

# Batterier

**TSFS17 Elkraftsystem - Föreläsning 9**

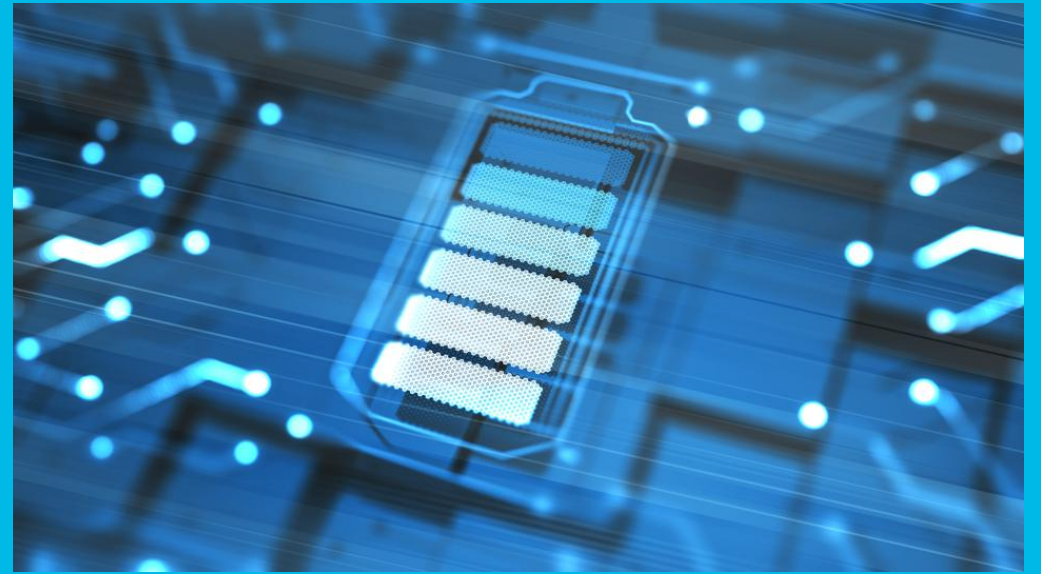
**Mattias Krysanter, 2023-12-05**

# 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)
- Cykling och åldring, CCCV, SOH
- Batteripack
- Estimering av laddningsgrad, state of charge (SOC)
- Balansering
- Batterihanteringssystem

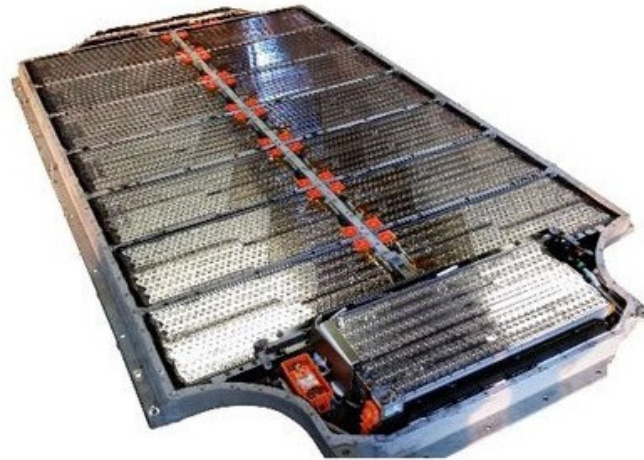


# Batteri - introduktion



# Introduktion

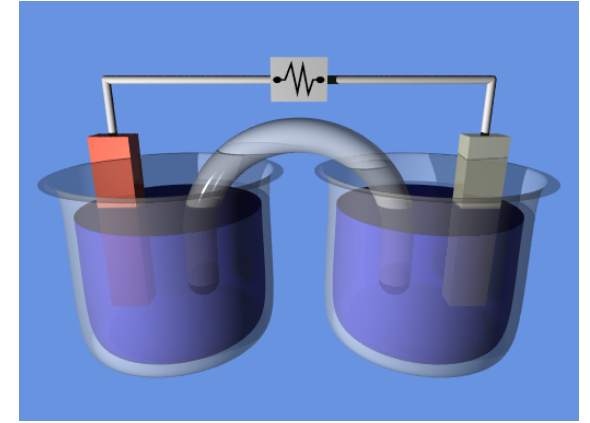
- Batterier är viktiga komponenter i framtida miljövänliga energilösningar inom transport och energilagring.
- Batterier är en viktig del i portabel elektronik.



# Batterier

## Ett batteri

- konverterar kemisk energi till elektrisk energi genom en reduktion-oxidationsreaktion (redox)
- består av en eller flera elektrokemiska celler.



## Celler

- Anod (negativ elektrod). Elektroner avges till den externa kretsen när elektroden oxideras.
- Katod (positiv elektrod). Elektroner absorberas från den externa kretsen när elektroden reduceras.
- Elektrolyt (jon-ledare). Medium för transport av laddade joner mellan anod och katod.

# Batterityper - primärceller

- Ej laddningsbara
- Pastaliknande elektrolyt (torr cell)
- Billiga, lätta
- Används för portabla elektronikprylar, ficklampor etc
- Kan förvaras länge utan att laddas ur
- Hög energidensitet
- Inget eller lite underhåll
- Låga effekter



# Batterityper - sekundärceller

- Laddningsbart
- Energilagring (backup vid solceller, fordon)
- Hög effektdensitet
- Hög urladdningsström
- Låg energidensitet
- Högre läckströmmar



# Grunder i batterikemi

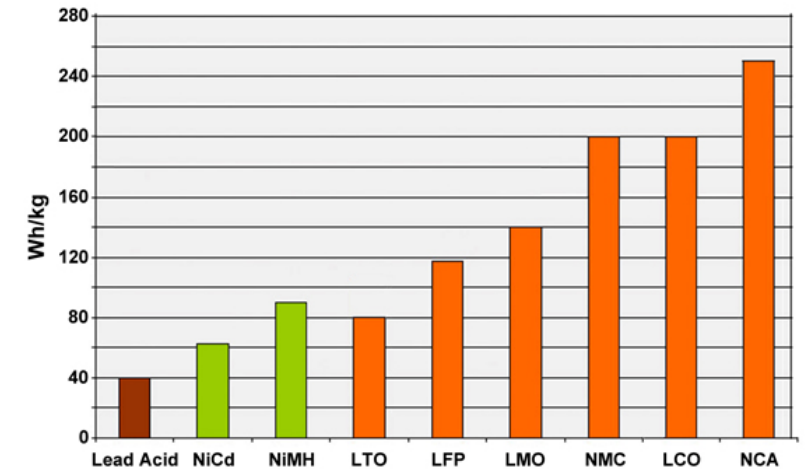




# Batterikemier

| Kemi                       | Anod                           | Katod                                | V   | Wh/kg   |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|-----|---------|
| <b>Primärceller:</b>       |                                |                                      |     |         |
| Alkaliskt MnO <sub>2</sub> | Zn                             | MnO <sub>2</sub>                     | 1.5 | 145     |
| Li/FeS <sub>2</sub>        | Li                             | FeS <sub>2</sub> (järnsulfid)        | 1.5 | 260     |
| <b>Sekundärceller:</b>     |                                |                                      |     |         |
| Blysyra                    | Pb                             | PbO <sub>2</sub>                     | 2   | 35-40   |
| Nickel-cadmium             | Cd                             | NiOOH                                | 1.2 | 40-60   |
| nickelmetallhydrid         | MH                             | NiOOH                                | 1.2 | 60-120  |
| litium-jon (Li-jon)        | Li <sub>x</sub> C <sub>6</sub> | Li <sub>(1-x)</sub> CoO <sub>2</sub> | 3.6 | 100-265 |

MH - väteabsorberande metallblandning

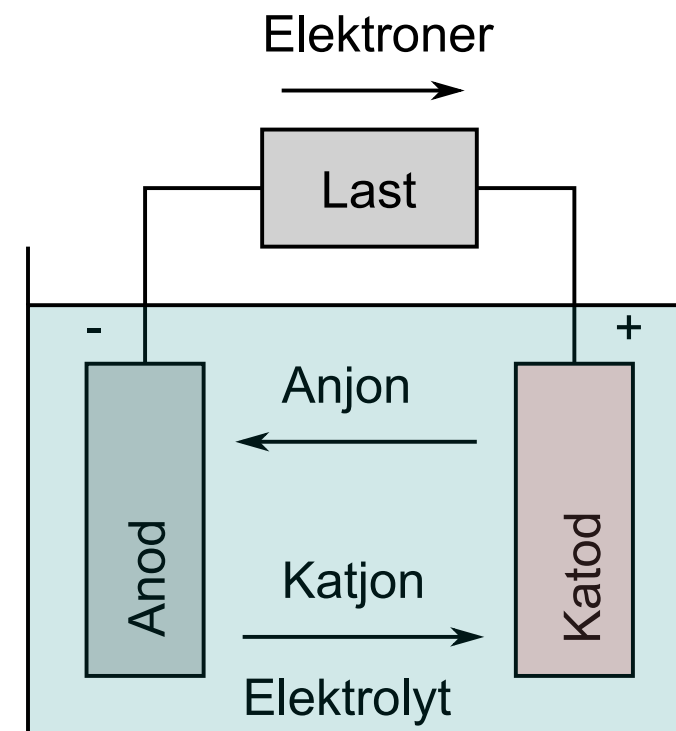


Energitäthet för olika kemier.  
Oranga staplar svarar mot olika litiumbaserade kemier.

# Redoxreaktion i en cell

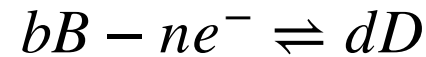
Elektroder namngivna efter laddningstecken vid urladdning.

- Anod
  - negativt laddad elektrod vid urladdning
  - anodmaterialet (bränslet) oxideras = avger elektroner
- Katod
  - positivt laddad elektrod vid urladdning
  - katodmaterialet tar upp elektroner = reduceras
- Anjon - negativt laddad jon
- Katjon - positivt laddad jon



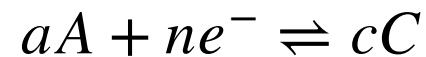
# Redoxreaktion i en cell

- Anodreaktion (negativ elektrod)



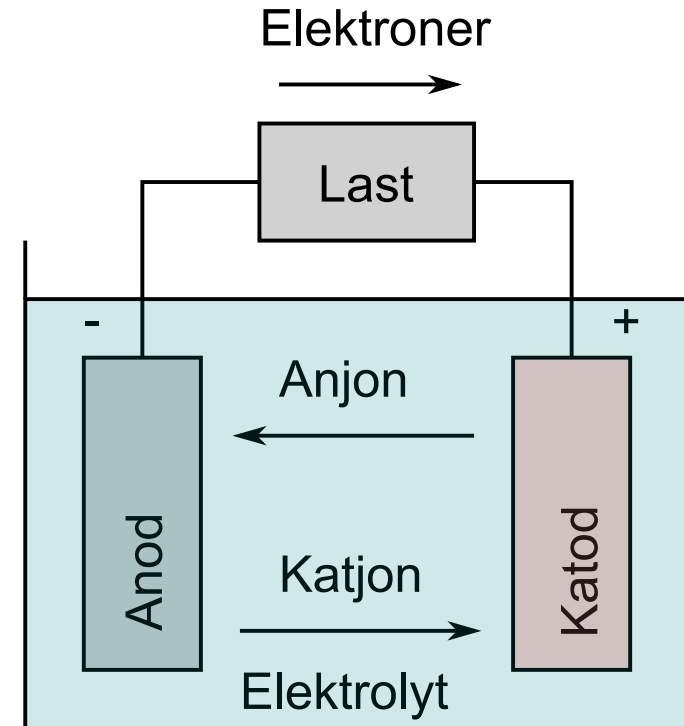
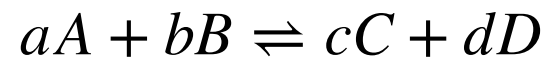
$b$  molekyler av  $B$  avger  $n$  elektroner för att bilda  $d$  molekyler av  $D$

- Katodreaktion (positiv elektrod)



$a$  molekyler av  $A$  upptar  $n$  elektroner för att bilda  $c$  molekyler av  $C$

- Cellreaktionen



Reduktion av den fria energin är reaktionens drivkraft.

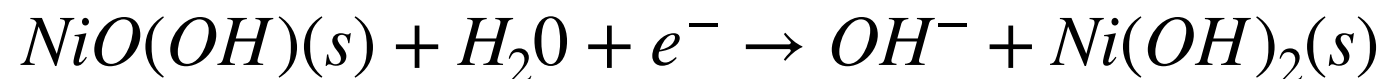
- funktion av koncentration av reaktanter, produkter, och temperatur
- ger cellens elektromotoriska kraft (emk) = spänning

# NiCd-cell - Urladdning

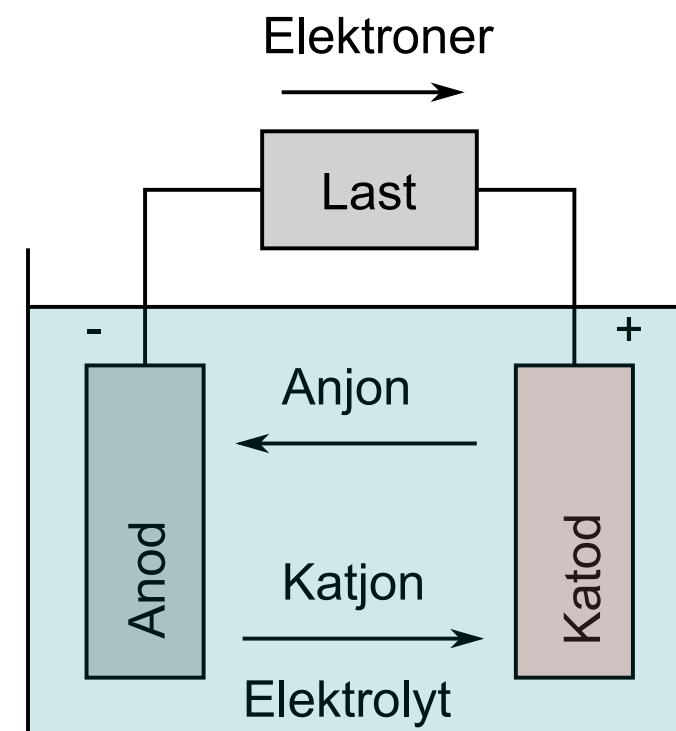
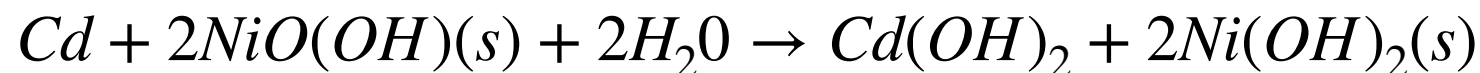
- Effekt avges i lasten
- Anodreaktion: Cadmium(metall) oxideras och bildar cadmiumhydroxid



- Katodreaktion: Nickeloxyhydroxid reduceras till nickelhydroxid



- Cellreaktionen

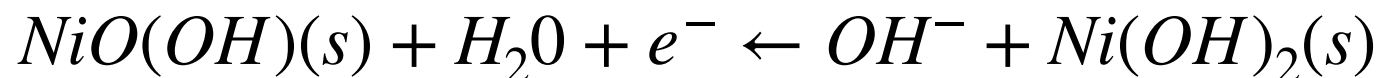


# NiCd-cell - Laddning

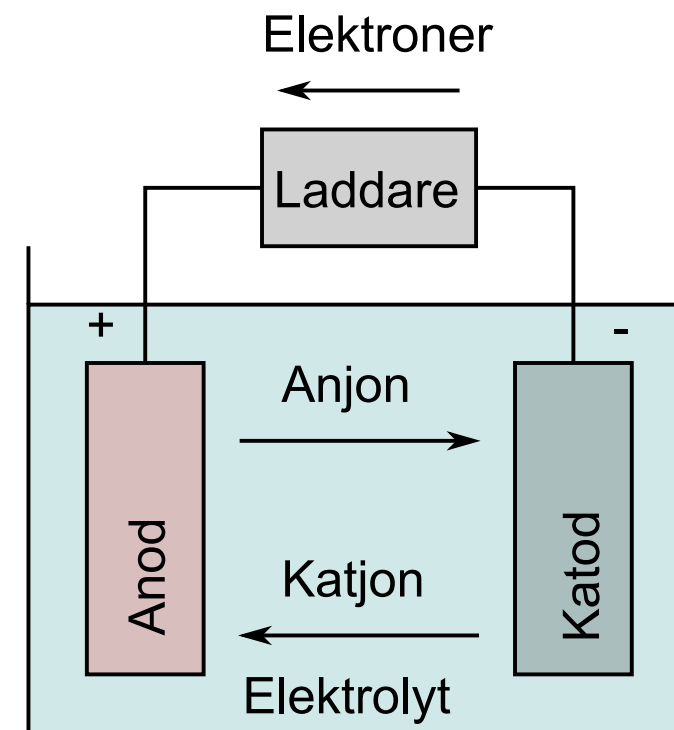
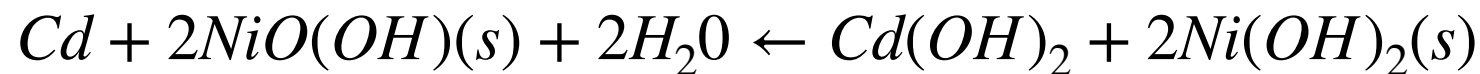
- Likströmskälla driver ström i motsatt riktning
- Anodreaktion: Cadmiumhydroxid reduceras till cadmiummetall



- Katodreaktion: Nickelhydroxid oxideras till nickeloxyhydroxid

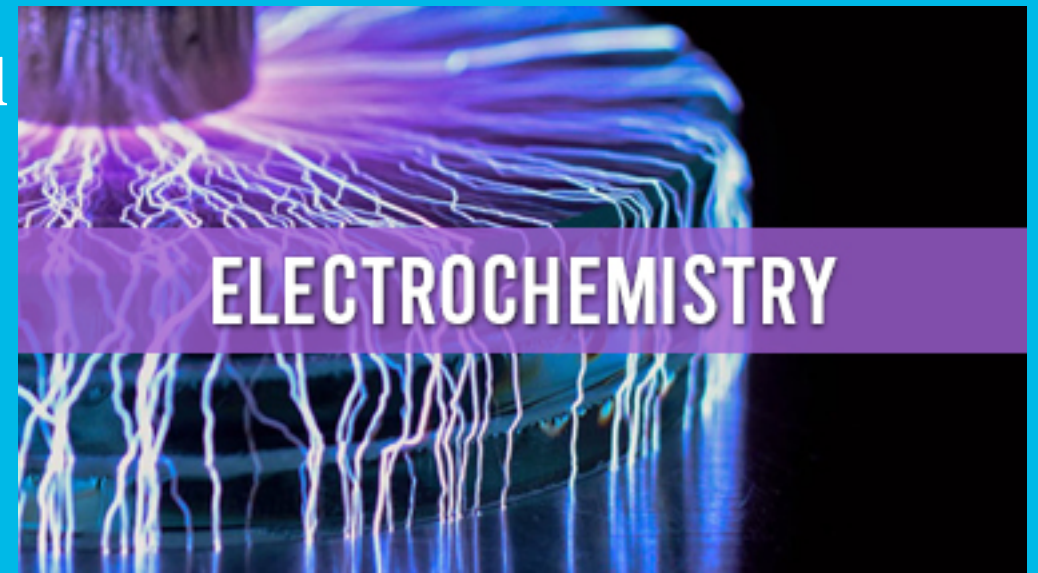


- Cellreaktionen



# Cellens teoretiska egenskaper

Spänning, laddningstäthet och energiinnehåll



# Normalpotential för halvceller

- Potential i förhållande till vätgas = normalpotential
- Pluspol: halvcell med högst normalpotential

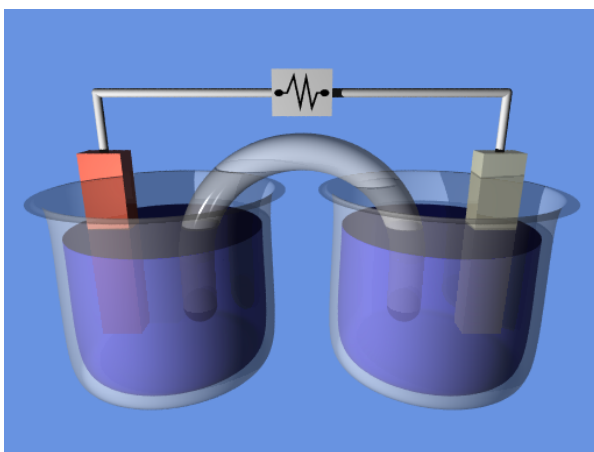


TABLE 17.1 Standard Reduction Potentials at 25 °C



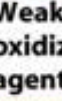
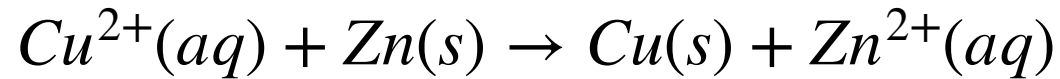
|   | Reduction Half-Reaction  | $E^\circ$ (V)  |  |          |
|---|--|--|--|----------|
| <b>Stronger oxidizing agent</b><br> | $F_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 F^-(aq)$   | 2.87   | <b>Weaker reducing agent</b><br> |          |
|   | $H_2O_2(aq) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$   | 1.78   |  |          |
|   | $MnO_4^-(aq) + 8 H^+(aq) + 5 e^- \longrightarrow Mn^{2+}(aq) + 4 H_2O(l)$  | 1.51   |  |          |
|   | $Cl_2(g) + 2 e^- \longrightarrow 2 Cl^-(aq)$   | 1.36   |  |          |
|   | $Cr_2O_7^{2-}(aq) + 14 H^+(aq) + 6 e^- \longrightarrow 2 Cr^{3+}(aq) + 7 H_2O(l)$                                      | 1.33   |  |          |
|   | $O_2(g) + 4 H^+(aq) + 4 e^- \longrightarrow 2 H_2O(l)$   | 1.23   |  |          |
|   | $Br_2(aq) + 2 e^- \longrightarrow 2 Br^-(aq)$  | 1.09   |  |          |
|   | $Ag^+(aq) + e^- \longrightarrow Ag(s)$   | 0.80   |  |          |
|   | $Fe^{3+}(aq) + e^- \longrightarrow Fe^{2+}(aq)$  | 0.77   |  |          |
|   | $O_2(g) + 2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2O_2(aq)$  | 0.70   |  |          |
|   | $I_2(s) + 2 e^- \longrightarrow 2 I^-(aq)$   | 0.54   |  |          |
|   | $O_2(g) + 2 H_2O(l) + 4 e^- \longrightarrow 4 OH^-(aq)$  | 0.40   |  |          |
|   | $Cu^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cu(s)$  | 0.34   |  |          |
|   | $Sn^{4+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Sn^{2+}(aq)$  | 0.15   |  |          |
|   |  | <b><math>2 H^+(aq) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g)</math></b> |  | <b>0</b> |
|   | <b>Weaker oxidizing agent</b><br> | $Pb^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Pb(s)$                  |  | - 0.13   |
| $Ni^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Ni(s)$   |  | - 0.26   |  |          |
| $Cd^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Cd(s)$   |  | - 0.40   |  |          |
| $Fe^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Fe(s)$   |  | - 0.45   |  |          |
| $Zn^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Zn(s)$   |  | - 0.76   |  |          |
| $2 H_2O(l) + 2 e^- \longrightarrow H_2(g) + 2 OH^-(aq)$   |  | - 0.83   |  |          |
| $Al^{3+}(aq) + 3 e^- \longrightarrow Al(s)$   |  | - 1.66   |  |          |
|   | $Mg^{2+}(aq) + 2 e^- \longrightarrow Mg(s)$  | - 2.37   |  |          |
|   | $Na^+(aq) + e^- \longrightarrow Na(s)$   | - 2.71   |  |          |
|   | $Li^+(aq) + e^- \longrightarrow Li(s)$   | - 3.04   | <b>Stronger reducing agent</b>   |          |

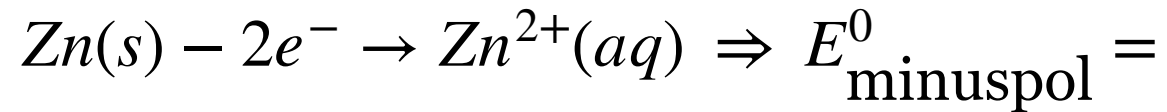
Table 17-1 Chemistry, 5/e  
© 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

# Beräkna emk för en ZnCu-cell

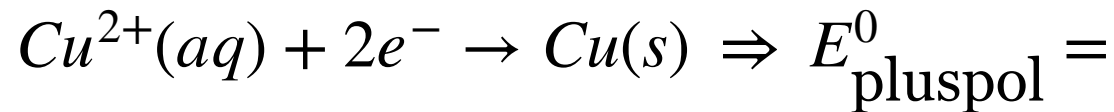
- Cellreaktion



- Anodreaktion/minuspolen



- Katodreaktion/pluspolen



Störst normalpotential blir pluspol

- Emk för ZuCu-cellen

$$E_{\text{cell}}^0 = E_{\text{pluspol}}^0 - E_{\text{minuspol}}^0 =$$



# Teoretisk laddningstäthet

- Ett mått på den elektrokemiska kapaciteten på ett material är att ange laddning/massa [Ah/g], dvs **laddningstätheten**.
- Faradays konstant anger laddningen på 1 mol elektroner:

$$F = N_A e = 96485 \text{ C/mol} = 96485 \text{ As/mol} = 26.8 \text{ Ah/mol}$$

- Beräkning av laddningstätheten för substans A:

$$\frac{F \cdot n}{M_A} = \frac{\text{Ah}/(\text{mol e}) \cdot (\text{mol e})/(\text{mol A})}{\text{g}/(\text{mol A})} = \text{Ah/g}$$

- Exempel: Vad är laddningstätheten för Zn?

$$\frac{26.8 \cdot 2 \text{ Ah/mol}}{65.4 \text{ g/mol}} = 0.82 \text{ Ah/g}$$

- Hur inkluderar vi båda elektroderna?

| 1A                             | 2                               | 3B                             | 4B                              | 5B                            | 6B                              | 7B                                | 8B                              | 1B                            | 2B                              |                              |                               |
|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 1<br>H<br>Hydrogen<br>1.0078   | 2<br>He                         |                                |                                 |                               |                                 |                                   |                                 |                               |                                 |                              |                               |
| 3<br>Li<br>Lithium<br>6.938    | 4<br>Be<br>Beryllium<br>9.0122  |                                |                                 |                               |                                 |                                   |                                 |                               |                                 |                              |                               |
| 11<br>Na<br>Sodium<br>22.990   | 12<br>Mg<br>Magnesium<br>24.305 |                                |                                 |                               |                                 |                                   |                                 |                               |                                 |                              |                               |
| 19<br>K<br>Potassium<br>39.098 | 20<br>Ca<br>Calcium<br>40.078   | 21<br>Sc<br>Scandium<br>44.956 | 22<br>Ti<br>Titanium<br>47.867  | 23<br>V<br>Vanadium<br>50.942 | 24<br>Cr<br>Chromium<br>51.996  | 25<br>Mn<br>Manganese<br>54.938   | 26<br>Fe<br>Iron<br>55.845      | 27<br>Co<br>Cobalt<br>58.933  | 28<br>Ni<br>Nickel<br>58.693    | 29<br>Cu<br>Copper<br>63.546 | 30<br>Zn<br>Zinc<br>65.38     |
| 37<br>Rb<br>Rubidium<br>85.468 | 38<br>Sr<br>Strontium<br>87.62  | 39<br>Y<br>Yttrium<br>88.906   | 40<br>Zr<br>Zirconium<br>91.224 | 41<br>Nb<br>Niobium<br>92.906 | 42<br>Mo<br>Molybdenum<br>95.96 | 43<br>Tc<br>Technetium<br>98.9062 | 44<br>Ru<br>Ruthenium<br>101.07 | 45<br>Rh<br>Rhodium<br>102.91 | 46<br>Pd<br>Palladium<br>106.42 | 47<br>Ag<br>Silver<br>107.87 | 48<br>Cd<br>Cadmium<br>112.41 |

11 — Atomic number

Na — Element symbol

Sodium — Element name

22.990 — Atomic weight

Alkali metals

Alkaline earth metals

Lanthanides

Actinides

Transition metals

Unknown properties

Post-transition metals

Metalloids

Other nonmetals

Halogens

Noble gases

# Teoretisk laddningstäthet och energitäthet

- Addera massan för båda elektroderna.
- Använd lagom mängd material för både anod och katod.

$$\frac{g}{Ah} \Big|_{cell} = \frac{g}{Ah} \Big|_{katod} + \frac{g}{Ah} \Big|_{anod}$$

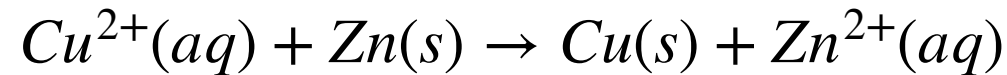
- Teoretisk laddningstäthet (specifik laddning) för en cell

$$\frac{Ah}{g} \Big|_{cell} = \left( \frac{g}{Ah} \Big|_{katod} + \frac{g}{Ah} \Big|_{anod} \right)^{-1}$$

- Massan av elektrolyt, behållare, kontakter är ej medräknat.
- Teoretisk energitäthet [Wh/g] erhålls genom att multiplicera den laddningstätheten med emk:n ([Ah/g · V = Wh/g])

# Teoretisk energitäthet - exempel ZnCu-cellen

- Cellreaktion:



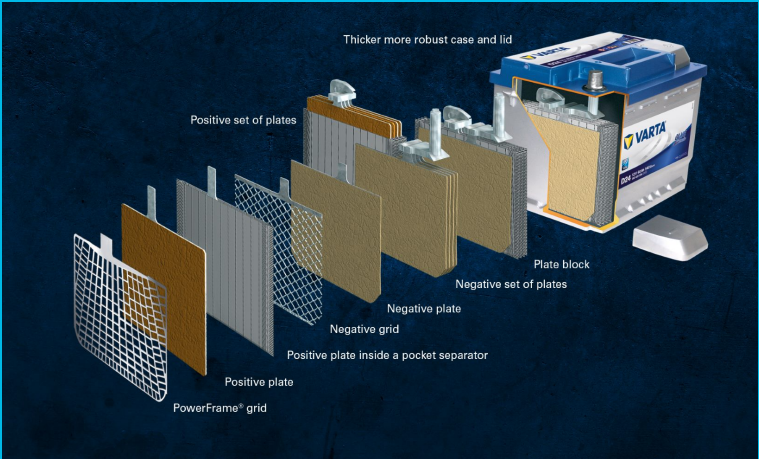
- Specifik laddning:

$$\frac{\text{Ah}}{\text{g}} = \left( \frac{\overbrace{\text{Cu}}}{63.5\text{g}} + \frac{\overbrace{\text{Zn}}}{65.4\text{g}} \right)^{-1} \frac{2 \cdot 26.8\text{Ah}}{2 \cdot 26.8\text{Ah}} = 0.42 \text{ Ah/g}$$

- Teoretisk specifik energi:

$$\frac{\text{Wh}}{\text{g}} = E^0 \frac{\text{Ah}}{\text{g}} = 1.1 \text{ V} \cdot 0.42 \text{ Ah/g} = 0.46 \text{ Wh/g} = 460 \text{ Wh/kg}$$

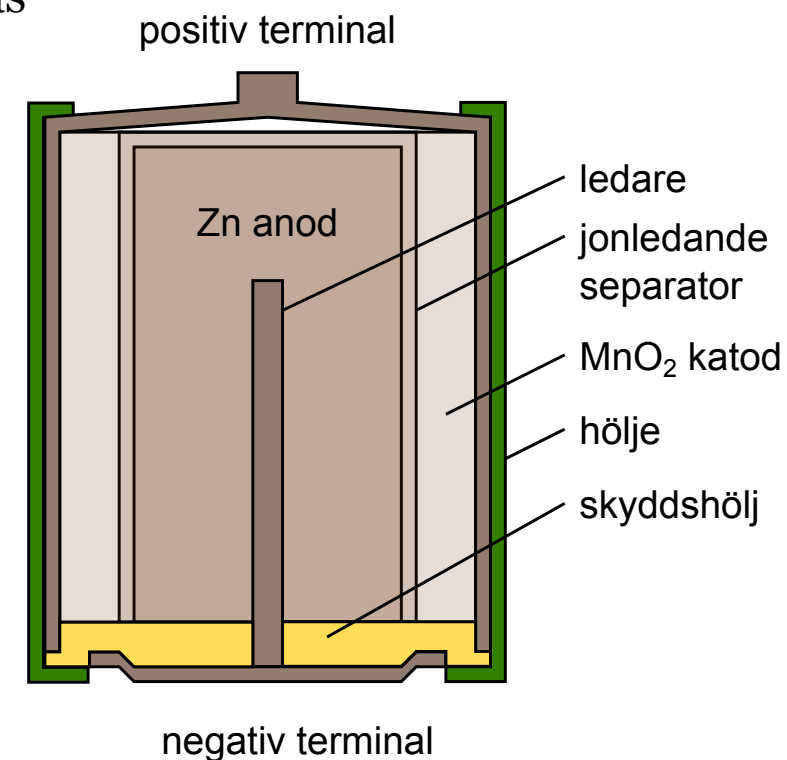
# Batterikonstruktion och faktisk prestanda



# Alkaliska batterier - konstruktion

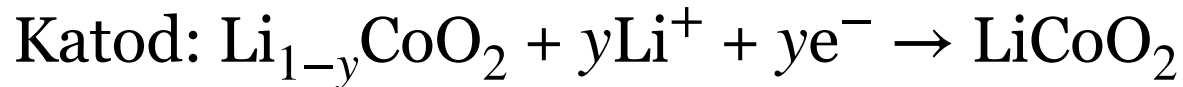
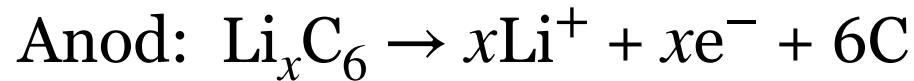
- Anod:  $Zn(s) + 2OH^- \rightarrow ZnO(s) + H_2O + 2e^-$       Zn oxideras
- Katod:  $2MnO_2(s) + H_2O + 2e^- \rightarrow Mn_2O_3(s) + 2OH^-$        $MnO_2$  reduceras
- Cell:  $Zn(s) + 2MnO_2 \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$
- Teoretisk laddningstäthet = 0.22 Ah/g
- Faktisk laddningstäthet = 2.8 Ah/25 g = 0.11 Ah/g
- Varför halveras kapaciteten?
- Jo, för batteriet innehåller mer:

- Anod (Zn) pulver
- Katod ( $MnO_2$ ) tabletter
- Strömledare mässing
- Separator indränkt i flytande KOH-elektrolyt



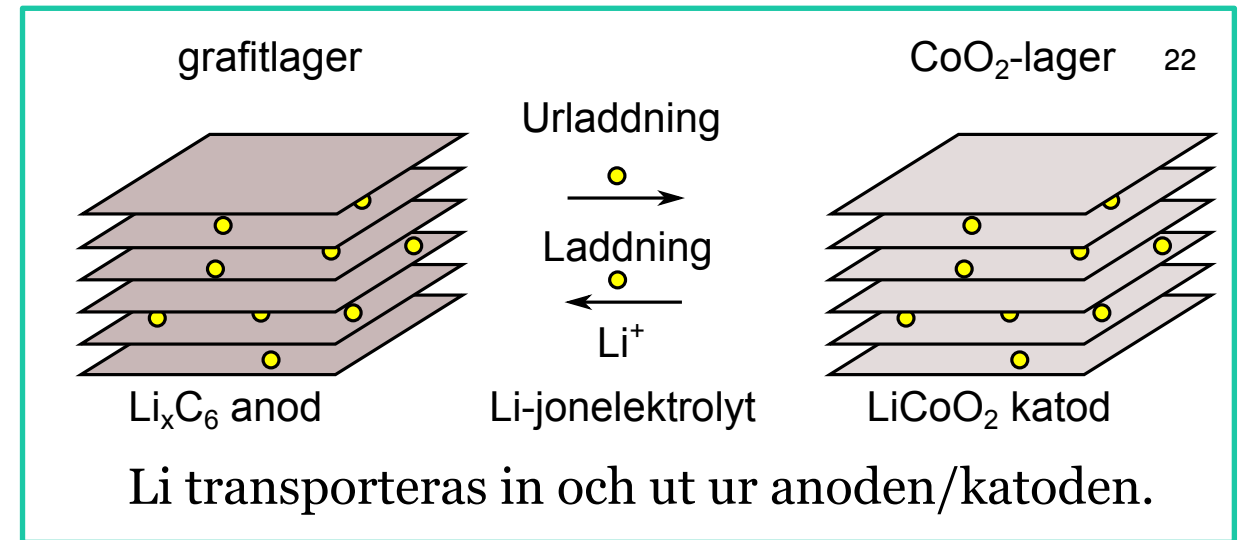
# Li-jonbatterier

Urladdningsreaktion:



$x, y$  beror på laddning  
och arbetspunkt

- Teoretisk laddningstäthet: 0.10 Ah/g
- Faktisk laddningstäthet = 0.94 Ah/19 g = 0.05 Ah/g
- Ungefär hälften av ett alkaliskt batteri, men spänningen är dubbelt så stor (4.1 V jmf 1.5 V) så energitätheten är större.



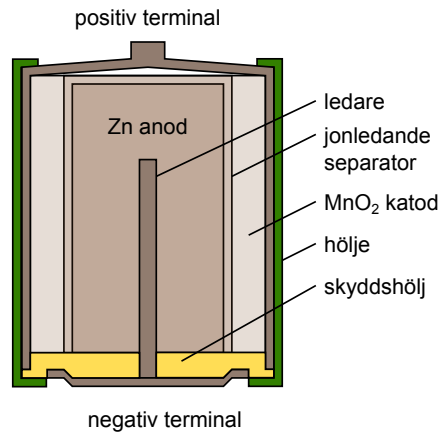
# Batterikonstruktion

Under batteridesign sker en avvägning mellan hög effekttäthet och hög energitäthet.

- Hög effekttäthet kräver stor kontaktyta mellan elektroderna.
- Hög energitäthet kräver maximalt med aktivt material

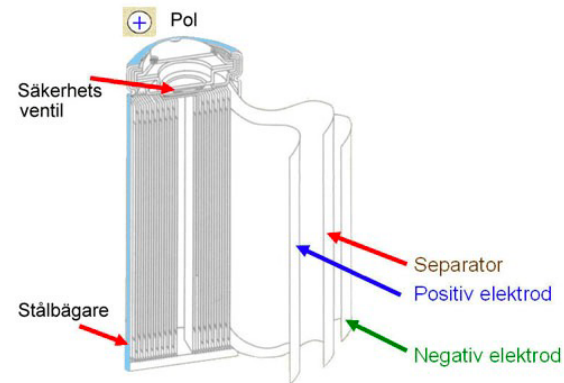
## Behållare

- Hög energitäthet
- Alkaliska batterier



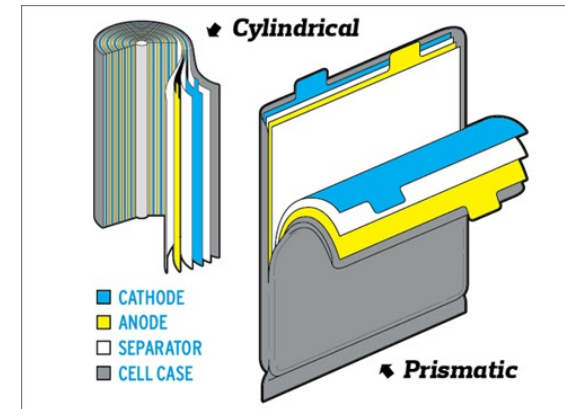
## Cylindriskt lindad cell

- Hög effekt, enkla att konstruera
- Li-jon, NiMH, NiCd



## Prismatisk cell

- Hög packningstäthet
- Lättare att kortsluta



# Ström-spänningskaraktäristik

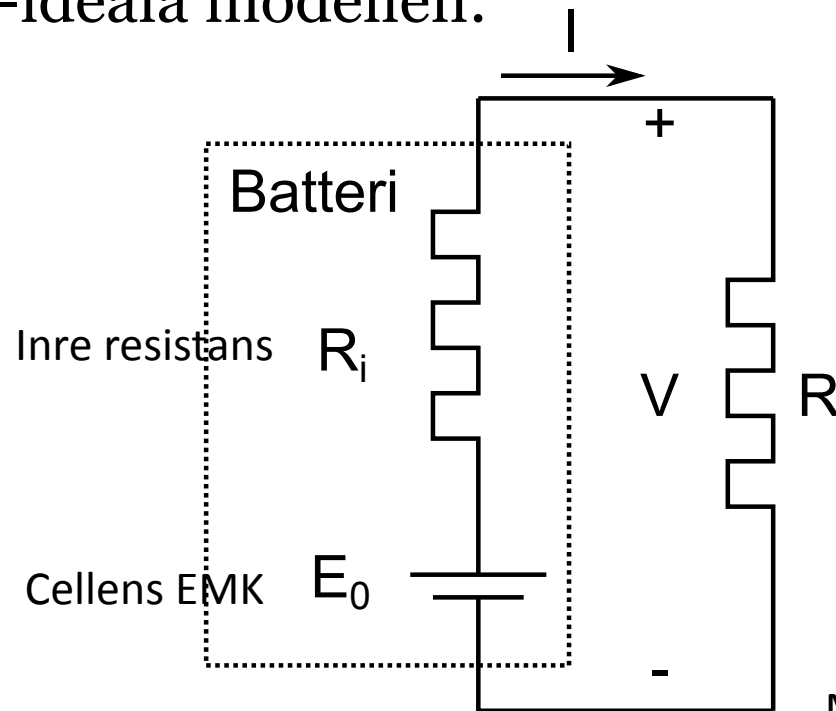
En ny fulladdad cell





# Batterispänning vid last

- Hur ser sambandet mellan spänningen och strömmen ut ur batteriet?
- Enklaste icke-ideala modellen:

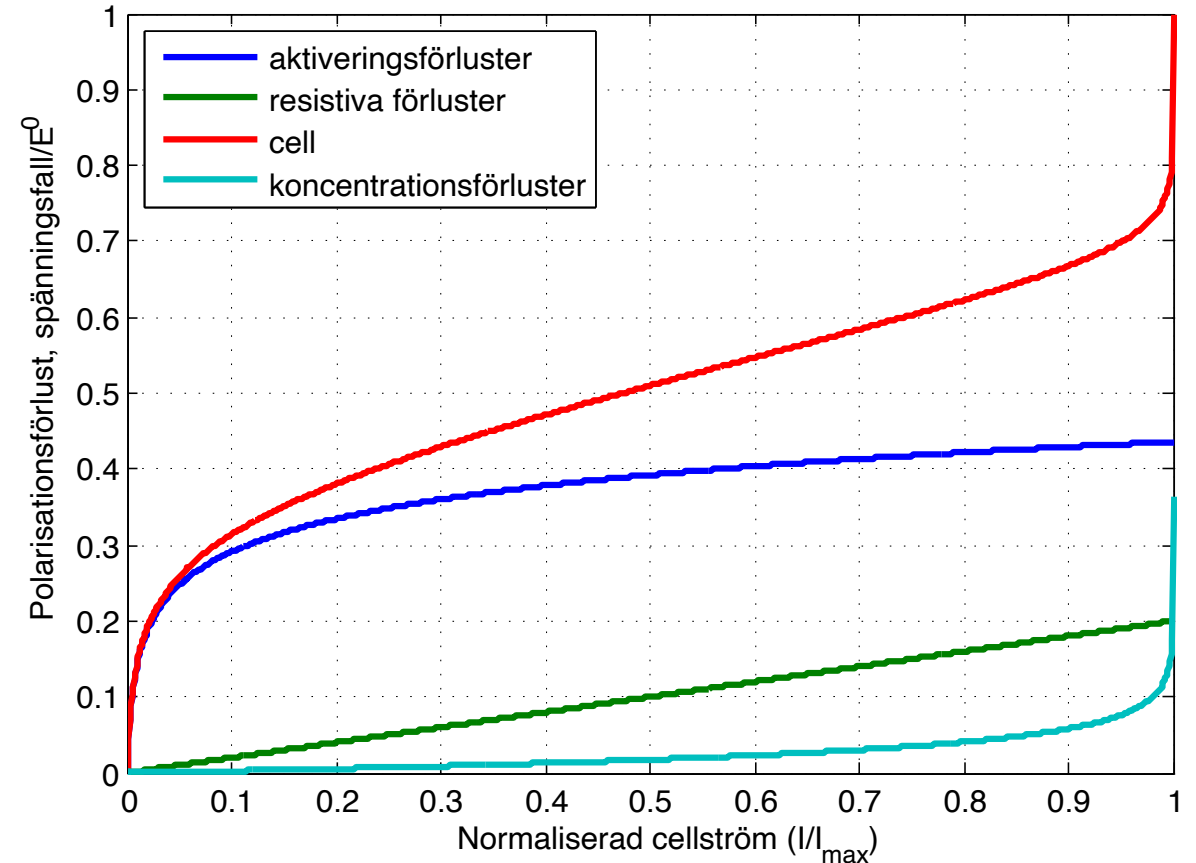


$$V = E_0 - IR_i$$

Men detta är en klart förenklad bild av batteriets förluster.

# Polarisationsförluster i batterier

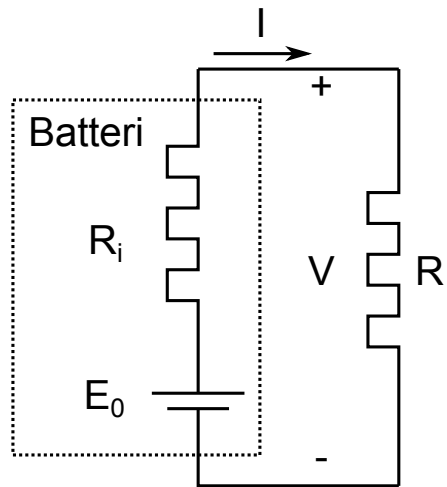
- Låga strömmar 0-0.2: Energiförluster kopplade till aktivering av reaktionerna vid elektroderna.
- 0.2-0.9: Energiförluster kopplade till resistiva förluster i elektrodkontakter, jontransporten i elektrolyten
- Höga strömmar 0.9-1: Förluster kopplade till att koncentrationen av reaktanter, produkter är begränsande



# Ström-spännings-karaktäristik

## Cellspänning

$$V = E_0 - \text{polarisationsförluster}(I)$$

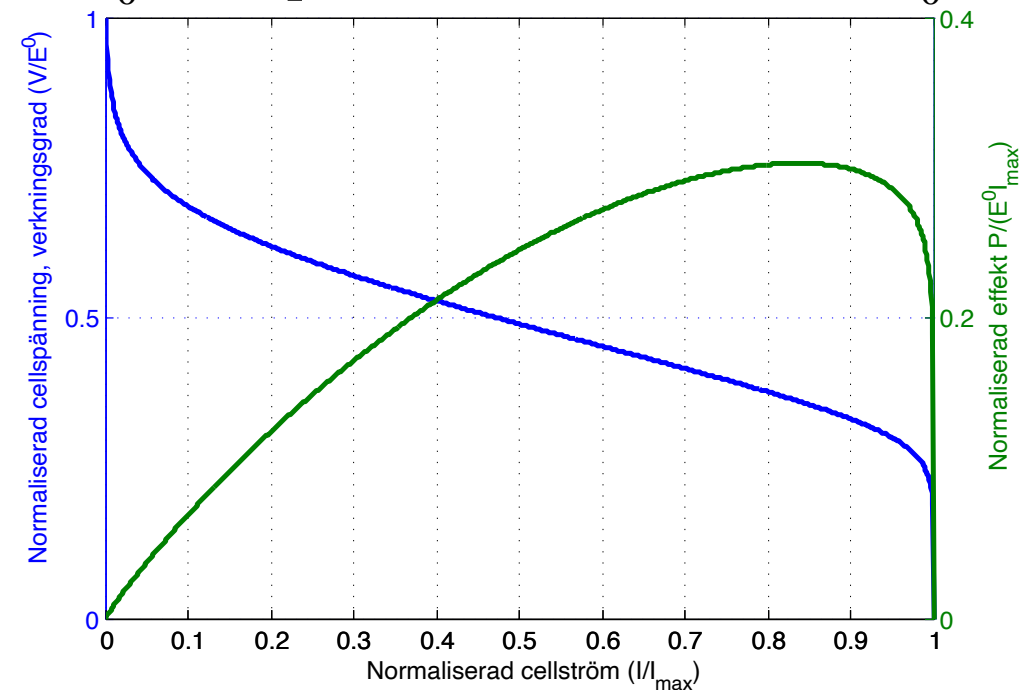


$$\text{Cellens verkningsgrad} = \frac{P_{\text{last}}}{P_{\text{cell}}} = \frac{VI}{E_0 I} = \frac{V}{E_0}$$

$$\text{Normaliserad effekt} = \frac{P_{\text{last}}}{E_0 I_{\text{max}}} = \frac{VI}{E_0 I_{\text{max}}} = \frac{V}{E_0} \frac{I}{I_{\text{max}}} = \text{normaliserad spänning} \cdot \text{ström}$$

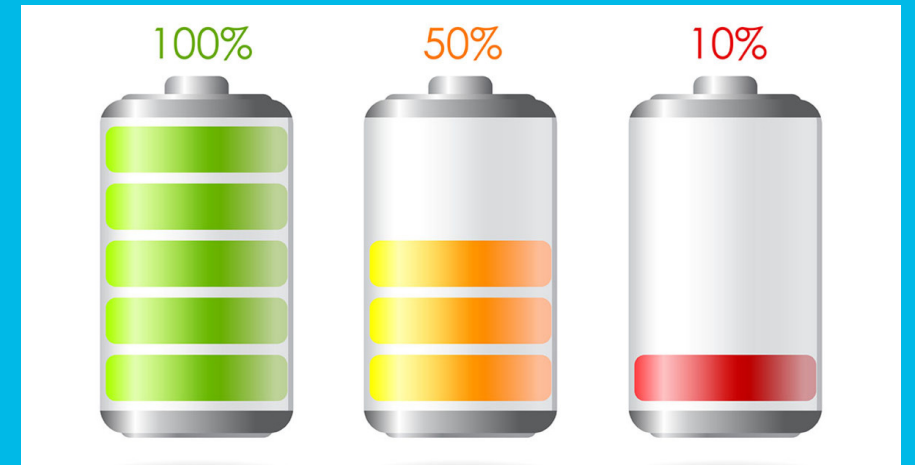
## Normaliserad cellspänning

$$V/E_0 = 1 - \text{polarisationsförluster}(I)/E_0$$



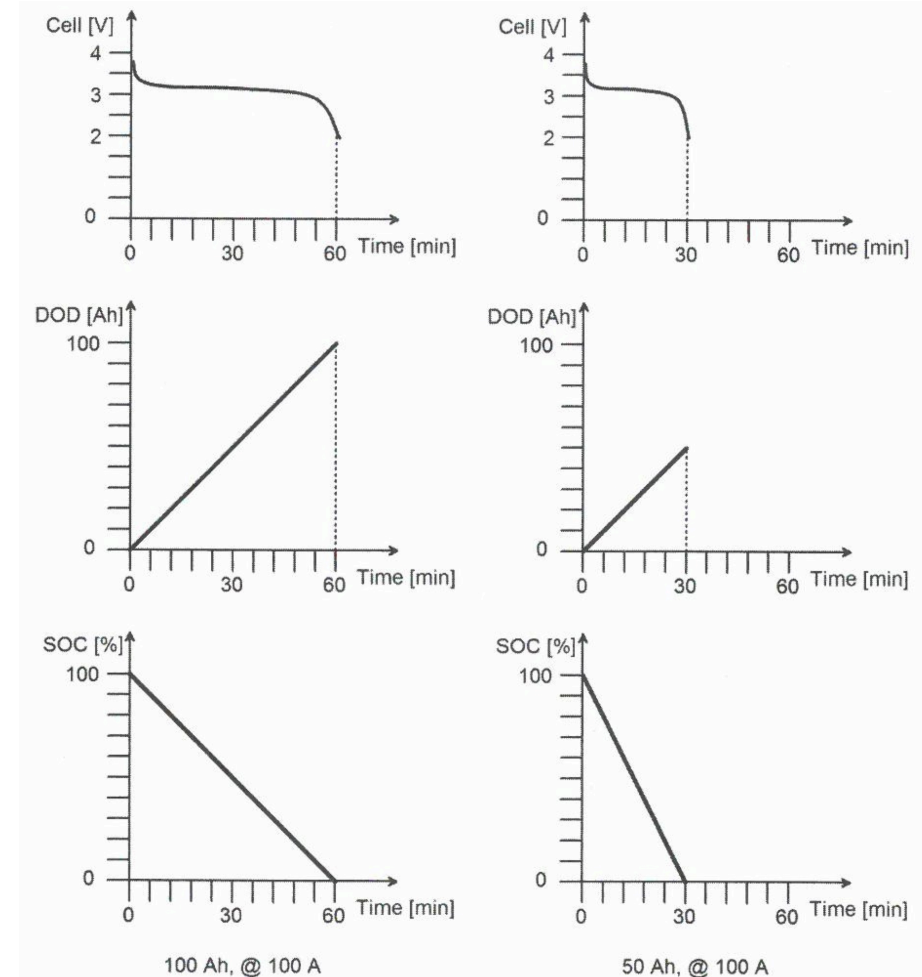
# Batteriegenskaper

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



# Batteri och cellegenskaper

- 1C ström = strömstyrka för att ladda ur det nominella batteriet på 1 h
- Depth of discharge (DOD)
  - Urladdning i Ah från fulladdat batteri
- State of charge (SOC)
  - $\frac{\text{nuvarande laddning}}{\text{total laddning}}$  i procent
  - 100% full
  - 0% tom



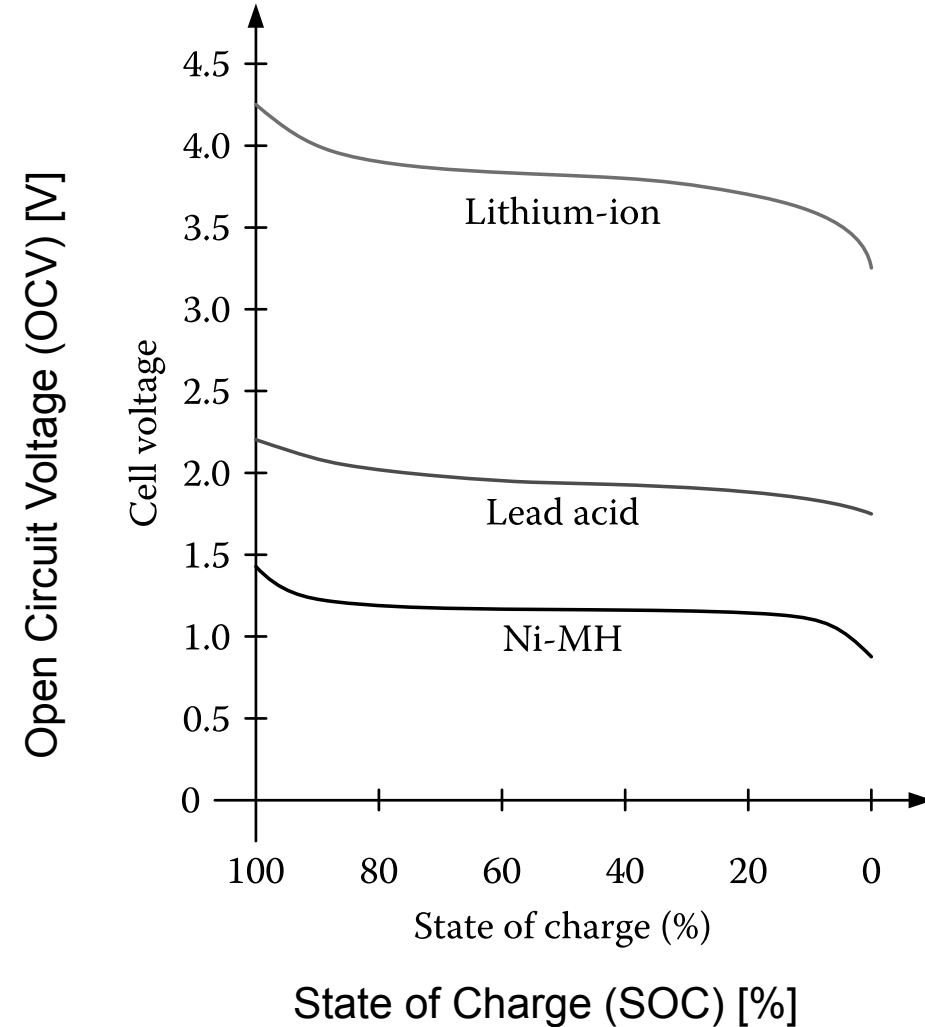
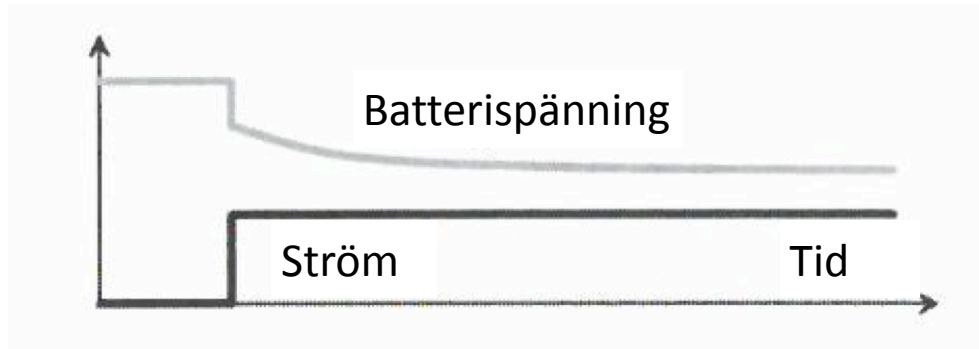
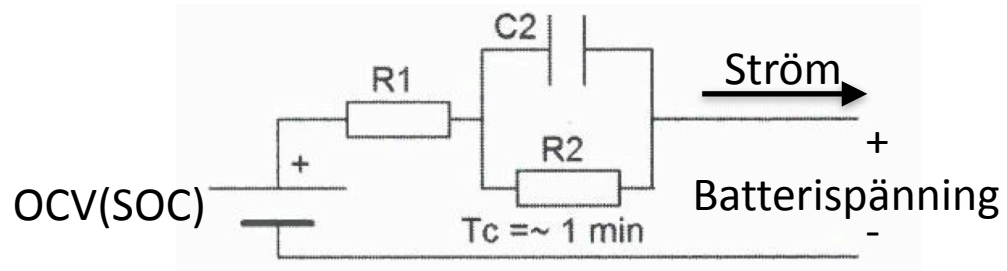
Nominell batterikapacitet = 100 Ah  
Urladdningsström = 1C

Batterikapacitet = 50 Ah  
Urladdningsström = 1C

Hur mycket är 1C här?

Svar: 100 A

# Batteriets OCV och dynamiska egenskaper



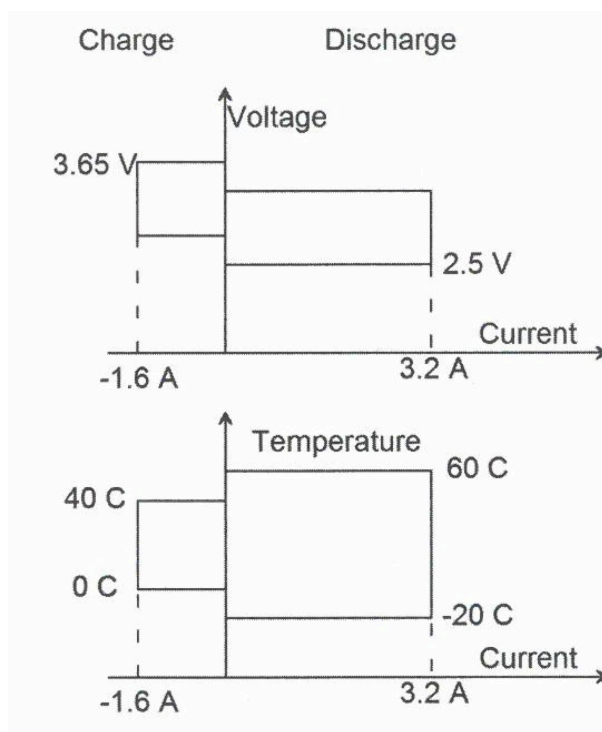
# Cellens arbetsområde

## 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:

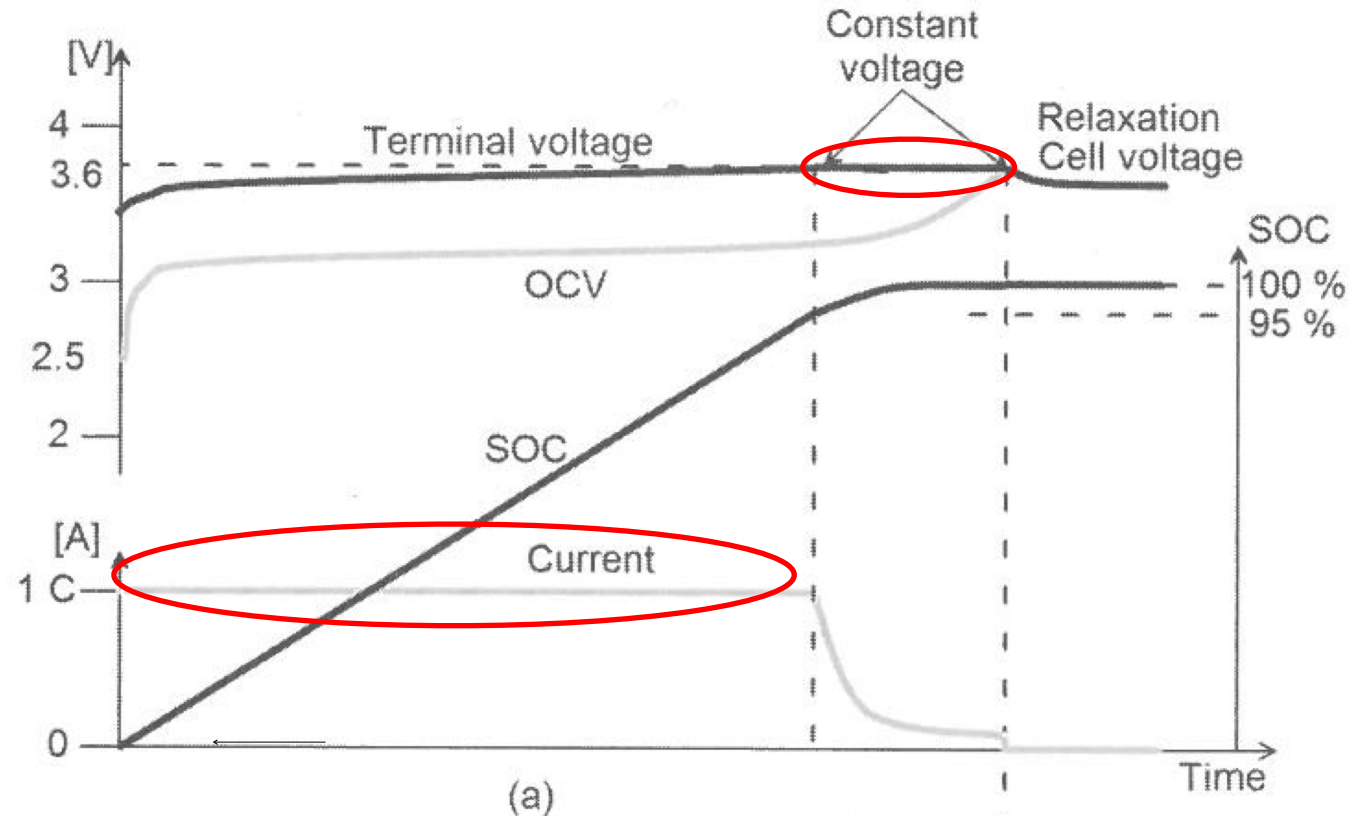
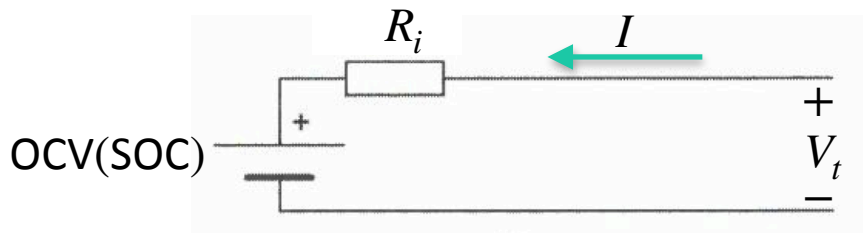
1. Constant Current-laddning,  $I$  fixt:

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

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

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

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



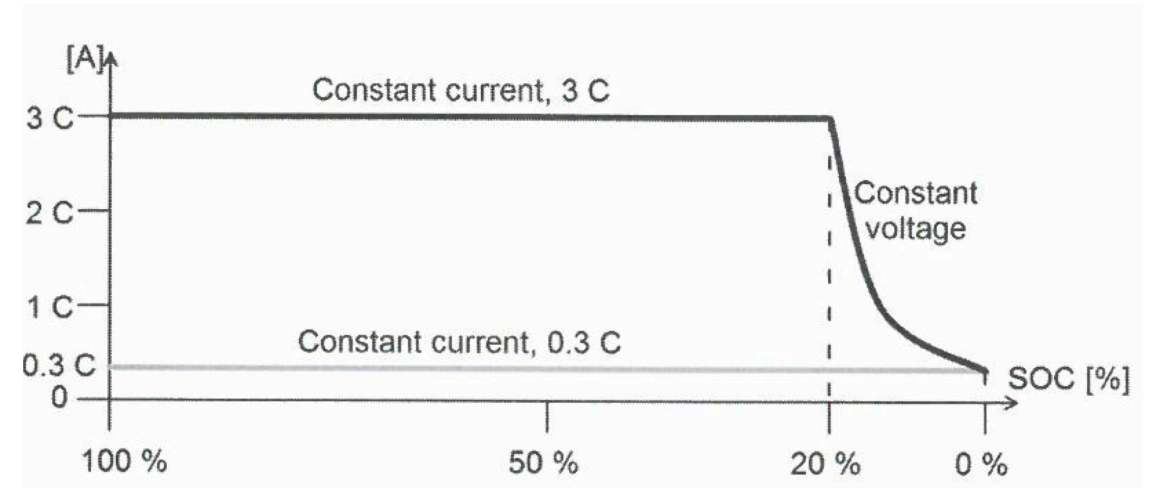
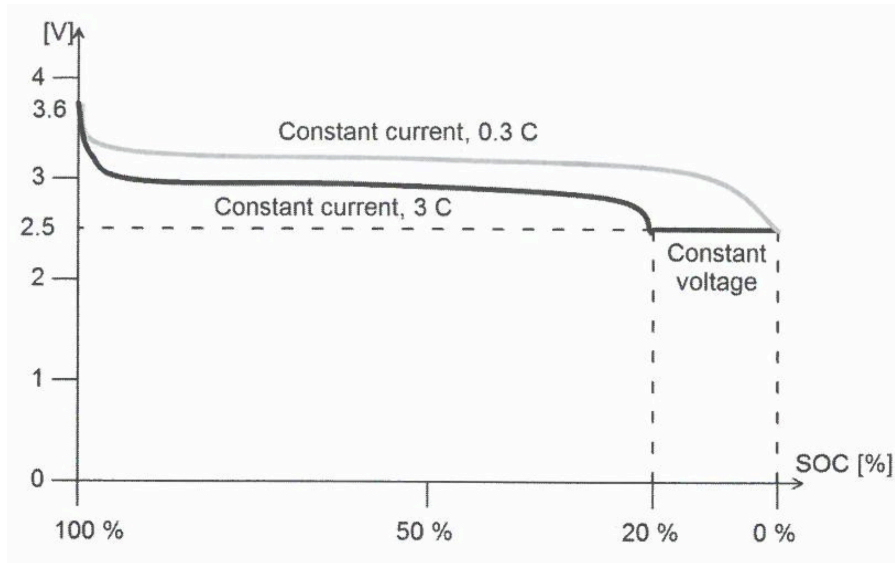
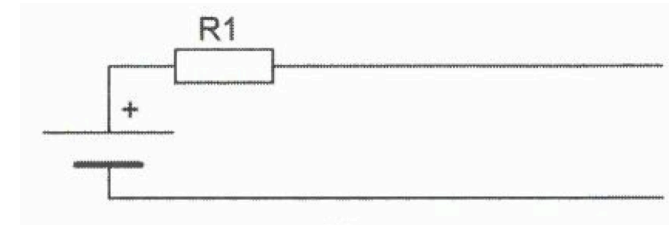


# Urladdning

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

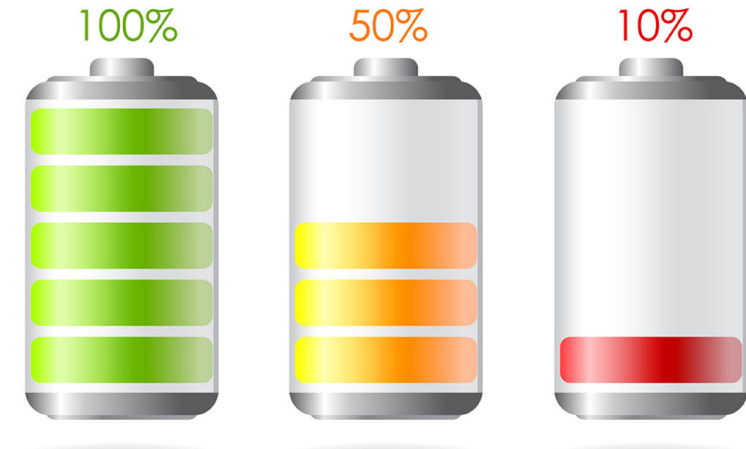
Detta är batteriets urladdningskapacitet som beror på lastens strömbehov.

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.

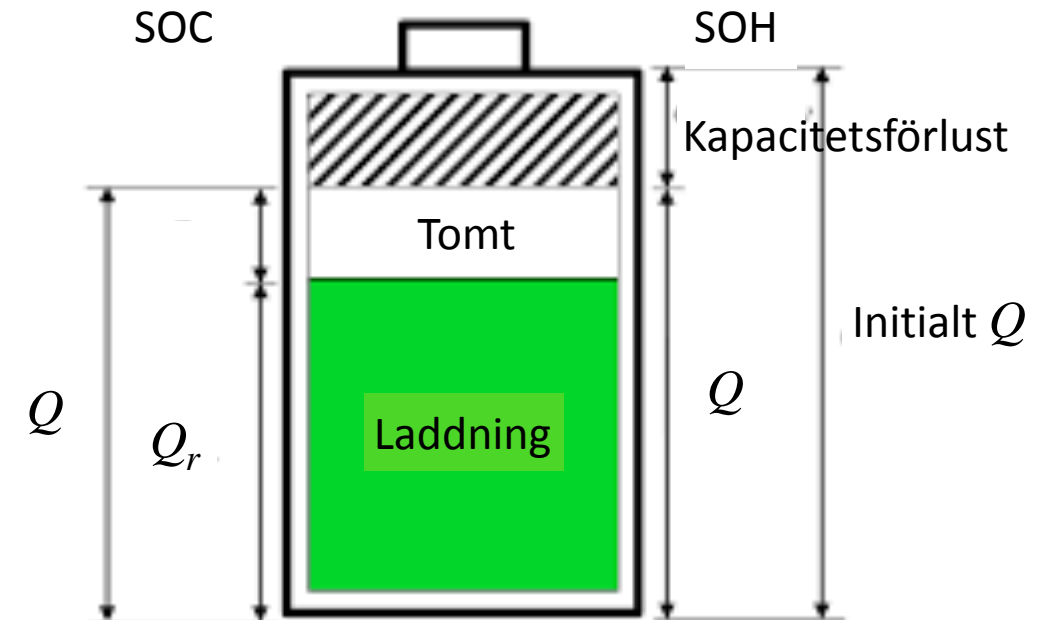


# Kapacitetsbegreppet

- **Nominell kapacitet**,  $Q_{\text{nom}}$  specificerar nominell urladdningskapacitet för ett nytt 25°C varmt batteri med urladdningsström 1C.
- **(Total) kapacitet**,  $Q$ : Laddningsmängd som tömmer ett fullt batteri. Minskar med tiden.
- **Residualkapacitet**,  $Q_r$ : Laddningsmängd som tömmer ett batteri från sin nuvarande laddnivå.
- **Urladdningskapacitet** för ström  $I$ ,  $Q_{[I]}$  Laddningsmängd som krävs för att från ett fullt batteri med en konstant urladdningsström  $I$  nå den lägsta tillåtna batterispänningen i specificerad temperatur.

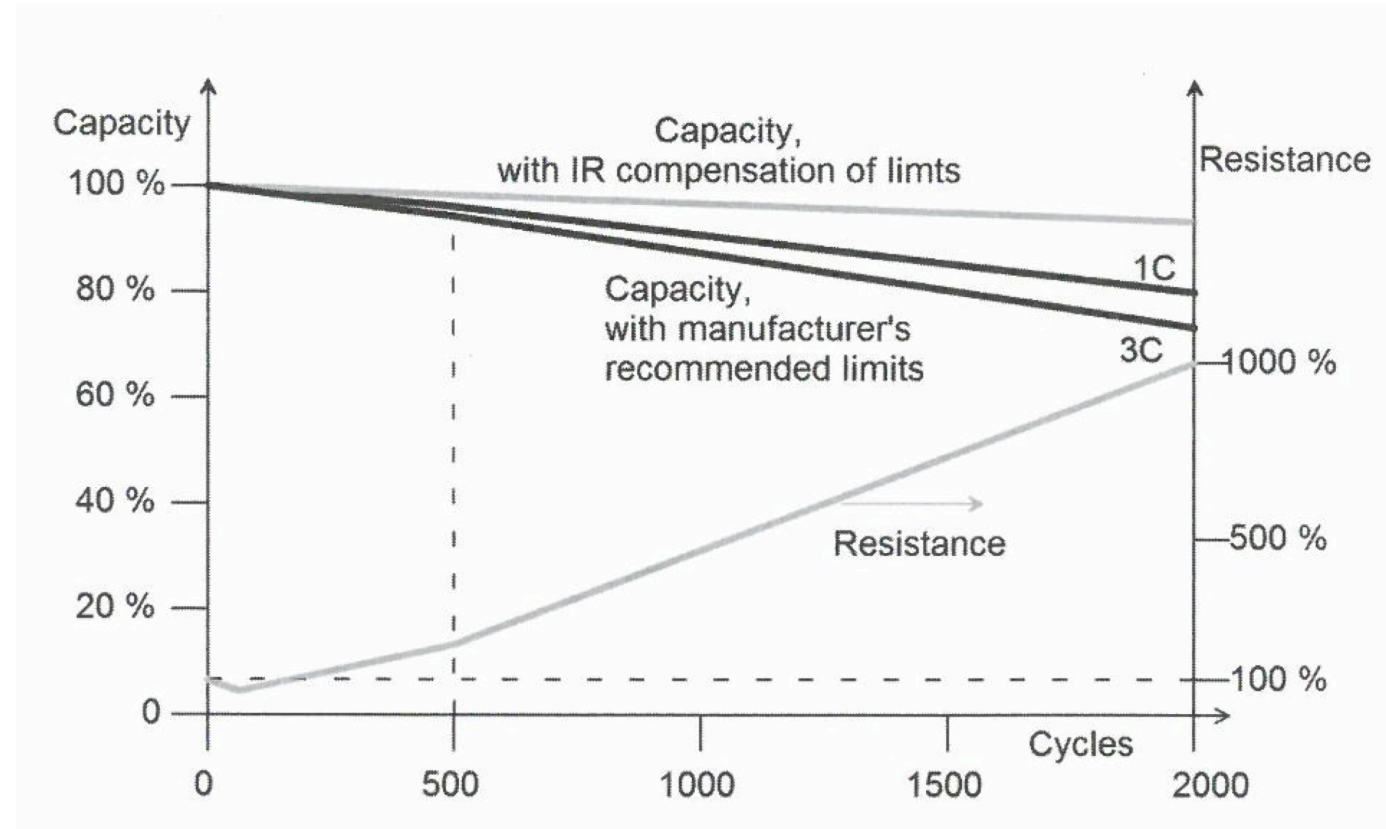
- **State-of-charge:** 
$$\text{SOC} = \frac{\text{Residualkapacitet}}{\text{Total kapacitet}}$$

- **State-of-health:** 
$$\text{SOH} = \frac{\text{Total kapacitet}}{\text{Total kapacitet för nytt batteri}}$$



# Åldring

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



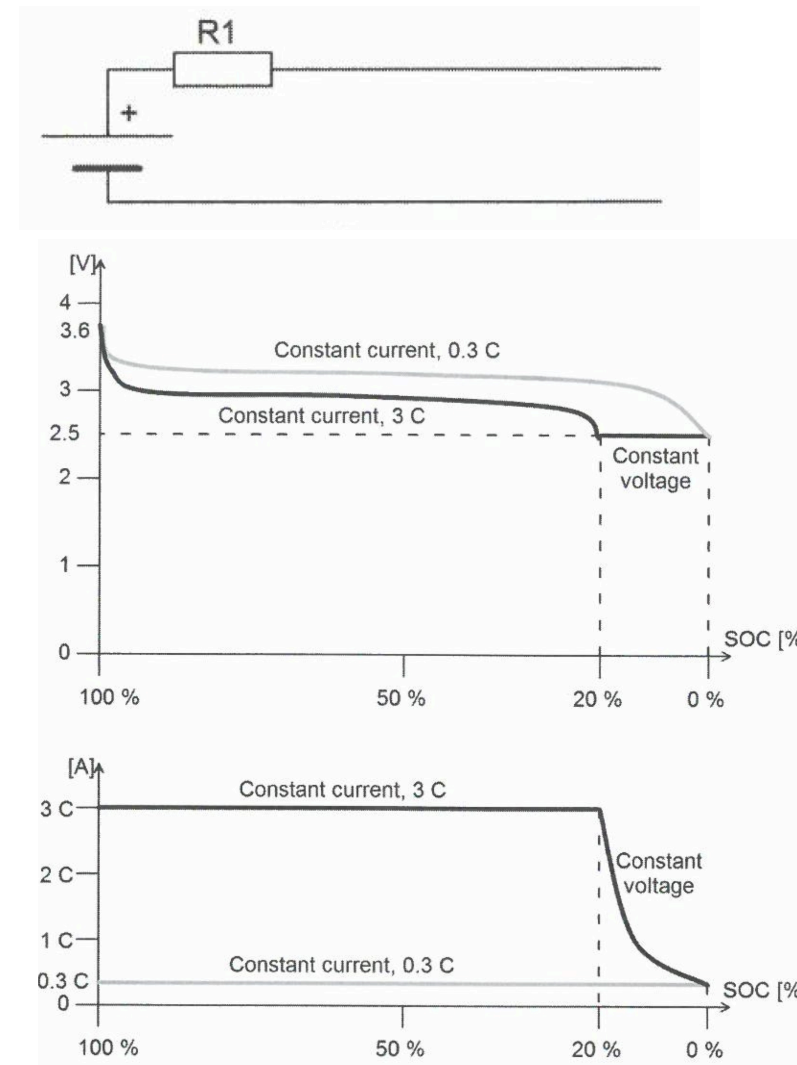
# Verkningsgrad

## Verkningsgrad (energi)

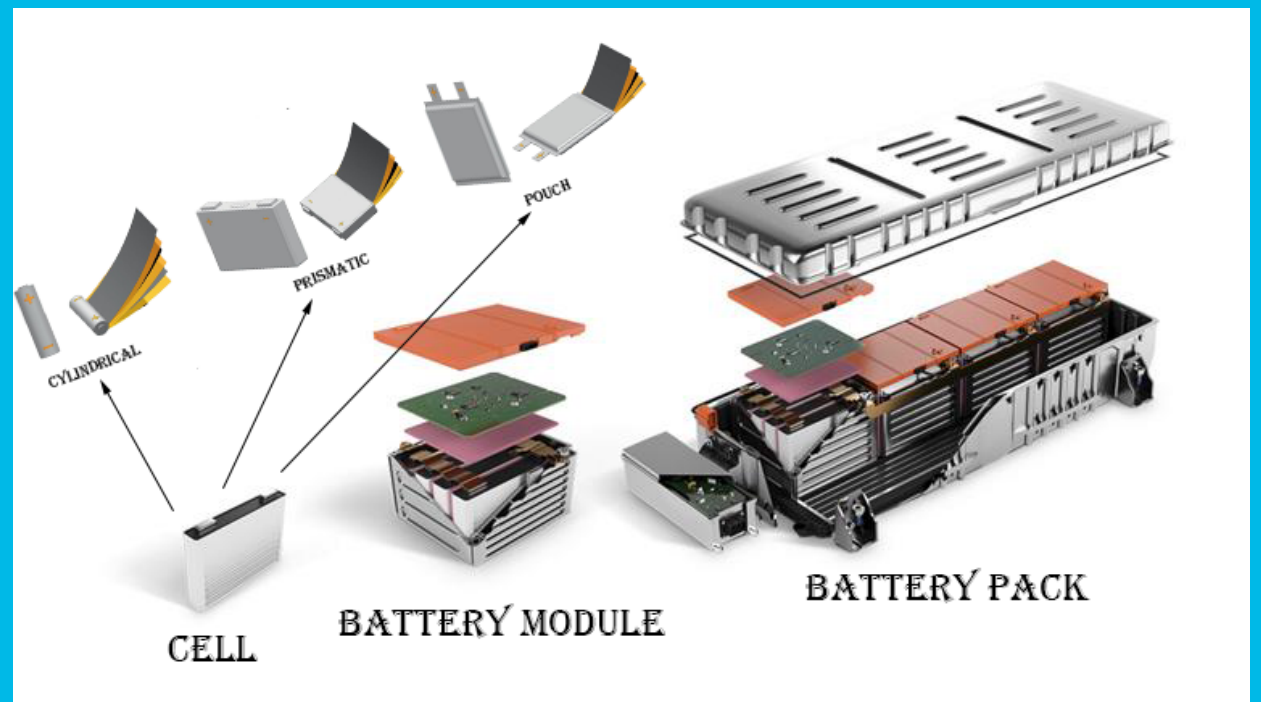
- Li-jon celler har hög verkningsgrad tack vare låg inre resistans,  $\approx 98\%$  för en cykel.
- Verkningsgraden minskar med ökad ström.
- Verkningsgrad =  $\frac{\text{nyttoenergi}}{\text{inmatad energi}} = \frac{\text{urladdningsenergi}}{\text{uppladdningsenergi}}$

## 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%.



# Batteripack



# Batteripacksexempel: Teslas Model S

## Packspec:

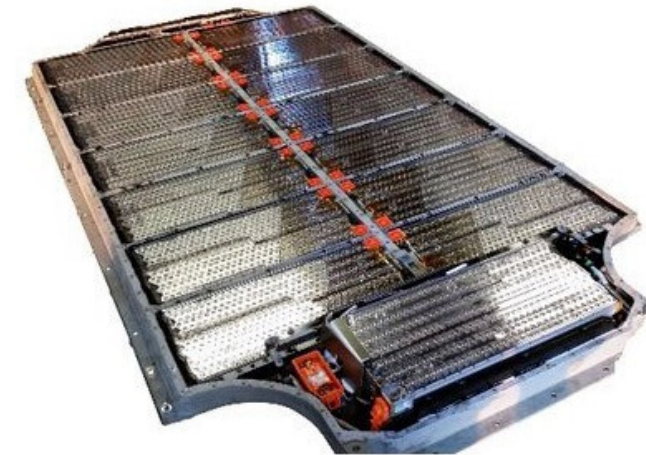
- 85 kWh (540 kg)
- 400 V
- 7104 celler: 16 moduler i serie

## 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.

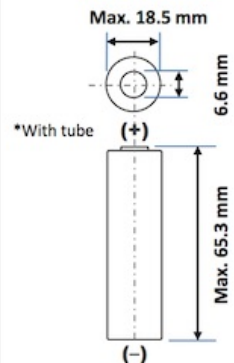
\*At temperatures below 10°C, charge at a 0.25C rate.

## Specifications

|                               |   |
|-------------------------------|---|
| Rated capacity <sup>(1)</sup> | Min. 3200mAh  |
| Capacity <sup>(2)</sup>       | Min. 3250mAh<br>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<br>Discharge: -20 to +60°C<br>Storage: -20 to +50°C |
| Energy density <sup>(3)</sup> | Volumetric: 676 Wh/l<br>Gravimetric: 243 Wh/kg                          |

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

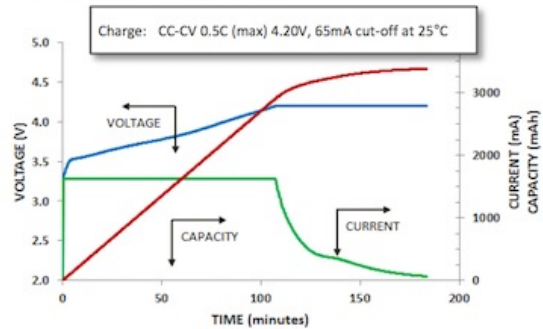
## Dimensions



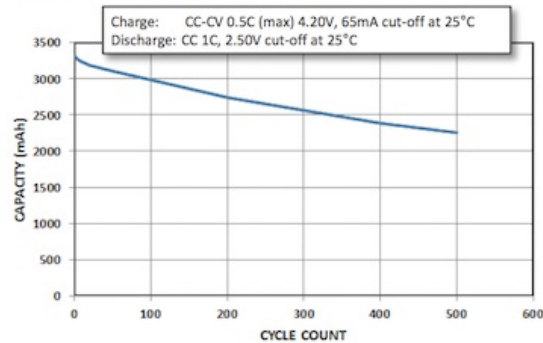
For Reference Only



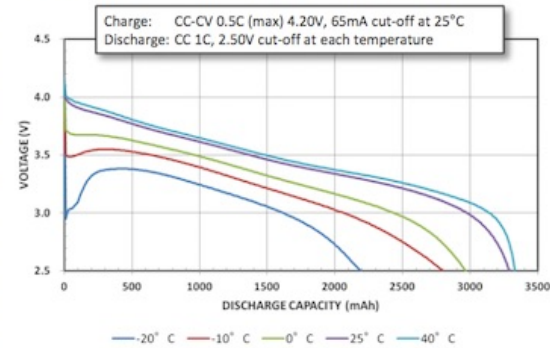
## Charge Characteristics



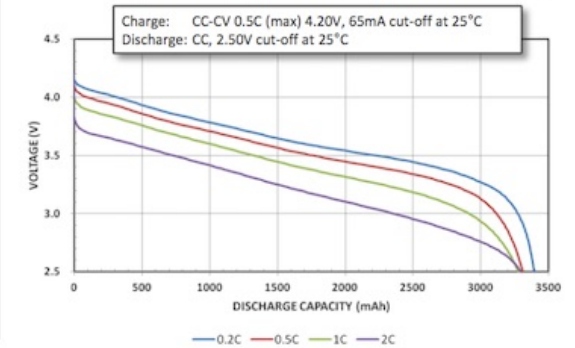
## Cycle Life Characteristics



## Discharge Characteristics (by temperature)



## Discharge Characteristics (by rate of discharge)



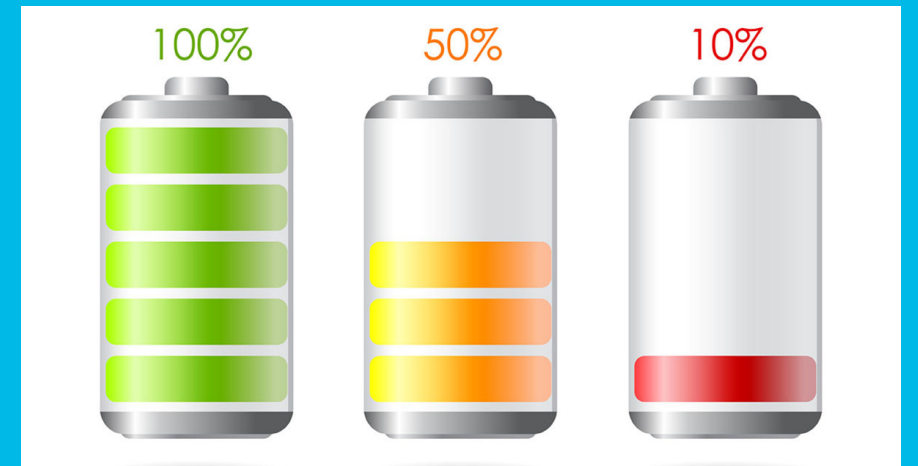
The data in this document is for descriptive purposes only and is not intended to make or imply any guarantee or warranty.



# 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:  $3.2 \text{ Ah} \cdot 74 \text{ celler parallellt} = 236.8 \text{ Ah}$
- Energikapacitet  $\approx$  nominell spänning  $\cdot$  laddningskapacitet =  $(3.6 \cdot 6 \cdot 16 \text{ V}) \cdot 236.8 \text{ Ah} = 81.8 \text{ kWh}$  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  $361 \text{ A} = 144 \text{ kW}$

# State of charge-estimering



# SOC-estimering

Varför?

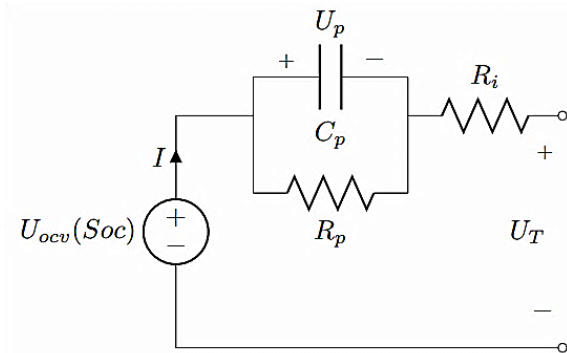
- Undvika skada genom att kontrollera SOC-nivån
- Räckviddsestimering
- Degradationsestimering



# 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)



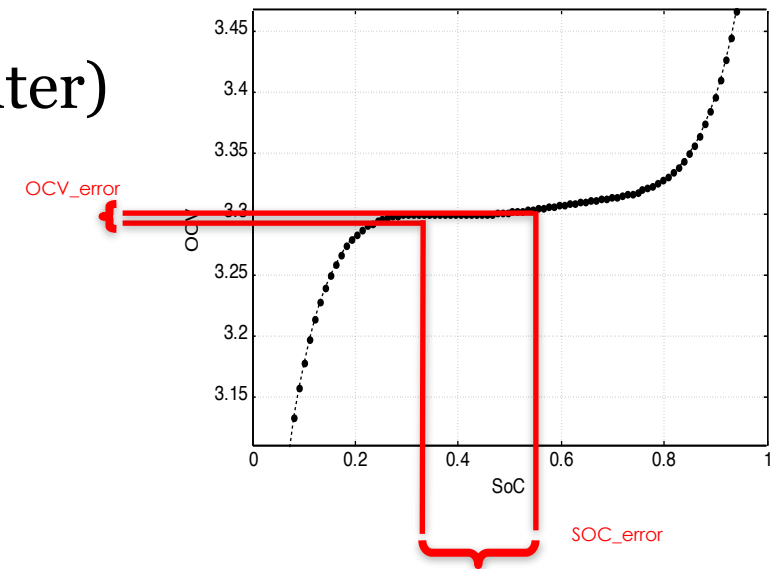
$$\dot{\text{SOC}} = \frac{\eta I}{Q_{\text{Batt}}}$$

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

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

$$Q = \int I dt$$

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



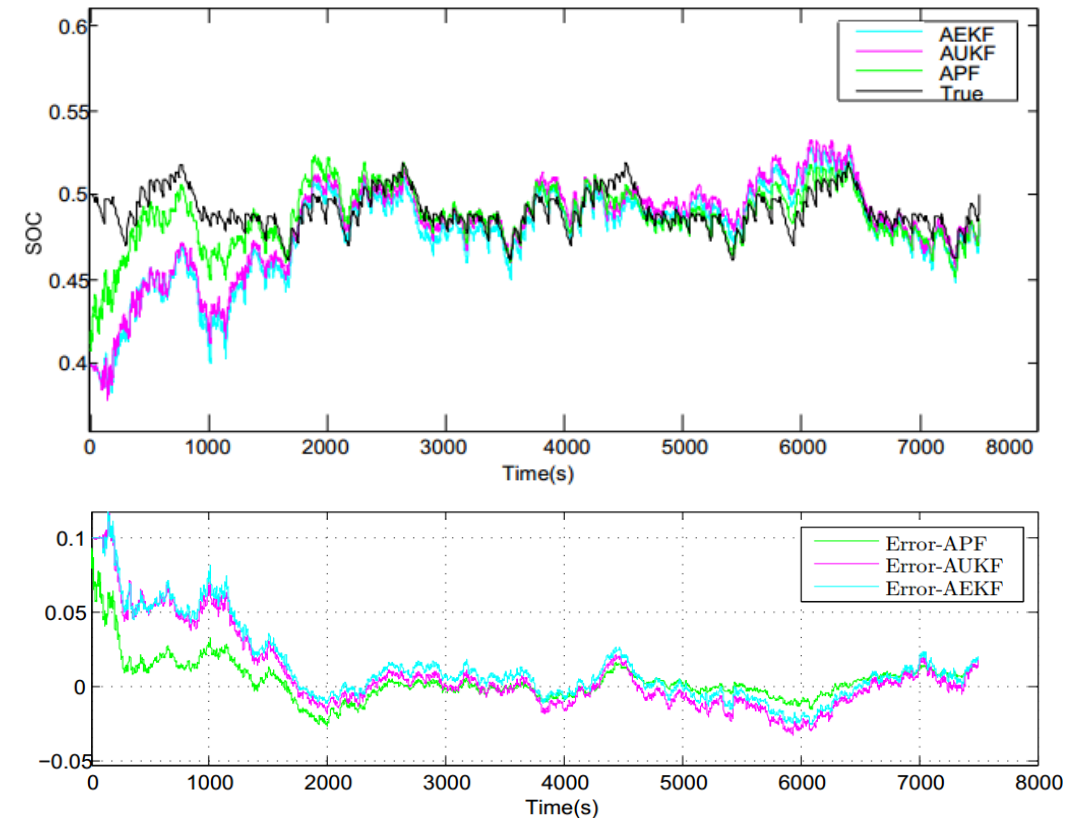
# SOC-estimation med hjälp av olika filter

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

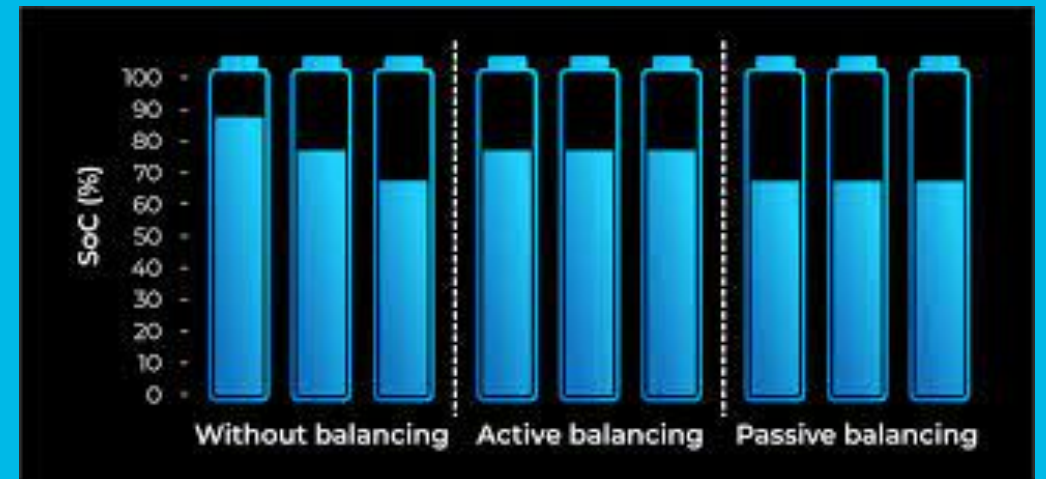
Notera att användningen är långt ifrån testcykler från fullt till tomt batteri med konstant ström.

=> Svårare att avgöra SOC och SOH

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



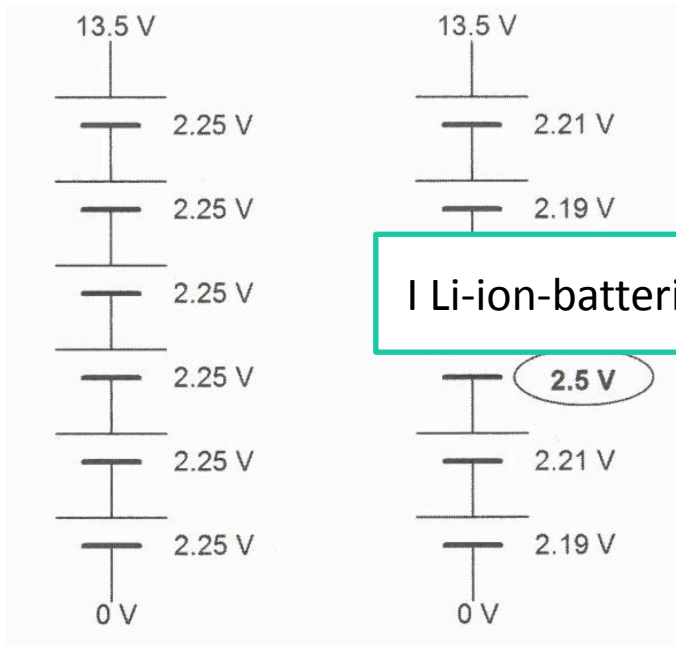
# Batteribalansering



# Olika spänningar i seriekopplade celler

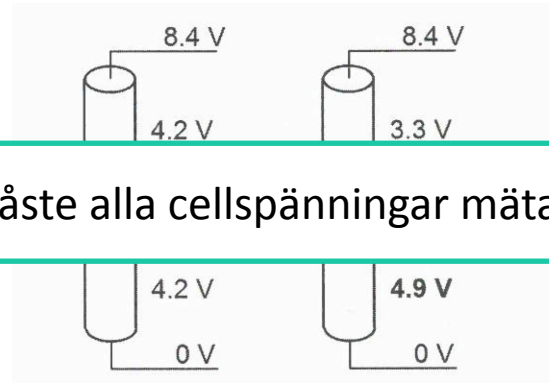
Betrakta laddning i en balanserat och ett obalanserat pack.

Blysyrabatteri



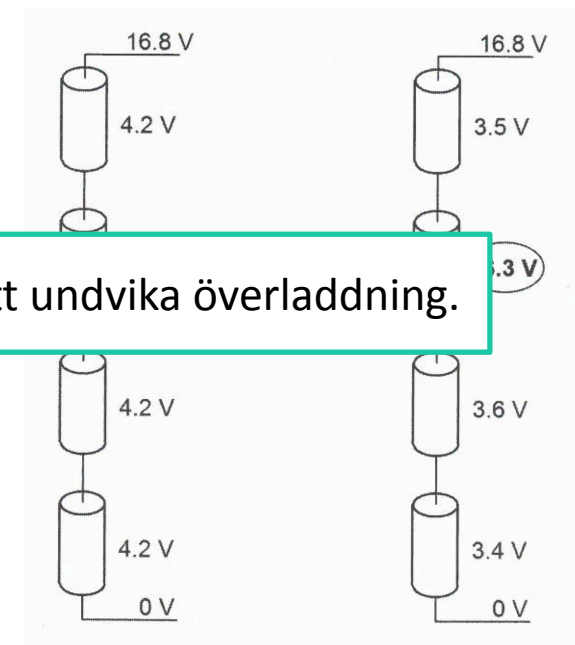
OK

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:

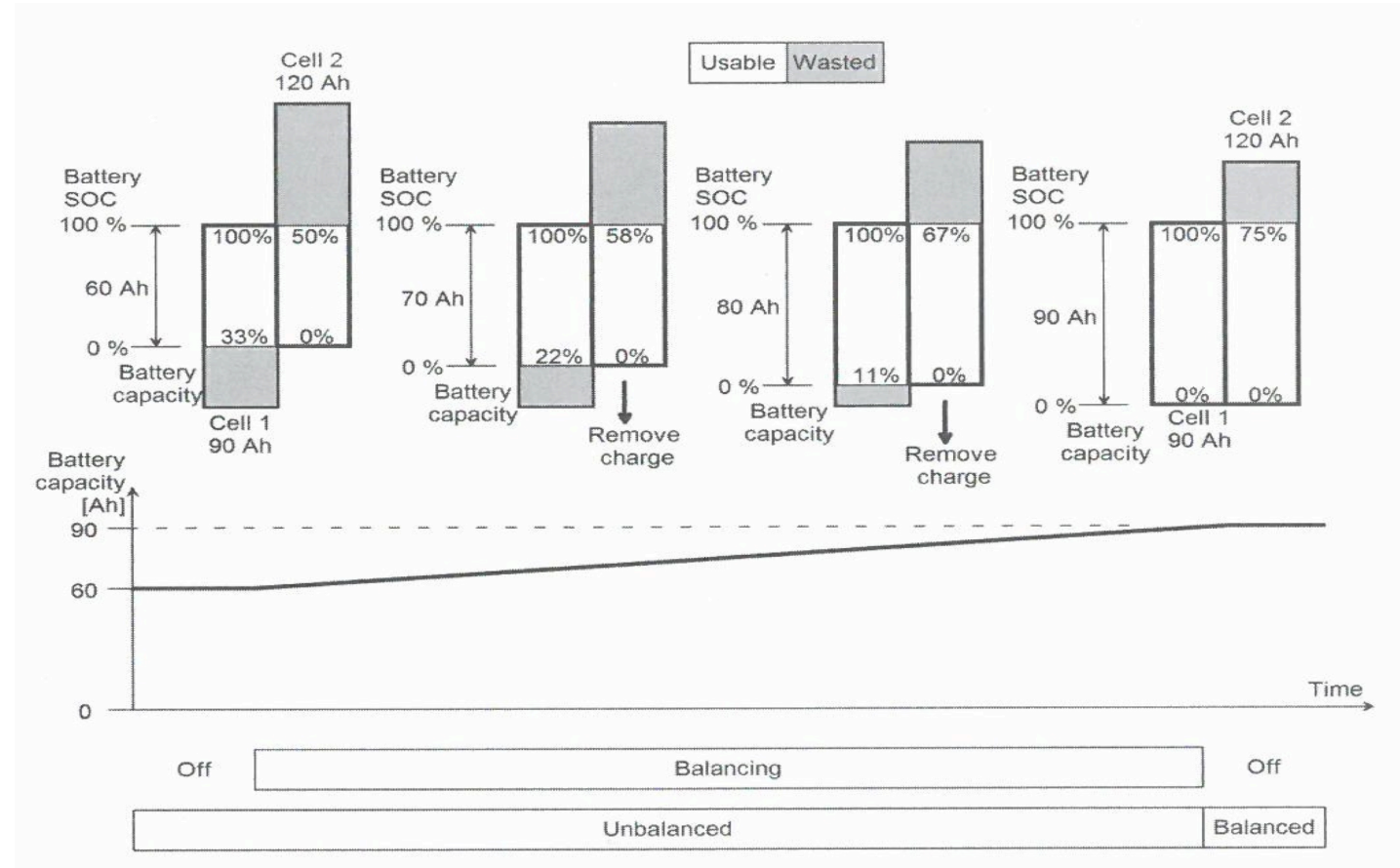
60 Ah

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

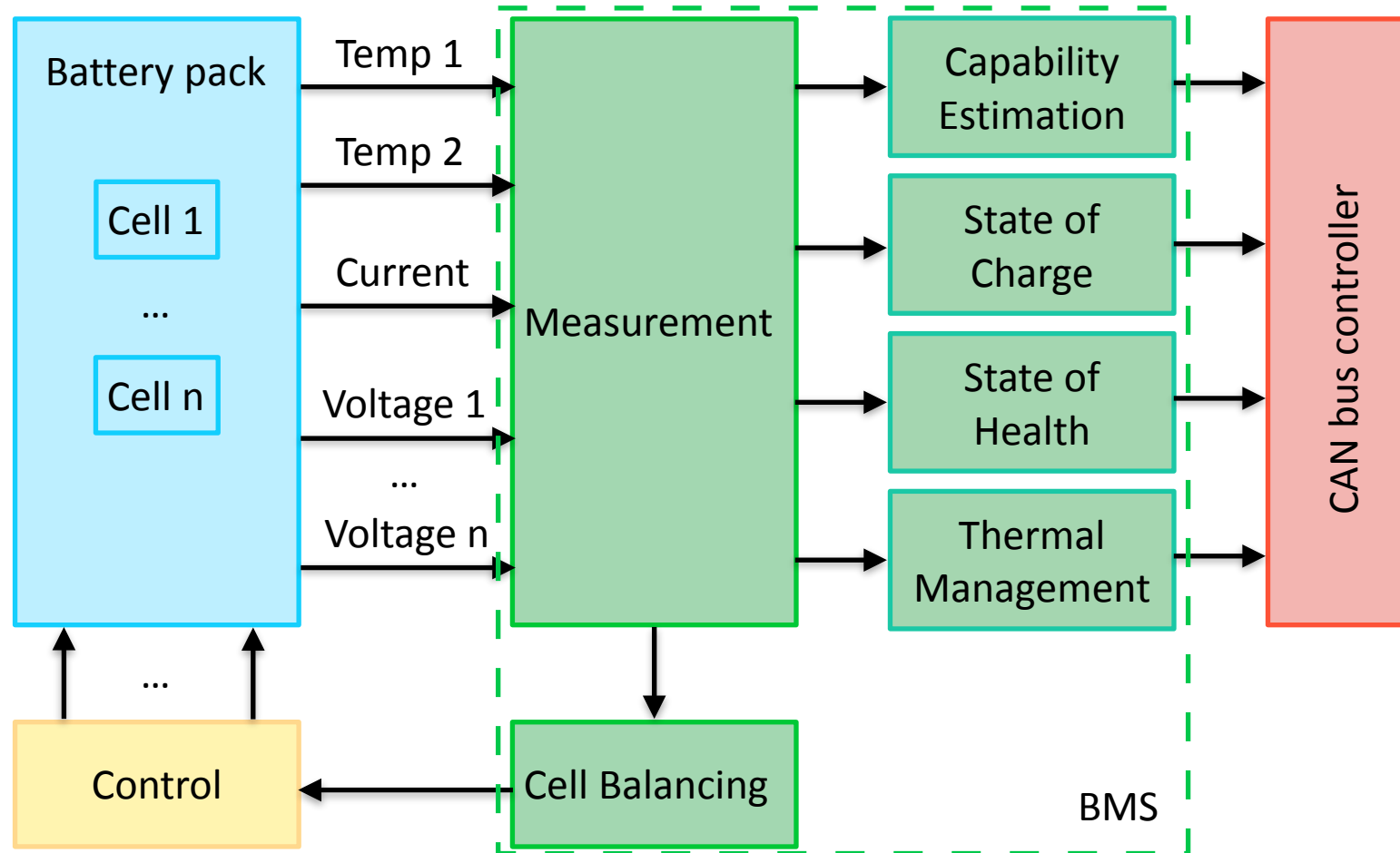




# Battery Management System



# Battery Management System (BMS)



# Batterier, TSFS17 Elkraftsystem

## Mattias Krysanter

[www.liu.se](http://www.liu.se)