

Potentialet i V2G-teknologi som fremtidssikring af det danske elnet i forbindelse med den planlagte udvidelse af vindkraftkapaciteten



Basis 2. semester - Maj2009
Gruppe B221 - Energiteknik
Modellernes virkelighed



Titel:

Potentialet i V2G-teknologi som fremtids-sikring af det danske elnet i forbindelse med den planlagte udvidelse af vindkraft-kapaciteten

Tema:

Modellernes Virkelighed

Projektperiode:

P2, Forårssemesteret 2009

Projektgruppe:

EG12B221

Deltagere:

Christian Jeppesen
Dennis Bertelsen
Kasper Varn Qvist
Mathias Friis Junge
Rasmus Maarbjerg-Andersen
Simon Vognstoft Pedersen
Sune Niemann Jensen

Vejledere:

Ewen Ritchie
Morten Boje Blarke

Oplagstal: 11

Sidetal: 85

Appendiksantal: 2

Bilagsantal: 13

Afsluttet den 25-05-2009

Synopsis:

Den danske regerings plan om at fordoble andelen af vindkraft i energisektoren kræver, at der kan foretages en regulering af forbrug og produktion på en hurtig og sikker måde. Elbilen bliver i dette projekt præsenteret som en potentiel løsning, og der produceres et stykke konverteringshardware, der kan lade et batteri og levere strøm til elnettet efter behov. I forbindelse med dette er der gennemført en analyse, af privatøkonomiske motiver for ejeren af en elbil, og der er fundet en fortjeneste ved at lade elbilerne handle på reguleringsmarkedet, eller ved at tilbyde elbilejerne en økonomisk kompensation, i form af fritagelse for afgifterne på el.

Det vurderes ud fra de opnåede resultater, at denne konverteringshardware kan være med til at fremtidssikre det danske elnet, ved at muliggøre indførelsen af mere vindkraft.

Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med et P2 projekt på Aalborg Universitet, hvor temaet for projektet er Modellernes Virkelighed. Projektet er skrevet af studerende på Aalborg Universitet, 2. semester. Målgruppen er personer på et tilsvarende akademisk niveau.

Kilder vil blive anvist løbende i rapporten vha. Harvardmetoden, som refererer til kildelisten bagerst i rapporten. Bagerst i rapporten er der vedlagt en CD, hvor appendiks, bilag og internetkilder er vedlagt. Figurer og tabeller er nummereret med to tal, hvor det første tal repræsenterer kapitelnummeret og det andet repræsenterer figurens placering i kapitlet. For eksempel „Figur 2.5.“

Rapportens indhold er frit tilgængeligt, men offentliggørelse (med kildeangivelse) må kun ske efter aftale med forfatterne.

Christian Jeppesen

Dennis Bertelsen

Kasper Varn Qvist

Mathias Friis Junge

Rasmus Maarbjerg-Andersen

Simon Vognstoft Pedersen

Sune Niemann Jensen

Indholdsfortegnelse

Kapitel 1	Indledning	1
1.1	Integration af vindmøller på elnettet	2
1.1.1	Udbygning af vindmøllekapaciteten	3
1.2	Elspotmarkedet	5
1.2.1	Forbrugerpriser på el	6
1.2.2	El-pris	6
1.2.3	Vindmøllers indflydelse på spotmarkedet	6
1.3	Elbilernes potentiale	7
1.4	Beskrivelse af Vehicle-to-Grid konceptet	8
1.4.1	Anvendelsesmuligheder	9
1.4.2	Lagringspotentialet	9
1.5	Værdi af akkumuleringsmulighed	10
1.6	Værdien af reguleringspotentialet	12
1.7	Problemformulering og problemafgrænsning	13
Kapitel 2	Prototype af V2G konverteringshardware	15
2.1	Strømforsyning	16
2.1.1	Buckkonvertere	17
2.1.2	Boostkonvertere	18
2.1.3	Buck-Boostkonvertere	18
2.1.4	Flybackkonvertere	19
2.1.5	Udvælgelse af konverter	20
2.1.6	Design af flybackkonverter	20
2.2	Batterilader	25
2.2.1	Lithium-ion	26
2.2.2	Bly/syre	31
2.2.3	Sammenligning	33
2.2.4	Konstruktion af batterilader	35
2.2.5	Design af batteri lade styring	37
2.3	Vekselretter	41
2.3.1	Design af 1-faset vekselretter	42
2.4	Styringssoftware - SoftCharge v.1.0 Beta	44
2.4.1	Overvågningsdelen	45
2.4.2	Styringsdelen	47
2.5	Delkonklusion	48
Kapitel 3	V2G-teknologiens indpasning i den danske energisektor	49

3.1	Privatøkonomisk betragtning	49
3.1.1	Specifikationer af batteri og lader	51
3.1.2	Beregning af fortjenesten	52
3.1.3	Opbygning af modellen	53
3.1.4	Case 1	53
3.1.5	Case 2	55
3.1.6	Case 3	58
3.2	Aktøranalyse	59
Kapitel 4 Konklusion		63
Kapitel 5 Perspektivering		65
Litteratur		67
Appendiks- og bilagsoversigt		71
Appendiks A Elbiler på markedet		73
Appendiks B Komponentliste		75

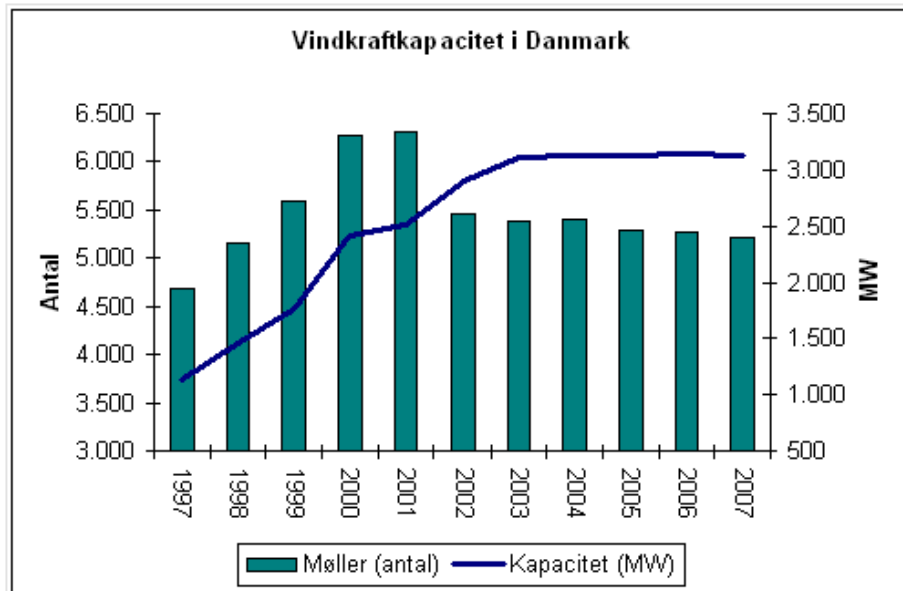
Indledning 1

Siden industrialiseringens indtræden i Danmark i 1864, har der været et nationalt stigende forbrug af fossile ressourcer indenfor både energisektoren og transportsektoren. Det var først i forbindelse med den første oliekrise i 1973, at afhængigheden af olie fra mellemøsten blev sat i tydeligt relief til vores forbrug. I forbindelse med krigen mellem Israel, Egypten og Syrien, valgte OPEC-landene; der sympatiserede med Egypten og Syrien, at reducere deres olieproduktion og hæve prisen på olie til næsten det firedobbelte. Politikere begyndte at fokusere på initiativer, der skulle gøre Danmark mindre afhængig af olie, og med tiden selvforsynende med energi. Det var ud fra disse initiativer at den danske vindmølle industri blev skabt; en industri som nu har vist sig som en global succes.

Da den anden oliekrise i 1979 var endt, og prisen og tilgængelighed på olie nærmede sig det normale, stagnerede udviklingen af nye teknologier, der var simpelthen ikke det samme fokus på nødvendigheden af at være selvforsynende og uafhængige af olie. Vindmølleteknologien blev til en eksportvare, der viste sig at være attraktiv for de mange udenlandske energiselskaber, der stod klar til at investere i vedvarende energi. Udviklingen af vindmølleteknologien fortsatte derfor, mens andre VE-teknologier stoppede udviklingen, og der blev opstillet flere og større vindmøller i det danske landskab. Dette fortsatte op til omkring årtusindeskiftet, hvor mængden af vindkraft udgjorde en så stor del af elproduktionen, at den til tider kunne dække hele energiforbruget. Dette skabte problemer i energiinfrastrukturen, idet vindmøllernes diskontinuerlige produktion gjorde det sværere for kraftværkerne at kompensere, således at produktionen til enhver tid harmonerede med forbruget. Da kraftværkerne sideløbende med elproduktionen også var leveringsansvarlige for varme, opstod der situationer, hvor kraftværkerne ikke kunne nedjustere tilstrækkeligt for vindmøllernes høje produktion, hvilket resulterede i en tvungen eksport for at opretholde en balancen på elnettet.

1.1 Integration af vindmøller på elnettet

Udbygningen af vindkraftsektoren har siden 2001 været fokuseret omkring en udskiftningsordning, hvor ældre vindmøller bliver udskiftet med et mindre antal større vindmøller. Det har betydet, at vindkraftkapaciteten er stagneret, mens antallet af møller er blevet reduceret, som det også ses på figur 1.1.



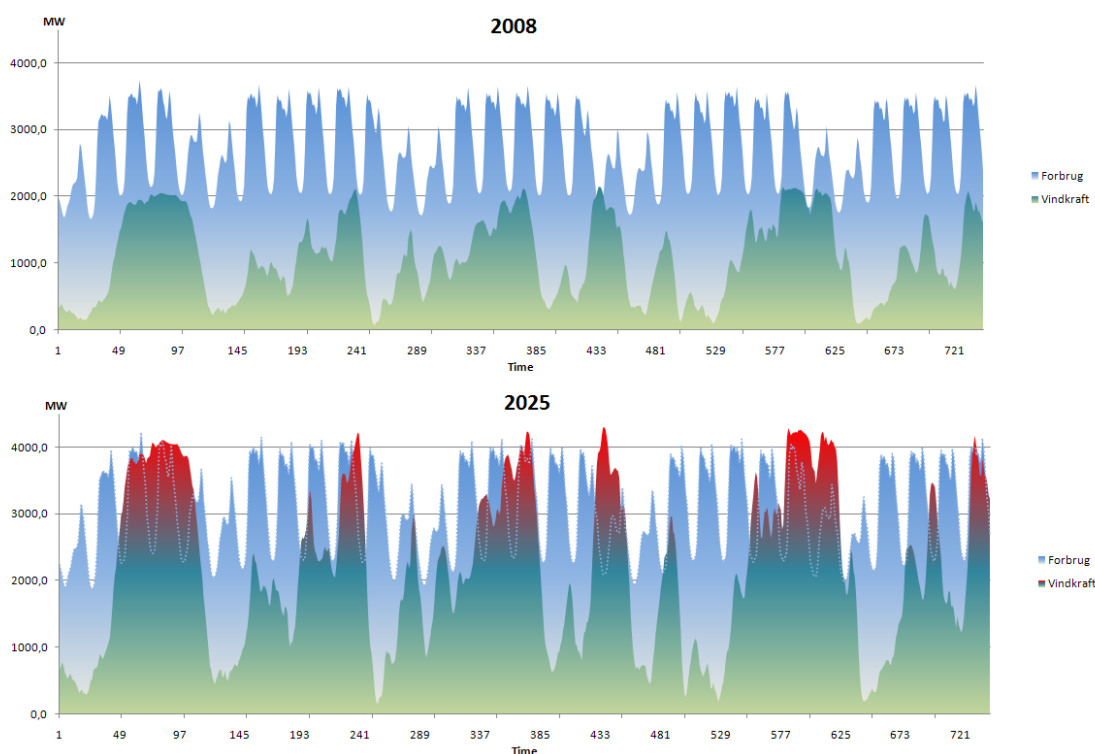
Figur 1.1. Udviklingen i vindkraftkapacitet i forhold til mængden af vindmøller. [Vindmølleindustrien, 2009]

Samtidigt er der flere problemer forbundet med opsætningen af store vindmøller, idet der bl. a. skal tages hensyn til lokalplaner og naboer. Vindmøller er ikke blot en gene af æstetiske grunde, men også med hensyn til støj, og derfor virker det logisk at placere møllerne på havet, hvor støjen ikke er til gene og vindkraftproduktionen ofte er højere end på land. Derfor er der i Danmark opført 8 vindmølleparker med en samlet kapacitet på 423 MW, eller hvad der svarer til godt 14 % af Danmarks totale vindmøllekapacitet. To nye havvindmølleparker er på vej; Horns rev II står klar til udbud, og Rødsand forventes klar i 2010. Med disse to havvindmølleparker, der hver har en kapacitet på omkring 200 MW, bliver den samlede havvindmølleproduktion næsten fordoblet.

I løbet af de sidste 14 år er vindmøllernes samlede kapacitet næsten femdoblet og i dag har de godt 5.400 møller sammenlagt en kapacitet på 3.124 MW, eller hvad der svarer til ca. 24 % af Danmarks samlede elkapacitet.

1.1.1 Udbygning af vindmøllekapaciteten

Regeringen fremlagde d. 19. januar 2007 sin fremsigtede energipolitik i publikationen *En visionær dansk energipolitik 2025* [Energistyrelsen, 2007], hvor der opstilles en række mål for den danske energisituation i året 2025. Her fremgår det bl.a. at Danmark skal dække 30 pct. af det samlede energiforbrug med vedvarende energi. Da vedvarende energi primært bidrager til el- og varmesektoren, og i langt mindre omfang til transportsektoren, skal andelen af vedvarende energi, i el- og varmesektoren næsten fordobles for at opnå regeringens vision. Hvis det antages, at mængden af vedvarende energi produceret ved forbrænding af affald forbliver uændret, vil det primært være vindmøller der skal stå for at øge mængden af vedvarende energi, sådan at kapaciteten bringes fra 3.124 MW til 6.500 MW. Dette sætter store krav til udviklingen af det danske elnet, da vind er en diskontinuerlig kilde, som nogle gange yder en stor effekt, og andre gange slet ingen. Indimellem overstiger elproduktionen fra vindmøllerne forbruget, hvilket i ekstreme tilfælde fører til, at Danmark skal betale for at komme af med strømmen til f.eks. Norge, som så kan højdelagre den i fjeldene.



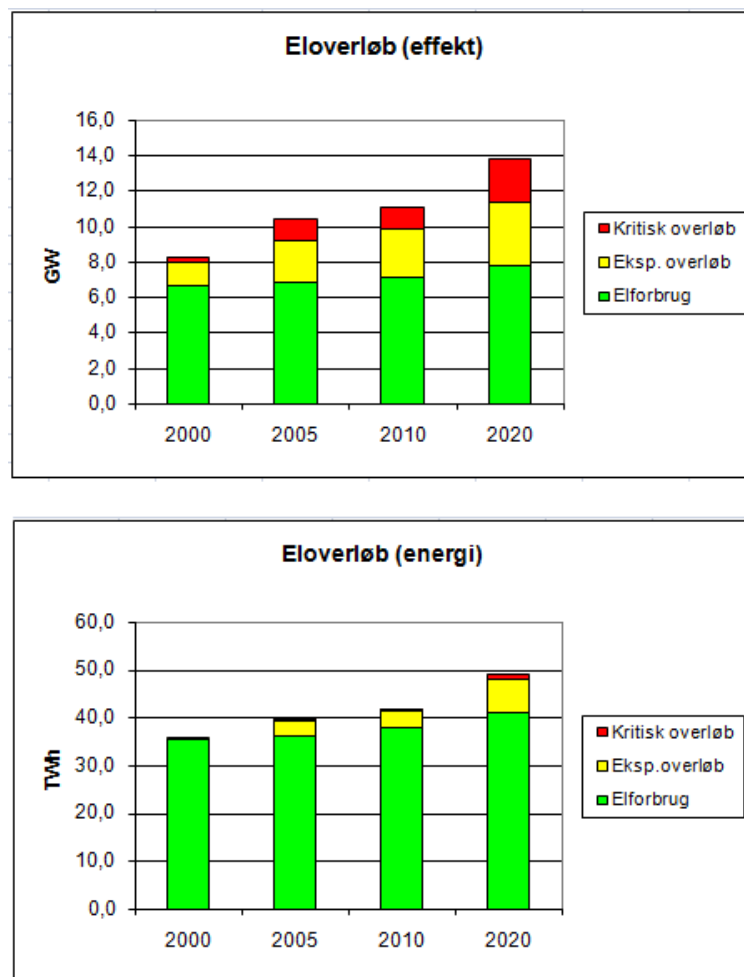
Figur 1.2. Figuren illustrerer det nuværende og fremtidige forhold mellem elforbrug og vindkraft for DK-vest. Øverste billede viser tilstanden i dag, mens nederste billede viser tilstanden i 2025, hvis der opføres flere vindmøller, men fleksibiliteten af forbruget ikke ændres.[Bilag 8] Forbrug og vindmøllekapacitet er fremskrevet med Energistyrelsens beregninger[Energistyrelsen, 2001]

Denne store forøgelse af vindmøller vil resultere i hyppigere forekommende situationer med eloverløb, hvor Danmark vil blive tvunget til at eksportere, indimellem gratis, elektricitet til Tyskland, Norge eller Sverige. På figur 1.2 ses det som de steder, hvor vindmølleeffekten

overstiger forbruget. Med regeringens planer om at fordoble vindmøllekapaciteten, ligger der altså en opgave i, f.eks. via lagring, at udglatte vindmøllernes elproduktion, således at den bliver kompatibel med det danske elforbrug.

I en rapporten *Kraftvarme- og VE-elektricitet* fra Energistyrelsen i 2001[Energistyrelsen, 2001], bliver udviklingen af eloverløbs størrelse fremskrevet på baggrund af tidligere eloverløb, og planlagt om udvidelse af vindmøllesektoren. Dette ses på figur 1.3, hvor det samlede eloverløb i 2010 findes til 4.110 GWh og forventes at stige til 8.080 GWh i 2020, mens det maksimale overløb vil være 6.060 MW i år 2020. Det ses også, at risikoen for et kritisk eloverløb vil være større, når eloverløbet forøges.

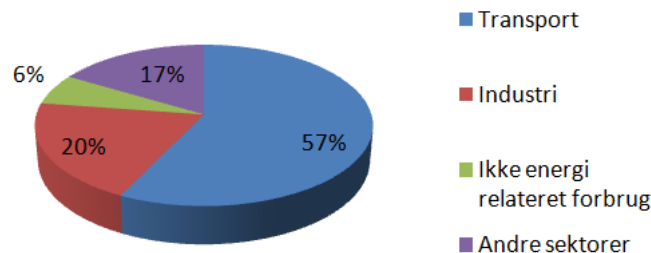
For at undgå kritiske situationer i fremtiden; hvor elproduktionen overstiger forbruget i en sådan grad, at strømmen ikke kan eksporteres eller forbruges på kraftvarmeværkerne, skal der indføres en metode til at lagre denne strøm, og her kan der være hjælp at hente i transportsektoren.



Figur 1.3. Energistyrelsens fremskrivning af eloverløb i Danmark frem til 2020[Energistyrelsen, 2001].

I transportsektoren er der ifølge de ledende eksperter og forskere ikke lang tid til at elbilen gør dens indtog i den globale transportsektor. Både Dong Energy's *Better Place Projekt* og kinesernes *Build Your Dream Projekt* forventer at sætte elbiler på gaden i år 2011. [Jensen, 2009] [Andersen, 2009]

Indførelsen af elbiler i stor skala vil betyde, at en stor del af det olieforbrug der er placeret i transportsektoren, som kan ses på figur 1.4, kan erstattes af elektricitet; et merforbrug som vindmøllerne delvist forventes at skulle dække.



Figur 1.4. Fordelingen af olie i den danske energisektor [International Energy Agency, 2007,]

1.2 Elspotmarkedet

Siden liberaliseringen af det danske elmarked 2. juni 1999, har elektricitet været handlet på markedsvilkår. Både producenter og aftagere af elektricitet har mulighed for, inden middag, at indsende hhv. salg- og købsbud til det nordiske Nord Pool eller det tyske EEX, der på baggrund af de angivne bud, danner en såkaldt systempris på el for det kommende døgns 24 timer. Systemprisen bliver altså dannet 12-36 timer før elektriciteten handles. Elektriciteten bliver ikke altid handlet til systemprisen, idet hverken forbrug eller produktion kan forudsiges helt præcist, og det kan være nødvendigt at justere på forholdet mellem disse. På ELBAS markedet handles der med el på timebasis, hvor salgs- og købsbud kan indsendes indtil en time før transaktionen, og kontrakterne indgås for en time ad gangen. Men ELBAS markedet alene er ikke nok til at regulere det meget følsomme elnet, hvorfor endnu et marked; reguleringsmarkedet, sørger for, at der til enhver tid er overensstemmelse mellem forbrug og produktion. Her er det primært større producenter der kan byde ind med en reguleringskapacitet og pris herfor, idet øjeblikregulering selvsagt kræver konstant forbrugs-/produktionskontrol. Dette giver den systemansvarlige mulighed for at regulere produktionen, så der er balance mellem produktion og forbrug. Reguleringskraftværkerne modtager både betaling for den strøm de afsætter ved regulering, et reguleringtillæg og en rådighedsbetaling for at stå til rådighed. Helt parallelt til opreguleringsmarkedet findes der også et marked for nedregulering, hvor det primært er store aftagere, der handler med nedreguleringskapacitet. I 2008 lå opreguleringstillæget mellem 0 og 5.555 DKK/MWh, nedreguleringstillæget mellem 1.100 og 1.379 DKK/MWh. Den gennemsnitlige rådighedsbetaling for opregulering i 2008 var 43,83 DKK/MW pr. time, mens den gennemsnitlige rådighedsbetaling for nedregulering var 12,08 DKK/MW pr. time.

1.2.1 Forbrugerpriser på el

Den samlede elpris forbrugeren betaler, er bestående af følgende elementer[Energinet.dk, 2009]

1. Betaling for markeds-el
2. PSO (Public Service Obligations) afgift, som opkræves til dækning af udgifter til eksempelvis sikring af forsyningssikkerhed, udbetaling af pristillæg til miljøvenlig elektricitet, forskning og udvikling af miljøvenlige produktionsteknologier
3. Transportomkostninger. Dette er abonnements pris til ens netselskab og leverandør af el.
4. Statslige afgifter og moms

1.2.2 El-pris

Prisen på el for 1 kWh kan svinge meget fra selskab til selskab, men også meget afhængig af tiden. Dette eksempel er fra ENERGINORD og er udspecificeret til hvordan prisen sig til 1 kWh.

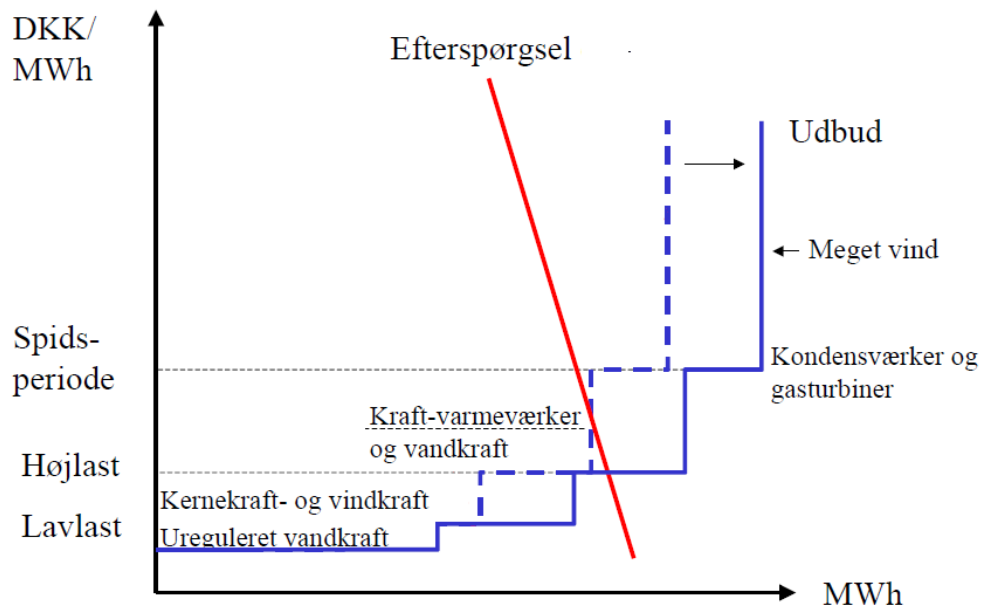
- ENERGINORD kvartalspris (Rå elpris) 50,28 øre
- Offentlig gebyr handel (Gebyr til Energinet.dk) 0,06 øre
- Offentlig gebyr net (Dækker udgifter til de opgaver Energinet.dk er forpligtet til at varetage såsom forsyningssikkerhed og udvikling af miljøvenlig el.) 5,20 øre
- Afgifter I alt pr. kWh 68,50 øre
 - El-afgift 55,60 øre
 - CO₂-afgift 8,90 øre
 - Distributionsbidrag 4,00 øre
- Transportbetaling 11,80 øre
- Moms 33,96 øre
- **Ialt 169,80 øre pr. kWh**

Det eneste der varierer i den samlede kWh pris, er ENERGI NORD kvartalspris. Den kan variere fra 26,53 øre første kvartal 2005 som det billigste, til 66,44 øre fjerde kvartal 2008 som det dyreste. [Energinord.dk, 2009]

1.2.3 Vindmøllers indflydelse på spotmarkedet

Meget af usikkerheden i Nord Pool's prognoser skyldes i høj grad uvisheden om det kommende døgns produktion fra vindmøllerne. Selv med moderne meteorologiske redskaber er vindkraftproduktionen svær at forudsige, 12-36 timer før den skal afsættes, hvorfor mange vindmølleejere lader den systemansvarlige eller et elselskab om at indmelde

produktionen på spotmarkedet. Her bydes produktionen ind til 0 DKK, selvom det ligger under marginalomkostningerne for vindmøllen. Dette gøres for at sikre, at vindmøllen kan komme af med produktionen. Når meget vindmøllestrøm bydes ind til 0 kr bliver elspotprisen billigere, se figur 1.5.



Figur 1.5. Figuren illustrerer hvordan en stor produktion fra vindmøllerne bevirker en lavere spotpris, idet vindmøllernes produktion bliver budt ind til en pris på 0 kr. [Enevoldsen, 2006]

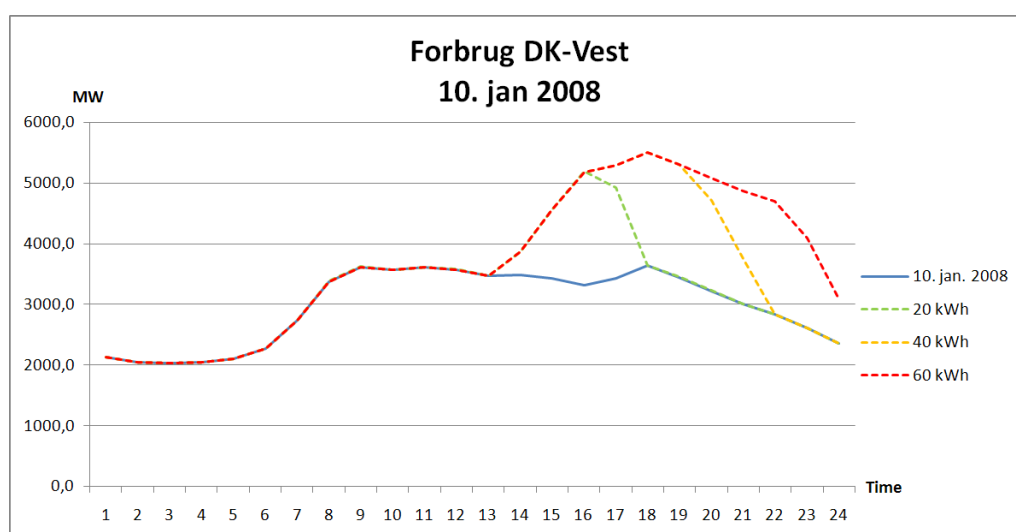
1.3 Elbilernes potentiale

Efter oliekriserne var blevet dæmpet, forsvandt en stor del af opmærksomheden på energiforsyningen fra politikernes og befolkningens side, og det var ikke før det nye årtusindes begyndelse, at energiforsyningen og oliens naturlige ulemper igen blev et folkeligt debattemne. Det var udsigterne til at oliereserverne med stor sandsynlighed ville blive udtømt i løbet af dette århundrede - sammen med en stigende frygt for de drivhusgasser der frigives ved afbrænding af fossile brændstoffer; blev ønsket om alternative brændstoffer til brug i transportsektoren, igen mere tydelig blandt befolkningen.

I 2008 dækkede de 1,965 mio. personbiler i Danmark 85% af transportbehovet, hvor stort set alle var drevet af konventionelle forbrændingsmotorer [Danmarks statistik, 2008]. Fordelene ved at bruge benzin eller diesel er ikke alene det høje energiindhold og lave produktionspris, men også at det er forholdsvis let at tilpasse produktionen til forbruget. Her er det ikke nødvendigt at kende til det præcise tidsmæssige forbrugsmønster for at kunne sikre leverance, idet benzin og diesel let kan lagres og stilles til rådighed for forbrugerne på deres vilkår. Denne forbrugerkomfort er sværere at efterkomme ved en

overgang fra benzin- og dieslbiler til elbiler, idet lagring af elektricitet ikke er mulig i samme omfang som for benzin og diesel. Her er må produktionen til enhver tid matche forbruget, hvilket betyder at hver gang en elbil sættes til opladning, vil de elproducerende anlæg opjustere produktionen og vice versa. Med mange elbiler på vejene er det derfor af afgørende betydning at have kendskab til opladningstendenserne, for at kunne sikre elforsyningen til det medfølgende større energibehov.

Med elsystemets nuværende infrastruktur vil de færreste forbrugere have mulighed for at oplade deres elbil andetsteds end i deres hjem, hvorfor det kun er når forbrugeren er hjemme at der er et opladningsbehov. Med et større antal elbiler, der alle bliver sat til opladning når forbrugerne kommer hjem fra hverdagens gøremål, risikeres en situation, hvor elforbruget vil stige betragteligt inden for en kort tidsperiode. Figur 1.6 illustrerer en sådan situation på en hverdag i januar 2008, hvis elnettet i DK-vest skulle levere strøm til opladning af 300.000 elbiler.



Figur 1.6. Grafen ovenover illustrerer hvordan elforbruget vil stige, hvis en flåde på 300.000 elbiler gennemsnitligt skulle oplades med hhv. 20, 40 eller 60 kWh. Alle bilerne tilsluttes elnettet i periode fra kl. 14- 17.[Bilag 8]

Den internationale gruppe *Project Better Place* arbejder på at udbygge infrastrukturen i en række lande, herunder Danmark og Israel, og de forventer at infrastrukturen i Danmark, kan være klar til de første elbiler i 2020. Til den tid vil elbilerne kunne hjælpe til med at reducere det førnævnte eloverløb, ved at foretage en intelligent opladning af batteriet i de perioder, hvor der er en større elproduktion fra vindmøllerne, og i andre tilfælde levere en del af den lagrede strøm tilbage på elnettet. Denne type interaktion mellem elbiler og elnet, er kendt som Vehicle-to-Grid eller V2G.

1.4 Beskrivelse af Vehicle-to-Grid konceptet

I takt med at antallet af elektriske biler i den danske transportsektor øges, vil den samlede teoretiske lagringskapacitet også stige, og mulighederne for at elselskaberne kan anvende

elbilerne, til hurtig og præcis regulering af energiforbruget, vil blive bedre. Dette kan lade sig gøre, da biler i gennemsnit kun anvendes til kørsel i 4% af tiden [Kempton og Tomic, 2004], og i de resterende 96% af tiden befinder sig ved hjemmet eller arbejdspladsen, hvor de kan kobles til elnettet.

1.4.1 Anvendelsesmuligheder

Et integreret V2G system kan være et værktøj for elskaberne, til at regulere forbruget eller produktionen af el. Det er imidlertid også muligt at bruge et V2G system peakshaving; ved at oplade batterierne om natten når efterspørgslen er lavest, og derefter sende strømmen tilbage på elnettet, i løbet af dagstimerne når forbruget er størst, vil forbruget teoretisk set blive udglattet.

Derudover vil der også være den mulighed at elbilerne, kan bruges til at transformere vindkraften til en teoretisk stabil kilde. Dvs. at hvis elproduktionen fra vindmøllerne pludselig stiger over et givent niveau, sættes elbilerne til at lade deres batterier op, og når vindproduktionen falder under den givne grænse, sendes strømmen tilbage på nettet igen. Elproduktionen fra vindmøllerne kunne derved betragtes som Base Load Supply.

Det sidste scenarie der kan være interessant at tage i betragtning, er i det tilfælde hvor der forekommer et strømafbud, og der kan gå nogle timer inden elnettet igen er forsynet. Da vil det være muligt, at lade elbilerne sende den lagrede elektricitet tilbage på elnettet henover en time, og derved sikre strømforsyningen, indtil kraftværkerne genstartes.

1.4.2 Lagringspotentialer

Batterierne i en elbil har en varierende kapacitet, alt afhængig af biltype. De kan variere fra nogle få kWh, til op over 100 kWh, og alt efter ejerens kørselsmønster, kan en større eller mindre del af batteriets kapacitet, bruges af elskaberne i forbindelse med et af de før nævnte scenarier.

Hvis elbilens forbindelse til elnettet går igennem en styreboks, der enten kan opereres fra et eksternt kontrolcenter, eller udfører sine handlinger med baggrund i et systemdesignet af brugeren, så kan den disponible kapacitet beregnes som en funktion af brugerens kørselsmønster og bilens specifikationer.

$$P = \left(E_{lagret} - \frac{S_{kørt} + S_{buffer}}{\eta_{bil}} \right) \eta_{vekselretter} \quad (1.1)$$

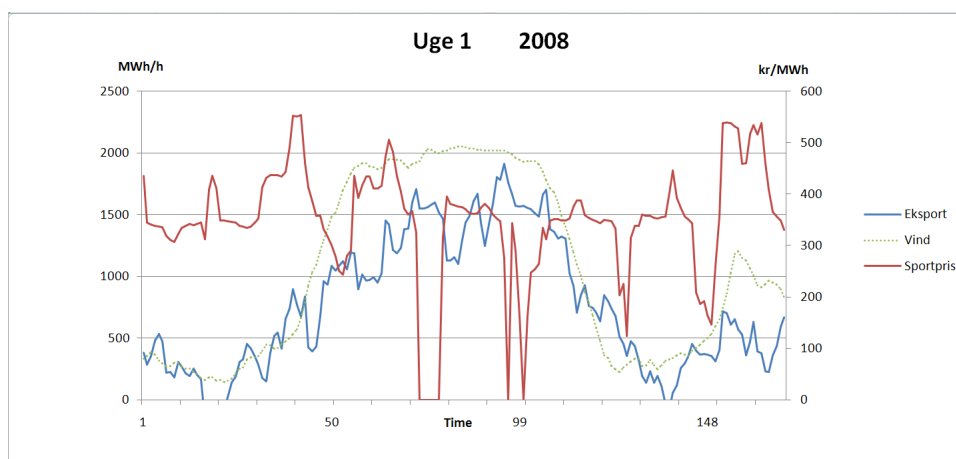
Hvor P er den effekt, der kan bruges til at opregulere eller forsyne elnettet med, E_{lagret} er batteriets effekt, $S_{kørt}$ og S_{buffer} et udtryk for den andel af batteriets kapacitet, der ikke er tilgængelig, den angives i kilometer, og omregnes til kWh ved η_{bil} der er i km/kWh.

Med udgangspunkt i udtræk af markedsdata fra Energinet.dk for købte reguleringsmidler i 2009, bilag 12, ses det at både reguleringsprisen og tilrådighedsbetalingen følger elfor-

bruget, og at der generelt foretages væsentligt flere timers opregulering end nedregulering (ca. 1500 timers opregulering imod ca. 100 timers nedregulering i de 3 første måneder af 2009). Dette er til elbilernes fordel, idet deres opreguleringskapacitet er betydeligt større, da nedregulering ville kræve at batterierne stod afladte under peakperioderne. Denne forskel udviskes dog når antallet af elbiler der er koblet på elnettet stiger.

1.5 Værdi af akkumuleringsmulighed

Det vstdanske elsystem eksporterede 3,13 TWh i 2008 til nabolandene Tyskland, Norge og Sverige. Modregnes mængden af importeret el i samme periode, fås et overblik over den samlede overskudsproduktion i DK-Vest, hvilket i 2008 var 1,03 TWh. En stor del af overskudsproduktionen er bevidst produceret med henblik på eksport, men grundet den store vindmøllekapacitet i DK-Vest, vil det af og til være en nødvendighed, frem for en god forretning, at eksportere elektriciteten, se figur 1.7.



Figur 1.7. Grafen ovenover illustrerer sammenhængen mellem nettoeksport og vindkraft produktionen, samt elspotprisen i tilhørende periode. Det fremgår tydeligt af figuren, hvordan mere vindmøllestrøm betyder større nettoeksport, og samtidig ses det, at stor produktion fra vindmøllerne bevirker store prisfluktuationer på elspotmarkedet.[Udtræk fra Energinet.dk, Bilag 8]

I det vstdanske elsystem er der i alt tilkoblet 3.911 vindmøller, der tilsammen har en kapacitet på 2.419 MW. Sammenholdes dette faktum med det vstdanske timelige elforbrug, der i 2008 svingede mellem 1.301,1 MWh/h og 3.747,8 MWh/h, er det tydeligt at der er potentiale for situationer hvor vindmøllerne alene producerer mere strøm end der forbruges. Når der hertil lægges den bundne elproduktion, der er i forbindelse med varmforsyning, er det svært at forestille sig, at der ikke ville forekomme situation, hvor eksport er en nødvendighed for at opretholde balancen på elnettet. I disse eloverløbsituationer vil indtægten fra eksporten mange gange være minimal, idet elproduktionen fra vindmøllerne ikke altid harmonerer med importbehovet fra nabolandene. Det er derfor muligt, at bruge elspotprisen som indikator for, hvornår der er tale om påtænkt eksport og hvornår

der er tale om eloverløb.

Hvis der ses bort fra de biomassefyrede, kan de danske kraftanlæg groft inddeles ind i tre typer. De kulfyrede, gasfyrede og vindbaseret anlæg. Grundet prisforskelle på de forskellige fossile brændsler, er det forskelligt til hvilken pris kraftværkerne kan producere el. Kulkondens er de billigste fossildrevende kraftværker med en marginalpris på 240 DKK/MWh, hvor gasdrevende anlæg minimum skal honoreres med 360 DKK/MWh for at kunne dække driftsudgifterne. Vindmøllerne har ikke nogen brændselsudgift, hvorfor det kun er vedligeholdelse og etableringsudgifter der skal dækkes og har derfor sin marginal pris under de 240 DKK/MWh. [Morten B. Blarke, 2008,s.35]

I 2008 eksporterede DK-Vest 174 GWh til en pris under 240 DKK/MWh, altså under kraftværkernes marginalpris. Selvom elektriciteten på elnettet i disse situationer gennemsnitlig består af 35,8 % vindmøllestrøm, er det ikke urimeligt at antage, at hele eksporten kommer fra vindmøllerne, idet kraftværkerne ikke vil have noget ræsonnement i at producere el til eksport ved denne lave spotpris. Når kraftværkerne alligevel producerer strøm i disse situationer, skyldes det den bundne produktion der er i forbindelse med varmeproduktionen og den stand-by drift der er nødvendig for regulering i tilfælde af pludselig nedgang i produktionen fra vindmøllerne.

Gennemsnitsprisen for de 174 GWh som DK-Vest i 2008 eksporterede med vind som marginalproduktion, var 170 DKK/MWh, svarende til 42 % af gennemsnitsekportprisen samme år. Hvis det kunne lade sig gøre at lagre elektriciteten i situationer med vindkraft som marginalproducent og sælge det i DK-Vest til gennemsnitspotprisen, ville det have en værdi af 43,7 mio DKK. Ydermere ville det skabe en reduktion i energimængden de danske kraftværker skulle levere, hvorfor det samlede CO₂-udslip også ville reduceres.

Kraftværker der anvender kul, udleder 0,713 kg CO₂ for hver kWh el de leverer til elnettet, hvis der regnes med en kraftværkseffektivitet på 48 %. Hvis de 174 GWh vindmøllestrøm som eksporteres kunne akkumuleres og senere fortrænge noget af kulkraftproduktionen, ville den samlede CO₂-reduktion være på 124.062 tons for 2008. Regnes der med en CO₂-kvotepris på 14 Euro, ville den samlede besparelse beløbe sig til 1.737 mio. Euro eller hvad der svarer til omkring 13 mio. DKK

Havde det været muligt at lagre elektriske energi i stor skala i sammenspil med produktionen fra vindmøllerne i DK-Vest, ville tvungen eksport af elektricitet kunne undgås. Værdien af en sådan ordning ville estimeres til knap 57 mio. DKK pr. år. [Afsnittet er baseret på udtræk fra Energinet.dk, Bilag 8 - "Analysedata"]

1.6 Værdien af reguleringspotentialiet

Hvis et scenarie med en flåde på 500.000 elbiler betragtes, vil den samlede lagringskapacitet med en gennemsnitlig batteristørrelse på 50 kWh, give en samlet kapacitet på 25 GWh, hvilket kan dække hele elproduktionen fra vindmøllerne. Faktisk ville 20 % af den samlede batterikapacitet kunne dække elproduktionen fra vindmøllerne, og dette betyder, at bilejerne ikke behøves frygte, at reguleringsbehovet bliver så stort, at bilen vil være afladet om morgenen.

Den gennemsnitlige betaling for en opregulering er ca. 325 DKK/MWh[Bilag 8], det giver at flåden af elbiler maksimalt kan modtage en betaling for opregulering på 4.677.120 DKK i timen. Dette vil naturligt aldrig være tilfældet, da en så stor regulering aldrig vil være nødvendig. Men det viser at der ligger et stort økonomisk potentiale i at anvende elbiler til opregulering.

1.7 Problemformulering og problemafgrænsning

- Hvordan kan et system konstrueres, så det ved at op- og aflade et batteri i henhold til den varierende vindkraftproduktion, muliggør indførelsen af større vindkraftkapacitet i den danske energisektor?
- Under hvilke forudsætninger kan det være økonomisk rentabelt for en elbil ejer, at stille bilens batteri til rådighed til ovenstående system?

Der forsøges i rapporten, at kaste lys over mulighederne for at anvende en switchmode konverter til at lade på batteriet i elbilen og benytte en vekselretter, til at levere strøm fra batteriet tilbage til elnettet, og derved opnå en samfundsmæssig gevinst i form af reduceret overløbsstrøm, mulighed for udbygning af vindkraftsektoren, større fleksibilitet på elnettet og eventuelt også på regulerkraftmarkedet.

Der vil blive taget stilling til hvorvidt relevansen af et system, hvor elbiler fungerer som energireservoir for elnettet, vil have praktisk anvendelse i et fremtidigt elsystem med større vindkraft indhold, og om det vil have et økonomisk perspektiv, der kan få bilejerne til at købe elbil og deltage i V2G systemet.

Der tages gennem rapporten en række forbehold for at kunne behandle og vurdere data, der er så fluktuerende som vindproduktionen og elspotprisen. Generelt gælder at alle data for vindkraftproduktion er indsamlet i DK-Vest, med mindre andet er nævnt, og at forbrugerne betaler en timebaseret elpris.

Forskellige scenarier for udviklingen af elbiler i Danmark bliver opstillet gennem rapporten, disse er hypotetiske og bruges til at vurdere det økonomiske potentiale af V2G konceptet. Data i disse scenarier er derfor oftest konstruerede til at løse en given problemstilling, eksempelvis størst mulig økonomisk gevinst til bilejeren.

Prototype af V2G konverteringshardware 2

Dette kapitel omhandler hvorledes den tidligere nævnte problemstilling:, „Hvordan kan et system konstrueres, så det ved at op- og aflade et batteri i henhold til den varierende vindkraftproduktion, muliggør indførelsen af større vindkraftkapacitet i den danske energisektor?“. Som beskrevet i afsnit 1.1 på side 2, vil der være dobbelt så meget vindkraft i år 2025, og dermed et større eloverløb. Dertil har elbilen potentialet til at kunne benytte denne overskydende energi.

I takt med antallet af vindmøller stiger og den elektriske bils fremtog kommer nærmere, vil der som beskrevet i afsnit 1.4 på side 8 være lagringskapacitet, til en hurtig og præcis regulering på elnettet. Dermed kan elbilen bruges til at aftage den overskydende energi, og tilsvarende sende energi tilbage til elnettet når der er brug for dette. Det kræves dog at der er et stykke hardware til at oplade batteriet i elbilen, og sende energien tilbage igen til elnettet. I de følgende afsnit er der vist et eksempel på dette.

Som tidligere beskrevet i afsnit 1.6 på side 12 er det alt afgørende hvornår der op- og aflades på batteriet, således at batteriet ikke bliver helt afladet i løbet af nattens timer, og så der stadig vil være strøm nok til den næste dags transport. Derfor bliver der ligeledes givet et eksempel på et intelligent stykke software, der netop skal benyttes til at skabe denne sikkerhed, og ydermere give forbrugeren den bedste mulige fortjeneste eller besparelse.

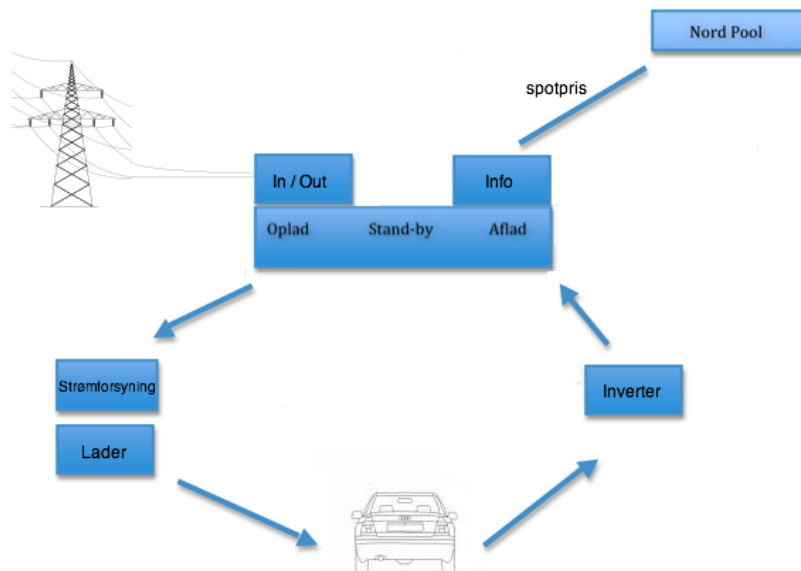
Prototypen af V2G-konverterings hardwaren er delt i 4 dele. De 3 første dele er tilsammen det samlede fysiske produkt, som der kan forestilles at sidde i den kommende el-bil, dog således at det er dimensioneret til et standard 12V batteri.

Den første del er en switchmode flyback converter, der har den egenskab at konvertere 230V AC netspændingen til en 18V DC spænding, som skal bruges til den valgte batteri lader.

Den anden del af produktet består af en batterilader, som skal kunne lade på et batteri. Den tredje del består af en vekselretter. Denne vekselretter skal konvertere 12V DC spændingen fra batteriet om til en tilnærmelse, af en 230 volt netspænding ved 50 Hz. Det vil være en tilnærmelse af netspændingen, da output fra denne konverter ikke vil være

en perfekt sinuskurve ligesom netfrekvensen, men derimod en firkant spænding med en frekvens på 50 Hz.

Den sidste del af produktet er en styring, der skal tilgodese batteriets levetid ved at lave så skånsomme opladninger af batteriet som muligt, og denne skal også tilgodese brugeren af elbilen. Dette bliver gjort ved at styringen laver målinger af diverse værdier på batteriet. Denne sammenhæng ses illustreret på figur 2.1.



Figur 2.1. Diagram over hvordan konverteringshardware'et skal fungere i samspil med hinanden.

2.1 Strømforsyning

Den første del af prototypen er en strømforsyning, som skal forsyne batteriladerdelen med elektricitet. For at kunne lade på et batteri kræver det en overspænding, i forhold til polspændingen på batteriet. Som det beskrives i det næste afsnit, kræver batteriladeren en inputspænding på 18V DC, og strømforsyningen designes derfor derefter.

Der ønskes designet en enhed, som kan transformere 230V AC fra elnettet til 18V DC. Effektiviteten for op- og afladningen af batteriet er et succeskriterium, for fortjenesten af den del af elbilens batterikapacitet som elbilsejeren stiller til rådighed på elnettet. Det er derfor en nødvendighed at der er fokus på effektivitet i det færdige produkt, men traditionelle lineære strømforsyninger, som er opbygget af en stor transformer, har en lav effektivitet [Pressman, 1991, Side 8]. Det ønskes derfor en spændings regulator som kan transformere denne spænding mere effektivt.

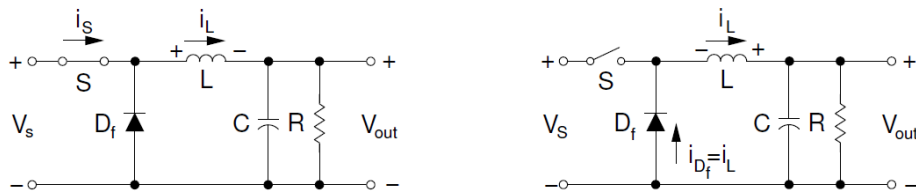
I effekt elektronikken bruges ofte switch-mode teknikken. Switch-mode består af power input, power output samt kontrol input. I switch-mode konvertere bruges spoler og kondensatorer i udpræget grad, da der teoretisk set ikke afsættes nogen effekt heri, og

dette er formålet med at bruge switch-mode power supplies (SMPS).

Der findes mange forskellige switch-mode konvertere, og mange forskellige afarter af disse. Groft kan de deles op i 2 kategorier; uden galvanisk adskillelse og med. Buck, Boost og Buck-Boost konverterne har ingen galvanisk adskillelse, og de resterende der beskrives i dette afsnit har. Galvanisk adskillelse kan opnås ved at adskille input og output på strømforsyningen med en transformer, hvilket giver den fordel at der opnås en adskillelse fra elnettet, og systemet bliver derved mere sikkert. Ulempen er at der i kredsløbet skal indgå en transformer hvori der er forbundet et effekttab.

2.1.1 Buckkonvertere

En Buck konverter switcher en DC spænding, således at outputspændingen bliver lavere. Konverteren består grundlæggende, som der ses på figur 2.2, af en kontakt (S) som åbner og lukker for inputspændingen. S er sluttet i tiden D (duty cycle) ud af periodetiden (T). Når S er sluttet, er spændingen over dioden D_f lig med inputspændingen, hvorved der løber en lineært tiltagende strøm igennem spolen L (efter formlen $I_{peak} = V_S \cdot \frac{D}{L}$ og den lagrede energi efter $E = 0,5 \cdot L \cdot i_L^2$) og kondensatoren C oplades. Når S bryder bliver udgangen af S holdt til stel gennem dioden D_f , altså er spændingen ved S udgangen og stel, en firkantspænding der går fra 0 V til input spændingen, hvor den er høj i tiden D [Pressman, 1991].



Figur 2.2. Diagram over en buckkonverter [Chrysis, 1984].

V_{out} kan beregnes på følgende måde [Erickson og Maksimovic, 2001]:

$$V_{out} = D \cdot V_s \quad (2.1)$$

Ulempen ved switch mode konvertere er at der er en vis støj forbundet med kredsløbet. En del af denne støj er elektrisk støj som bl.a. kommer til udtryk ved at DC-spændingen bliver pulserende, der teknisk betegnes ripple. For Buckkonverteren kan denne ripple beregnes som:

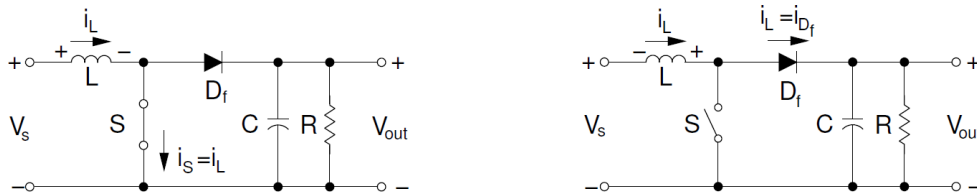
$$\Delta V_{out} = V_{out} \cdot \frac{1 - D}{8LCf^2} \quad (2.2)$$

Hvor L er induktansen i spolen, C er kapaciteten af kondensatoren, og f er frekvensen kontakten slutter og bryder med. Det ses, at ripple ikke kan blive nul, men kan mindskes ved at hæve frekvensen. Desuden ses det, at frekvensen er den laveste for de 3 typer uden galvanisk adskillelse, da frekvensen er opløftet til 2. potens [Hart, 1997].

2.1.2 Boostkonvertere

Boostkonverteren har den egenskab at den kan danne en højere, eller en tilsvarende outputspænding, end inputspændingen. Et simpelt diagram over boostkonverteren ses på figur 2.3, hvor switchen (S) er sluttet og brudt.

Når switchen er sluttet i tiden D (duty cycle), vil der som i buckkonverteren, løbe en lineært tiltagende strøm i spolen. Denne strøm (I_L) vil ikke løbe mod V_{out} , da dioden D_f sidder i spærreretningen, derimod vil kondensatoren (C) levere strømmen til output. Når switchen brydes vil polarisering i spolen vendes, og den opladete energi i spolen vil aflades til C gennem D_f . Når spolen aflades, vil den forsøge at holde afladningsstrømmen konstant, hvorved spolens energi aftager, og spændingen vil stige til et højere potentiale end V_S . Er switchen brudt, vil input også levere energi til output [Pressman, 1991]. Er switchen S brudt i en hel periode (T), vil $V_S = V_{out}$. Når switchen begynder at slutte, vil outputspændingen overstige inputspændingen.



Figur 2.3. Diagram over boost konverteren [Chryssis, 1984].

Outputspændingen kan beregnes ud fra ligning 2.3:

$$V_{out} = \frac{V_s}{1 - D} \quad (2.3)$$

Ripple i en boostkonverter kan beregnes på følgende måde:

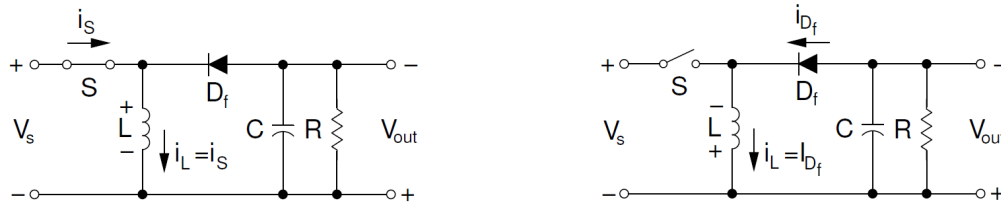
$$\Delta V_{out} = V_{out} \cdot \frac{D}{RCf} \quad (2.4)$$

Som det ses i formelen 2.4 er ripple lavest når D er gående mod nul [Hart, 1997].

2.1.3 Buck-Boostkonvertere

Buck-Boostkonvertere ses på figur 2.4, den samler egenskaberne fra buck- og boostkonverterne, da den både kan reducere og forhøje outputspændingen i forhold til inputspændingen. Outputspændingen er lig med inputspændingen, når D er lig med 50 % af T . Når S er sluttet løber der, som i de 2 foregående konvertere en lineært tiltagende strøm i spolen L (i_L), og D_f er i spærreretningen. Når S brydes vendes polariteten i spolen, og spolen forsøger at opretholde strømmen, så kondensatoren oplades igennem D_f . Da kondensatoren oplades efter polariteten af spolen, får man således en konvertering af polariteten på

outputpolerne i forhold til inputpolerne. [Pressman, 1991]



Figur 2.4. Diagram over en Buck-Boostkonverter [Chrysis, 1984].

Outputspændingen kan beregnes ud fra ligning 2.5:

$$V_{out} = V_s \frac{D}{1 - D} \quad (2.5)$$

Som det ses på ligning 2.5, fungerer konverteren som en Buckkonverter når $D < 50\%$ og som en Boostkonverter når $D > 50\%$. Ripple i en boostkonverter kan beregnes på følgende måde:

$$\Delta V_{out} = V_{out} \cdot \frac{D}{RCf} \quad (2.6)$$

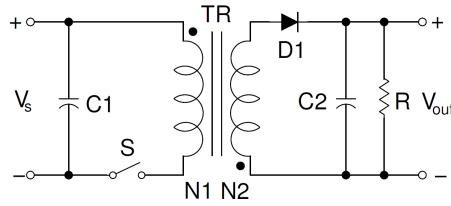
Som det ses i formel 2.6 er ripple lavest når D er gående mod nul [Hart, 1997].

2.1.4 Flybackkonvertere

De forskellige konverter typer der er blevet beskrevet i forrige afsnit, har været grundlæggende konverter typer, uden galvanisk adskillelse. Andre switchmode konverter topologier bygger på de teknikker som også bruges i de grundlæggende topologier. Dette gælder også for flybackkonverteren, som bygger på princippet fra Buck-Boostkonverteren.

Flybackkonverterens opbygning ses på figur 2.5 på næste side, og er en konverter som kan regulere en spænding op eller ned i forhold til inputspændingen. Konverteren fungerer i to trin, når kontakten er sluttet og når kontakten er brudt. Når kontakten S er sluttet vil der løbe en lineært tiltagende strøm gennem primærviklingen (N_1) på transformeren TR efter forskriften $\frac{dI}{dt} = \frac{(V_s - 1)}{L_{N1}}$, hvor L_{N1} er induktansen i primærvindingen. Samtidig vil dioden D_1 sidde i spærre retningen på sekundærsiden, og energien til output vil derfor komme fra kondensatoren C_2 .

Når kontakten S brydes vil strømmen gennem primærviklingen ophøre, hvorved polariteten i denne vendes. Den oplagrede energi i primærviklingen vil blive overført til sekundærviklingen, og aftage da dioden; efter polariteten er vendt, sidder i lederetningen, og derefter aftage efter forskriften $\frac{dI_{N2}}{dt} = \frac{V_{out}}{L_{N2}}$, hvor L_{N2} er induktansen i sekundærvindingen.



Figur 2.5. Diagram over en flybackkonverter [Chryssis, 1984].

Outputspændingen kan beregnes på følgende måde:

$$V_{out} = V_s \cdot \frac{D}{1-D} \cdot \frac{N2}{N1} \quad (2.7)$$

Hvor $\frac{N2}{N1}$ er forholdet mellem antallet af primære- og sekundærviklinger.

Ripplespændingen på Flybackkonverterens output kan beregnes på følgende måde:

$$\Delta V_{out} = V_{out} \cdot \frac{D}{RC_2 f} \quad (2.8)$$

Det ses, at $\Delta V_{out} \rightarrow 0$, når $D \rightarrow 0$. For belastningen $R \rightarrow 0$ går $\Delta V_{out} \rightarrow \infty$ [Hart, 1997].

Flybackkonverteren er den billigste og den mest simple konverter med galvanisk adskillelse, pga. et lille antal komponenter. Dette gør bl.a. at det begrænsede antal af komponenter giver mulighed for at designe konverterens udformning lille og kompakt. Konverteren bliver ofte brugt i mange sammenhænge, men den har dog begrænsninger idet den udsender en del støj, i forhold til de mere avancerede topologier, og egner sig derfor kun til begrænsede udgangseffekter (0-150W) [Pressman, 1991].

2.1.5 Udvalgelse af konverter

Af sikkerhedsmæssige hensyn vælger vi Flybackkonverteren, da den har galvanisk adskillelse. Flybackkonverteren er også den mest simple konvertertopologi, hvilket er ønskværdigt i prototypefasen.

2.1.6 Design af flybackkonverter

Flybackkonverteren er designet som det ses på printdiagrammet på figur 2.6 på side 22, med komponenterne som er listet på appendiks B. Konverteren er opbygget af en VIPer 100A styringskreds med MOSFET og PWM indbygget i en komponent, hvis datablad ses på bilag 2. Konverteren er designet vha. et program udviklet og stillet til rådighed af producenten af VIPer kredsen [STMicroelectronics, 2003], med en primær spændingsregulering.

Konverteren fungerer grundlæggende som beskrevet i afsnit 2.1.4 på foregående side, hvor diodebroen BR1 og kondensatoren C2 udgør DC forsyningsspændingen til kredsløbet, som ved en inputspænding på 230V AC, vil være 325V DC. Omkring transformeren er der en ekstra vikling, forsyner styringskredsløbet med en spænding op til 15V (jf. bilag 2). Det ses, at D1 og C4 i styringskredsløbet har samme funktion som D11 og C11, at forsyne

kredsløbet, når der er gennemgang mellem Drain og Source i VIPer kredsen. Ben 3 og 4 på VIPer kredsen er henholdsvis drain og source på MOSFET'en, som har til funktion at switche den primære side på transformeren. Derudover har drainbenet, som det ses på figur 1 i bilag 2, til formål at forsyne VIPer kredsen med strøm i opstartsfasen, før energien fra transformeren er blevet overført til styringskredsen.

Ben 2 på VIPer kredsen er forsyningsben (V_{DD}) for VIPer kredsen. Spændingen skal holdes under 15V, og over 8V. Hvis spændingen på V_{DD} kommer under 8V, lukker sikkerhedskredsen ned for MOSFET'en, og VIPer kredsen bliver igen forsynet fra drainbenet, indtil kredsens spænding når 11V, hvorefter VIPer kredsen begynder at switche igen. V_{DD} er også forbundet med den interne error amplifier, som ved den primære spændingsregulering er internt trimmet til 13V. Dvs. at error amplifier justerer duty cycle, så den ønskede udgangsspænding for flybackkonverteren opretholdes. Ben 5 COMP udgør output for error amplifieren.

Ben 1 bestemmer switchfrekvensen for kredsløbet. Denne frekvens bestemmes af det RC-led, hvor ben 1 er koblet til midtpunktet. Switchfrekvensen bestemmes, som det ses på side 9 i bilag 2. Den teoretiske switch frekvens for kredsløbet beregnes i 2.9:

$$\begin{aligned} f_{sw} &= \frac{2,3}{R2 \cdot C5} \cdot \left(1 - \frac{550}{R2 - 150}\right) \\ &= \frac{2,3}{7,5k\Omega \cdot 4,7nF} \cdot \left(1 - \frac{550}{7,5k\Omega - 150}\right) \\ &= 60,3 \text{ kHz} \end{aligned} \tag{2.9}$$

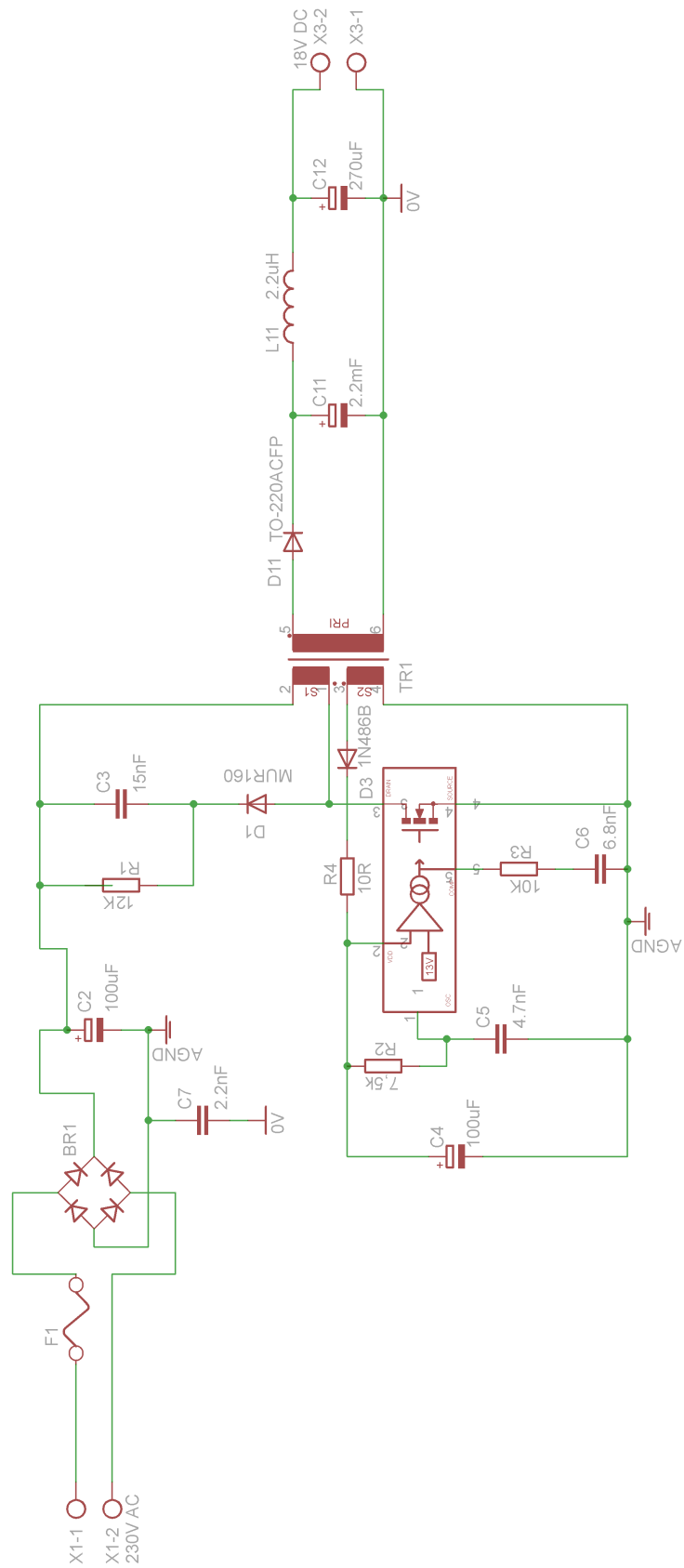
Den teoretiske switch frekvens for kredsløbet vil derfor være 60 kHz.

Lige inden udgangen er der placeret et LC-led, som udgør et low-pass filter¹, som skal reducere outputripple. LC-ledet består af L11 og C12, hvor L11 er en spole med en induktans som ikke leveres af førende danske komponent leverandører. Den er derfor viklet omkring en luftkerne. Antallet af vindinger og kerneradius er beregnet ud fra formel 2.10 [Jewett og Serway, 2008], hvor $\mu = \mu_0$ er permeabiliteten for luft, r er radius for spolen og N er antallet af vindinger. Induktansen for spolen L11 beregnes:

$$\begin{aligned} L11 &= \frac{\pi \cdot \mu \cdot r^2 \cdot N^2}{1 + 0,9 \cdot r} \\ &= \frac{\pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{M} \cdot 0,008m^2 \cdot 20^2}{1 + 0,9 \cdot 0,008m} \\ &= 2,1 \mu H \end{aligned} \tag{2.10}$$

Når spolen er viklet måles induktansen, og længden tilpasses så den ønskede induktans opnås. Dette er dokumenteret på bilag 10.

¹Et low-pass filter har til formål at lade lavfrekvente signaler pasere, og reducere amplituden på høj frekvente signaler

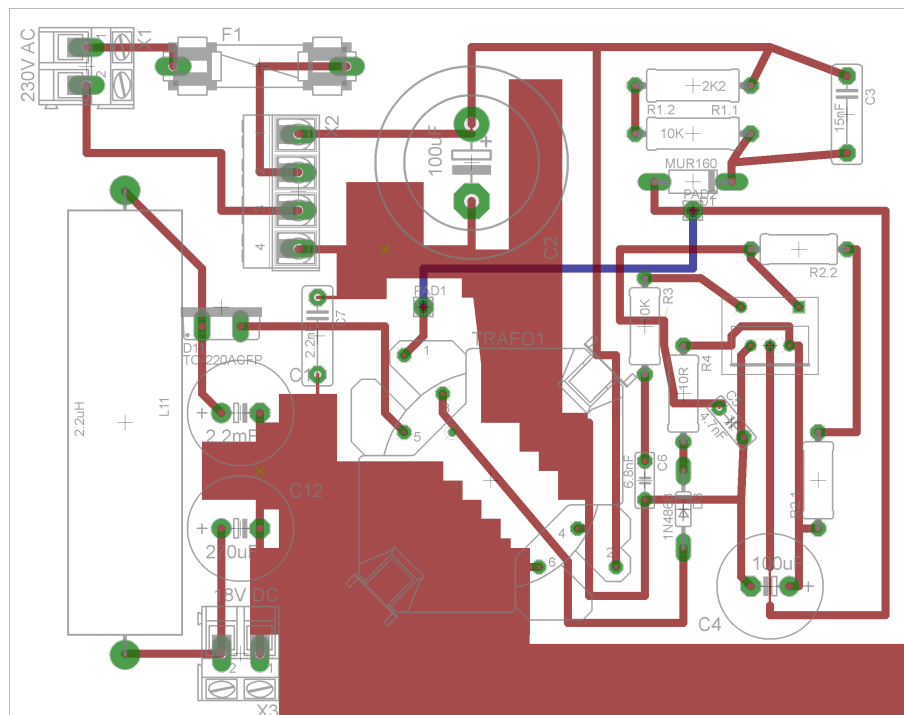


Figur 2.6. Printdiagram til batterilader.

2.1.6.1 Udformning af printudlæg

Printdiagrammet på figur 2.6 på modstående side er blevet tegnet om til det printudlæg som ses på figur 2.7. Design af printudlægget, er noget der kræver meget øvelse, derfor er dette printudlæg ikke designet optimalt. For at opnå høj effektivitet, og mindske den støj der er forbundet ved switch mode teknologien, er printudlægget forsøgt designet efter disse grundregler:

- Komponenter er placeret tæt, idet kobberbanerne skal være så korte som muligt, for at opnå mindst mulig modstand. Dette er især vigtigt i de baner hvor der løber en stor strøm. Derudover kan lange printbaner, hvor der switches med en stor frekvens virke som en antenne, og der opstår en risiko for at udsende elektromagnetisk støj. Derfor skal de komponenter der switcher (transformatoren, dioden og MOSFET'en) placeres tæt ved hinanden.
- For at minimere udsendelsen af elektromagnetisk støj, skal stelplanerne være så store som muligt. Derfor skal der være et stelplan, hvor der ikke er printbaner.
- Pga. risiko for overslag skal der være $>2,5\text{mm}$ mellem højspændingsbaner og stel.
- Der skal placeres afladningskondensatorer mellem stelplan på primær- og sekundærsiden for at undgå en forskel i spændingspotentialet af disse. Denne kondensator skal have kapaciteten $\geq 2,2\text{nF}$. Dette gøres for at minimere støj i kredsløbet.
- Mellem de 2 stelplan skal der være $>5\text{mm}$, for at undgå overslag mellem disse.



Figur 2.7. Printudlæg til Flyback converteren.

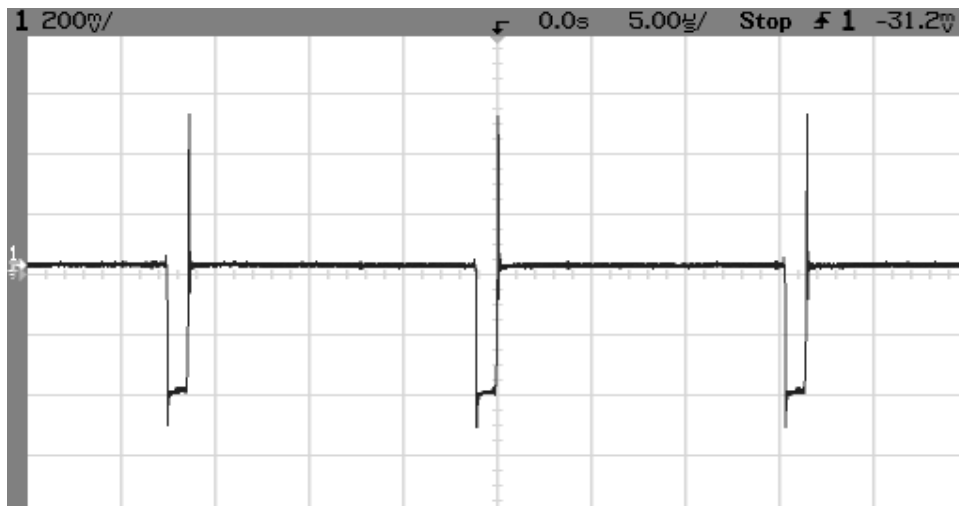
2.1.6.2 Test

Første udgave af prototype strømforsyningen blev udformet på hulprint med faste kobberbaner. Denne printtype har dog den ulempe at hver printbane maks. kan lede 1A, og der må højest være en spændingsforskel, mellem 2 sideliggende printbaner, på 50V. Dette resulterede i overslag mellem 2 printbaner, og kredsløbet fungerede ikke. En visualisering af første udkast til strømforsyningen ses på bilag 5a.

Anden udgave af prototype strømforsyningen blev designet som beskrevet på 2.1.6.1 på forrige side. En visualisering af andet udkast til strømforsyningen ses på bilag 5b. Denne udgave gav intet output, når den blev forsynet med en inputspænding. Det blev afprøvet om der var noget galt med transformeren, ved sætte en 12V DC spænding på ben 3 og 4 på transformeren, og derved kortlægge hvorvidt der var fejl i styringsdelen af MOSFET'en. Det viste sig, ved at måle hen over MOSFET'en, at den åbnede og lukkede, som det ses på figur 2.8. Switchfrekvensen beregnes, hvor periodetiden (T) er aflæst til $16,5 \cdot 10^{-6} s$:

$$\begin{aligned} F_{sw} &= \frac{1}{T} \\ &= \frac{1}{16,5 \cdot 10^{-6} s} \\ &= 60,6 kHz \end{aligned} \tag{2.11}$$

Switch frekvensen beregnes til at være 60,6 kHz, hvilket næsten stemmer overens med beregning 2.9 på side 21.



Figur 2.8. 60 kHz switch frekvensen for MOSFETen.

Det kan dermed konkluderes, at der ikke er nogen fejl på styringskredsløbet. Dernæst blev det forsøgt at sætte en AC forsyningsspænding på input samtidigt med, at styrekredsløbet er kunstigt forsynet med 12V DC. Under testen blev der langsomt justeret på AC spændingen, fra 0V og op efter. Resultatet af dette blev, at outputspændingen lå ca. 10 % under inputspændingen, altså outputspændingen var proportional med inputspændingen. Ved en inputspænding på over 50V AC, slog VIPer kredsens sikkerhedsdel til, og output-

spændingen faldt betydelig, og VIPer kredsen udsendte en højfrekvent lyd.

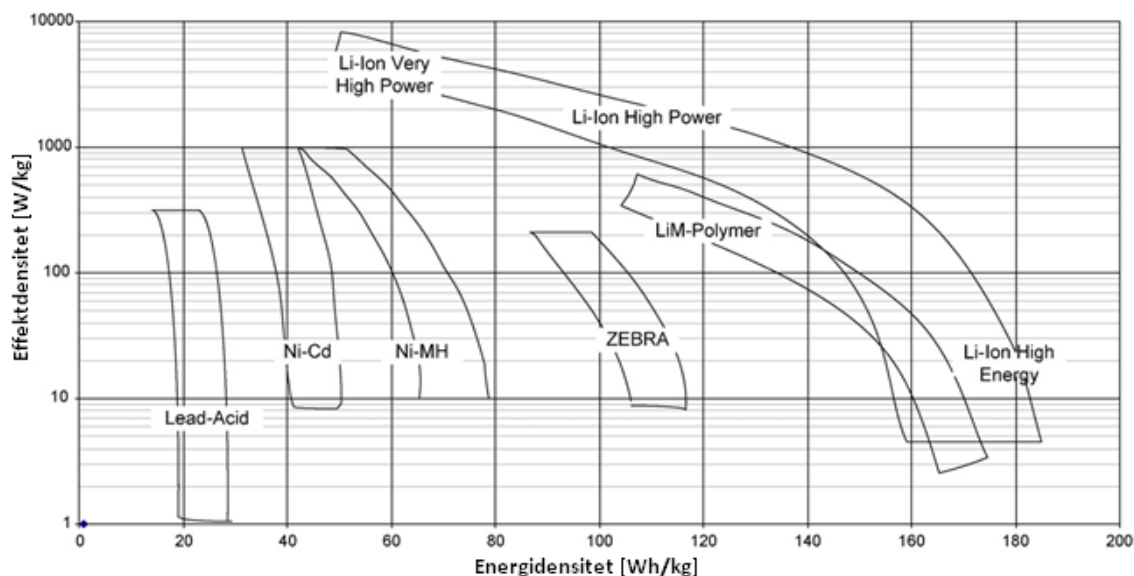
Det er højst sandsynligt, at denne fejl skyldes fejl i transformerens design eller udformning. Enten er antallet af vindinger eller forholdet mellem vindingerne forkert, eller også kan en beskadigelse af isoleringen på kobbertråden som transformeren er viklet af, gøre at der er overslag i transformeren, mellem vindingerne. Transformeren blev derfor afmonteret og testet. Det blev forsøgt at lave en måtningskurve, ved at sætte en kendt spænding ind på primærsiden af transformeren, og måle spændingen på sekundærsiden, for en række forskellige spændinger på primærsiden. Dette laves der en graf over, hvor spændingen på primærsiden vises på 1. akse, og spændingen på sekundærsiden vises på 2. akse. Dette skulle give en lineært stigende funktion, som glatter ud mod vandret når transformerens kernemateriale når sit måtningspunkt. Dette skete dog ikke, da spændingen langsomt blev reguleret op fra nul, hvor amperemeteret gav voldsomme udslag, og sikringen i skilletransformatoren sprang ved ca. 2 volt. Der er derfor ingen tvivl om at der er overgang i transformeren. Strømforsyningen til batteriladeren virkede derfor ikke ved projektets afslutning.

2.2 Batterilader

Når der ses på anvendelsen af bilbatterier i biler i dag, har disse til funktion at indgå i det elektriske system, der driver køretøjets elsystem, samt at drive den startermotor der anvendes til opstart af køretøjets motor. Det kræves derfor, at batteriet er i stand til at levere en kraftig effekt momentant. Ses der derimod på elbiler, både eksisterende og fremtidige, har batteriet en meget anderledes rolle. Batteriet har her til rolle af fungere som „brændstof“ og levere den effekt som det kræves af køretøjets driftsystem, og opnå en så lang driftsradius som muligt.

Nutidens producenter af elbiler; som eksempelvis Tesla Motors, har primært valgt at anvende lithiumbatterier til at løse denne problemstilling. At netop denne løsning kan anses som værende attraktiv, understøttes af rapport „The effect of PHEV and HEV DUTY cycles on battery and battery pack performance“ [Valøen og Shoesmith, 2007] samt figur 2.9 på den følgende side.

Idet en del af dette projekt omhandler produktionen af en komponent, der er i stand til at lade et batteri, samt at levere det i batteriets lagrede elektricitet tilbage på elnettet, ses det hensigtsmæssigt at lave en forudgående undersøgelse af et lithiumbatteri omhandlende relevante data så som lade- og afladekurver, effekt m.m.. Det kunne herunder være relevant med en sammenligning med bly/syre-batteriet, der anvendes i nutidens konventionelle køretøjer med forbrændingsmotorer, for at belyse eventuelle forskelle, fordele og/eller ulemper. Andre kommercielle genopladelige batterityper, som f.eks. nikkel-metal, er på forhånd fravalgt denne undersøgelse grundet for høj selvafladning [Buchmann, 2003a].



Figur 2.9. Skema over diverse batteritypers effekt- og energidensitet[Campanari et al., 2008].

2.2.1 Lithium-ion

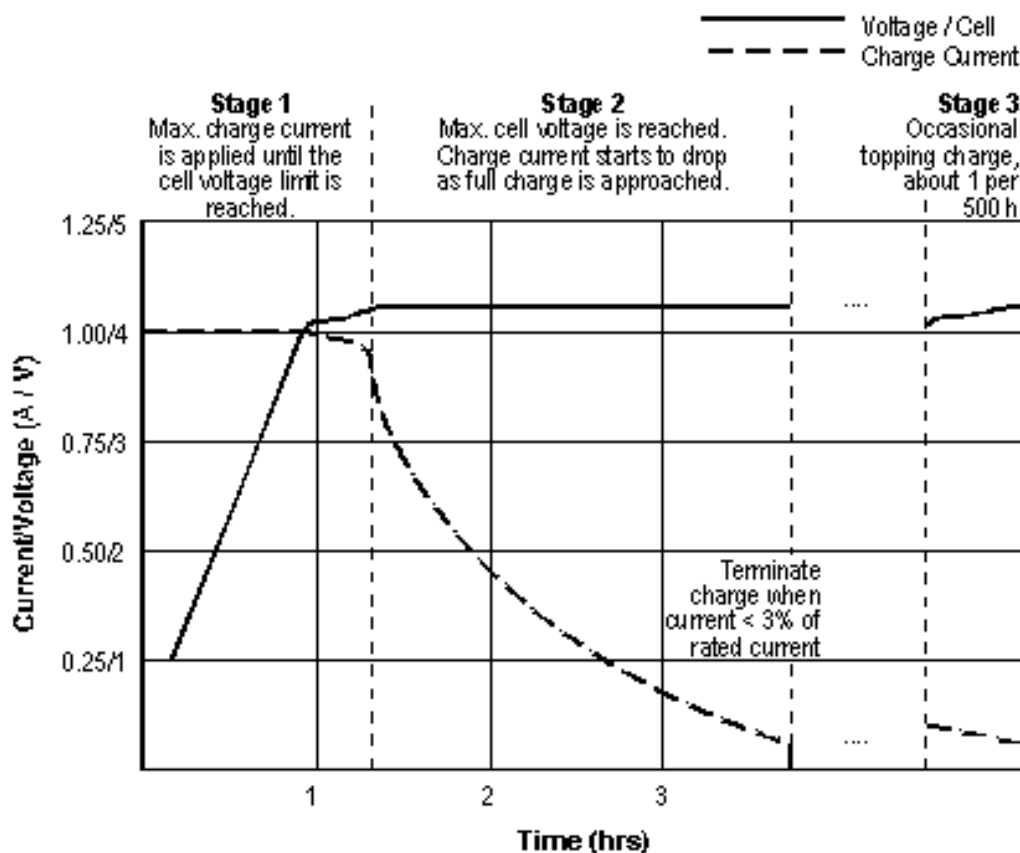
Lithiumbatterier kendes primært fra elektronikprodukter, hvor der ses behov for en kompakt energikilde med høj kapacitet, så som bærbare computere, mobiltelefoner, digitale kameraer osv. Denne type batterier har i de senere år, grundet udvikling af teknologien, vundet indpas på anvendelsesområder, hvor andre batterityper før har domineret. Dette kunne være områder som f.eks. powertools eller elektriske plæneklippere. Denne anvendelsespopularitet må ses som en effekt af flere af denne batteriteknologis karakteristika som ses i tabel 2.1. Specielt energi- og effektdensiteten må anses som favorable punkter, når der tænkes i udviklingen af stadigt mere kompakte produkter, eller produkter hvor der ønskes mest mulig energi og effekt på mindst mulig plads, som i eksempelvis elbiler.

Batteritype	Li-ion
Maksimalt opnået effekt	Tiere af kW
Energidensitet (Wh/kg)	150-200
Effektdensitet (W/kg)	200-315
Levetid (Ladecykler - indtil 80% af oprindelig kapacitet) ²	1.000-10.000+
Lade/afladeeffektivitet (%)	~ 95
Selvafladning (%)	~ 1 pr. måned ³
Kapacitetstab (%)	~ 4 pr. år ⁴
Pris (Euro/kWh)	350-1.000

Tabel 2.1. Data på lithium-ion batteri[Nielsen, 2008][Divya og Østergaard, 2008,side 514][Kær, 2008,slide 12][Maxim Integrated Products, 2006].

2.2.1.1 Ladeproces

Til ladning af lithium-ion batterier anvendes en metode, hvor der lades med en konstant spænding på batteriet. Dette fungerer ved, at den anvendte lader er programmeret, sådan at batteriets spænding, under hele ladeforløbet, er det samme som batteriets nominelle spænding. Når batteriet er afladet, vil spændingen ligge under denne værdi og laderen vil derfor øge strømstyrken ind i batteriet, op til det højst tilladte for batteriet, i et forsøg på at nå den nominelle spænding. Efter en tidsperiode nås den nominelle spænding, og laderen vil derefter skrue ned for strømstyrken for at holde denne spænding. Dette kan ses på figur 2.10, hvor den anvendte ladestrøm A er angivet i C^5 .



Figur 2.10. Eksempel på ladecyklus for et lithiumbatteri[Buchmann, 2003c].

Som der ses på figuren 2.10, kan ladeprocessen deles op i 2 dele - Maksimal strømstyrke og konstant spænding. Under forløbet med maksimal strømstyrke er batteriets spænding under den angivende nominelle værdi. Dette vil laderen opfange, og forsøge at hæve spændingen ved at lade en maksimal ladestrøm løbe igennem batteriet. I det eksempel der er

²1 ladecyklus svarer til en fuld opladning efterfulgt af en 80% afladning

³Her er ikke medregnet tab til evt. sikkerhedskredsløb

⁴Ved opbevaring med 40 % kapacitet ved 25°C

⁵1C betyder at et 1 Ah batteri lades eller aflades med 1 A, hvilket resulterer i en lade/afladetid på en time. Ved 0.5C lades med den halve strømstyrke hvilket resulterer i en fordoblet lade/afladetid, og ved 2C lades med den dobbelte strømstyrke hvilket resulterer i en halveret lade/afladetid osv.

vist på figur 2.10, er ladestrømmen $1C$ indtil den nominelle spænding er nået. Efter dette førstetrin af ladeforløbet, vil batteriet være opladet til omkring 70% [Buchmann, 2003c].

I 2. trin af ladeforløbet, holdes den opnåede førstetrin opnåede spænding konstant, under hele forløbet. Dette gøres ved, gradvist at sænke strømstyrken ind i batteriet, indtil denne når under 3% af den i første trin anvendte C -værdi, her anses batteriet som fuldt opladet og ladeprocessen afbrydes. Tidsmæssigt er 2. del af ladeprocessen generelt dobbelt så tidskrævende som 1. del [Buchmann, 2003c].

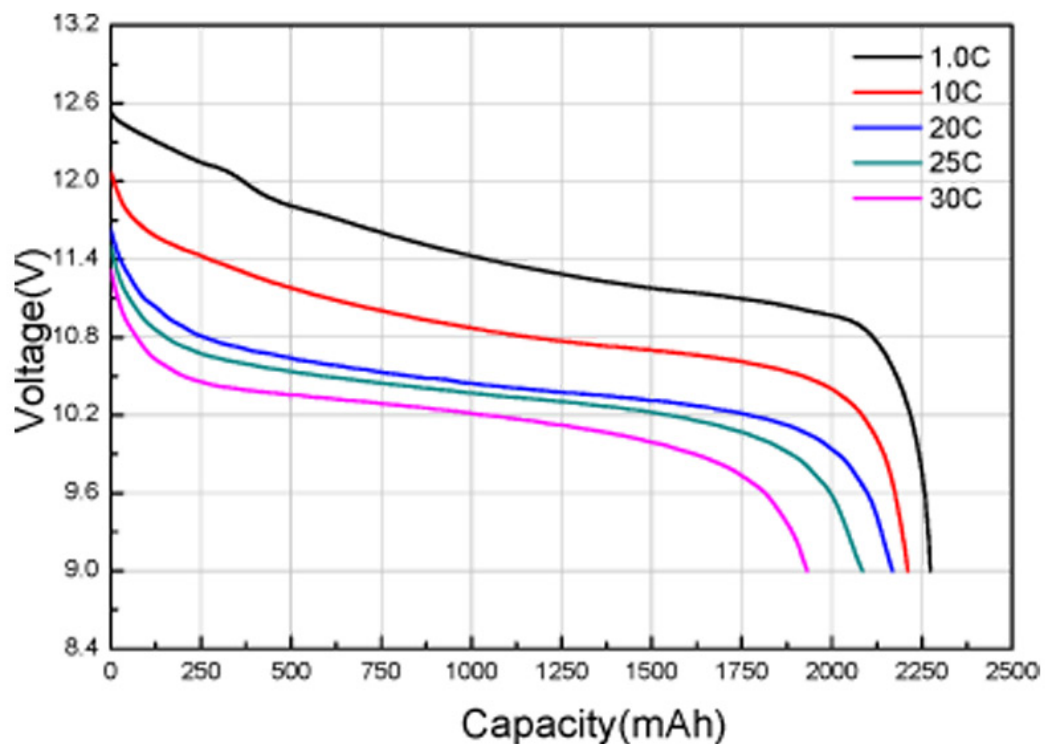
I forbindelse med opladningen af lithiumbatterier er det yderst vigtigt ikke at overstige batteriets nominelle spænding, idet denne type batterier har en meget lav tolerance for overspænding, omkring $0,05V$ per celle. Ladning over denne spænding vil gøre batteriet ustabilt, og kan i værste fald medføre eksplosion eller at batterier bryder i brand. Dette er også grunden til, at batterierne kun lades med maksimal strømstyrke, indtil den nominelle spænding er opnået, og derefter gradvist sænker den, da andet ville kompromittere sikkerheden. Endvidere indbygges et sikkerhedskredsløb oftest i sådanne batteripakker. Dette har til funktion at afbryde en evt. forbindelse mellem batteri og hardware, hvis batteritemperaturen overstiger et indprogrammeret punkt.

Som det også ses på figur 2.10 på forrige side, er der nævnt et muligt 3. trin i ladeprocessen, et vedligeholdelsestrin der har til funktion at sikre at batteriet er konstant fuldt opladet. Pga. den lave selvafladning nævnt i tabel 2.1 på side 26 anses dette trin dog som værende unødvændigt, hvilket også er grunden til det høje interval for dette trin i figuren.

2.2.1.2 Afladning

Den tidligere nævnte C-værdi har stor indflydelse på batteriets driftstid under afladning, idet denne teoretisk falder lineært med stigningen af C-værdien, eksempelvis vil driftstiden for en kontinuert 30C-afladning være reduceret fra en time ved en 1C-afladning til 2 minutter. Som det ses på figur 2.11, har den anvendte C-værdi under afladning, også indflydelse på den kapacitet batteriet vil være i stand til at levere. Tages der udgangspunkt i den specifikke batteritype fra figuren, ses det at kapacitetsforskellen mellem en 1C-afladning og en 30C-afladning er:

$$100 - \frac{1900mAh}{2250mAh} = 15,6\% \quad (2.12)$$



Figur 2.11. Afladekurve for et 2,2 Ah lithiumbatteri ved forskellige strømstyrker [www.milehighrc.com, 2009].

Hvis der opstilles en case, hvor en elbil kører under følgende forhold:

- 2·36 km kørsel pr. dag
- Holder en gennemsnitsfart på 70 km/t
- Der køres 6,4 km pr. kWh[Praem, 2009]

således at den totale køretid pr. dag er:

$$\begin{aligned}
 \text{Total kørselstid} &= \frac{2 \cdot 36 \text{ km}}{70 \frac{\text{km}}{\text{t}}} \\
 &= 1,03 \text{ timer} \\
 &= 1 \text{ time } 1 \text{ minut og } 48 \text{ sekunder}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

og den brugte effekt er:

$$\frac{72 \text{ km}}{6,4 \text{ km kWh}} = 11,25 \text{ kWh}
 \tag{2.14}$$

Med udgangspunkt i, at et lithiumbatteri med samme kapacitet som det anvendt i Tesla Roadster, nævnt i apendiks A på side 73 vil der blive gennemregnet følgende for køretøjet:

- Driftstid pr. opladning
- Driftsradius pr. opladning
- Gennemsnits C-værdi under nævnte kørselsforhold
- Batterivægt krævet for at understøtte kapacitet til en uges kørsel

$$\begin{aligned}
 \text{Driftstid pr. opladning} &= \frac{53 \text{ kWh}}{11,25 \text{ kWh}} \\
 &= 4,71 \text{ driftsdage} \\
 &= 1,03 \text{ timer} \cdot 4,71 \\
 &= 4,85 \text{ timer} \\
 &= 4 \text{ timer } 51 \text{ minutter } 5 \text{ sekunder}
 \end{aligned}
 \tag{2.15}$$

eller

$$4,85 \text{ timer} \cdot 70 \frac{\text{km}}{\text{t}} = 339,5 \text{ km}
 \tag{2.16}$$

Svarende til en C-værdi på:

$$\frac{1 \text{ time}}{4,85 \text{ timer}} = 0,21 \text{ C}
 \tag{2.17}$$

Ved en energidensitet på 200 Wh pr. kg ifølge tabel 2.1 på side 26 kræves der:

$$\frac{4850 \text{ Wh}}{200 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} \cdot 7 = 169,25 \text{ kg batteri}
 \tag{2.18}$$

for at have batterikapacitet nok til en uge.

2.2.2 Bly/syre

Bly/syrebatterierne bruges i mange forskellige sammenhænge, hvor der er brug for et elektrisk lager. I nyere tid er det primært blevet brugt i applikationsområder hvor lagerfunktionen samt økonomien har været de primære fokuspunkter, og vægt ikke har haft en betydelig indflydelse. Det er f.eks. hospitalsudstyr og UPS-anlæg⁶. Batteriernes anvendes i dag i bilindustrien som bl.a. energikilde til de startermotorer der starter køretøjernes forbrændingsmotorer. Batterier har dog også været anvendt som primær energikilde i små elektriske køretøjer med forholdsvis kort aktionsradius så som Ellerten. Værdier og karakteristika for et bly/syrebatteri kan ses på figur 2.2.

Batteritype	Bly/syre
Maksimalt opnået effekt	Flere tiere af MW
Energidensitet (Wh/kg)	35-50
Effektdensitet (W/kg)	75-300
Levetid (Ladecykler ⁷ - indtil 80% af oprindelig kapacitet)	500-1.500
Lade/afladeeffektivitet (%)	~ 80
Selvafladning (%)	2-5 pr. måned
Kapacitetstab (%)	N/A
Pris (Euro/kWh)	50-150

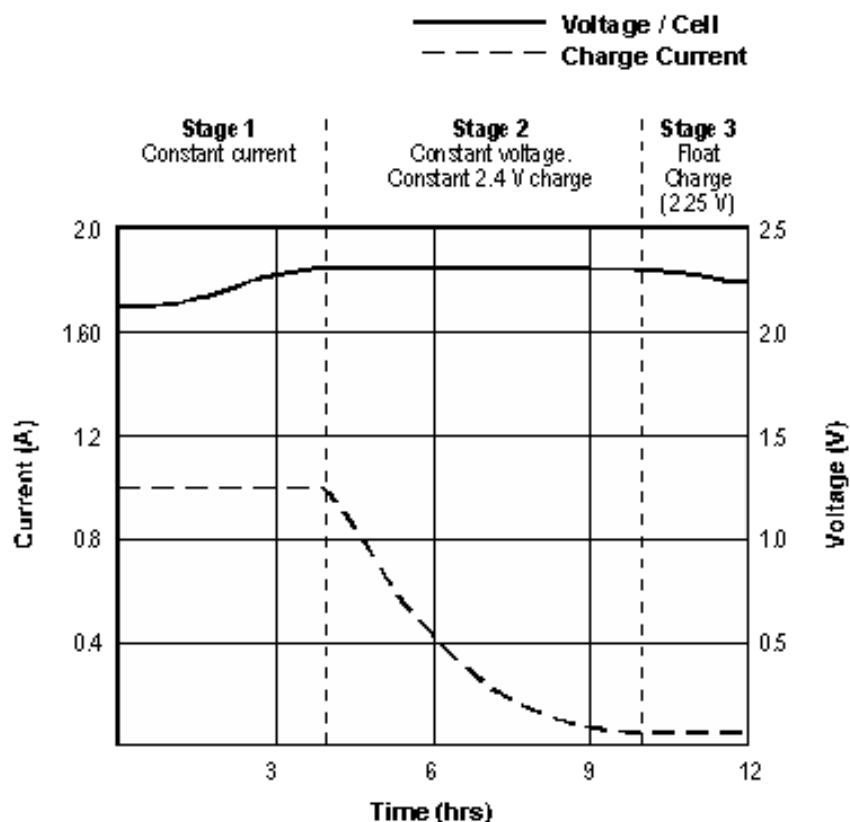
Tabel 2.2. Data på bly/syre batteri[Nielsen, 2008][Divya og Østergaard, 2008,side 514][Kær, 2008,slide 12].

⁶Uninterruptible Power Supply

⁸1 ladecyklus svarer til en fuld opladning efterfulgt af en 70% afladning

2.2.2.1 Ladeproces

Ladeprocessen for et bly/syre-batteri, er meget lignende den for lithiumbatteriet, hvilket eksempelvis ses ved at sammenholde figur 2.12 med figur 2.10 på side 27. Batteriet lades ligeledes vha. den opdelte ladeproces med en maksimal strømstyrke først, efterfulgt af konstant spænding. Til forskel fra lithiumbatteriet gøres der ved opladning af et bly/syre-batteri, reelt brug af det 3. ladetrin, hvor batteriet tilføres en såkaldt float-ladning der er mellem 0,05-0,2V lavere pr. celle end ladespændingen [Buchmann, 2003b]. Dette gøres for at udligne den selvafladning der vil være i batteriet. Endvidere har denne batteriteknologi en højere tolerance for overladning i forhold til lithiumteknologien [Buchmann, 2003a] - omkring 10-20 % [Linden, 1995].



Figur 2.12. Eksempel på ladecyklus for et bly/syre-batteri [Buchmann, 2003b].

2.2.2.2 Afladning

Med udgangspunkt i samme case som i afsnit 2.2.1.2 på side 29, dog med et bly/syre-batteri i form af et *Varta Ultra Dynamic* batteri på 12V og 95Ah[Varta] vil resultaterne se således ud:

$$\begin{aligned} \text{Batteriefekt} &= 12V \cdot 95Ah \\ &= 1,14kWh \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \text{Driftstid pr. opladning} &= \frac{1,14kWh}{11,25kWh} \\ &= 0,1 \text{ driftsdage} \\ &= 1,03 \text{ timer} \cdot 0,1 \\ &= 6,18 \text{ minutter} \\ &= \sim 6 \text{ minutter } 11 \text{ sekunder} \end{aligned} \quad (2.20)$$

eller

$$\frac{6,18min}{60min} \cdot 70 \frac{km}{t} = 7,21km \quad (2.21)$$

Svarende til en C-værdi på:

$$\frac{1 \text{ time}}{0,24 \text{ timer}} = 4,17 \quad (2.22)$$

Ved en energidensitet på 50 Wh pr. kg ifølge tabel 2.2 på side 31 kræves der:

$$\frac{4850Wh}{50 \frac{Wh}{kg}} \cdot 7 = 679 \text{ kg batteri} \quad (2.23)$$

for at have batterikapacitet nok til en uge.

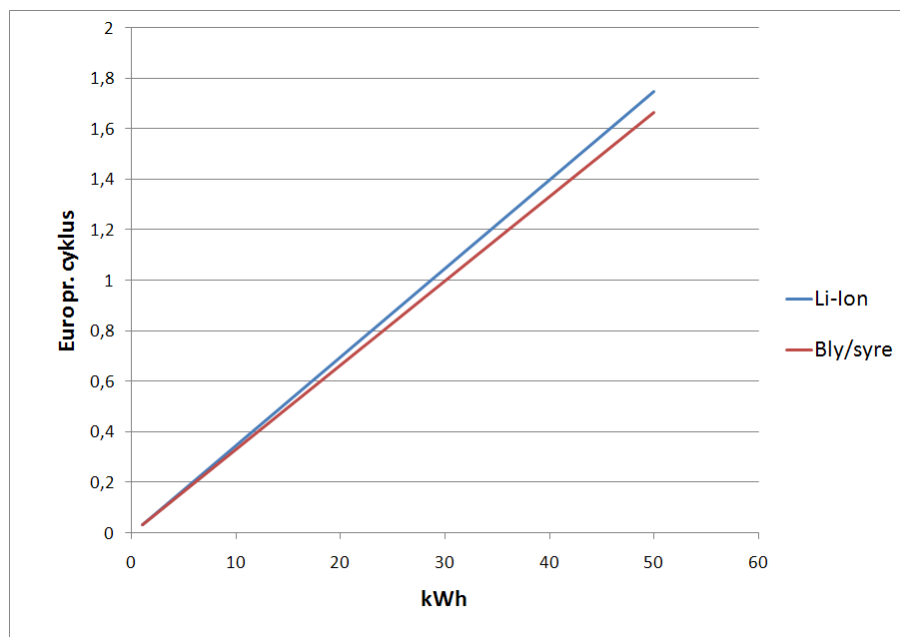
2.2.3 Sammenligning

Det ses ud fra ovenstående undersøgelser, at de to teknologier har lignende karakteristika bl.a. hvad angår ladeprocesser, samtidigt ses det at lithiumteknologien på en lang række områder er bly/syre-teknologien overlegen, som det også ses ud fra tabel 2.3 på side 35, specielt når der tænkes i anvendelsesområder som elbiler, hvor bl.a. lang levetid og energidensitet er vigtige punkter. Konsekvensen af energidensiteten blev beskrevet i

afsnit 2.2.1.2 på side 29 og 2.2.2.2 på forrige side hvor lithiumbatteriet skulle have en masse på 169,25 kg for at dække en uges forbrug i den opstillede case, mens der for bly/syre batteriet var krævet et 679 kg batteri. Dette vil have indflydelse på hvor vidt batteriet vil egne sig til anvendelse i en elbil, idet det må ses som optimalt med så stor batterikapacitet med mindst mulig masse. Punkter som pris pr. kWh og specielt sikkerhed, grundet behovet for sikkerhedskredsløb på lithiumbatterier, falder ud til bly/syre-teknologiens favør. Beregnes råprisen pr. cyklus for de to batteriteknologier med udgangspunkt i den længste opnåede levetid, samt den billigste pris pr. kWh ifølge tabellerne 2.1 på side 26 og 2.2 på side 31:

$$Pris \text{ pr. cyklus} = \frac{Antal \text{ kWh} \cdot Pris \text{ pr. kWh}}{Antal \text{ cyklusser}} \quad (2.24)$$

Bliver den økonomiske forskel mellem de to teknologier væsentligt reduceret, som det fremgår af bilag 9 og kan ses på figur 2.13.



Figur 2.13. Forskel i pris pr. cyklus for lithium- og bly/syre-batterier.

Da der i dette projekt arbejdes med fremstilling af prototypehardware til bl.a. batteriopladning, prioriteres punkter som batteritolerance og sikkerhed højt, da disse har indflydelse på personsikkerheden under anvendelse af den fremstillede hardware. Da de to batterityper, har lignende lade karakteristika ses det hensigtsmæssigt at anvende et bly/syre-batteri i testopstillingen, samt at anvende et 12 volts batteri i stedet for de 300V + batterier der anvendes i elbiler, igen af sikkerhedsmæssige hensyn.

Batteritype	Bly/syre	Li-ion
Maksimalt opnået effekt	Flere tiere af MW	Tiere af kW
Energidensitet (Wh/kg)	35-50	150-200
Effektdensitet (W/kg)	75-300	200-315
Levetid (Ladecykler)	500-1.500	1.000-10.000+
Lade/afladeeffektivitet (%)	~ 80	~ 95
Selvafladning (%)	2-5 pr. måned	~ 1 pr. måned
Kapacitetstab (%)	N/A	~ 4 pr. år
Pris (Euro/kWh)	50-150	350-1.000
Tolerance for overladning	Høj (10-20 %)	Lav (~ 0,05V pr. celle)
Sikkerhed (Overophedning)	Termisk stabilt	Stabilt indtil 150-250°C afh. af kemi (Sikkerhedskredsløb anbefalet)

Tabel 2.3. Data over bly/syre- og lithium-ion batterier [Nielsen, 2008][Divya og Østergaard, 2008, side 514][Kær, 2008, slide 12][Buchmann, 2003a].

2.2.4 Konstruktion af batterilader

Når et batteri skal oplades, stiller det en række krav til den anvendte oplader og ladeproces som det bl.a. kom til udtryk i afsnit 2.2 på side 25. Dette kan opnås ved anvendelse af et intelligent kredsløb, der er i stand til at registrere og tage højde for disse forhold. Dette kredsløb ville gennem en procedurerække, kunne garantere en sikker og optimal opladning af det anvendte batteri. Et eksempel på en sådan procedurerække vil blive givet nedenfor:

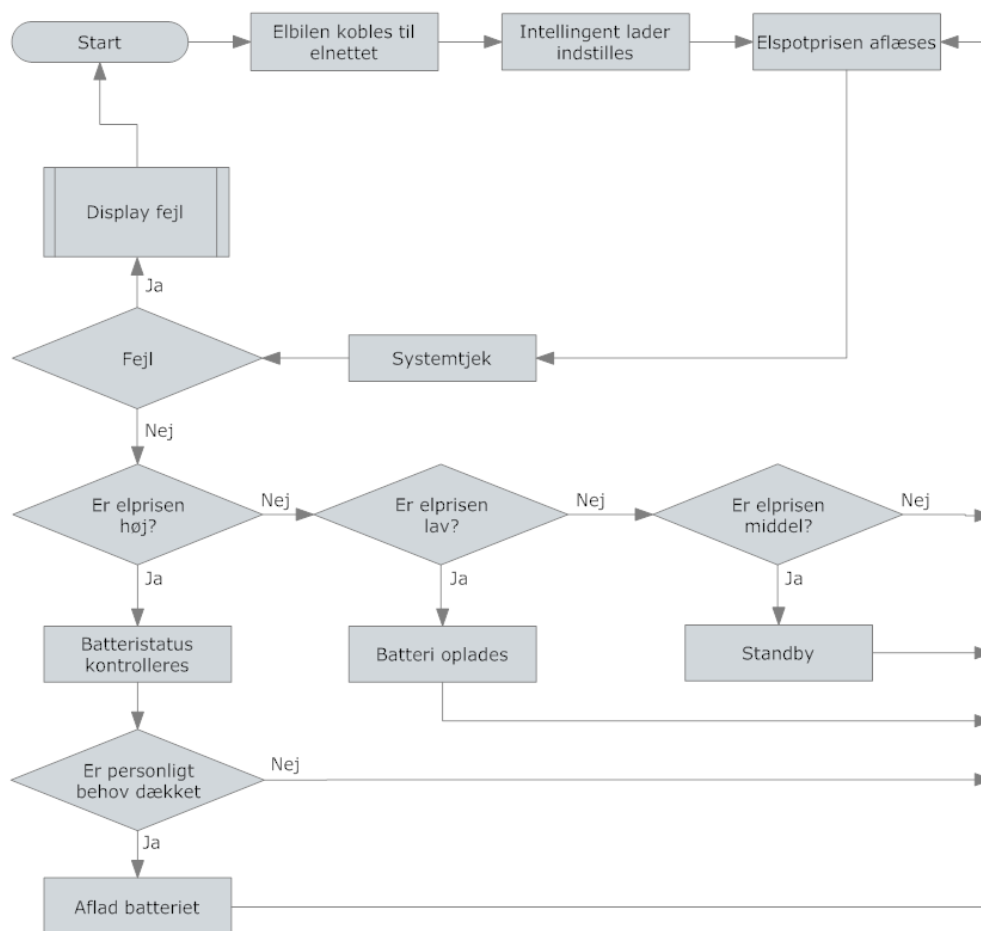
1. **Under opstart** undersøger laderen om der er isat batteri på ladepolerne, ved at måle om der er spænding over disse. Er dette tilfældet fortsættes der med den efterfølgende procedure i rækken, hvis ikke, søges der kontinuerligt indtil et batteri registreres. Det kunne evt. tilføjes at laderen automatisk slukkede efter en given tid uden registrering af batteri.
2. **Et battericheck** initialiseres, hvor batteriets vitale data måles. Her tænkes det på data som temperatur for batteri og evt omgivelser, pol og eller celledspænding samt eventuelle fejl mm. Først måles batteriets basale funktioner for at opdage eventuelle fejl. Hvis fejl konstateres, meldes fejl og procedurerækken stoppes. Konstateres ingen fejl måles batterikapaciteten. Er batteriet fuldt opladet, springes der direkte til sidste procedure i rækken, er dette ikke tilfældet startes ladeproceduren.
3. **Under opladning** vil laderen lade på det anvendte batteri i henhold til dets ladekurve som eksempelvis figur 2.10 på side 27, og som er beskrevet i afsnit 2.2.1.1 på side 27. Under hele ladeprocessen vil der udover de essentielle værdier for ladekurven, blive målt på batteri/celleteperatur samt omgivelsestemperatur, for at sikre at batteriet ikke overophedes og derved skades. Nærmer batteritemperaturen sig et kritisk niveau, kunne det tænkes at laderen kunne sænke den anvendte ladestrøm, for på den måde at nedbringe temperaturen. Der kunne også tænkes i at indbygge et fejlsikringssystem der ville have til opgave at afbryde ladeprocessen f.eks. i tilfælde

af svigt i førnævnte sikkerhedsforanstaltning.

4. **Afslutningsvis** skal laderen måle og meddele hvornår batteriet er fuldt opladet, samtidigt skal laderen være i stand til at batteriet kan blive siddende i laderen efter endt opladning uden risiko for overopladning og derved skade batteriet.

Alle underlæggende procedurer kører kontinuert med, at næste procedure i rækken initialiseres.

Dette kunne se ud som på figur 2.14.



Figur 2.14. Eksempel på flowchart over intelligent lader.

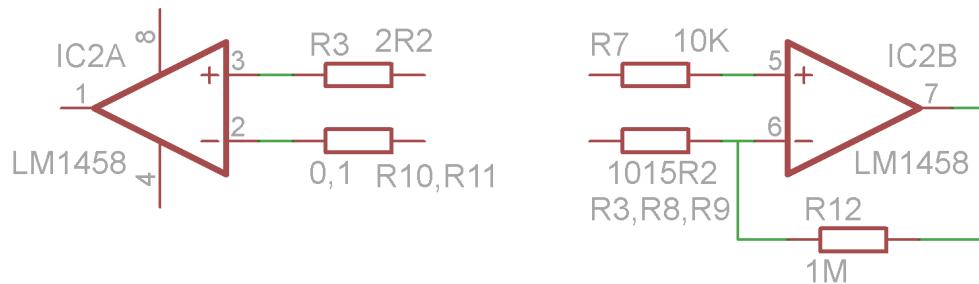
Batteriladeren som er vist på figur 2.16 på side 38[Hamer, 2001], lader med en konstant strøm indtil polspændingen på batteriet er 14,1 V. Herefter falder ladestrømmen automatisk til under 0,1 A og derefter falder spændingen til et lavere men mere sikker spændning for batteriet på 13,6 V, præcis som beskrevet om batteriladeren i afsnit 2.2 på side 25.

2.2.5 Design af batteri lade styring

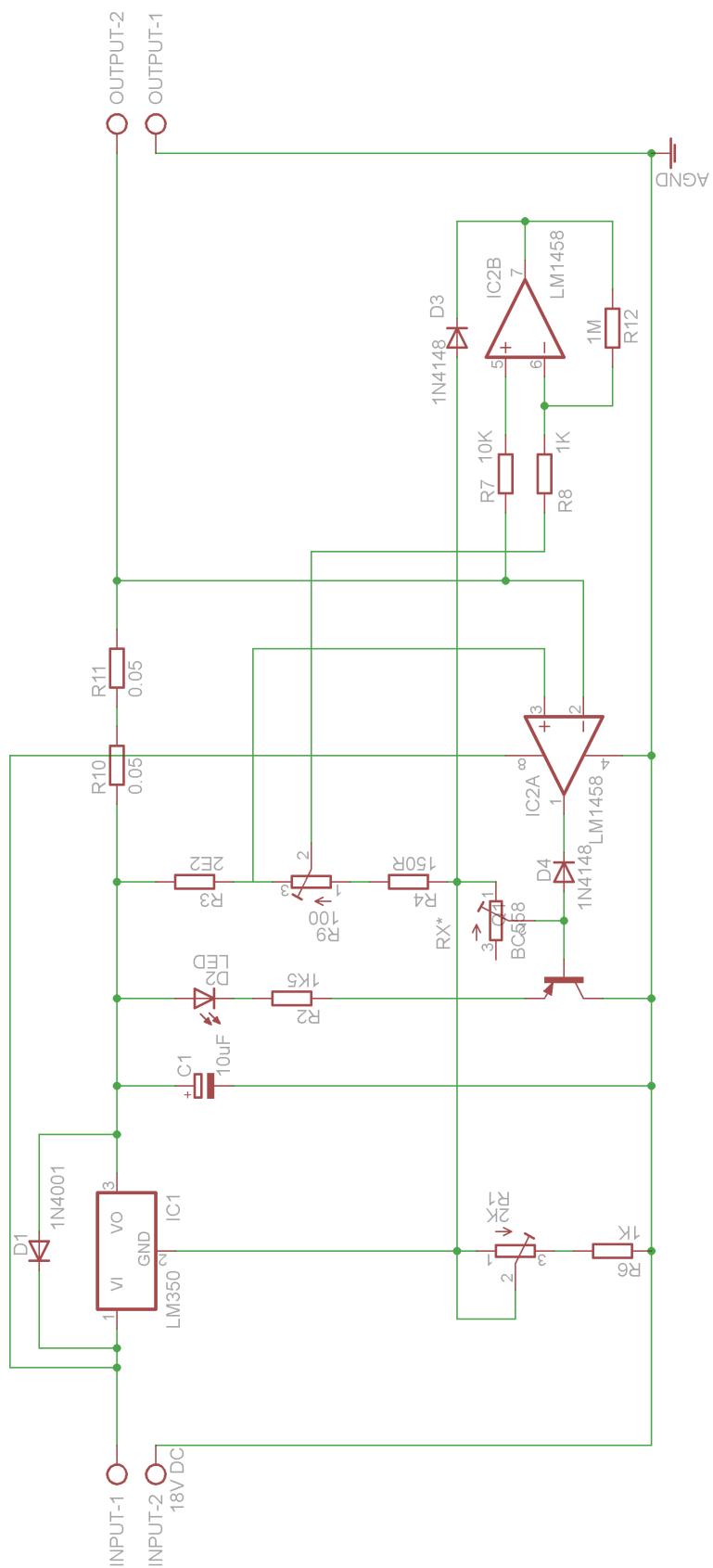
Der bliver brugt en LM350 i batteriladeren. Denne LM350 er en spændingsregulator som altid holder et spændingspotential på 1,25 V mellem output og justeringsbenet, som er forklaret i bilag 3. Dette er vist på diagrammet i figur 2.16 på den følgende side, også kaldet henholdsvis punkt B og C. Ved at tilføje modstande mellem justeringsbenet og stelpunktet, kan outputspændningen hæves.

For at beskytte batteriet, og forlænge dens levetid, begrænses ladestrømmen på batteriet. Dette gøres ved den højre halvdel af LM1458 operationsforstærkeren, som ses på figur 2.15 sammen med modstandene R10,R11 og R3,R9. Operationsforstærkerens virkemåde er beskrevet i databladet i bilag 4. Når der lades på et batteri, opstår der et spændingsfald over R10,R11, som afhænger af ladestrømmen. Når dette spændingsfald er større end spændingsfaldet over R3 og midterbenet, vil der løbe en lille strøm gennem D3, hvilket vil bevirke at der løber en mindre strøm gennem modstandene R1,R9. Dermed begrænser LM350 kredsen strømmen, hvilket kan justeres på R9.

Når strømmen løber gennem den kombinerede 0,1 ohms modstanden R10,R11, opstår der et spændingsfald over modstanden. Så længe spændingsfaldet; skyldet strøm-flowet, over modstanden R10,R11 er større end spændingsfaldet over R3 vil LM1458's output forblive høj. Men så snart ladestrømmen falder til et niveau under 109 mA, vil spændingsfaldet over R10,R11 blive lige så stor som spændingsfaldet over R3, og i samme sekund som dette sker, vil den venstre del af operationsforstærkeren LM1458, se figur 2.15 til venstre, output blive lav, og derved kan transistoren BC558 lade en strøm løbe fra collector til base, hvorefter lysdioden tænder og der indikeres at opladningen af det tilsluttede batteri er færdig.



Figur 2.15. Viser de to operationsforstærkere i kredsløbet. Dette diagram er et udsnit af figur 2.16 på den følgende side.



Figur 2.16. Diagram over batteri lade stying.

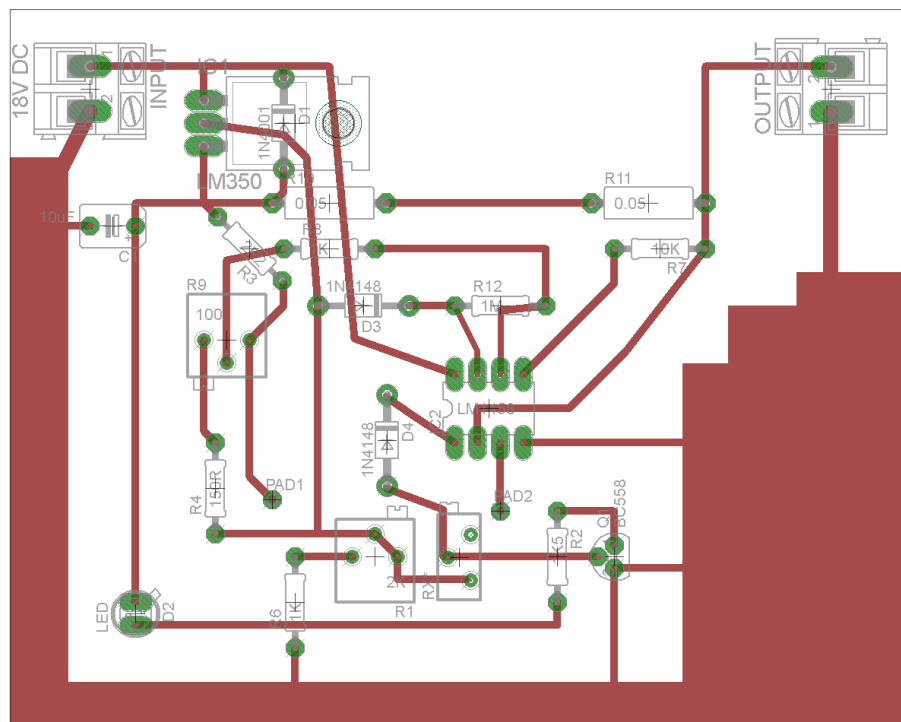
2.2.5.1 Justering af print

For at indjustere denne batterilader er der 5 mindre trin der skal gennemgås. Disse er beskrevet nedenfor. Det hele er justeret med et multimeter.

For at undgå at beskadige IC LM1458 fjernes denne fra soklen mens justeringerne finder sted.

Når der ikke er tilkoblet et batteri til laderen, vil der ikke løbe nogen strøm igennem 0,1 ohms modstanden og derfor vil output blive lav. Batterilader printudlægget ses på figur 2.17.

1. Tilslut multimeteret til output + og - (batteri tilslutning) og juster 2K ohm trim-potten således at output bliver 14,1 V.
2. Sluk for inputspændingen og aflad kondensatorne.
3. Placer forsigtigt IC LM1458 i soklen, og se efter at alle ben sidder som de skal.
4. Tænd nu for inputspændingen påny, og juster RX trimpotten således at output nu er 13,6 V præcist.
5. Juster så 100 ohms trimpotten, således at den bliver indstillet til den maksimale modstand. Stil multimeteret til ampere DC. Herefter tilsluttes batteriet (ikke et helt opladet batteri) og trimpotten skrues ned indtil strømstyrken er 0,1 gange batteri kapaciteten.



Figur 2.17. Printudlæg til batteri lade.

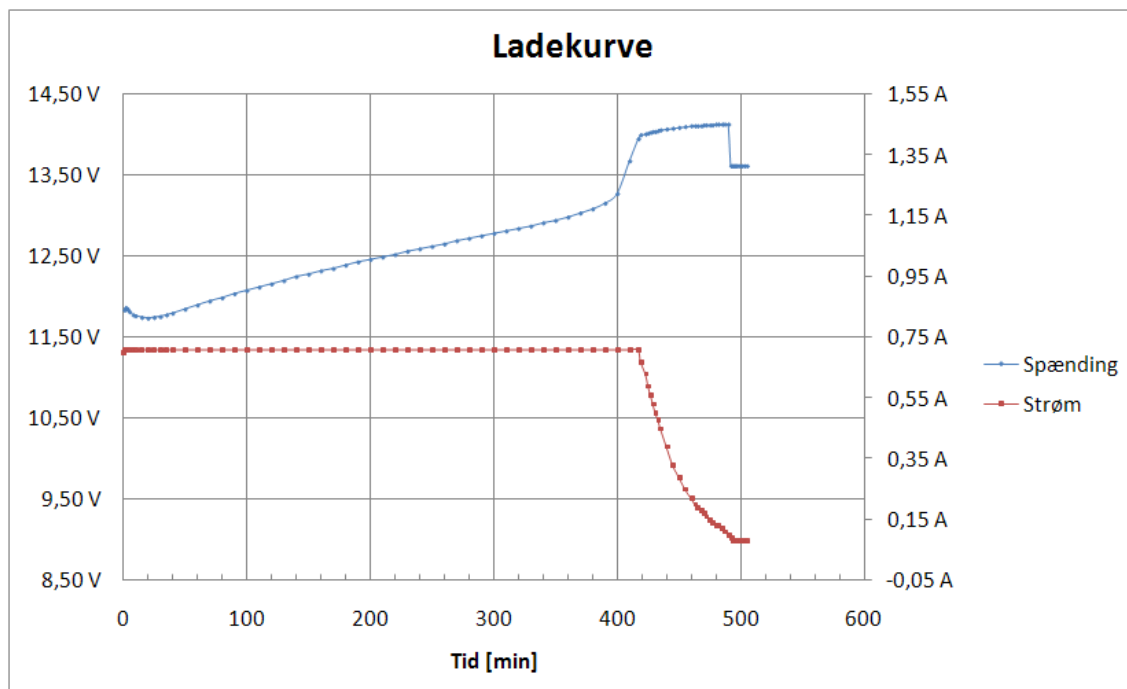
2.2.5.2 Test

Første test: Batteriladerprintet bliver påtrykt med en spænding på 18V, og bliver testet jævnfør afsnit 2.2.5.1 på foregående side. Billeder af prototype batteriladeren ses i bilag 6.

Punkt 1-4 gennemgås ret hurtigt og uden problemer, men da ladestrømmen til batteriet skulle justeres ind i henhold til punkt 5 på listen, reagerede styringen ikke på dette. Ifølge mærkningen af batteriet og i henhold til punkt 5, skulle batteriet lades med en strøm på 0,7A, men blev ladet med 1,4A, da den 100 ohms trimpot ikke kunne justeres ind. Ladningen af batteriet stoppes kort efter for at beskytte batteriet og kredsløbet.

Efterfølgende blev der fejlsøgt på fremgangsmåde og ligeledes på kredsløbet. Der kunne konkluderes efter gennemgang af diagrammet, at i tilfælde af batteriet bliver tilkoblet kredsløbet inden dette påtrykkes med en forsyningsspænding på 18V, ville der løbe en strøm gennem den venstre del af IC LM1458 og derved bliver denne kortsluttet. IC'en udskiftes med en ny og testen startes på ny.

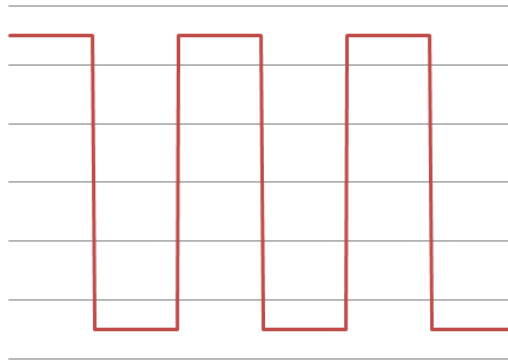
Anden test: Batterilader printet bliver påny påtrykt med en spænding på 18V, og bliver testet jævnfør afsnit 2.2.5.1 på forrige side. Igen gennemgås punkt 1-4 hurtigt og præcist. Forsyningsspændingen til laderkredsløbet fjernes ikke, og der er stor opmærksomhed på at hvis den skal fjernes, skal batteriet altid være frakoblet inden forsyningen slukkes. Ved at følge punkt 5, er det nu muligt at indjustere ladestrømmen som batteriet bliver ladet med. De data som blev logget under ladningen af batteriet, er plottet ind i en graf og lade kurven ses på figur 2.18. Grafen viser hvordan der lades med en konstant strøm indtil spændingen når et niveau på 14,1V, hvorefter ladestrømmen begynder at aftage. Når ladestrømmen kommer ned på 0,1A falder spændingen igen til 13,6V hvorefter opladningen stopper.



Figur 2.18. Ladekurve fra forsøg. Se data i bilag 1.

2.3 Vekselretter

En vekselretter er en betegnelse for et elektronisk kredsløb, som omsætter en jævnspænding til en vekselspænding. Dette kan være en ægte sinuskurvet-vekselretter, hvor udgangskurven er på 50Hz, eller det kan være en modificeret vekselretter, hvor udgangen skiftevis er positiv og negativ. Selve formen på kurven kan variere mellem et antal af former, f.eks. firkantformet som vises på figur 2.19, der er interessant da den er en tilnærmelse af en sinuskurve.



Figur 2.19. Eksempel på firkantkurve.

Vekselretteren er det sidste led før elnettet, og derfor vil det være her, hvor den sidste tilpasning af vekselspændingen sker.

Til en vekselretter kommer der en jævnstrøm eller en jævnspændning. I hvert tilfælde er det vekselretterens opgave at sikre at netfrekvensen og -spændingen er korrekte.

De forskellige typer af vekselrettere arbejder alle på forskellige måder, men deres opbygning er i princippet altid ens, hvor der bliver brugt styrende halvledere og i tilfælde af tre-faset vekselretning, er disse placeret parvis i tre grupper.

Meget forenklet består en vekselretter af seks transistorer og seks dioder [Danfoss A/S, 1998]. Ved en 3-faset vekselretter, hvor det er styringen af transistorerne der er vanskelig.

I dag anvendes vekselretteren f.eks. som frekvensomformer, hvor den er det sidste led inden motortilslutningen. Til styringen af vekselretteren i en frekvensomformer, benyttes et styringskredsløb kaldet mellemløbet. Dette kredsløb slår halvlederne til og fra på de rigtige tidspunkter efter forskellige principper, hvorved outputfrekvensen ændres. I en frekvensomformer styres switchmønsteret af størrelsen af den variable strøm eller spænding i mellemkredsløbet. I en styring der gør brug af en variabel spænding vil frekvensen følge spændingens amplitude. Dette kaldes PAM⁸.

Et andet princip kaldet PWM⁹, virker ved at spændingen fra mellemkredsløbet er fast, og motorspændingen gøres variabel ved at sende mellemkredsspændingen videre til motoren, men i kortere og længere tidsperioder.

⁸Pulse-Amplitude-Modulation

⁹Pulse-Width-Modulation

2.3.1 Design af 1-faset vekselretter

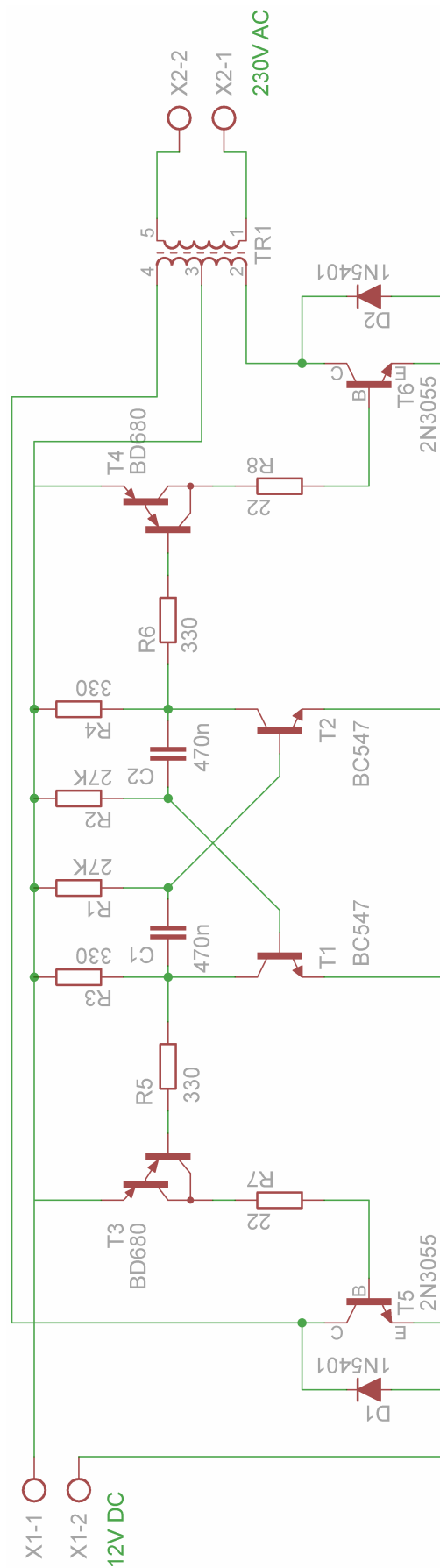
Det følgende er et eksempel på en vekselretter som konvertere en 12V DC spænding til 230V firkantspænding, som skulle minde om netspændingen. Diagrammet til dette eksempel ses på figur 2.20 på næste side, og er opbygget af komponenterne som er listet i appendiks B på side 77. Denne vekselretter er opbygget af 3 dele: En AMV¹⁰, som sender et PWM signal ud til effektdelen, som forstærker det PWM-signal som kommer fra AMV'en. Dette signal transformeres op af en transformer, så spændingen kommer til at passe med netspændingen. Der er i princippet ikke noget i vejen for, at sende en højre spænding ind i kredsløbet, og dermed kunne undgå at bruge en transformer til at transformere spændingen op, men dette vil kræve komponenter, der kan holde til den højere spænding, og disse komponenter er kostbare, og dette system med en transformer viser princippet. AMV'en har 2 udgange; collectorbenet på henholdsvis T1 og T2. Disse 2 udgange styrer henholdsvis den højre og venstre effektdel. AMV'en fungerer sådan, at den skiftevis går høj på collectorbenet T1 og T2. Når collectorbenet på T2 er høj, vil C2 aflade via R2 og R4 gennem basis-emitter på T1. Dette betyder, at der er gennemgang i collector-emitter, hvilket gør, at C1 oplades gennem R3 og R1. I denne periode er collectorbenet lav. Denne afladning sker, så længe at C2 kan opretholde en basis-emitter for T1 på over 0,6-0,7V. Når denne spænding ikke længere opretholdes, lukker gennemgangen mellem collector-emitter på T1, hvilket betyder, at collectorbenet går høj, og C1 begynder at aflade gennem basis-emitter på T2. [Hansen, 2001].

Dette PWM-signal bliver sendt ud til effektdelen, via henholdsvis T3 og T4, som begge er en Darlington strømforstærker. Darlingtonkredsen forstærker strømmen ned til T5 og T6, som skiftevis har åbent for gennemgang i hver af de primære sider af transformeren. Dette gør; da strømmen skiftevis løber hver vej, fra det midtersteben på transformeren, at der fås en skiftevis positiv og negativ spænding på udgangen.

Frekvensen på udgangen styres af AMV'en. Denne frekvens beregnes vha. denne formel[Hansen, 2001]:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{0,7(C1 \cdot R1 + C2 \cdot R2)} \\ &= \frac{1}{0,7(470nF \cdot 27k\Omega + 470nF \cdot 27k\Omega)} \\ &= 56 \text{ Hz} \end{aligned} \tag{2.25}$$

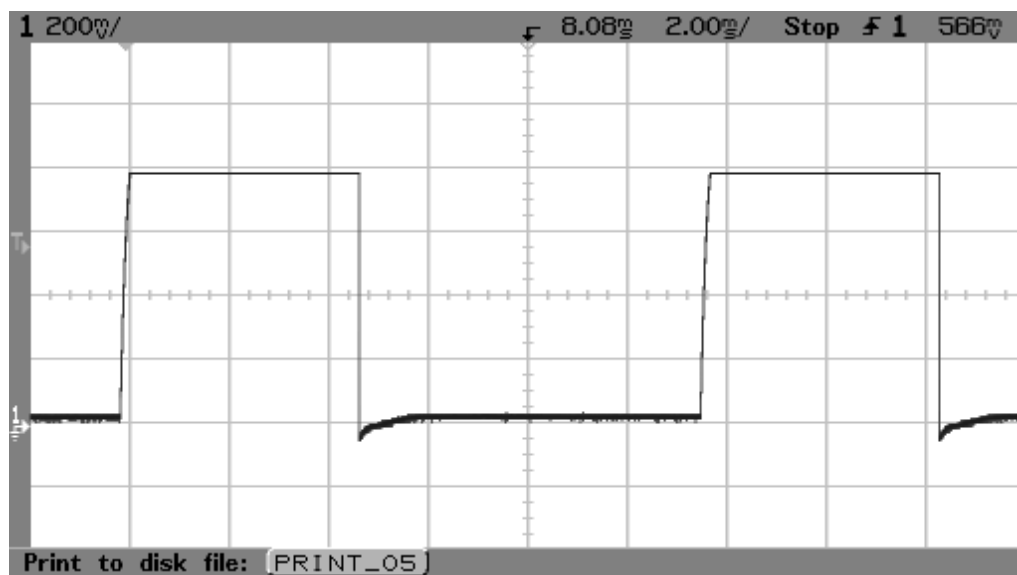
¹⁰astabil multivibrator



Figur 2.20. Diagram over veksleretter.

2.3.1.1 Test

Prototypen af vekselretteren blev udformet på hulprint, som vist på bilag 7. Ved testen af vekselretteren blev spændingen målt på output på sekundærsiden på transformeren. Denne spænding blev målt til at være $>1V$, med en frekvens på 21 kHz. Derefter blev transformeren afmonteret fra printet, og udgangssignalet fra AMV'en blev målt. Udgangssignalet fra AMV'en kan ses på figur 2.21.



Figur 2.21. Udgangssignalet for AMV'en på T1's collectorben.

Frekvensen på firkantspændingen fra AMV'en beregnes:

$$\begin{aligned} f_{AMV} &= \frac{1}{T} \\ &= \frac{1}{12 \cdot 10^{-3}} \\ &= 83 \text{ Hz} \end{aligned} \tag{2.26}$$

Som beregnet i beregning 2.25 på side 42, skulle den teoretiske frekvens for systemet være 56 Hz, men den målte frekvens var 83 Hz. Denne frekvensforskel er dog for stor til at komponent tolerancen kan forklare den. Frekvensforskellen kan forklares ved fejl i monteringsfasen.

2.4 Styringssoftware - SoftCharge v.1.0 Beta

Til prototypehardwaren er der ligeledes blevet udviklet en betaversion af et stykke software, der er i stand til at overvåge, samt kontrollere op-/afledning og drift af et batteri. Softwaren er programmeret i LabView fra National Instruments, grundet tilgængeligheden af dataopsamlingsudstyr¹¹, samt at denne software tilbyder en lettilgængelig opsætning af

¹¹Der er i dette projekt anvendt en USB-6215 DAQ

den synlige brugerflade. Netop den synlige brugerflade er i denne software højt prioriteret, idet den er tiltænkt som et bud på et færdigt produkt til anvendelse i f.eks. elektriske køretøjer. Softwaren er delt op i to dele, en overvågningsdel samt en styringsdel, som begge vil blive beskrevet i dette afsnit, både brugerflade og kode:

2.4.1 Overvågningsdelen

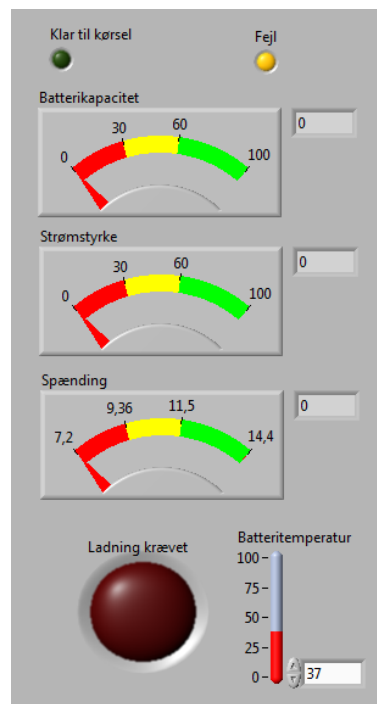
Den synlige brugerflade i overvågningsdelen, som ses på figur 2.22, er opbygget således at alle brugerrelevante informationer om det anvendte batteri er tilgængeliggjort på en let overskuelig måde. Brugeren bliver vist informationer i form af følgende data:

- Batterikapacitet
- Batterispænding
- Strømstyrke ind/ud af batteriet
- Batteriets overfladetemperatur

samt 3 tilstandslamper der indikerer:

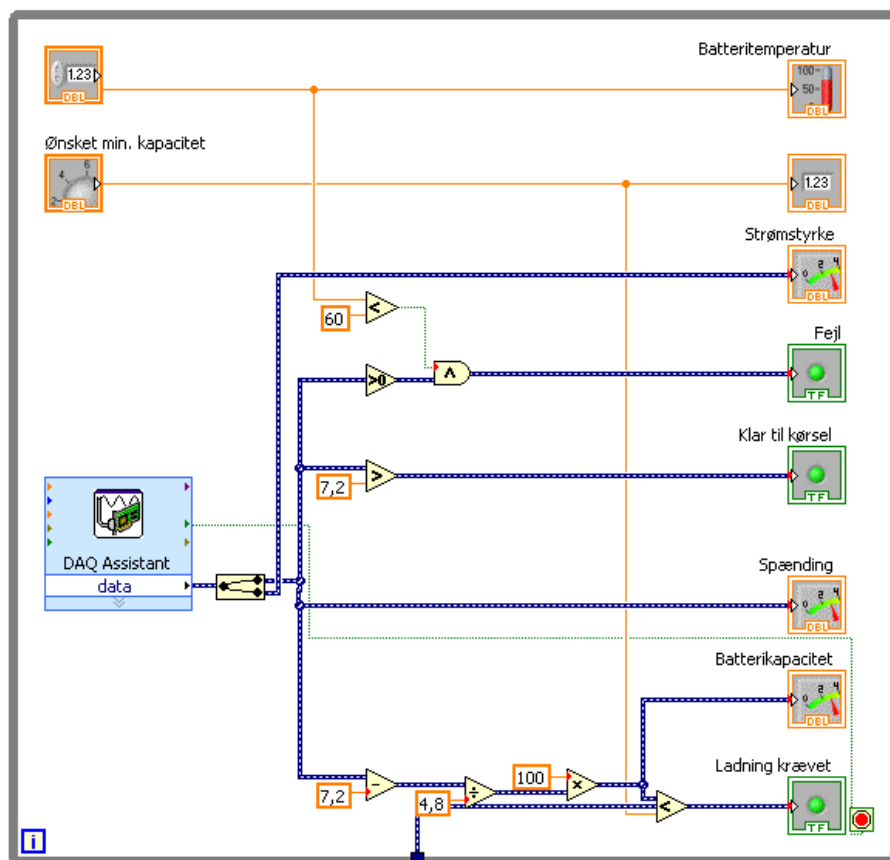
- Batteriet er klar til drift - Grøn
- Der er opstået en fejl i systemet - Gul
- En opladning af batteriet kræves - Rød

således at brugeren tilnærmes samme brugerfladefornemmelse, som det eksempelvis kendes fra et køretøj med forbrændingsmotor.



Figur 2.22. Brugerflade til overvågningsdel i SoftCharge v.1.0 Beta.

Koden til dette kan ses på figur 2.23. Her ses det, at USB-6215 DAQ måler spænding, strømstyrke samt temperatur fra batteriet. Disse data bliver vha. en DAQ-assistent sendt ud som input til de respektive displays, der afbilder dataene på brugerfladen. Batterikapaciteten bliver beregnet ud fra forholdet mellem den energi der blev tilført batteriet under sidste fulde opladning og den energi, der er blevet tappet siden da, med forbehold for den specifikke batteritypes lade-/afladeeffektivitet. Koden bag „Klar til kørsel“ undersøger om alle værdier for batteriet er sande, i dette tilfælde vil det sige, at der skal være et signal fra batteriet i form af spænding og strømstyrke, samt at batteriets temperatur er inden for det anbefalede driftsinterval. Hvis disse værdier er sande, vil lampen lyse. Hvis ikke systemet returnerer alle disse værdier som sande, vil det blive opfattet som en fejl i systemet og „Fejl“ vil lyse. „Ladning krævet“-lampen vil lyse hvis batterikapaciteten falder til under det indstillede minimum eller når batteriet når under 10% af kapaciteten.



Figur 2.23. Blokkode til overvågningsdel i SoftCharge v.1.0 Beta.

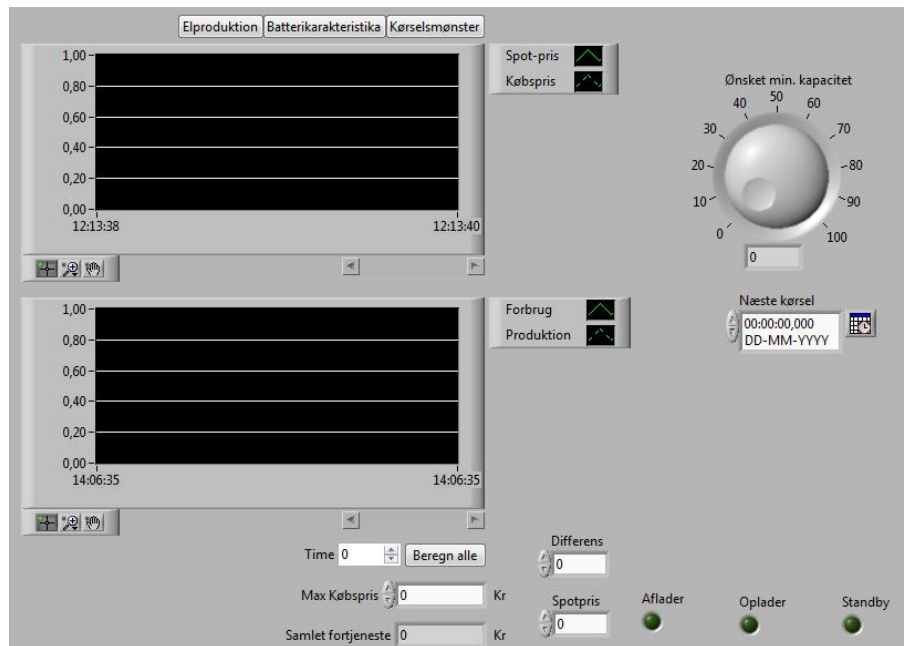
2.4.2 Styringsdelen

Den synlige brugerflade i styringsdelen, som kan ses på figur 2.24, giver mulighed for brugerbestemmelse af en række kriterier for op- og afladningsprocessen i form af:

- Ønsket minimums kapacitet
- Tidspunkt og dato for næste kørsel

således at brugeren er sikret en bestemt batterikapacitet på et ønsket tidspunkt. Endvidere er der ligeledes 3 tilstandslamper der har til funktion at informere brugeren om den igangværende drift af batteriet i form af:

- Lader
- Aflader
- Standby



Figur 2.24. Brugerflade til styringsdel i SoftCharge v.1.0 Beta.

Styringen af denne drift ses på figur 2.25 på den følgende side, og det skal bemærkes at i denne version, styres op- og afladningen af to konstanter, der repræsenterer elspotprisen, og den differens der er fra sidste opladning. Dette vil i en fremtidig version være erstattet af en algoritme, der beregner den minimale prisdifferens nødvendig for profit, på baggrund af karakteristika for batteriet som eksempelvis alder, kapacitet og husstandens stiktyper.

Udover disse funktioner, arbejdes der på i en senere version af softwaren at muliggøre en prisreguleret op- og afladeprocess, således at brugeren udover at indstille de to førnævnte funktioner, nu også kan indstille hvilken pris der maksimalt ønskes at betale pr. kWh, samt en live tilgang til elspotpriserne. Så længe prisen er under den indstillede værdi, vil der

The schematic diagram illustrates the control system for the DBL. The top section shows a high-level flow: **Spotpris** (input 1.23) feeds into a comparison block (less than), which then connects to the **Oplader** (charger) block. The **Oplader** output goes to the **Differens** (difference) block, which also receives a feedback signal from the **Standby** block. The **Differens** block output goes to a summing junction, which also receives a signal from the **Spotpris** block. The summing junction output goes to the **Aflader** (discharger) block. The **Aflader** output goes to another summing junction, which also receives a signal from the **Oplader** block. The final summing junction output goes to the **Standby** block. The bottom section shows two detailed views of the 'True' state, each containing a **Con_Voltage** block set to 10, connected to an **Analog DBL 1Chan 15amp** output.

2.5 Delkonklusion

48

V2G-teknologiens indpasning i den danske energisektor 3

3.1 Privatøkonomisk betragtning

Ideen om at udnytte batteriet i elbiler som et energilager og dermed øge fleksibiliteten af det danske elnet, kræver, hvis ikke lovmæssige forhold påbyder det, at der for ejeren af batteriet vil være ræsonnement i at stille akkumuleringsmuligheden til rådighed.

Dette ræsonnement kan være en økonomisk fortjeneste i form af en rådighedsbetaling fra elselskaberne, der sikrer batterierne en fast tarif, for den tid elbilen er koblet til elnettet. Dette giver elselskaberne en lagringskapacitet, som vil kunne bruges til op- og nedregulering, samt lagring af overløbsstrøm, når vindkraftproduktionen er høj. Således vil elselskaberne kunne bruge billig overløbsstrøm frem for dyr opreguleringsstrøm, når en opregulering er nødvendig. Fortjenesten, ved brug af overløbsstrøm til opregulering vil kunne betales som kompensation, i form af en fast tarif til batterierne.

Dette vil betyde, at elselskaberne kan leje en vis kapacitet af batterierne. Lejeprisen til batterierne vil kunne betales som rådighedsstillet kapacitet som en funktion af timer opkoblet til elnettet. Hvis fortjenesten ved at bruge bilbatterier som lagre, overstiger batteriernes slitageudgifter for batteriet, vil batterierne kunne høste en økonomisk gevinst.

Ifølge denne model vil batterierne være garanteret en fast tarif hver måned uanset det nationale forbrug og vindforhold, mens risici ved markedets uforudsigeligheder vil ligge hos elselskaberne.

Hvis batterierne derimod selv vil have mulighed for at spekulere i en fortjeneste ved køb og salg, kræver det kommunikation mellem den private hustand og elselskaberne. Det er i øjeblikket ikke muligt at sælge til elnettet, medmindre kapaciteten, der er til rådighed er minimum 10 MW. Dette vil kunne klares ved oprettelsen af et elbillaug, således at en større mængde elbiler har mulighed for at sælge på samme tid.

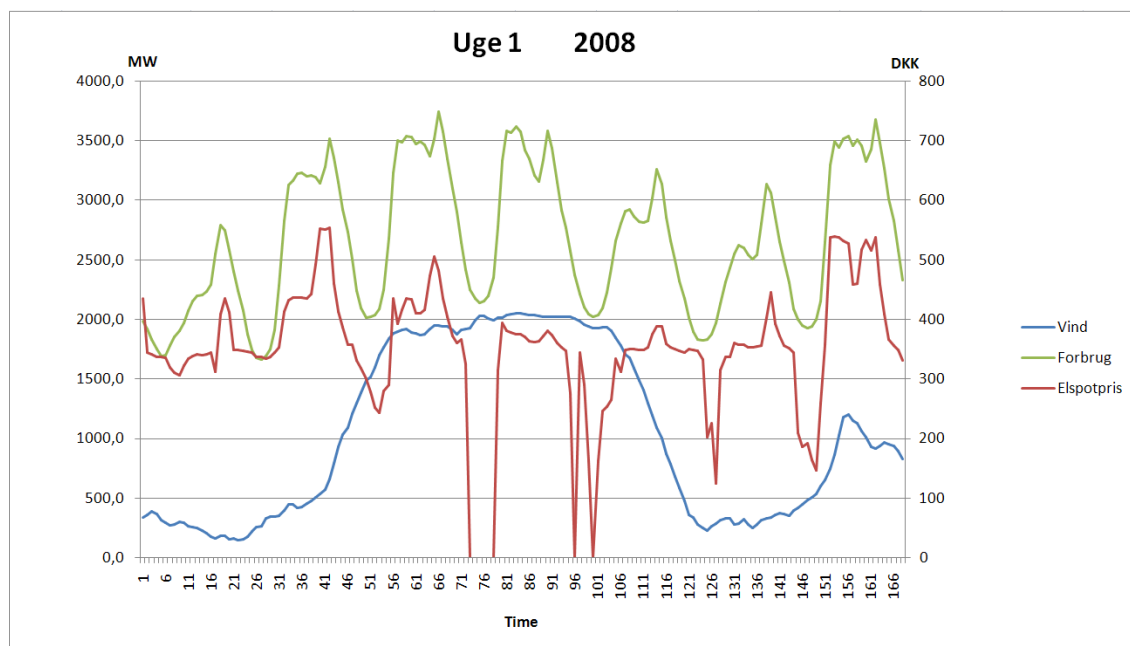
Derudover vil det nødvendigvis kræve en form for intelligent elmåling, således at

batteriejerne kan handle til den øjeblikkelige elpris, fremfor en fast tarif.

Under disse forudsætninger, samt at batteriejerne ikke favoriseres frem for andre på elspotmarkedet, vil det være muligt at planlægge op og afladnings tidspunkter det kommende døgn, sådan der opnås størst fortjenneste, kl. 16 hvor elspotpriserne offentliggøres. Hvis fluktuationerne på elprisen er tilstrækkelig store til at dække udgifter til slitage på batteriet, samt effekttab ved op og afladning, vil der for batteriejerne være et ræsonnement i at bruge deres batteri som ellager.

Det vil i praksis betyde et øget forbrug ved lave elspotpriser og en øget produktion ved høje elspotpriser. Idag er efterspørgselskurven for strøm meget lidt prisafhængig jf. kap. 1.4.2, men med differentieret elforbrug styret af elspotprisen gøres elspotprisens reguleringsevne på elmarkedet mere betydelig.

Figur 3.1 viser forholdet mellem elforbruget og elspotprisen i den første uge, januar 2008. Da elspotprisen og elforbruget er stærkt korreleret for januar 2008¹, vil forbruget stige i de timer hvor det før var lavt, og produktionen vil stige hvor forbruget er højt. Da en del af strømmen fra elnettet i højlastperioderne vil komme fra elbilerne, vil produktionen fra kraftanlæggene kunne reduceres i samme periode. Sammen med et øget forbrug i lavlastperioderne vil dette udglatte produktionskurven for kraftanlæggene i elsystemet.



Figur 3.1. Skema over vindproduktion, elforbrug og elspotprisen i uge 1 2008.

Af ovenstående figur fremgår sammenhængen mellem spotprisen og vindkraftproduktionen for første uge januar 2008. Benyttes elspotprisen som indikator for op- og afladningstidspunkter vil det medføre en lidt bedre indpasning af vindkraft i det vestdanske elsystem, idet vindkraftproduktionen er svagt negativt korreleret med spotprisen². Hermed ville for-

¹Korrelationskoefficienten mellem forbrug og elspotpris antog for januar 2008 værdien 0,65 [Bilag 8, "Korrelationer"]

²Korrelationskoefficienten mellem vindkraftproduktionen og elspotprisen antog for januar 2008 værdien -0,32[Bilag 8, "Korrelationer"]

bruget være højt når produktionen fra vindmøller er høj og spotprisen lav.

I de følgende afsnit redegøres for en række betingelser, der vil ligge til grund for modelberegninger for de tidligere beskrevne scenarier, ved at stille batterikapacitet til rådighed på elnettet.

3.1.1 Specifikationer af batteri og lader

Batteriets pris kan være svær at gennemskue, og varierer fra producent til producent. Batteriets pris er, jf. batteri-afsnittet, oplyst til at være mellem 300-1000 euro pr. kWh. Til beregningerne i denne model bruges tal fra Electricity Storage Association ESA [Electricity Storage Association, 2009], der vurderer prisen til 600 dollars pr. kWh, svarende til ca. 3.300 DKK pr. kWh.

Batteriets levetid er ligeledes hentet fra ESA [Electricity Storage Association, 2009], der vurderer levetiden af et Li-ion batteri til 3.000 cyklusser, dvs. at efter 3.000 fulde op- og afladninger, vil kapaciteten af batteriet være reduceret til 80%.

Til beregning af det økonomiske tab forbundet med slitage på batteriet ved op- og afladning, benyttes levetiden samt prisen for batteriet, hvilket svarer til det daglige tab, når det antages at batteriet fortager en opladecyklus pr. dag.

$$\frac{Pris_{Batt}}{Cyklusser} = Tab \text{ pr. opladnings cyklus} = [DKK/dag] \quad (3.1)$$

Hvor $Pris_{Batt}$ er start prisen for batteriet.

Af praktiske årsager vil der i beregningerne udelukkende blive regnet med fulde opladecykler, da værdien af en delvis opladning, varierer i forhold til den øjeblikkelige kapacitet af batteriet og vil kræve langt mere avancerede beregninger. Det antages ydermere, at der ikke foretages flere op- og afladninger over 24 timer, men i stedet netop én opladning og én afladning pr. døgn.

Op- og afladetiden vil være afhængig af batteriets kapacitet, samt hvilken effekt det er muligt at lade fra og til elnettet med. Der tages udgangspunkt i husstand og arbejdsplads, hvor elbilen kan tilsluttes 3 faser à 16 A / 230 V, svarende til en effekt på 11 kW. Opladningstiden findes ved:

$$Daglig \text{ Opladningstid} = \frac{C_{Batt}}{P_{Stik} \cdot \eta_{Lader}} \quad (3.2)$$

Hvor C_{Batt} er kapaciteten af batteriet, P_{Stik} er effekten på stikket og η_{Lader} er effektiviteten af laderen.

Da bilen dagligt skal levere strøm til transport til og fra arbejdspladsen, vil afladetiden ikke være den samme som opladetiden. Afladningstiden er derfor:

$$Daglig\ Afladningstid = \frac{C_{Batt} \cdot \eta_{Lader} - Distance \cdot \eta_{Bil}}{P_{Stik}} \quad (3.3)$$

Hvor η_{Bil} er effektiviteten er bilen.

Distancen til og fra arbejdet er fastsat til 25 km, således den dagligt kørecyklus er 50 km. Desuden tager modellen udgangspunkt i en elbil med en effektivitet på 1/6,4 kWh/km, jf. afsnit 2.4 på side 44.

3.1.2 Beregning af fortjenesten

Disse specifikationer gør det muligt at, beregne den daglige fortjeneste, ved at stille et batteri med en given kapacitet til rådighed på elnettet. Fortjenesten bestemmes ud fra tre faktorer, køb af el fra elnettet når elspotprisen er lav, salg til elnettet når elspotprisen er høj, samt slitage på batteriet:

Tabet ved køb af el pr. opladecyklus:

$$\frac{Elspot_{Opladningstid}}{\eta_{Lader}} \cdot (C_{Batt} - Distance \cdot \eta_{Bil}) = [DKK/dag] \quad (3.4)$$

Fortjeneste ved salg af el pr. opladecyklus:

$$Elspot_{Afladningstid} \cdot \eta_{Lader} \cdot (C_{Batt} - Distance \cdot \eta_{Bil}) = [DKK/dag] \quad (3.5)$$

Slitage på batteriet pr. opladecyklus:

$$\frac{Pris_{Batt}}{Cyklusser} = [DKK/dag] \quad (3.6)$$

Daglig fortjeneste ved at stille en given batterikapacitet til rådighed:

$$(Salg\ til\ elnettet) - (Køb\ fra\ elnettet) - (Slitage\ på\ batteri) = [DKK/dag] \quad (3.7)$$

Da modellen tager udgangspunkt i en fluktuerende elspotpris, og benytter elspotpriser, ved køb og salg, for hhv. de billigste og dyreste timer, vil den daglige fortjeneste variere i forhold til den daglige difference i prisen på elspotmarkedet. For at give et mere reelt billede af fortjenesten, beregner modellen den daglige fortjeneste for år 2008.

3.1.3 Opbygning af modellen

Grundlæggende er modellen skrevet omkring den tidligere nævnte beregning af dagsfortjenesten, der bruger specifikationerne for batteri og opladerenhed til at beregne fortjenesten. Dette kræver en række prædefinerede værdier for prisen, antal cyklusser og kapaciteten af batteriet, effektiviteten af lader og bil, kørecyklus samt effekten, hvorved batteriet har mulighed for at oplade. Modelkodeen kan ses i bilag 11.

Derudover skal modellen have adgang til priserne på elspotmarkedet for minimum 24 timer. Priserne hentes fra Energinet.dk, og importeres til Matlab, for den dag eller dage fortjenesten ønskes at beregnes.

Ud fra de prædefinerede værdier findes antal op- og afladetimer, svarende til antallet af billige og dyre timer, der skal bruges til beregning af fortjenesten.

For at beregne fortjenesten over en længere periode, kan modellen programmeres til at gennemløbe dagsfortjenesten et givent antal gange. Dette udføres ved en løkke, hvor start og slut dagen angives, f.eks. fra den n'te til den m'te dag i 2008. Dagsfortjenesten beregnes herefter m-n gange, med elspotpriserne svarende til den specifikke dag.

Udover at beregne fortjenesten for en dag eller periode med fastsatte værdier, er modellen i stand til at beregne fortjenesten ved variable værdier. Til dette bruges igen en løkke, der gennemløber den tidligere løkke med en variabel, med et bestemt interval. Løkken giver således et række for fortjenesten given ved en variabel, som Matlab plotter til en graf.

Modellen tager desuden forbehold for to scenarier, der vil kunne bevirke et forkert resultat:

Hvis distancen for den daglige kørsel ikke kan dækkes af batteriets kapacitet, altså at det ikke er muligt at køre den ønskede distance, med start kapaciteten, angives den daglige fortjeneste som "not a number". Hvis:

$$C_{Batt} < Distancen \cdot \eta_{Bil} \quad (3.8)$$

angives der intet resultat, da det ville give en negativ antal op og afladnings timer.

Ligeledes tages der forbehold mod en op- og afladetid på mere en 12 timer, da modellen regner i 24 times intervaller, hvilket vil sige, at en opladetid på mere en 12 timer, vil svare til at oplade batteriet i længere tid end det rent faktisk er muligt.

3.1.4 Case 1

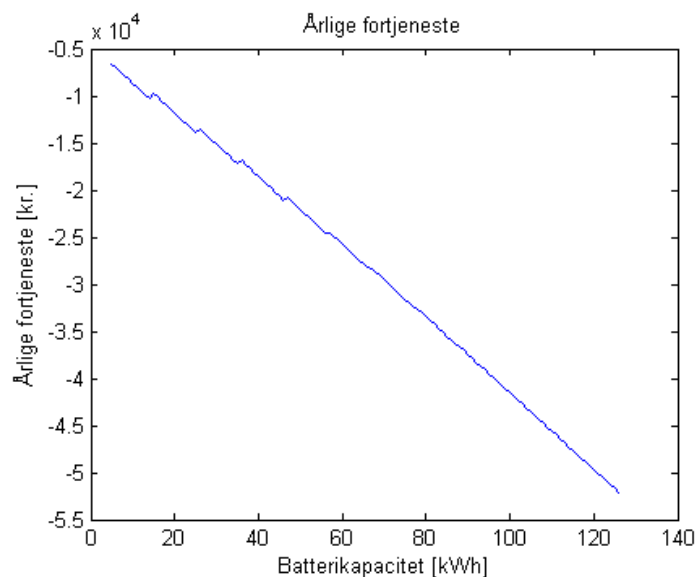
En elbiler ejer ønsker at stille batteriet på sin elbil til rådighed til elnetsregulering, med det formål at høste en økonomisk gevinst. Bileren planlægger at stille batteriet til rådighed over et år, hvor han forventer en daglig kørsel, svarende til en distance til og fra hans arbejdsplads, samtlige årets dage. Når bilen ikke kører, forventes det, at batteriet er tilsluttet elnettet via en intelligent elmåler. Hvilken batterikapacitet er mest hensigtsmæssig, med henblik på størst mulig fortjeneste?

Undersøgelsen bygger på data om prisfluktuationerne på elspotmarkedet fra d. 1. januar til d. 31. december 2008, som ses i bilag 13, hvor bilejeren køber og sælger til priser på elspotmarkedet på lige fod med andre aktører. Da det ønskes at batterierne altid foretager en hel ladecyklus i døgnet, antages det at batteriejerne byder ind på elspotmarkedet, med tilstrækkeligt lave bud, således de altid har mulighed for at købe og sælge til elspotprisen. Specifikationer for elbilen angives ud fra producenternes oplyste informationer om tilgængelig teknologi.

Specifikationer for batteri	
Stik til rådighed	11 kW
Distance (kilometer kørt om dagen)	50 km.
Effektiviteten af bilen	0,156 kWh / km.
Levetid (Nominerede cyklusser)	3.000
Effektivitet af oplader og aflader	95 %
Pris for batteri	3.300 DKK / kWh

Tabel 3.1. Specifikationer for batteri og ladeenhed.

Med disse indstillinger har modellen gennemløbet beregningerne for dagsfortjenesten 366 gange, svarende til dagene i 2008, mens kapaciteten holdes variabel. figur 3.2 viser den årlige fortjeneste som funktion af batterikapaciteten.

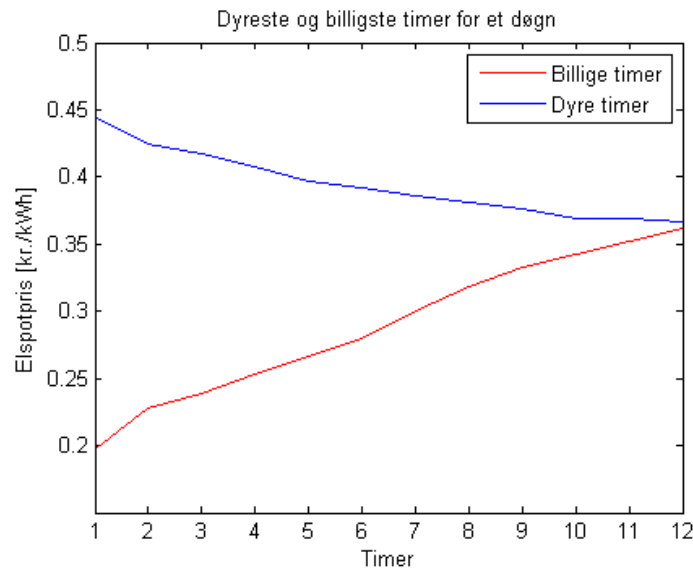


Figur 3.2. Skema over den årlige fortjeneste som funktion af batterikapaciteten, uden favorisering af elbiler.

Figur 3.2 illustrerer på samme tid, at fortjenesten ved de givne specifikationer ikke vil give et positivt resultat ved nogen kapacitet. Dette skyldes, at fortjenesten ved køb og salg ikke vil være i stand til at dække slitageudgifter på batteriet.

$$\frac{Pris_{Batt}}{Cyklusser} \gg Pris_{Afladning} - Pris_{Opladning} \quad (3.9)$$

Figur 3.3 viser forholdet mellem de 12 dyreste timer og billigste timer på elspotmarkedet i januar 2008. Den maksimale fortjeneste ved at op- og aflade en time på elspotmarkedet, vil være ved at oplade hvor differencen mellem den dyreste og billigste timer er størst. Effekten af stikket er således en afgørende faktor for kWh prisen, er stikket tilstrækkelig stor til at oplade batteriet på én time, vil man opnå den størst mulige fortjeneste pr. kWh. Hvis stikket derimod behøver længere tid til at oplade batteriet, vil den gennemsnitlige fortjeneste pr. kWh falde.



Figur 3.3. Sammenligning af de gennemsnitlige 12 dyreste elspotpriser samt de 12 billigste elspotpriser i januar 2008.

Ifølge afsnit 3.12 vil fortjenesten ved køb og salg blive større i takt med at kapaciteten bliver større. Figur 3.2 på modstående side viser dog at funktion ikke stiger på noget tidspunkt, dette skyldes at tabet ved slitage på batteriet pr. kWh er større end den maksimale fortjeneste ved køb og salg af el. Dvs. at funktionen er eksponentielt aftagende indtil kapaciteten svarer til 12 opladetimer, fordi den gennemsnitlige fortjeneste pr. op- og afladningstime falder i takt med den samlede opladningstid bliver større. Når kapaciteten overstiger, hvad der svarer til 12 opladningstimer, bliver funktionen lineær.

Det er ifølge figur 3.3 ikke mulig at høste en fortjeneste ved at stille et elbilbatteri til rådighed til akkumulering af el fra elnettet ved de givne specifikationer. Der er i case 1 taget udgangspunkt i muligheden for at anvende elbiler på elnettet på ligefod med andre aktører, det har dog vist sig at teknologien på flere punkter er den begrænsende faktor for at implementere elbilen til akkumulering på markedsvilkår.

3.1.5 Case 2

En elbilejer ønsker at stille batteriet på sin elbil til rådighed til elnetsregulering, med det formål at høste en økonomisk gevinst. Bilejeren planlægger at stille batteriet til rådighed over et år, hvor han forventer en daglig kørsel, svarende til en distance til og fra hans

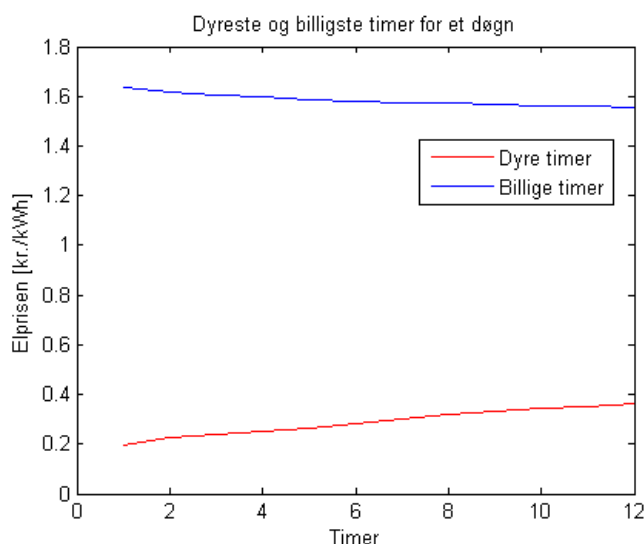
arbejdsplads, samtlige dage. Når bilen ikke kører, forventes det, at batteriet er tilsluttet elnettet via en intelligent elmåler. Hvilken batterikapacitet er mest hensigtsmæssigt, med henblik på størst mulig fortjeneste?

Undersøgelsen bygger på data om prisfluktuationerne på elmarkedet fra d. 1. januar til d. 31. december 2008, som ses i bilag 13, hvor bilejeren kan købe uden afgift og sælge med, og derved få hvad der svarer til afgiften som tillæg til elprisen, bilejeren køber med afgift, mens f.eks. elselskaberne kompensere ejeren, med hvad der svarer til afgiften. Specifikationer for elbilen angives ud fra producenternes oplyste informationer om tilgængelig teknologi.

Specifikationer for batteri	
Stik til rådighed	11 kW
Distance (kilometer kørt om dagen)	50 km.
Effektiviteten af bilen	0,156 kWh / km.
Levetid (Nominerede cyklusser)	3.000
Effektivitet af oplader og aflader	95 %
Pris for batteri	3.300 DKK / kWh

Tabel 3.2. Specifikationer for batteri og ladeenhed.

Under samme betingelser som case 1, gennemløbes beregningerne for dagsfortjenesten 366 gange med kapaciteten som variabel, med den ændring at batteriejerne nu kan købe el uden afgift som før, men kan sælge med en elpris der svarer til elspotprisen med afgift. Dvs. at differencen mellem købs- og salgsprisen bliver 1,19 DKK større. Figur 3.4 viser sammenligningen mellem prisen på de dyreste og billigste timer, hvor batteriejerne modtager et ekstra beløb svarende til afgiften, på den el han sælger.

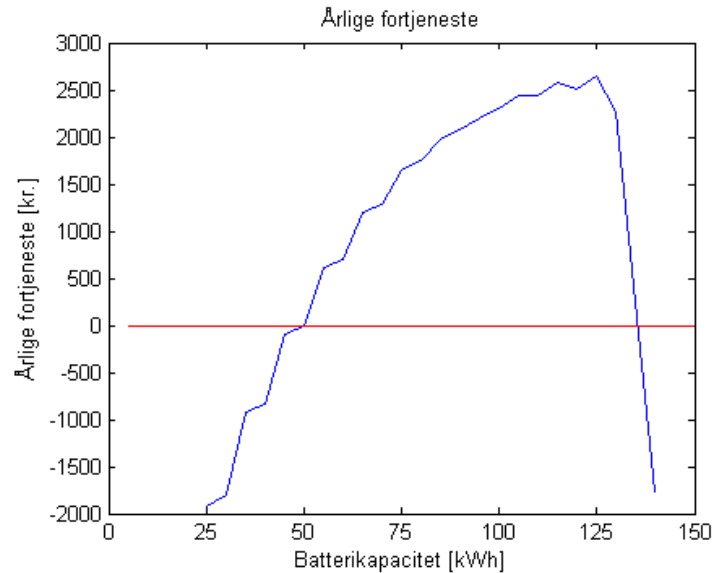


Figur 3.4. Sammenligning af de gennemsnitlige 12 dyreste elspotpriser plus afgift samt de 12 billigste elspotpriser i januar 2008.

Hvis figur 3.4 sammenlignes med figur 3.3 på forrige side fra case 1 er det tydeligt at differencen mellem de dyreste og billigste timer er større, nemlig netop 1.19 DKK Dvs. at fortjeneste pr. kWh er tilsvarende til case 1 plus 1,19 DKK.

Figur 3.4 på forrige side viser ydermere at den gennemsnitlige difference ved at ændre opladetiden er betydelig mindre end tilfældet i case 1. Dette skyldes at den fastsatte afgift bliver den dominerende faktor for differencen.

Figur 3.5 viser den årlige fortjeneste som funktion af kapaciteten, tilsvarende figur 3.2 på side 54 fra case 1.



Figur 3.5. Skema over den årlige fortjeneste som funktion af batterikapaciteten, med favorisering af elbiler.

I modsætning til case 1, vokser fortjenesten i takt med kapaciteten øges, hvilket skyldes at indtægterne pr. opladecyklus er større end slitageudgifterne. Funktionen vil være voksende til den når et maksimum, når opladetiden overskrider 12 timer, herefter vil fortjenesten ved køb og salg af el være konstant, men prisen for batteriet vil blive ved med at stige.

Ifølge figur 3.4 på modstående side vil der opnås en positiv fortjeneste ved at stille et elbilsbatteri til rådighed til akkumulering af el fra elnet, i det scenarie at elbilejerne favoriseres således at differencen på den el der købes og den el der sælges er tilstrækkelig stor til at dække udgiften til slitage på batteriet. Den størst mulige fortjeneste med specifikationerne for case 2, vil være begrænset af den kapacitet det er muligt at op- og aflade på et døgn, dvs. at den maksimale fortjeneste vil være ved den kapacitet, der svarer til den maksimale opladningstid samt den effekt det er mulig at lade med:

$$12 \text{ timer} \cdot 11 \text{ kWh} \cdot 95\% = 125,4 \text{ kWh} \quad (3.10)$$

3.1.6 Case 3

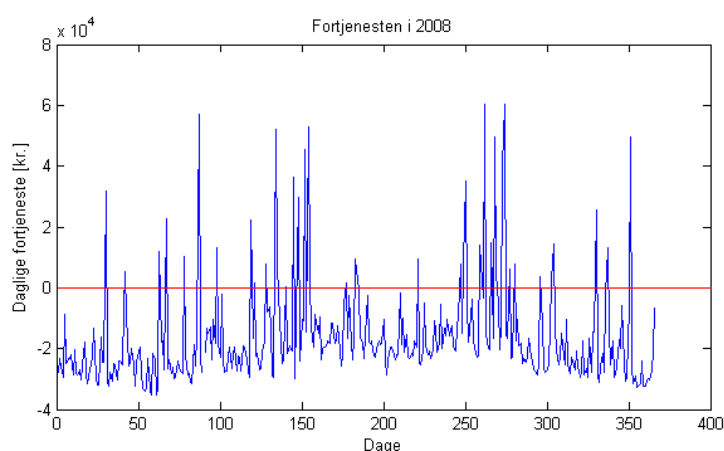
Et elbillaug ønsker at stille deres samlede batterikapacitet til rådighed på reguleringsmarkedet, med det formål at høste en økonomisk gevinst. Elbilerne ønsker at stille batterikapaciteten til rådighed som 30 sekunders regulering, således at de hele tiden modtager et rådighedsbeløb, mens de har mulighed for at sælge el til reguleringspris. Vil en økonomisk gevinst være mulig?

Undersøgelsen bygger på data for prisfluktuationerne på reguleringsprisen fra d. 1. januar til d. 31. december 2008, som ses i bilag 12, hvor bilejerne kan købe el til elspotpris, men sælge til reguleringspris, derudover modtager bilejerne et rådighedsbeløb for den tid elbilerne står til rådighed. Specifikationer for elbilen angives ud fra producenternes oplyste informationer om tilgængelig teknologi.

Specifikationer for batteri	
Levetid (Nominerede cyklusser)	3.000
Kapacitet af batteri	50 kWh
Pris for batteri	3.300 DKK / kWh
Stik til elnettet	10 MW
Kapacitet af bilpark	45.450 kWh
Opladetiden	4 timer

Tabel 3.3. Specifikationer for batteri og ladeenhed.

Figur 3.6 viser den samlede fortjeneste for elbillaugene pr. dag over 2008. Fortjenesten udgør i denne udregning, rådighedsbeløbet for 12 timer, differencen på den købte og solgte el, samt slitage på batteriet. Grafen viser, at det kun i 42 dage i løbet af et år, er muligt at opnå en positiv økonomisk gevinst under de givne forudsætninger. Hvis elbilerne vælger at stille batterierne til rådighed andre dage, med den hensigt udelukkende at modtage rådighedsbeløbet, kan de i tilfælde af et opreguleringsbehov risikere at miste penge, da beløbet fra opregulering de fleste dage, ikke vil være i stand til at kunne dække tabet for slitage på batteriet.



Figur 3.6. Dagsfortjenesten ved køb og salg på regulerings markedet for 2008.

Da det antages at elspotpriserne ved køb og salg udligner hinanden, vil det være muligt at finde en minimums regulerings pris, det behøves for at opnå en positiv fortjeneste.

$$Fortjenesten = (Reg_{Pris} \cdot Oplade\ timer) - Slitage\ på\ batteri + (Tid_{Tilrædighed} \cdot P_{Bilpark} \cdot Råd_{Belb}) \quad (3.11)$$

Hvis bilejerne vil opnå en positiv fortjeneste, skal den gennemsnitlige pris for de 4 afladningstimer være minimum:

$$Reguleringspris > 1.809,79DKK \quad (3.12)$$

3.2 Aktøranalyse

I forbindelse med arbejdet omkring V2G-teknologien, samt konstruktionen af prototype-hardware og -software, ses det relevant med en analyse af aktører på et marked, hvor denne teknologi kunne tænkes at indgå og hvilken interesse disse ville have i enten at fremme denne teknologi eller vanskeliggøre dens udbredelse. Disse aktører kunne eksempelvis være:

- Staten
- Energiselskaber
- Samarbejdsorganisationer så som *Project Better Place*
- Fabrikanten af elbiler
- Forbrugerne

Den danske stat vil som øverste led i rækken af markedsaktører have en stor interesse i denne teknologi, idet anvendelse af denne muliggøre at opfylde og imødekomme en række krav og problemstillinger, såvel politisk som energiteknisk og økonomisk. En implementering af V2G-teknologien i det danske energisystem ville bl.a. medvirke til muliggørelsen af den planlagte udvidelse af vindkapaciteten, nævnt i afsnit 1.1 på side 2, idet der vil kunne opnås større fleksibilitet i forbrugseffekten vha. eksempelvis intelligentstyring. Derved opnås også en reduktion af eloverløbet, hvilket ville kunne betyde en evt. økonomisk gevinst for den danske stat, idet en evt. overskudsproduktion fra vindmøller vil kunne blive lagret i de tilsluttede batterier og derved blive solgt på dansk marked til dansk pris. At udbygningen af vindmøllekapaciteten muliggøres bevirker samtidigt at der tages et skridt i den rigtige retning hvad angår energiselvstændighed samt at opfylde EU's krav om større andel af vedvarende energi i energisystemet samt reduktion af CO₂-emissioner [Kommissionen For De Europæiske Fællesskaber, 2008].

Indføres V2G-teknologien i lokalt CO₂-belastede områder vil der endvidere opstå mulighed for en miljøforbedring i og omkring disse, idet anvendelsen af teknologien og derved

også elbiler vil kunne fortrænge nuværende køretøjer med forbrændingsmotorer, hvori der anvendes fossile brændsler. Denne fortrængning vil dog have en mulig negativ indflydelse på statens økonomi, idet der sammen med de fortrængte køretøjer mistes en indtægtskilde i form af den energi- og CO₂-afgift der er pålagt de fossile brændsler. Med udgangspunkt i en gennemsnitlig årlig kørsel for personbiler på 16985 km [Vejdirektoratet, 2004] og et energiklasse A benzinkøretøj med en brændselsøkonomi på minimum 20 km/L [Færdselsstyrelsen, 2009] vil mængden af fortrængt brændsel udgøre:

$$\frac{16985 \frac{km}{år}}{20 \frac{km}{L}} = 849,25 \frac{L}{år} \quad (3.13)$$

Med den gældende CO₂-afgift på 0,23 DKK/L samt energiafgift på 3,96 DKK/L [Energi- og Olieorganisationerne, 2009] vil den samlede mistede afgift pr. køretøj pr. år udgøre:

$$849,25 \frac{L}{år} \cdot 4,19 \frac{DKK}{L} = 3.558,36 \frac{DKK}{år} \quad (3.14)$$

Et beløb der skal indtjenes andetsteds.

Elselskaberne og producenterne kunne tænkes at have en noget blandet indstilling til implementeringen af V2G-teknologien, idet de både vil kunne få gavn af den samtidigt med at den vil kunne medbringe evt. komplikationer og nye problemstillinger. Som beskrevet i afsnit 1.5 på side 10 er der potentiale i at anvende elbilers batterier til at eliminere den tvungne eleksport, som kan opstå når der er meget overløbsstrøm i det danske elsystem. Ydermere kan den i batterierne lagrede el anvendes til at fortrænge CO₂-tung elproduktion fra de fossile drevne kraftværker, eksempelvis i reguleringstilfælde som nævnt i afsnit 1.6 på side 12, endda med et økonomisk ræsonnement. Det økonomiske ræsonnement samt de nævnte arbejdsopgaver vil dog ikke tilfalde elselkaberne og producenterne i første omgang, idet de anvendte batterier vil tilhøre de respektive ejere af de elbiler hvori batterierne er placeret. For at disse kan tilfalde elselkaberne og producenterne skal der tænkes i metoder hvorved ejerskabet at den på batteriet lagrede el enten helt eller delvist kan overgå til disse, eksempelvis i form af et batterileasingsystem hvor elbilejeren leaser batteriet af sit respektive elskab

Projektorganisationer i stil med *Project Better Place* vil, sammen med deres respektive leverandører af eksempelvis elbiler og dertilhørende ladesystemer, ved anvendelse af V2G-teknologien kunne skabe større mulighed for at udvide deres aktivitetsområder, idet det tilbudte produkt med denne teknologi kan ses som et samspilsprodukt snarere end et rent forbrugsprodukt i elsystemssammenhæng, bl.a. grundet muligheden for intelligent styring. Netop at produkterne får denne mulighed ved anvendelse af teknologien, må ses som et stærk salgsargument i kvantitetsforhandlinger med kunder som eksempelvis energiselskaber, der kunne have tilbøjelighed for at starte ud med at købe projektorganisationernes produkt i mindre kvantitet, idet de evt. kunne være usikre på om der ville være nok fleksibilitet i deres forsyningsnet til at understøtte opladning af alle leverede elbiler, eller om

dette ville risikere en mørklægning af deres forsyningsområde. En problemstilling der ville kunne mindskes ved anvendelse af V2G-teknologi med intelligent styring.

Endeligt er der forbrugerens interesse, der er en faktor som ikke kan ignoreres. Diversiteten i de krav der bliver stillet til elbilerne, vil gøre det svært for producenterne at imødegå alle, og initiaert vil det betyde at færre vælger at købe elbiler, da de ikke kan få opfyldt deres behov. Dette kan beskrives ud fra den rækkefølge af kriterier, der ses nedenfor.

- **Miljø**

Elbilen udleder mindre CO₂ end konventionelle biler, både med hensyn til produktion og kørsel. En bilejer der er bevidst om miljøhensyn, vil med større sandsynlighed vælge en elbil, på trods af at den ikke lever op til alle ejerens kriterier.

- **Infrastruktur**

Elbilen skal kunne anvendes til den daglige kørsel med den infrastruktur som er tilgængelig. Hvis bilen kun kan oplades i hjemmet, skal rækkevidden forøges for at kunne dække ejerens forbrug.

- **Rækkevidde**

Elbilernes rækkevidde bestemmes af den mængde energi, der kan transporteres i bilens batterier. Det er derfor vigtigt at anvende batterier med høj energidensitet, således at der opnås tilstrækkelig rækkevidde uden at påvirke bilens performance unødvendigt.

- **Performance**

Elbilens køreegenskaber skal leve op til forbrugerens behov; tophastigheden for en elbil er ofte lavere end for biler med forbrændingsmotorer, mens dens acceleration foregår hurtigere.

- **Pris**

Elbiler er en forholdsvis ny teknologi, i forhold til hvor langt de er nået i kommercialisering. Produktionsprisen vil sandsynligvis falde i takt med en masseproduktion, men som det er nu, er prisen højere end for konventionelle biler. Prisen pr. kørt km. er dog lavere.

- **Sikkerhed**

En elbils motor, er væsentligt mindre end en forbrændingsmotor. Da motoren altid har været et vigtigt element i forbindelse med sikkerheden ved eksempelvis frontale sammenstød, vil en forringet sikkerhed kunne afskrække nogle købere fra at vælge en elbil.

- **Tryghed**

Hvis ejeren ved at der i forbindelse med et V2G koncept, er forbundet en risiko for at bilens batteri; på ikke-planlagte tidspunkter, kan blive afladet, vil det kunne afskrække nogle købere. Ligesom tanken om at antallet af mekanikere der kan reparere bilen, ikke er så stort, kan virke skræmmende.

- **Design**

Elbiler kan på grund af færre og mindre mekaniske dele, designes på nye og kreative måder, hvilket både kan tiltale og afskrække nogle købere.

Hvis forbrugeren køber bilen på baggrund af det første trin, er de underliggende trin generelt mindre vigtige. Hvis ikke det første trin giver et fornuftigt ræsonnement for

forbrugeren, bevæger forbrugeren sig til det næste trin der repræsenterer et alternativt behov, osv. For hvert trin forbrugeren bevæger sig ned i rækken, er sandsynligheden for at et køb finder sted lavere. Ligeledes hvis en bestemt elbil ikke kan opfylde alle kravene, er sandsynligheden for at en kunde vil vælge den lavere.

Med hensyn til at bruge elbiler i forbindelse med et V2G system, er især behovet for tryghed gældende for forbrugeren. Det kan virke meget afskrækkende på en forbruger ikke selv at have kontrol over en del af sit batteri, og derved risikerer at der i et nødstilfælde, ikke vil være nok strøm til at gennemføre en uplanlagt kørsel. For at imødegå dette, er det essentielt at få udviklet teknologien, hvor batterierne hurtiglades med en større strømstyrke op til eksempelvis 50 % på et kvarter ved at lade med en større strømstyrke.

Konklusion 4

I rapportens indledning beskrives det, hvordan eloverløb udgør et økonomisk og teknisk problem for den danske stat. Hvis de politiske planer om at udbygge energisektoren med en stor mængde vindkraft bliver realiseret, vil der til tider være en så stor produktion af elektricitet, at eloverløbet ikke kan afsættes gennem udlandsforbindelserne. Det er derfor afgørende at flere af de sektorer der forbruger energi i større omfang, kan udnytte den elektricitet der produceres af vindmøllerne når vinden blæser. I dette projekt er transportsektoren blevet betragtet som en potentiel aftager af denne energi, i form af en fremtidig elbil flåde.

Rapporten viser, at elbilerne udgør et stort potentiale for, at kunne aftage produktionen fra vindmøllerne, da de har et tilnærmelsesvis ensartet dagligt forbrug og stor forbrugsfleksibilitet. Hvis dette kombineres med et V2G koncept, hvor den lagrede energi leveres tilbage til elnettet, åbner det op for at bilerne kan anvendes til at løse nogle af de energitekniske problemer, der er forbundet med at styre reguleringen af vindkraften og muligvis give en økonomisk gevinst for ejeren.

Der er fundet frem til en korrelation mellem vindkraftproduktion, elspotpris og forbrug, hvilket kan signalere, at de perioder hvor elspotprisen falder pludseligt og nærmer sig nul, kan forekomme eloverløb, og derved et behov for nedregulering. Dette kan bruges til at styre hvornår elbilerne foretager opladninger, og sørge for at den lagrede energi er billigst mulig.

I forhold til udformningen af lader/konverter ledet mellem elbilen og elnettet, er flere potentielle teknologier blevet beskrevet. Der blev konstrueret en styrekreds til at styre opladningen af et batteri og gennem en laboratorieøvelse testet til at opfylde de kriterier blysyre batterier kræver, som er de samme opladekriterier som Li-ion batterier kræver. Til batteriladerkredsen blev der produceret en strømforsyning, som bygger på flyback switch mode teknologien. Strømforsyningen fungerede ikke ved projektets afslutning, pga. en defekt transformer. Ligeledes blev der konstrueret en konverterkreds, som skulle omforme batterispændingen til netspænding. Denne kreds blev testet, men fungerede ikke ved projektets afslutning. Alt i alt er der fundet at teknologien til at konstruere et stykke hardware, som kan oplade et batteri for senere at levere strømmen tilbage til elnettet

er fuldt til rådighed, og at den største udfordring for dette koncept, er at tilpasse op-/afladningen til behovet for regulering på elnettet. Som svar på denne problemstilling er der forsøgt konstrueret, en første version af den brugerstyring, der skal være forbundet med laderen, SoftCharge skal sikre brugeren, at dennes kørselsmønster altid kan gennemføres, og i fremtidige versioner vil dette program holde ansvar for sætte op- eller afladningen af batteriet i gang på baggrund af målinger på elnettet.

Dette har ledt til 3 potentielle scenarier for anvendelsen af denne laderteknologi; det første scenarie, hvor elbilerne agerer på elspotmarkedet under de samme markedsvilkår som andre elproducenter; det andet hvor elbilerne modtager en kompensation, enten i form af fritagelse fra afgifter, eller et tilskud fra staten; og det tredje scenarie, hvor en samling af elbiler stiller deres samlede kapacitet til rådighed på 30 sekunders reguleringsmarkedet. Resultatet af den økonomiske analyse viser, at der ikke vil være nogen gevinst ved at udnytte fluktuationerne i elspotprisen, hvis fluktuationerne er indenfor en realistisk grænse. I forhold til det andet scenarie, viser det sig, at det er muligt at opnå en fortjeneste, hvis forholdet mellem batterikapaciteten og den effekt batteriet kan lades/aflades med er rigtig. En batterikapacitet på 125,4 kWh, giver en årligfortjeneste på cirka 2650 kr. Ligeledes er der fundet at elbilerne har et potentiale til at kunne genere en fortjeneste, hvis de kan levere op-/nedregulering til elnettet, der blev fundet at en reguleringsbetaling pr. time på minimum 1.809,79 DKK/MW er nødvendig, og at denne pris i 2008 i alt opstod 75 gange.

Hvis laderkonceptet, som er udviklet gennem dette projektforsøg og beskrevet i denne rapport, anvendes i større omfang til at oplade elbiler, vil det være med til at fortrænge det ekstra eloverløb, en fordobling af vindkraftkapaciteten vil medføre, og ultimativt vil det kunne skabe et mere stabilt og sikkert elnet, med en meget høj andel af vindkraft. Et koncept der vil gavne både miljøet og infrastrukturen, og som opfylder de idealer som regeringen har sat gennem En visionær energipolitik 2025.

Perspektivering 5

Indførelsen af flere vindmøller betyder mere svingende elproduktion, hvilket formentligt skal tilpasses med intelligente systemers evne til at tilpasse forbruget med den øjeblikkelige produktion af el. Hvis konceptets egenskaber ikke svarer til udbyggelsen af vindkapaciteten, vil risikoen for eloverløb stadig være at finde, hvis det blæser meget over en periode.

I rapporten er der holdt fokus hvordan dette eloverløb kan benyttes til noget brugbart i samfundet ved at benytte eloverløbet til at oplade forbrugernes elbiler. Der er ligeledes holdt fokus på hvilke områder, der skal reguleres på, for at det kan betale sig for den private bruger at investere i en elbil, for at det på samme tid også kunne give et økonomisk afkast ved tilbageføring af el til nettet fra elbilens batteri. Dette vil også resultere i en mere fuldstændig udnyttelse af den elproduktion der kommer fra vindmøllerne ved at overløbsstrømmen kan blive brugt til at lade elbilens batterier op. Denne løsning er relativ langsigtet, da den vil kræve store investeringer fra forbrugernes side, men også fra elleverandøren, da der muligvis skal laves aftaler vedrørende tilbagebetaling af afgift i tilfælde af tilbagelevering af el fra bilens batteri. En alternativ og midlertidig differentiering af elforbruget kan dog opnås uden større problemer. Det kan f.eks. gøres ved at lade på bilens batteri om natten. Dette vil kunne hæve niveauet for det natlige middelstrømforbrug, og da det oftest er om natten, når forbruget af elektricitet er minimalt, at der kan forekomme eloverløb, vil det kunne forbedre fleksibiliteten en smule på elnettet.

I forbindelse med dette og det intelligente system, er det interessant at analysere elspotprisen fluktuationer. Hvor meget skal el-prisen fluktere, for at den private forbruger opnår en reel besparelse eller mulig fortjeneste ved at investere i en elbil med tilhørende batteri? Hertil kommer det at vurdere og forudsige, hvor meget spotprisen angiveligt vil fluktuerer, hvis der regnes med dobbelt så stor vindkapacitet i det danske el-net. Disse analyser vil være vigtige i forbindelse med at oplyse den danske befolkning om køb af elbiler.

Et alternativ til denne problematik med eloverløb i forbindelse med opsætning af flere vindmøller og derved en større elproduktion, kan muligt være det nye tyske projekt, et hybridkraftværk, ved navn ENERTRAG Hybridkraftwerk. Dette kraftværk er baseret på 6 MW vindkraft. Producerer disse vindmøller mere strøm end der er efterspurgt på

elmarkedet, omdanner anlægget den overskydende energi til brint ved brug af elektrolyse. Denne brint presses ned i lagertanke og når efterspørgslen på strøm igen stiger og der på samme tid er vindstille, blandes brinten med naturgas og bliver derefter afbrændt i et tilhørende kraftværk.

Ydermere vil Enertag, i perioder med meget vind, sælge den overskydende brint fra produktionen til tyske tankstationer hvor der således kan tankes brint som brændstof.

“Jeg kan bruge brinten på mobilitet, på varme - eller på strøm. I den forbindelse bliver vores leverance lige så tilforladelige som et almindeligt kraftværks. Dertil kommer, at brint forbrændes CO₂-frit.“ Enertags direktør Werner Diwald. [Reiter, 2009]

Denne måde at benytte den overskydende elproduktion fra vindmøller er dog heller ikke helt uden kritik. Eksperter tvivler på hybridkraftværkernes gennemslagskraft, da der går meget energi tabt i konverteringerne fra el til brint og igen den anden vej. Virkningsgraden på dette kan med tiden komme op på omkring 40 %, men er på nuværende tidspunkt på maks 20 % ifølge Martin Pehnt fra Institutet for Energi og Miljøforskning i Heidelberg. [Reiter, 2009]

Litteratur

- Andersen, 2009.** Ulrik Andersen. *Better Place-direktør vil redde planeten med elbiler.* URL: <http://ing.dk/artikel/95694-better-place-direktoer-vil-redde-planeten-med-elbiler?highlight=ulrik+andersen>, 2009. Tilgået: 20-05-2009.
- Buchmann, 2003a.** Isidor Buchmann. *What's the best battery?* URL: <http://batteryuniversity.com/partone-3.htm>, 2003. Redigeret i 2006.
- Buchmann, 2003b.** Isidor Buchmann. *Charging the lead-acid battery.* URL: <http://batteryuniversity.com/partone-13.htm>, 2003. Redigeret i 2007.
- Buchmann, 2003c.** Isidor Buchmann. *Charging lithium-ion batteries.* URL: <http://batteryuniversity.com/partone-12.htm>, 2003. Redigeret i 2007.
- Campanari, Manzolini, og Iglesia, 2008.** Stefano Campanari, Giampaolo Manzolini, og Fernando Garcia de la Iglesia. *Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations*, 2008.
- Chryssis, 1984.** G. Chryssis. *High-Frequency Switching Power Supplies: Theory and Design*. ISBN: 0-07-010951-6, Handbook. 1. edn, 1984.
- Danfoss A/S, 1998.** Danfoss A/S. *Værd at vide om frekvensomformere*, 1998.
- Danmarks statistik, 2008.** Danmarks statistik. *Danmark i tal 2008*, 2008.
- Divya og Østergaard, 2008.** K. C. Divya og Jacob Østergaard. *Battery energy storage technology for power systems — An overview*, 2008.
- Electricity Storage Association, 2009.** Electricity Storage Association. *Electricity Storage Association*. URL: http://electricitystorage.org/tech/technologies_technologies_liion.htm, 2009. Downloadet: 20-05-2009.
- Energi- og Olieorganisationerne, 2009.** Energi- og Olieorganisationerne. *Benzin*. URL: <http://www.oliebranchen.dk/Priser/document.aspx?path=%2fhome%2fpriser%2fbenzin&layout={628F8056-CBA9-400E-8073-36FEE61695D5}>, 2009. Tilgået: 20-05-2009.
- Energinet.dk, 2009.** Energinet.dk. *PSO tariffen*. URL: http://www.energinet.dk/da/menu/Marked/Tariffer_priser/El+-+Tariffer/PSO-tariffen/PSO+tarif.htm, 2009. Downloadet: 20-05-2009.

- Energinord.dk, 2009.** Energinord.dk. *Hvad koster 1 kWh?* URL: http://energinord.dk/dk/privat/priser/prisen_paa_en_kwh.htm, 2009. Downloadet: 20-05-2009.
- Energistyrelsen, 2001.** Energistyrelsen. *Rapport fra arbejdsgruppen om kraftvarme- og VE-elektricitet*, 2001.
- Energistyrelsen, 2007.** Energistyrelsen. *En Visionær Dansk Enerkipolitik 2025*, 2007.
- Enevoldsen, 2006.** Svend W. Enevoldsen. *Vindkraftens betydning for elprisen i Danmark*. URL: http://www.dkvind.dk/materiale/samfundsokonomi/vindkraftens_betydning_for_elmarkedet.pdf, 2006. Downloadet: 20-05-2009.
- Erickson og Maksimovic, 2001.** Robert W. Erickson og Dragan Maksimovic. *Fundamentals of Power Electronics 2. edn*. ISBN: 0-7923-7270-0, Handbook. Academic Publishers, 2001.
- Færdselsstyrelsen, 2009.** Færdselsstyrelsen. *Hvor langt på literen?*, 2009.
- Hamer, 2001.** Jan Hamer. *Motorcycle Battery Charger*. URL: <http://www.uoguelph.ca/~antoon/circ/lader.htm>, 2001. Downloadet: 20-05-2009.
- Hansen, 2001.** Peter Hansen. *Digitalteknik*. ISBN: 87-7881-437-5. Industriens Forlag, 2001.
- Hart, 1997.** D. W. Hart. *Introduction to Power Electronics*. ISBN: 0-02-351182-6, Handbook. 1. edn, 1997.
- International Energy Agency, 2007,.** IEA International Energy Agency. *World Oil Supply and Demand*, 2007,.
- Jensen, 2009.** Mette Buck Jensen. *Kinesere indtager Danmark med elbiler og ladestationer*. URL: <http://ing.dk/artikel/95540-kinesere-indtager-danmark-med-elbiler-og-ladestationer?highlight=elbilen>, 2009. Tilgået: 20-05-2009.
- Jewett og Serway, 2008.** John W. Jewett og Raymond A. Serway. *Physics for scientists and engineers*. ISBN: 0-495-11240-2, Handbook. Thomson, 2008.
- Kempton og Tomic, 2004.** Willett Kempton og Jasna Tomic. *Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue*, 2004. produceret af University of Delaware, USA.
- Kommissionen For De Europæiske Fællesskaber, 2008.** Kommissionen For De Europæiske Fællesskaber. *To gange 20% i 2020 - Europas muligheder i forbindelse med klimaændringerne*, 2008.
- Kær, 2008.** Søren Knudsen Kær. *RISØ præsentation*. Slides på IET og NIK-VE's hjemmeside, 2008.
- Linden, 1995.** David Linden. *Handbook of Batteries*. ISBN: 0-07-037921-1, 2. Edition. McGraw-Hill, 1995.

- Maxim Integrated Products, 2006.** Maxim Integrated Products. *Battery Fuel Gauges: Accurately Measuring Charge Level*, 2006.
- Morten B. Blarke, 2008.** Morten B. Blarke. *The missing link in sustainable energy*, 2008.
- Nielsen, 2008.** Mads Pagh Nielsen. *Brint (energibærere, lagring) og brændselsceller*. Forelæsning på P1 Torsdag d. 30/10 2008, 2008.
- Praem, 2009.** Per Praem. *CO₂ udledning fra en dansk elbil er faldet i 2008*. URL: http://www.danskelbilkomite.dk/CO2_2008.htm, 2009. Downloadet: 21-05-2009.
- Pressman, 1991.** Abraham I. Pressman. *Switching Power Supply Desigb*. ISBN: 0-07-050806-2, Handbook. McGraw-Hill Inc., 1991.
- Reiter, 2009.** Michael Reiter. *Nyt kraftværk skal sikre stabil vedvarende energi*. Ingeniøren, 08.05, 9, 2009.
- STMicroelectronics, 2003.** STMicroelectronics. *VIPer Flyback Converter Design Help - version 2.24*. URL: http://www.st.com/stonline/products/families/power_management/ac_dc_conversion/high_voltage_converters/related_info/vipfm5.htm, 2003. Downloadet: 20-05-2009.
- Valøen og Shoesmith, 2007.** Lars Ole Valøen og Mark I. Shoesmith. *The effect of PHEV and HEV DUTY cycles on battery and battery pack performance*, 2007.
- Varta. Varta. VARTA ULTRA dynamic.** URL: <http://pmd.varta-automotive.com/pmd2/showBatterieDetail.do;jsessionid=EF306E15A2926534CB061076DED0BF58?ArtikelNr=5959010853332>.
- Vejdirektoratet, 2004.** Vejdirektoratet. *Gennemsnitlig årskørsel pr. køretøj, i Danmark*. URL: http://webapp.vd.dk/interstat/display.asp?THEME_ID=1&PAGE_ID=1493&isTest=true, 2004. Tilgået: 20-05-2009.
- Vindmølleindustrien, 2009.** Vindmølleindustrien. *Vindkraftkapacitet i Danmark*. URL: <http://www.windpower.org/da/stats/capacityDK.htm>, 2009. Tilgået: 20-05-2009.
- www.milehighrc.com, 2009.** www.milehighrc.com. *Dollar for Dollar the best High rate Lithium Polymer (lipo) batteries we could find*. URL: <http://milehighrc.com/Lipos.html>, 2009. Tilgået: 20-05-2009.

Appendiks- og bilagsoversigt

Appendiks A Elbiler på markedet

Appendiks B Komponentliste

Bilag 1 Måleresultater fra batteriopladning

Bilag 2 Datablad for VIPer100

Bilag 3 Datablad for LM350

Bilag 4 Datablad for LM1458

Bilag 5 Billeder af strømforsyningen

Bilag 6 Billeder af Batteriladeren

Bilag 7 Billeder af vekselretteren

Bilag 8 Analysedata

Bilag 9 Pris pr.cyklus

Bilag 10 Induktans L11

Bilag 11 Økonomisk model

Bilag 12 Markedsdata - Regulering

Bilag 13 Markedsdata

Alle Appendiks og bilag er vedlagt på en CD baggerst i rapporten.

Elbiler på markedet A

Herefter følger en oversigt over et udvalg af elektriske biler med batterier, der i øjeblikket forhandles i Europa og USA.

Model	Rækkevidde	Batterikapacitet	Motoroutput	Ladetid
Kewet Buddy	40-80 km	10-15 kWh	13 kW	6-8 timer
Citroën C1 ev'ie	100-110 km		30 kW	6-7 timer
CityEl	80-90 km	<3,6 kWh	3,5 kW	
Mitsubishi i-MiEV	160 km	16 kWh		3-7 timer
MyCar	64-110 km			5-8 timer
NICE Mega City	96 km	3,7-8,2 kWh	20,2 kW	
REVA-I	80 km	9,6 kWh	13 kW	8 timer
REVA-L-ion	120 km	9,6 kWh	13 kW	1-6 timer
Tesla Roadster	320 km	53 kWh	185 kW	3,5 timer
Th!nk City	170 km	28,3 kWh	30 kW	9,5-13 timer
Venturi Fétish	300 km		180 kW	
ZAP Xebra	40-64 km	7,2 kWh	5 kW	4 timer

Gennemsnitlig batterikapacitet: 16,5 kWh

Bemærk: Enkelte bilspecifikationer er ikke repræsenteret, da de ikke oplyses af producenten, eller en troværdig kilde. Specifikationer er indsamlet fra bilernes respektive producents hjemmeside.

Komponentliste B

Komponenter til flybackkonverteren

Inputkomponenter

- 1 stk. BR1 3A 373V
- 1 stk. C2 100 μ F 373V
- 1 stk. C7 2,2nF 2KV
- 1 stk. C3 15nF 373V
- 1 stk. R1 12k Ω 3,7W
- 1 stk. D1 MUR160

Styringskomponenter

- 1 stk. VIPer100A
- 1 stk. D3 1N486B
- 1 stk. R4 100 Ω
- 1 stk. C4 μ F
- 1 stk. R2 7,5K Ω
- 1 stk. C5 4,7nF
- 1 stk. R3 10k Ω
- 1 stk. C6 6,8nF

Transformer

- Primær induktans: 385 μ H
- Kernemateriale: N67 type RM14
- Primære vindinger: 43 stk. 0,72mm
- Styringsvindinger: 7 stk. 0,1mm
- Sekundære vindinger: 10 stk. 2,3mm

Outputkomponenter

- 1 stk. D11 TO 220ACFP
- 1 stk. C11 2,2mF $I_{rms} = 3,7A$ ESR = 30m Ω 25V
- 1 stk. C12 270 μ F $I_{rms} = 130mA$ ESR = 138m Ω 25V

Komponenter til batteriladeren

Modstande:

- 1 stk. 0.1 Ω 2W
- 1 stk. 2E2 Ω
- 1 stk. 150 Ω
- 2 stk. 1k Ω
- 1 stk. 1k5 Ω
- 1 stk. 10k Ω
- 1 stk. 1M Ω
- 1 stk. 50k Ω trimpot
- 1 stk. 100 Ω trimpot
- 1 stk. 2k Ω trimpot

Kondensatorer:

- 1 stk. 4700 μ F 35V
- 1 stk. 10 μ F 25V

Dioder:

- 1 stk 1N4001
- 2 stk 1N4148

Lysdiode:

- 1 stk. grøn

Transistor:

- 1 stk. BC558

IC:

- 1 stk. LM1458
- 1 stk. LM350

Komponenter til vekselretteren

Transistor:

- 2 stk BD680 (Darlington)
- 2 stk 2N3055 40411 (Power Transistor)
- 2 stk BC547B

Kondensator:

- 2 stk 470nF

Diode:

- 2 stk 1N5401

Modstande:

- 2 stk 22 ohm - 5W
- 4 stk 330 ohm
- 2 stk 27k ohm