
Total vektet score	-	5	-	3,25	-	2

Det er mange usikkerhetsmomenter knyttet til antall induktorer i basismodulen. Dette må dermed testes med eksperimentering med en-til-en-overføring, en-til-mange-overføring og mange-til-mange-overføring for å finne ut hva som gir best virkningsgrad ved perfekt og

imperfekt kobling, i forhold til hvor fleksibel dette gjør løsningen og hvor stort utslag feilparkering gjør for virkningsgraden.

Støtdemping

Vurdering av støtdemping vil være med å avgjøre utformingen av ladeløsningen, og kan påvirke konstruksjonens størrelse. I tillegg til at støtdempingen skal beskytte elektronikken er det ansett som viktig at dempingen ikke er skjør og blir ødelagt under støt.

Tabell 7.13: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av støtdempende løsning.

Alternativ / Kriterium	Plastklosser		Skumgummi		Spiralfjæring	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Funksjonalitet (40 %)	2	0,8	3	1,2	4	1,6
Størrelse (15 %)	4	0,6	5	0,75	3	0,45
Integrerbar (20 %)	4	0,8	4	0,8	4	0,8
Robusthet (15 %)	3	0,45	3	0,45	5	0,75
Kostnader (10 %)	5	0,5	5	0,5	5	0,5
Total vektet score	-	3,15	-	3,7	-	4,1

Spiralfjæringen kom totalt best ut av de ulike løsningsalternativene, se Tabell 7.13. Dette vil derfor være løsningen det vil arbeides ut ifra ved videre utvikling av produktet.

Overføringskjerne

Hvilket stoff som skal brukes som overføringskjerne vil påvirke hvor godt magnetfeltet ledes fra primærsiden til sekundærsiden. I tillegg vil overføringskjernen kunne påvirke hvordan primær- og sekundærsiden kobles sammen – om det krever fysisk kontakt eller om det fungerer med en ladeavstand.

Tabell 7.14: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av overføringskjerne.

Alternativ / Kriterium	Delvis kjerne		Luftkjerne		Fullverdig kjerne		Splittet kjerne	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Funksjonalitet (40 %)	4	1,6	3	1,2	5	2	3	1,2
Gjennomførbarhet (15 %)	4	0,6	5	0,75	2	0,3	4	0,6
Kostnader (15 %)	3	0,45	5	0,75	3	0,45	3	0,45
Brukervennlighet (30 %)	3	0,9	5	1,5	1	0,3	2	0,6
Total vektet score	-	3,55	-	4,2	-	3,05	-	2,85

Det er usikkert hvordan de ulike overføringskjernene vil påvirke den magnetiske overføringen, og dette bør derfor testes nærmere. Men som det fremkommer av Tabell 7.14 vil løsningsalternativet med fullverdig kjerne elimineres for videre utvikling. Øvrige alternativer anses som realistiske å undersøke nærmere ved eksperimentering.

Elektrisk kompatibilitet

Hva ladeløsning skal lade opp er en viktig vurdering. Men på dette stadiet i utviklingsprosessen er det ønskelig å vurdere hva som faktisk lar seg gjennomføre ved eksperimentering med noen forenklinger.

Tabell 7.15: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av kompatibilitet for produktet.

Alternativ \ Kriterium	Ett kjøretøy		Flere kjøretøy		Ett kjøretøy og flere mindre, elektriske artikler	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Kompleksitet (30 %)	5	1,5	3	0,9	4	1,2
Gjennomførbarhet (30 %)	5	1,5	4	1,2	3	0,9
Nødvendighet (40 %)	5	2	2	0,8	2	0,8
Total vektet score	-	5	-	2,9	-	2,9

Som det fremkommer av Tabell 7.15 vil hovedfokus for videreutviklingen være konsentrert rundt opplading av ett kjøretøy. Dersom vurderingen skal gjennomgås på et senere tidspunkt bør en markedsundersøkelse legges til grunn for om tilleggfunksjonen vil gi en merverdi for produktet som veier opp for økte utviklingskostnader

Fysisk kompatibilitet

Hvordan ladeløsningen skal tilrettelegges for bruk av flere ulike kjøretøy påvirker ladeløsningens konstruksjon, og det må også ses nærmere på hvilken nytte denne funksjonen utgjør.

Tabell 7.16: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av fysisk kompatibilitetstilpasning.

Alternativ \ Kriterium	Fastmonterte spor		Ingen spor		Justerbare spor	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Kompleksitet (15 %)	4	0,6	5	0,75	3	0,45
Funksjonalitet (50 %)	5	2,5	3	1,5	5	2,5
Fleksibilitet (35 %)	1	0,35	5	1,75	3	1,05
Total vektet score	-	3,45	-	4	-	4

Det er tidlig å bestemme hvilket løsningsalternativ som vil bli anvendt i videre utvikling. Det kan virke lurt å holde på to av alternativene, da å parkere på nøyaktig sted vil være nødvendig

dersom ladeløsningen består av en jernkjerne. Dersom ladeløsningen ikke består av jernkjerne vil den ikke være like var på hvor man parkerer, og en mer fleksibel løsning vil være å foretrekke.

Elektromagnetisk induksjon

Både induktive koblinger og magnetisk resonanskobling blir brukt i ulike ladesystemer i dag. Det vil derfor være nødvendig med en vurdering av hva som trolig er best egnet til bruk i ladeløsningen for små kjøretøy.

Tabell 7.17: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av elektromagnetisk induksjonskobling.

Kriterium	Induktiv kobling		Magnetisk resonanskobling	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Ladeavstand (20 %)	2	0,4	4	0,8
Kompleksitet (30 %)	4	1,2	3	0,9
Virkningsgrad (10 %)	4	0,4	3	0,3
Gjennomførbarhet (40 %)	5	2	5	2
Total vektet score	-	4	-	4

De ulike løsningsalternativene kommer relativt likt ut i egenscreeningen, se Tabell 7.17. Det er nærliggende å tro at koblingsvalg varierer ut ifra bruksområde. Det anses som vanskelig å bestemme én kobling for videre arbeid, derfor vil eksperimentering rettet mot anvendelse være nødvendig.

Sklisikkerhet

Vurdering av funksjonsløsning for sklisikkerhet vil være med å avgjøre utformingen av ladeløsningen, og er en viktig funksjon med tanke på bruk av produktet.

Tabell 7.18: Seleksjonsmatrise etter Pughs modell for valg av sklisikker løsning.

Kriterium	Sklimatte		Fastmontert konstruksjon		Fastmontert rammeverk	
	Score	Vektet score	Score	Vektet score	Score	Vektet score
Fleksibilitet (30 %)	5	1,5	2	0,6	4	1,2
Stabilitet (20 %)	4	0,8	5	1	5	1
Gjennomførbarhet (20 %)	5	1	5	1	5	1
Sikkerhet (30 %)	4	1,2	3	0,9	3	0,9
Total vektet score	-	4,5	-	3,5	-	4,1

Sklimatten kom best ut i egenscreeningen, gitt av Tabell 7.18. Dette vil derfor være løsningen det vil arbeides ut ifra ved videre utvikling av produktet. De fastmonterte løsningene opptar gulvplass konstant, og gjør at ladeløsningen blir permanent eller semipermanent. Markedsundersøkelsen i forprosjektet for EasyCharging viste at potensielle kunder er opptatt av en mobil løsning.

7.5.3. Foretrukne løsningsalternativer

Funksjonsalternativene som kom best ut av seleksjonsmatrisen, og dermed vil bli tatt med videre i utviklingsprosessen, er presentert i Tabell 7.19.

Tabell 7.19: Tabellarisk fremstilling av funksjonsalternativene som kom best ut av selekteringsprosessen, og som vil være med videre i utviklingsprosessen.

Funksjon	Valgt løsningsalternativ
Induktortype	<ul style="list-style-type: none"> • Heliksspole • Spiralspole
Antall induktorer i basismodul	<ul style="list-style-type: none"> • Ën induktor • Flere induktorer
Støtdemping	<ul style="list-style-type: none"> • Spiralfjæring
Overføringskjerne	<ul style="list-style-type: none"> • Delvis kjerne • Luftkjerne • Splittet kjerne
Elektrisk kompatibilitet	<ul style="list-style-type: none"> • Ett kjøretøy*
Fysisk kompatibilitet	<ul style="list-style-type: none"> • Ingen spor • Justerbare spor
Elektromagnetisk induksjon	<ul style="list-style-type: none"> • Induktiv kobling • Magnetisk resonanskobling
Sklisikkerhet	<ul style="list-style-type: none"> • Sklimatte

* Ladeløsningen vil utvikles med den hensikt å kunne lade opp ett kjøretøy, men dersom elektronikken er kompatibel med multilading vil det ikke jobbes aktivt for å motvirke dette. Dette vil da bli en tilleggsfunksjon for produktet.

For enkelte av funksjonene er det valgt flere løsningsalternativer, se Tabell 7.19. Dette er knyttet til usikkerhet rundt hvilke løsningsalternativer som er best egnet for ønsket sluttprodukt, og løsningene vil kunne sammenlignes bedre ved eksperimentering. De funksjonene hvor det kun er valgt én løsning vil denne løsningen være foreløpig valgt for tiltenkt sluttprodukt.

8. Forsøk

Ved gjennomføring av eksperimentell testing vil forståelsen for den underliggende teorien kunne styrkes, og det vil være lettere å velge funksjonsløsninger som egner seg i systemet gjennom de resultatene som genereres.

8.1. Orienterende forsøk

Med den hensikt å følge i Michael Faradays fotspor vil det bli foretatt enkle forsøk hvor det vil bli undersøkt hva som egentlig skjer når man sender spenning inn i en spole og har en annen spole i nærheten.

8.1.1. Forsøksmålinger

Det er definert målinger for eksperimenteringen for å vite hvilken informasjon som er ønskelig å hente ut.

Hovedmål

Hovedmålingen for det orienterende forsøket er:

«Å forstå og kartlegge enkle sammenhenger og fysiske betingelser knyttet til induksjon.»

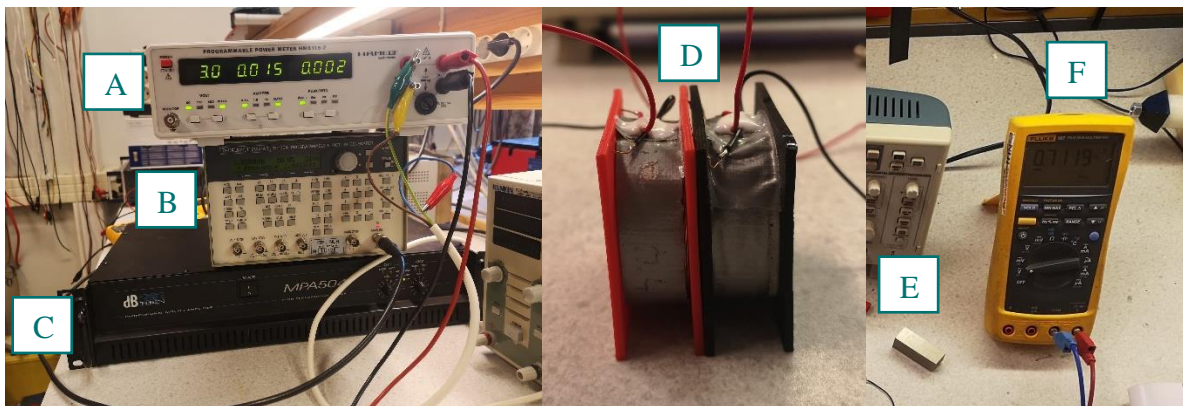
Delmål

1. Forstå og kartlegge hvordan spenning påvirker overføringsevnen.
2. Forstå og kartlegge hvordan frekvens påvirker overføringsevnen.
3. Forstå og kartlegge hvordan avstand påvirker overføringsevnen.

8.1.2. Instrumentering

Under eksperimentet ble det brukt følgende utstyr:

- Forsterker
- Signalgenerator
- Wattmeter
- To spoler med 600 vindinger hver
- Banankabler
- Voltmeter
- Massiv jernkjerne
- Plastplater med ulik tykkelse
- Tykkelsesmåler

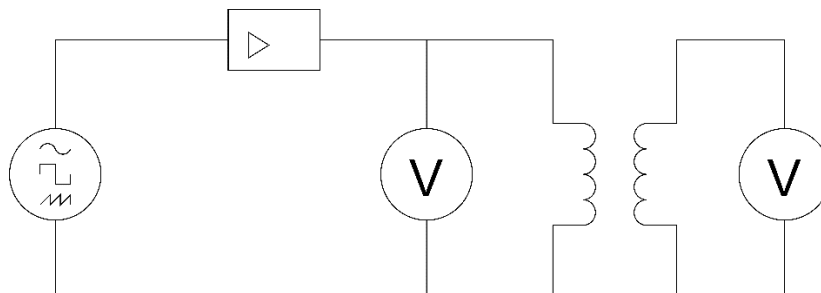


Figur 8.1: Instrumentering. A. Wattmeter. B. Signalgenerator. C. Forsterker. D. Spoler. E. Jernkjerne. F. Voltmeter.

8.1.3. Forsøkstrinn

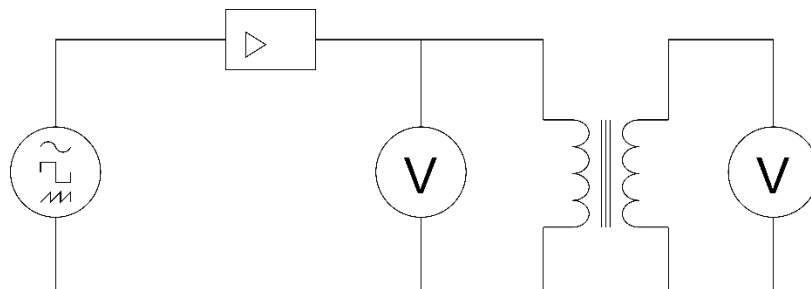
Forsøket ble gjennomført på følgende måte:

1. Utstyret ble koblet opp som vist i Figur 8.2.



Figur 8.2: Kretsen starter med en signalgenerator koblet til en stikkontakt, som deretter kobles til en forsterker. Spenningen måles over begge spolene som står plassert konsentrisk med avstand tilnærmet lik null. Voltmeteret på primærsiden er egentlig wattmeteret, men det er kun spenning som skal måles i dette forsøket.

2. Alle instrumentene ble skrudd på.
3. Frekvens ble innstilt på 100 Hz.
4. Stilte spenningen på 0,3 V over primærspolen og leste av voltmeteret på sekundærsiden.
5. Gjentok punkt 4 for spenningsverdier fra 0,3-3,0 V med intervall på 0,3 V.
6. Koblet opp utstyret med en jernkjerne, vist i Figur 8.3.



Figur 8.3: Eneste endringen i oppsettet er at den massive jernkjerne blir tilført systemet, og går gjennom begge spolene.

7. Gjentok punkt 5.
8. Tok ut jernkjernen, så koblingen ble som i Figur 8.2.
9. Stilte spenningen på 3,0 V.
10. Varierte frekvensen fra 100 Hz-10 kHz og leste av voltmeteret på sekundærsiden for hver innstilling.
11. Satte jernkjernen inn, så koblingen ble som i Figur 8.3.
12. Gjentok punkt 10.
13. Tok ut jernkjernen, så koblingen ble som i Figur 8.2.
14. Stilte inn spenningen over primærspolen på 3 V.
15. Stilte inn frekvensen på 1 kHz.
16. Plasserte plastplater med ulik tykkelse mellom spolene for å vite avstanden mellom spolene. Målte tykkelsen på hver plate. Leste av voltmeteret på sekundærsiden ved hver avstandsjustering.
17. Satte jernkjernen inn, så koblingen ble som i Figur 8.3.
18. Gjentok punkt 16.
19. Koblet fra utstyret.

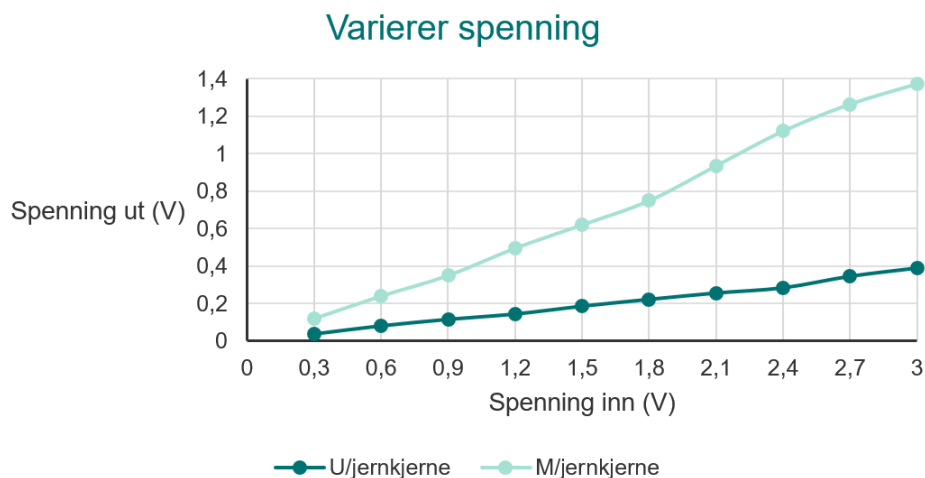
8.1.4. Forsøksbetingelser

Det er fastsatt en sikkerhetsramme for forsøket som innebærer at maksimal spenning inn i systemet er 3 V, og minste frekvens er 100 Hz. Grunnen til dette er at det er helt sikkert at utstyret tåler disse nivåene og ikke blir ødelagt. Romtemperaturen er ansett som tilnærmet konstant under målingene, og er sett bort ifra. Både de faste og de varierende variablene for hvert oppsett er beskrevet i forsøksstrinnene.

8.1.5. Resultater

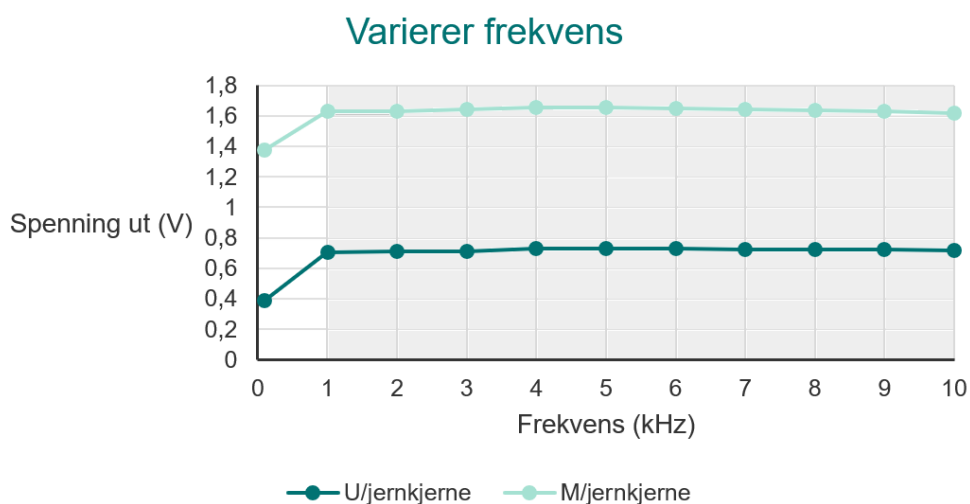
Resultatene fra det orienterende forsøket er presentert i Figur 8.4, Figur 8.5 og Figur 8.6. De målte verdiene er plottet inn i grafer, og ingen beregninger er gjort. Resultatene er presentert i sin helhet i Vedlegg 2.

Forsøksstrinn 3-7



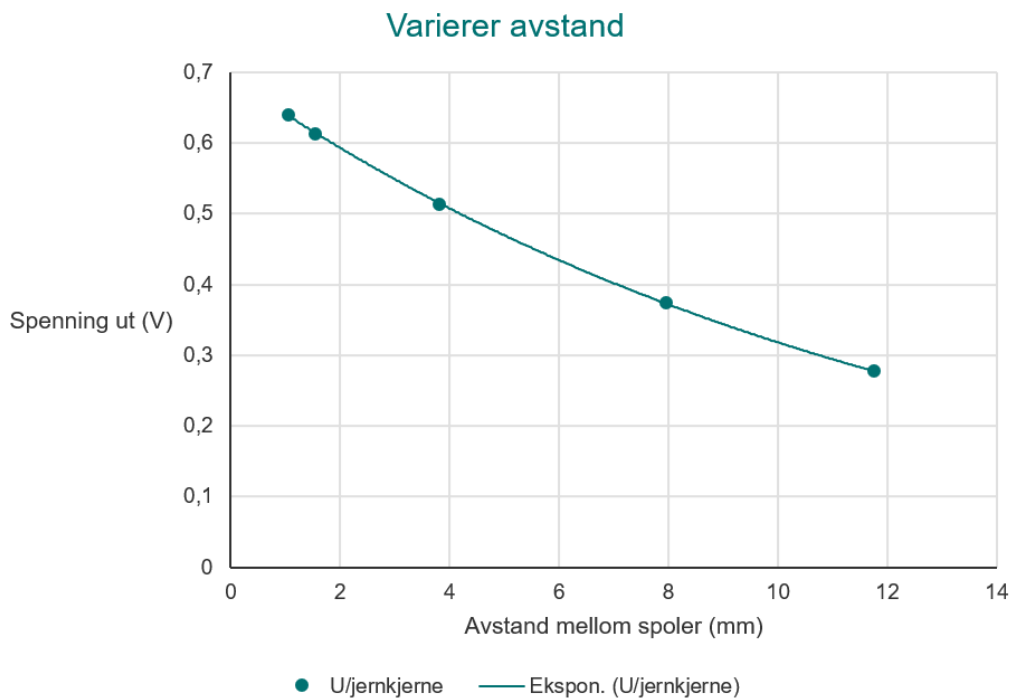
Figur 8.4: Resultater fra målingene med varierende spenning over primærspolen.

Forsøksstrinn 8-12



Figur 8.5: Resultater fra målingene med varierende frekvens. Etter målingene ble foretatt ble det oppdaget at måleinstrumentet som ble brukt ikke hadde arbeidsområde over 1 kHz, derfor er det markert med grått.

Forsøkstrinn 13-18



Figur 8.6: Resultater fra målingene med varierende avstand mellom primærspolen og sekundærspolen.

8.1.6. Resultattolkning

Det er flere feilkilder knyttet til forsøket, og dette gjør at resultatene fra målingene kun viser tendenser og ikke eksakte verdier. Måleutstyret som er brukt er ikke kalibrert før bruk, og kan dermed vise uriktige verdier. I tillegg er spenningsmålingen på primærsiden målt med et wattmeter som kun viser spenning med tidels nøyaktighet mens målingen på sekundærsiden oppgir tre desimaler. Dette kan føre til uriktige forhold mellom inn- og utsiden. En annen usikkerhet ved målingene er at utstyret blir varmere underveis i testingen, noe som kan påvirke overføringsevnen. Men siden hensikten med forsøket er å kartlegge og forstå fysiske sammenhenger knyttet til induksjon, og ikke anvende verdiene på noen måte, velges det å tolke de resultatene som er generert.

I det orienterende forsøket ble det kun sett på sammenhengen mellom spenning inn og spenning ut. Dette sier dermed ingenting om systemets virkningsgrad, kun hvor stort spennings tap det er i kretsen. Fra Figur 8.4 kan man se at det er tilnærmet lineær sammenheng mellom spenning inn i systemet og spenning ut. Det vil si at spennings tapet ikke er konstant, men varierer med spenningen tilført. Denne observasjonen gjelder både for undersøkelsene gjort med og uten jernkjerne. Det er en viss økning i spenningsoverføring mellom 1,8 V og 2,1 V hvor grafen innstiller seg lineært på et høyere nivå, men det er uvisst om dette er en observasjon som er knyttet til feilkildene eller om det er en reell forhøyning. Figur 8.5 viser at det var en stor økning av overført spenning fra 100 Hz til 1 kHz, før grafen flater ut. Over 1 kHz fungerer ikke måleinstrumentet optimalt, og dette kan forklare hvorfor det ikke blir økning av overført spenning ved høyere frekvens. Figur 8.6 viser at det er mindre spennings tap ved kortere

avstander. Ved kortere avstander overlapper mer av arealet og magnetfeltet generert fra primærspolen blir mer konsentrert mot sekundærspolen, så dette resultatet var som forventet.

8.1.7. Resultatoppsummering

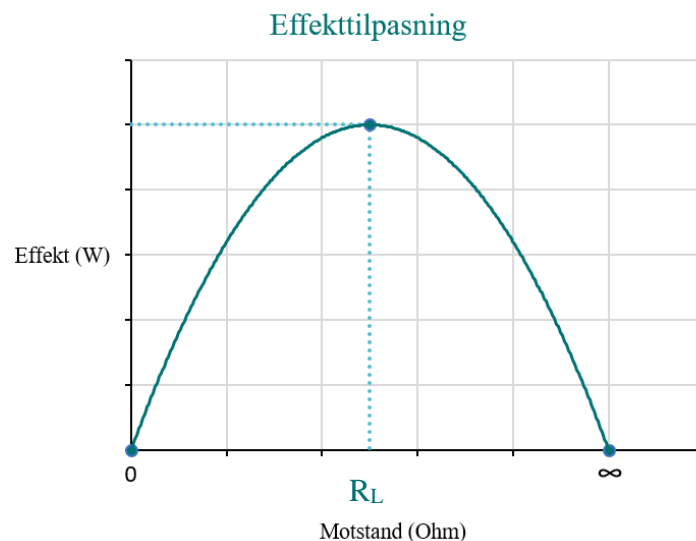
Resultatene fra forsøket indikerer at et ladesystem vil kunne trenge en frekvensomformer for å overføre mest mulig spenning med samme input, og at ladekonstruksjonen blir utformet på en måte som tilrettelegger for så nær fysisk kontakt som mulig mellom primær- og sekundærsiden.

8.2. Effektilpasning

For å få et system så effektivt som mulig er det ønskelig å tilpasse de variablene som er enklest å gjøre noe med. Når en spenningskilde blir belastet oppstår et spenningsfall over den indre resistansen i spenningskilden. Dette spenningsfallet gir et effekttap inne i spenningskilden. Siden hensikten med ladesystemet vil være å få størst mulig effektutvikling i batteriet, som kan anses som en belastning, må batteriets resistans være like stor som den indre resistansen i spenningskilden.

$$R_i = R_L \quad [8.2.1.]$$

Forholdet mellom R_L og effekt P vises grafisk i Figur 8.7. For å oppnå størst mulig effekt er det derfor hensiktsmessig å finne R_L for å kunne angi virkningsgraden til spolene og kjernene som undersøkes. På denne måten får man et sammenligningsgrunnlag for ulike spoletyper og kjerner som kan indikere hvilke løsninger som er best egnet.



Figur 8.7: Ved en bestemt motstand leverer systemet maksimal effekt, som fører til høyere virkningsgrad.

8.2.1. Forsøksmålsettinger

Det er definert målsettinger for forsøket som en rettesnor på hva som er hensikten med forsøket.

Hovedmål

Hovedmålsettingen for forsøket med effektilpasning er:

«Vurdere og sammenligne ulike spolers evne til å overføre og motta elektrisk effekt, og hvilken påvirkning ulike kjerner har på systemet.»

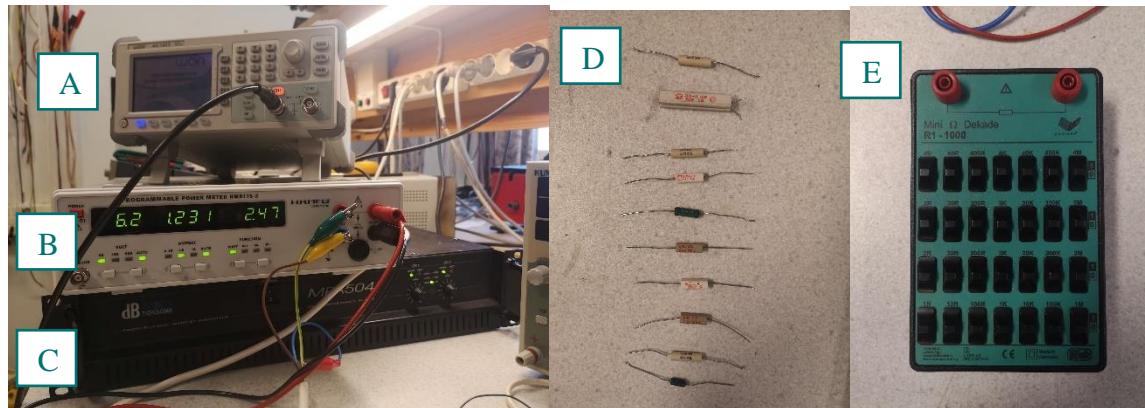
Delmål

1. Finne lasten som gir maksimalt overført effekt for hver spole/kjerne-kombinasjon, og dermed høyest virkningsgrad.
2. Finne ut hvilken spole/kjerne-kombinasjon som har høyest virkningsgrad.

8.2.2. Instrumentering

Under eksperimentet er det brukt følgende utstyr:

- Forsterker
- Signalgenerator
- Wattmeter
- Amperemeter
- Voltmeter
- To identiske spoler med 600 vindinger
- Banankabler
- Massiv jernkjerne
- Motstander med ulike størrelser
- Elektrikerteip

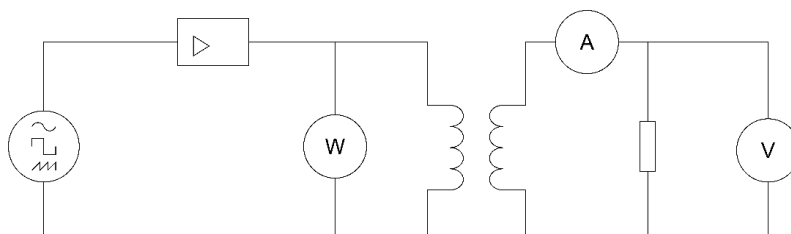


Figur 8.8: Instrumentering. A. Signalgenerator. B. Wattmeter. C. Forsterker. D. Motstander med ulike ohmske størrelser. E. Motstand som kan justeres med brytere.

8.2.3. Forsøkstrinn

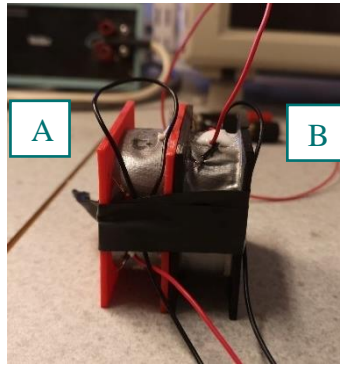
Forsøket ble gjennomført på følgende måte:

1. Forsøket ble koblet opp som vist i Figur 8.9.



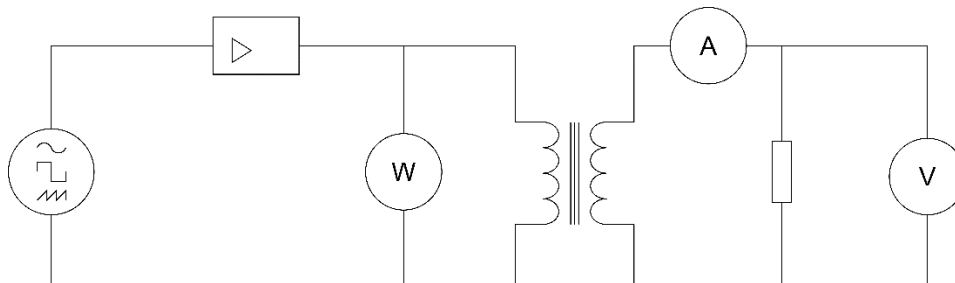
Figur 8.9: Kretsen starter med en signalgenerator som får input fra en stikkontakt. Signalgeneratoren kobles til en forsterker, og effekten måles før den går til primærspolen. I sekundærkretsen måles strøm og spenning over en motstand som varieres.

2. Spolene ble teipet sammen, se Figur 8.10.



Figur 8.10: Spolene ble teipet sammen for å sikre lik avstand gjennom hele forsøket. A. Primærspolen som er koblet til vekselstrømkilden. B. Sekundærspolen som får induisert spenning.

3. Instrumentene ble slått på.
4. Frekvens ble innstilt på 1kHz.
5. Effekt på primærsiden ble satt til 1 W.
6. Koblet inn ulike motstander manuelt (Figur 8.8 D), fra 1 Ω til 100 Ω , og leste av verdier på amperemeteret og voltmeteret. Etterstilte effekten på primærsiden så den alltid var 1 W.
7. Byttet ut motstandene med en regulerbar motstand (Figur 8.8 E)
8. Regulerte motstanden fra 5 Ω til 200 Ω , med et intervall på 5 Ω frem til det var sikkert at maksimalpunktet var funnet. Deretter intervall på 10 Ω . Amperemeter og voltmeter ble avlest.
9. Teipen ble tatt av, og en jernkjerne ble lagt inn mellom spolene. Se Figur 8.11.



Figur 8.11: En jernkjerne blir lagt inn mellom spolene.

10. Punkt 8 ble gjentatt, men motstanden varierte fra 5 Ω til 300 Ω .
11. Koblet fra utstyret.

8.2.4. Forsøksbetingelser

Sikkerhetsrammen for forsøket ble satt på bakgrunn av hva utstyret tåler. Spolene vist i Figur 8.10 ble tilført konstant effekt på 1 W og frekvens på 1 kHz. Omgivelsestemperaturen er antatt konstant.

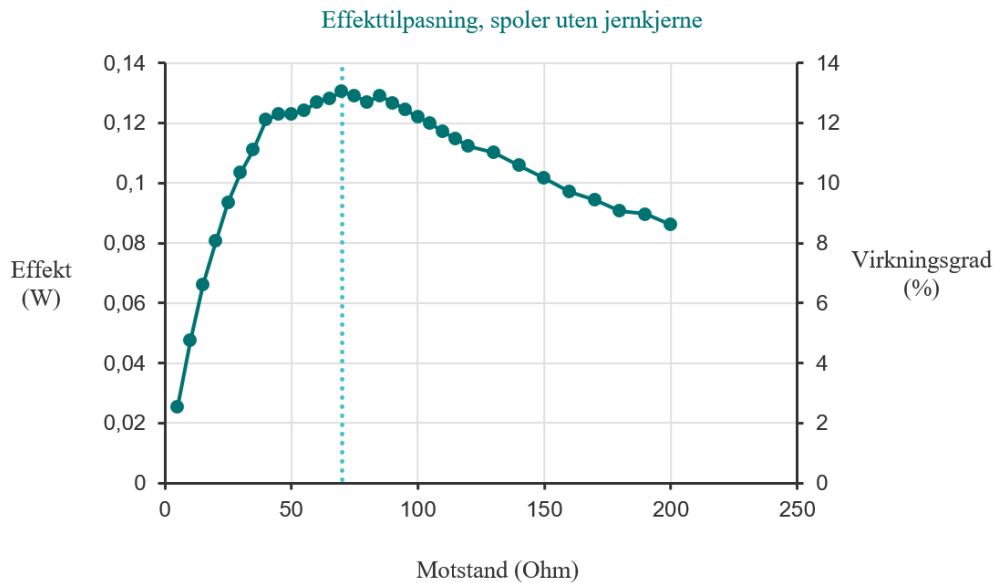
8.2.5. Resultater

Resultatene fra forsøket med effekttilpasning er presentert i Figur 8.13 og Figur 8.14.

Resultatene er i sin helhet presentert i Vedlegg 2. Av de avleste målingene ble effekt ut av

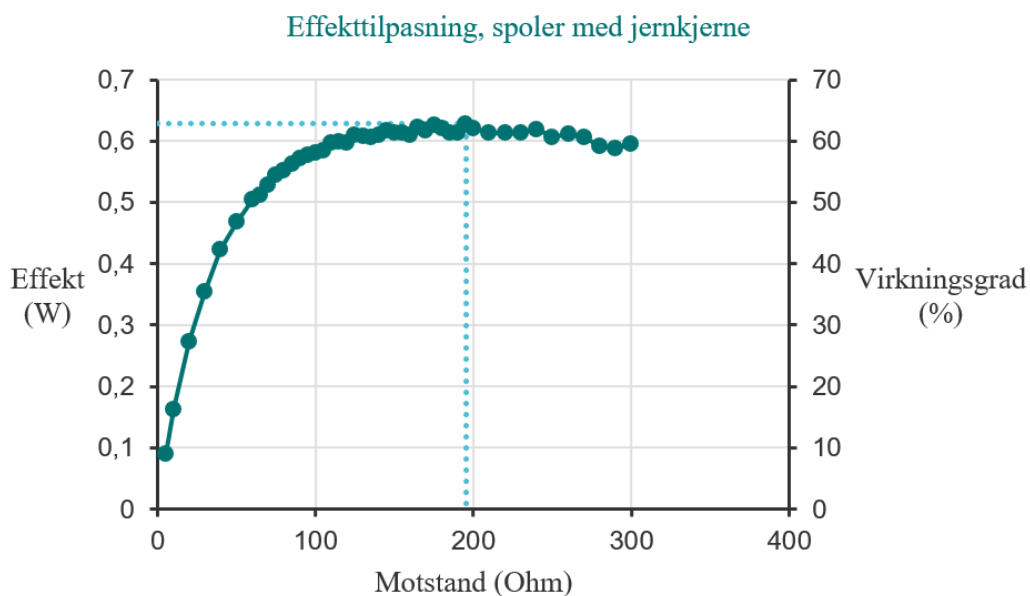
systemet beregnet ved hjelp av [4.1.13.] og virkningsgraden ble gitt av avleste inn-verdier og beregnet effekt av [4.1.14.]

Forsøkstrinn 4-8



Figur 8.12: Resultater fra målingene gjort uten jernkjerne.

Forsøkstrinn 9-10



Figur 8.13: Resultater fra målingene gjort med jernkjerne.

8.2.6. Resultattolkning

Målingene kan ikke anses som svært nøyaktig, da det ikke er korrigert for innvirkningen måleinstrumentene har på kretsen. Det er allikevel rimelig å anta noen klare tendenser. Det fremkommer av Figur 8.12 og Figur 8.13 at spoler med jernkjerne har en betydelig høyere

virkningsgrad enn spolene uten. Det er svært lite effekt som ble sendt inn i systemet, så resultatene er ikke overførbare til en ladeløsning enda. Det er allikevel et godt tegn at det med enkelt utstyr er mulig å få en såpass høy virkningsgrad.

Svakheter ved forsøket og resultatene er at det er brukt flere gjeldende siffer enn det skal være ved utregningene som er gjort. Dette er gjort for å kunne skille de ulike måleresultatene og dermed få en bedre indikasjon på forskjeller ved de ulike uavhengige variablene, og resultatene kan dermed ikke tolkes entydig. For å forenkle forsøket blir effekten inn målt før den inntar primærspolen, så eventuelt tap i ledninger og koblinger blir ikke medregnet. Måler både strøm gjennom og spenning over sekundærspolen. Systemet blir varmere underveis i forsøket, og det er uvisst hvilken innvirkning dette har. Det er valgt å ha tette målinger som en sikkerhet på å oppdage grove feil. Det blir også foretatt et valg om å stole på at wattmeteret viser reell effekt for målingene.

8.2.7. Resultatoppsummering

Av forsøket fremkommer det at jernkjerne helt klart er best under de gitte forsøksbetingelsene. Men for å kunne si noe sikkert bør det undersøkes med større effekt for å kartlegge hvordan spolene opptrer i større skala. Virkningsgraden på over 60 % er positivt.

8.3. Magnetisk resonans

Da det ikke lenger er et wattmeter som kan operere innenfor økte frekvenser vil det i dette forsøket benyttes spenningsmåling for å kartlegge spenningstrekanten, og på den måten beregne aktiv effekt inn i systemet. Vet at strømmen er like stor i alle deler av kretsen siden vi kobler i serie, og at strøm og spenning ligger i fase over motstanden R . Setter derfor inn en motstand i kretsen som målereferanse for å måle spenningen U_R som ligger i fase med I . Det vil i tillegg bli foretatt et forsøk med en passiv spole i resonans.

8.3.1. Forsøksmålinger

For forsøket hvor magnetisk resonans skal undersøkes er det definert målsettinger for hva som er ønskelig å finne ut.

Hovedmål

Hovedmålsettingen for forsøket er følgende:

«Vurdere om magnetisk resonanskobling påvirker systemets virkningsgrad eller ladeavstand.»

Delmål

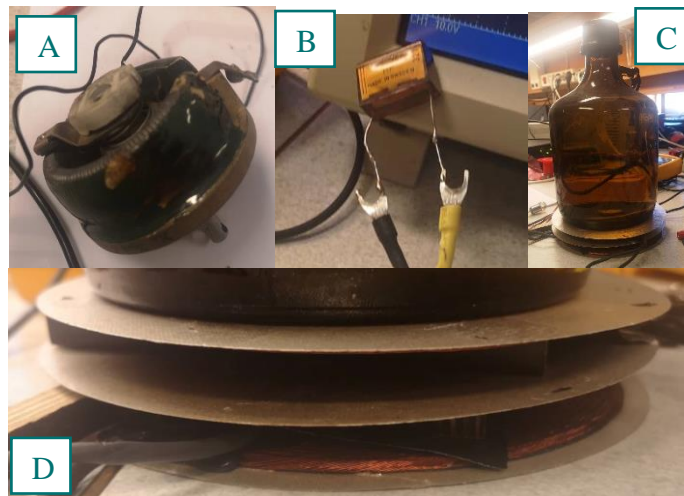
1. Finne resonansfrekvensen til spolen og kondensatoren som blir brukt i forsøket.
2. Finne lasten som gir maksimalt overført effekt, og dermed høyest virkningsgrad.

8.3.2. Instrumentering

Under eksperimentet er følgende utstyr benyttet:

- Signalgenerator
- Forsterker
- Voltmeter
- Amperemeter
- Tre identiske, flate spoler
- Lampe
- Regulerbar motstand

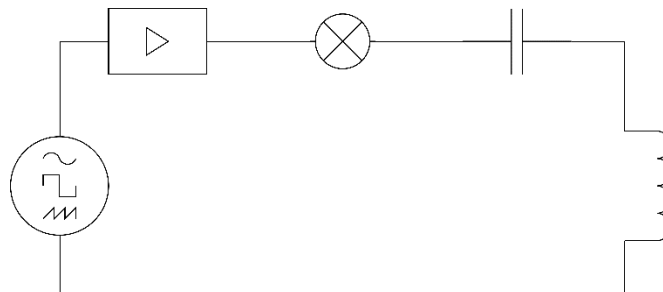
- Motstand på 0,1 Ohm, bruker som målereferanse
- Regulerbar motstand
- Fire pinner med lik tykkelse (1 cm)
- Tung gjenstand som ikke påvirker magnetfeltet



Figur 8.14: Instrumentering. A. Regulerbar motstand. B. Kondensator. C. Tung gjenstand som holder spolene på plass. D. Tre identiske spoler med like avstand, gitt av de fire pinnene.

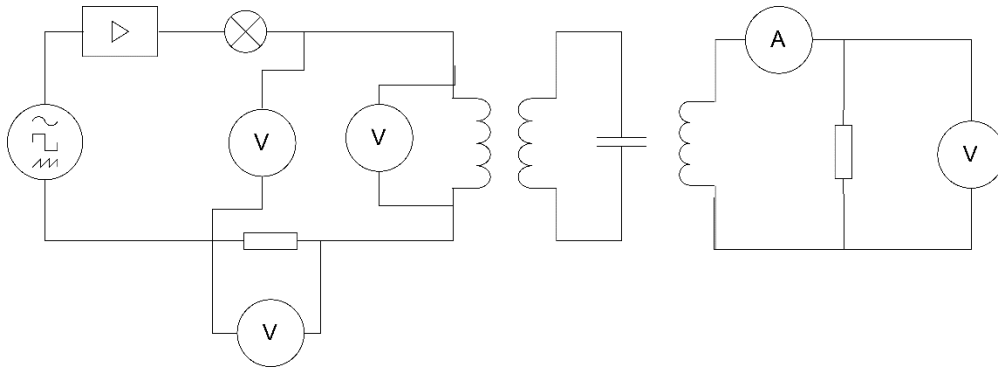
8.3.3. Forsøkstrinn

1. Utstyret ble koblet opp som vist i Figur 8.15.



Figur 8.15: Kobling for å finne resonansfrekvensen til kondensatoren og spolen.

2. Instrumentene ble slått på.
3. Frekvensen ble stilt på til lampen slukket.
4. Leste av resonansfrekvens.
5. Koblet fra utstyret, og koblet opp på nytt som vist i Figur 8.16.
6. Beholdt resonansfrekvensen, og lot signalgeneratoren og forsterkeren jobbe på et nivå.
7. Varierte den regulerbare motstanden, og fant et toppunkt på bakgrunn av de målte verdiene på sekundærsiden.
8. Måler deretter de tre spenningen på primærsiden.
9. Kobler fra.



Figur 8.16: Resonanskobling med en passiv spole, og en shuntmotstand som fungerer som målereferanse.

8.3.4. Forsøksbetingelser

Det er i dette forsøket uvisst hvor mye effekt som blir sendt inn i systemet før resultatene, men forsterkeren og signalgeneratoren stod urørt. Frekvensen var konstant. Varierte motstanden på sekundærsiden.

8.3.5. Resultater

Resonansfrekvensen til systemet ble målt til 18,6 kHz. Ved lavere frekvens var kretsen induktiv, mens ved høyere frekvens var kretsen kapazitiv. Av voltmeteret, amperemeteret og shuntmotstanden fremkommer de målte resultatene av Tabell 8.1. Ohms lov [4.1.9.] er brukt til å beregne motstand R_2 fra verdiene U_2 og I_2 .

Tabell 8.1: Måleresultatene fra effektilpasning med resonans.

U_s	U'_L	U'_R	R_{shunt}	I_2	U_2	R_2
8,067 V	8,062 V	0,028 V	0,1 Ohm	0,180 A	7,05 V	39,2 Ohm

Vinklene φ og θ blir beregnet ved bruk av cosinussetningen [4.2.7.], notasjonen er gitt av Figur 4.7.

$$\varphi = \cos^{-1} \left(\frac{8,067^2 + 0,028^2 - 8,062^2}{2 \cdot 8,067 \cdot 0,028} \right) = 89,98967235^\circ$$

I og med at vinkelen er så nær 90° blir det vurdert som hensiktsmessig å utføre beregningene med mange desimaler, til tross for at dette kan medføre unøyaktighet med tanke på gjeldende siffer.

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{0,028^2 + 8,062^2 - 8,067^2}{2 \cdot 0,028 \cdot 8,062} \right) = 100,1886784^\circ$$

β blir funnet ved hjelp av trekantens geometri:

$$\beta = 180 - \theta = 79,8113216^\circ$$

Den reelle spenningen av spolen U'_{R2} blir:

$$U'_{R2} = \cos(\beta) \cdot 8,062 = 1,426089281 \text{ V}$$

Strømmen i kretsen beregnes med Ohms lov [4.1.9.]:

$$I = \frac{U'_R}{R_{shunt}} = 0,28 \text{ A}$$

Aktiv effekt på primærsiden gjennom spolen beregnes med effektformel [4.1.13.]:

$$P_{inn} = U'_{R2}I = 0,39930499868 \text{ W}$$

Aktiv effekt på sekundærsiden blir, ved bruk av samme formel, beregnet til:

$$P_{ut} = U_2I_2 = 1,269 \text{ W}$$

Dette gir systemet en virkningsgrad gitt av formel [4.1.14.]:

$$\eta = \frac{P_{ut}}{P_{inn}} = 3,18$$

8.3.6. Resultattolkning

Resultatene kan tyde på at måleutstyret ikke opererer optimalt under forhold med så stor andel reaktiv effekt. Det er svært lite sannsynlig at det går mer effekt ut av systemet enn det som blir tilført.

8.3.7. Resultatoppsummering

Det vil være hensiktsmessig å justere forsøket, for deretter å gjøre målingene om igjen. Den enkleste justeringen vil være å inkludere lampen sammen med shuntmotstanden for å måle større verdier for ohmsk motstand. En annen mulighet vil være å sette inn en kompenseringskondensator i resonans i parallell med spolen. Dette kan redusere andelen reaktiv effekt.

8.4. Oppfølgingsforsøk

Basert på de tilegnede erfaringene fra de tidligere forsøkene vil de være nødvendig å gjøre visse korrigeringer, i tillegg til en utvidelse av forsøkene for å innhente mer informasjon. Ved videre testing vil det også være lurt å foreta flere gjentak av forsøkene, og kunne gjøre statistiske beregninger og analyser av måleresultatene.

Effekttilpasning med flate spoler

Det er ønskelig å gjenta forsøkstrinnene fra kapittel 8.2 med flate spoler. Endringer som bør gjøres er å finne en regulerbar motstand som ikke er en spole, da den kan slå ut induktivt på målingene. I tillegg bør det settes inn et wattmeter på primærsiden, da det har vist seg å være vanskelig å gjøre spenningsmålinger med så stor andel reaktiv effekt. Det bør også undersøkes hvordan frekvensen påvirker systemet, og det vil trolig være hensiktsmessig å overføre større effekt enn 1 W.

Finne resonansfrekvens

Det bør finnes en spole og en kondensator som har høy Q-verdi. I tillegg bør forsøkstrinn fra kapittel 8.3 gjøres på nytt med andre måleinstrumenter, og målingene bør verifiseres ved hjelp av håndberegninger og ved å kartlegge båndbredden.

Magnetisk resonans

Et forsøk på magnetisk resonans med to spoler og to kondensatorer bør gjennomføres, og kobles som vist i Figur 4.12. Gjennomføre eksperimenter med alle fire koblingsmulighetene; SS, SP, PS og PP. Når den beste koblingssammensetningen er funnet bør ladeavstand og høyere effekt undersøkes.

Passiv spole i resonans

Gjenta de senere forsøkstrinn fra kapittel 8.3, og undersøke hva en passiv spole i resonans har å si for kretsen. Finne ut om ladeavstanden øker, eller om kretsen er like skjør for avstand som det fremkom av det orienterende forsøket. Gjenta forsøk med to passive spoler, og variere avstanden mellom alle fire men også teste to på primærsiden og to på sekundærsiden med økt avstand mellom.

Andre anbefalte forsøk

- Eksperimentere med mange-til-en-overføring og mange-til-mange-overføring med bruk av identiske spoletyper. På denne måten finne ut om det vil være hensiktsmessig å ha flere spoler i basismodulen.
- Eksperimentere med spoler med likt antall vindinger, men med ulik form. For eksempel runde og firkantede spoleprofiler.
- Eksperimentere med antall vindinger, da det vil være et antall som vil kunne øke overføringsevnen. Det vil trolig øke opp til et visst punkt før motstanden i spolematerialet vil påvirke overføringsevnen negativt.
- Undersøke om det vil gjøres noe utslag med pulserende spenning mot sinusformet spenning.

9. Robusthet, modularisering og materialer

For at produktet skal opprettholde sin funksjonalitet, er det nødvendig å kartlegge og vurdere robusthet, form og estetikk, og materialer.

9.1. Robusthet

For at ladeløsningen skal tilfredsstillende de krav og ønskede egenskaper som er definert er det essensielt at produktet blir utformet med tanke på robusthet. Både nødvendig vedlikehold, brukers sikkerhet, konstruksjonens sikkerhet og levetiden til produktet må opp til vurdering. Det er ønskelig at produktet skal trenge lite vedlikeholdsarbeid av brukeren selv, og dette må tas hensyn til når design og materialer skal velges slik at brukerens ansvar kun ligger i å holde konstruksjonen ren og kontrollere at både ledninger og ladekonstruksjon ser riktig ut ved en visuell kontroll. Alle delene i ladeløsningen må designes og lages med materialer som tåler de belastninger den gitte delen vil bli utsatt for, med tanke på styrke, innfesting og funksjoner.

I og med at ladeløsningen baserer seg på elektromagnetisk stråling vil det være spesielt hensiktsmessig å fokusere på å konsentrere feltet fra primærspolen mot sekundærspolen, både for å forhindre unødige tap og dermed øke virkningsgraden, men også av hensyn til omgivelsene. Det er fremdeles uenigheter hvorvidt elektromagnetisk stråling påvirker mennesker (93), og dette er noe som burde undersøkes nærmere. Men det er funnet ut at interferens kan oppstå og påvirke pacemakere og høreapparater (94), og det er ønskelig at personer som har disse hjelpemidlene kan oppholde seg i samme rom som ladeløsningen. Hensyn rundt feltets retning og rekkevidde må dermed fokuseres på.

9.2. Form, estetikk og modularisering

Ladeløsningens utforming baserer seg på funn fra funksjonsanalysen gjort i kapittel 7 og robusthensyn. Produktet må designes for å tåle fukt, olje, sand, støv, sollys og sammenstøt, i tillegg til at designet skal være funksjonelt. Ladeløsningens estetiske utforming kommer i andre rekke, men det er viktig å vurdere i form av produktets signalement.



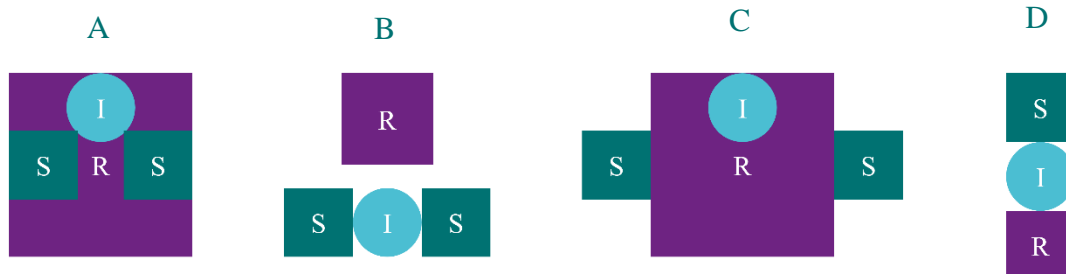
Figur 9.1: De tre grunnformene firkant, trekant og sirkel danner grunnlaget for utforming av produktet.

Det er ønskelig at produktet utformes på en måte som indikerer at det er et elektrisk produkt, i tillegg til at den estetisk skal passe inn i sine omgivelser. På denne måten vil ikke produktet utgjøre et skue i seg selv, i tillegg til at personer i nærheten av produktet vil opptre mer varsomt. Dette kan løses ved at ladekonstruksjonen består av rene flater, og farger som sort og hvitt blir ofte brukt i elektriske artikler. Ladekonstruksjonen vil dermed få et minimalistisk og tidløst design, som ikke er for fremtredende. Som nevnt i metodikkdelen av rapporten vil det bli sett nærmere på hvordan produktet bør settes sammen ved hjelp av modularisering. Produktet vil deles opp i induktor, reguleringsystem (black box) og et sett justerende spor.



Figur 9.2: R = reguleringsystem, S = justerende spor og I = induktor.

De ulike delene av produktet kan settes sammen lineært, vinkelrett, delvis integrert eller integrert, se Figur 9.3.



Figur 9.3: A. Integrert modul. B. Vinkelrett modul. C. Delvis integrert modul. D. Lineær modul.

Det er som det fremkommer av Figur 9.3 flere måter å organisere produktet. Den modulen som blir valgt for videre arbeid er Figur 9.3 B. Ved denne løsningen vil hovedelektronikken ligge på utsiden av ladekonstruksjonen og være lett tilgjengelig for nødvendig vedlikehold, det blir mer rom for flere induktorer i ladekonstruksjonen og det er færre elektroniske komponenter som vil bli utsatt for sammenstøt.

Ut ifra hva som fremkom av eksperimentering vil det medfølge en jernkjerne med induktoren. Dette vil medføre at enten primær- eller sekundærsiden av ladesystemet bør være bevegelig og kunne tilpasse seg motsatt side. Det blir ansett som enklest å utforme en bevegelig del på sekundærsiden av systemet, da denne siden kun består av en spole og ledninger. Sekundærsiden bør kunne justeres i høyderetning for å senkes ned over jernkjernen etter parkering. For å integrere sekundærløsningen i eksisterende kjøretøy vil den letteste måten være å koble ledningen direkte inn i eksisterende ladekontakt på kjøretøyet, og feste konstruksjonen på kjøretøyet underside. En mer avansert utforming vil være å legge om elektronikken i kjøretøyet. Men for små kjøretøy blir kompatible med ladeløsningen allerede fra produksjonen vil nok den letteste løsningen være å foretrekke.

9.3. Tidlig materialdrøfting

Det er ønskelig at ladeløsningen skal beherske temperaturvariasjoner mellom $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ og $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ for å være egnet under norske forhold, i tillegg til å tåle sammenstøt. Konstruksjonen vil derfor være nødt til å ha høy slagseighet i dette temperaturintervallet for å tåle de påkjenninger som den vil bli utsatt for. Ytterkonstruksjonen vil også måtte tåle fukt, olje, sand, salt, støv og sollys da dette kan forekomme i kontakt med kjøretøy og hvis ladekonstruksjonen blir montert utendørs. De utsatte delene bør derfor være korrosjonsbestandige. Ytterkonstruksjonen er sannsynligvis den største delen, og det er ønskelig at materialet ikke veier for mye da det skal være en mobil løsning. Det er også viktig at ytterkonstruksjonen ikke påvirker det magnetiske feltets bane ved koblingspunktet mellom primær- og sekundærspolen. Det er også ønskelig at

materialet brukt i ytterkonstruksjonen har høy ripemotstand, og det vil derfor være lurt å se på overflatehardhet (HB).

Sklimatten skal fungere mot underlaget for å hindre løsningen fra å flytte på seg, og materialet må derfor ha en høy friksjonskoeffisient for best mulig grep. I tillegg vil sklimatten måtte tåle fukt og olje, og være slitesterkt siden den potensielt belastes flere ganger daglig.

Spolene bør være av et materiale med høy elektrisk ledeevne, men med lav magnetisk permeabilitet. Siden kobber er det mest utbredte materialet for spoler vil det være nærliggende å tro at dette vil være et naturlig valg også for denne ladeløsningen. For at spolen skal oppnå støtte mot spiralfjærene vil det være nødvendig med en plate som fjæringen kan trykke mot. Spoleplaten bør ha dårlig elektrisk ledningsevne da den er i direkte kontakt med spolen, og det ikke bør induseres en strøm i denne platen. Som det fremkom av eksperimenteringen bør det være en fysisk kjerne mellom spolene. Kjernens viktigste egenskap er å skulle lede det magnetiske feltet fra primærspolen til sekundærspolen, og kjernen vil derfor måtte ha høy permeabilitet. Men kjernen bør også tåle støt den blir utsatt for, og den bør derfor være av et materiale med høy slagseighet. Noen kjente materialer som vil være av interesse til bruk i ulike deler av ladeløsningen er S235, Al6082, PVC, PE, PC og silikonelastomer.

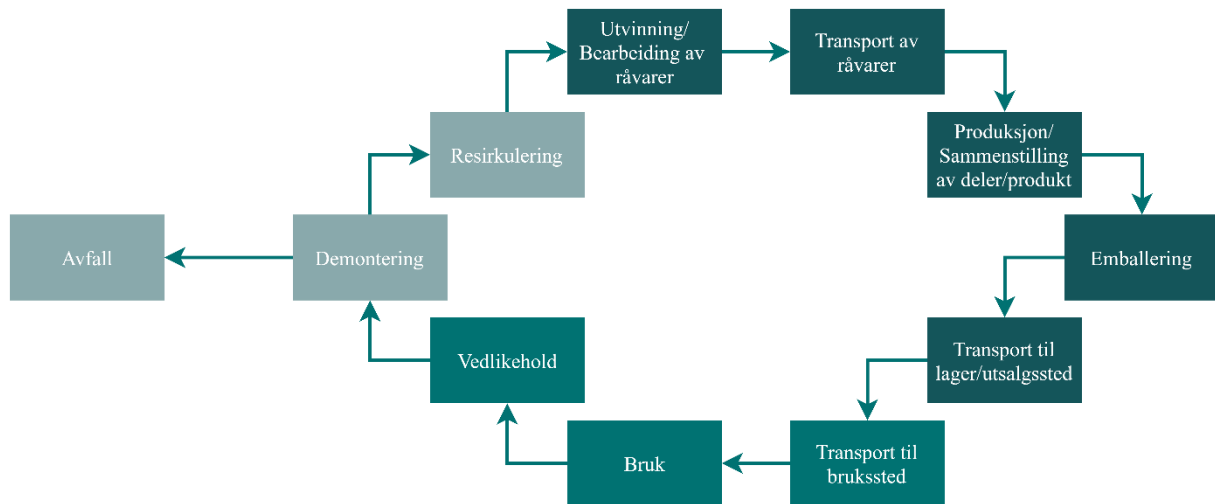
Siden dette er såpass tidlig i utviklingsprosessen vil det ikke være hensiktsmessig å bestemme hvilke materialer hver enkelt del skal ha, da ladeløsningen trolig vil endres etter hvert som mer informasjon blir innhentet. Generelt sett bør de deler av konstruksjonen som ikke skal lede strøm bør ha dårlig elektrisk ledeevne, komponentene som er i kontakt med omgivelsene bør tåle sammenstøt, være motstandsdyktig mot riper og tåle fuktighet, støv og sollys. Det kan være lurt å se på materialeegenskaper som strekkfasthet, flytegrense, overflatehardhet, E-modul, korrosjonsbestandighet, elektrisk ledeevne, magnetisk ledeevne, massetetthet og optimalt temperaturintervall.

9.4. Produktets livssyklus

Når materialer skal bestemmes for produktets komponenter er det ønskelig å undersøke hvilken påvirkning de ulike materialene har på livsløpet til produktet. Da det ikke er fremkommet et fullverdig design er det ikke hensiktsmessig å foreta en fullverdig livsløpsanalyse, men det er allikevel interessant å se nærmere hvordan forskjellige materialer slår ut på en slik analyse. Det er ønskelig at livsløpet til et produkt i størst mulig grad opptrer som en lukket sløyfe. Livssyklusen består av tre hovedfaser; produksjonsfasen, bruksfasen og endt levetid, se Figur 9.4. Livssyklusen til et produkt er illustrert ved Figur 9.5.



Figur 9.4: De ulike fasene livssyklusen til et produkt består av, med tilhørende fargekode som blir brukt i Figur 9.5.



Figur 9.5: Illustrasjon av livssyklusen til et produkt. Materialvalg for produktet påvirker flere deler av produktets syklus.

Ved hjelp av en Eco-Audit-analyse i CES Edupack kan man sammenligne ulike materials påvirkning på produktets livssyklus, med egen inputdata for mengde av hvert materiale, transportavstander, transportmiddel, hvor mye energi produktet bruker per dag, produktets forventede levetid og hvilket land produktet skal benyttes i. Dette kan gi en god indikasjon på hvordan produktet etterlater sitt CO₂-avtrykk.

10. Tidlig produktarkitektur

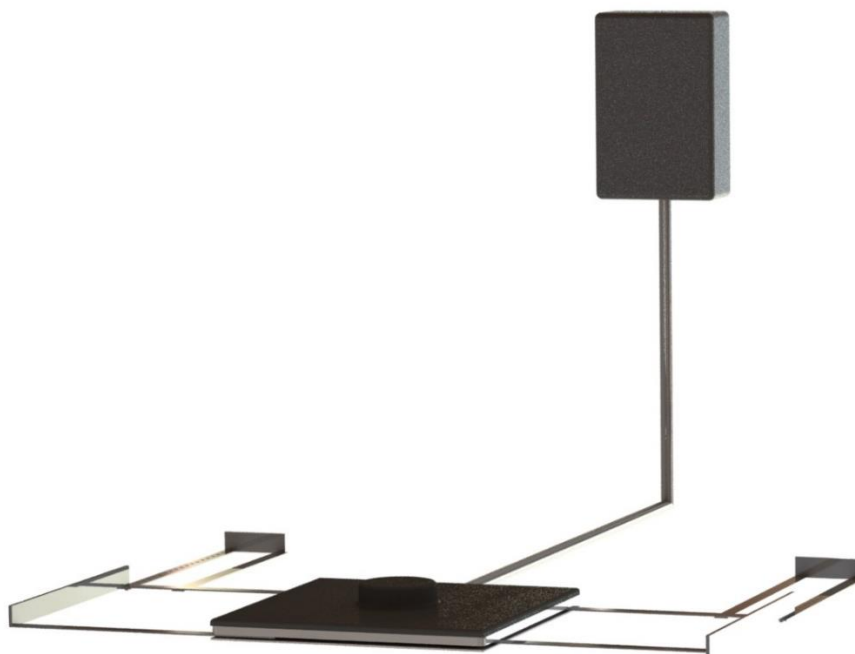
Produktarkitekturen illustrerer hvordan informasjonen innhentet i løpet av arbeidet kan bli tolket og anvendt i praksis.

10.1. Konseptdesign

Basert på de vurderingene som har funnet sted i denne oppgaven blir det fremlagt et potensielt design for primærsiden av ladesystemet. I fremstillingen er det gjort noen forenklinger, da det ikke anses som hensiktsmessig å detaljtegne ladeløsningen på et så tidlig stadium i utviklingsprosessen. Ladeløsningen er 400 mm x 400 mm x 6 mm når den er sammenslått. Ved totalt utslått kan den romme kjøretøy med hjulbredde opp til 120 mm.

10.1.1. Sammenstilling

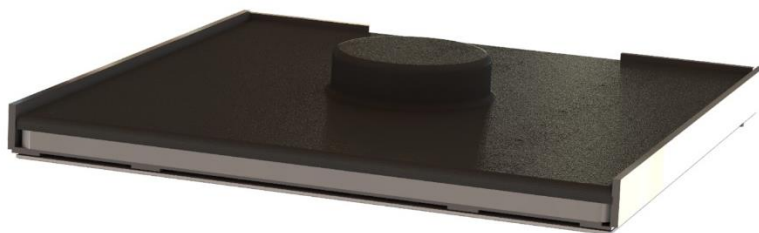
Ladeløsningen blir vist frem på forskjellige måter for å gi leseren et innblikk i hvordan den er bygd opp.



Figur 10.1: Helhetlig løsning for primærsiden. I figuren er hjulsporene slått ut slik at de største av de små kjøretøyene får plass, og kan navigere seg enkelt til ladeløsningens midtpunkt.



Figur 10.2: Nærbilde av utslått løsning.



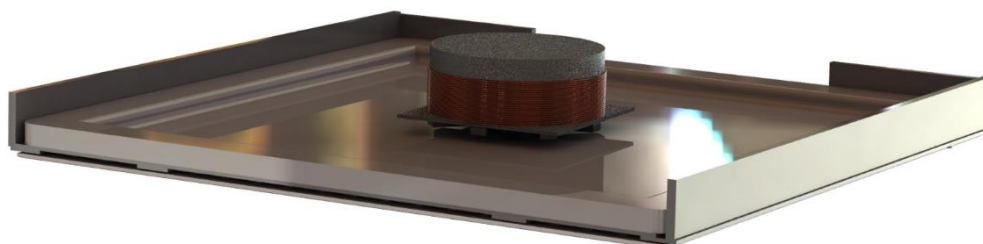
Figur 10.3: Hjulsporene kan enkelt slås sammen slik at konstruksjonen opptar mindre gulvplass.

Hjulsporene på sidene kan justeres enkelt til å tilpasses ulike kjøretøy, og på det bredeste kan de romme mopedbiler mens de minste kjøretøyene (robotgressklipper, robotstøvsuger) plasseres oppå ladekonstruksjonen. Det er blitt gjort en antakelse om at personer som benytter elsykler og elektriske sparkesykler innehar en muskelstyrke og koordinasjon som gjør de egnet til å plassere kjøretøyet slik at ladeløsningen plasseres mellom hjulene.

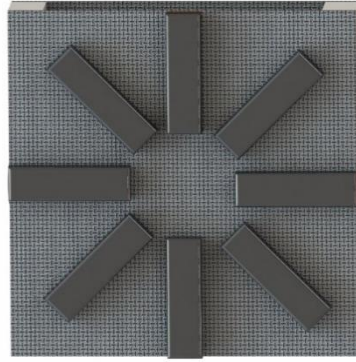


Figur 10.4: Innsiden av ladeløsningen. Det store toppunktet i konstruksjonen skyldes kjernen på spolens innside.

På innsiden av topplaten er spolen med tilhørende kjerne plassert. Dersom kjerne skal benyttes i overføringen vil det kun være rom for én spole, da kjernen må overlape med sekundærspolen for tilstrekkelig overføring. En annen mulighet vil være flere mikromoduler med hver sin kjerne som alle får plass i sekundærspolens midtpunkt, men det er ikke gjort nok eksperimentering til å fastslå om det egner seg.



Figur 10.5: Ladekonstruksjonen sett uten topplaten.

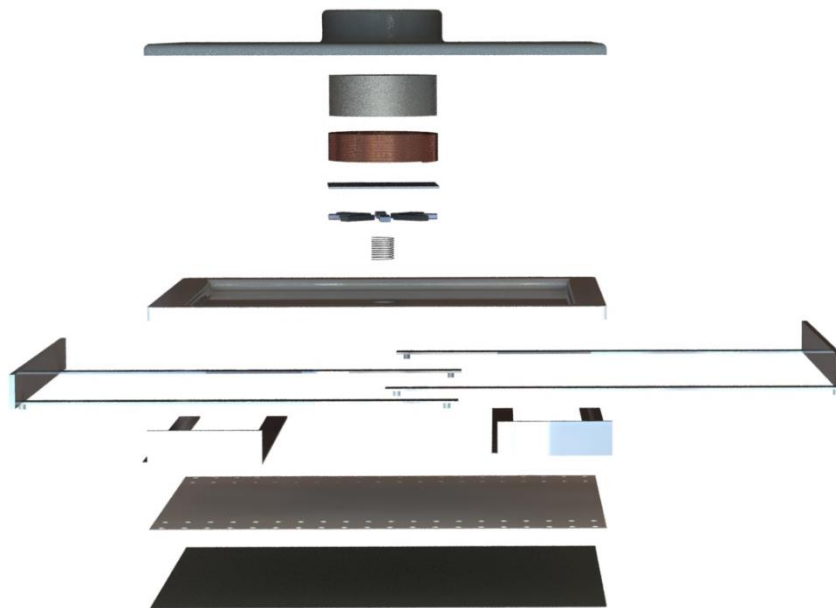


Figur 10.6: Spolen er festet til en plate, og ferrittklosser er montert på platens underside.

Av dekomponeringen fremkom det at å utforme ferrittklosser kunne gjøre samme tilnærmet samme nytte som heldekkende ferritt, og det er valgt å adaptere denne funksjonsløsningen til den utviklede ladeløsningen for små kjøretøy.

10.1.2. Design av komponenter

Hovedelementene som er designet for denne ladeløsningen er topplate, jernkjerne, spole, plate, ferrittklosser, bunnplate, hjulspor til langside, hjulspor til kortside, sammenkoblingsplate og sklimatte. Det vil også bli benyttet innkjøpte deler blant øvrig elektronikk i elektronikkboksen, ledninger, støpsel, spiralfjærer og skruer.



Figur 10.7: Den utformede ladeløsningen er sammensatt av flere komponenter.

De ulike komponentene vil vises nærmere i de påfølgende avsnitt.

Topplate



Figur 10.8: Uthulet topplate med rom for spole og jernkjerne.

Topplaten er utformet for å romme spolen med tilhørende jernkjerne. Den er lagd relativt tynn for å påvirke feltet i minst mulig grad. Topplaten festes til bunnplaten, og sammen utgjør de hele den utvendige konstruksjonen.

Jernkjerne



Figur 10.9: Jernkjernen er kompakt og skal knytte sammen spolene i primær- og sekundærsiden.

Jernkjernen er utformet til å dekke hele spolens indre rom. Den er massiv utformet for å maksimere overføringen mellom primær- og sekundærspolen.

Spole



Figur 10.10: Prinsipielt designet spole til bruk i ladeløsningen.

Med utgangspunkt i eksperimentet som gav en virkningsgrad på litt over 60 % er det prinsipielt utformet en spole til bruk i systemet. Da eksperimenteringen kun ble gjort med 1 W er det usikkert hvor stor spolen bør være for å overføre større effekt, men det vil være en heliksspole for størst mulig arealoverlapp med jernkjernen.

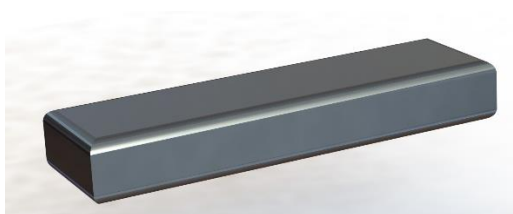
Plate



Figur 10.11: Tynne plater forenkler sammenkobling av ulike deler.

Det er utformet tynne plater som spoler og ferrittklosser kan festes til, i tillegg til å støtte systemet mot spiralfjæringen.

Ferritt



Figur 10.12: Åtte ferrittklosser er festet til platen under spolen, og utgjør en sirkelformasjon.

Det er på bakgrunn av eksperimenteringen antatt at ferrittklossene fører til en kortslutning og hjelper feltet til å ta kortest mulig vei tilbake til sekundærspolen.

Bunnplate



Figur 10.13: Bunnplaten til systemet holder spolen, med sammenhørende komponenter, på plass.

Bunnplaten utgjør sammen med topplaten systemets ytterkonstruksjon. Den er utformet til å romme spolen og kjernen med tilhørende komponenter. I tillegg skal bunnplaten monteres til sammenkoblingsplaten for å romme plass til hjulsporene i underkant.

Hjulspor til langside



Figur 10.14: Hjulsporene består av tynne skiver som skyves ut av hovedkonstruksjonen som en skuff. De holder seg i nøyaktig posisjon ved hjelp av en "knott" som kan dyttes inn og festes i hullene i sammenkoblingsplaten.

Hjulsporene til langsiden fungerer som en skuff man trekker ut av ladekonstruksjonen, og angir siktet som kjøretøyet parkeres etter. Ved hjelp av små «knotter» kan lengden justeres og tilpasses det enkelte kjøretøy. Hjulsporene på den ene siden har samme bredde som ladekonstruksjonen, mens den andre siden har spor på innsiden.

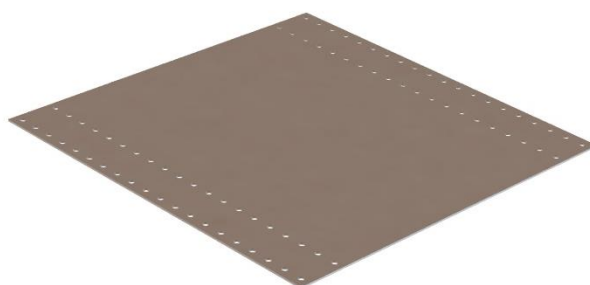
Hjulspor til kortside



Figur 10.15: Hjulsporene som indikerer stoppunktet for kjøretøyet festes til langsidesporene med festemekanisme som mellom langsidesporene og sammenkoblingsplaten.

Hjulsporene til kortsiden er festet til langsidesporene. De justeres med samme «knott-system», og indikerer når kjøretøyet skal stoppe. Hjulsporene på hver side har hull i ytterkant.

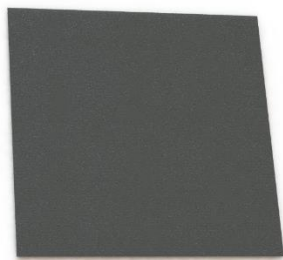
Sammenkoblingsplate



Figur 10.16: Platen inneholder festespor til langsidesporene.

Hjulsporene til langsiden festes «knottene» til sammenkoblingsplaten. I tillegg er sammenkoblingsplaten festet til ladekonstruksjonens bunnplate.

Sklimate



Figur 10.17: En sklimate monteres på ladeløsningens underside.

Under sammenkoblingsplaten festes en sklimate for å hindre konstruksjonen fra å bevege seg ved sammenstøt.

10.2. Visjonsbasert produktarkitektur

En visjon for ladeløsningens design er å gjøre den mer brukervennlig. Som det fremkom av egenscreeningen som ble foretatt under konseptutredningen er det ønskelig å basere løsningen på bruk av luftkjerne. For at dette skal la seg gjøre må det eksperimenteres mer for å finne en kobling som gir en akseptabel virkningsgrad over større avstander. Dette vil gjøre ladeløsningen mer anvendelig for flere typer kjøretøy med ulik bakkeklaring, og mindre følsom for skjev-parkeringer.

10.2.1. Sammenstilling

Det er utformet et designalternativ for en fremtidig løsning som har en stilren utforming, men som fremdeles inneholder de nødvendige funksjonene. Fremstillingene som følger i dette kapitlet viser konstruksjonen med én modul, altså bestående av én spole. Men i konstruksjonen er det avsatt plass til å legge inn flere spoler for opplading av kjøretøy som krever en høyere effekt.



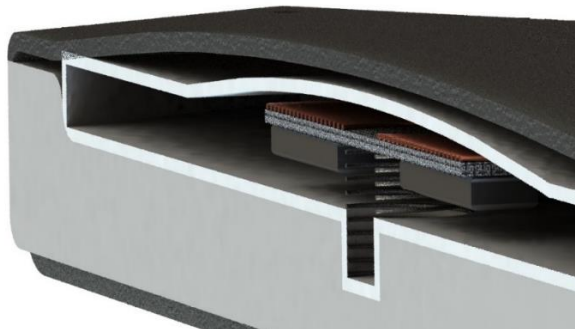
Figur 10.18: Ladeløsningen med spole plassert på gulvet, og øvrig elektronikk er representert med en veggmontert black box.



Figur 10.19: Spolekonstruksjon sett skrått fra siden. Den avrundede toppen indikerer hvor kjøretøyet bør sikte for optimal overføring.

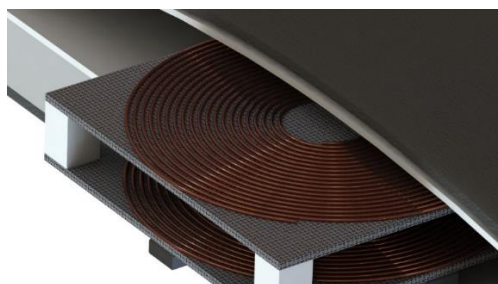


Figur 10.20: På konstruksjonens underside er det festet en sklimatte som skal sikre at konstruksjonen holdes på plass for sikkert bruk, samtidig det er et enkelt og rimelig element som gjør ladeløsningen mobil.

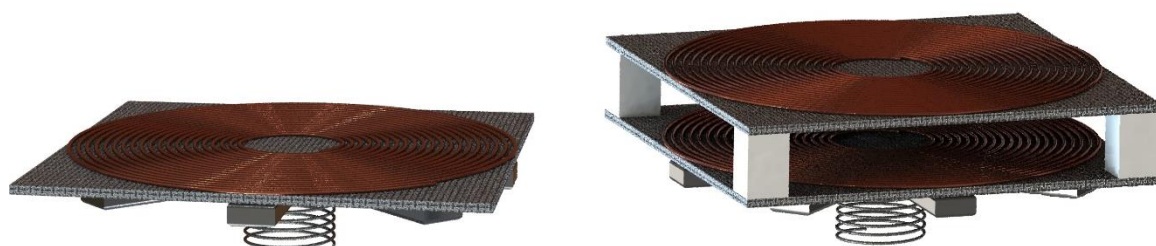


Figur 10.21: Illustrasjonen viser hvordan komponentene er sammensatt på innsiden av konstruksjonen. Mellom topp- og bunnplaten er det et heldekkende silikonbelegg som beskytter spolene.

Det er fremdeles usikkert hvordan elektronikken i ladeløsningen kommer til å utformes. Det er derfor utformet to mulige løsninger for hvordan modulene kommer til å være. De ulike forslagene er presentert i Figur 10.23 A og B.



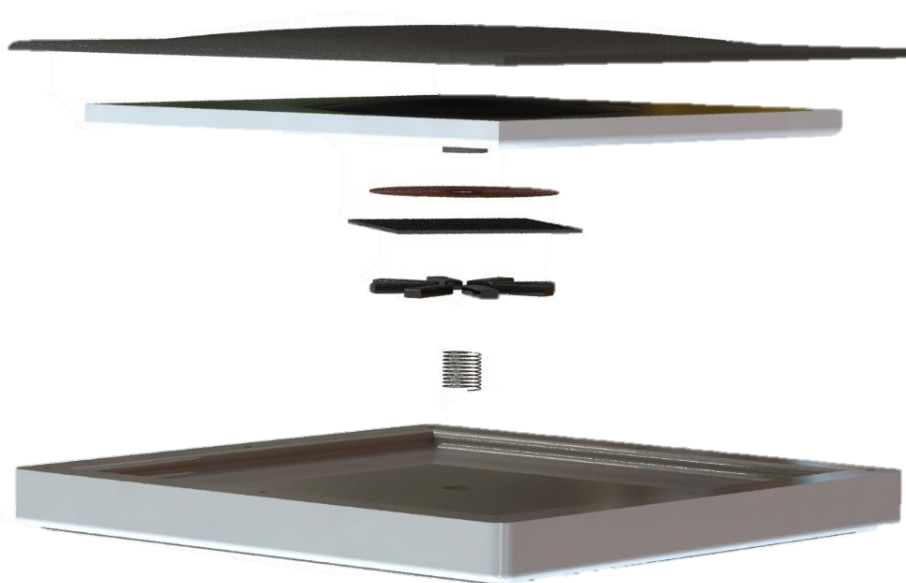
Figur 10.22: Det er en mulighet at en modul består av en aktiv og en passiv spole plassert ovenfor hverandre.



Figur 10.23: A. Modul bestående av én spole. B. Modul bestående av to spoler ovenfor hverandre, festet sammen av fire plastklosser montert til platene.

10.2.2. Design av komponenter

Hovedelementene som er designet for denne ladeløsningen er topplaten, bunnplaten, silikondekselet, sklimatte, spoler, ferrittklosser, plater under spolene samt plastklosser. De innkjøpte delene vil være de samme som for hovedløsningen vist i forrige delkapittel. Plate under spole, ferritt og sklimatte vil være identiske med foregående løsning.



Figur 10.24: Ladeløsningen er sammensatt av flere komponenter.

De ulike komponentene vil vises nærmere i de påfølgende avsnitt.

Topplate

Topplaten er utformet med en buet topp for å indikere midtpunktet på løsningen, hvor det er antatt størst ladningseffekt grunnet spoleplassering. Langs sidekantene er det skruehull for å få festet topplaten til bunnplaten. Topplaten kan brukes til ladeløsningen uavhengig av hvor mange moduler den skal romme.



Figur 10.25: Topplaten til ladeløsningen.

Bunnplate

Ladeløsningens bunnplate er utformet med en tykk kant rundt, hvor festehullene befinner seg. Den har også et hull skjært ut til plassering av spiralfæringen. Bunnplaten er romslig utformet slik at den kan romme flere moduler. Det er ønskelig at bunnplaten utformes slik at den kan benyttes til ladeløsningen uavhengig av hvor mange moduler den skal inneholde. Den bør derfor ha like mange hull som den bør behøve til et maksimalt antall spoler. En forenkling i den grafiske fremstillingen er derfor at den er utformet til kun én modul.



Figur 10.26: Ladeløsningens bunnplate.

Bunnplaten for visjonsløsningen er lagd tykkere enn det opprinnelige designet. Det er for at spolene skal ligge høyere, og sikre bedre sammenkobling med sekundærsiden.

Silikondeksel

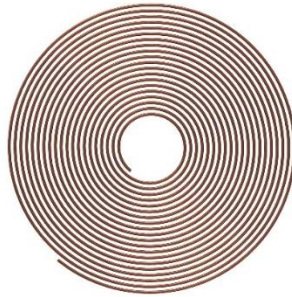
Silikondekselet har samme form som topp- og bunnplaten har når de er satt sammen, bare den er liten nok til å plasseres inni. Silikondekselet beskytter spolene, og eventuelt annen elektronikk, fra vann, fukt o.l.



Figur 10.27: Silikondekselet rommer elektronikken, og befinner seg på innsiden av topp- og bunnplaten.

Spole

Spolene som er benyttet i fremstillingen er prinsipielt designet. For å bestemme spolenes fullstendige design, antall i modul samt sammenkobling er det nødt til å eksperimenteres mer, ref. kapittel 8.



Figur 10.28: Spolen befinner seg i ladekonstruksjonen på gulvet, mens øvrig elektronikk befinner seg i elektronikkboksen på veggen.

Plastklosser

Dersom spolene skal bygges ovenfor hverandre er det designet plastklosser som passer på platen under spolene, som ikke påvirker magnetfeltet.



Figur 10.29: Plastklossene kan holde spolene adskilt dersom det er nødvendig.

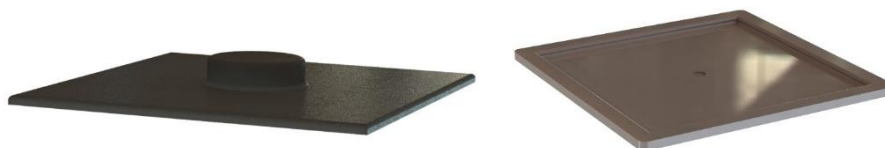
11. Produksjon og økonomi

Denne delen av rapporten vil konsentrere seg rundt mulig produksjonsmetoder og grove beregninger av utviklingskostnader, for å gi et innblikk hvor kostbart en utviklingsprosess er.

Grov oversikt over produksjonsmetoder

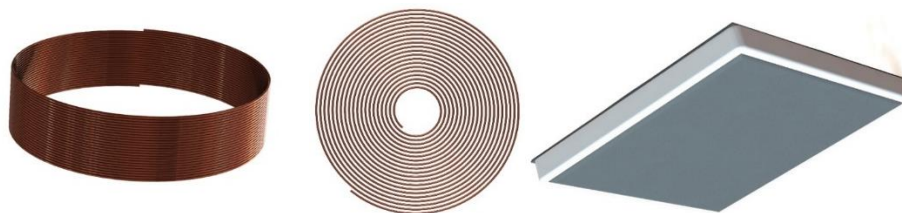
Det er fremdeles et tidlig stadium i konseptutviklingsprosessen, og mye kan ennå skje med design og materialvalg. Det er derfor vanskelig å forutse hvilke produksjonsmetoder som er best egnet for de ulike komponentene med tilhørende materialer, da ulike behandlingsprosesser vil være best egnet. Det er ønskelig at ladekonstruksjonen skal være så enkel som mulig å utforme, og at flest mulig deler skal basere seg på standardprofiler hvis mulig.

Når det skal lages en prototype av ladekonstruksjonen vil NMBUs verksted ha en sentral rolle, og stå for utvikling av hver komponent og sammenstille produktet. De ansattes kompetanse vil bli dratt nytte av, og produksjonsmetoder for prototypen vil bli bestemt i samråd med dem ettersom design og materialer er valgt.



Figur 11.1: Det vil trolig være hensiktsmessig å støpe flere av delene produktet består av.

Ved stort produksjonsvolum vil det være nødvendig å se på muligheten for å støpe både topp- og bunnplate. Støpeformer er en stor utgiftspost, og man bør derfor ikke gå til innkjøp av dette før produktarkitekturen er bestemt. Støpning egner seg godt for serieproduksjon, da enhetskostnadene vil synke for hver produsert enhet. I tillegg kan støpning benyttes til komplekse geometriske utforminger, så de planlagte delene bør gå fint å støpe. Når det gjelder jernkjerne, ferrittklosser og plater for sammenkobling av spoler og ferritt vil det gjøres lurt i å se hva som eksisterer på markedet, og kutte til nødvendige dimensjoner. Eventuelt kan jernkjernen dreies utvendig. Spoler og sklimatte bør spesialbestilles fra egnede leverandører.



Figur 11.2: Flere produsenter er spesialisert i produksjon av spoler og sklimatter, og vil trolig være gunstig å inngå et leverandørsamarbeid med på sikt.

Regnskap for utviklingsarbeidet

Det er tidkrevende å drive med konsept- og produktutvikling, og denne tiden utgjør en stor kostnad for ferdig produkt, se Tabell 11.1. Ved utvikling av prototype vil utviklingskostnadene

kun tillegges prototypen, i tillegg i material- og produksjonskostnader og innkjøpte komponenter. Når produktet skal serieproduseres fordeles kostnadene fra konseptutvikling og prototypeutvikling på alle produserte enheter, i tillegg vil faste enhetskostnader tillegges for hvert produkt.

Tabell 11.1: Kostnadskalkyle for utviklingsarbeidet for ladekonseptet.

Hva	Timer	Antall	Pris (NOK)	Sum (NOK)
Delsum konseptutvikling, forprosjekt TIP300	704	-	550	387 200
Konseptutvikling				
Forundersøkelser	319	-	550	175 450
Dekomponering	24	-	550	13 200
Koketopp	-	1	290	290
Qi-lader	-	1	199	199
Elektrisk tannbørste	-	1	100	100
Konseptutredning	122	-	550	72 600
Eksperimentering	91	-	550	44 550
Utforming og design	102	-	550	56 100
Teknisk tegning og 3D-fremstilling	64	-	550	35 200
Rapportering	205	-	550	112 750
Delsum konseptutvikling	927	-	-	510 439
Total sum konseptutvikling	-	-	-	897 639

Det fremkommer av Tabell 11.1 at de totale konseptutviklingskostnadene ligger på tilnærmet 900 000 NOK. Denne kostnaden vil øke i takt med mer utvikling av konseptet. Det er ikke angitt et kostnadsestimat for prototype eller serieproduksjon, siden dette ikke er mulig da løsningene vil utvikles og endres ved videre arbeid. Men før videre eksperimentering kan finne sted vil det være nødvendig å kjøpe inn et nytt wattmeter eller to for å forenkle videre systemtesting, se Tabell 11.2.

Tabell 11.2: Egnede wattmeter for videre eksperimentering.

Egnede wattmeter (modell)	Frekvensområde	Pris (NOK)
Power meter 5335 B (98)	0,5 Hz – 100 kHz	22 000* (99)

* Utreknet med valutakalkulator, ikke tatt høyde for eventuell toll.

Det er ikke gjort grundige undersøkelser på hvilket wattmeter som er best egnet, og heller ikke undersøkt nærmere om et lignende wattmeter er å oppdrive hos norske leverandører selv om dette ville være å foretrekke. Men ut fra databladet på det oppgitte wattmeteret i Tabell 11.2 kan det se ut til at dette wattmeteret har et arbeidsområde som vil stemme overens med videre eksperimentering.

12. Prosessevaluering og diskusjon

I denne delen av rapporten vil utviklingsprosessen evalueres og diskuteres for å ta lærdom av de tilegnede erfaringene fra arbeidet.

Tidlig i arbeidsprosessen ble det utviklet en arbeidsplan med milepæler som skulle sørge for nødvendig fremgang i arbeidet. For å overholde arbeidsplanen ble det i tråd med IPD og målrettet prosjektstyring planlagt gjennomføring av jevnlig egenering med innsetting av tiltak ved behov. Dette fungerte godt i teorien, men ikke like godt i praksis. Da det oppstod utfordringer tidlig i prosessen ble ønsket om å finne ut løsninger selv ansett som veien å gå. Det viste seg derimot senere at både veileder og andre fagpersoner ved NMBU kunne kommet med innspill som ville løst utfordringene raskere. Dessverre gikk verdifull tid i starten av prosessen tapt på grunn av dette, og arbeidsplanen ble dermed ikke overholdt som planlagt.

Valg av metodikk for oppgaven baserte seg på tidligere anvendt metodikk fra produktutviklingsrettede prosjektoppgaver i løpet av studiet og ingeniørfaglig metodegrunnlag. En utfordring ved metodikken har vært å knytte de ulike metodene sammen på en naturlig måte. Ønsket har vært at metodene skulle utfylle hverandre, og på den måten eliminere svakheter ved hver enkelt metode. Men det har vært utfordrende å tenke tverrfaglig ved alle trinn i prosessen, og dette har ført til flere iterasjoner av tidligere steg (jf. prosessdiagrammet).

Kommersialisering av induksjonslading er forholdsvis nytt, og det var derfor utfordrende å finne oppdatert stoff. Informasjonsinnhenting og teori- og teknologiutredning ble derfor basert på fagbøker om grunnleggende fysisk teori og elektroteknikk, og mer spesialisert informasjon ble hentet fra diverse fagfelleverderte forskningsartikler. Informasjonsinnhenting ville vært en enklere prosess med oppdatert og objektiv faglitteratur direkte knyttet mot induksjonslading. Det å basere seg på noen få forskningsartikler er egentlig et tynt grunnlag for å angi det som teori, men det som fremkommer av utredningen er kryssjekket og informasjonen nevnes flere steder. Andre utfordringer knyttet til informasjonsinnhenting er å finne ut om artikkelforfatterne har økonomiske interesser eller andre ugunstige motiver bak publikasjonene, og hvor anerkjente tidsskriftene publikasjonene har funnet sted i er. Det er i denne sammenhengen valgt å stole på fagfelleverdinger der det fremgår henvisning til en forskningsartikkel.

I arbeidet med konseptgenerering kan det i ettertid vurderes om det ble lagt for mye fokus og vekt på de funksjonene og funksjonsløsningene som fremkom av dekomponeringen. Rapporten bærer av den grunn større preg av adaptering enn selvgenerering. Ved å innhente informasjon fra flere kanaler kunne flere løsningsalternativer potensielt blitt generert, og dette kunne ført til en bredere vurdering med optimaliserte løsninger. Fokuset rettet seg tidlig mot induktiv kobling og magnetisk resonans basert på transformatorprinsippet. Andre trådløse ladesystemer med relevans er radiobølger og kapasitiv kobling, noe som ikke ble sett nærmere på i denne oppgaven. Det burde også blitt undersøkt om generatorprinsippet lar seg anvende til trådløs opplading, noe som ville vært interessant å finne ut av siden det meste av informasjon omhandler induktiv kobling og magnetisk resonanskobling.

Det er mange usikkerheter knyttet til eksperimentene som ble gjennomført. Blant annet er det ikke mulig å ha fullstendig kontroll på alle variabler når forsøkene blir gjennomført på en forsøksbenk på en lab. I tillegg skulle alle manualene til måleinstrumentene blitt gjennomgått

før forsøksstart, da det på et senere tidspunkt fremkom at måleinstrumentene ikke var egnet til arbeidet de ble satt til. Skulle denne besvarelsen blitt gjort om igjen ville forsøkene blitt planlagt ned til minste detalj før forsøksoppstart tidlig i prosessen, alt utstyr skulle blitt sjekket opp, og det ville blitt lagt en plan for hvilke forsøk som skulle gjennomføres og i hvilken rekkefølge. På denne måten kunne det blitt spart inn tid, problemene som oppstod ville blitt avdekket på et tidligere stadium, og det kunne blitt bedre sammenheng mellom eksperimentering og teoriutredning.

Designprosessen ble gjennomført på bakgrunn av informasjon som fremkom av grovspesifiseringen, konseptgenereringen som resulterte i egenscreening, og eksperimenteringen. Da det ikke fremkom nok informasjon til å lage et komplett designforslag ble det vurdert som lite hensiktsmessig å detaljtegne konstruksjonen, og dermed ble både ledninger og skruer sett bort ifra. Det er ønskelig at det utvikles en løsning som gir mer frihet for brukeren enn det eksperimentene gjort i denne oppgaven kom frem til, og det ble derfor valgt å modellere et visjonsdesign. Ideelt sett ville fullverdig ladeløsning med all elektronikk inkludert blitt modellert, før simuleringer og FEM-analyser burde blitt gjennomført. Dette kunne gitt verdifull informasjon til utviklingsprosessen, og kunne til en viss grad kompensert for manglende måleutstyr.

Iterasjonssyklusene som fremkom av prosesstrinnene i Figur 3.6 ble forsøkt fulgt når det fremkom ny informasjon ved senere trinn. Men som tidligere nevnt ble arbeidsplanen litt forskjøvet i tid, noe som gav følgefeil i form av lite tid til å gjennomgå tidligere trinn på en tilfredsstillende måte. Flere iterasjoner ville styrket utviklingsarbeidet ved at flere løsninger ville blitt utredet, men tidsbegrensningen for oppgaven ble et hinder.

13. Konklusjon

Gjennom gradsarbeidet er det gjort en utredning av eksisterende induksjonssystemer gjennom dekomponering og litteraturstudium av enkelte systemer, og planlagt og gjennomført enkle laboratorieforsøk som tilrettelegger for videre utviklingstrinn. Videre er det lagt frem et videreutviklet konseptdesign for en bredere anvendelse.

13.1. Resultater og anbefalinger

Følgende resultater er fremkommet av gradsarbeidet:

- Dimensjonene til ladekonstruksjonen er 400 mm x 400 mm x 6 mm.
- Ladekonstruksjonen kan tilpasses flere typer små kjøretøy.
- Ladesystemet er modulbasert, og kan skaleres opp ved bruk av flere induktorer. På den måten kan systemet elektrisk tilpasses ulike kjøretøy.
- Det er blitt utført tidlig systemtesting, samt fremlagt forslag for oppfølgingsforsøk.
- Det har blitt fremlagt et designforslag basert på informasjonen som er innhentet gjennom gradsarbeidet.
- Det har blitt fremlagt et visjonsbasert designforslag det anses som mer hensiktsmessig å jobbe mot i videre utvikling.
- Kostnadene knyttet til konseptutviklingen, inkludert forprosjektet, er beregnet til 897 639 NOK.

Visse elementer er ikke blitt like mye vektlagt så tidlig i konseptutviklingsprosessen, og det arbeidet som gjenstår krever mer eksperimentering. Det er derfor mangler blant tekniske spesifikasjoner. På bakgrunn av de erfaringer som er tilegnet vil det anbefales å kjøpe inn nødvendig måleutstyr med arbeidsområde innenfor ønskede forsøksbetingelser og gjennomføre de oppfølgingsforsøkene som er blitt redegjort i rapporten, samt kartlegge om det er noen helserisiko knyttet til elektromagnetisk stråling.

13.2. Anbefalinger og videre arbeid

Det anbefales å foreta ytterligere undersøkelse og eksperimenteringer på konseptet:

- Undersøke om enten spolen, ytterkonstruksjonen eller andre elementer kan påvirke feltets retning. Det er ønskelig å få konsentrert feltet for at avstanden mellom primær- og sekundærsiden kan økes uten at det gir for mye tap.
- Utvikle en sekundærside av systemet. Både med tanke på mottakerspole, øvrig elektronikk og utforming for å kunne ettermonteres på eksisterende kjøretøy.
- Datasimuleringer og FEM-analyser av hele ladesystemet. På denne måten kan man snevre inn antall og omfang av eksperimentene, og få svar på mer med bruk av mindre ressurser. Kan på bakgrunn av datasimuleringene bestemme hvilke eksperimenter det bør avsettes tid og penger til å gjennomføre praktisk.
- I dette mastergradsarbeidet ble det kun undersøkt muligheter ved å benytte transformatorprinsippet, å splitte en transformator i to og ha den ene delen i ladekonstruksjonen og den andre i ønsket kjøretøy. Det burde bli undersøkt om generatorprinsippet kan anvendes, og hva dette eventuelt vil si for virkningsgraden og funksjonaliteten med en roterende del i systemet.

- Grundig patentsøk, både for å innhente mer informasjon om eksisterende løsninger og for å vite hvilke konsepter som er beskyttet og dermed må unngås.
- Etter at ladesystemet med høyest virkningsgrad er utprøvd bør systemets kapasitet avdekkes, samt bestemme størrelse på spolene og standardkomponenter for å oppnå tilstrekkelig overført effekt. Undersøke om standardkomponentene kan kjøpes inn som de er, eller om de må spesialbestilles eller egenproduseres.
- Omfattende markedsundersøkelse for å kartlegge kundenes behov, både eksplisitte og skjulte, og for å få en bedre forståelse av hvem kunden er og på den måten tilpasse ladesystemet og -konstruksjonen.
- Ny vurdering av produktarkitektur opp mot funn i resultatene fra de nye eksperimentene, samt med faktiske dimensjoner på alle elektriske komponenter. I tillegg bør det bli foretatt materialvalg og vurderinger av egnede produksjonsmetoder.

14. Litteratur og referanser

Litteratur og referanser brukt i arbeidet med gradsoppgaven.

14.1. Skriftlige kilder

2. Parker, S. *Elektrisitet*. Oslo : N. W. DAMM & SØN AS, 2001. s. 64.
3. Bøe, J. K. *Teknisk innovasjon og nyskaping: Fra vismenn og oppdagere til idéutvikling og prosjektplanlegging*. Ås : Universitetet for miljø- og biovitenskap, 2012. s. 267.
7. Challoner, J. *Energi*. Oslo : N. W. DAMM & SØN AS, 2001. s. 64.
8. Thomassen, K. *Rapport nr. 3: Elektrisitet og magnetisme*. Tromsø : Universitetets kompetansesenter for lærerutdanning og etter- og videreutdanning (UNIKOM), 2000. s. 261.
12. Vangsnes, S., Venås, H., Fosbæk, F. *Elektroteknikk i praksis*. Oslo : Elforlaget, 2000. s. 261.
15. Treffers, M. *History, Current Status and Future of the Wireless Power Consortium and the Qi Interface Specification*. New York : IEEE Circuits and Systems Magazine, 2015. s. 4.
16. Johansen, Ø. K. *Energi: Livets fundament og sivilisasjonens grunnlag*. Oslo : Kagge Forlag AS, 2010. s. 272.
18. Nord, K. T., Tvedt, B. *Energikilder*. Oslo : Gyldendal Norsk Forlag AS, 2001. s. 89.
19. Kim, J., Son, H.-c., Kim, D.-h., Park, Y.-j. *Optimal design of a wireless power transfer system with multiple self-resonators for an LED TV*. Madrid : IEEE (IEEE Transactions on Consumer Electronics), 2012. s. 6.
23. Iannuzzi, D., Rubino, L., Di Noia, L. P., Rubino, G., Marino, P. *Resonant inductive power transfer for an E-bike charging station*. Amsterdam : Elsevier (Electric Power Systems Research), 2016. s. 12.
32. Bjerke, M., Hatfield, M., Hemma, M., Frydenberg, H. *ChargePod SB: Forretningsplan 2015*. Ås : NMBU, 2015. s. 26.
33. Bjerke, M., Kjetså, J. L. *EasyCharging*. Ås : NMBU, 2018. s. 93.
36. Magrab, E. B., Gupta, S. K., McCluskey, F. P., Sandborn, P. A. *Integrated Product and Process Design and Development: The Product Realization Process, Second Edition*. New York : CRC Press, 2009. s. 304.
37. Andreasen, M. M., Hein, L. *Integrert produktutvikling*. Oslo : Universitetsforlaget, 1986. s. 213.
38. Bøe, J. K. *Industriell økologi og produktplanlegging*. Ås : NMBU, 2018. s. 32.
39. Andersen, E. S., Grude, K. V., Haug, T. *Målrettet prosjektstyring*. Bekkestua : NKI Forlaget, 2012. s. 265.
40. Pugh, S. *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Boston : Addison-Wesley, 1990. s. 278.
41. Osborn, A. F. *Applied Imagination: Principles and Procedures of Creative Thinking*. New York : Scribner, 1953. s. 317.

42. Baxter, M. *Product Design: Practical methods for the systematic development of new products*. Florida : CRC Press, 1995. s. 308.
44. Gieck, K., Gieck, R. *Engineering Formulas*. Pennsylvania : McGraw-Hill Education, 2006. s. 580.
45. Johannessen, J. *Tekniske tabeller*. Oslo : Cappelen, 2007. s. 158.
62. Tipler, P. A., Mosca, G. *Physics: For Scientists and Engineers*. New York : W. H. Freeman and Company, 2008. s. 1172.
63. Grimenes, A. A., Jerstad, P., Sletbak, B. *Grunnleggende fysikk for universitet og høgskole*. Oslo : Cappelen Damm AS, 2011. s. 760.
65. Wildi, T. *Electrical Machines, Drivers, and Power Systems*. New Jersey : Prentice Hall, 2006. s. 934.
66. Haug, R. *Elektroniske systemer for teknisk fagskole*. Oslo : Yrkeslitteratur as, 2012. s. 157.
68. Darmawan, T. *Magnetic Resonance and Magnetic Induction*. New Jersey : The Wireless Power Consortium, 2017. s. 6.
69. Lindem, T., Spildrejorde, K. Ø., Elvegård, M. *Vi måler på LC-resonanskretser, serie og parallell. Båndbredde (BW) og Q-faktor*. Oslo : Universitetet i Oslo, 2014. s. 9.
82. Limtun, S. L., Sjøvold, T. *Innføring i elektronikk*. Oslo : Hjerteforum : organ for Norsk cardiologisk selskap, 2014. s. 10.
97. Johannessen, A., Christoffersen, L., Tufte, P. A. *Forskningsmetode for økonomisk-administrative fag*. Oslo : Abstrakt Forlag, 2011. s. 490.
98. Machura, P., Li, Q. *A critical review on wireless charging for electric vehicles*. Amsterdam : Elsevier (Renewable and Sustainable Energy Reviews), 2019. s. 25.
105. Bøe, J. K. *Konsept- og produktrealisering: Materialer, fysiske og bruksmessige egenskaper*. Ås : Institutt for matematiske realfag og teknologi, NMBU, 2018. s. 38.

14.2. Nettkilder

1. Statens vegvesen. *Klimagassutslipp fra vegtrafikk*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.vegvesen.no>.
4. O'Grady, P. Internet Encyclopedia of Philosophy. *Thales of Miletus*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.iep.utm.edu>.
5. Raade, G. Store norske leksikon. *Rav*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
6. The Famous People. *William Gilbert Biography*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.thefamouspeople.com>.
9. Wikipedia. *Hans Christian Ørsted*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://no.wikipedia.org>.
10. Wikipedia. *Transformator*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://no.wikipedia.org>.
11. Wikipedia. *Michael Faraday*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://no.wikipedia.org>.

13. The Royal Institution: Science Lives Here. *Michael Faraday's Magnetic Laboratory*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.rigb.org>.
14. Wikipedia. *Wardencllyffe Tower*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://en.wikipedia.org>.
17. Vinjar, A., Hofstad, K. Store norske leksikon. *Vannkraft*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
20. Smedsrud, A. B. Tek.no. *Samsung vil kutte alle kabler fra TV-en*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.tek.no>.
21. Olsen, S. J. Tek.no. *Dells nye laptop har en funksjon ingen andre har*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.tek.no>.
22. Wireless Power Consortium. *Qi - Mobile Computing*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.wirelesspowerconsortium.com>.
24. WiTricity. *Automotive*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <http://witricity.com>.
25. Green Car Reports. *Electric Cars Sans Cords: Nissan Readyng Power Inductive Charging*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.greencarreports.com>.
26. BMW BLOG. *DRIVEN: BMW i8 Safety Car*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.bmwblog.com>.
27. Teknisk Ukeblad Media AS. *De lader ferge med 1,2 megawatt effekt - uten fysisk kontakt med fartøyet*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.tu.no>.
28. electrive.com - industry service for electric mobility. *Inductive 200 kW charging system for buses ready*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.electrive.com>.
29. Momentum Dynamics. *Momentum Wireless Power*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.momentumdynamics.com>.
30. Olsen, S. J., Plikk, N. Tek.no. *Bygger verdens første trådløse hurtigladdere for eltaxier - i Oslo*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.tek.no>.
31. WPC - Wireless Power & Communication AS. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.]
34. Store norske leksikon. *Akronym*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
35. Cappelen Damm: Entreprenørskap og bedriftsutvikling 1. *Mål og visjoner*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://merkur3.cappelendamm.no>.
43. Draw. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.draw.io>.
46. Standard Norge. *CE-merking*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.standard.no>.
47. Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap. *CE-merking*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.dsb.no>.
48. Lovdata. *Lov om tilsyn med elektriske anlegg og elektrisk utstyr (el-tilsynsloven)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
49. Lovdata. *Lov om kontroll med produkter og forbrukertjenester (produktkontrollloven)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.

50. Lovdata. *Lov om vern mot brann, eksplosjon og ulykker med farlig stoff og om brannvesenets redningsoppgaver (brann- og eksplosjonsvernloven)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
51. Lovdata. *Lov om vern mot forurensninger og om avfall (forurensningsloven)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
52. Lovdata. *Lov om strålevern og bruk av stråling (strålevernloven)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
53. Lovdata. *Lov om arbeidsmiljø, arbeidstid og stillingsvern mv. (arbeidsmiljøloven)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
54. Lovdata. *Forskrift om elektrisk utstyr*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
55. Lovdata. *Forskrift om systematisk helse-, miljø- og sikkerhetsarbeid i virksomheter (Internkontrollforskriften)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.]
56. Lovdata. *Forskrift om elektriske lavspenningsanlegg*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
57. Lovdata. *Forskrift om elektromagnetisk kompatibilitet*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
58. Irontech. *Hva er IP-klasser og hvordan defineres de?* [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.irontech.no>.
59. Lovdata. *Lover*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
60. Store norske leksikon. *Forskrift*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
61. Standard Norge. *Standardisering*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.standard.no>.
64. Store norske leksikon. *Elementærladning*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
67. Andersen, P. B. Store norske leksikon. *Elektrisk leder*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
70. Store norske leksikon. *Resonans*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
71. Wikipedia. *Inductive charging*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://en.wikipedia.org>.
72. Store norske leksikon. *Induksjonstopp*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
73. Siemens Home Appliances. *The new freedom in cooking*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.siemens-home.bsh-group.com.au>.
74. Qi (standard). *Wikipedia*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://en.wikipedia.org>.
75. Organisation Internationale de Normalisation (ISO). *ISO/IEC 14443-1:2018*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.iso.org>.
76. Organisation Internationale de Normalisation. *ISO/IEC 15693-1:2018*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.iso.org>.
77. Wikipedia. *Contactless smart cards*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://en.wikipedia.org>.

78. Kyoritsu. *Clamp Meter Principle*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.kew-ltd.co.jp>.
79. GH Induction Group. *Welding*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <http://www.ghinduction.com>.
80. Store norske leksikon. *Induksjonsmotor*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
81. Store norske leksikon. *Generator - energiomformer*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
83. clas ohlson. *Belkin BOOST UP (5W), trådløs Qi-ladestasjon*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.clasohlson.com/no>.
84. Witt. *WIF60IFC*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <http://www.witt.no>.
85. NetOnNet. *Høyt teknologisk elektrisk tannbørste med LCD-display!* [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.netonnet.no>.
86. Lovdata. *Forskrift om tekniske krav og godkjenning av kjøretøy, deler og utstyr (kjøretøyforskriften)*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
87. Lovdata. *Forskrift om krav til sykkel*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://lovdata.no>.
88. Hepro. *Frihet til å dra hvor du vil, når du vil*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.hepro.no>.
89. Segway. *Products*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <http://segway.com/>.
90. M3-Nätverket. *Nu kommer elmopederna - vi testar 9 hete modeller*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://m3.idg.se>.
91. RX Sport. *Titan R2 Elektrisk Mopedbil*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <http://rxsport-shop.no>.
92. Paxster. *Paxster: Technical Specifications*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <http://www.paxster.no>.
93. XXL. *El-sykkel*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.xxl.no>.
94. Elkjøp. *Robotstøvsuger*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.elkjop.no>.
95. Ruller. *Vis alle elbiler*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.ruller.no>.
96. Store norske leksikon. *Paramagnetisme*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://snl.no>.
99. Knutsen, T. M., Platou, E. S. Den norske legeförening. *Pacemakerbehandling*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://beta.legeföreningen.no>.
100. Mouser Electronics Inc. *Data Sheet Power Meter 5335B*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.mouser.com>.
101. BK Precision. *Power Meter Model 5335B*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.bkprecision.com>.
102. Explainthatstuff! *Wireless power chargers*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.] <https://www.explainthatstuff.com>.

103. Science ABC. *How Does An Induction Cooktop Work?* [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.]
<https://www.scienceabc.com>.

104. Trondhjems turnforening. *Systemer for kvalitetsstyring*. [Internett] [Sisert: 1 Mai 2019.]
<http://trondhjemsturn.no>.

15. Vedlegg

Vedlegg 1: Variasjonsbredde for ulike kjøretøy

Vedlegg 2: Forsøksresultater tilhørende kapittel 8.1.

Vedlegg 3: Forsøksresultater tilhørende kapittel 8.2.

Vedlegg 4: Forsøksresultater tilhørende kapittel 8.3.

Vedlegg 5: Forsøksresultater fra ufullstendige forsøk

Vedlegg 1: Variasjonsbredde for ulike kjøretøy

Tabell 15.1: Spesifikasjoner for utvalgte elektriske rullestoler.

Modell	Batterikapasitet (Wh x antall)	Bakkeklaring (cm)	Bredde (cm)	Lengde (cm)
Hepro S19V	288 x 2	6	58	98
Hepro S19+	288	6	48,5	93
Hepro S4	960 x 2	12	68	165
Hepro S4C	960 x 2	12	79	165
Meyra Optimus 11	876 x 2	11	68	116
Hepro HS-828	900 x 2	9	67	140

Tabell 15.2: Spesifikasjoner for utvalgte elektriske mopeder.

Modell	Batterikapasitet (Wh x antall)	Bakkeklaring (cm)	Bredde (cm)	Lengde (cm)
UGBEST Speedy	1200 x 2	-	-	200
Govecs GO! S1.5	2100	-	-	-
Vessla	1200	-	71	173
NIU MI Pro	1200	-	657	164
Viarelli Venice Electric	1440	-	67	175
Drax Stealth	1500	-	75	181

Tabell 15.3: Spesifikasjoner for utvalgte segway.

Modell	Batterikapasitet (Wh x antall)	Bakkeklaring (cm)	Bredde (cm)	Lengde (cm)
Segwai i2 SE Commuter	-	-	63	48
Segwai i2 SE	382	-	65	48
Segway X2 SE	382	-	84	67
Segway miniPlus	329	-	58	28
Ninebot by Segway miniPRO	310	-	55	26

Tabell 15.4: Spesifikasjoner for utvalgte elektriske mopedbiler.

Modell	Batterikapasitet (Wh x antall)	Bakkeklaring (cm)	Bredde (cm)	Lengde (cm)
Titan Zero R2	3240 x 6	-	119	224
Paxster	5100 6700 9200.	-	118	232

Tabell 15.5: Spesifikasjoner for utvalgte elsykler.

Modell	Batterikapasitet (Wh x antall)	Bakkeklaring (cm)	Bredde (cm)	Lengde (cm)
SUB Tour eRide 20	400	-	-	-
Spark eRide 920	504	-	-	-
Hyb Square Cross B2.9U	500	-	-	-
S-Pedelec ST1 P48 Sport	630	-	-	-

Tabell 15.6: Spesifikasjoner for utvalgte robotstøvsugere.

Modell	Batterikapasitet (Wh x antall)	Bakkeklaring (cm)	Bredde (cm)	Lengde (cm)
iRobot Roomba 965	-	2	34	34
Xiaomi Roborock S50	-	3	40	45

Tabell 15.7: Spesifikasjoner for utvalgte elbiler for barn.

Modell	Batterikapasitet (Wh x antall)	Bakkeklaring (cm)	Bredde (cm)	Lengde (cm)
Beamer i4	54 x 2	-	68	102
Volvo XC90 Kinetic	84	-	69,5	129,5
VW Tourag	120	-	76	123
Roadster	120	-	78	142
BMW X6 M- Sport	120	-	101	145

Vedlegg 2: Forsøksresultater tilhørende 8.1.

Tabell 15.8: Tilhører kapittel 8.1. Varierer spenning, konstant avstand tilnærmet lik 0, konstant frekvens på 100 Hz.

U_{inn} (V)	U_{ut} (V)	$U_{ut,jernkjerne}$ (V)
0,3	0,0375	0,1211
0,6	0,0807	0,2409
0,9	0,1154	0,3505
1,2	0,1440	0,4961
1,5	0,1858	0,6205
1,8	0,2220	0,7491
2,1	0,2560	0,9356
2,4	0,2838	1,1206
2,7	0,3454	1,2642
3,0	0,3891	1,3723

Tabell 15.9: Tilhører kapittel 8.1. Varierer frekvens, konstant avstand tilnærmet lik 0, konstant spenning 3,0 V. Grått område indikerer hvor måleutstyret er utenfor arbeidsområdet.

f (kHz)	U_{ut} (V)	$U_{ut,jernkjerne}$ (V)
0,1	0,3891	1,3723
1	0,7037	1,6298
2	0,7109	1,6324
3	0,7119	1,6405
4	0,7296	1,6565
5	0,7293	1,6523
6	0,7280	1,6465
7	0,7265	1,6405
8	0,7248	1,6342
9	0,7225	1,6270
10	0,7201	1,6195

Tabell 15.10: Tilhører kapittel 8.1. Varierer avstanden, konstant frekvens på 1 kHz, konstant spenning på 3,0 V.

Avstand (mm)	U_{ut} (V)	$U_{ut,jernkjerne}$ (V)
1,05	0,6407	1,6255
1,54	0,6136	1,6138
3,81	0,5142	1,4007
7,95	0,3737	1,2111
11,76	0,2775	1,0087

Vedlegg 3: Forsøksresultater tilhørende 8.2.

Tabell 15.11: Effektilpasning, spoler uten jernkjerne. Varierer motstand, konstant effekt inn på 1 W, konstant avstand tilnærmet lik 0. Bruker motstander vist i Figur 8.8. D.

R_{last} (ohm)	I_{last} (mA)	U_{last} (mV)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
1	71,4	69,3	0,0050	0,5
2,2	71,1	155,5	0,0111	1,11
3,3	70,7	229,4	0,0162	1,62
5,6	68,8	388,8	0,0267	2,67
8,2	68,3	542,5	0,0371	3,71
10	67,5	669	0,0452	4,52
27	58,6	1624	0,0952	9,52
47	50,2	2308	0,1159	11,59
82	38,3	3113	0,1192	11,92
100	33,7	3320	0,1119	11,19

Tabell 15.12: Tilhører kapittel 8.2. Effektilpasning med motstand vist i Figur 8.8. E, spoler uten jernkjerne. Varierer motstand, konstant effekt inn på 1 W, konstant frekvens på 1 kHz, konstant avstand tilnærmet lik 0.

R_{last} (ohm)	I_{last} (mA)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
5	70,5	0,358	0,0252	2,52
10	68,7	0,692	0,0475	4,75
15	66,3	0,998	0,0662	6,62
20	63,7	1,267	0,0807	8,07
25	61,3	1,523	0,0934	9,34
30	58,9	1,757	0,1035	10,35
35	56,5	1,967	0,1111	11,11
40	55,1	2,198	0,1211	12,11
45	52,3	2,349	0,1229	12,29
50	49,7	2,475	0,1230	12,30
55	47,6	2,608	0,1241	12,41
60	46,1	2,751	0,1268	12,68
65	44,5	2,877	0,1280	12,80
70	43,3	3,012	0,1304	13,04
75	41,6	3,101	0,1290	12,90
80	39,9	3,184	0,1270	12,70
85	39,0	3,305	0,1289	12,89
90	37,6	3,371	0,1267	12,67
95	36,3	3,431	0,1245	12,45
100	35,0	3,486	0,1220	12,20
105	33,9	3,536	0,1199	11,99
110	32,7	3,582	0,1171	11,71
115	31,7	3,623	0,1148	11,48
120	30,7	3,660	0,1123	11,23

Tabell 15.12 forts.: Tilhører kapittel 8.2. Effektilpasning med motstand vist i Figur 8.8. E, spoler uten jernkjerne. Varierer motstand, konstant effekt inn på 1 W, konstant frekvens på 1 kHz, konstant avstand tilnærmet lik 0.

R_{last} (Ohm)	I_{last} (mA)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
130	29,2	3,775	0,1102	11,02
140	27,6	3,837	0,1059	10,59
150	26,1	3,887	0,1015	10,15
160	24,7	3,931	0,0971	9,71
170	23,6	3,990	0,0942	9,42
180	22,5	4,026	0,0906	9,06
190	21,8	4,110	0,0896	8,96
200	20,8	4,138	0,0861	8,61

Tabell 15.13: Samme betingelser som for Tabell 15.12, men målingene er fokusert rundt det målte toppunktet fra Tabell 15.12.

R_{last} (ohm)	I_{last} (mA)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
66	44,0	2,890	0,1272	12,72
67	43,7	2,910	0,1272	12,72
68	43,3	2,929	0,1268	12,68
69	43,0	2,949	0,1268	12,68
70	42,6	2,963	0,1262	12,62
71	42,2	2,981	0,1258	12,58
72	41,9	2,999	0,1257	12,57
73	41,6	3,016	0,1255	12,55
74	41,2	3,033	0,1250	12,50

Tabell 15.14: Lasttilpasning, spoler med jernkjerne. Varierer motstand, konstant effekt inn på 1 W, konstant frekvens på 1 kHz, konstant avstand tilnærmet lik 0. Bruker motstand vist i Figur 8.8. E.

R_{last} (Ohm)	I_{last} (mA)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
5	132,5	0,676	0,0896	8,96
10	127,3	1,282	0,1632	16,32
20	117,3	2,333	0,2737	27,37
30	108,93	3,249	0,3539	35,39
40	102,86	4,112	0,4230	42,30
50	96,97	4,834	0,4688	46,88
60	91,98	5,488	0,5048	50,48
65	88,94	5,750	0,5114	51,14
70	87,15	6,069	0,5289	52,89
75	85,36	6,368	0,5436	54,36
80	82,77	6,67	0,5521	55,21
85	81,00	6,95	0,5630	56,30
90	79,25	7,20	0,5706	57,06

Tabell 15.14 forts.: Lasttilpasning, spoler med jernkjerne. Varierer motstand, konstant effekt inn på 1 W, konstant frekvens på 1 kHz, konstant avstand tilnærmet lik 0. Bruker motstand vist i Figur 8.8. E.

R_{last} (Ohm)	I_{last} (mA)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
95	77,58	7,43	0,5764	57,64
100	75,91	7,65	0,5807	58,07
105	74,27	7,86	0,5838	58,38
110	73,38	8,14	0,5973	59,73
115	71,86	8,33	0,5986	59,86
120	70,32	8,50	0,5977	59,77
125	69,63	8,76	0,6100	61,00
130	68,19	8,92	0,6083	60,83
135	66,77	9,07	0,6056	60,56
140	65,74	9,26	0,6088	60,88
145	64,95	9,49	0,6164	61,64
150	63,73	9,63	0,6137	61,37
155	62,70	9,79	0,6138	61,38
160	61,51	9,90	0,6089	60,89
165	61,20	10,16	0,6218	62,18
170	60,02	10,27	0,6164	61,64
175	59,55	10,50	0,6253	62,53
180	58,44	10,60	0,6195	61,95
185	57,35	10,69	0,6131	61,31
190	56,63	10,84	0,6139	61,39
195	56,55	11,10	0,6277	62,77
200	55,54	11,18	0,6209	62,09
210	53,83	11,38	0,6126	61,26
220	52,65	11,63	0,6123	61,23
230	51,50	11,89	0,6123	61,23
240	50,69	12,22	0,6194	61,94
250	49,11	12,33	0,6055	60,55
260	48,38	12,62	0,6106	61,06
270	47,30	12,82	0,6064	60,64
280	45,89	12,90	0,5920	59,20
290	44,91	13,08	0,5874	58,74
300	44,54	13,36	0,5950	59,50

Vedlegg 4: Forsøksresultater tilhørende 8.3.

Tabell 15.15: Lasttilpasning med tre spoler, hvorav én i resonans. Frekvens 18,6 kHz, shuntmotstand på 0,1 Ohm, konstant input fra signalgenerator og forsterker. Avstand 1 cm mellom hver spole.

R_{last} (Ohm)	I_{last} (A)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)
1,06	0,341	0,360	0,123
2,42	0,327	0,791	0,259
3,32	0,319	1,446	0,448
4,66	0,310	1,060	0,338
6,40	0,299	1,914	0,572
9,01	0,284	2,558	0,726
11,93	0,269	3,210	0,863
14,63	0,256	3,744	0,958
16,23	0,247	4,01	0,990
20,26	0,231	4,68	1,081
40,16	0,182	7,31	1,330
51,87	0,155	8,04	1,2462
74,47	0,123	9,16	1,1267

Tabell 15.16: Samme betingelser som for Tabell 15.15, men målingene er fokusert rundt det målte toppunktet fra Tabell 15.15.

R_{last} (Ohm)	I_{last} (A)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)
27,04	0,213	5,76	1,227
29,32	0,206	6,04	1,244
29,90	0,204	6,10	1,244
30,30	0,203	6,15	1,248
31,51	0,199	6,27	1,248
32,97	0,195	6,43	1,254
34,50	0,191	6,59	1,259
35,69	0,188	6,71	1,261
37,65	0,183	6,89	1,261
39,06	0,180	7,03	1,265
40,68	0,176	7,16	1,260

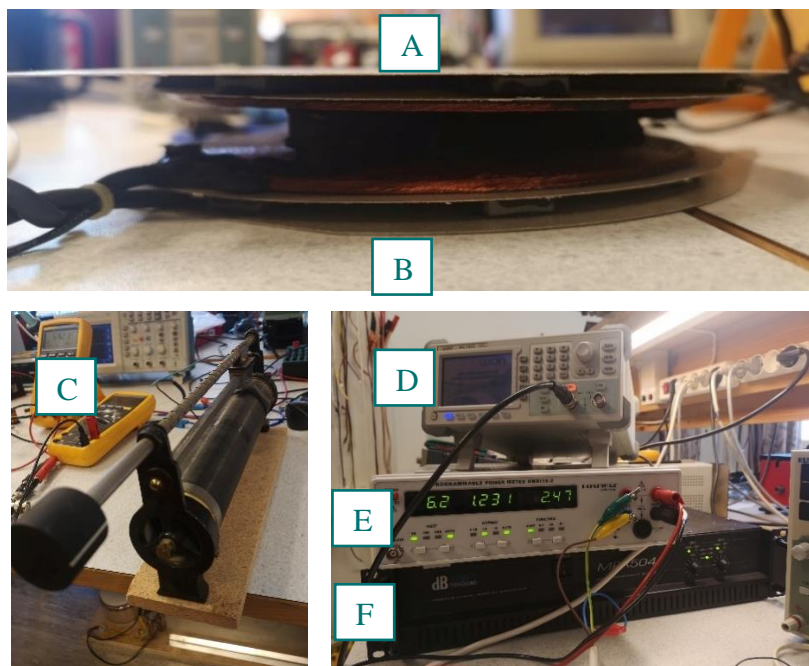
Vedlegg 5: Forsøksresultater fra ufullstendige forsøk

Arbeidet med oppfølgingsforsøk ble oppstartet, men grunnet mangefunt måleinstrument ved universitetet ble forsøkene avsluttet. I de påfølgende tabellene blir måleresultatene fra oppfølgingsforsøkene som ble gjennomført presentert, men det er valgt å se bort ifra disse resultatene i mastergradsarbeidet da wattmeteret kun har arbeidsområde opp til 1 kHz.

Til tross for den store måleusikkerheten er det én interessant observasjon som er blitt gjort ved gjennomføringen av de påfølgende forsøkene. Målingene som blir presentert i Tabell 15.17 testet en hypotese om at en jernkjerne splittet i to (en kjerne på primærsiden og en kjerne på sekundærsiden) ville overføre bedre enn luftkjerne. Men resultatene kan tyde på at det lille luftgapet som oppstår mellom ferrittklossene på primær- og sekundærsiden er nok til å kortslutte kretsen, og at det dermed induseres svært lite strøm. Jernkjernen leder magnetisme flere tusen ganger bedre enn luft, og det kan tyde på at magnetisme ligner på strøm og vil ta minste motstands vei og unngår luftgapet. Hypotesen er svekket, og det vil være rimelig å anta at et tilnærmet homogent stoff vil være å foretrekke mellom spolene – være seg luft eller jern.

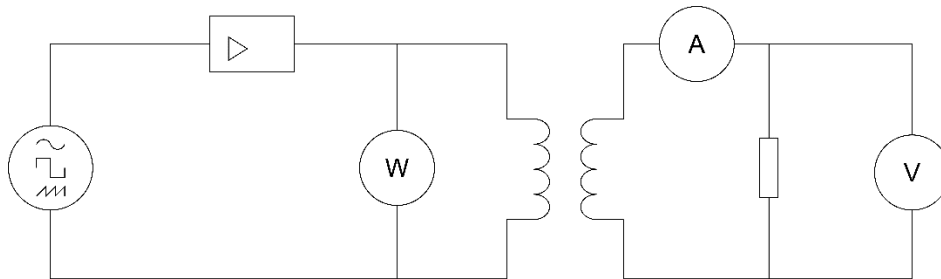
Utstyrsliste:

- Forsterker
- Signalgenerator
- Wattmeter
- Amperemeter
- Voltmeter
- To identiske flate spoler
- Banankabler
- Manuelt regulerbar motstand



Figur 15.1: Instrumentene som ble brukt i forsøket. A. Sekundærspole. B. Primærspole. C. Regulerbar motstand. D. Signalgenerator. E. Wattmeter. F. Forsterker.

Forsøksstrinnene som ble gjort står beskrevet i kapittel 8.3. Oppfølingsforsøk, under delkapittel 8.3.1 Effekttilpasning.



Figur 15.2: Kablingsskjema for forsøkene.

De målte resultatene er presentert i tabellene som følger, med nærmere forklaringer i tabellteksten.

Tabell 15.17: Lasttilpasning med flate spoler uten jernkjerne. Varierer motstand, konstant effekt inn på 10 W, konstant frekvens på 10 kHz, konstant avstand tilnærmet lik 1,4 cm.

R_{last} (ohm)	I_{last} (A)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
0,062	1,99	0,123	0,245	2,45
0,545	1,63	0,889	1,449	14,49
1,285	1,30	1,670	2,171	21,71
2,226	1,03	2,293	2,362	23,62
3,657	0,82	2,999	2,459	24,59
5,124	0,68	3,484	2,369	23,69
7,457	0,54	4,027	2,175	21,75
9,673	0,45	4,353	1,959	19,59
10,302	0,43	4,430	1,905	19,05
11,063	0,41	4,536	1,860	18,60
12,492	0,38	4,747	1,804	18,04

Tabell 15.18: Utvidelse av Tabell 15.17, men fokusert rundt det målte toppunktet som fremkommer av Tabell 15.17..

R_{last} (ohm)	I_{last} (A)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
1,78	1,15	2,047	2,354	23,54
1,935	1,10	2,128	2,341	23,41
2,491	0,99	2,466	2,441	24,41
2,674	0,96	2,567	2,464	24,64
3,125	0,89	2,781	2,475	24,75
3,851	0,80	3,081	2,465	24,65
4,793	0,71	3,403	2,416	24,16

Tabell 15.19: Lasttilpasning med flate spoler, med ferrittklossene mot hverandre. Varierer motstand, konstant effekt inn på 10 W, konstant frekvens på 10 kHz, konstant avstand lik klossenes tykkelse.

R_{last} (Ohm)	I_{last} (A)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
0,056	0,43	0,024	0,01	0,1 %
0,349	0,41	0,143	0,059	0,59 %
0,587	0,39	0,229	0,089	0,89 %
2,086	0,29	0,605	0,175	1,75 %
3,417	0,23	0,786	0,181	1,81 %
5,311	0,18	0,956	0,172	1,72 %
6,400	0,16	1,024	0,164	1,64 %
7,864	0,14	1,101	0,154	1,54 %

Tabell 15.20: Effektilpasning med flate spoler, ferrittklossene fjernet, og spoleplatene lagt mot hverandre. Avstand tilnærmet lik 4 mm (ledningene), konstant frekvens 10 kHz, konstant effekt inn på 10 W, varierer motstand.

R_{last} (Ohm)	I_{last} (A)	U_{last} (V)	P_{ut} (W)	Virkningsgrad (%)
0,059	2,81	0,165	0,464	4,64
0,340	2,26	0,768	1,736	17,36
0,476	2,06	0,980	2,019	20,19
0,773	1,77	1,368	2,421	24,21
1,136	1,56	1,772	2,764	27,64
1,598	1,33	2,125	2,826	28,26
2,240	1,11	2,486	2,759	27,59
2,701	0,97	2,620	2,541	25,41
3,519	0,83	2,921	2,424	24,24
4,891	0,67	3,277	2,196	21,96
5,793	0,60	3,476	2,086	20,86



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway