

---

# Vindoptimeret opladning V2G

## Wind Optimized Charging V2G

Analyse af tidsstyret, optimeret opladning af elbiler med vindproduktion, midlertidig lagring af overskydende vindproduktion og V2G (Vehicle-to-Grid) energi-arbitrage. Baseret på simulering af en konstrueret brugerprofils kørsel og opladning, ved brug af alternative elbilmodeller, alternative opladningsstrategier og i forhold til historiske elmarkedsdata. Simuleringernes primære output er årlig opladningsudgift, CO<sub>2</sub>-udledning per kørt km og vindandel i elforbrugets energimix.

---

## Vindenergi Danmark

Af Jørgen Horstmann & Frank Nørgaard

Medfinansieret af Energistyrelsen

April 2015

---



# Vindoptimizeret opladning V2G

Delrapport 3 af 4  
Bilag I. Datagrundlag  
V1.1 web



**VIND**ENERGI  
D A N M A R K

# Bilagsoversigt

Bilag I.	Datagrundlag.....	1
Bilag I.A.	Elmarkedsdata .....	2
Bilag I.B.	Elmarkedspladser .....	3
Bilag I.C.	Opladningsstrategier .....	4
Bilag I.D.	Kørselsprofil.....	5
Bilag I.E.	Elbil specifikationer .....	6
Bilag I.F.	Ladehastighed.....	7
Bilag I.G.	Ladetab .....	8
Bilag I.H.	Ladeprocess.....	9
Bilag I.I.	Ladevindue .....	10

# Bilag I. Datagrundlag

Hovedpunkterne i analysens datagrundlag og forudsætninger er overskueliggjort i figur 1.

Figur 1: Analysens datagrundlag og forudsætninger		
Datagrundlag	Beskrivelse	Datakilder
Elmarkedsdata	<ul style="list-style-type: none"> <li>Historiske elmarkedsdata for Danmark Vest for kalenderåret 2012</li> <li>Fx timeværdier for elpris, elforbrug, vindproduktion og CO<sub>2</sub>-udledning</li> <li>Prisområdet DK-Vest har høj vindkraftandel og er derfor velegnet som rollemodel for det fremtidige samlede elsystem (vest og øst)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energinet.dk's webtjeneste "Udtræk af markedsdata"</li> <li>Energinet.dk's FTP server</li> <li>Nord Pool elbørsens webtjeneste</li> </ul>
Elmarkedspladser	<ul style="list-style-type: none"> <li>Opladningsstrategien Vindoptimeret opladning V2G oplader på spotmarkedet og regulerkraftmarkedet (nedregulering), og den aflader på regulerkraftmarkedet (opregulering)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energinet.dk's webtjeneste "Udtræk af markedsdata"</li> </ul>
Opladningsstrategier	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ikke-styret opladning</li> <li>Vindoptimeret opladning G2V</li> <li>Vindoptimeret opladning V2G</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defineret forudsætning</li> </ul>
Kørselsprofil	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konstrueret, forenklet brugermodel for en elbilejer med et typisk kørselsforbrug til rutinemæssig daglig job-pendling</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DTU's Danmarks Transportvaneundersøgelse</li> <li>Danmarks Statistik</li> </ul>
Elbil specifikationer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konstruerede, forenklede modeller for elbilers specifikationer og energiforbrug</li> <li>Fx batterikapacitet, rækkevidde, energiforbrug til kørsel, elforbrug til opladning og opladningstid</li> <li>Illustreres som eksisterende elbil-modeller med cirka tilsvarende specifikationer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konstrueret og modificeret delvist ud fra elbilproducenters oplyste specifikationer for eksisterende elbil-modeller</li> </ul>
Ladehastighed	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konstruerede, forenklede modeller for opladningsforløb med givne ladested/ladeboks specifikationer</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Konstrueret og modificeret delvist ud fra elbil-producenters oplyste specifikationer for eksisterende elbil-modeller</li> </ul>
Ladetab	<ul style="list-style-type: none"> <li>7,5 pct. og 7,5 pct. ved op- og afladning</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defineret forudsætning</li> </ul>
Ladeproses	<ul style="list-style-type: none"> <li>Op- og afladning forløber tidsmæssigt lineært med konstant effekt i hele ladevinduet SoC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defineret forudsætning</li> </ul>
Ladevindue	<ul style="list-style-type: none"> <li>Afgrænsning af brugbar ladevindue til slitageskånsomt interval 10-90 % SoC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Defineret forudsætning</li> </ul>

## Bilag I.A. Elmarkedsdata

Simuleringerne baseres på historiske elmarkedsdata for prisområdet Danmark Vest i kalenderåret 2012. Data er tilvejebragt fra Energinet.dk's webtjeneste "Udtræk af markedsdata", Energinet.dk's FTP webtjeneste og Nord Pool elmarkedets webtjeneste. Fx elpris, elforbrug, vindproduktion og CO<sub>2</sub>-udledning.

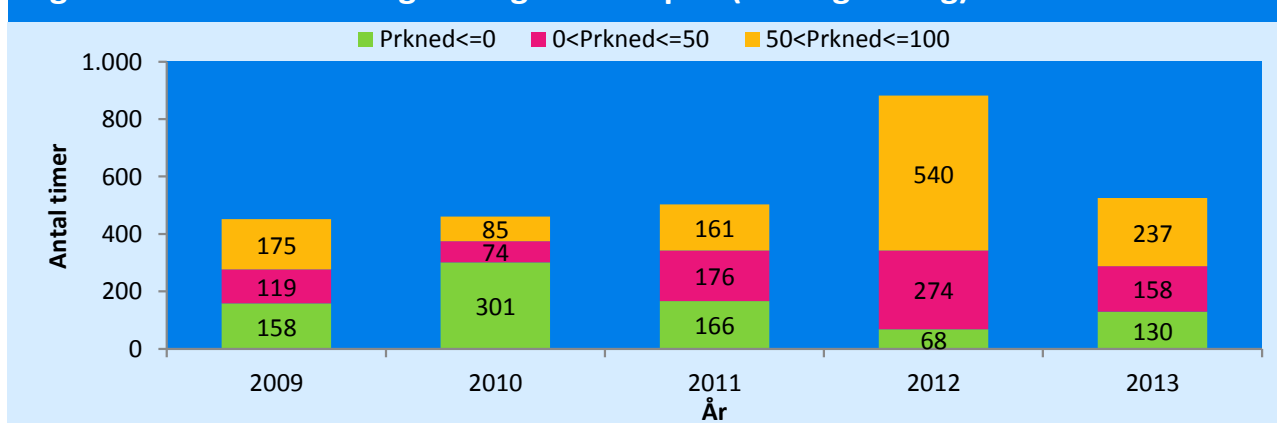
Elmarkedet i Danmark er opdelt i to prisområder, Øst og Vest, adskilt ved Storebælt. Danmark Vest er valgt som datagrundlag, fordi områdets energimix allerede i dag har høj vindandel, hvilket gør det velegnet som reference for et fremtidsscenario, hvor vindkraft er udbygget til 50 pct. af hele landets elforsyning.

Kalenderåret 2012 er valgt, fordi det ved analysens start er det seneste, hvortil der er publiceret data for hele året. Rentabiliteten ved Vindoptimeret opladning V2G afhænger af den prisvolatilitet, der primært forårsages af vindproduktionens fluktuationer, og som kommer til udtryk ved fx store variationer i løbet af døgnet, mange særligt lave og nul/negative priser på nedregulering, og mange særligt høje på opregulering. Prisvolatiliteten varierer fra år til år i takt med, at der på den ene side udbygges med ny vindkraft, der øger volatiliteten, og på den anden side implementeres nye løsninger til at afdæmpe effekten, fx udlands transmissionsforbindelser, varmepumper og elpatroner på kraftvarmeverker og frakobling af vindproduktion.

Dermed afhænger gevinsterne ved Vindoptimeret opladning V2G af, hvad der i øvrigt implementeres af alternativer, som "konkurrerer" om at løse samme problem med at balancere og aftage overskydende vindproduktion. Forventningen er, at vindandelen om få år vil nå et så højt niveau, at det er nødvendigt at benytte alle kendte løsningsalternativer, for at elsystemet vil kunne drives samfundsøkonomisk optimal. Herunder også fleksibelt elforbrug og energilagring, som fx opladning af elbiler og V2G.

Året 2012 kan betegnes som et relativt "dårligt" år til at generere besparelser med Vindoptimeret opladning, idet elprisen det år kun nåede under nul kroner i relativt få timer, nemlig 68 timer. Som det fremgår af figur 2 var der i 2010, to år før, ca. fire gange så mange timer med nul/negative elpriser, nemlig 301 timer. Forskellen kan hænge sammen med de nye løsninger, der blev implementeret i de pågældende år, og som kan have medvirket til at afdæmpe prisudsving. Fx Storebæltskablet, store varmepumper og elpatroner i fjernvarmen. Jævnfør tidligere rapport "Vindoptimeret opladning af elbiler" ville det koste minus 361 kr. at oplade en Tesla S til et års kørselsforbrug med Vindoptimeret opladning, når markedsdata baseres på kalenderåret 2010. Sammenlignet med Ikke-styret giver det en besparelse på 129 pct. Benyttes i stedet markedsdata for 2012, bliver opladningsudgiften 274 kr., svarende til en besparelse på 76 pct.

**Figur 2: Timer med særlig lav regulerkraftpris (nedregulering) DK-Vest 2009-2012**



## Bilag I.B. Elmarkedspladser

Vindoptimeret opladning V2G defineres i nærværende analyse som opladning i spot- og regulerkraftmarkedet samt afladning i regulerkraftmarkedet. I senere udgaver af opladningsstrategien vil markedsdeltagelsen blive udvidet til også at omfatte el- og kapacitetsprodukter på andre markedspladser.

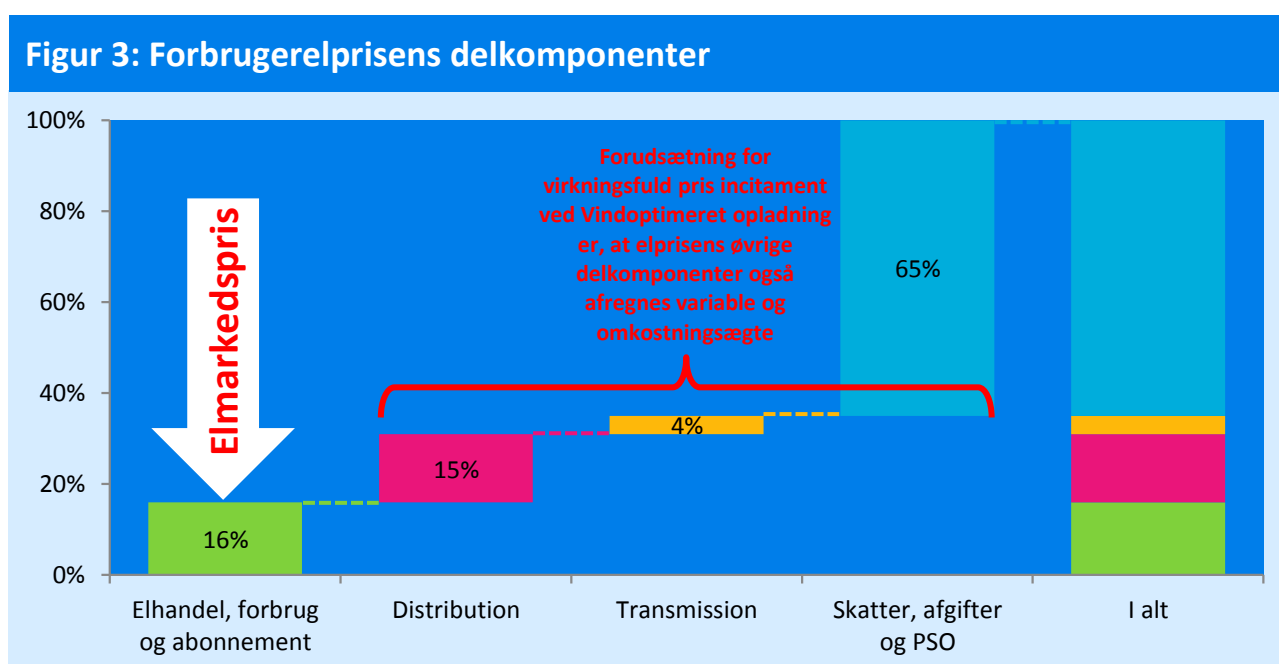
Elmarkedet er i grossistledet opdelt i en række elmarkedspladser, hvor der handles forskellige elprodukter for energi og kapacitet. De elmarkedspladser, der typisk fremhæves som værende mest velegnede til intelligent opladning og V2G, er:

- Spotmarkedet
- Regulerkraftmarkedet
- Manuel reserve
- Primær reserve (frekvensregulering)

To-markedsdeltagelsen i spot- og regulerkraftmarkedet begrundes med, at det først og fremmest er på disse to markedspladser, at elbilernes deltagelse i markedsdannelsen vil kunne bidrage til at effektivisere udnyttelsen af vindkraft og øge vindproduktionens markedsværdi.

Spot- og regulerkraftmarkedet rummer også det største potentiale for, at mange elbiler vil kunne deltage og generere gevinster for elbilejerne. Endelig vil elbiler kunne deltage i spot- og regulerkraftmarkedet uden, at det vil kræve større ændringer i reglerne for markedsdeltagelse.

Opladningsudgift opgøres til individuelle timepriser, dvs. el-grossistpriser. Elprisen består i forbrugerledet af tre delelementer, energipris, nettariffer og afgifter. Opladningsudgiften er el-grossistpris-delen af energiprisen, som illustreret i figur 3. De andre dele, nettariffer, afgift og moms er ikke indregnet i opladningsudgiften.



## Bilag I.C. Opladningsstrategier

Simuleringerne omfatter tre alternative opladningsstrategier, Ikke-styret opladning, Vindoptimeret opladning (uden V2G) og Vindoptimeret opladning V2G. Definerings af opladningsstrategierne er beskrevet i punktform i figur 4.

Budstrategierne udgør kernen i det prissignal, der tidsstyrer og optimerer elbilernes opladning. Forud for simuleringerne af de analyserede opladningsstrategier er der eksperimenteret med forskellige alternative strategier for budafgivelse i regulerkraftmarkedet. Fx vedrørende fastsættelse af de pristærskel-værdier, der bestemmer, hvornår og til hvilke priser, henholdsvis op- og afladning accepteres.

Pristærsklen for opladning i regulerkraftmarkedet kan fastsættes som en fast konstant, fx nul kroner, hvilket betyder, at elbilen kun accepterer opladning i de timer, hvor elprisen er nul kroner eller derunder. Eller den vil eksempelvis kunne fastsættes som en variabel i forhold til spotprisen, fx således, at der kun accepteres opladning, når regulerkraftprisen er lavere end spotprisens laveste kvartil.

**Figur 4: Definerings af opladningsstrategier**

<p><b>Ikke-styret opladning</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reference for fordelene/gevinsterne ved Vindoptimeret opladning (uden V2G)</li> <li>• Den opladningsadfærd elbilejere vil udvise, såfremt de ikke har andet incitament</li> <li>• Ingen tidsforskydning</li> <li>• Opladning hver dag</li> <li>• Påbegyndes straks efter ankomst på hjemmelokation</li> <li>• Afbrydes, når batteriets SoC igen er 100 pct.</li> <li>• Opladning alene i spotmarkedet</li> </ul>
<p><b>Vindoptimeret opladning</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reference for fordele/gevinster ved Vindoptimeret opladning V2G</li> <li>• Tidsforskydning til timer med laveste elpriser</li> <li>• Ikke nødvendigvis rutinemæssig opladning hver dag, men efter behov og muligheder</li> <li>• Afbrydes, når SoC svarer til næste dags planlagte kørsel</li> <li>• Opladning i spot- og regulerkraftmarkedet</li> </ul>
<p><b>Vindoptimeret opladning V2G</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Analyseobjekt</li> <li>• Principielt samme adfærdsstyring som ved Vindoptimeret opladning (uden V2G)</li> <li>• Tilføjelse af V2G og energi-arbitrage</li> <li>• Afladning i regulerkraftmarkedet i timer med højeste elpriser for opregulering</li> </ul>

## Bilag I.D. Kørselsprofil

Elbilerens kørselsprofil er konstrueret ud fra data fra DTU's Transportvaneundersøgelse og Danmarks Statistik. Profilen er konstrueret for en typisk dansk jobpendler, dvs. en person, der bruger elbilen til daglig, rutinemæssig kørsel til og fra arbejde, og med et tilsvarende kørselsforbrug på weekenddage. Det daglige kørselsforbrug anslås til ca. 45 km, svarende til 16.425 km per år.

Videre forudsættes kørselsrutinen at bestå af to daglige køreture á en time, henholdsvis til arbejde i perioden kl. 8:00 til 9:00, og fra arbejde i perioden kl. 17:00 til 18:00. Elbilen tilkobles opladning både på hjemmelokationen og på arbejdslokationen. Dermed forudsættes elbilen til rådighed for op- og afladning i 22 timer i døgnet, svarende til cirka 92 pct. af tiden.

Endelig forudsættes et buffer-lager til ikke-planlagt kørsel svarende til en tredjedel af dagligt kørselsforbrug, dvs. opladning til 15 km kørsel. Med den energieffektivitet for de to elbilmodeller, der er angivet i figur nedenfor, svarer det til et minimum buffer-lager på henholdsvis 2,4 og 2,79 kWh. Elbilerens kørsels- og opladningsprofil opsummeres i figur 5.



Figur 5: Konstruktion af kørselsprofil	
<b>Kørselsprofil</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Typisk dansk jobpendler</li> <li>• Rutinemæssig, daglig kørsel til og fra arbejde</li> </ul>
<b>Kørselsforbrug</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 16.425 Km/år</li> <li>• 45 Km/dag</li> </ul>
<b>Rådighedsperioder</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hjemme kl: 18-08</li> <li>• Arbejde kl: 09-17</li> </ul>
<b>Kørselsperioder</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ud kl: 8-9</li> <li>• Hjem kl. 17-18</li> </ul>
<b>Buffer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 33 1/3 pct. af daglig kørselsforbrug</li> <li>• Nok til 15 km kørsel</li> </ul>



## Bilag I.E. Elbil specifikationer

I simuleringerne benyttes to elbilmodeller med henholdsvis kort rækkevidde/lille batteri og lang rækkevidde/stort batteri. Elbilerne konstrueres ud fra specifikationer, der overordnet svarer til oplysningerne for to markedsførte elbiler, Nissan Leaf og Tesla S, samt egne erfaringer. Specifikationerne fremgår af figur 6.

**Figur 6: Elbil specifikationer**

Elbilmodel		
	<b>Nissan Leaf 24/160</b>	<b>Tesla S 90/186</b>
Batterikapacitet	24 kWh	85 kWh
Elforbrug	160 Wh/km	186 Wh/km
Rækkevidde	150 km	483 km
Min. buffer i % af dagligt kørselsforbrug	45 km * 33 1/3 % = 15 km = 2,4 kWh	45 km * 33 1/3 % = 15 km = 2,79 kWh
Min. buffer i % af batterikapacitet	10 %	3,3 %

\*) Betegnelsen xx/yyy refererer til xx kWh batterikapacitet og yyy Wh elforbrug per km

## Bilag I.F. Ladehastighed

Ladehastigheden har betydning for gevinstpotentialer med Vindoptimeret opladning V2G. Høj ladehastighed øger elbilens forbrugsfleksibilitet og dermed potentialer for alene at oplade i de timer, hvor elprisen er lavest. Lav ladehastighed gør, at elbilen vil skulle oplade i de fleste af nattens timer, hvilket indskrænker muligheden kunne oplade alene i de timer, hvor elprisen er lavest.

Vindoptimeret opladning V2G defineres med et minimum krav om "semi-hurtig" ladning, dvs. et netstik med min. 11 kW effekt (3-fase, 230 V og 16 amp). Standarden for private i Danmark er 3,6 kW, og opgradering til "semi-hurtig" ladning vil typisk svare til den højeste hastighed, der vil kunne opnås med eksisterende distributionsnet tilførsel. Typiske stiktype effekter illustreres i figur 7.

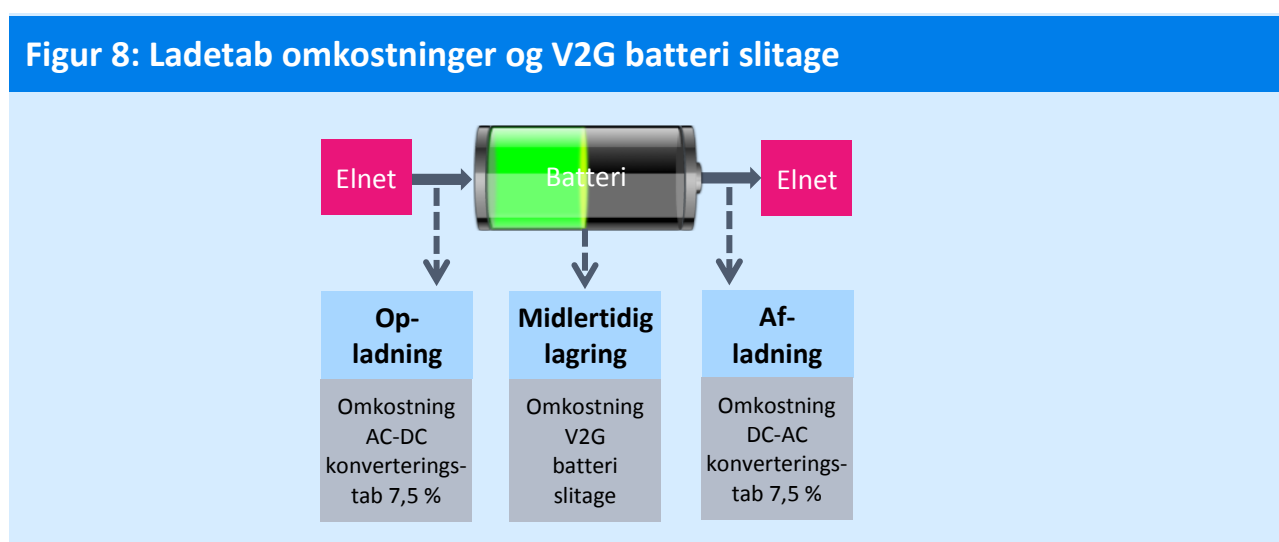
**Figur 7: Eksempler på stiktype effekter og ladetab**

Alternativ	Spec	Effekt (kW) op-/afladning før ladetab	Effekt ladetab op-/afladning	Konverterings-effektivitet	Effekt (kW) op-/afladning efter ladetab
Alternativ 1	230 V 1 fase 10 A	3,6/3,6	7,5 %/7,5 %	92,5 %/92,5 %	3,33/3,33
Alternativ 2	<b>400 V 3 fase 16 A</b>	<b>11/11</b>	<b>7,5 %/7,5 %</b>	92,5 %/92,5 %	<b>10,18/10,18</b>
Alternativ 3	400 V 3 fase 32 A	22/22	7,5 %/7,5 %	92,5 %/92,5 %	20,35/20,35

## Bilag I.G. Ladetab

Ladeeffektiviteten udtrykker, hvor meget energi, batteriet tilføres efter fradrag af ladetab ved konvertering fra veksel- til jævnstrøm. Tilsvarende tabes energi under tilbagekonverteringen og afladning tilbage til el-nettet. I denne analyse forudsættes ens ladetab for op- og afladning, dvs. 7,5 pct. ved opladning og 7,5 pct. ved afladning, som illustreret i figur nedenfor.

I midten af figuren illustreres desuden V2G omkostningerne til batteri slitage, som beskrives nærmere i bilag II om batteriets kostpris og batterislitage.

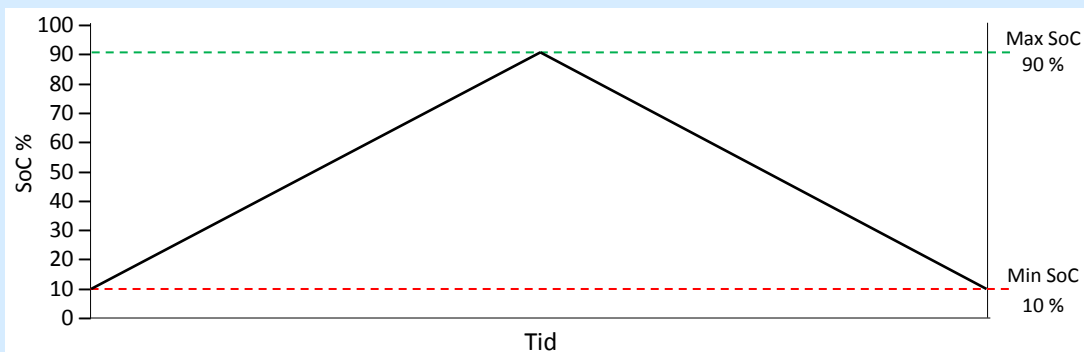


## Bilag I.H. Ladeproces

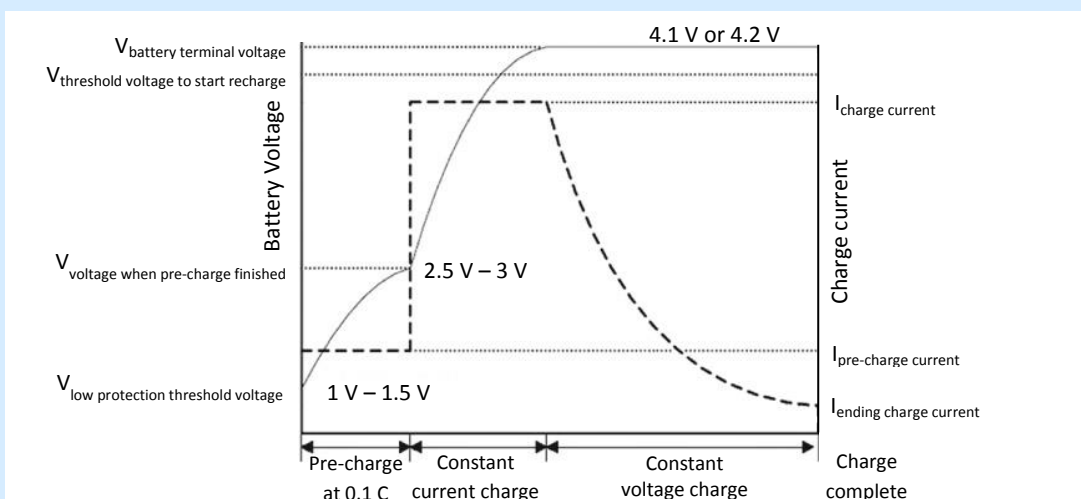
SoC forudsættes at stige/falde lineært med konstant ladeeffekt i hele ladevinduet i hele ladeperioden. I figur 9 vises den lineære udvikling i SoC for en op- og afladnings cykling inden for et brugbart afkortet ladevindue i intervallet 10-90 pct. SoC. Figuren viser, at op- og afladningen forløber med jævn hastighed. Det tager således lige så lang tid at oplade 1 kWh fra 10 pct. SoC og fra 90 pct. SoC.

I figur 10 vises en typisk ladeproces for et lithium-ion batteri. Processen styres i to faser med to metoder, konstant volt og konstant effekt<sup>1</sup>. Hvis batteriet ikke tidligere har været i brug, for-oplades med konstant, lav effekt, og det fortsættes i fase et, men med højere effekt. Når volt eller SoC når en grænse tæt på fuld opladning, indledes fase to, hvor volt holdes konstant, og effekten aftager. Den konkrete grænse afhænger af batteriet. Fx forudsættes i et case studie 30 pct. ladehastighed reduktion ved 80 pct. SoC. Ladehastigheden falder som standard fra 3,1 til 2,2 kWh per time, og ved hurtigladning fra 16,7 til 11,7 kWh per time<sup>2</sup>.

**Figur 9: Ladeproces for cykling med konstant effekt**



**Figur 10: Typisk ladeproces for lithium-ion batteri**

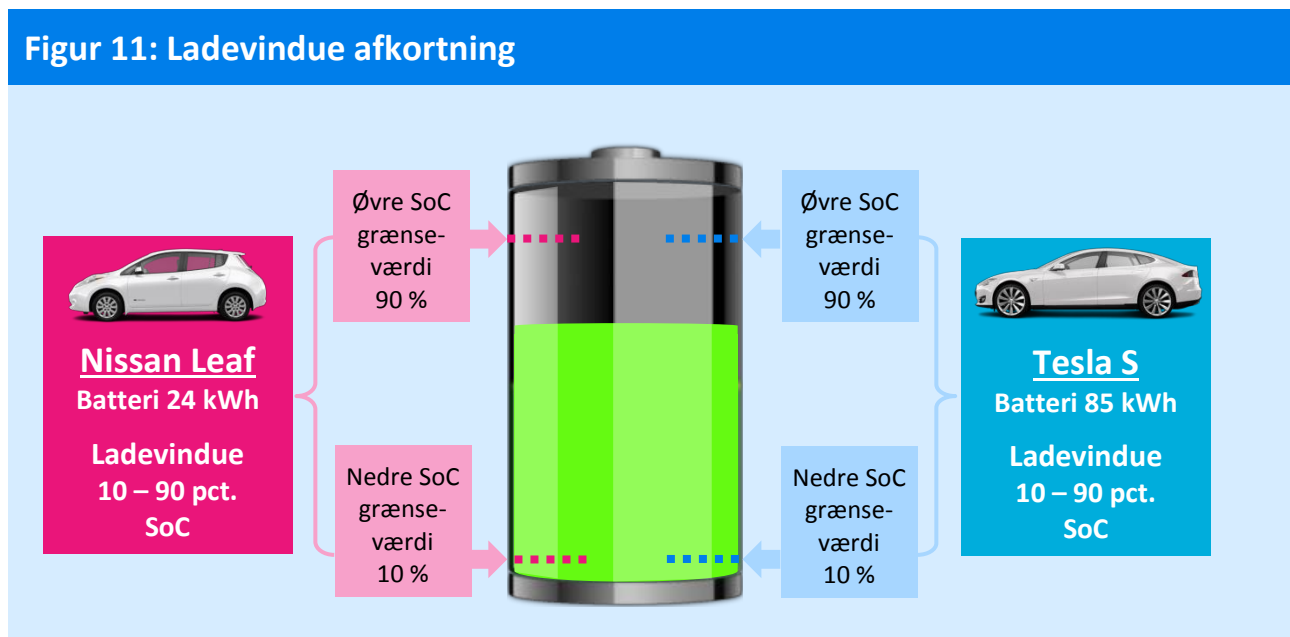


<sup>1</sup> Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks, Power Electronics and Power Systems; R. Garcia-Valle and J.A. Pecas Lopes (eds.); Springer Science+Business Media; New York; 2013

<sup>2</sup> Smart EV VC Facts & Current Status of the Standardization for EV Batteries and Charging Infrastructure; Li-Ion Battery Charging Basics; Fairchild Semiconductor; 2010

## Bilag I.I. Ladevindue

Det forudsættes, at batteriets fulde kapacitet på 100 pct. SoC afkortes til et brugbart ladevindue. Som illustreret i figur 10 afkortes model elbilernes kapacitet til et ladevindue på 10-90 pct. SoC.





**VIND**ENERGI

D A N M A R K



**VIND**ENERGI

D A N M A R K

# Vindoptimizeret opladning V2G

Delrapport 3 af 4  
Bilag I. Datagrundlag  
V1.1 web



**VIND**ENERGI

D A N M A R K