

Energimyndighetens titel på projektet – svenska <b>BAMSE – Åldringskänslig batteristyrning</b>	
Energimyndighetens titel på projektet – engelska <b>Battery Aging-sensitive Management System</b>	
Universitet/högskola/företag <b>Scania CV AB</b>	Avdelning/institution
Adress <b>Granparksvägen 10, 151 48 Södertälje</b>	
Namn på projektledare <b>Malin Andersson</b>	
Namn på ev övriga projektdeltagare <b>Moritz Streb, Verena Löfqvist Klass, Matilda Klett, Göran Lindbergh, Mikael Johansson</b>	
Nyckelord: 5-7 st <b>Litium-jon batterier, elfordon, modellering, parametrering, styrning, laddning</b>	

## Förord

Projektet ”BAMSE – Åldringskänslig batteristyrning” har utvecklat metoder för uppdatering av modeller och styrstrategier i batteristyrssystemet hos tunga elektriska fordon. Det har genomförts som ett samarbete mellan Scania och två avdelningar på KTH; Avdelningen för reglerteknik och Avdelningen för tillämpad elektrokemi. Projektet har finansierats av Scania CV AB samt av Fordonsstrategisk Forskning och Innovation (FFI) genom programmet Energi och Miljö.

## Innehållsförteckning

Innehållsförteckning .....	1
Sammanfattning .....	2
Summary .....	2
Inledning/Bakgrund .....	3
Genomförande .....	5
Parametrering av modeller från kördata .....	6
Experimentdesign för förbättrad modellparametrering .....	6
Fysikbaserad batteristyrning .....	7
Adaption av laddstrategi baserat på batteristatus .....	7
Resultat .....	8
Parametrering av modeller från kördata .....	8
Experimentdesign för förbättrad modellparametrering .....	10
Fysikbaserad batteristyrning .....	11
Adaptiv styrstrategi baserat på batteristatus .....	12
Diskussion .....	13

Publikationslista.....	14
Opublicerade manuskript.....	15
Referenser, källor.....	15

## Sammanfattning

Batterier i dagens elfordon bidrar med en stor andel av fordonets totala kostnad liksom det totala koldioxidutsläppen från dess produktion. Genom att använda batteriet mer effektivt kan dess klimat- och ekonomiska påverkan minskas. Batteriets användning regleras av batteristyrssystemet, som förlitar sig på modeller över batteriets olika tillstånd så som dess laddnivå och hälsostatus. BAMSE-projektet har kringlat dessa modeller, som kan vara både empiriska och fysikbaserade. Projektet har undersökt och utvecklat metoder för parameterestimering från kördata och optimal experimentdesign för att förbättra parameterestimaten. Dessutom har flera olika användningsområden för modeller inom batteristyrning studerats så som modellbaserad prediktion av batterikapacitet, diagnos av batteriåldring samt adaptiv batteristyrning för ökad livslängd. Projektets resultat visar att de undersökta modellerna kan parametreras väl från kördata, och från experiment ombord. Det visar på flera lovande användningsområden för modellerna i styrssystemet men även att det finns ett behov av att utveckla nya typer av modeller som beskriver andra relevanta tillstånd i dagens elfordon.

## Summary

Batteries in today's electric vehicles contribute with a large fraction of the total vehicle cost as well as its total carbon dioxide emissions in production. By using the battery more efficiently, its effect on the climate and cost can be reduced. The usage of the battery is regulated by the battery management system, which relies on models to estimate battery states such as the state of charge and state of health. The BAMSE project has focused on these models, both empirical and physics-based, and developed methods for parameter estimation from driving data as well as designed experiments for improved parameter estimation. In addition, several applications for models within battery management was studied, such as model-based prediction of battery capacity, battery diagnostics as well as adaptive battery control for increased lifetime. The project results show that the investigated models can be estimated from driving data as well as from experiments performed onboard. It points toward several promising areas of use for the models in the battery management system but also that there is a need to develop new models that resolve states that are important in today's electric vehicle battery systems.

## Inledning/Bakgrund

Övergången från konventionella till elektriska fordon går allt snabbare och möjliggörs av litium-jon batteriet. Tack vare framsteg inom material- och celldesign samt ökad produktionsskala blir batterierna både billigare och mer energitäta [1]. Trots detta är batterierna avgörande för det totala fordonets kostnad och klimatpåverkan. I tunga fordon, som lastbilar och bussar, kan de installerade batterierna stå för en tredjedel och upp till hälften av totala kostnaden. För en batteridrivna distributionslastbil bidrar batterierna dessutom med 40 % av de totala koldioxidutsläppen från produktionen [2].

För att säkerställa att batterierna används på ett säkert och effektivt sätt begränsas dess energi- och effektuttag av ett batteristyrssystem. Styrsystemet sätter gränser för vilka strömmar som tas ut, vilka spänningsnivåer batteriet används inom samt hur batteriet ska laddas. Ett viktigt sätt att minska batteriers kostnad och klimatpåverkan per installerad energi- och effekt är därför att öka dess utnyttjandegrad. Detta kan göras genom att designa styrstrategier som optimalt utnyttjar tillgänglig energi och effekt. En annan dimension av batteriers utnyttjandegrad rör dess livslängd. När batterier används ombord på fordon utsätts de för olika typer av belastning så som hög- och låg temperatur, höga strömmar, stora skillnader i laddnivå och temperatur. Detta leder till degradering av batteriernas olika delar och yttrar sig som förlust av effekt och kapacitet [3]. Genom att använda batterierna på mer skonsamma sätt kan dess livslängd utökas. Detta påverkar dess kostnad och klimatpåverkan per tidsenhet eller cyklad energi.

Utöver de mätbara signalerna (ström, spänning, temperatur) bestäms batteriets användargränser också av tillstånd som måste skattas. Viktigast är laddnivån (benämnd SOC, efter ”state of charge”) och batteriets hälsostatus (SOH, efter ”state of health”). Dagens batteristyrssystem använder sig av enkla empiriska modeller för att skatta SOC och SOH från uppmätt ström, spänning och temperatur [4]. En viktig faktor som avgör batteriets utnyttjandegrad är noggrannheten på SOC- och SOH-estimeringen eftersom den avgör hur konservativa användarbegränsningarna måste sättas. En annan faktor är att SOC och SOH i själva verket är trubbiga mått på de interna tillstånd som egentligen avgör användarbegränsningarna.

Eftersom fysikbaserade modeller beskriver interna batteritillstånd finns potential att utöka batteriernas energi- och effektuttag genom att istället basera användarvillkor på de tillstånd som styr degradering. Exempel på sådana tillstånd är litiumkoncentration och anodpotential. Tidigare forskning har visat att laddning som optimeras med avseende på interna tillstånd kan vara både snabbare och skonsammare för batterier än konventionella laddprotokoll med konstant ström [5-7]. På samma sätt har studier visat att batteriets tillgängliga energi och effekt kan utnyttjas till högre grad om användarvillkoren baseras på interna tillstånd jämfört med konventionella gränser på ström och spänning [8-9].

Målet med BAMSE-projektet var att undersöka hur datadrivna och fysikbaserade modeller kan förbättra tillståndsestimering och styrning av batterier på tunga elektriska fordon. Projektets huvudtes var att utnyttjandegraden skulle kunna öka

genom att använda modeller som kontinuerligt uppdateras och på så vis ger en ögonblicksbild av batteriets status. Dels skulle sådana modeller bibehålla noggrannheten i tillståndsestimeringen, vilket i sig kan utöka användargränserna. Dels så skulle modellen ge information om batteriets åldringsstatus, och skulle kunna användas för att uppdatera användargränserna själva. Hypotesen var att större energi- och effektuttag skulle kunna tillåtas i början jämfört med senare, utan att negativt påverka livslängden.

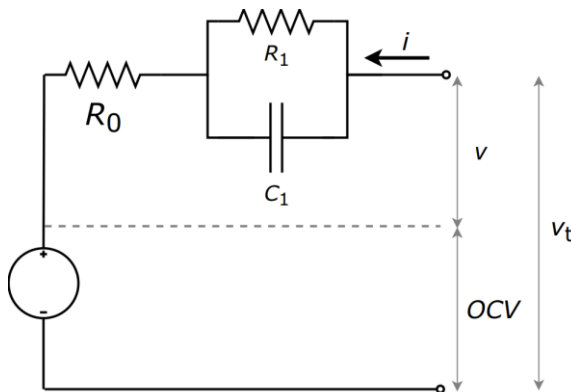
Arbetet har fokuserat på fyra delområden:

- 1) **Parametrisering av modeller från kördata.** I och med att batteriernas egenskaper förändras när de åldras behöver modellerna i styrsystemet uppdateras för att kunna bibehålla god noggrannhet av tillståndsestimaten. Ett alternativ som undersöktes var att göra parameterestimering på den data som mäts under användning av batteriet. Detta studerades för datadrivna och fysikbaserade modeller. En viktig frågeställning rörde vilka parametrar som exciteras av kördata och således är möjliga att estimeras.
- 2) **Experimentdesign för förbättrad modellparametrisering.** Eftersom kördagens dynamik avgörs av hur fordonet används är det inte säkert att alla modellparametrar kan estimeras från den uppmätta datan. Istället undersöktes optimal experimentdesign som en metod för att säkerställa identifierbarhet förbättra noggrannheten hos identifierade modeller. Inom projektet studerades experimentering för parameterestimering under laddning.
- 3) **Fysikbaserad batteristyrning.** Fysikbaserade modeller beskriver elektrokemiska och fysikaliska processer som sker inuti batteriet och kan därför innehålla mer information om batteriets status jämfört med konventionella empiriska modeller. Därför undersöktes hur fysikbaserade modeller kan användas för estimering av batteriers åldringsstatus, förutsäga framtida åldring samt designa laddstrategier baserat på interna batteritillstånd.
- 4) **Adaptiv styrstrategi baserat på batteristatus.** Slutligen undersöktes hur battericellers nyttjandegrad och livslängd påverkas av att deras snabbbladdningsstrategi optimeras baserat på en fysikbaserad modell och sedan adapteras regelbundet i samband med modelluppdatering.

BAMSE-projektet har genomförts som ett samarbete mellan Scania och två avdelningar på KTH; Avdelningen för reglerteknik och Avdelningen för tillämpad elektrokemi. Det har finansierats av Scania samt av Fordonsstrategiska Forskning och Innovation (FFI). Projektet pågick under fem år mellan januari 2019 till december 2023.

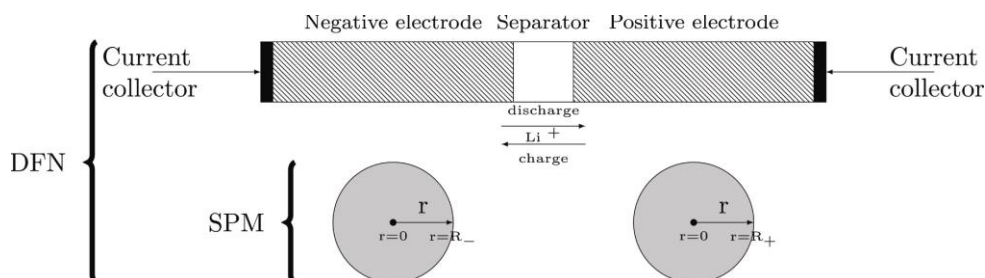
## Genomförande

BAMSE-projektet har framförallt fokuserat på två modeller; en empirisk modell och en fysikbaserad modell. Den empiriska modellen är en ekvivalentkretsmodell som är standard inom batteristyrning. Den beskriver battericellen som en elektrisk komponent och dess spänningsförluster (överpotentialer) modelleras med hjälp av resistorer och kondensatorer. En ekvivalentkretsmodell med en RC-länk visas i Figur 2.



Figur 2: En ekvivalentkretsmodell med en serieresistans  $R_0$ , och en RC-länk. Modellen är en empirisk beskrivning av en battericell och fångar dess öppenkretpotential (OCV, från open circuit voltage) samt dess spännings svar  $v$  till en ström  $i$ .

Den fysikbaserade modell som undersökts i projektet är DFN-modellen (från Doyle-Fuller-Newman), som är väl vedertagen. Den beskriver interna koncentrationer och potentialer inuti cellen med hjälp av kopplade partiella differentialekvationer. Parametrarna i denna modell representerar fysikaliska storheter så som till exempel elektrolytens konduktivitet och elektrodernas tjocklek. Totala antalet parametrar är i storleksordningen 50-100, beroende på hur detaljrikt beroenden på e.g. temperatur beskrivs. Figur 3 visar en schematisk bild av DFN modellen.



Figur 3: En schematisk beskrivning av DFN-modellen. Koncentrationer och potentialer beskrivs i elektroddomän och partikeldomän av partiella differentialekvationer. Figuren kommer från [IV].

## Parametrisering av modeller från kördata

I den här delen av studien användes kördata från flera olika generationer av Scantias elektrifierade flotta. Kördatan består av tidsupplöst packström, pack-, modul- och cellspänning samt modultemperatur som uppmätts ombord under normalt användande av fordonen. Mätfrekvensen på signalerna var 1-100 Hz.

I artikel [VI] undersöktes parameteridentifiering av ECM-modellen. Batteriers spänningssvar uppvisar tydligt beroende på deras temperatur, SOC och ström (styrka och riktning). Detta modelleras vanligtvis hos den empiriska modellen med hjälp av tabulerade värden som uppmätts genom utförlig testning i labbmiljö. En sådan implementering av parameterberoende gör det svårt att identifiera parametrarna ombord eftersom det kräver att alla kombinationer av SOC och temperatur uppmäts samt att dessa förekommer under en längre period. I det här arbetet formulerade vi istället parameterberoende som funktioner, baserade på fysikalisk insikt. Dessutom beskrevs modellen i kontinuerlig tid istället för i diskret tid vilket förbättrar modellparametrarnas känslighet. Klassiska metoder för systemidentifiering användes sedan för att identifiera parametrarna. I det här arbetet deltog Scania och Avdelningen för reglerteknik.

Artikel [II] studerade istället parametrisering av DFN-modellen. Utgångspunkten var att undersöka vilka modellparametrar som ger utslag på spänningen när vanlig kördata simuleras, och därmed är möjliga att identifiera. Detta genomfördes med hjälp av global känslighetsanalys. Global känslighetsanalys skiljer sig gentemot lokal känslighetsanalys såtillvida att dess resultat inte beror av antagna parametervärden utan istället beskriver en parameters betydelse i genomsnitt. Den är en bättre lämpad metod för att beskriva parameterkänsligheten hos olinjära modeller eftersom dessa parametrar interagerar med varandra och skiftar i betydelse beroende på de värden de antar. Den globala känslighetsanalysen genomfördes på kördata från en batterilastbil, en plug-in hybridlastbil samt en batteribuss för att undersöka om parametrarnas betydelse skiljer sig beroende på hur batterisystemet används. Känslighetsanalysen genomfördes även med avseende på interna batteritillstånd som är viktiga inom fysikbaserad styrning. Den analysen visade vilka parametrar som är viktiga att uppdatera när batteriet åldras, och de förändras, eftersom de har stor påverkan på estimeringen av de inre tillstånden. I den här studien deltog Scania, Avdelningen för reglerteknik samt Avdelningen för tillämpad elektrokemi.

Inom ramen för BAMSE-projektet genomfördes också en litteraturstudie (artikel [IV]) som kartlade metoder för parametrisering av DFN-modellen från insignal-utsignal data. Studien behandlade parameterkänslighet och identifierbarhet, olika metoder för optimering av parametrarna samt design av experiment.

## Experimentdesign för förbättrad modellparametrisering

Optimal experimentdesign går ut på att forma experimentets insignal på så sätt att den data som uppmäts innehåller information om modellens parametrar. Att datan innehåller parameterinformation betyder att förändringar hos en parameters värde ger upphov till tydlig skillnad hos modellens utsignal. Det betyder också att

parametrarnas effekt på utsignalen är unik, och inte kan åstadkommas genom att förändra en annan parameter. På så sätt är parametern unikt identifierbar.

I artikel [V] utvecklades en metod för design av experiment för identifiering av DFN-modellens parametrar. Metoden baseras på global känslighetsanalys vilket betyder att parametrarnas värden inte behöver vara kända. För var och en av de studerade parametrarna optimerades ett experiment som maximerar parametrarnas globala känslighet och samtidigt minimerar känsligheten hos de övriga parametrarna. För att förenkla det resulterande optimeringsproblemet definierades experimentets input endast med tre parametrar; initialt SOC, strömmens amplitud och grad av variation. Det realiserades sedan som en sekvens av fyrkanspulser. Hela parametersetet, bestående av åtta parametrar, identifierades i en stegvis process med start hos experimentet tillhörande den mest känsliga parametern. Validering av metoden genomfördes på en kommersiell cylindrisk cell. Detta arbete utfördes av Scania och Avdelningen för tillämpad elektrokemi.

Artikel [I] och [XI] behandlar istället experimentdesign för identifiering av ECM parametrar. Däri föreslås metoder för att kombinera experimentering med laddning, eftersom laddningen är det tillfälle där batteristyrsystemet helt kan styra hur strömsignalen ska se ut. Först definierades villkor för snabbbladdning som syftade till att motverka degradering. Den optimala laddströmmen härleddes sedan, med målet att ladda så snabbt som möjligt. Experimentet för parameteridentifiering definierades som en multisinus och dess amplituder och frekvenser optimerades för att excitera modellens parametrar. Slutligen visades hur en kombinerad informativ laddsekvens, där snabbbladdningsprofilen och experimentet överlagrades, bibehöll parameterinformation och samtidigt uppfyllde de åldringsrelaterade bivillkoren. Validering av metoden genomfördes på kommersiella celler för elfordon. Arbetet utfördes av Scania och Avdelningen för reglerteknik.

### **Fysikbaserad batteristyrning**

I artikel [III] estimerades DFN parametrar kontinuerligt hos celler som cyklades likt batterier i olika elnätssapplikationer. Parameterestimeringen genomfördes på optimala experiment. I takt med att cellerna åldrades, förändrades parametrarna med mer eller mindre förutsägbara förlopp. Genom att använda Gaussian process regression extrapolerades parametrarnas bana så att dess framtida värden kunde förutsägas. Vidare undersöktes om batterimodeller baserade på de prognosticerade parametrarna kunde simulera och förutsäga framtida batterikapacitet. Arbetet utfördes av Scania och Avdelningen för tillämpad elektrokemi.

### **Adaption av laddstrategi baserat på batteristatus**

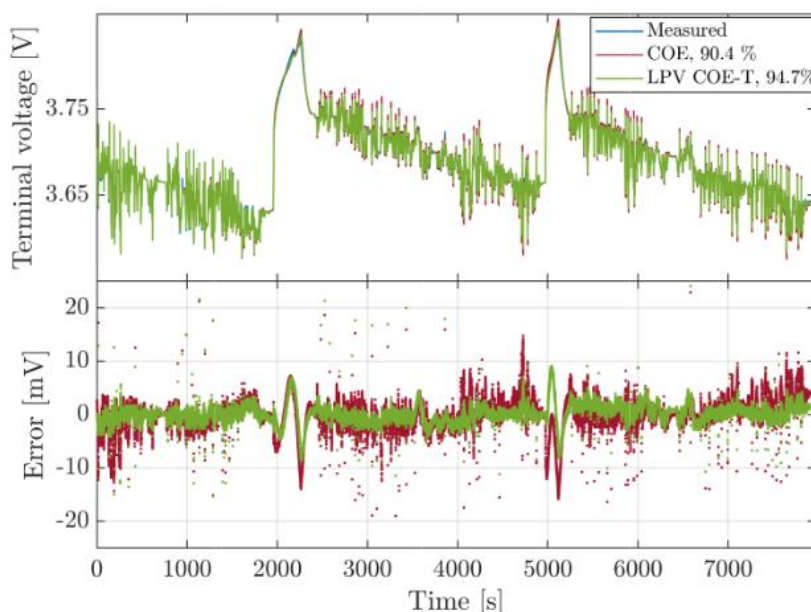
Slutligen, i artikel [X] undersöks huruvida en adaptiv laddstrategi kan utöka batteriets utnyttjandegrad och livslängd. Den fysikbaserade DFN-modellen användes för att designa cellspecifika snabbbladdningsprotokoll med kriteriet att undvika litiumplätning och att hålla cellen under 45 °C. Ett cyklingsfönster definierades baserat på elektrodernas koncentrationer istället för på terminalspänningen. Cellerna cyklades sedan i en temperaturkammare i Scantias

batterilabb. Vid upprepade tillfällen under experimentets gång genomfördes ny parameteridentifiering och därefter ny design av snabbbladdningsprotokollet och cyklingsfönstret. Denna studie utfördes av Scania, Avdelningen för reglerteknik och Avdelningen för tillämpad elektrokemi.

## Resultat

### Parametrisering av modeller från kördata

I artikel [VI] formulerades en ekvivalentkretsmodell i kontinuerlig tid med parameterberoenden på temperatur, ström och OCV (som substitut för SOC). Modellerna identifierades sedan på kördata från elektriska bussar. Att införa temperaturberoende på modellparametern  $R_0$  medförde stor förbättring i modellens noggrannhet jämfört med att inte ha något parameterberoende. Den kontinuerliga modellformuleringen visades kunna identifieras med högre noggrannhet än den diskreta modellformuleringen. Dessutom kunde parameterberoenden identifieras mer robust för den kontinuerliga modellen.



Figur 4: Uppmätt spänning från en elektrisk buss samt modellerad spänning med två modeller; en kontinuerlig ekvivalentkretsmodell med temperaturberoende (LPV COE-T) och en kontinuerlig ekvivalentkretsmodell utan temperaturberoende (COE). Den temperaturberoende modellen uppvisar högre noggrannhet. Figuren kommer från [VI]. © [2020] IEEE

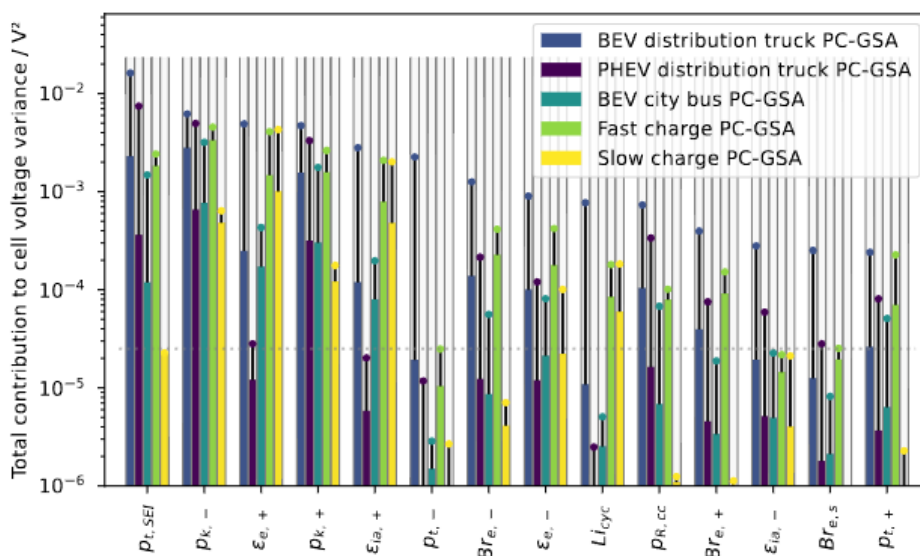
Studien pekade även på två beteenden som är viktiga att fånga för att förbättra modellens noggrannhet; beroende hos  $R_0$  på strömriktningen samt att inkludera hysteres i modellen för OCV.

En annan slutsats från arbetet var att kvaliteten på kördatan begränsar modellparametriseringens kvalitet. En utmaning är att strömmen och spänningen inte mäts på samma ställe och att de uppmätta mätserierna därför inte alltid



matchar på så vis att högfrekventa pikar i ström har samma tidsstämpel som spänningssvarets höga pikar. Synkronisering av ström och spänningssignalen är viktig för att korrekt modellera cellens spänningssvar vid högfrekvent dynamik. En annan svårighet är att den temperatur som finns tillgänglig inte beskriver cellens temperatur utan modultemperaturen. Mer noggrann temperaturmätning, eller modellering av den interna celltemperaturen, skulle möjliggöra mer robust identifiering av spänningssvarets temperaturberoende.

I artikel [II] genomfördes global känslighetsanalys av parametrarna i DFN-modellen på dataset från olika typer av elektrifierade fordon. Resultatet indikerade att alla de studerade parametrarna kan exciteras av kördata men att graden av excitering beror av kördatans karaktär. För att excitera alla de studerade parametrarna behöver kördatan inkludera höga strömmar, längre perioder av laddning och urladdning för att åstadkomma koncentrations-polarisering samt stor skillnad i SOC. Allt detta fanns i datasetet från en elektrisk distributionslastbil. Datan från en elektrisk buss innehöll endast låga strömmar eftersom fordonet haft ett stort antal batteripack. Kinetiska parametrar var därför inte lika känsliga. Datan från en plug-in hybridlastbil hade högre strömmar men höll sig istället i ett smalt SOC-spänn. I det datasetet var inte kapacitetsrelaterade parametrar känsliga. Summering av känslighetsanalysens resultat visas i Figur 5.



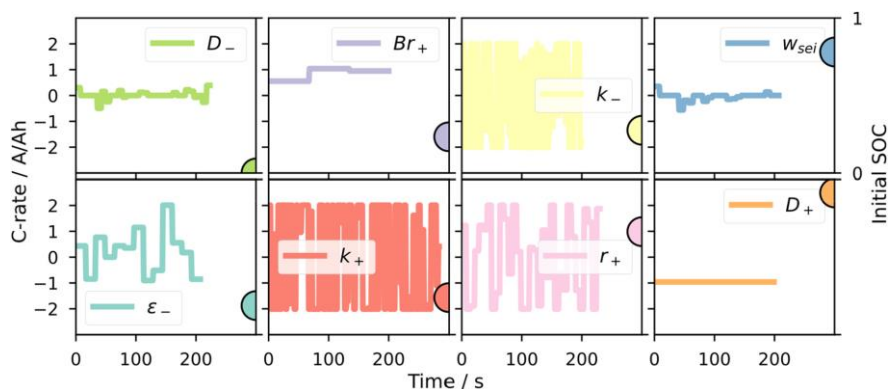
*Figur 5: Resultat från den globala känslighetsanalysen av DFN-modellparametrar på fem olika dataset. Data från batterilastbilen (BEV distribution truck) ger upphov till högst känslighet hos de flesta parametrarna medan datan från plug-in hybriderna (PHEV) och batteribussen (BEV city bus) inte innehåller alla komponenter som krävs för att göra alla parametrarna känsliga. Figuren kommer från [II].*

Studien visade också att flera av modellens parametrar interagerar med varandra och att man behöver lumpa ihop dessa för att åstadkomma en identifierbar modell.

Slutligen visades det att de parametrar som är viktiga för att beskriva de interna tillstånd som används vid fysikbaserad batteristyrning (text litiumpläteringspotential) också är känsliga med avseende på utspänningen. Det indikerar att de viktigaste parametrarna också är de som kan identifieras med högst noggrannhet från kördatan.

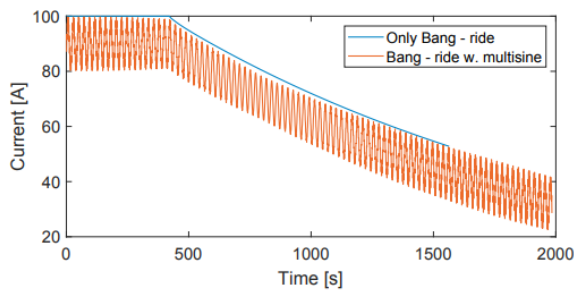
### Experimentdesign för förbättrad modellparametrisering

Optimala experiment för identifiering av DFN-modellparametrar designades i [V] baserat på global känslighetsanalys. Parameteridentifiering med de föreslagna experimenten ledde till minst 40% lägre modellfel jämfört med parametrering på en kombination av konstantströmladdning och GITT-pulser (GITT från "galvanostatic intermittent titration technique", ett standardexperiment). De optimala experimenten visas i Figur 6.



Figur 6: Optimala experiment för identifiering av DFN-modellparametrar. Designen är baserad på global känslighetsanalys. Figuren kommer från [V].

I [I] och [XI] designades istället experiment för identifiering av ekvivalentkretsparametrar. Experimentet tog formen av en multisinus med optimala frekvenser och amplituder. Dessa överlades sedan på ett optimalt snabbbladdningsprotokoll. Det optimala snabbbladdningsprotokollet visades ha formen av en "bang-ride" signal vilket betyder att laddströmmen först är den högsta tillåtna och sedan följer laddproblemets bivillkor. Arbetet visar att de adderade experimenten kan förbättra modellparametriseringen jämfört med enbart identifiering på snabbbladdning eller kördata. I ett studerat exempel förbättras noggrannheten hos alla parametrar med en informativ laddsekvens som bara adderar 400s till ett snabbbladdningsprotokoll. Detta visas i Figur 7. Generellt så gällde att ökad parameterinformation ledde till långsammare laddning.



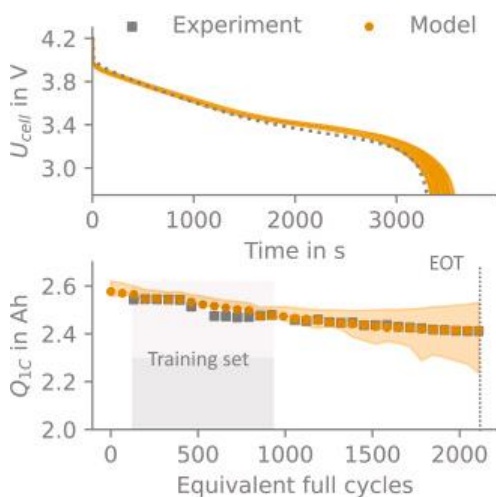
Figur 7: Ett optimalt snabbbladdningsprotokoll samt den informativa laddsekvensen som förbättrar alla modellparametrars noggrannhet. Experimentet består av två överlagrade sinuser. Figuren kommer från [I].

### Fysikbaserad batteristyrning

I artikel [III] användes DFN-modellen för att följa cellers åldrande under cykling. Identifierade parametrar visades följa olika banor beroende på vilka cyklingsprotokoll som använts. Banornas olika utseende kunde kopplas till skillnader i elektrodmaterialens åldring, som analyserades i en post-mortem-analys. Skillnaderna uppkom exempelvis hos positiva partiklarnas diameter och hos den positiva elektrodens tjocklek.

Extrapolering av parametrarnas banor med hjälp av Gaussian process regression användes sedan för att förutsäga framtida parametervärden. Metoden resulterade i bättre parameterestimater jämfört med linjär extrapolering.

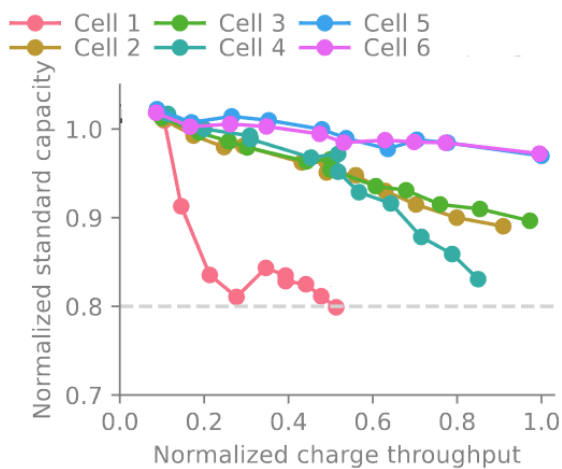
Slutligen studerades prognos av batterikapacitet med hjälp av de uppskattade parametervärdena. Baserat på de första 900 cyklerna kunde metoden förutsäga kapaciteten vid 2200 cykler med ett konfidensintervall på 5 % SOH. Detta illustreras i Figur 8.



Figur 8: Simulering av urladdningskapacitet med hjälp av prognosticerade DFN-modellparametrar resulterade i god överensstämmelse med den faktiska urladdningskapaciteten. Figuren kommer från [III].

### Adaptiv styrstrategi baserat på batteristatus

I artikel [X] cyklades celler med ett adaptivt snabbladdningsprotokoll designat för att undvika litiumplätning och höga temperaturer. Det jämfördes med ett protokoll som såg likadant ut i början men som sedan bibehöll samma strömnivåer genom hela testet och bara skalade tiden för att cykla mellan samma spänningsnivåer. Dessutom cyklades även celler med konventionell ”constant current constant voltage” (CCCV) laddning. Figur 9 visar resultatet från cyklingsstudien. Den konventionella laddstrategin bibehöll kapaciteten bäst, men tog också längre tid. Att adaptera laddprotokollet baserat på den fysikbaserade modellen ledde till lägre kapacitetsförlust jämfört med att använda ett statistiskt protokoll.



Figur 9: Resultat från cyklingsstudien med olika laddprotokoll. Cell 2-3 använde den adaptiva laddstrategin, cell 4 den statistiska, skalade. Cell 5-6 laddade med CCCV. Cell 1 är en outlier som laddade med ett adaptivt protokoll men förlorade kapacitet mycket snabbt redan vid start. Figuren kommer från [X].

Resultatet visade också att man genom att adaptera cyklingsfönstret med hjälp av modellen kunde bibehålla hög utnyttjandegrad av cellernas kapacitet varje cykel. Medan det statistiska protokollet förlorade både total och utnyttjad kapacitet behöll de adapterade cellerna hög utnyttjad kapacitet genom hela testet. Den slutsats som kunde dras är att ett adaptivt laddprotokoll och adaptivt cykelfönster ökar cellens utnyttjandegrad, både per cykel och med avseende på livslängd, jämfört med ett statistiskt.

En viktig observation som gjordes vid efterföljande post-mortem-analys av tre celler var att de åldrats mycket inhomogent. Litiumplätning upptäcktes på samtliga tre celler, men den var inte jämnt fördelad över elektrodarean utan förekom endast på en del av den. Den adaptivt laddade cellen uppvisade mindre litiumplätning jämfört med den cell som bara skalat sitt protokoll.

## Diskussion

Inom BAMSE-projektet undersöktes dels parameterestimering av empiriska och fysikbaserade modeller med hjälp av kördata som mäts ombord på tunga elfordon. Dels utvecklades metoder för experimentdesign som ökar modellparametrarnas känslighet. Specifikt studerades experiment som kan utföras ombord i samband med laddning

Den data som mäts under körning och laddning visades vara informativ om modellernas parametrar, men att dess informationsinnehåll var beroende av hur fordonet använts. Ju högre strömmar och större SOC-fönster desto fler parametrar kunde exciteras. Tungta elfordon använder idag allt fler batteripack vilket innebär att dess individuella celler utsätts för lägre strömmar ombord. Detta skulle kunna ha inverkan på möjligheten att estimeras och uppdatera dess modeller. Som ett alternativ till att använda kördata undersöktes också optimal experimentdesign och informativa laddsekvenser som kombinerade laddning och experimentering. Både för ekvivalentkretsmodellen och DFN-modellen kunde parameternoggrannheten ökas genom att använda optimala experiment i stället för, eller som komplement till, kördata. De optimala experimenten skulle därför kunna spela en större roll i den typ av fordon där modellparametrarna exciteras mindre under körning.

En utmaning med att använda kördata för analys och parameterestimering är det stora behovet av lagring och datorkapacitet som krävs. Om fordonets celler ska modelleras ombord krävs både att batteristyrssystemet kan lagra långa tidsserier av kördata från alla dess celler samt utföra parameteroptimeringen på processorer ombord. Om modellerna istället ska parametreras offboard krävs hög överföringskapacitet och lösningar för molnbaserad lagring av fordonsdata.

Inom projektet undersöktes också ett flertal olika användningsområden för modeller ombord. Ett sådant var diagnos av batteristatus med hjälp av en fysikbaserad modell, samt prognos av framtida batterikapacitet via extrapolering av modellparametrarnas banor. Resultaten visade att skillnader i batteriers åldrande till viss del kan fångas av en fysikbaserad modell. Till exempel kunde olika typer av kapacitetsförlust detekteras, samt olika förändringar av elektrodstrukturen. Studien visade också att framtida kapacitet kunde förutsägas med god noggrannhet med hjälp av parametrarnas banor men att metoden är begränsad till en situation där batteriets cyklingsmönster är samma livet ut.

I det sista delarbetet undersöktes projektets huvudtes; huruvida utnyttjandegraden hos batteriet kan ökas genom adaptiv fysikbaserad styrning. Genom att skatta en fysikbaserad beskrivning av batteriets verkliga kapacitet, och basera cyklingsfönstret på detta, kunde utnyttjandegraden hos batteriet ökas jämfört med ett konventionellt spänningsbaserat cyklingsfönster som var konstant under hela livslängden. Att uppdatera snabbbladdningsprotokollen baserat på den fysikbaserade modellens estimat av interna tillstånd som styr degradering kunde livslängden ökas jämfört med att behålla konstanta snabbbladdningsprotokoll. Detta visade tydligt fördelarna med att använda adaptiv batteristyrning för att öka batteriers utnyttjandegrad.

Snabbladdning med protokoll som designats baserat på fysikbaserade gränser förekommer frekvent i tidigare forskning men har främst studerats med hjälp av simuleringar. Den här studien visade att heterogenitet i elektrodegenskaper och åldrande medför en stor utmaning för fysikbaserad styrning eftersom dagens modeller inte tar hänsyn till detta. Vad som enligt modellen är en accepterad ström som inte leder till för låg anodpotential kan egentligen vara fördelat ojämnt inuti cellen så att delar av elektroden ser för hög ström med litiumplätning som följd. För att lyckas implementera fysikbaserad styrning krävs modeller som kan ta hänsyn till heterogenitet i cellen men samtidigt är möjliga att parametrisera och simulera ombord. Detta är en fortsatt utmaning.

Slutligen, en stor utmaning för modellbaserad batteristyrning är inte modellerna själva utan mängden celler som installeras på tunga elektriska fordon. I storleksordning har en elektrisk lastbil flera tusen celler. BAMSE-projektet har främst handlat om hur batterier kan styras och estimeras på cellnivå. En viktig fortsättning på projektet handlar om hur batteristyrning ska ske på packnivå. Vilka modeller som då ska användas och hur de ska interagera blir viktiga frågeställningar.

## Publikationslista

[I] Andersson, M., Taghavian, H., Hjalmarsson, H., Klass, V. L., Johansson, M. Informative Battery Charging: Integrating Fast Charging and Optimal Experiments. IFAC-PapersOnLine, 56(2), 11160-11166, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.835>

[II] Streb, M., Andersson, M., Klass, V. L., Klett, M., Lindbergh, G., Johansson, M. Investigating re-parametrization of electrochemical model-based battery management using real-world driving data. eTransportation, 16, 100231, 2023.

<https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100231>

[III] Streb, M., Ohrelius, M., Siddiqui, A., Klett, M., & Lindbergh, G. "Diagnosis and prognosis of battery degradation through re-evaluation and Gaussian process regression of electrochemical model parameters." Journal of Power Sources 588, 233686, 2023

<https://doi-org.focus.lib.kth.se/10.1016/j.jpowsour.2023.233686>

[IV] Andersson, M., Streb, M., Ko, J. Y., Klass, V. L., Klett, M., Ekström, H., Johansson, M., Lindbergh, G. Parametrization of physics-based battery models from input-output data: A review of methodology and current research. Journal of Power Sources, vol 521, 230859, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230859>

[V] Streb, M., Ohrelius, M., Klett, M., & Lindbergh, G. Improving Li-ion battery parameter estimation by global optimal experiment design. Journal of Energy Storage, 56, 105948, 2022

<https://doi-org.focus.lib.kth.se/10.1016/j.est.2022.105948>

[VI] Andersson, M., Klass, V. L., Johansson, M. A continuous-time LPV model for battery state-of-health estimation using real vehicle data. 2020 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), pp. 692-698, 2020 <https://doi.org/10.1109/CCTA41146.2020.9206257>

[VII] Andersson, M. Aging-sensitive battery control. *Licentiate thesis*, KTH, 2022.

[VIII] Streb, M. Identifying Parameters for Aging-Adaptive Battery Management, *Doctoral thesis*, KTH, 2024

## Opublicerade manuskript

[IX] Andersson, M. Modelling, parameter identification and aging-sensitive management of lithium-ion batteries in heavy-duty electric vehicles, *Doctoral thesis*, 2024

[X] Andersson, M., Streb, M., Prathimala, V. G., Siddiqui, A., Lodge, A., Klett, M., Klass, V. L., Johansson, M., Lindberg, G. Electrochemical model-based aging-adaptive fast charging of automotive lithium-ion cells, 2024

[XI] Andersson, M., Taghavian, H., Hjalmarsson, H., Klass, V. L., Johansson, M. Informative battery charging, 2024

## Referenser, källor

[1] Ziegler, Micah S., Juhyun Song, and Jessika E. Trancik. "Determinants of lithium-ion battery technology cost decline." *Energy & Environmental Science* 14.12 (2021): 6074-6098.

[2] Burul, D. and Algesten, D. "Life cycle assessment of distribution vehicles, Battery electric vs diesel driven" Scania R&D (2021) URL: <https://www.scania.com/content/dam/group/press-and-media/press-releases/documents/Scania-Life-cycle-assessment-of-distribution-vehicles.pdf>

[3] Birkl, C. R., Roberts, M. R., McTurk, E., Bruce, P. G., & Howey, D. A. (2017). Degradation diagnostics for lithium ion cells. *Journal of Power Sources*, 341, 373-386.

[4] Lin, X., Kim, Y., Mohan, S., Siegel, J. B., & Stefanopoulou, A. G. (2019). Modeling and estimation for advanced battery management. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2, 393-426.

[5] Yin, Y., & Choe, S. Y. (2020). Actively temperature controlled health-aware fast charging method for lithium-ion battery using nonlinear model predictive control. *Applied energy*, 271, 115232.

[6] Pathak, M., Sonawane, D., Santhanagopalan, S., Braatz, R. D., & Subramanian, V. R. (2017). Analyzing and minimizing capacity fade through optimal model-based control-theory and experimental validation. *ECS transactions*, 75(23), 51.

- [7] Zhang, C., Jiang, J., Gao, Y., Zhang, W., Liu, Q., & Hu, X. (2017). Charging optimization in lithium-ion batteries based on temperature rise and charge time. *Applied energy*, 194, 569-577.
- [8] Namor, E., Sossan, F., Torregrossa, D., Cherkaoui, R., & Paolone, M. (2017, June). Battery storage system optimal exploitation through physics-based model predictive control. In *2017 IEEE Manchester PowerTech* (pp. 1-6). IEEE.
- [9] Perez, H., Shahmohammadhamedani, N., & Moura, S. (2015). Enhanced performance of li-ion batteries via modified reference governors and electrochemical models. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(4), 1511-1520.