
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, CO₂-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 4 af 4
Bilag II. Batterislitage
V1.1 web



VINDENERGI
D A N M A R K

Bilagsoversigt

Bilag II. Batterislitage.....	1
Bilag II.A. Kostpris for elbil batteri.....	2
Bilag II.B. Viden om batteri slitage	5
Bilag II.C. Model for V2G batteri slitage omkostninger.....	10

Bilag II. Batterislitage

Et elbil-batteri slides, når det bruges, og fordi tiden går. Slitagen gør, at kapaciteten løbende svinder ind, og når den er reduceret til et vist niveau, anses batteriet for værende opslidt og ubrugelig som energilager til elbil-kørsel. V2G intensiverer brugen, fordi der periodisk op- og aflades mere energi, og det øger slitagen.

I nærværende bilag II beskrives den omkostningsmodel for batteri slitage, der konstrueres til at analysere gevinsterne ved Vindoptimeret opladning V2G. Batteri slitage omkostningerne er afgørende for, om V2G vil kunne betale sig, eller om besparelserne bliver lavere end med Vindoptimeret opladning uden V2G.

Indledningsvis estimeres kostprisen for batterier, og den fremtidige prisudvikling vurderes. Dernæst beskrives eksisterende viden om batteri slitage for Vindoptimeret opladning V2G. Til sidst beskrives den konstruerede omkostningsmodel, der benyttes i analysen, og hvordan den anvendes til at efterberegne gevinsterne ved Vindoptimeret opladning V2G.

Bilag II.A. Kostpris for elbil batteri

Udgangspunktet for at vurdere omkostninger til batterislitage er at kende batteriets kostpris. Fastsættelse af batteriets kostpris og beslutning om, hvilke omkostningselementer, der bør indgå i slitage omkostningsmodellen er i sig selv både usikker og kompleks, og det bliver desto mere vanskelig, når kostprisen skal fremskrives under givne forudsætninger vedrørende produktionsmæssige stordriftsfordele.

Et af de bedst dokumenterede bud herpå er fra det amerikanske forsknings- og udviklingsprojekt EV Everywhere Grand Challenge under det amerikanske energiministerium US DOE (United States Department of Energy) VTO (Vehicle Technology Office)¹. Projektet er et samarbejde med erhvervskonsortiet USABC (United States Advanced Battery Consortium) under bil-organisationen USCAR (United States Council for Automotive Research), og som drives af USA's tre førende bilproducenter, Chrysler, Ford og GM.

Under dette projekt medfinansierer DOE batteri forsknings- og udviklingsprojekt hos førende joint-ventures mellem bilproducenter som BMW, Mercedes, Chrysler, Ford og GM samt batteri producenter som Johnson Controls, LG Chem og A123Systems. Projektets anvendt forskning arm ledes af national-laboratoriet Argonne National Laboratory (ANL) og har deltagelse af en række øvrige nationale laboratorier og universiteter.

DOE har opstillet en række ydelsesmæssige målsætninger for EV Everywhere, der skal overkomme tekniske barrierer og muliggøre storskala kommercialisering af batterier til elbiler. Nogle af disse målsætninger fremgår af figur 1, fx vedrørende salgspris, levetid, energitæthed, størrelse og vægt. Ifølge projektets seneste fremdrifts rapport er kostprisen faldet fra ca. 1.000 USD per kWh i 2008 til ca. 325 USD ved udløbet af 2013. Delmålet for 2014 er 300 USD per kWh, og slutmålet er ca. 125 USD i 2020².

Figur 1: USABC's performance mål for batterier til elbiler i 2020

End of Life Characteristics at 30°C	Units	System Level	Cell Level
Peak Discharge Power Density, 30 s Pulse	W/L	1000	1500
Peak Specific Discharge Power, 30 s Pulse	W/kg	470	700
Peak Specific Regen Power, 10 s Pulse	W/kg	200	300
Useable Energy Density @ C/3 Discharge Rate	Wh/L	500	750
Useable Specific Energy @ C/3 Discharge Rate	Wh/kg	235	350
Useable Energy @ C/3 Discharge Rate	kWh	45	N/A
Calendar Life	Years	15	15
DST Cycle Life	Cycles	1000	1000
Selling Price @ 100K units	\$/kWh	125	100
Operating Environment	°C	-30 to +52	-30 to +52

¹ EV Everywhere Grand Challenge Blueprint, U.S. Department of Energy DOE, 2013

² Fiscal Year 2013 Annual Progress Report for Energy Storage R&D, US DOE VTO, Approved by David Howell, 2014

Normal Recharge Time	Hours	< 7 Hours, J1772	< 7 Hours, J1772
High Rate Charge	Minutes	80% ΔSOC in 15 min	80% ΔSOC in 15 min
Maximum Operating Voltage	V	420	N/A
Minimum Operating Voltage	V	220	N/A
Peak Current, 30 s	A	400	400
Unassisted Operating at Low Temperature	%	> 70% Useable Energy @ C/3 Discharge rate at -20 °C	> 70% Useable Energy @ C/3 Discharge rate at -20 °C
Survival Temperature Range, 24 Hr	°C	-40 to +66	-40 to +66
Maximum Self-discharge	%/month	<1	<1

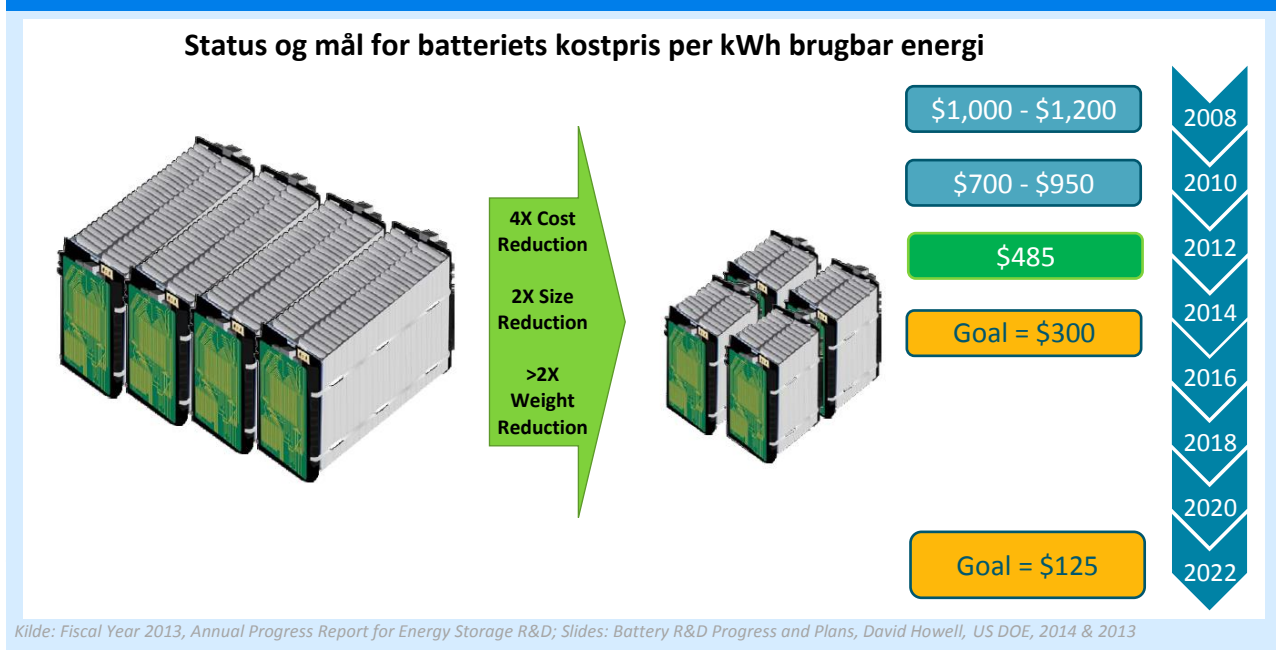
Kilde: Fiscal Year 2013 Annual Progress Report for Energy Storage R&D, US DOE VTO, Approved by David Howell, February 2014

I nærværende analyse benyttes EV Everywhere projektets 2014-delmål på 300 USD per kWh som reference for batteriets kostpris til beregning af V2G batteri slitage omkostninger. Dermed antages det, som det fremgår af nedenstående figur 2, at kostprisen er henholdsvis:

- 7.200 USD (43.200 DKK) for et 24 kWh batteri, og
- 25.500 USD (153.000 DKK) for et 85 kWh batteri

US DOE's præstationsmål om en kostpris for batterier til elbiler på 100 USD/kWh (celle) (600 DKK/kWh) i 2020 er lavt sammenlignet med, hvad andre aktører og myndighedsorganer forventer. EU Kommissionens rådgivningsorgan ERTRAC (European Road Transport Research Advisory Council) anslår i en rapport fra 2012 en kostpris på mellemlang sigt på 200 Euro/kWh (1.489 DKK/kWh) (på celle-niveau). Dvs. over det dobbelte af DOE's forventning i 2020³. Konsulentvirksomheden Boston Consulting Group (BCG) vurderer i en rapport fra 2010, at "det er usandsynligt, at omkostningsmålet på 250 USD per kWh i 2020 kan nås hverken på celle-niveau eller batteripakke-niveau"⁴. BCG's egen analyse vurderer, at kostprisen på OEM-niveau i 2020 ville lande på 360-440 USD per kWh. Samme præstationsmål, som DOE angiver som opnået i 2013.

Figur 2: US DOE EV Everywhere mål for batteri kostpris og ydelse



Endelig fremhæves medieudtalelser om omkostningerne ved batteri produktion fra ledende medarbejdere i Tesla Motors som indikatorer for det nuværende og fremtidige prisniveau. Differencen mellem købsprisen for en Tesla S med et 60 kWh og et 85 kWh batteri er i dag 10.000 USD, hvilket svarer til en batteriomkostning på 400 USD per kWh⁵.


Ifølge Tesla's CEO Elon Musk under præsentationen af Gigafactory i 2014, vil stordrift og nye produktionsanlæg muliggøre en omkostningsreduktion på "mere end 30 pct." i 2017⁶. Ifølge 60-85 kWh beregningen bringer det kostprisen ned på ca. 280 USD per kWh.

Tesla Motors' CTO JB Staubel har i 2013 udtalt sig vedrørende påstanden om, at batteriomkostningen er ca. halvdelen af købsprisen for en Tesla S, dvs. ca. 470 USD per kWh. Ifølge JB Staubel er batteri omkostningernes andel af købsprisen (i 2013) meget lavere: "Faktisk er de langt mindre end halvdelen. I de fleste tilfælde mindre end det kvarte"⁷.

Indikationerne om Tesla's batteriomkostninger stemmer nogenlunde overens med det niveau, der fås med den såkaldte BatPac ydelses- og omkostningsmodel, som Argonne National Laboratory har udviklet, og som DOE har brugt til at fastsætte målsætningerne for EV Everywhere⁸. Præmisserne er, at industri gennemsnittet for batteriomkostningen i dag er 500 USD per kWh, men for Tesla er den 300 USD.

Men en reduktion jævnfør Tesla's planer for Gigafactory på 30 pct. kommer den ned på ca. 200 USD per kWh, og det stemmer cirka overens med, hvad man kommer frem til med BatPac beregningsmodellen med de stordriftsfordele, en produktion på 100.000 elbiler ville give⁹.

Figur 3: Elbil batteri kostpris til omkostningsmodel for batterislitage

Elbilmodel		
	Nissan Leaf 24/160	Tesla S 90/186
Batterikapacitet	24 kWh	85 kWh
2014: Kostpris per kWh (system) ^{*)**)}	300 USD = 1.800 DKK	300 USD = 1.800 DKK
2014: Kostpris per elbil	7.200 USD (43.200 DKK)	25.500 USD (153.000 DKK)
2022: Kostpris per kWh (system) ^{*)**)}	125 USD = 750 DKK	125 USD = 750 DKK
2022: Kostpris per elbil	3.000 USD (18.000 DKK)	10.625 USD (63.750 DKK)

*) EV Everywhere 2014-målsætning ifølge EV Everywhere Progress of Battery Development Project, Plug-In Battery Cost (per kWh Useable Energy), U.S. Battery R&D Progress and Plans, David Howell, US DOE, 2001; **) Valuta omregningskurs 6 DKK/USD

⁵ www.teslamotors.com

⁶ Tesla Gigafactory slides, Tesla Motors

⁷ How Tesla Is Driving Electric Car Innovation, MIT Technology Review, 7. August 2013

⁸ Elon Musk's massive bet on batteries is riding on two big if's, Quartz, 28. Februar 2014

⁹ BatPaC: A Lithium-Ion Battery Performance and Cost Model for Electric-Drive Vehicles, Argonne National Laboratory

Bilag II.B. Viden om batteri slitage

Ældning refererer til de uoprettelige fysiske og kemiske effekter, der reducerer et batteris ydelse¹⁰. Batteriets kapacitet svinder ind, efterhånden som det bruges, og tiden går, og det kan skyldes effekter af en række forskellige processer, som finder sted i forskelle dele af batteriets celler. Ældningen opleves typisk ved, at elbilen får kortere rækkevidde ved fuld opladning og eventuelt lavere acceleration.

Et elbil-batteri ældes som følge af, at det bruges og at tiden går. Brugspåvirkningen afhænger primært af, hvor meget det bruges, og hvordan det bruges, mens tidspåvirkningen vedrører den degenerering, der alene skyldes, at tiden går.

Vindoptimeret opladning V2G øger batteriets ældning, fordi der cykles, dvs. op- og aflades, flere kWh end ved cykling alene til kørsel. Fx totalt 4.500 kWh per år, hvor 3.000 kWh anvendes til kørsel, og 1.500 kWh til afladning tilbage til elnettet. V2G cyklingerne øger brugen af batteriet, og det forkorter dets brugbare levetid, så det kan blive nødvendigt at udskifte med et nyt, tidligere end ellers.

Det øgede brugs effekt på ældningen afhænger af brugsmønstret. Dels V2G cyklingsens brugsmønster i sig selv, dels de ændringer, V2G cyklingen forårsager i opladningsmønstret for den del, der anvendes til kørsel.

Figur 4: Vindoptimeret opladning V2G's effekt på batteri-ældning

$$\begin{aligned} & \text{Batteri-ældning ved Ikke-styret opladning} \\ - & \text{Ældning ved Vindoptimeret opladning V2G} \\ = & \Delta \text{ ældning ved Vindoptimeret opladning V2G} \end{aligned}$$

Hvor Δ ældning ved V2G = ældning ved V2G + Δ ældning for opladning til kørsel

Batteriets levetid omfatter perioden fra det tages i brug første gang (BoL, Beginning of Life), til det ikke længere er brugbar (EoL, End of Life). Det amerikanske batteri-samarbejde USABC opererer med et EoL kriterie, hvor batteriet anses for ubrugeligt, når dets nominelle kapacitet er reduceret til 80 pct. af den oprindelige kapacitet¹¹.

Kapacitetsreduktionen påvirkes hovedsagelig af følgende stress-faktorer¹²:

- Temperatur
- Cykling
- SoC-swing
- C-rate

¹⁰ Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

¹¹ USABC: U.S. Advanced Battery Consortium, Electric vehicle battery test procedure manual, Tech. Rep., 1996; Plug-in electric vehicles integrating fluctuating renewable electricity, Dallinger, David, Fraunhofer, 2012

¹² Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

- Kalenderlevetid (lagringsperioder, SoC i lagringsperioder)

Ældning tilskrives typisk 2 mekanismer:

- Kalender baseret ældning: Effekter på ydelse forårsaget af (lagrings-)tid og temperaturer – dvs. tid
- Cykling baseret ældning: Effekter på ydelse forårsaget af op-/afladningscykling – dvs. brug (maksimal antal cyklinger eller maksimal anvendelsestid ved specifikke brugsbetingelser)

Temperatur: Temperaturstigninger øger over tid cellernes relative modstand, og det reducerer levetiden. Det antages dog at have lav relevans for V2G, idet det antages, at batteripakken i nødvendigt omfang afkøles henholdsvis opvarmes før og under V2G cykling¹³.

C-rate: C-raten angiver forholdet mellem ladeeffekt (A eller kW) og batteriets energi volumen (Ah eller kWh). Fx defineres 16 kW ladeeffekt for et batteri på 16 kWh som 1 C-rate. Alternativt giver 32 kW afladningseffekt 2 C-rate (32 kW afladningseffekt/16 kWh batteri energi).

C-rate influerer på celletemperatur og påvirker ældning. C-raten er lav ved V2G cykling sammenlignet med C-raten ved kørsels cykling, og dermed er C-rate ældningsfaktoren ved V2G cykling relativ lav.

Det antages dog også at have lav relevans for V2G afladning, fordi effekten ved V2G afladning typisk kun udgør en brøkdel af de effekter på fx 30-100 kW, og endnu højere peak-effekter, som elbilers elmotor opererer med under kørsel. Forsøg med en bestemt type lithium-ion batteri har vist, at kapacitet reduktionen for kørsel (2,85 C-rate) kan være 2,2 gange højere end for V2G (0,5 C-rate).

Figur 5: C-rate effekter normaliseret med batteri kapacitet

C-rate	Andel	Effekt til op-/afladning
1	C/1	1 time
10	C/0,1	0,1 time
0,25	C/4	4 timer

I nærværende rapport's simuleringer er afladningseffekten for V2G ca. 10,2 kW efter konverteringstab, dvs. en brøkdel af effekten ved kørsel.

DoD og SoC-swing: Batteriers cykling-levetid relaterer til afladningsdybde (DoD, Depth of Discharge) eller SoC-swing (SoC, State of Charge). Relationen mellem et batteri's cykling-levetid og henholdsvis DoD eller SoC-swing er ifølge mange eksperter blandt hovedfaktorerne for cykling-baseret ældning.

De parametre, der influerer på batterislitage, afhænger af modelleringstilgangen. Der kan overvejes forskellige alternative tilgange til batteri ældning¹⁴.

¹³ Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

Figur 6: Alternative modelleringstilgange

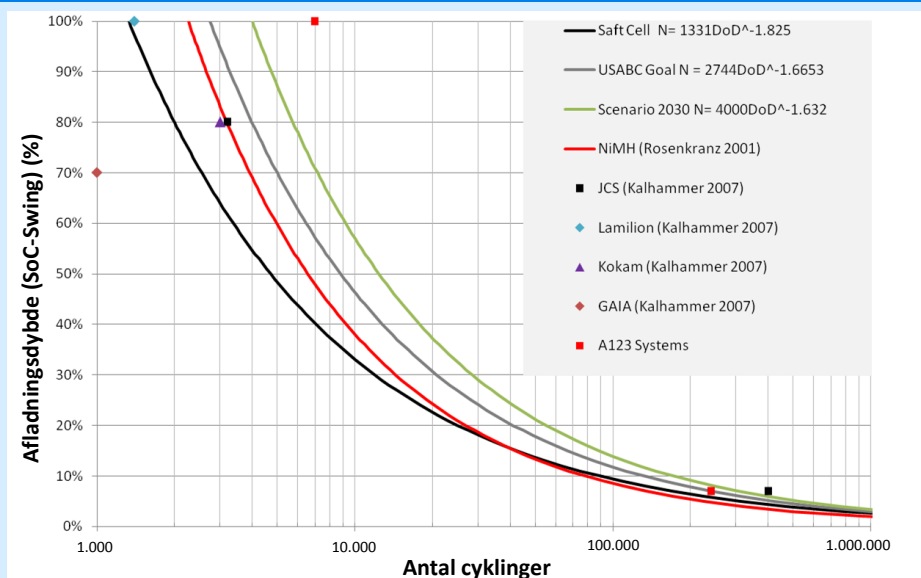
Modeller baseret på fysiske og kemiske processer	Modeller baseret på energi overførsel	Event-orienterede modeller
Højt komplekse. Giver mest præcis information om batteriets ældning. Kræver laboratorie eksperimenter til at karakterisere hvert batteris specifikke kemiske sammensætning. Algoritmer for komplekse til afvikling i indlejrede elbil-systemer.	Mindre komplekse. Kan bruges som relativt præcis heuristisk tilgang til at bestemme batteri ældning. Kræver detaljeret information om stres faktoreres effekter. Disse faktorer er vanskeligt at definere, nye kemiske sammensætninger for lithium-ion batterier udvikles hastigt, og fremtidens materialer er uafklaret.	Ældning beregnes alene for en enkelt stres faktor. Bestemmer antal cyklinger i batteriets levetid som en funktion af afladningsdybde. Cyklings levetid relateret til afladningsdybde er en passende modelleringstilgang for V2G cyklings, hvor betingelser som temperatur, c-rate og kalender-ældning kan defineres.

De eksakte slitage karakteristika og stresfaktorenes indflydelse på batteriældning og levetid varierer fra batteri til batteri, alt efter batteriernes kemiske kompositioner, celledimensionering og systemdesign, og de kan kun identificeres ud fra producentens specifikationer. Batterier med identiske materialer viser samme karakteristika. Fx udsættes de fleste lithium-ion batterier for stress i begge ender af SoC.¹⁵

Omkostningseffekt: Afladningsdybde

Som det fremgår af figur 7 influeres batteri degradering af afladningsdybde DoD. Figuren illustrerer, hvordan batteriets cyklings levetid er afhængig af afladningsdybden, hvor antal cyklinger er afbildet ud af X-aksen (efter logaritmisk skala), og afladningsdybden (DOD, i procent) op af Y-aksen. Som det fremgår af figuren, og som de fleste tidligere målinger har indikeret, reduceres lithium-ion batteriers kapacitet og performance som et resultat af cyklings, og tabets omfang afhænger både af antal cyklinger og afladningsdybden (DoD), som batteriets udsættes for under disse cyklinger¹⁶.

Figur 7: Batteri cyklings levetid afhængig af afladningsdybde (DoD)



Kilde: Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

¹⁴ Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

¹⁵ A practical battery wear model

¹⁶ Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization; Scott B. Peterson, Jay Apt og J. F. Witacre, Journal of Power Sources; 2009

Ved helt dybe afladninger (høj DoD pct.) reduceres batteriets cykling levetid betydeligt (få cyklinger), hvorimod der med lette afladninger (lav DoD pct.) kan opnås mange cyklinger. Fx viser kurven for USABC Goal, at der kan opnås 5.000 cyklinger ved DoD 70 %, og 1 mio. cyklinger ved DoD 3 %. Hvis der fx er tale om et 24 kWh batteri, vil der ved DoD 70 % kunne opnås afladning af i alt ca. 84.000 kWh $((24 * 70 %) * 5.000)$. Ved DoD 3 % vil der kunne aflades i alt ca. 720.000 kWh $((24 * 3 %) * 1.000.000)$.

Videre ses, at der for A123 Systems antages at kunne opnås 7.000 cyklinger, førend kapaciteten antages at være reduceret til 20 pct. Det resulterer i en levetids reduktion på 0,0029 pct. per cykling.

Bemærk, at modellen indikerer den højeste levetid $((x,y)=(1.000.000, 0\%))$ for et fuldt opladet (100 % SoC) batteri uden cykling. Denne betingelse, 100 pct. SoC, er den mest krævende, hvad angår kalender levetid. Dette modsætningsforhold indikerer en svaghed ved modellen.

Omkostningseffekt: Energi-overførsel

Ifølge en analyse af A123 systems' batterier er mængden af overført energi den vigtigste faktor for kapacitetsreduktion, og ikke DoD og cykling levetid¹⁷. Jævnfør A123 Systems' website opnås 20 pct. kapacitetsreduktion ved en cykling levetid på 7.000 cyklinger, hvilket svarer til en levetidsreduktion på $(20/7000)$ 0,0029 pct. points per cykling. Dermed er kapacitetsreduktionen per normaliseret Wh energioverførsel for kørsel 0,0062 pct. points (maximum 2,85 C-rate), og for arbitrage er den 0,0027 pct. points (0,5 C-rate). Dvs. kapacitetsreduktionen målt i pct. point for arbitrage er ca. det halve af, hvad den er for kørsel, hvor uoverensstemmelsen i de to værdier skyldes de forskellige C-rater for arbitrage-cykling og kørsel-cykling¹⁸.

Afladningsomkostninger

For at kunne vurdere, om V2G vil kunne betale sig, er der behov for at kende batterislitage omkostninger per afladet kWh. Batterislitage ved til afladning er en funktion $C_{dis}(DoD_{start}, DoD_{end})$, der afhænger af DoD i starten af opladningen (DoD_{start}) og DoD efter endt opladning (DoD_{end}). De øvrige batteri-specifikke funktionsparametre er batteriets kostpris C_{bat} og batteriets brugbare energi E_{bat} .

Idet det antages, at der regelmæssigt op- og aflades op til en given DoD, og det forudsættes, at degraderingsomkostningerne i batteriets levetid fordeler sig ligeligt over alle cyklinger, repræsenterer omkostningerne for en cykling, dvs. én afladning fra $DoD_{start} = 0$ til $DoD_{end} = DoD$, den totale batteriomkostning divideret med antallet af cyklinger. Dermed bliver formlen for omkostning per cykling som illustreret i figur 8.

Figur 8: Beregning af batteriomkostning

Omkostning per cykling

$$= C_{dis}(0, DoD) = \frac{C_{bat}}{N_{cycle}(DoD)}$$

Omkostning per kWh overført energi

$$= C_{dis, energi}(0, DoD) = \frac{C_{bat} * DoD * E_{bat}}{N_{cycle}(DoD)}$$

Hvor:

C_{bat}	= Batteri kostpris
E_{bat}	= Batteri energi
N_{cycle}	= Antal cyklinger
DoD	= Afladningsdybde

Kilde: Egen tilpasning jf. Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

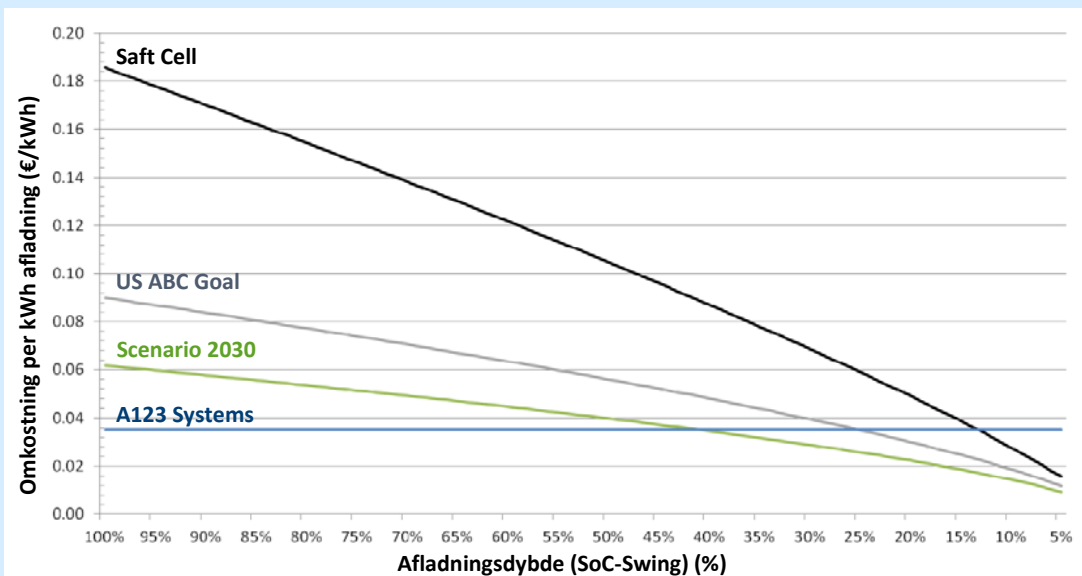
¹⁷ Lithium-ion battery cell degradation resulting from realistic vehicle and vehicle-to-grid utilization; Scott B. Peterson, Jay Apt og J. F. Witacre, Journal of Power Sources; 2009

¹⁸ Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

Figur 9 illustrerer specifikke afladningsomkostninger som funktion af DoD for degraderingsfunktionerne beskrevet ovenfor, ved investeringsomkostning på 1.827 kr. (€ 247) per kWh brugbar energi. Figuren viser:

- Beregning af omkostning per energienhed afladning illustrerer den nødvendige spredning mellem elmarkedets højeste og laveste priser
- For omkostningsmodel baseret på afladningsdybde (DoD) øges omkostningsfunktionen med stigende afladningsdybde (DoD)
- For US ABC og Scenario 2030 antagelserne er omkostningen per kWh mellem ca. 0,15 kr. (2 ct.) ved laveste afladningsdybde og ca. 0,67 kr. (9 ct.) ved højeste afladningsdybde
- For modellen baseret på energioverførsel og med brug af A123 batteriets ydelsesresultat er konstantomkostningen ca. 0,30 kr (4 ct.) per kWh

Figur 9: Batteri degradering omkostninger



Note: Batteri system investering 247 €/kWh brugbar energi

Kilde: Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

Bilag II.C. Model for V2G batteri slitage omkostninger

Nærværende analyses omkostningsmodel tager udgangspunkt i forudsætningerne for batteri levetid og kostpris. På den baggrund estimeres den gennemsnitlige omkostning per cykling og per kilowatttime energi. Efterfølgende tilpasses beregningen til formodede bristede forudsætninger.

- **Levetid:** Fastsættes til 1.500 dybe cyklinger (100 % afladningsdybde DoD; dvs. cykling fra 0 % SoC til 100 pct. SoC til 0 % SoC), hvorefter batteriets kapacitet antages reduceret til dets End-of-Life kriterie
- **End-of-Life EoL kriterie:** Når batteriets kapacitet er reduceret til 80 pct. af dets initiale kapacitet.
- **Slitage degradering kWh til EoL:**
 - Nissan Leaf: $(24 \text{ kWh} * 20 \%)$ = 4,8 kWh
 - Tesla S: $(85 \text{ kWh} * 20 \%)$ = 17 kWh
- **Slitage degradering procentpoint per cykling til EoL:**
 - Nissan Leaf: $(20/1.500 \text{ cyklinger})$ = 0,0133 procentpoint
 - Tesla S: $(20/1.500 \text{ cyklinger})$ = 0,0133 procentpoint
- **Batteri kostpris per kWh:** Fastsættes til 1.800 DKK (300 USD) per kWh, på linje med USABC's 2014-mål.
- **Batteri kostpris per batteri:**
 - Nissan Leaf: $(24 \text{ kWh} * 1.800 \text{ DKK})$ = 43.200 DKK
 - Tesla S: $(85 \text{ kWh} * 1.800 \text{ DKK})$ = 153.000 DKK
- **Omkostning per cykling:** Idet omkostningen antages lige fordelt over alle levetids cyklinger
 - Nissan Leaf: $(1.800 \text{ DKK} * 24 \text{ kWh} / 1.500 \text{ cyklinger})$ = 28,8 kr.
 - Tesla S: $(1.800 \text{ DKK} * 85 \text{ kWh} / 1.500 \text{ cyklinger})$ = 102 kr.
- **Energiflow omkostning per kWh:**
 - Nissan Leaf: $(28,8 \text{ kr.} / (2 * 24 \text{ kWh}))$ = 0,6 kr.
 - Tesla S: $(102 \text{ kr.} / (2 * 85 \text{ kWh}))$ = 0,6 kr.

Jævnfør beregningerne forudsættes det, at V2G slitageomkostningen per kWh energiflow er 0,6 kr., og at batteriets levetid er 1.500 fulde cyklinger inden slitagen reducerer kapaciteten til 80 pct. EoL kriteriet. Der vil imidlertid være forhold, som gør, at det højest opnåelige antal kWh energiflow (Achievable Cycle Count, ACC) vil være endnu højere, således at slitage omkostningen per kWh vil blive endnu lavere. Dermed vil slitageomkostningen per kWh til V2G og til kørsel formentlig ikke være ens, som det antages i beregningen, hvilket yderligere øger det højest opnåelige antal kWh energiflow.

Der fremhæves tre forhold, som bryder med beregningens forudsætninger, og som øger det maksimalt opnåelige antal kWh energiflow samt nedbringer slitageomkostning per kWh energiflow:

1. Ladedybden afkortes med nedre og øvre SoC grænseværdier
2. Ladning i slitage-følsomme SoC yder-intervaller undgås
3. Uens slitage for V2G- og kørsel-cykling

Ad. 1: Afkortet afladningsdybde DoD

Afladningsdybden DoD er afkortet, så der aldrig cykles med 100 pct. afladningsdybde, og det reducerer ifølge forskningen slitage effekten og batteri omkostningen. Afladningsdybden er afkortet på tre måder:

- a. I den lave ende af SoC er brugbar ladevindue afkortet med en definitiv minimum grænseværdi på 10 pct. SoC, så der aldrig cykles i 0-10 pct. SoC intervallet
- b. I den høje ende af SoC er det brugbare ladevindue afkortet med en definitiv maksimum grænseværdi på 90 pct. SoC, så der aldrig cykles i 90-100 pct. SoC intervallet
- c. Opladningsstrategiens algoritmer har indbyggede mekanismer, som typisk yderligere vil afkorte afladningsdybden, fx til 70 pct. DoD, hvor slitagen antages minimal
- d. Dermed afkortes afladningsdybden per definition til max 80 pct. DoD (10-90 pct. SoC)

Ad. 2: Ingen cykling i slitage følsomme SoC yder-intervaller

Der cykles ikke i de slitage-følsomme SoC yder-intervaller, dvs. under 10 pct. og over 90 pct. Der cykles alene i det skånsomme midt-interval, og det reducerer den gennemsnitlige slitage omkostning.

Ad. 3: Uens slitage for V2G- og kørsel-cykling

Slitageomkostningen er lavere for V2G-cykling end for kørsel-cykling, hvor den ind imellem også peak'er med høj effekt. Det skyldes af C-raten for V2G-afladning er lavere end for afladning til motor. I beregningen antages ens slitageomkostninger for V2G- og kørsel-cykling. Forsøg har vist, at kapacitetsreduktionen for V2G i procentpoint kan være under det halve af, hvad den er for kørsel¹⁹.

De ændrede forudsætninger medfører:

- A. Slitage per kWh energiflow er generelt lavere for afkortet afladningsdybde (DoD)
- B. Slitage per kWh energiflow er lavere for V2G-cykling end for kørsel-cykling
- C. Slitage per kWh energiflow er variabel i forhold til cyklingernes individuelle SoC-interval

I nærværende analyse vælges alene at korrigere V2G omkostningsmodellen for den generelt lavere slitage per kWh energiflow som følge af afkortet afladningsdybde (DoD).



Ad. A: Slitage per kWh energiflow er generelt lavere for afkortet afladningsdybde (DoD)

Energiflow omkostningen per kWh (V2G og kørsel) formodes generelt at være lavere end de beregnet 0,6 kr. Fordi afladningsdybden DoD per definition afkortes (punkt 1) og slitage-følsom cykling i SoC yder-intervallerne (punkt 2) udelukkes. Dermed ville der kunne overføres flere kWh gennem batteriet (Achievable Cycle Count ACC), inden det reduceres til EoL-kriteriet.

- a. 1.500 cyklinger og 100 % afladningsdybde DoD ville kunne overføre et energiflow på
 - i. Nissan Leaf: $(24 \text{ kWh} * 1.500 \text{ cyklinger} * 2)$ = 72.000 kWh
 - ii. Tesla S: $(85 \text{ kWh} * 1.500 \text{ cyklinger} * 2)$ = 255.000 kWh
- b. Med afkortet afladningsdybde ville der fx kunne opnås 10 pct. højere energiflow
 - i. Nissan Leaf: $(72.000 \text{ kWh} + 10 \%)$ = 79.200 kWh
 - ii. Tesla S: $(255.000 \text{ kWh} + 10 \%)$ = 280.500 kWh
- c. Det ville reducere energiflow omkostningen per kWh til
 - i. Nissan Leaf: $(43.200 \text{ kr.} / 79.200 \text{ kWh})$ = 0,55 kr.
 - ii. Tesla S: $(153.000 \text{ kr.} / 280.500 \text{ kWh})$ = 0,55 kr.

¹⁹ Smart Grid Agent: Plug-In Electric Vehicle; David Dallinger, Jochen Link, Markus Büttner; Fraunhofer ISI; 2013

Tilpasningerne er specificeret i figur 10.

Figur 10: V2G batteri slitage omkostninger		
Elbilmodel		
	Nissan Leaf 24/160	Tesla S 90/186
Batterikapacitet	24 kWh	85 kWh
Kostpris per kWh batteri ^{*) **)} ***)	300 USD = 1.800 DKK	300 USD = 1.800 DKK
Kostpris per elbil batteri	43.200 DKK (24*1.800)	153.000 DKK (85*1.800)
Levetid (dybe cyklinger, 100 % DoD)	1.500	1.500
Opnåeligt antal kWh energiflow	72.000 kWh	255.000 kWh
Batterislitage omkostning per kWh energiflow (kørsel- og V2G cyklung)	0,60 kr/kWh (43.200/(2*1.500*24)) (43.200 DKK/72.000 kWh ACC)	0,60 kr/kWh (153.000/(2*1.500*85)) (153.000 DKK/255.000 kWh ACC)
Tilpasning A: Afkortet afladningsdybde DoD og ingen cyklung i slitage-følsomme SoC yderintervaller	79.200 kWh 0,55 kr/kWh (43.200 DKK/(72.000 kWh ACC + 10%)) (43.200 DKK/79.200 kWh ACC)	280.500 kWh 0,55 kr/kWh (43.200 DKK/(255.000 kWh ACC + 10%)) (43.200 DKK/280.500 kWh ACC)

^{*)} System; ^{**) EV Everywhere 2014-målsætning ifølge EV Everywhere Progress of Battery Development Project, Plug-In Battery Cost (per kWh Useable Energy), U.S. Battery R&D Progress and Plans, David Howell, US DOE, 2010; ^{***) Omregningskurs 6 DKK/USD}}

Vindoptimeret opladning V2G

Delrapport 4 af 4
Bilag II. Batterislitage
V1.1 web



VINDENERGI

D A N M A R K