

Batterier

TSFS17 Elkraftsystem - Föreläsning 10

Mattias Krysanter, 2023-12-08

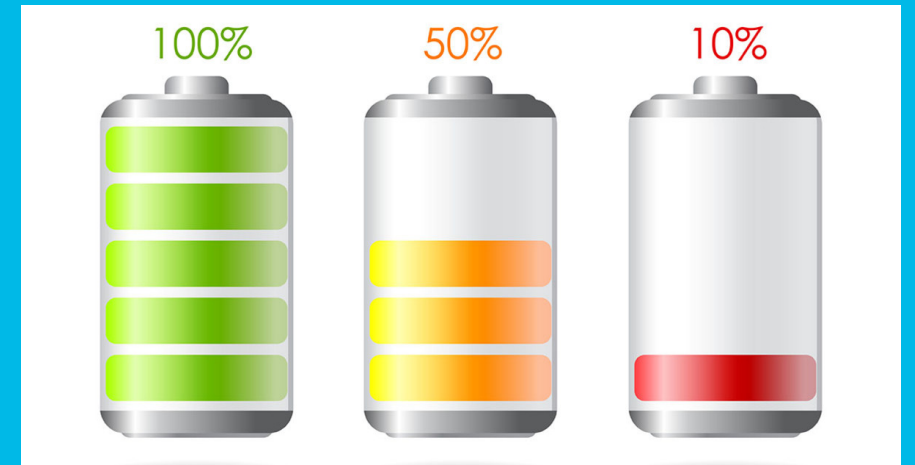
Dagens föreläsning

- Introduktion
- Grunder i batterikemi
- Cellens teoretiska egenskaper
 - Cellens elektromotoriska kraft (emk)
 - Teoretisk kapacitet: laddningstäthet, energitäthet
- Batterikonstruktioner och faktisk prestanda
- Ström-spänningskaraktäristik
- Batteriegenskaper, C-rate, SOC, DOD, OCV, uppladdning, urladdning, åldring, batterihälsa (SOH)
- Batteripack
- Balansering
- Estimering av laddningsgrad, state of charge (SOC)
- Batterihanteringssystem
- Batterimodellering



Batteriegenskaper

C-rate, SOC, DOD, OCV, uppladdning, urladdning, åldring, batterihälsa (SOH), verkningsgrad



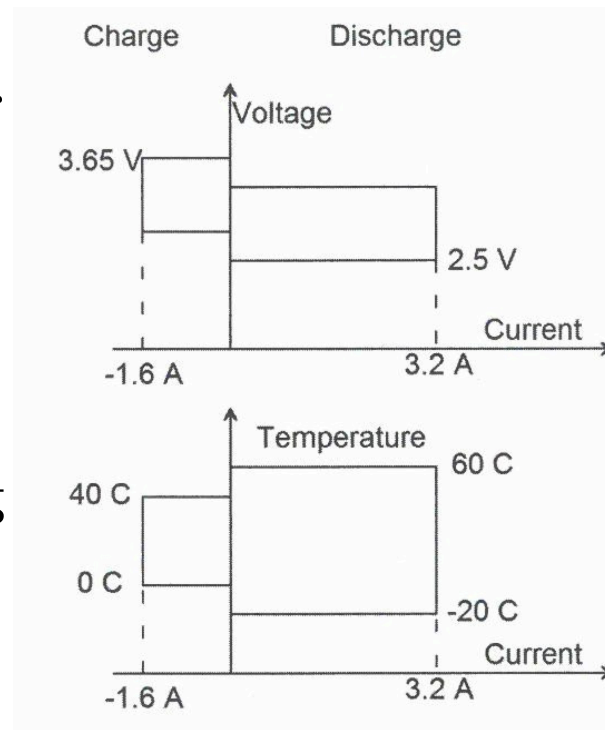
Cellens arbetsområde

Degradation och/eller skada

- Över-urladdning
- Upp- och ur-laddning utanför spec. temperatur och strömgränser.

Farliga felanvändning

- Höga temperaturer orsakade av för höga strömmar, för hög spänning eller extern värme.
- Punktering eller krossning
- Kan leda till termisk rusning.



Batteriladdning - CCCV

En vanlig metod är Constant Current Constant Voltage (CCCV) laddning.

Laddningsförloppet består av 2 faser som namnet indikerar CC + CV:

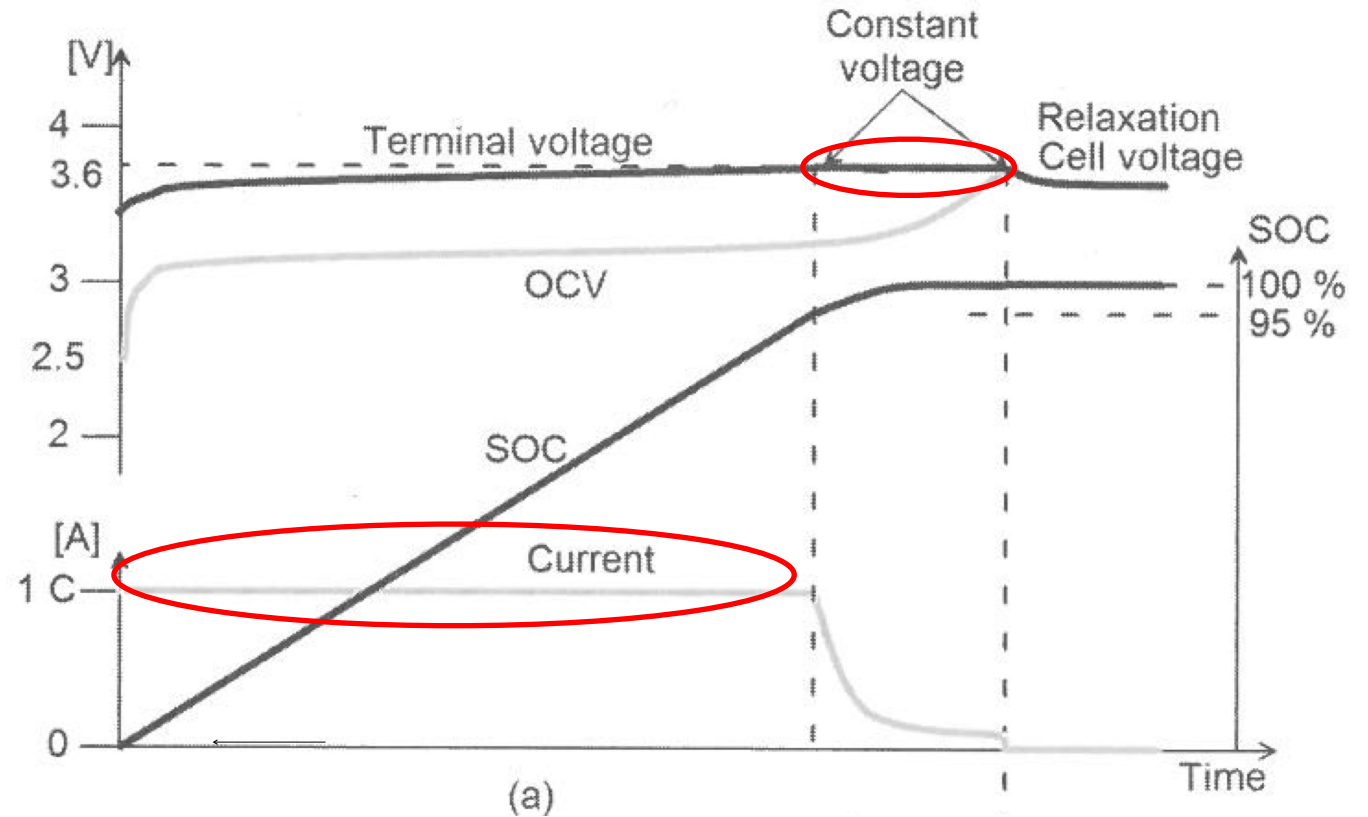
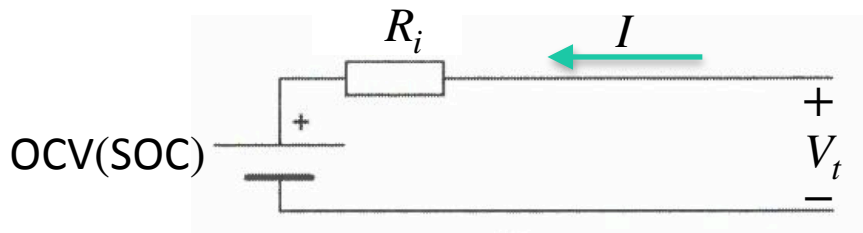
1. Constant Current-laddning, I fixt:

$$V_t = \text{OCV}(\text{SOC}) + IR_i$$

När terminalspänningen V_t når spänningsgränsen V_{max} så påbörjas nästa fas.

2. Constant Voltage-laddning, $V_t = V_{\text{max}}$:

$$I = (V_{\text{max}} - \text{OCV}(\text{SOC}))/R_i$$

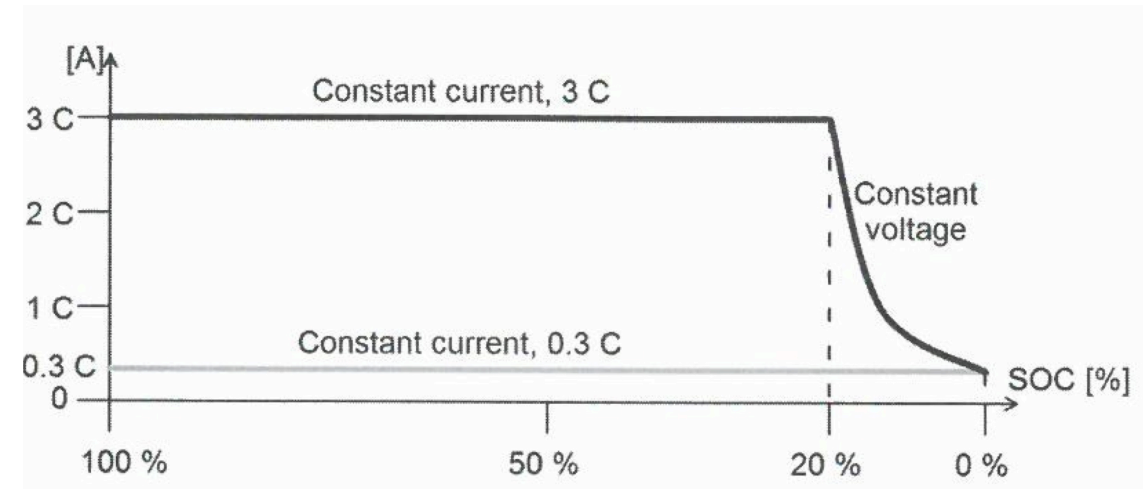
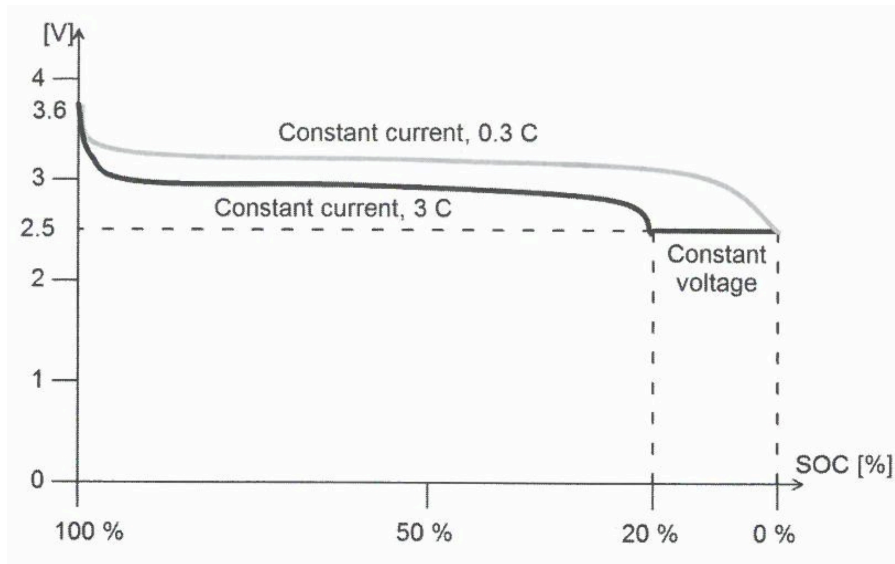
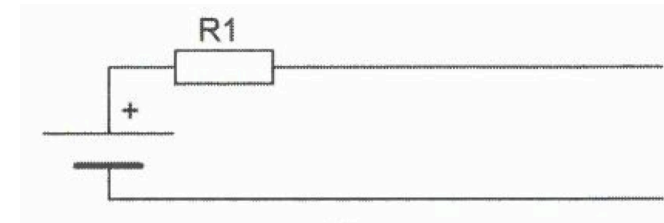


Urladdning

Vid testning och specifikation av batterier är det vanligt att använda konstant urladdningsström tills en definierad brytspänning (cut-off voltage) nås.

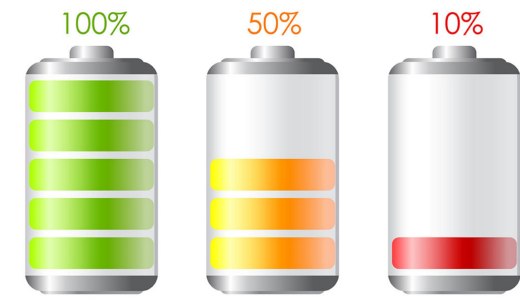
Detta är batteriets urladdningskapacitet som beror på lastens strömbehov.

För att tömma batteriet helt används CV i en andra fas likt för laddningsförloppet.



Så vad är egentligen ett fullt eller tomt batteri?

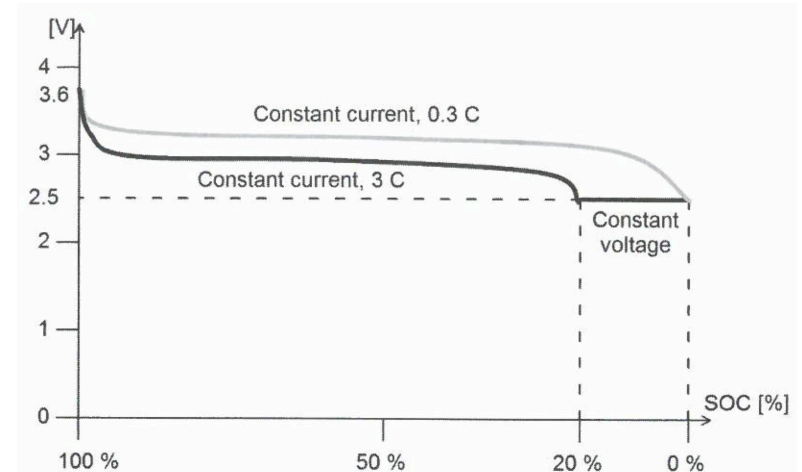
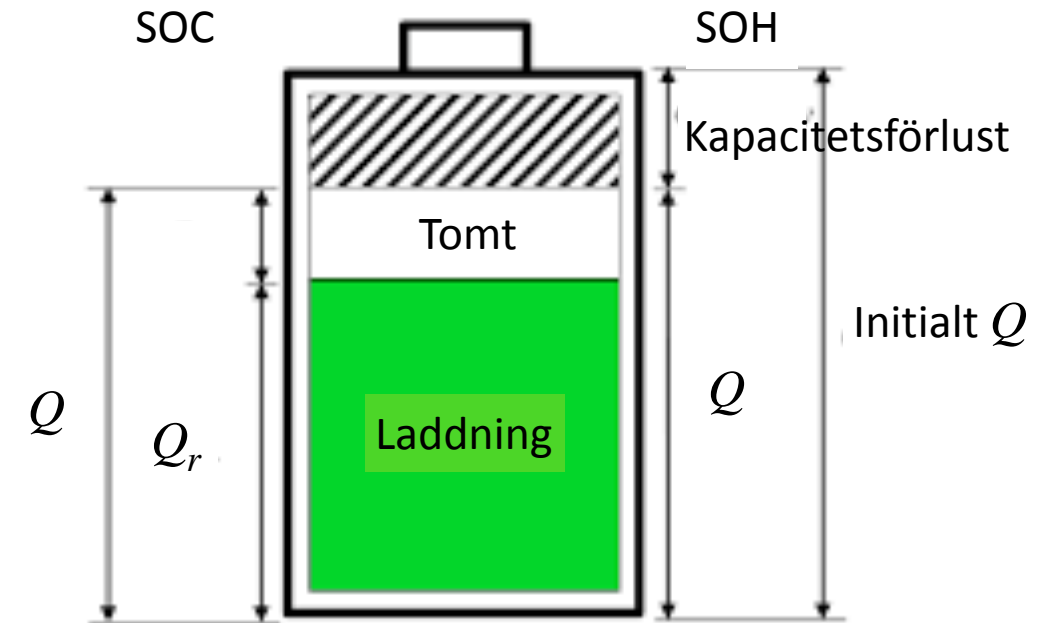
- Fulladdat, dvs SOC = 100%:
 - Relaxerat batteri i vila med högsta tillåtna batterispänning (OCV) för en given temperatur.
 - Ex: LMO: 4,2 V @ 25°C
 - Använd CCCV-laddning för att nå tillståndet.
- Tomt, SOC = 0 %:
 - Relaxerat batteri i vila med lägsta tillåtna batterispänning (OCV) för en given temperatur.
 - Ex: LMO: 3,0 V @ 25°C
 - Använd CCCV-urladdning för att nå tillståndet.



Kapacitetsbegrepp

- **(Total) kapacitet, Q :** Laddningsmängd som tömmer ett fullt batteri. Minskar med tiden.
- **Residualkapacitet, Q_r :** Laddningsmängd som tömmer ett batteri från sin nuvarande laddnivå.
- **State-of-charge:**
$$\text{SOC} = \frac{\text{Residualkapacitet}}{\text{Total kapacitet}}$$
- **State-of-health:**
$$\text{SOH} = \frac{\text{Nuvarande total kapacitet}}{\text{Total kapacitet för nytt batteri}}$$

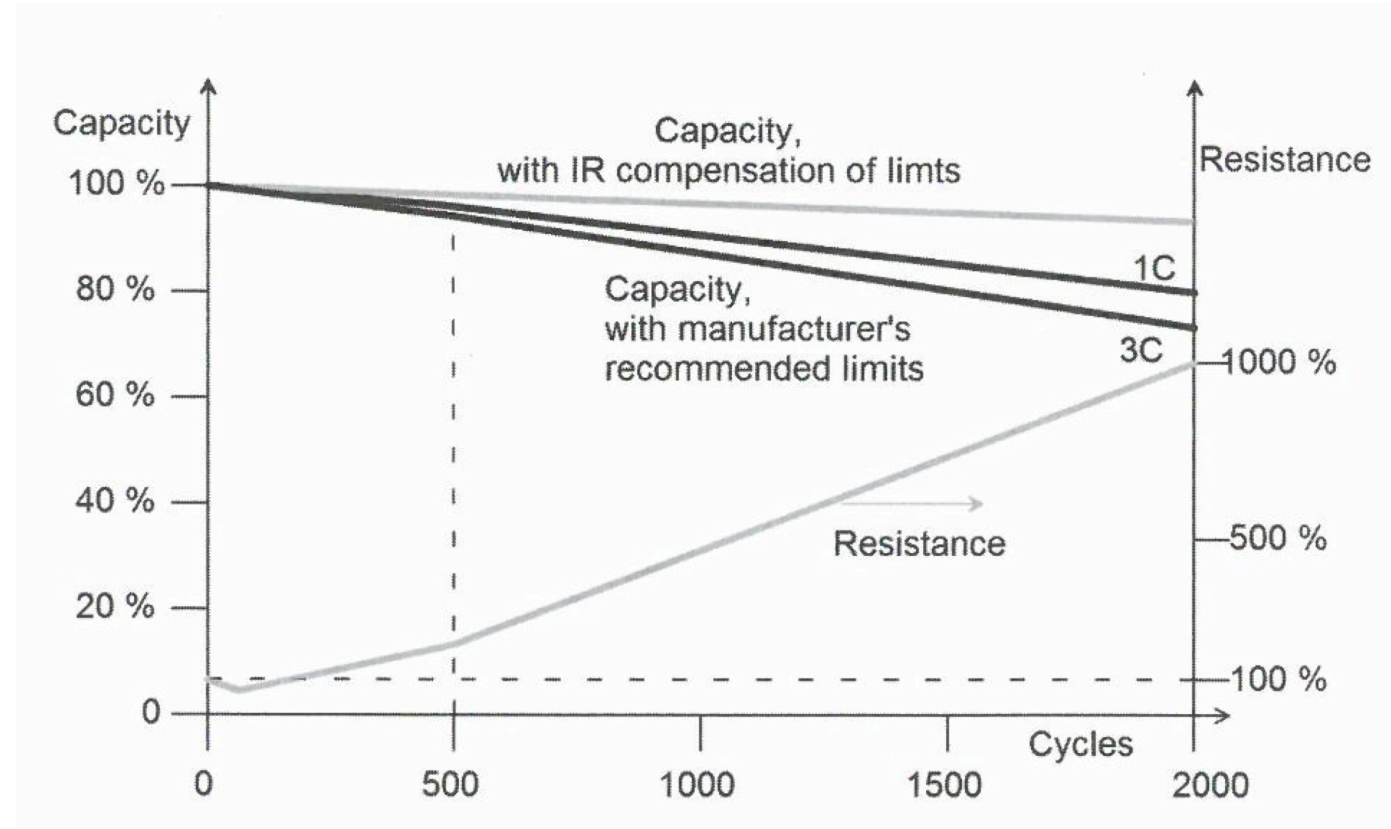
- **Urladdningskapacitet** för ström I , $Q_{[I]}$: Laddningsmängd som kan plockas ut från ett fullt batteri med en konstant urladdningsström I för att nå den lägsta tillåtna batterispänningen i specificerad temperatur.
- **Nominell kapacitet, Q_{nom}** specificerar nominell urladdningskapacitet för ett nytt 25°C varmt batteri med urladdningsström 1C.



Tar hänsyn till strömstyrka

Åldring

- Åldringseffekter:
 - Kapaciteten minskar
 - Den inre resistansen ökar vilket leder till effektreduktion
- Batterier anses vara slut när kapaciteten sjunker under 80% av den ursprungliga kapaciteten.
- OBS: Urladdningskapaciteten reduceras både i takt med kapacitetsminskning och resistansökning.
- Faktorer som påverkar åldrande
 - Användning, strömstyrka, antal laddcykler
 - Omgivningstemperatur
 - Kalenderåldrande (räcker med att ligga på hylla för att åldras).



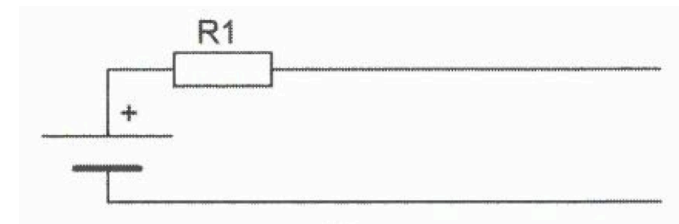
Verkningsgrad

Verkningsgrad för en laddcykel (energi)

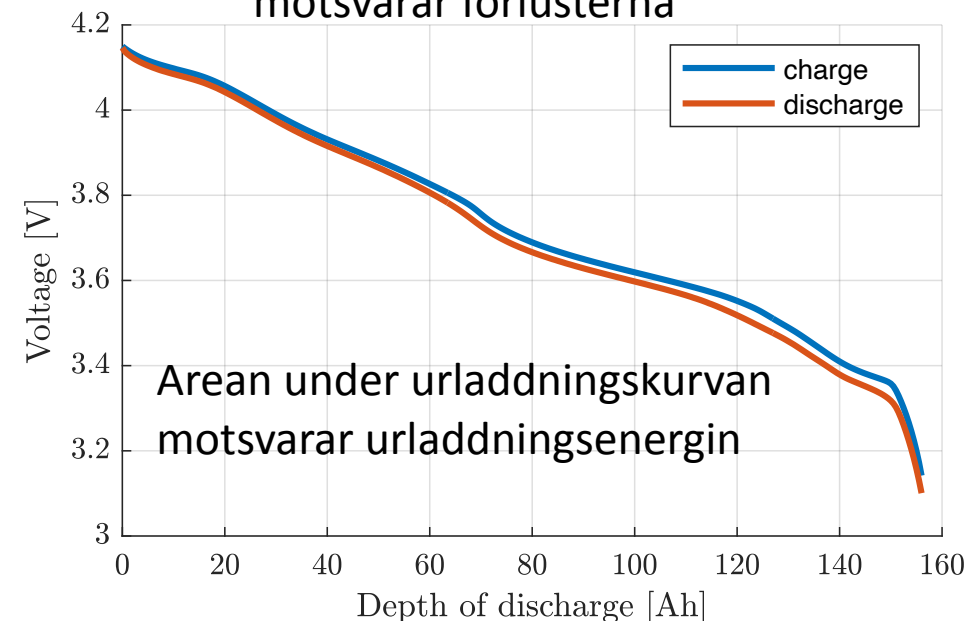
- Li-jon celler har hög verkningsgrad tack vare låg inre resistans, $\approx 98\%$ för en cykel.
- Verkningsgraden minskar med ökad ström.
- Verkningsgrad = $\frac{\text{nyttoenergi}}{\text{inmatad energi}} = \frac{\text{urladdningsenergi}}{\text{uppladdningsenergi}}$

Coulombverkningsgrad

- Upp- och Ur-laddningskapaciteten bestäms för samma cykel. Då är
- Coulombverkningsgrad = $\frac{\text{urladdningskapacitet}}{\text{uppladdningskapacitet}}$
- Beskriver andelen laddning som återfås vid urladdning.
- För korta laddcykler är läckströmmar försumbara och Coulombverkningsgraden alltså nära 100%.

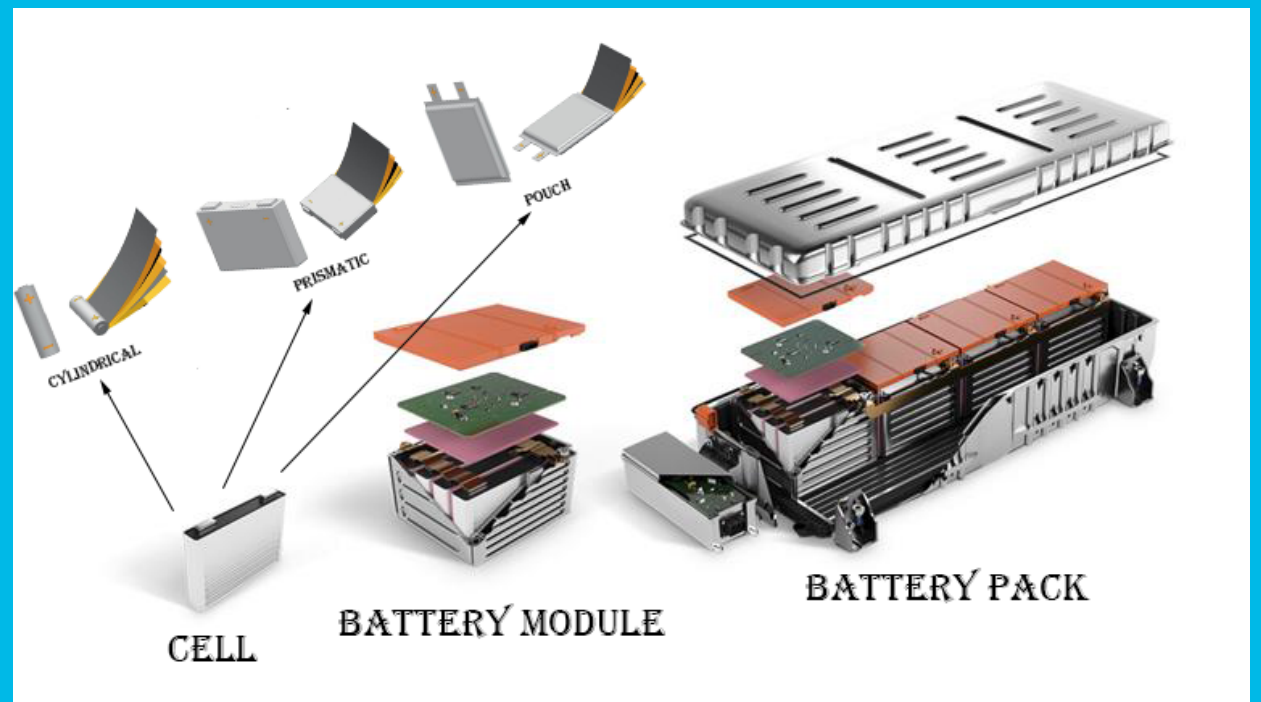


Arean mellan kurvorna
motsvarar förlusterna



$$E = \int v(\text{DoD}) d\text{DoD} \quad [\text{V Ah} = \text{Wh}]$$

Batteripack



Batteripacksexempel: Teslas Model S

Packspec:

- 85 kWh (540 kg)
- 400 V
- 7104 celler: 16 moduler i serie

Modulspec:

- Modul: 6 seriekopplade grupper med 74 parallellkopplade celler

Cells spec:

- 18650 Li-ion cells
- 3.6 V, 3.2 Ah, 48.5 g, 243 Wh/kg



Panasonic Lithium Ion NCR18650B

Features & Benefits

- High energy density
- Long stable power and long run time
- Ideal for notebook PCs, boosters, portable devices, etc.

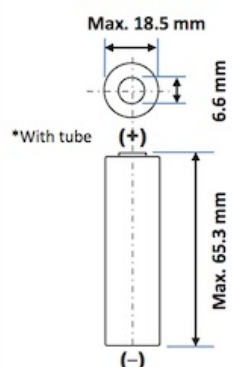
* At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

Specifications

Rated capacity ⁽¹⁾	Min. 3200mAh
Capacity ⁽²⁾	Min. 3250mAh Typ. 3350mAh
Nominal voltage	3.6V
Charging	CC-CV, Std. 1625mA, 4.20V, 4.0 hrs
Weight (max.)	48.5 g
Temperature	Charge*: 0 to +45°C Discharge: -20 to +60°C Storage: -20 to +50°C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric: 676 Wh/l Gravimetric: 243 Wh/kg

⁽¹⁾ At 20°C ⁽²⁾ At 25°C ⁽³⁾ Energy density based on bare cell dimensions

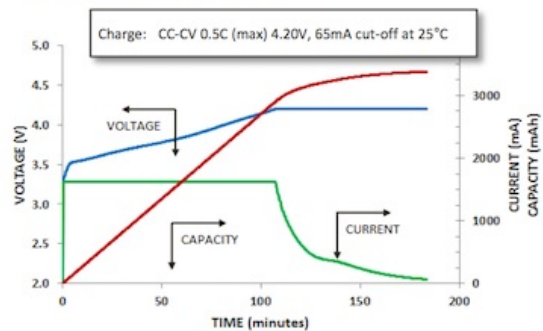
Dimensions



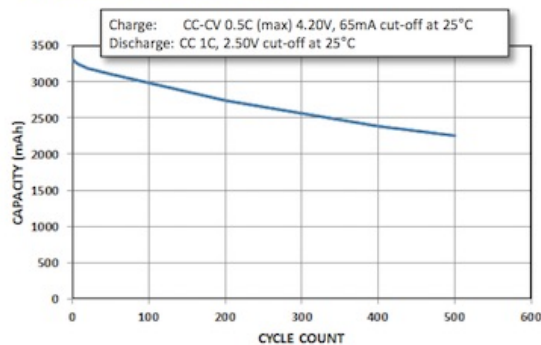
For Reference Only



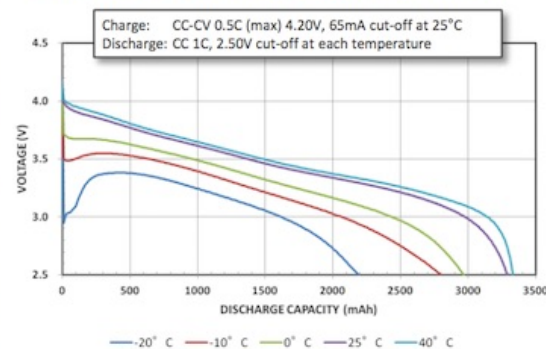
Charge Characteristics



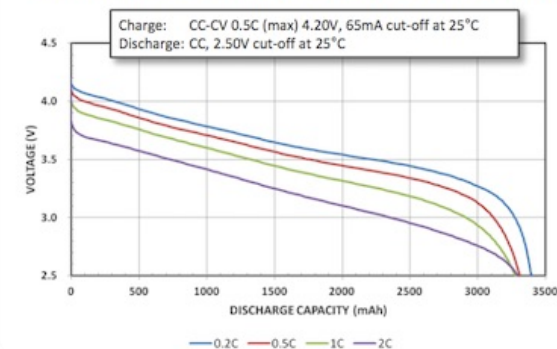
Cycle Life Characteristics



Discharge Characteristics (by temperature)



Discharge Characteristics (by rate of discharge)



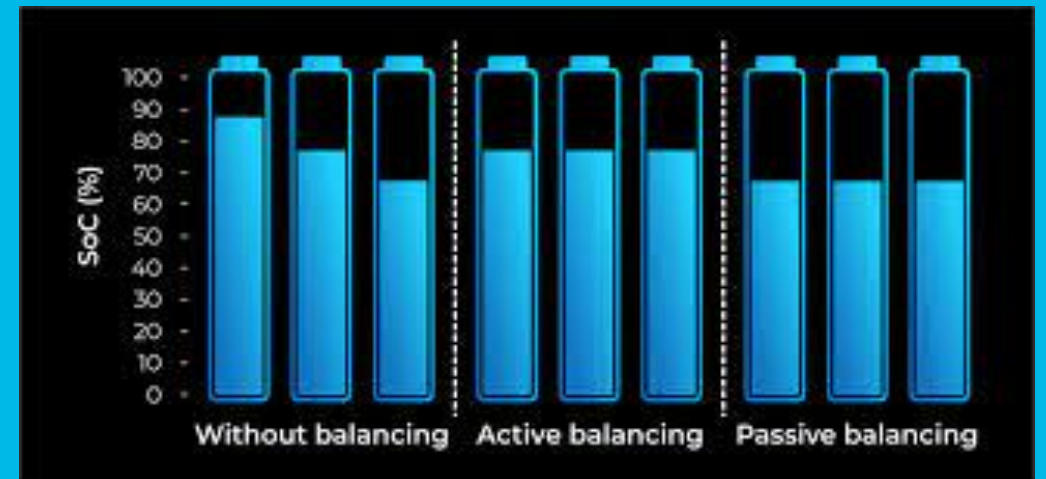
The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.

VERSION 13.11 R1 | Copyright© 2012 Energy Comf

Lite packberäkningar

- Max spänning:
 $\text{max } 4.2 \text{ V/cell} \cdot 6 \text{ celler i serie/modul} \cdot 16 \text{ moduler i serie} = 403 \text{ V}$
- Laddningskapacitet: $3.35 \text{ Ah} \cdot 74 \text{ celler parallellt} = 247.9 \text{ Ah}$
- Energikapacitet \approx nominell spänning \cdot laddningskapacitet = $(3.6 \cdot 6 \cdot 16 \text{ V}) \cdot 247.9 \text{ Ah} = 85.7 \text{ kWh}$ jmf 85 kWh
- Cellvikt = $7104 \text{ celler} \cdot 0.0485 \text{ kg/cell} = 345 \text{ kg}$ jmf med 540 kg för hela packet.
- Energitäthet för pack: $85 \text{ kWh}/540 \text{ kg} = 157 \text{ Wh/kg}$ (jmf 243 Wh/kg för cell)
- Max konstant urladdningsström: cellens maxström $4.875 \text{ A} \cdot 74 \text{ celler parallellt} = 361 \text{ A}$
(Modulspec: 225 A kontinuerligt, 1000 A i 10 s, 1500 A i 3 s).
- Maxeffekt: maxspänning $400 \text{ V} \cdot$ maxström $361 \text{ A} = 144 \text{ kW}$

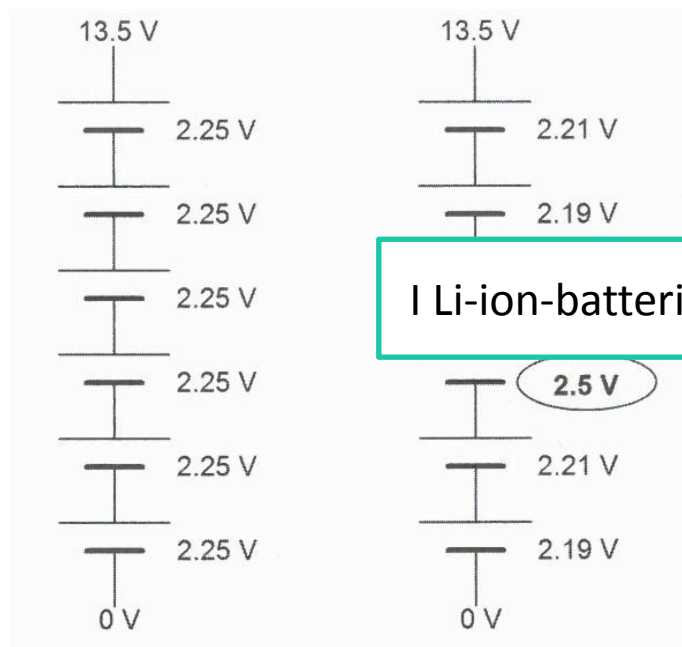
Batteribalansering



Olika spänningar i seriekopplade celler

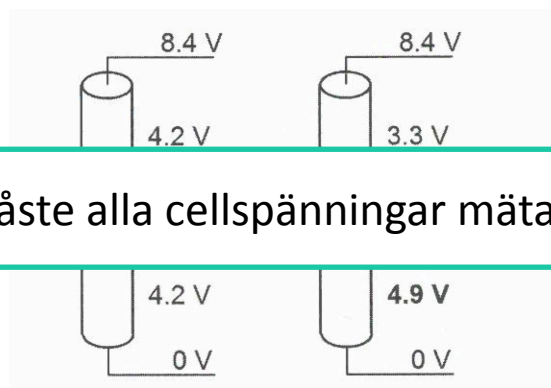
Betrakta laddning i en balanserat och ett obalanserat pack.

Blysyrabatteri



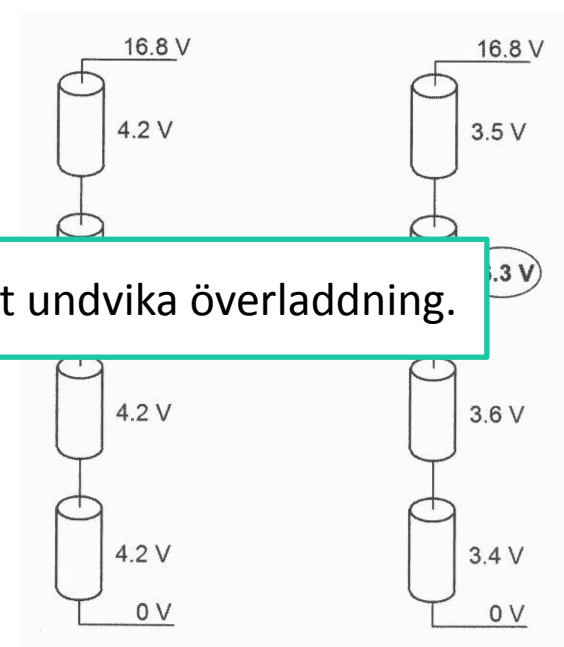
OK

Litet LiPo-batteri



Cellskada

Fyrcelligt Li-ion batteri



Termisk rusning

I Li-ion-batteripack måste alla cellspänningar mätas för att undvika överladdning.

Balansering (omfördelning av laddning mellan cellerna)

Exempel: Två seriekopplade celler

Cell 1: 90 Ah

Cell 2: 120 Ah

Utan balansering:

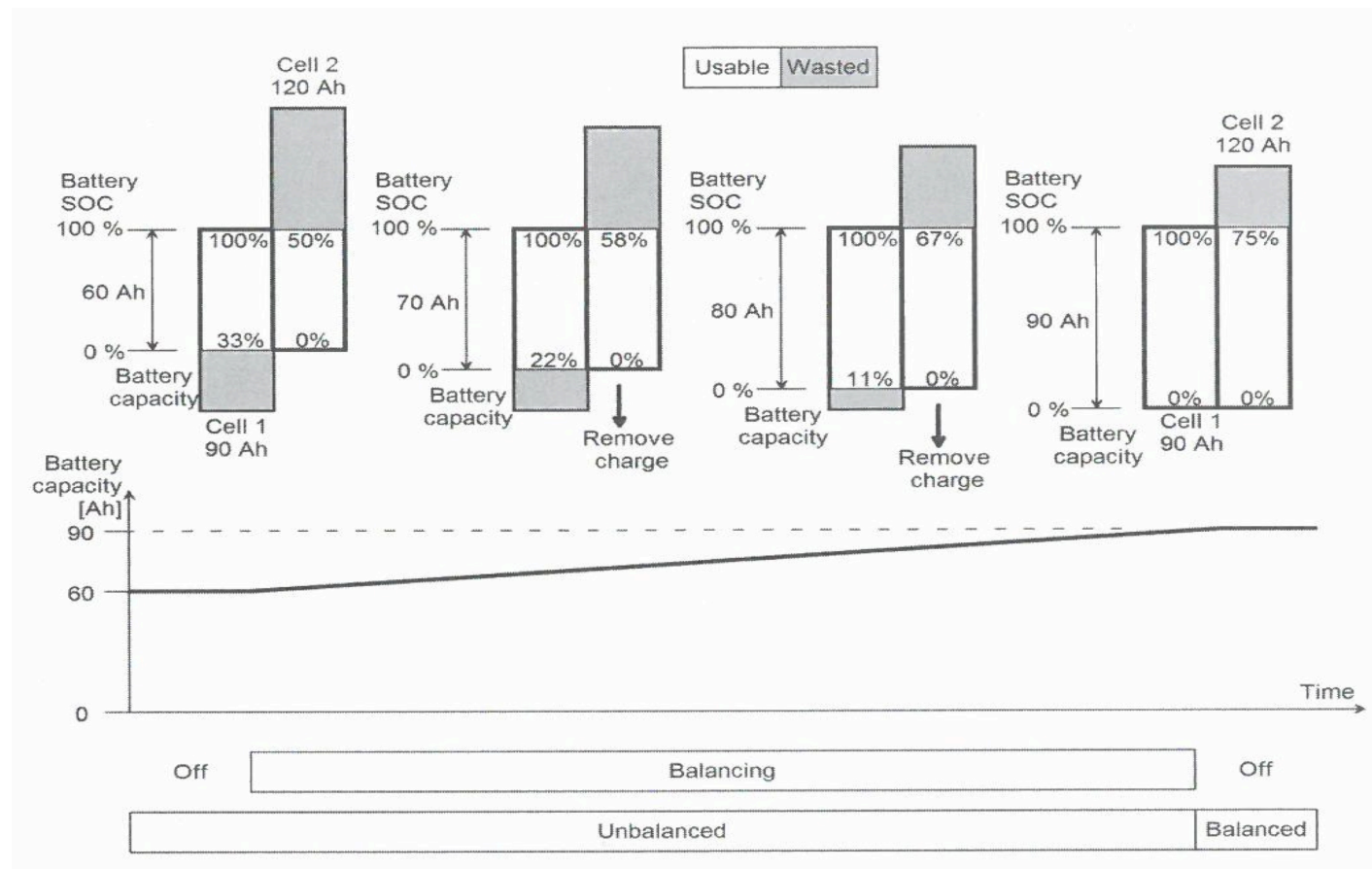
60 Ah

Med balansering:

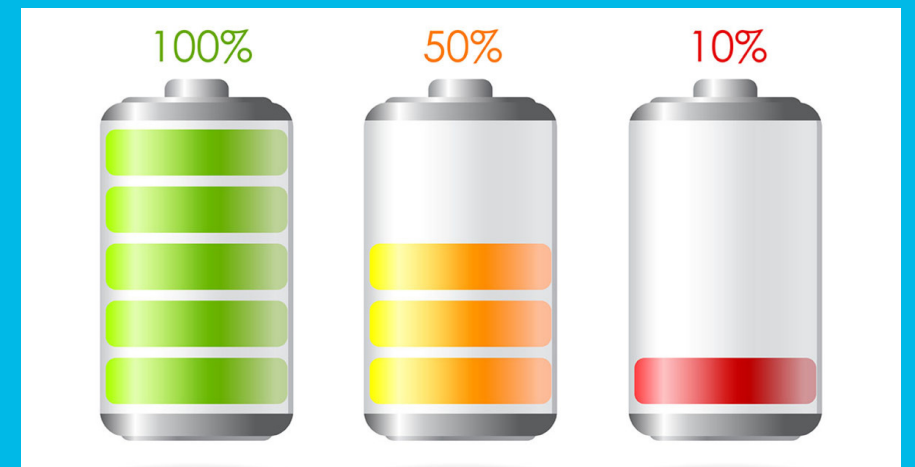
Tappa ut laddning ur cell 1, t ex genom en resistans parallellkopplade med cellen:
Kapacitet = $\min(\text{cellkapacitet}) = 90 \text{ Ah}$

Omfördelning av laddning hanterar också obalans i kapacitet.

Kapacitet = $\text{mean}(\text{cellkapacitet}) = 105 \text{ Ah}$



State of charge-estimering



SOC-estimering

Varför?

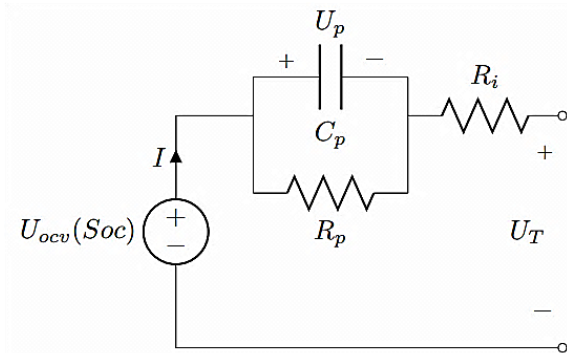
- SOC för alla celler är viktigt för
 - Balansering
 - Räckviddsestimering
 - Skadereglering (överladdning/urladdning leder till permanent skada)
- Det går inte att mäta SOC därför krävs noggranna SOC-estimeringsmetoder.
- Utan bra SOC-estimering kan inte batteripacket utnyttjas fullt ut för att ha säkerhetsmarginal för skadlig/katastrofal över-/under-laddning!



SOC-estimering

Hur?

- Coulombbräkning – integrera mätt ström
- Mäta spänning och använda OCV-kurvan
- Ovanstående metoder ofta otillräckliga, i praktiken måste de kombineras i ett filter (Kalman, partikelfilter)



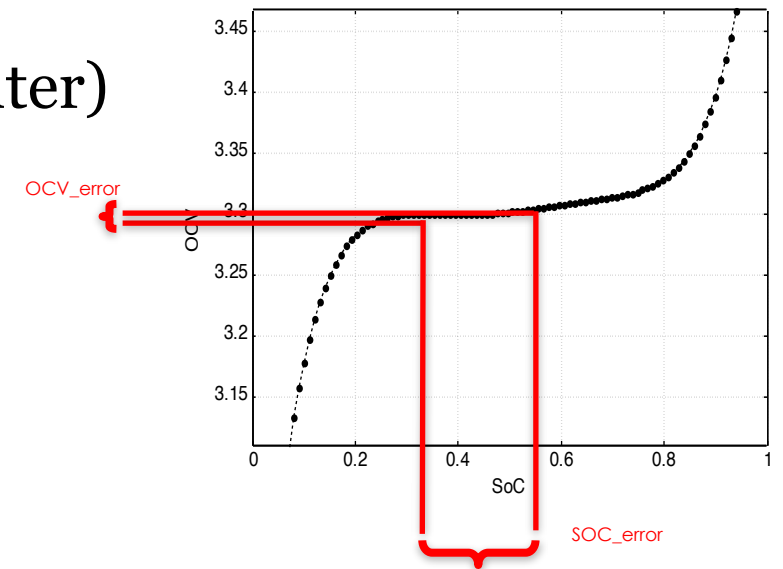
$$\dot{\text{SOC}} = \frac{\eta I}{Q_{\text{Batt}}}$$

$$\dot{U}_p = \frac{I}{C_p} - \frac{R_p U_p}{C_p}$$

$$U_T = U_{\text{OCV}}(\text{SOC}) - U_p - R_i I$$

$$Q = \int I dt$$

$$\text{OCV} = f(\text{SOC})$$



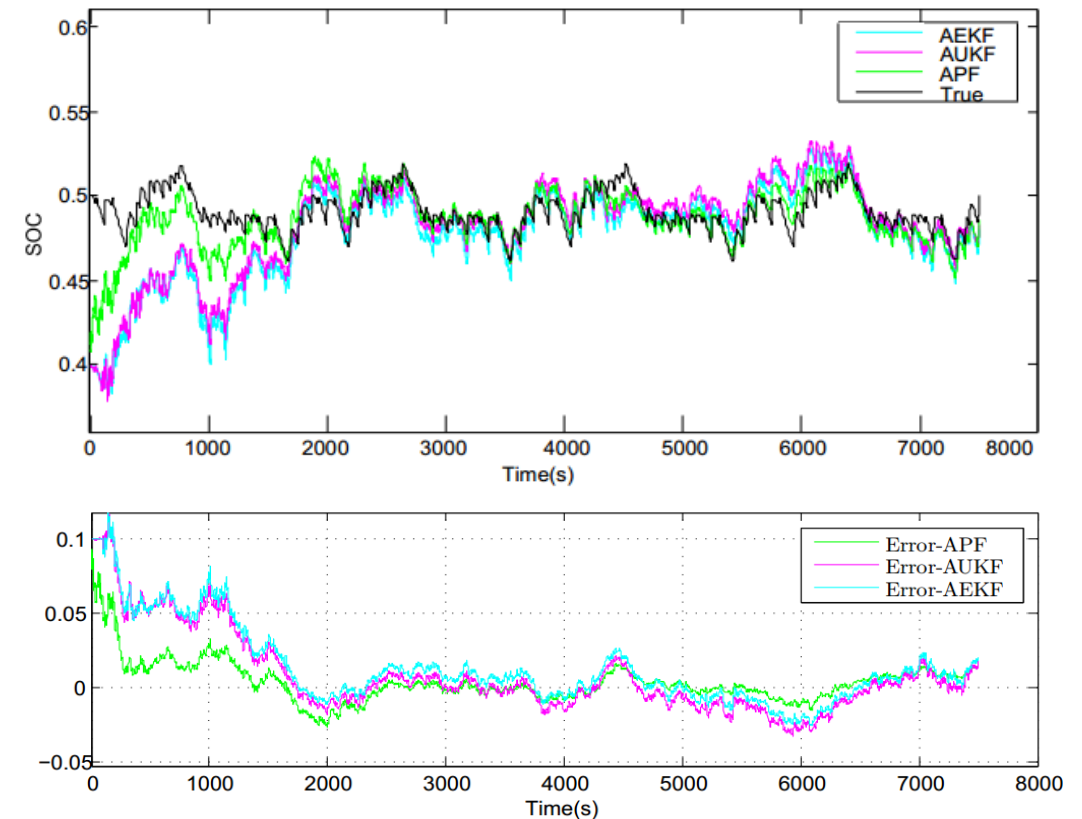
SOC-estimation med hjälp av olika filter

Simulerade data av ett elhybridsfordon som körs med SOC nära 0.5.

Notera att användningen är långt ifrån testcykler från fullt till tomt batteri med konstant ström.

=> Svårare att avgöra SOC och SOH

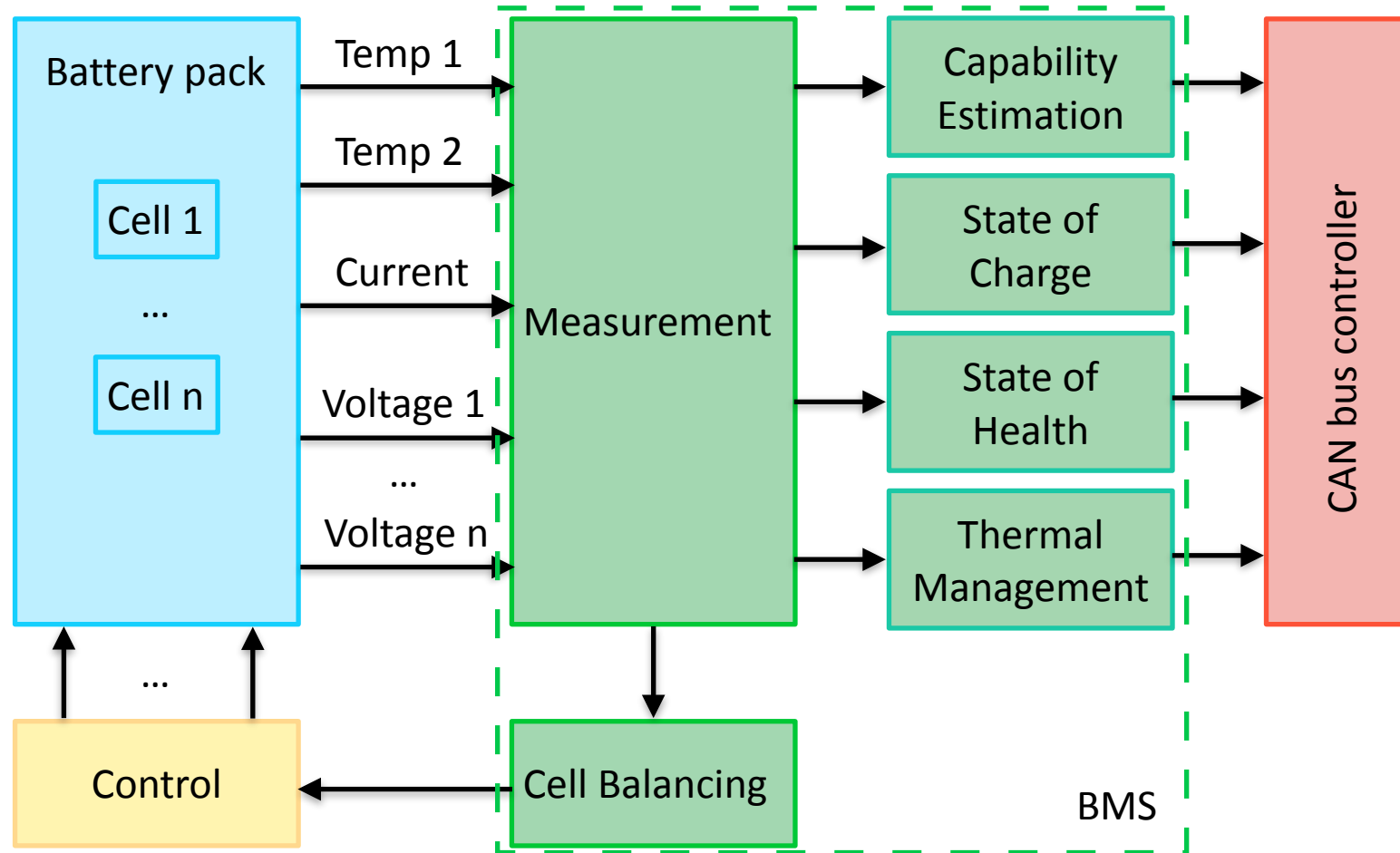
SOC-skattningarna konvergerar, dvs de färgade kurvorna närmar sig den svarta kurvan som är det sanna SOC.



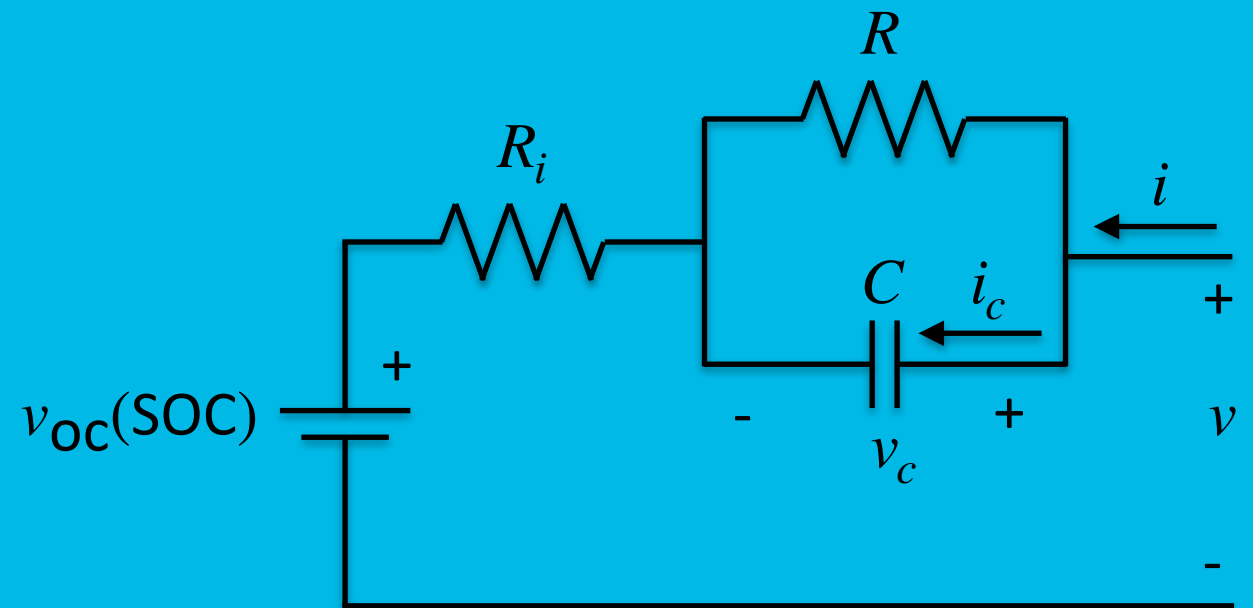
Battery Management System



Battery Management System (BMS)



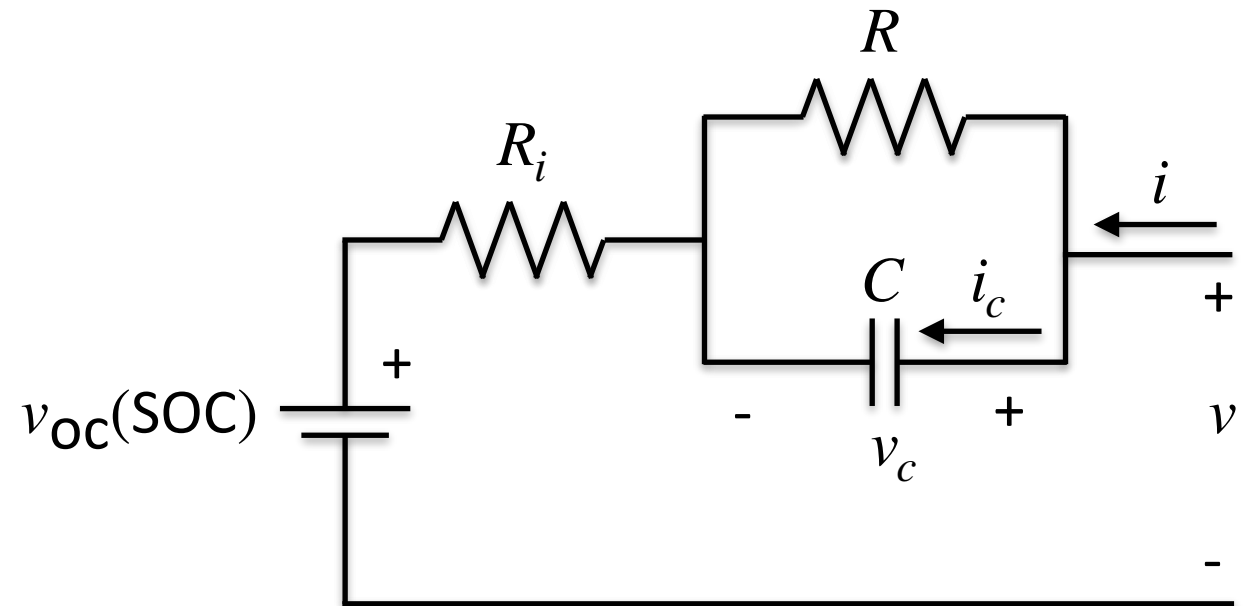
Batterimodellering



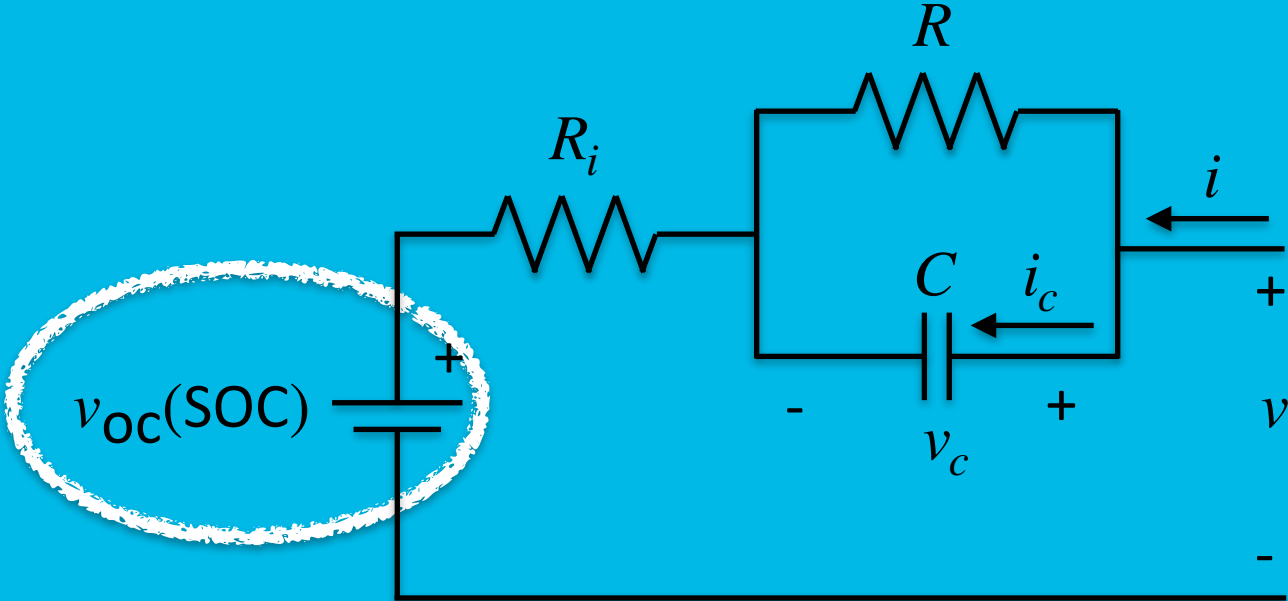
Modelstruktur

Modellstruktur

- Ekvivalent kretsmodell som beskriver sambandet mellan batteriets spänning v och ström i ($i > 0$ vid uppladdning)
- Modellen har 3 delar:
 - Open circuit voltage som funktion av SOC, $v_{OC}(SOC)$
 - Batteriets inre resistans R_i
 - En RC-krets som beskriver polarisationsförluster
- Delarna kan modeleras separat med olika mätdata.

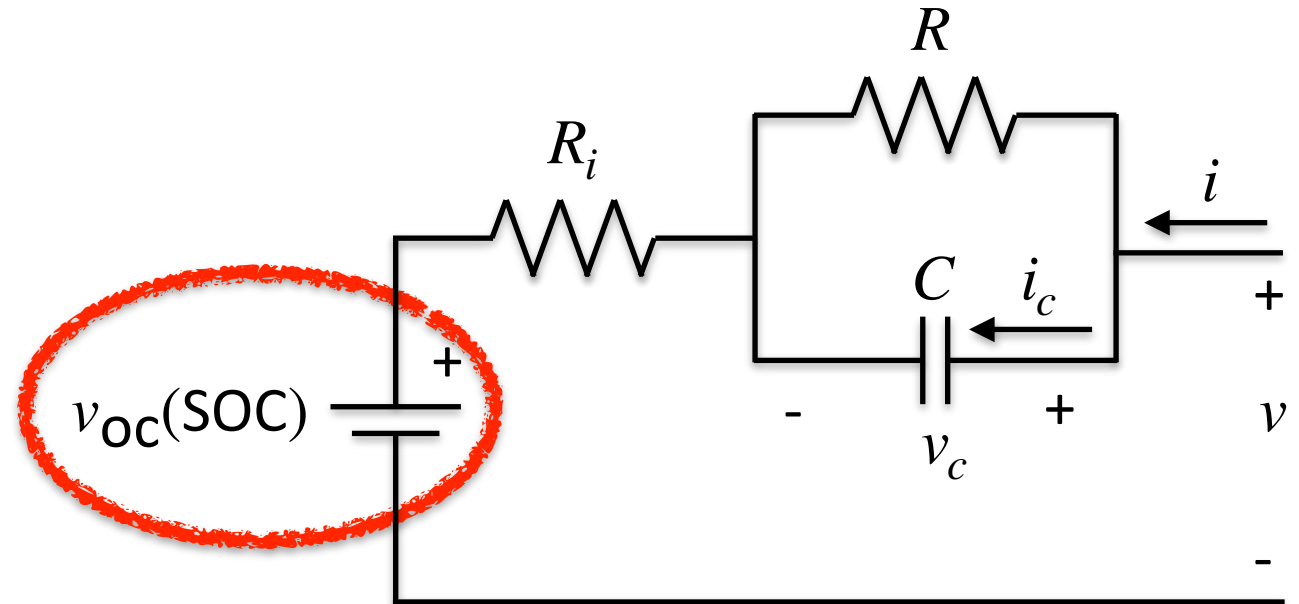


Open circuit voltage



Open circuit voltage

- Krav för att identifiera OCV:
- Mätningar från hela SOC-området, från fullt till urladdat batteri.
- Om batteriet vilat ($i = 0$) tillräckligt länge kommer $v_c = 0$ och då är $v_{OC}(SOC) = v$ vilket kan mätas.
- För att spara tid att mäta upp OCV-kurvan räcker det oftast att använda en liten ström.

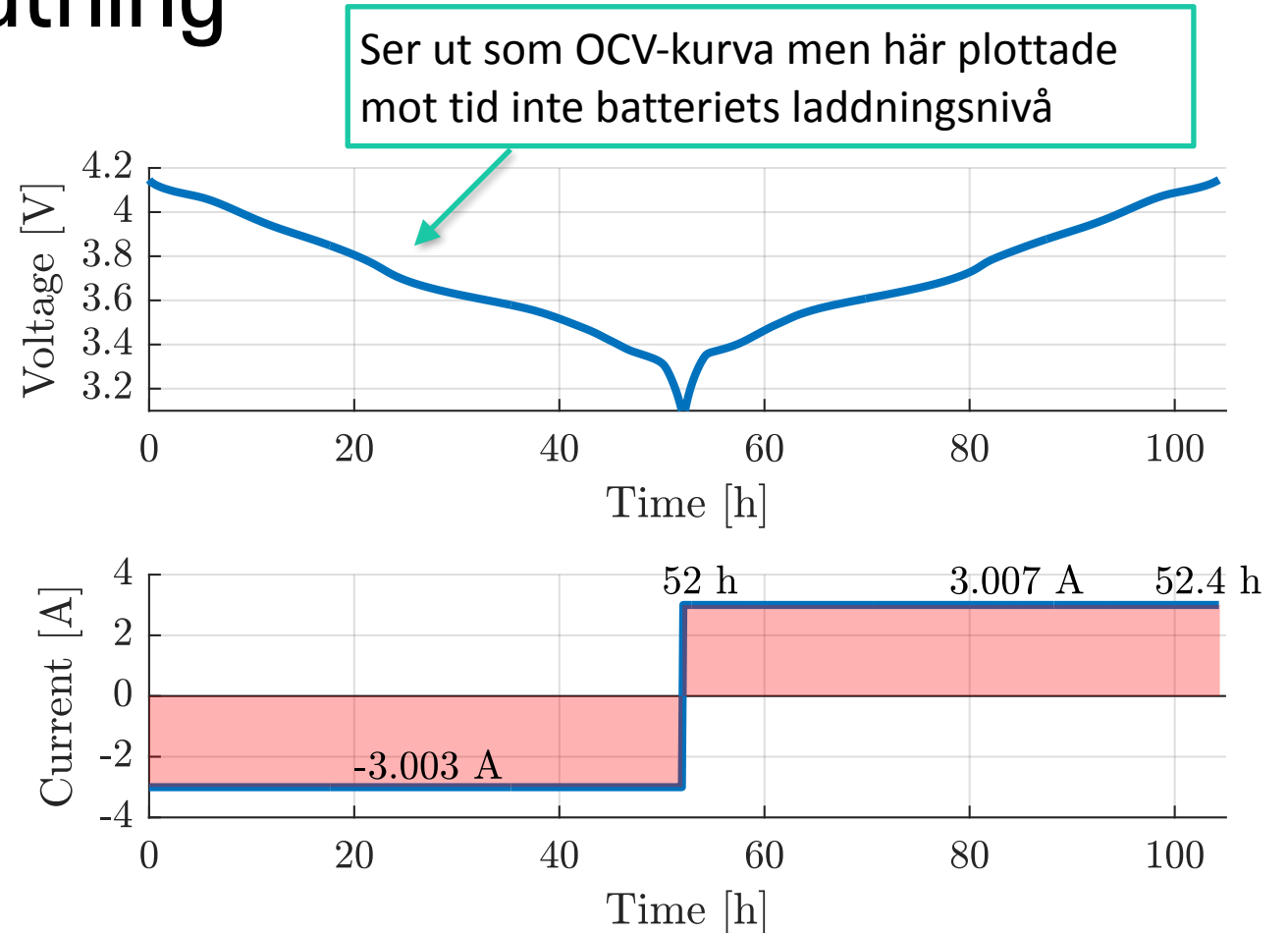


Cyklingstest/kapacitetsmätning

- Låg ström, här 3 A (om det är lite beror på batteriets kapacitet)
- Cykling
 - Urladdning från maxspänning till minsta tillåtna spänning: 4.15 V → 3.1V
 - Uppladdning 3.1V → 4.15V
- (Urladdnings)Kapaciteten kan beräknas:

$$Q = - \int_{\text{fullt}}^{\text{tomt}} i dt = - I \Delta t =$$

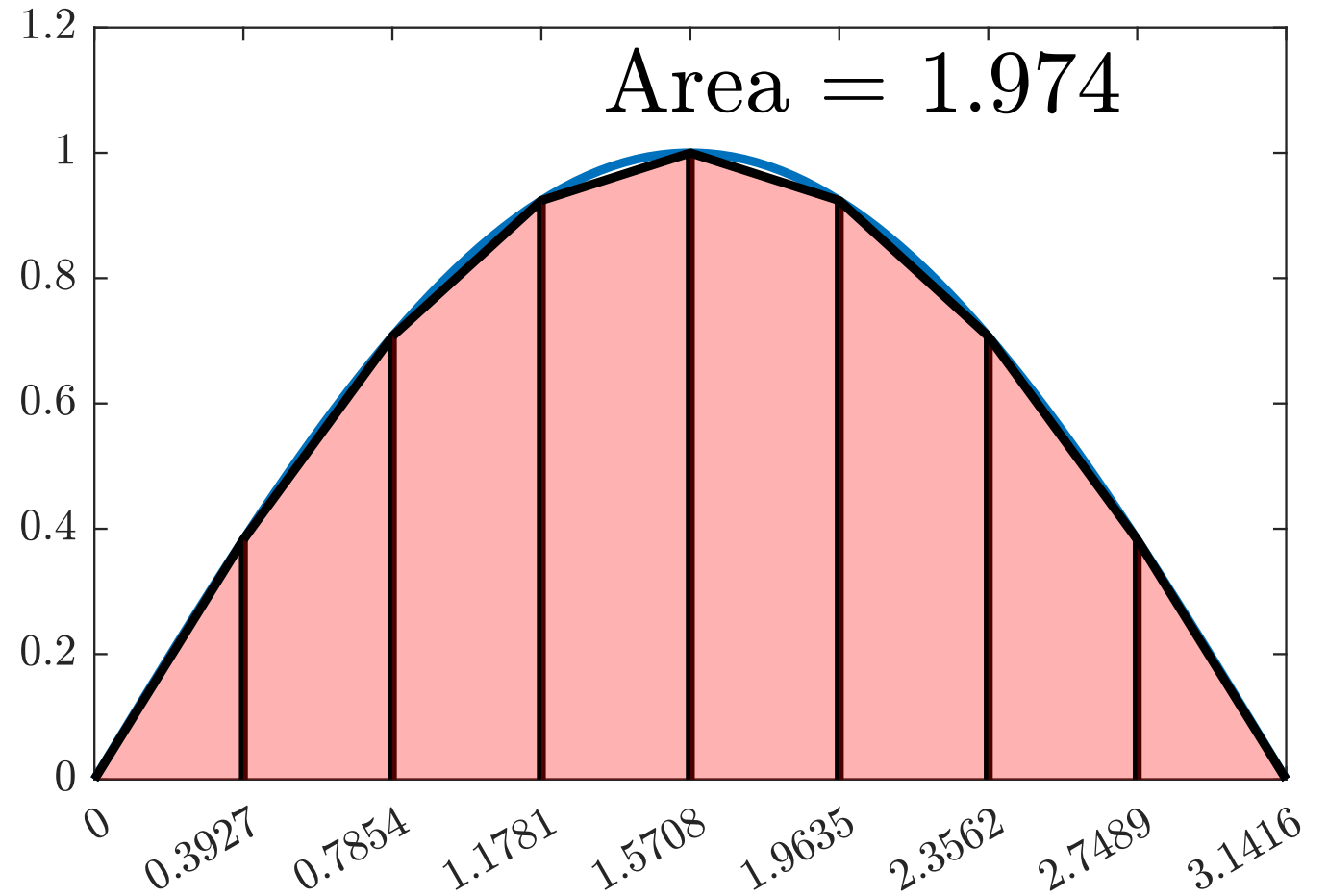
$$= 3.003 \cdot 52 = 156.2 \text{ Ah}$$



En numerisk integrationsmetod: Trapetsmetoden

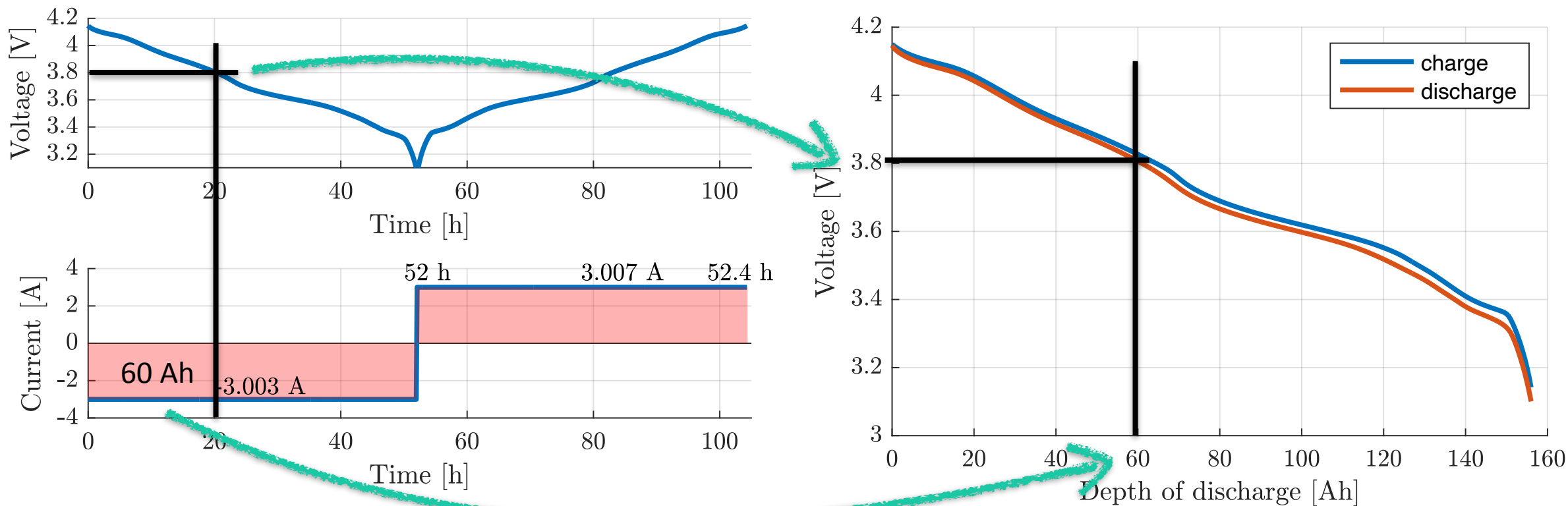
- Beräkna $\int_0^{\pi} \sin(x) dx =$
 $= [-\cos(x)]_0^{\pi} = 1 - (-1) = 2$
- Numerisk approximation:

```
x = [0:pi/8:pi];
y = sin(x);
Area = trapz(x,y);
```



Spänning som funktion av DoD

- Illustration av beräkning av spänning som funktion av DoD.



Verkningsgraden

För samma DoD är spänningen under uppladdning högre än under urladdning pga strömmen.

Energikapacitet (Energi ut):

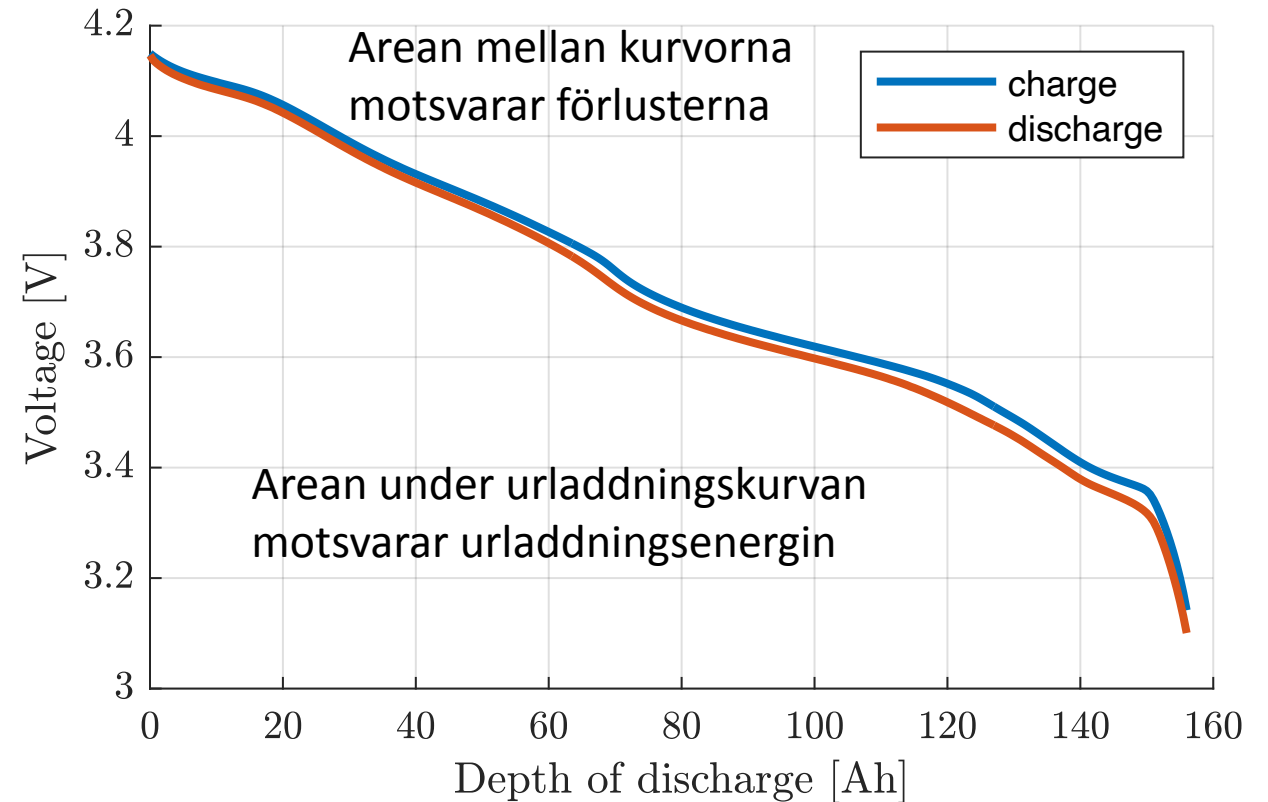
$$\int_0^{156} v(t) d\text{DoD} [\text{VAh} = \text{Wh}] =$$

$$= \text{trapz}(\text{DoD}, V_{\text{discharge}}) = 579 \text{ Wh}$$

Energi in:

$$\text{trapz}(\text{DoD}, V_{\text{charge}}) = 583 \text{ Wh}$$

$$\text{Verkningsgrad} = \frac{E_{\text{ut}}}{E_{\text{in}}} = 99.4 \% \text{ (vid 3 A)}$$



Open Circuit Voltage (OCV)

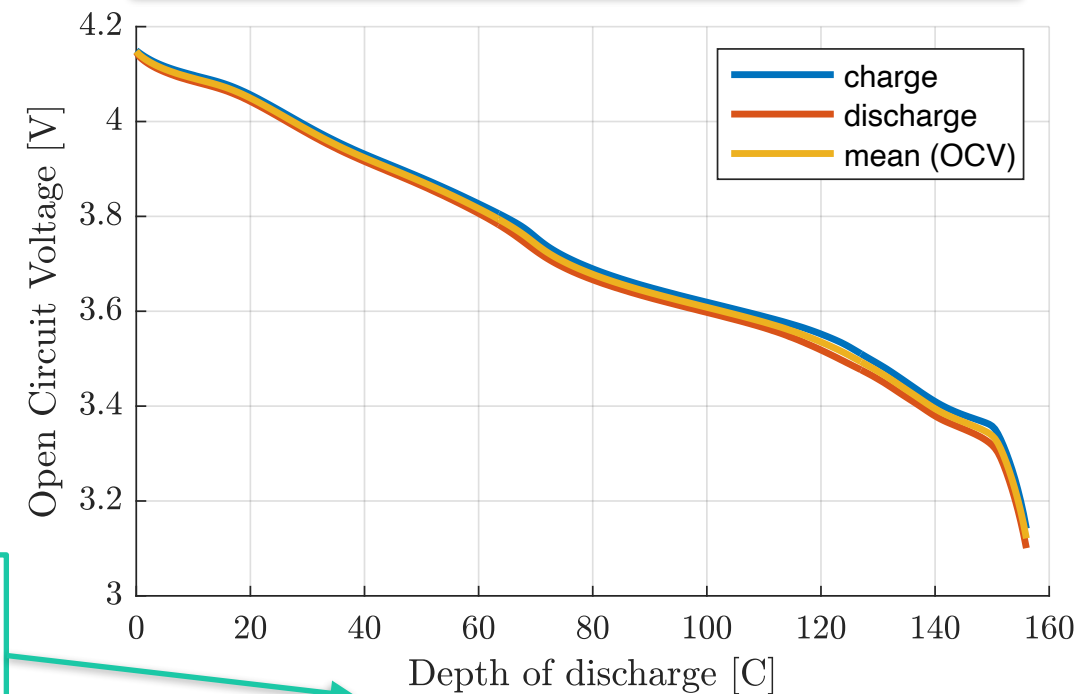
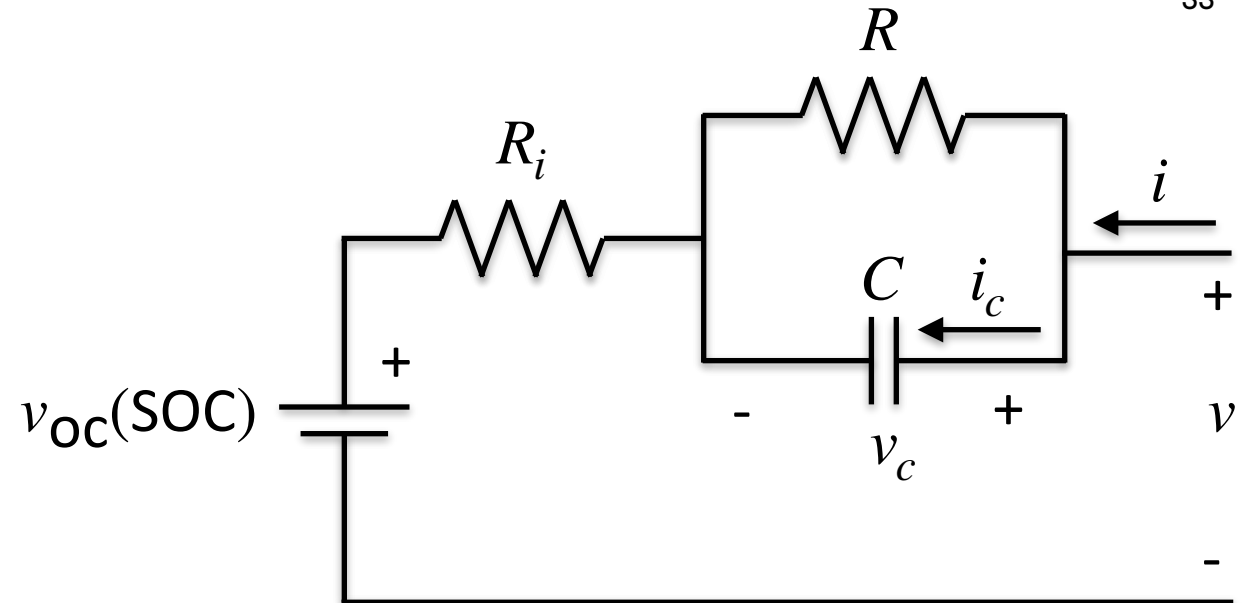
Vid konstant ström $I_{\text{dis}} < 0$ och $I_{\text{chg}} > 0$ för ur- resp. uppladdning gäller

$$v_{\text{dis}}(\text{DoD}) = v_{\text{oc}}(\text{DoD}) + I_{\text{dis}}(R_i(\text{DoD}) + R(\text{DoD}))$$

$$v_{\text{chg}}(\text{DoD}) = v_{\text{oc}}(\text{DoD}) + I_{\text{chg}}(R_i(\text{DoD}) + R(\text{DoD}))$$

Om $I_{\text{dis}} = -I_{\text{chg}}$ så kan OCV approximeras med

$$v_{\text{oc}}(\text{DoD}) \approx \frac{v_{\text{chg}}(\text{DoD}) + v_{\text{dis}}(\text{DoD})}{2}$$



Nu återstår att byta DOD mot SOC på x-axeln. Alltså hur beräknas SOC(DoD)?

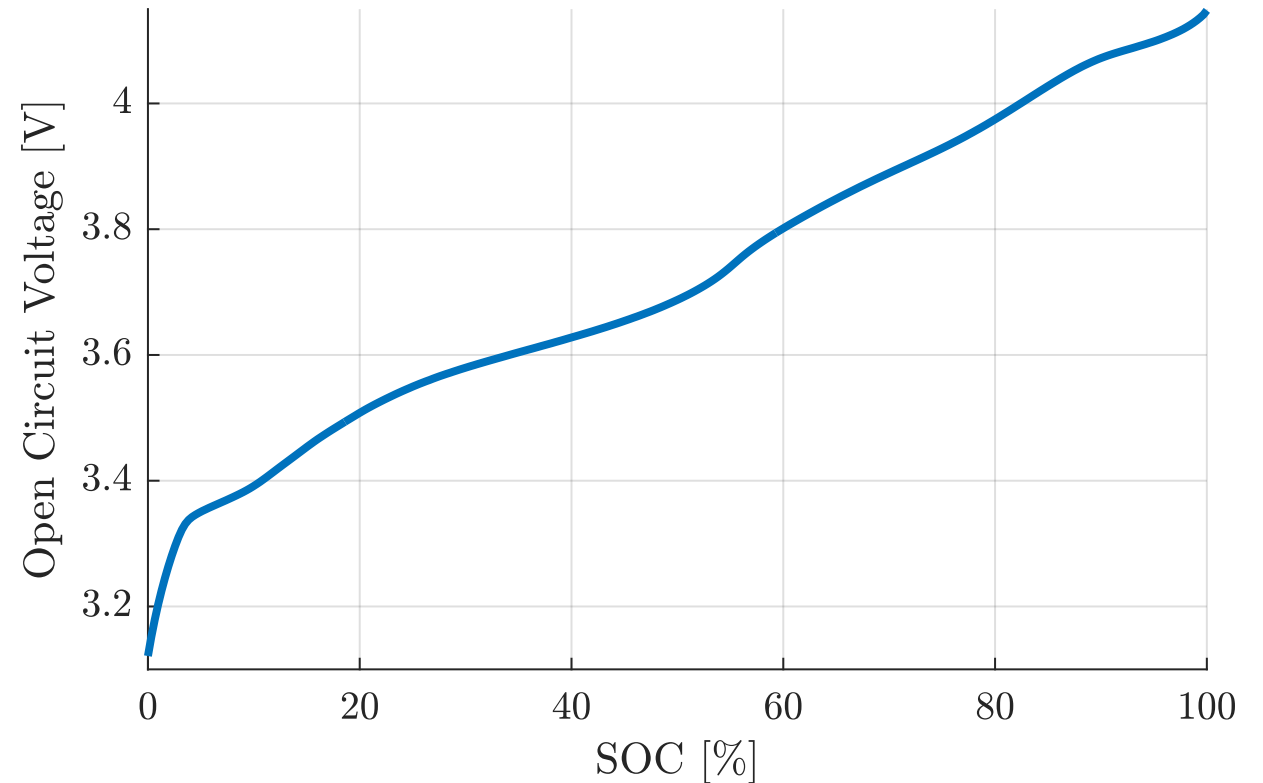
OCV vs SOC

SOC är definieras som ni minns av

$$\text{SOC} = \frac{\text{nuvarande laddnivå}}{\text{total kapacitet}}$$

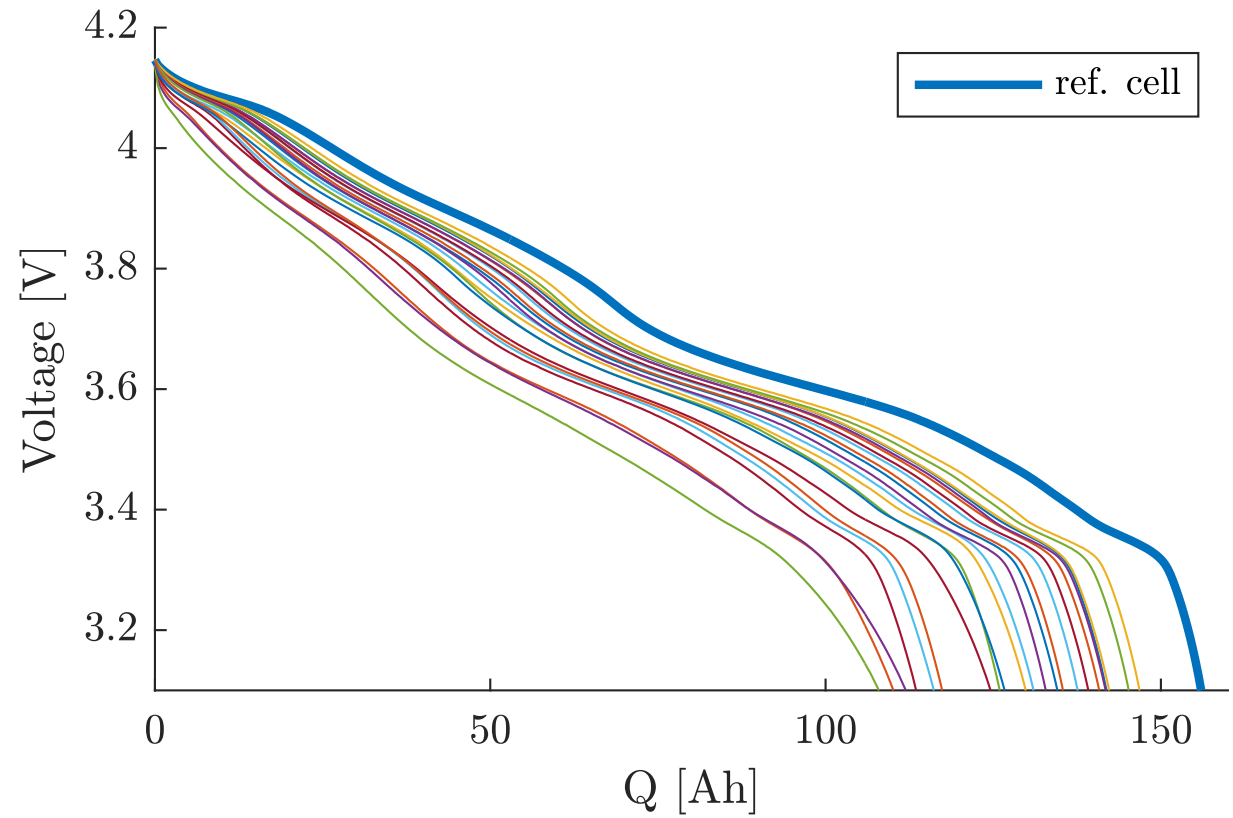
Detta kan uttryckas med batteriets totala kapacitet Q_{tot} för och DoD som

$$\text{SOC(DoD)} = \frac{Q_{\text{tot}} - \text{DoD}}{Q_{\text{tot}}}$$

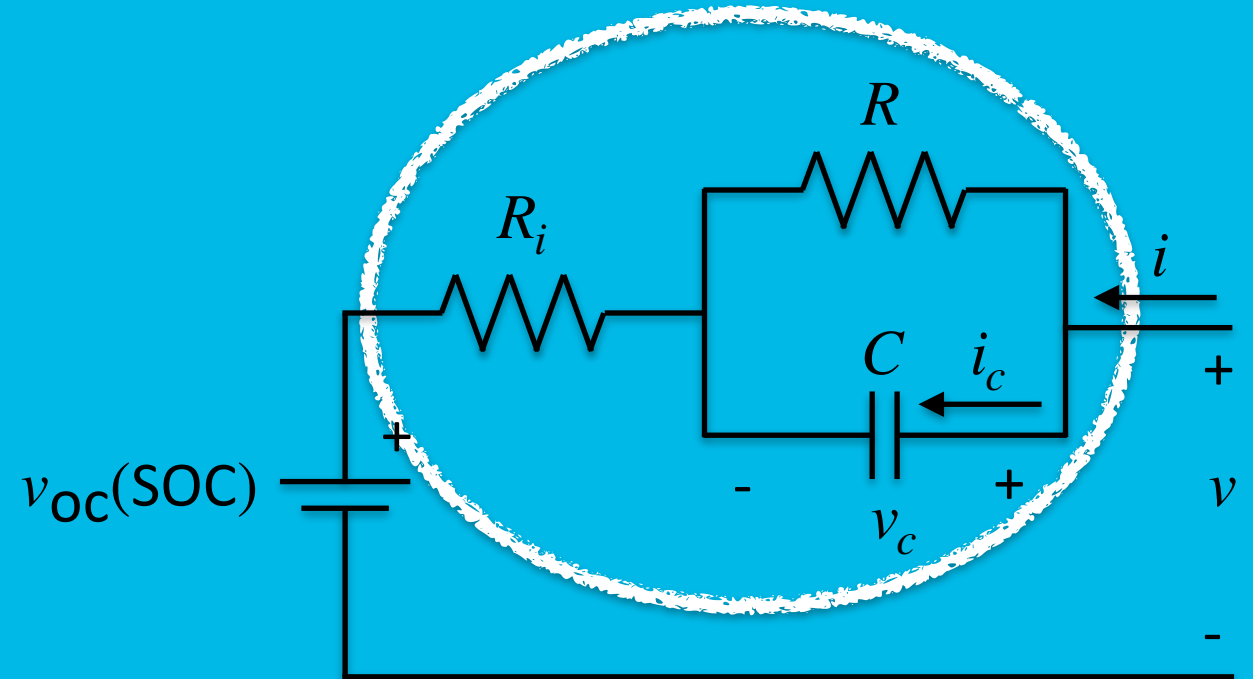


Kapaciteten sjunker

- Användning och lagring kan minska batteriets kapacitet.
- Figuren visar hur upprepade cyklings tester under livslängden minska kapaciteten på batteriet.

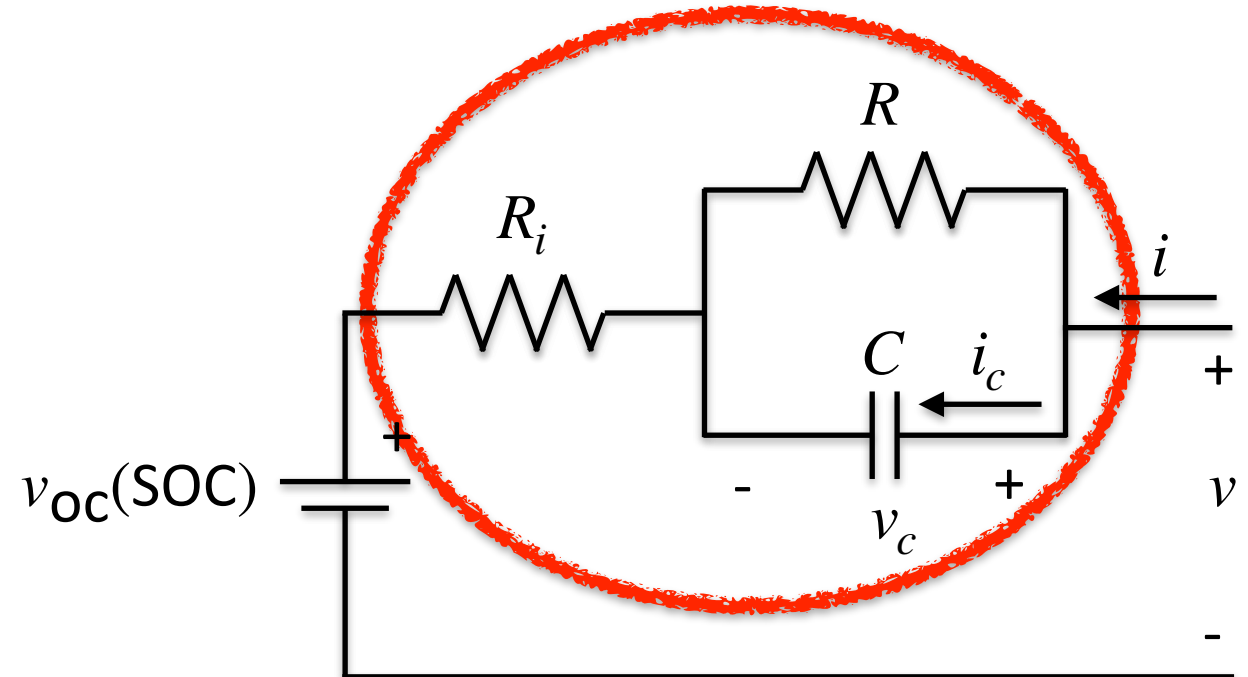


Impedansmodellering



Impedansestimering

- Impedansen beror i denna modell på parametrarna R_i , R och C som kan bero på SOC och temperatur.
- Nedan beskrivs en metod för att skatta parametrarna för givet SOC och temperatur.
- Identifiera impedans med data där SOC inte ändras mycket.
- Strömmen måste variera för att kunna skatta kapacitansen C .
- Här väljs ett steg i ström, men även sinusvågor i olika frekvenser, eller vitt brus med brett frekvensinnehåll är vanligt förekommande.



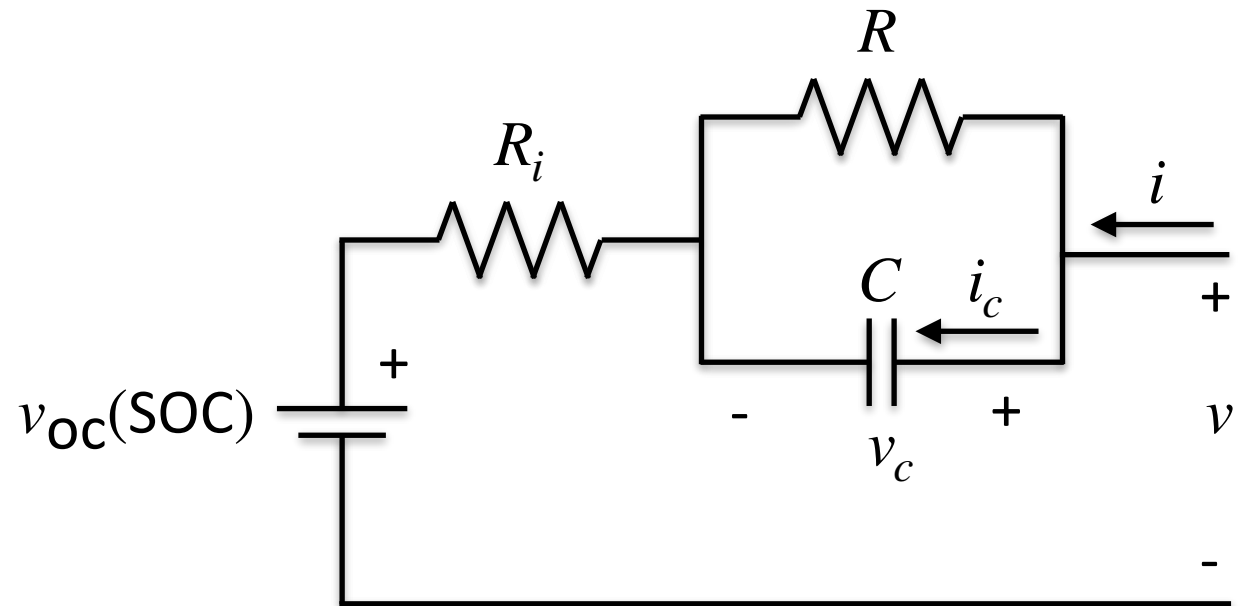
Grundidé för att identifiera parametrar

1. Ställ upp batterimodellen så att spänningen $v(t)$ kan skattas från strömmen

$$\hat{v}(t) = h(i(t) \mid \text{SOC}, R, R_i, C)$$

2. Beräkna parametrarna så att modellens beräknade spänning \hat{v} överrensstämmer (så bra som möjligt) med uppmätt spänning v

$$\min_{R, R_i, C} \|v - \hat{v}\|$$



Differentialekvationer på tillståndsform

Differentialekvationer på tillståndsform skrivs

$$\frac{dx}{dt} = f(x(t), u(t))$$

Tillståndsekvation

$$y(t) = g(x(t), u(t))$$

Mätekvation

där

- $x(t)$ är en vektor med tillstånd (de variabler som är deriverade)
- $u(t)$ är en vektor med insignaler
- $y(t)$ är en vektor med utsignaler
- f och g är kända ofta olinjära funktioner.

Om insignal $u(t)$ för $t \geq 0$ och initialtillstånd $x(0)$ är kända så kan utsignalen $y(t)$ för $t \geq 0$ beräknas.

Vi vill skriva batterimodellen på tillståndsform med $i(t)$ som insignal och $v(t)$ som utsignal.

Härledning av tillståndsform

Fysikaliska lagar ger:

$$\text{KVL: } v(t) = v_{\text{OC}} + R_i i(t) + v_c(t) \quad (1)$$

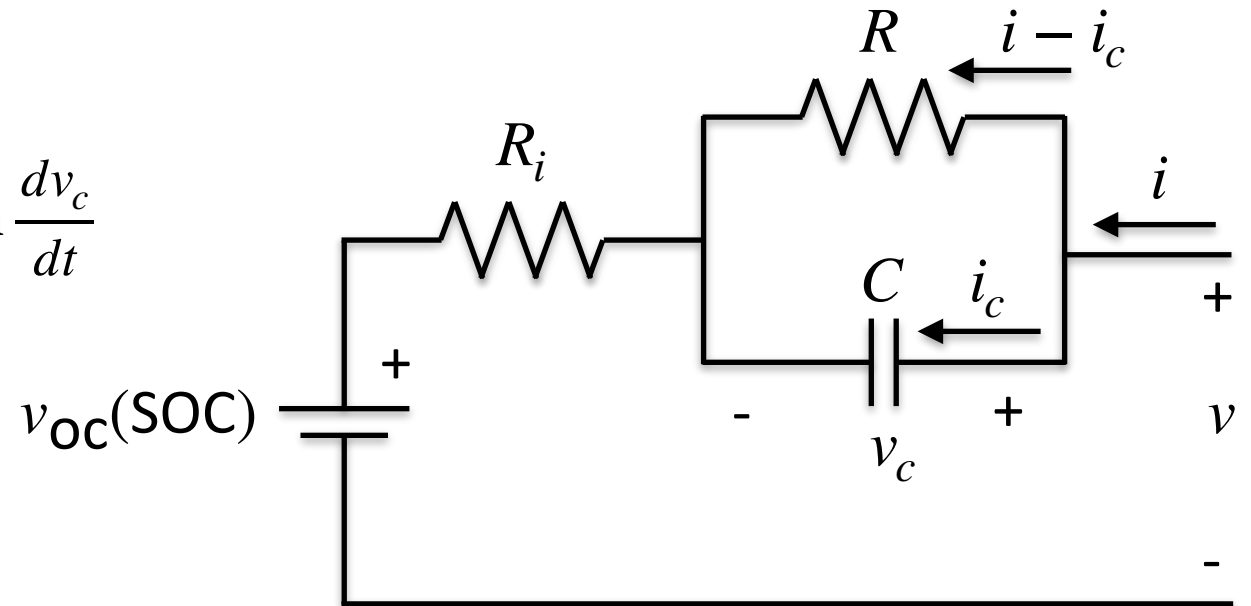
$$\text{Kapacitansen: } i_c(t) = C \frac{dv_c}{dt}(t) \quad (2)$$

$$\text{KVL: } v_c = R(i - i_c) = Ri - Ri_c \quad (3)$$

(1) är mätekvationen, (2) blir tillståndsekvationen om $\frac{dv_c}{dt}$ löses ut och i_c substitueras med uttrycket från (3):

$$\frac{dv_c}{dt} = -\frac{v_c}{RC} + \frac{i}{C}$$

$$v(t) = v_c + v_{\text{OC}} + R_i i$$



Problembeskrivning

Givet tillståndsformen

$$\frac{dv_c}{dt}(t) = -\frac{v_c(t)}{RC} + \frac{i(t)}{C} \quad (4)$$

$$v(t) = v_c(t) + v_{OC}(t) + R_i i(t) \quad (5)$$

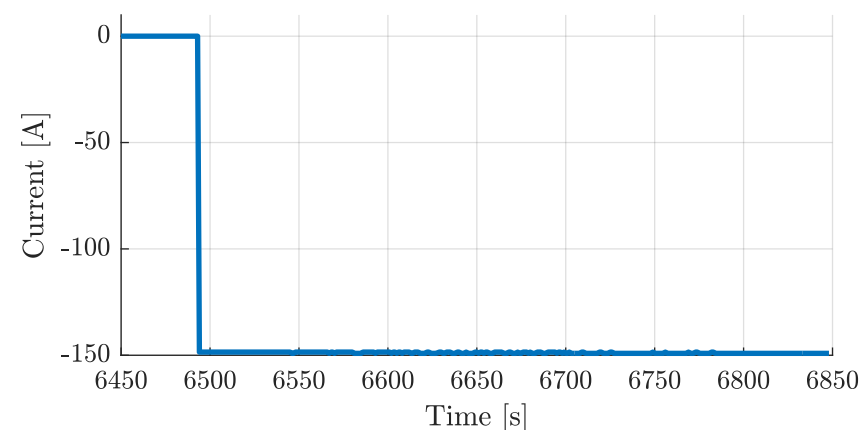
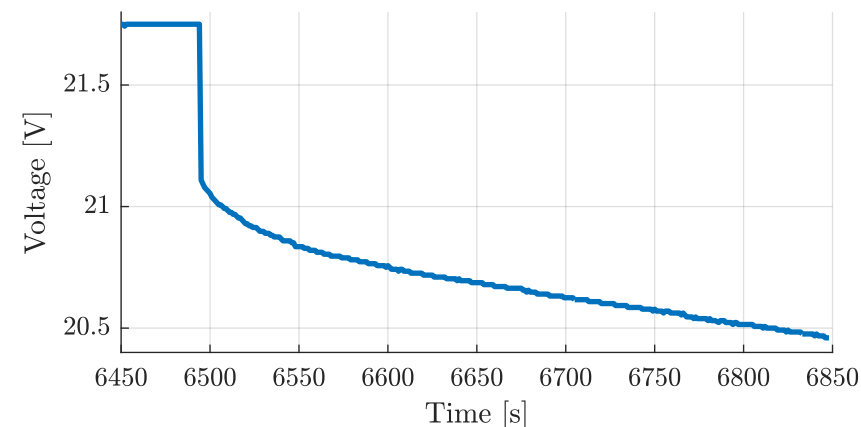
en insignal $i(t)$ och ett initialvärde på tillståndet $v_c(0)$ så kan utsignal $v(t)$ beräknas.

Vi antar ett steg i ström:

$$i(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ I & t \geq 0 \end{cases}$$

och initialvillkoret $v_c(0) = 0$ V, dvs

$$v(t) = v_c(t) + v_{OC} + R_i i(t) = v_{OC} \quad \text{för } t < 0$$



Lösning av differentialekvationen

En inhomogen differentialekvation av första ordningen är $\dot{y} + ay = f(t)$ och lösningen $y = y_h + y_p$ där $y_h = ke^{-ax}$ och y_p bestäms med hjälp av $f(t)$.

$$\frac{dv_c(t)}{dt} + \frac{v_c(t)}{RC} = \frac{I}{C}$$

Den homogena lösningen är $v_{c,h}(t) = ke^{-\frac{t}{RC}}$ och den partikulära $v_{c,p}(t) = IR$.

$$v_c(t) = v_{c,h}(t) + v_{c,p}(t) \Rightarrow v_c(t) = ke^{-\frac{t}{RC}} + IR$$

Konstanten k beräknas från initialvillkoret $v_c(0) = 0$ vilket ger

$$v_c(0) = ke^{-\frac{0}{RC}} + i(0)R \Leftrightarrow 0 = k \cdot 1 + IR \Leftrightarrow k = -IR$$

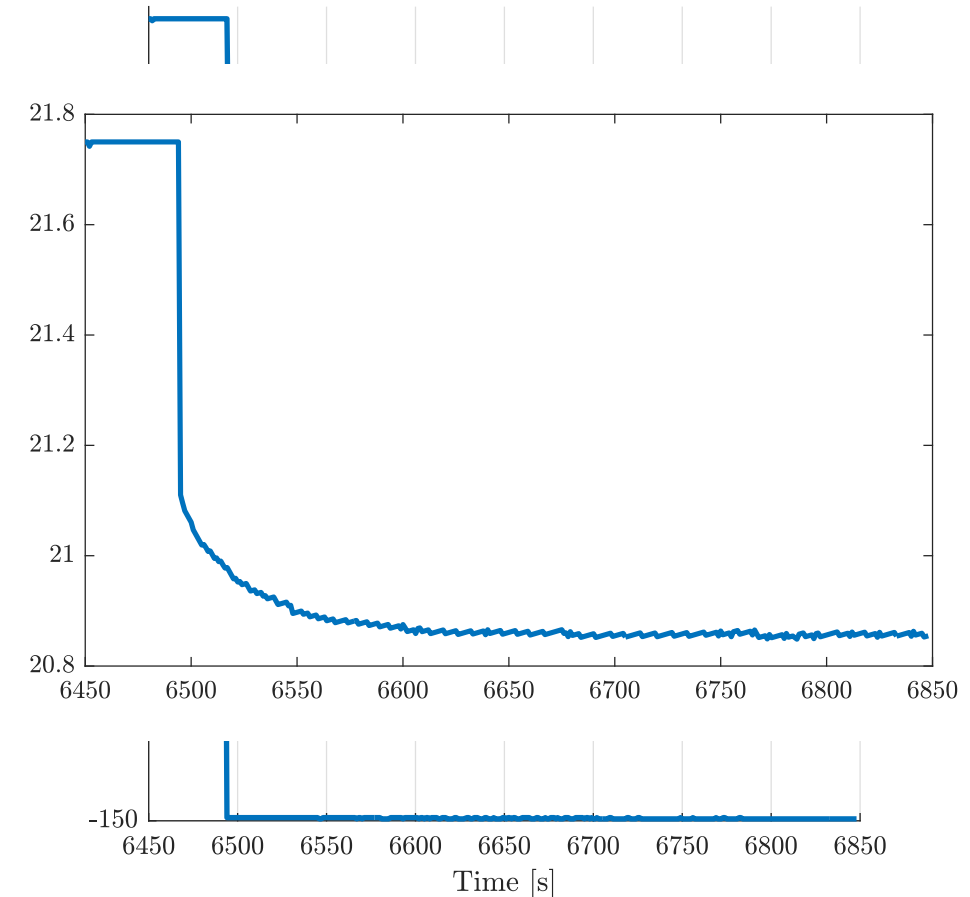
Detta ger lösningen

$$v_c(t) = IR(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \text{ och om det sätt in i (5) erhålls}$$

$$v(t) = \begin{cases} v_{oc} + RI(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) + R_i I & t \geq 0 \\ v_{oc} & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

När $t \rightarrow \infty$ så blir $v(t) = v_{oc} + \underbrace{RI + R_i I}_{\text{konstant}} \Rightarrow v_{oc}$ sjunker pga urladdning. Antag linjärt

avtagande och kompensera för detta.



Beräkning av modellparametrar

v_{oc} : $v(0^-) = v_{oc} = 21.75 \text{ V}$

R_i : $v(0) = v_{oc} + IR_i = 21.11 \text{ V}$

$$R_i = \frac{v(t) - v_{oc}}{I} = \frac{21.11 - 21.75}{-149} = 4.3 \text{ m}\Omega$$

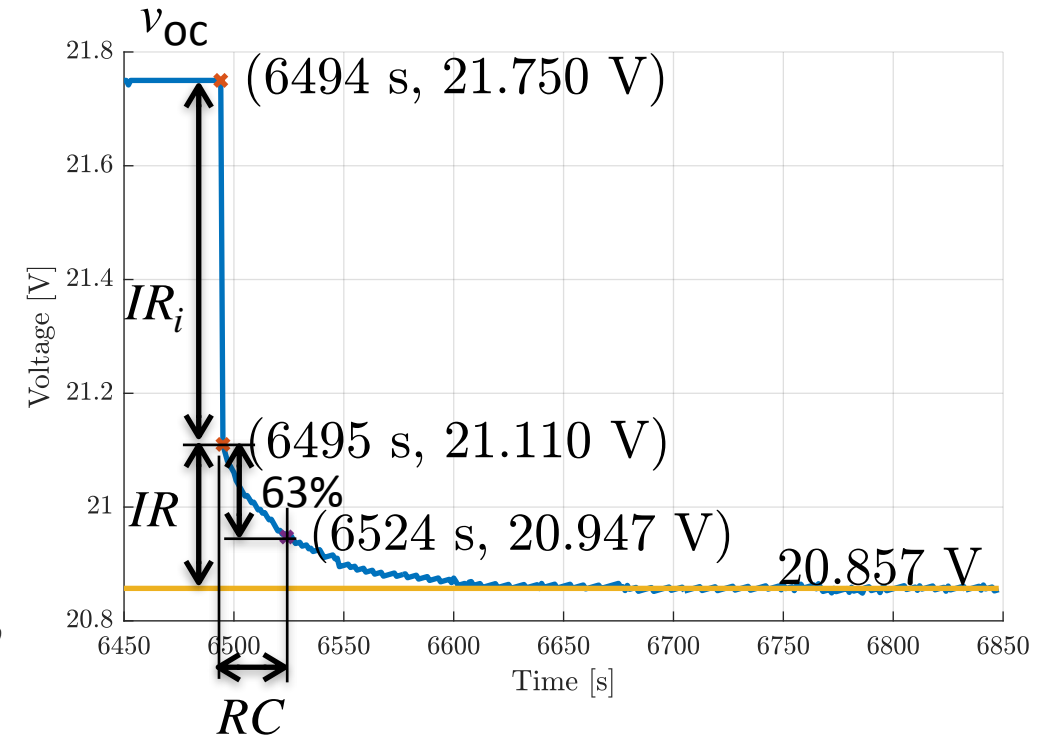
R : $v(t) = v_{oc} + I(R_i + R(1 - e^{-\frac{t}{RC}})) \rightarrow v_{oc} + I(R_i + R)$ då $t \rightarrow \infty$

$$R = \frac{v(t) - v_{oc}}{I} - R_i = \frac{20.857 - 21.75}{-149} - 4.3 \cdot 10^{-3} = 1.7 \text{ m}\Omega$$

C : Tidskonstanten τ för systemet är tidpunkten $t = \tau$ då $1 - e^{-1} = 63 \%$ av den totala förändringen av stegsvaret nåtts. Detta ger:

$$\frac{\tau}{RC} = 1 \Leftrightarrow C = \frac{\tau}{R} = \frac{30}{1.7} \text{ kF} = 17.6 \text{ kF}$$

$$v(t) = v_{oc} + I(R_i + R(1 - e^{-\frac{t}{RC}})) \text{ för } t \geq 0$$



Simulering av tidsdiskretiserad modell

Antag att alla signaler samplas $y(t)$, $y(t + \Delta t)$, $y(t + 2\Delta t)$, ... och kalla dem y_k , y_{k+1} , ...

I exemplet är $\Delta t = 1$ s.

$$\frac{dv_c}{dt}(t) = -\frac{v_c(t)}{RC} + \frac{i(t)}{C},$$

$$\frac{dv_c}{dt}(t) \approx \frac{v_c(t + \Delta t) - v_c(t)}{\Delta t} = \frac{v_{c,k+1} - v_{c,k}}{\Delta t} \quad \text{(Eulerapproximation)}$$

$$v(t) = v_c(t) + v_{OC} + R_i i(t)$$

Tidsdiskret modell

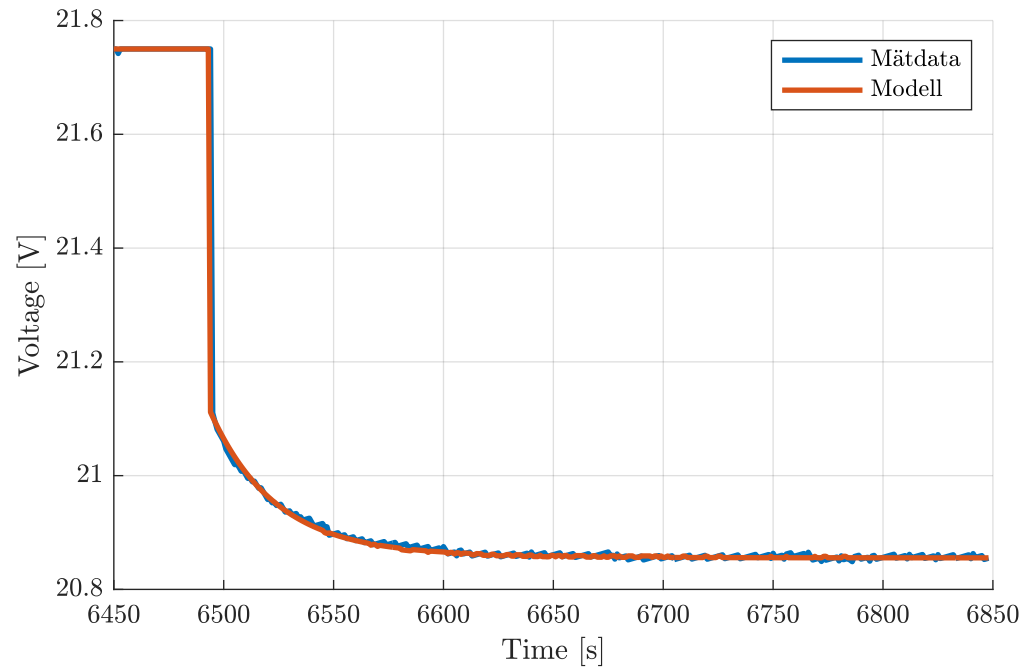
$$v_{c,k+1} = v_{c,k} \left(1 - \frac{1}{RC}\right) + \frac{1}{C} i_k$$

$$v_k = v_{c,k} + v_{OC,k} + R_i i_k$$

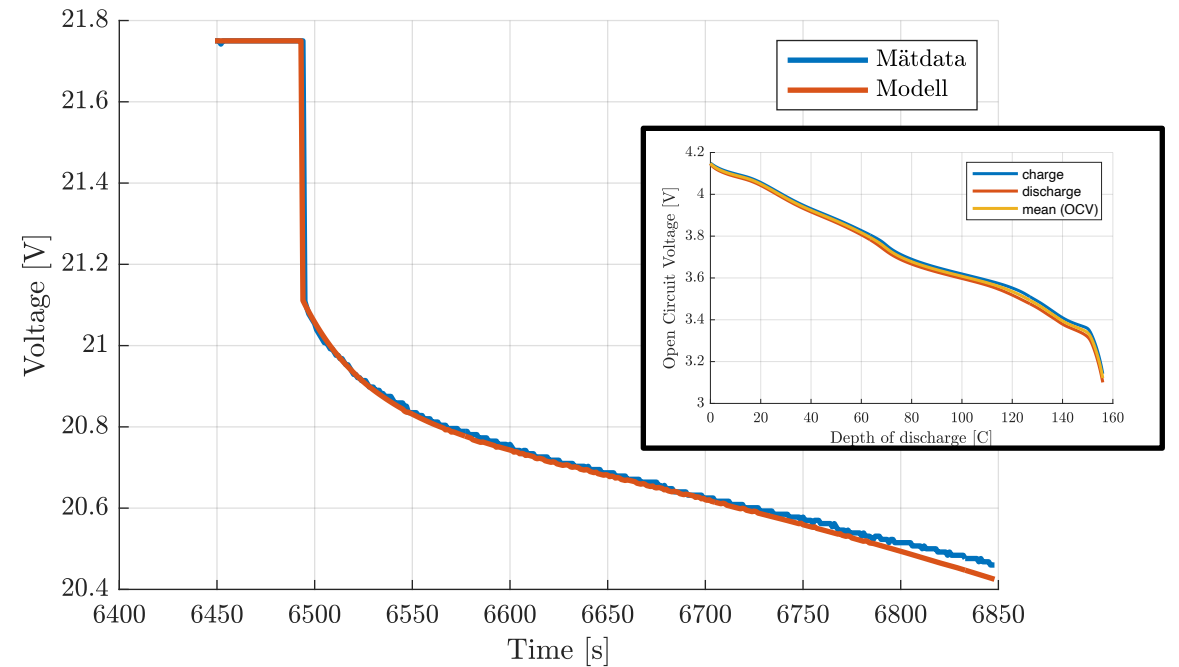
```
n = numel(i);    % Insignal i = [i_1, ..., i_n]'
vc = zeros(n,1); % Initialvillkor vc(1) = 0
v = zeros(n,1);
for k = 1:n-1
    v(k) = vc(k) + voc(k) + Ri*i(k);
    vc(k+1) = vc(k)*(1-1/(R*C)) + 1/C*i(k);
end
v(n) = vc(n) + voc(n) + Ri*I(n);
```

Hur bra blev modellen?

Stegsvaret med kompensering av v_{OC}



Stegsvaret utan kompensering av v_{OC} men där en skattad OCV-kurva används för att beräkna v_{OC} (DOD)



Den stämmer bra, men hur skulle det se ut för en annan situation och hur bra skulle den fungera över längre tid?

Batterier, TSFS17 Elkraftsystem

Mattias Krysanter

www.liu.se