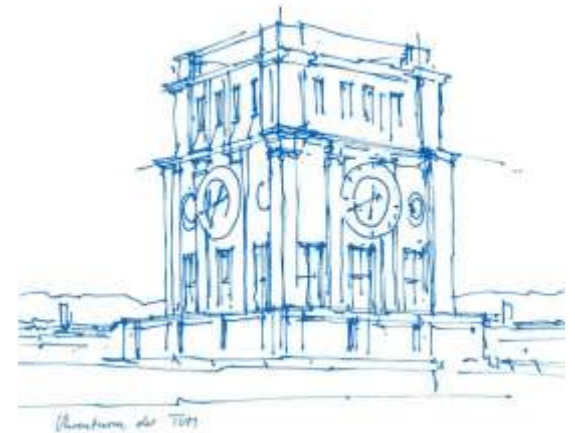


Workshop Dezentrale Sektorkopplung und Hybride Energiespeichersysteme

Modellierung und Simulation moderner Batteriesysteme und hybrider Energiespeicher Topologien

Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen
 Technische Universität München
 Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
 Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik

Dresden, 15.11.2016



Übersicht

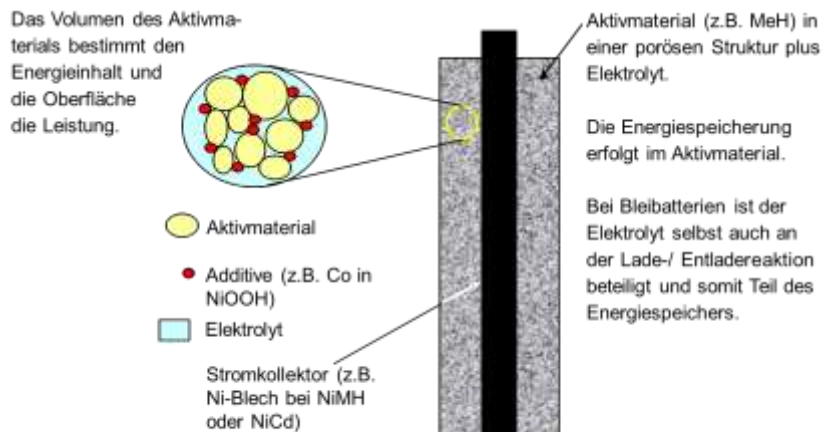
- Einführung
- Modelle für Batterien
 - Für unterschiedliche Aufgaben
 - Auf unterschiedlichen Längenskalen
 - vom Partikel bis zum System
- Hybride Energiespeichersysteme
 - Grundgedanke
 - Topologien
 - Beispiel

Einleitung

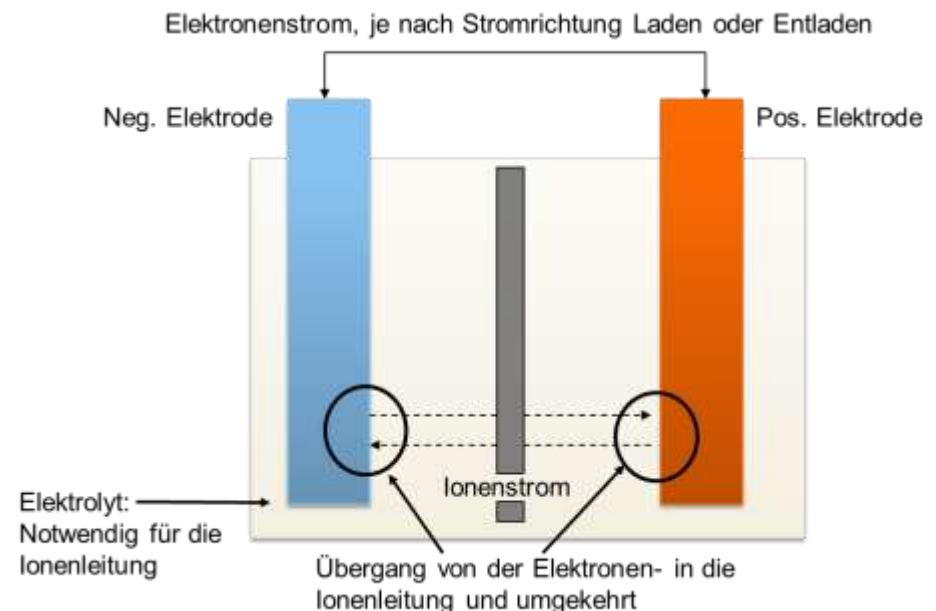
Elektrochemische Energiespeicher

Ein elektrochemisches Speichersystem besteht aus zwei Phasengrenzen Elektrode/Elektrolyt. Hierdurch entsteht eine Spannung (in der Regel ladezustandsabhängig) sowie Spannungsabfälle bei fließende Strom.

Aufbau einer Elektrode



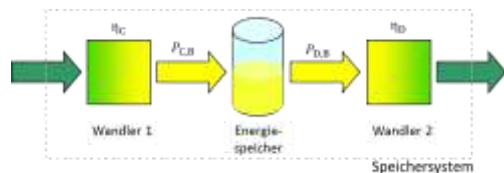
Aufbau einer Zelle



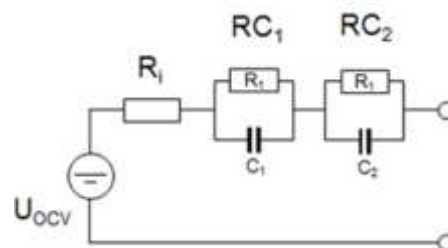
Modelle für Batteriesysteme

Modellarten und deren Eigenschaften

Bilanzierende Modelle (BM)



Ersatzschaltbildmodelle (EM)



Fundamentale Modelle (FM)

Physico-Chemical Model

Newman's p2D model for porous electrodes

Concentrations and potentials in liquid and solid phase of active material domain

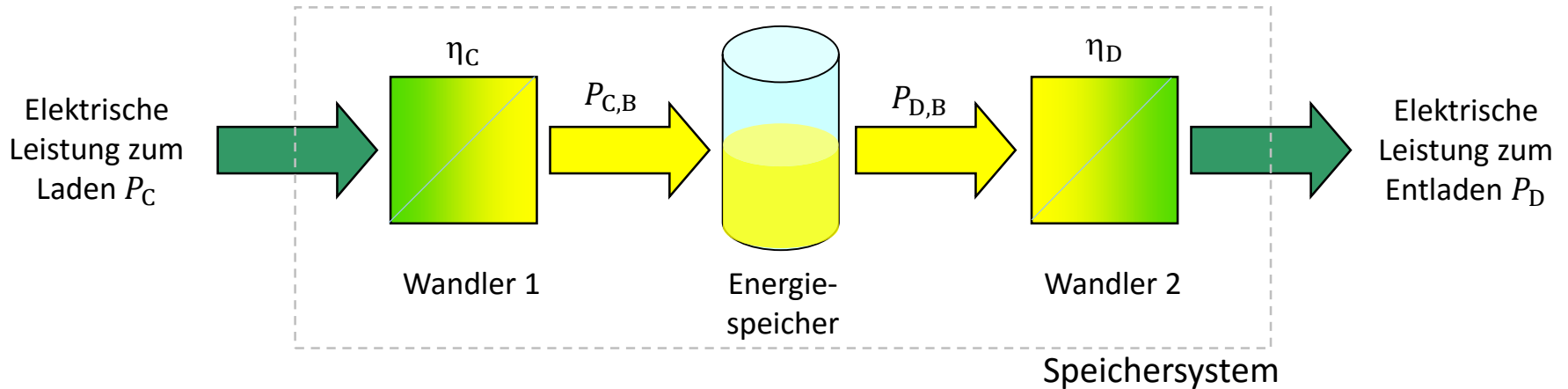
$$c_l \frac{\partial c_l}{\partial t} = \nabla D_{l,e} j_f \nabla c_l + a j_+ (1 - t_+)$$

$$\nabla \phi_l = -\nabla \phi_s = -\frac{a n F}{s_+} j_+ \quad \frac{\partial c_s}{\partial t} = \nabla D_s \nabla c_s$$

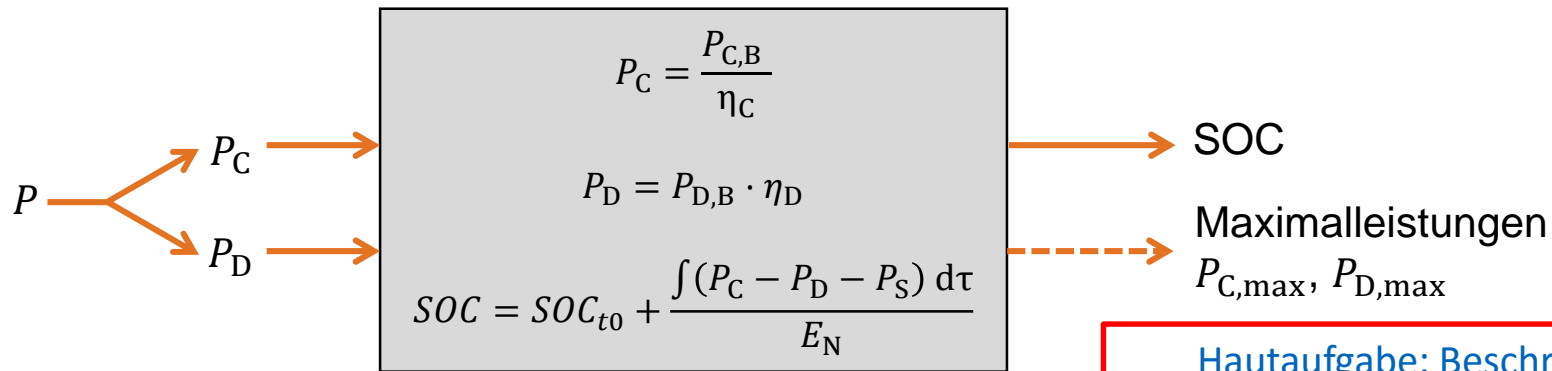
	BM	EB	FM
Komplexität	gering	mittel	hoch
Parametrierungsaufwand	gering	hoch	Theor. gering
Dynamik	Nur SoC Änderung	Sehr detailliert	Sehr detailliert
Geschwindigkeit	Sehr schnell	schnell	Sehr gering
Spannungs-/Strom für Zelle	nein	ja	ja
Spannung-/Strom-Verteilung	nein	nein	ja

Bilanzierende Modelle BM

Gilt generell für elektrische Energiespeichersysteme



Bestimmung des SOC über die Leistungen:

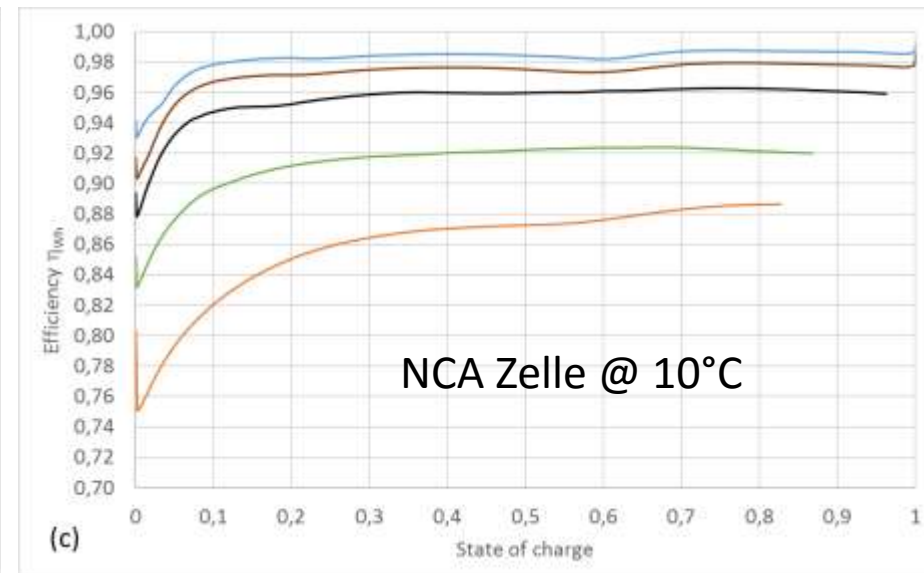
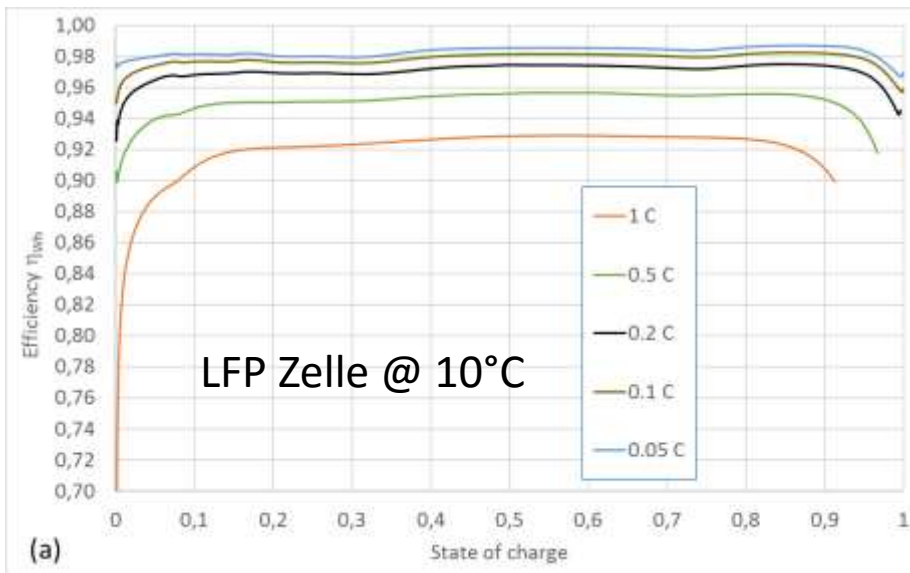
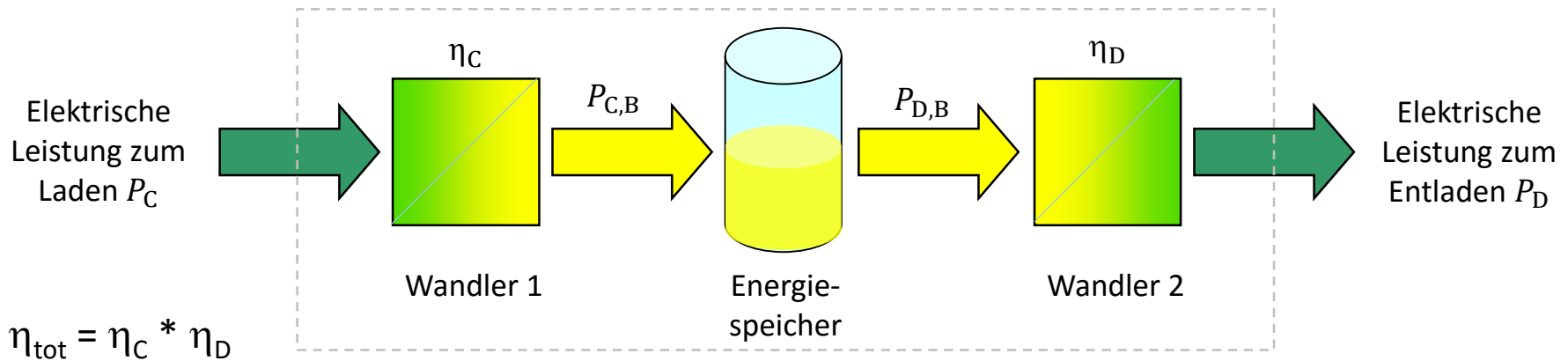


P_S : Selbstentladungsleistung + Peripherieverbrauch

Hautaufgabe: Beschreibung der Wirkungsgradfunktionen $\eta_x(\text{SoC}, T, I \dots)$

Bilanzierende Modelle BM

Wirkungsgradfunktionen für Li-Ionen Batterien (Beispiele)

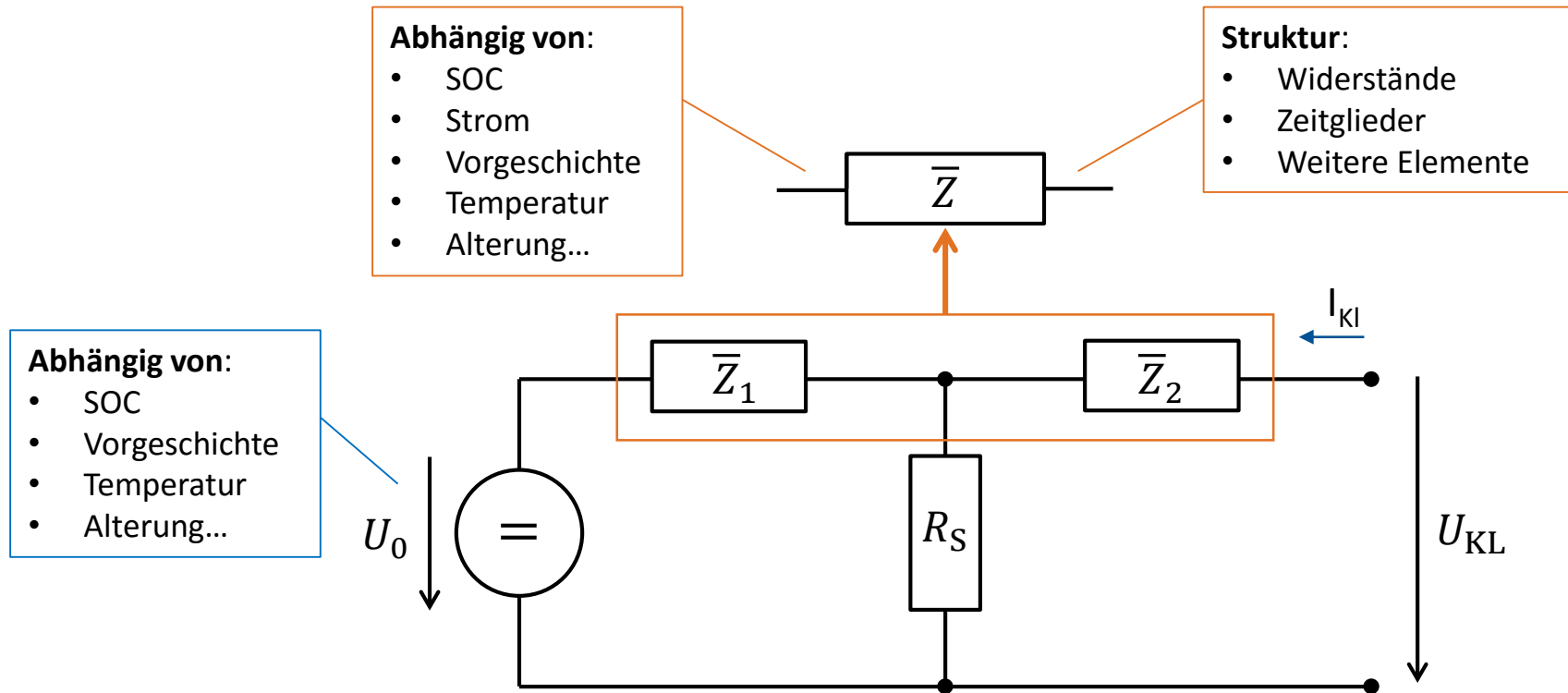


Ersatzschaltbildmodelle EM

Gilt generell für elektrochemische Speicher

Zusammenfassung der Impedanzen

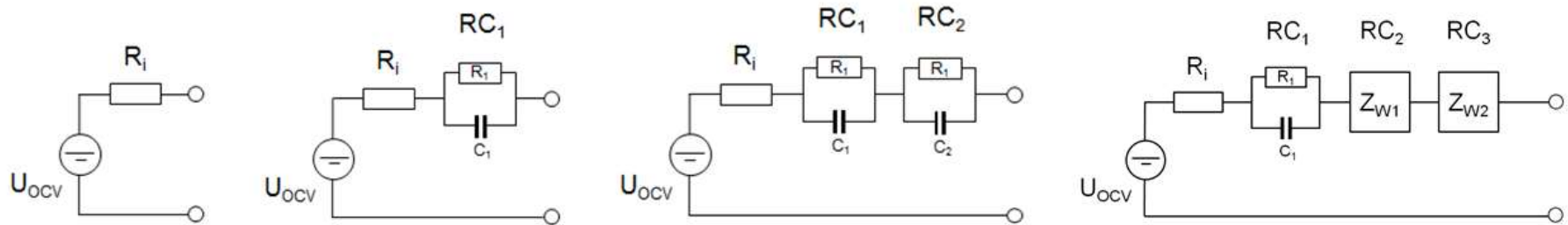
- Unter Vernachlässigung der Selbstentladung, können die Impedanzen zu einer Impedanz \bar{Z} zusammengefasst werden.



Ersatzschaltbildmodelle EB

Genauigkeit ↔ Geschwindigkeit

Die Impedanz kann auf unterschiedliche Weise nachgebildet werden. Häufig sind dies ein ohmscher Widerstand plus RC Glieder. Die RC Glieder bilden hierbei die Warburgimpedanz(en) der Elektroden nach.



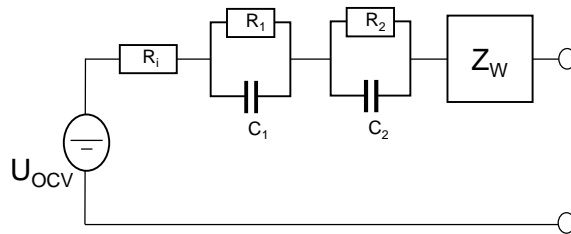
Genauigkeit

Geschwindigkeit

- Abhängigkeiten von Ladezustand, Temperatur, Stromstärke, ... werden über Wertetabellen für die einzelnen Bauteile dargestellt
- Kopplung mit einem einfachen thermischen Modell und auch Alterungsmodelle möglich.

Ersatzschaltbildmodelle EB

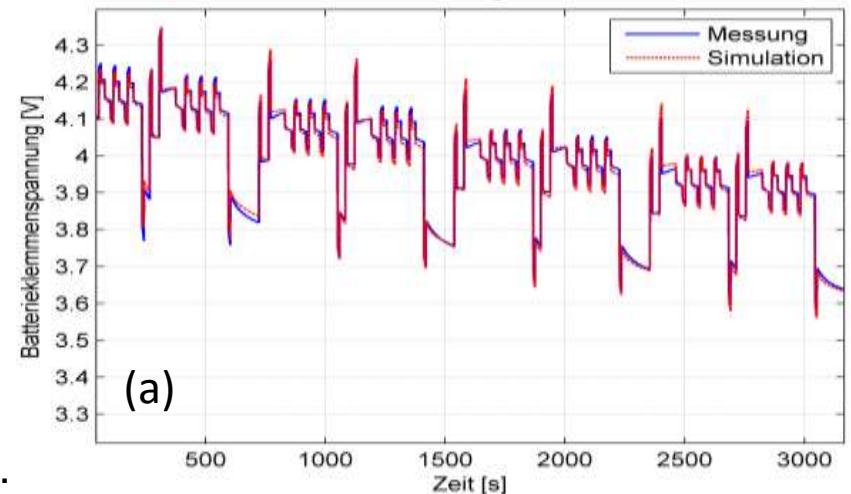
Parametrierung von ESB Modellen



Die Parametrierung erfolgt entweder im Zeitbereich (a) oder im Frequenzbereich (b).

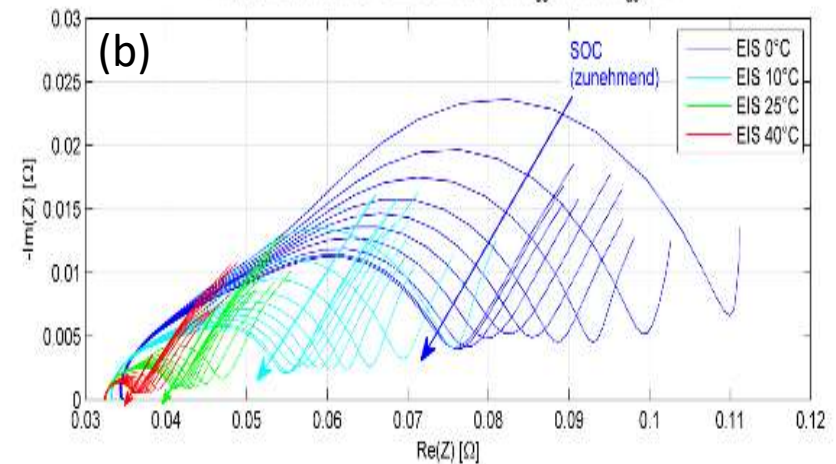
Hierbei ist zu beachten, dass alle Abhängigkeiten berücksichtigt werden:

- SoC Abhängigkeit
- Stromabhängigkeit
- Temperaturabhängigkeit
- Einfluss der Alterung



(a)

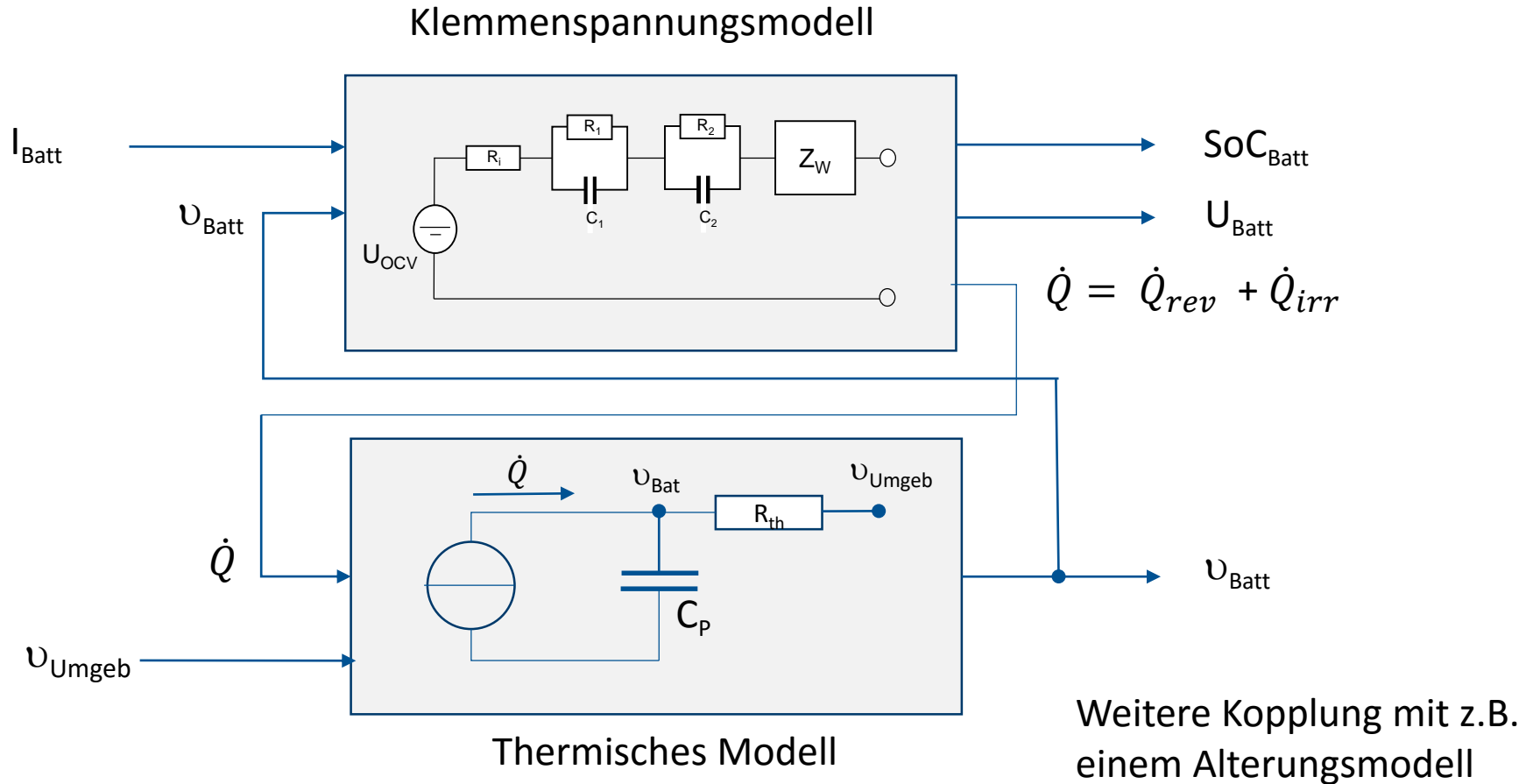
Impedanzspektren bis 10mHz beim Laden mit $I_{dc}=0.5A$ und $I_{ac}=0.4A$



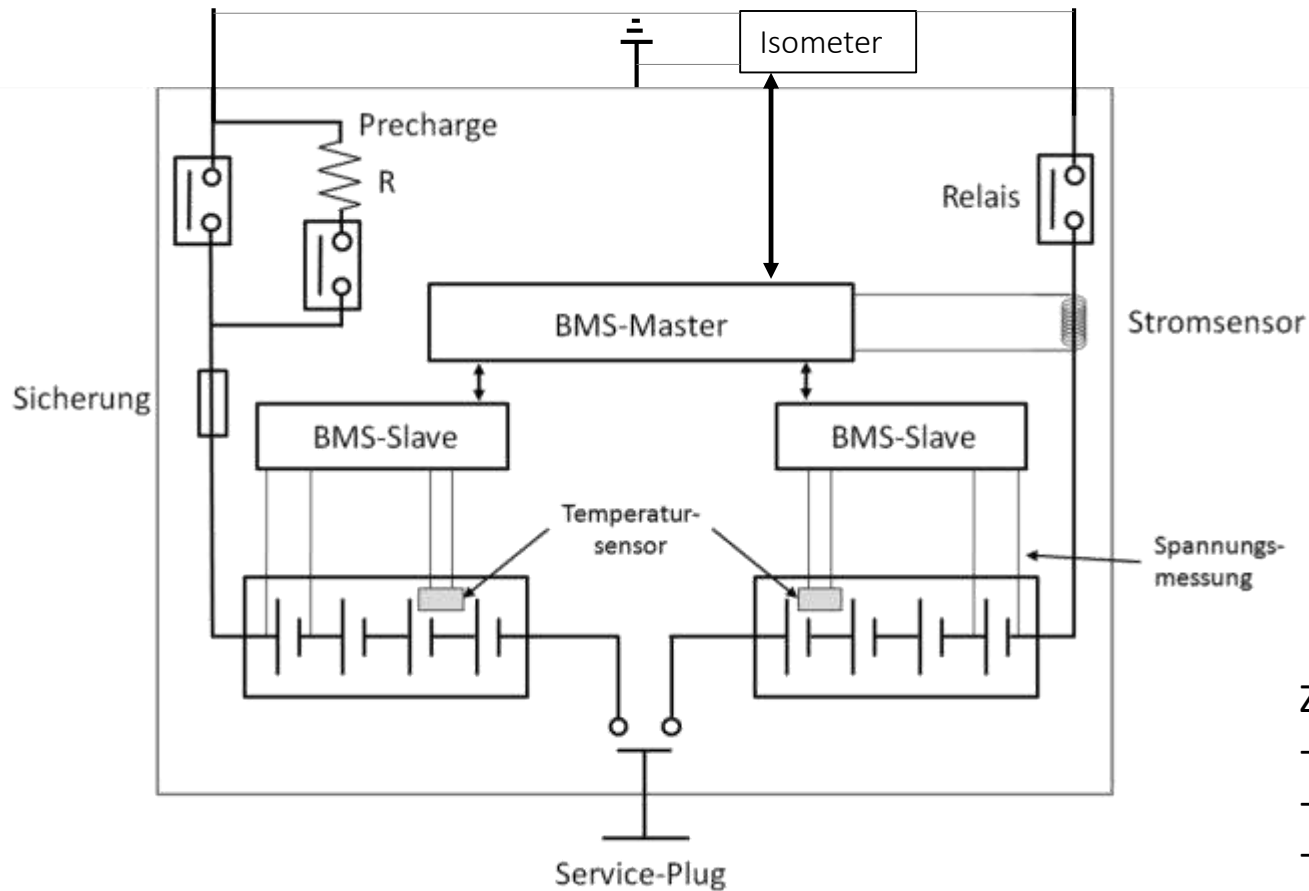
(b)

Ersatzschaltbildmodelle EB

Kopplung mit weiteren Modellen

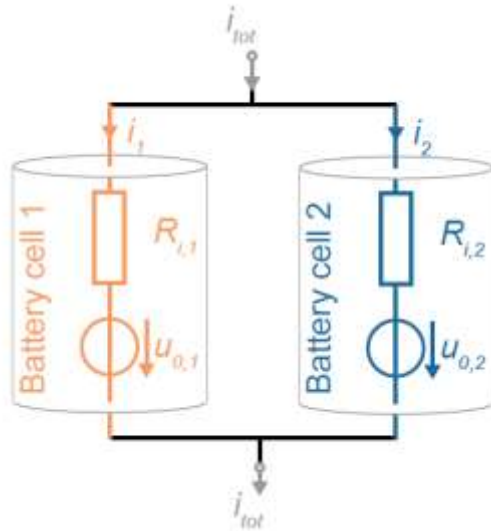


Batteriesysteme



- Zu Berücksichtigen
- Vielzelliges System
 - Batteriemangement
 - Weitere Verluste
 - Kühlsystem

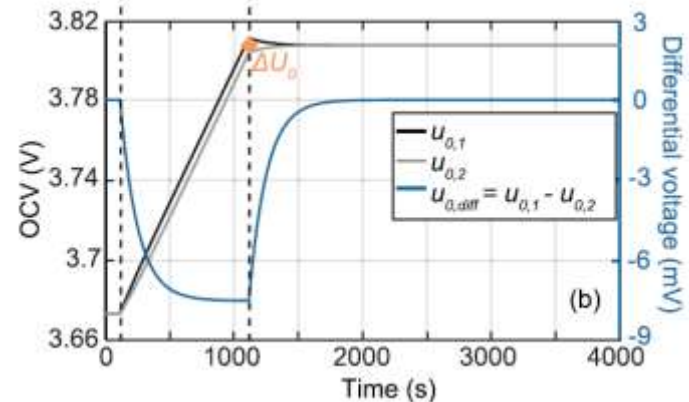
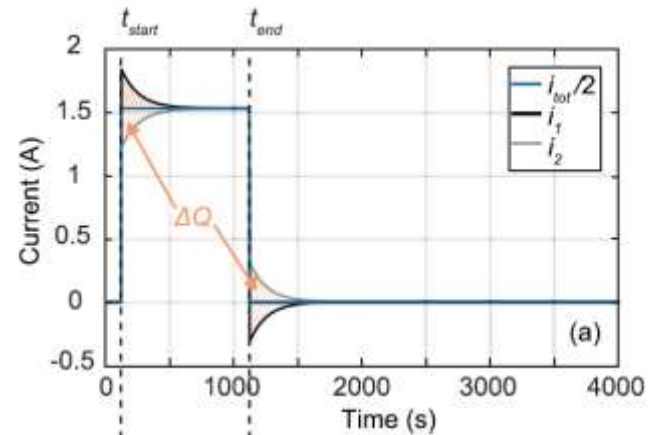
Parallelschalten von Zellen



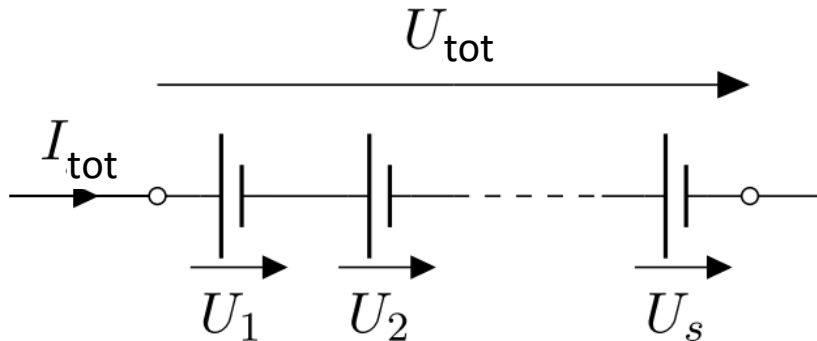
Einfaches Modell
 $U_0 = f(\text{SoC}), R_i = \text{konst.}$

Deutliche Umladeeffekte, obwohl durch Parallelschaltung die rel. Standardabweichung abnimmt.

Simulationsbeispiel für Zellen mit unterschiedlichem ohmschen Widerstand → unterschiedl. Ladungsdurchsatz



Serienschaltung von Zellen



s : Anzahl in Serie geschalteter Zellen

U_i : Spannung der Zelle i

C_i : Kapazität der Zelle i

Für identische Zellen bei identischen Bedingungen (T , SoC, ...) gilt:

$$U_{\text{tot}} = s \cdot U_1 = s \cdot U_2 = \dots = s \cdot U_s$$

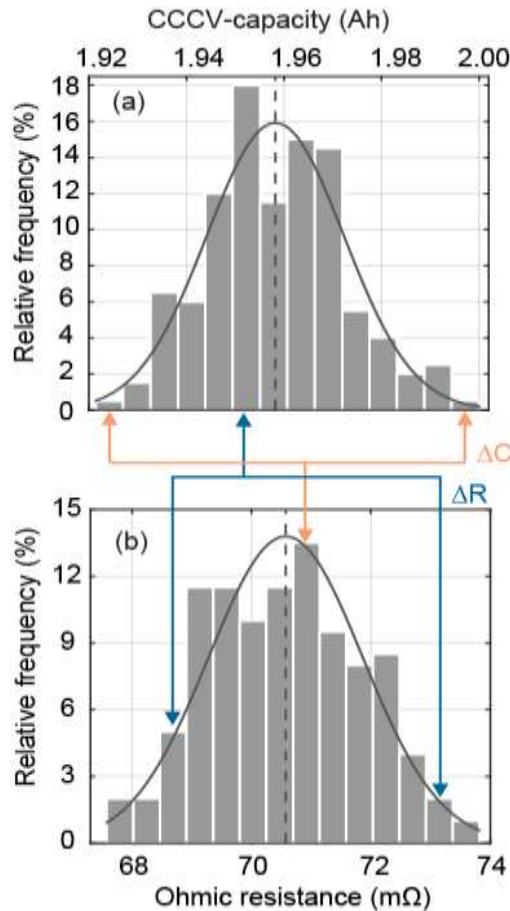
$$C_{\text{tot}} = C_1 = C_2 = \dots = C_s$$

Bei Zellen unterschiedlicher Kapazität ergibt sich für die Gesamtkapazität die minimale Zellkapazität:

$$C_{\text{tot}} = \min_{i=1 \dots s} C_i$$

Serienschaltung von Zellen

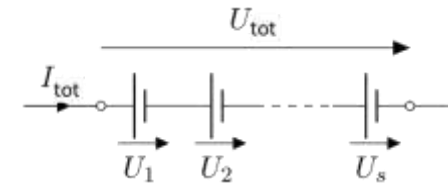
Daten neuer Zellen



Unter der Annahme, dass die Widerstände und die Kapazitäten normalverteilt sind :

$$C \sim N(\mu_C, \sigma_C^2)$$

$$R \sim N(\mu_R, \sigma_R^2)$$



Ergibt sich für ein Modul das aus s in Serie geschalteten Zellen besteht:

$$R_{tot} = s \cdot \mu_R; \quad \sigma_{R,tot} = \sqrt{s} \cdot \sigma_R$$

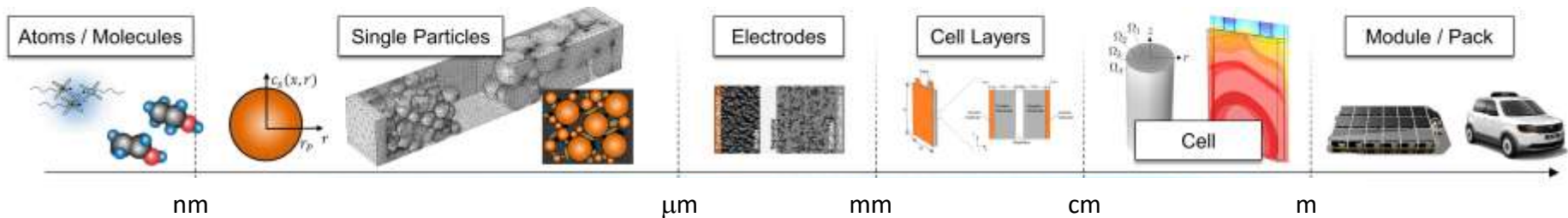
$$C_{tot} = \mu_C - \alpha \sigma_C$$

I.d.R. Beschreibung durch skalierte Zelle

Wichtig: C_{tot} ist kleiner als der Mittelwert
Die relative Standardabweichung des Innenwiderstands wird kleiner.

Fundamentale Modelle FM

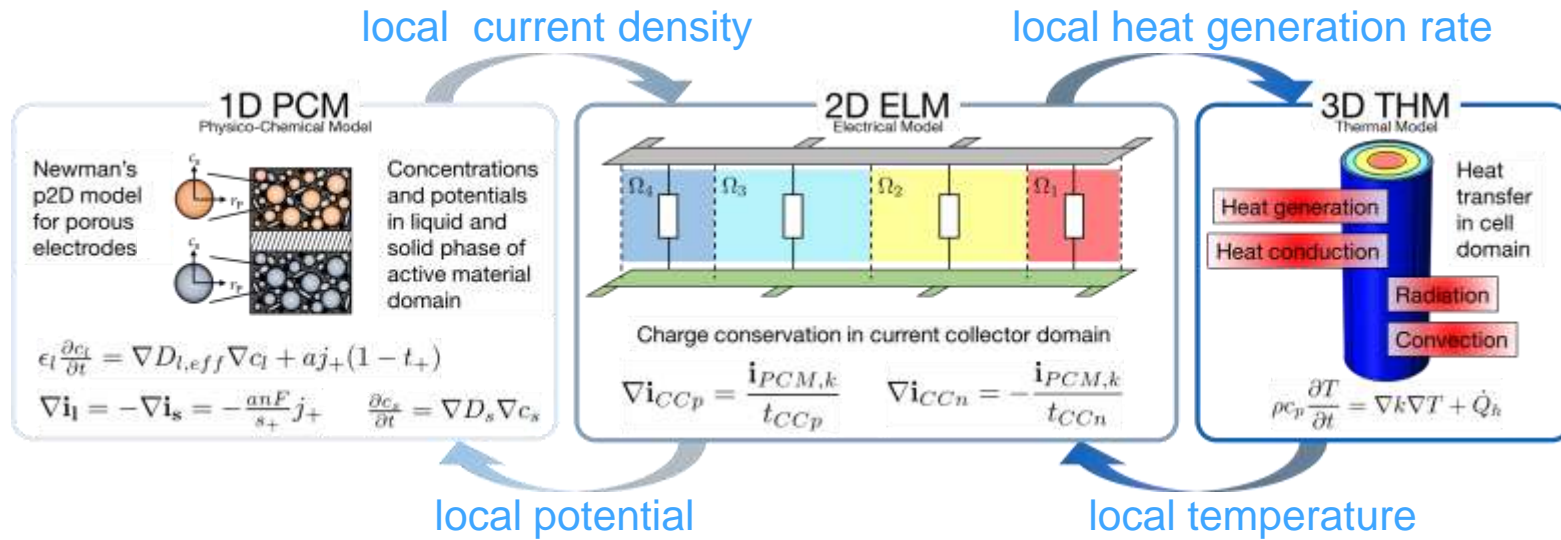
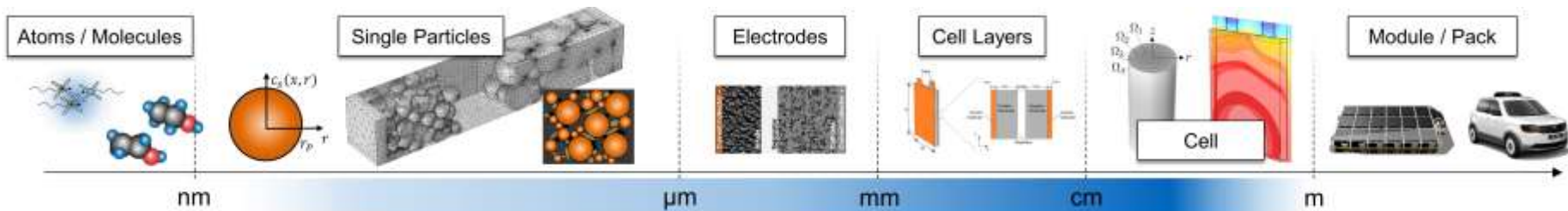
Modelle, die auf grundlegenden Zusammenhängen basieren



	Ein Partikelmodelle (r_1)	Newman	Newman +	Newman +	Zellmodell +
	Multipartikelmodelle (r_1, r_1, r_1)		el Koppl.	el. Kopplung+	Kopplung zw.
	Mikrostrukturmodelle			th. Kopplung	Zellen

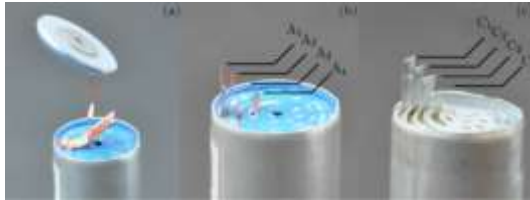
Fundamentale Modelle

Newman Modell für eine Zelle

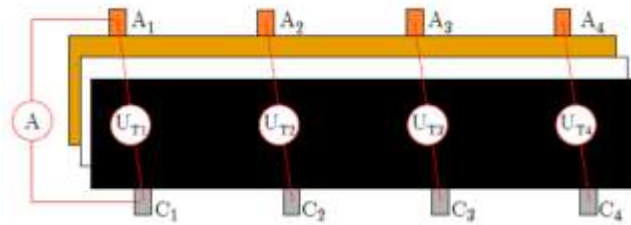


Fundamentale Modelle

Newman Modell (Beispiel LFP Rundzelle)

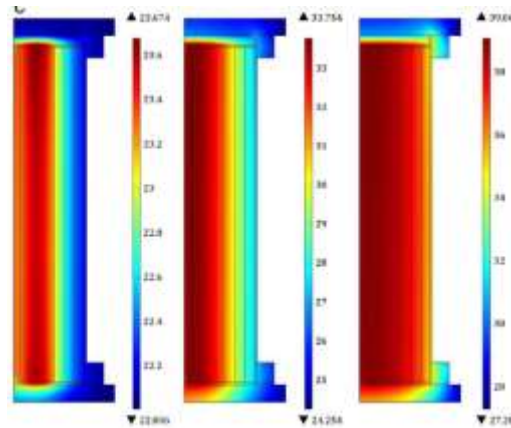


Modifikation
der Zelle
(A123)

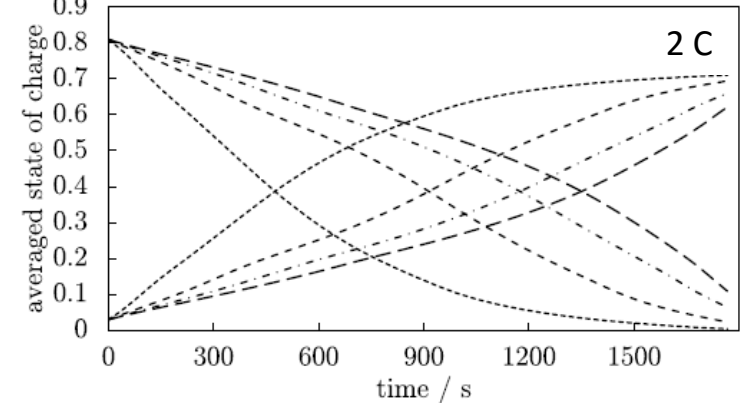
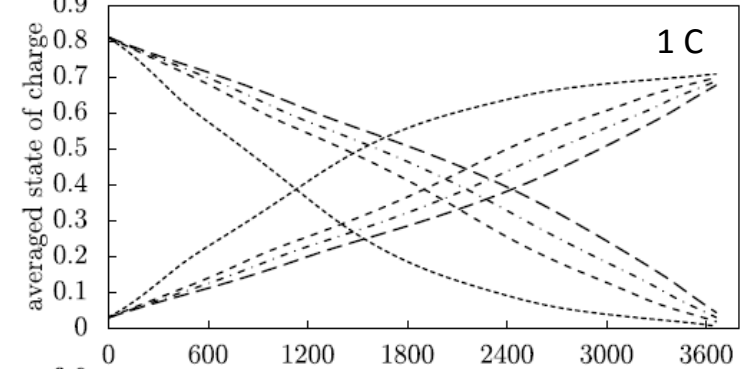
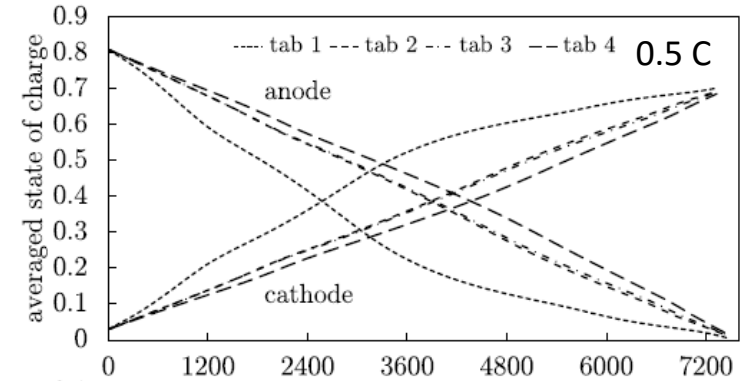


Innerer
Aufbau

Temperat-
entwicklung bei 2 C
für 100%, 50 %
und 0% SoC



SoC Verteilung während Entladung

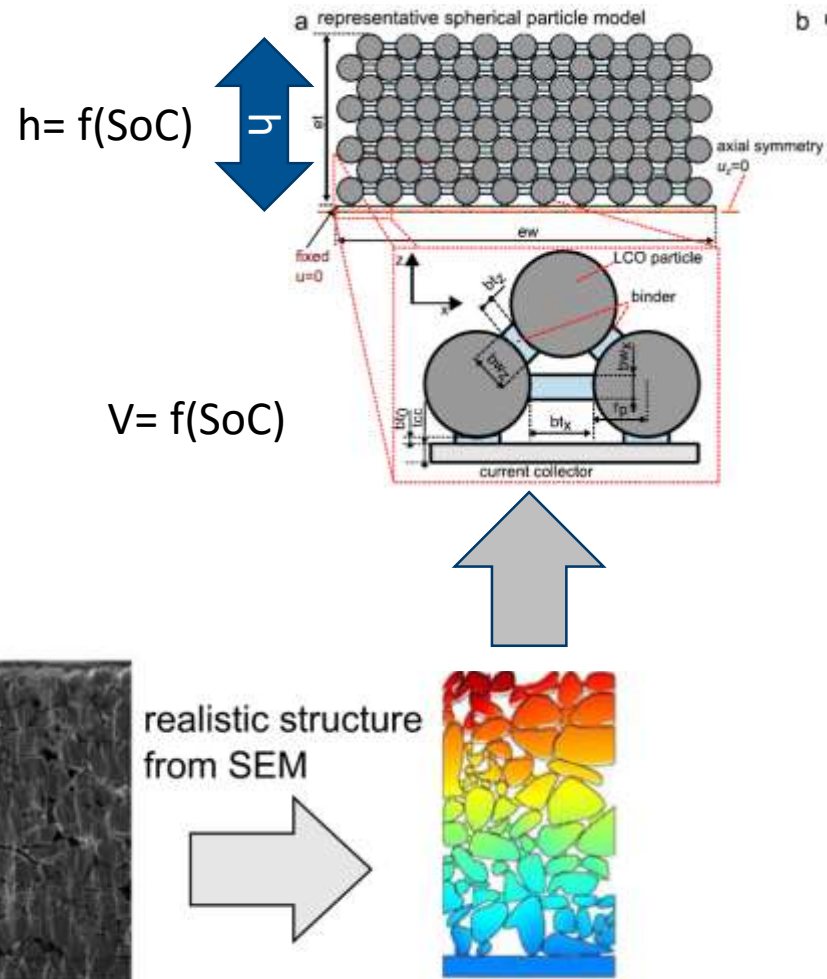
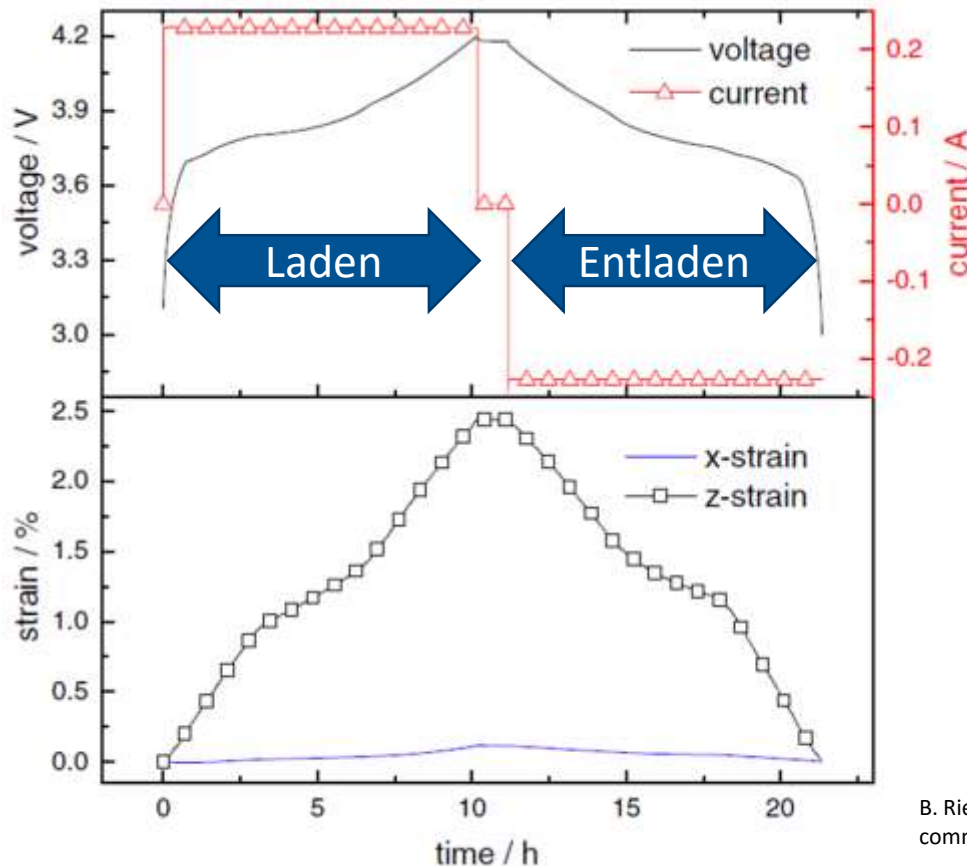


S. V. Erhard, P. J. Osswald, J. Wilhelm, A. Rheinfeld, S. Kosch, and A. Jossen, Simulation and Measurement of Local Potentials of Modified Commercial Cylindrical Cells- II: Multi-Dimensional Modeling and Validation, Journal of The Electrochemical Society, 162 (14) A2707-A2719 (2015)

Ersatzschaltbildmodelle

Mikromechanisches Modell einer Elektrode

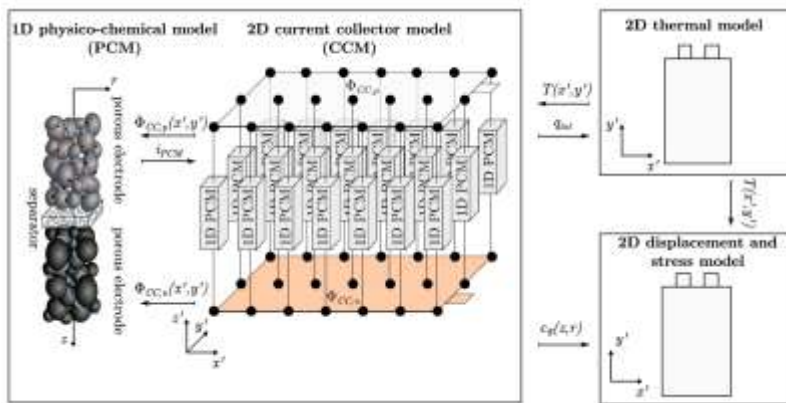
Dickenänderung einer Li-Ionen Zelle



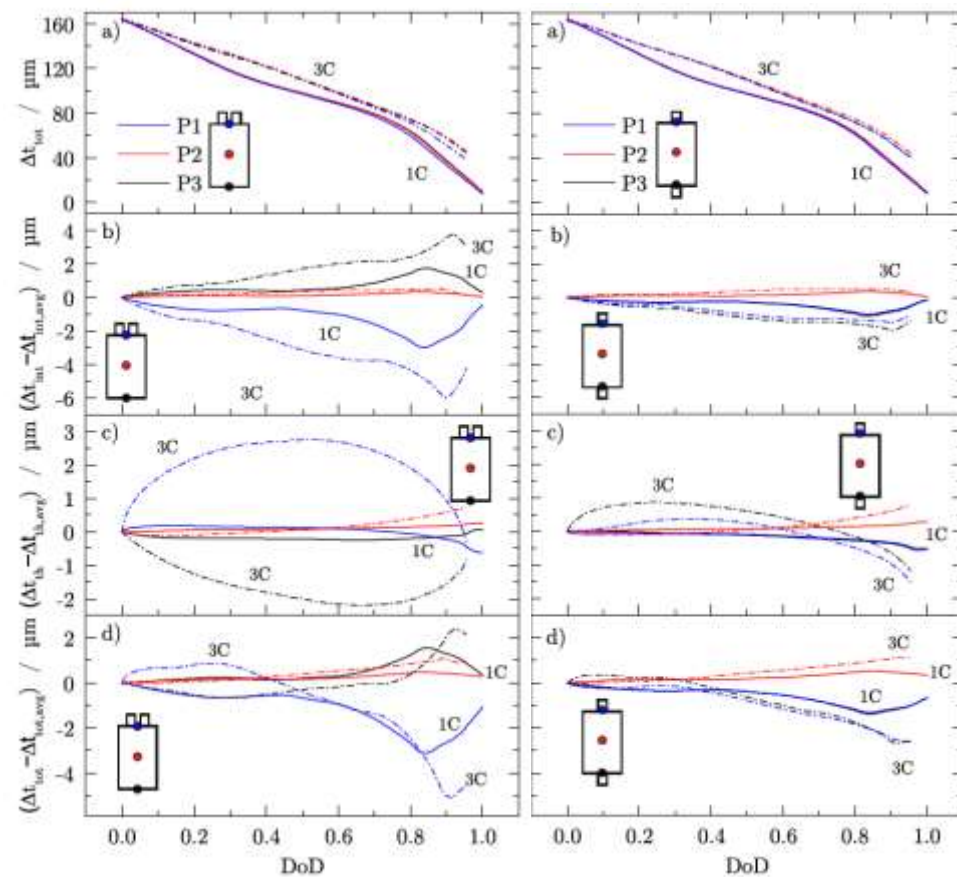
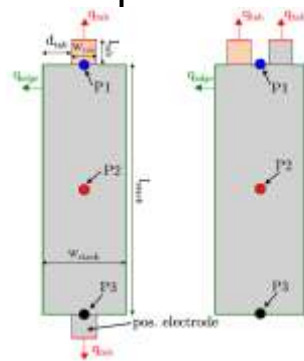
B. Rieger, S.V. Erhard, K. Rumpf, A. Jossen, „A new method to model the thickness change of a commercial pouch cell during discharge“, J. Electrochem. Soc. 163 (2016) A1566-A1575

Ersatzschaltbildmodelle

Newman Modell erweitert um ein mikromechanisches Modell



Erlaubt die lokale Volumenarbeit zu berechnen. Hier am Beispiel zweier Zelldesigns:



B. Rieger, S.V. Erhard, M. Venator, S. Kosch, A. Rheinfeld, A. Jossen, „Multi-Dimensional modeling of the influence of cell design on temperature, displacement and stress inhomogeneity in large-format lithium-ion cells“, J. Electrochem. Soc., accepted

Hybride Speichersystems

Hybride Speichersysteme

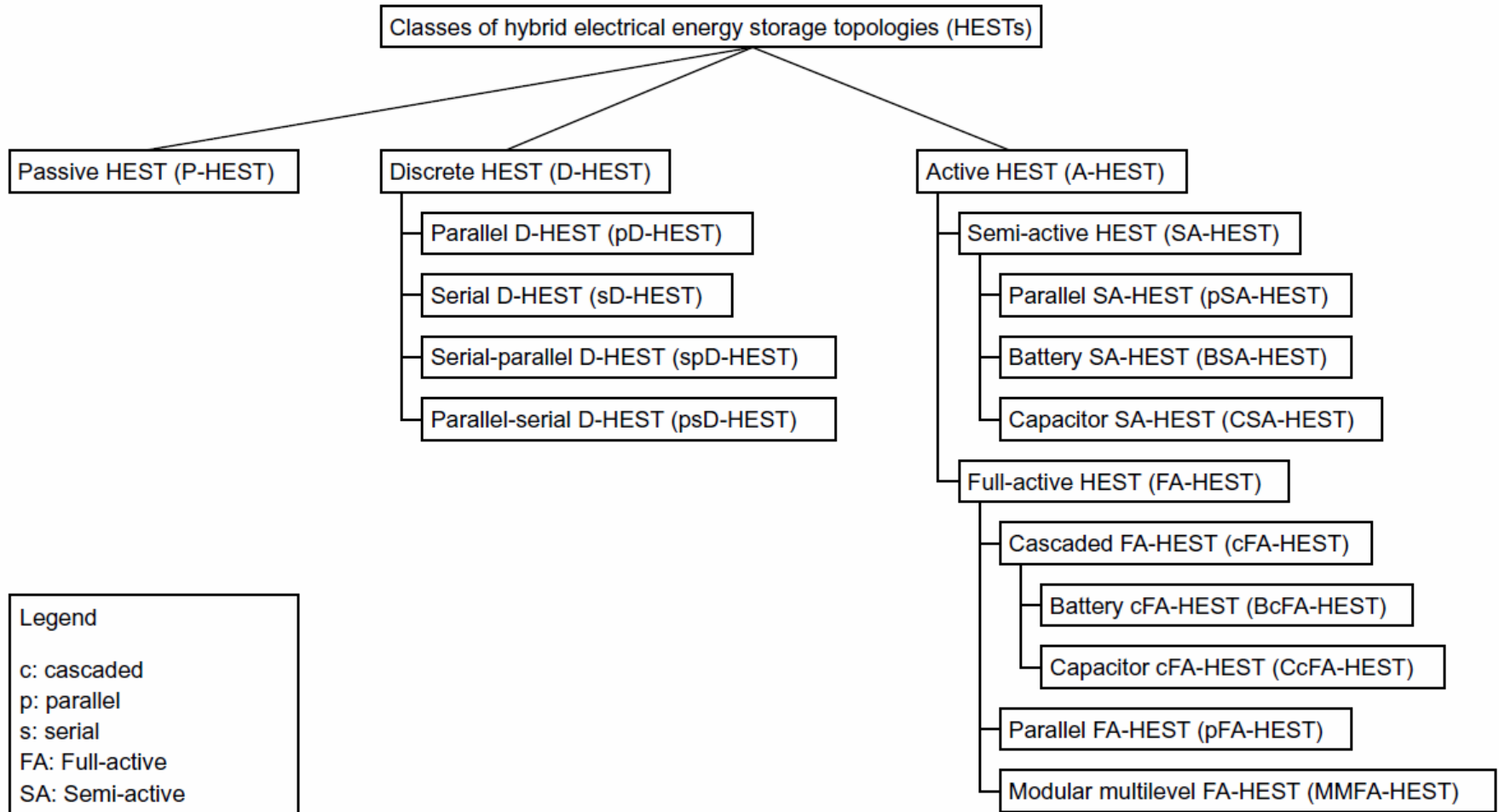
- Verwendung unterschiedlicher Speichersysteme innerhalb eines Gesamtspeichers
 - Kombination der Vorteile der einzelnen Technologien
 - Vermeidung von Nachteilen
 - Darstellung eines Speichers mit Performanceeigenschaften, wie sie für einzelne Technologien nicht verfügbar sind.
- Beispiele
 - Kombination eines Hochenergie- und eines Hochleistungsspeichers

HE Li-Ion -- DLC

- Kombination eines zyklenfesten Systems (teuer) mit einem System mit hoher Kalendarischer Lebensdauer/schlechter Zykluslebensdauer (preiswert)

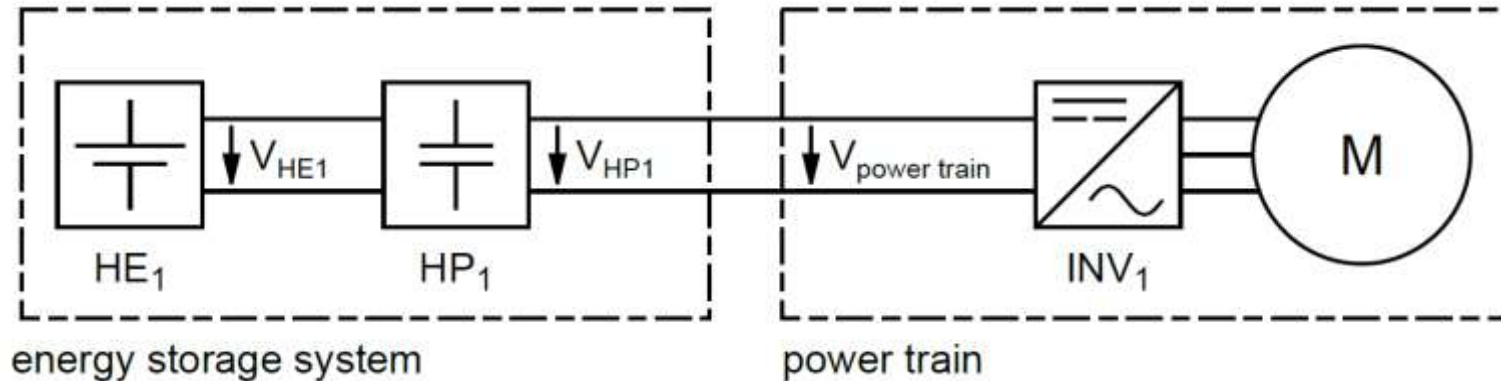
Lithium-Ion -- Bleibatterie

Topologien hybrider Energiespeicher

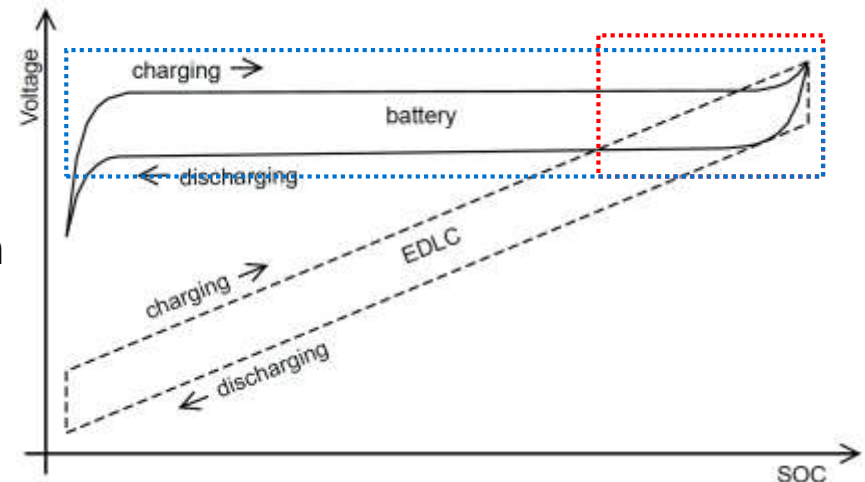


T. Zimmermann, Peter Keil, Markus Hofmann, Max F. Horsche, Simon Pichlmaier, Andreas Jossen / Journal of Energy Storage 8 (2016) 78–90

Hybride Energiespeichersysteme – Passive Topologie

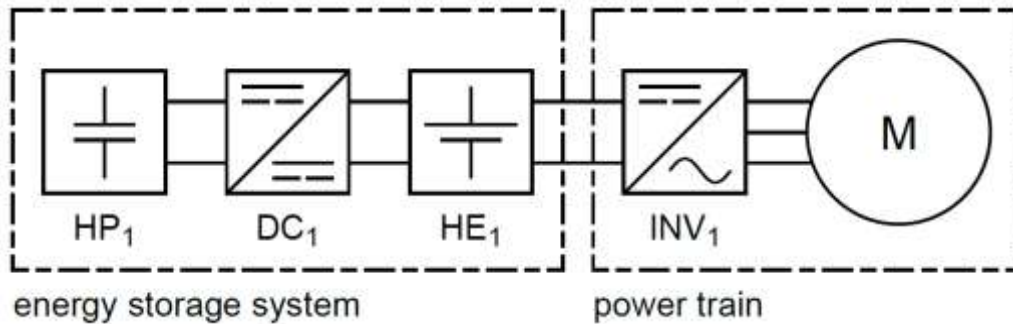


- Parallelschaltung der Speicher
- Keine aktive Steuerung/Regelung
- Die Aufteilung der Leistung ergibt sich aus den Spannungs-/Widerstandskurven
- Ausnutzung des DLC in der Regel schlecht.

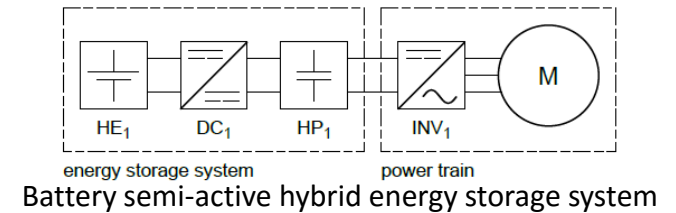


Hybride Energiespeichersysteme – Semi-aktive Topologie

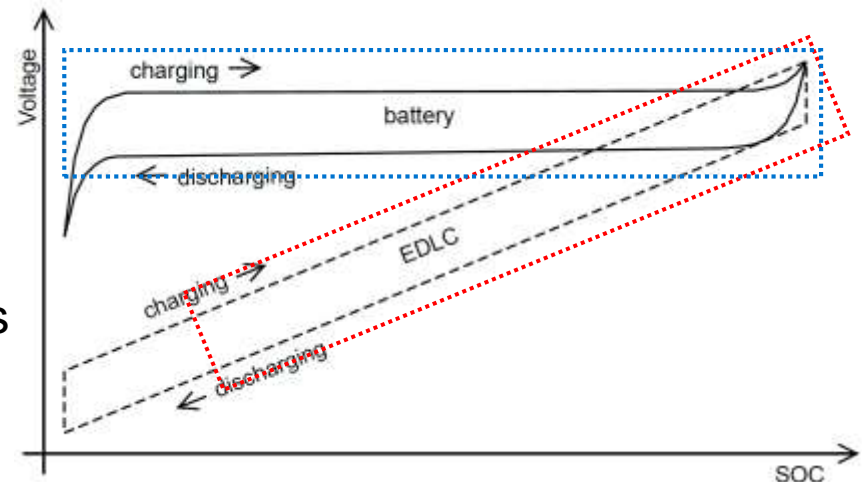
Capacitor semi-active hybrid energy storage system



Alternatively possible

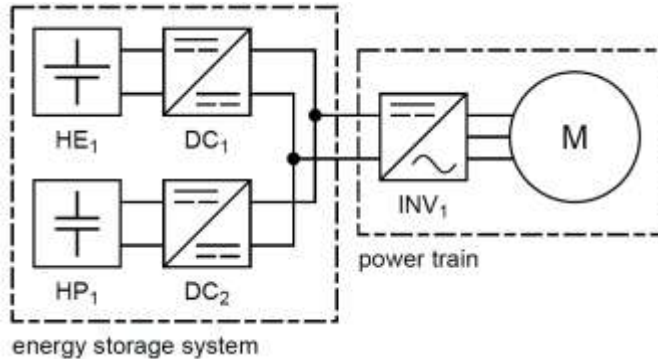


- Entkopplung beider Systeme durch einen dc/dc Wandler
- Aktive Kontrolle möglich
- Zusätzliche Verluste im Wandler
- Bessere Ausnutzung des dc/dc Wandlers

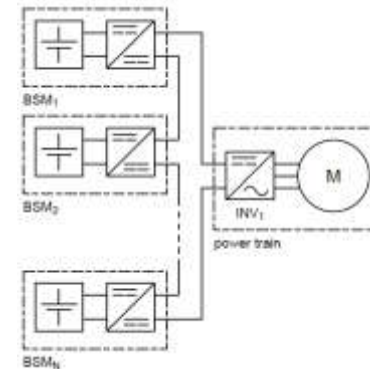


Hybrid energy storage systems – Full-active topology (example)

Parallel full-active hybrid energy storage system

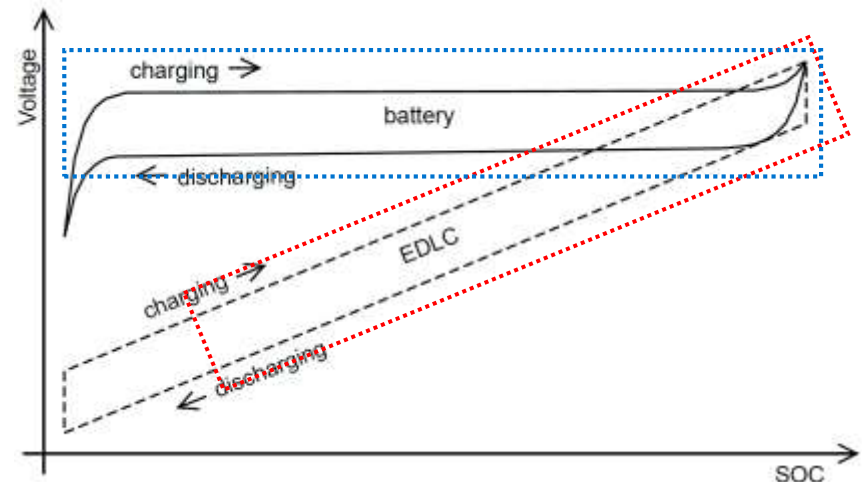


Alternatively possible



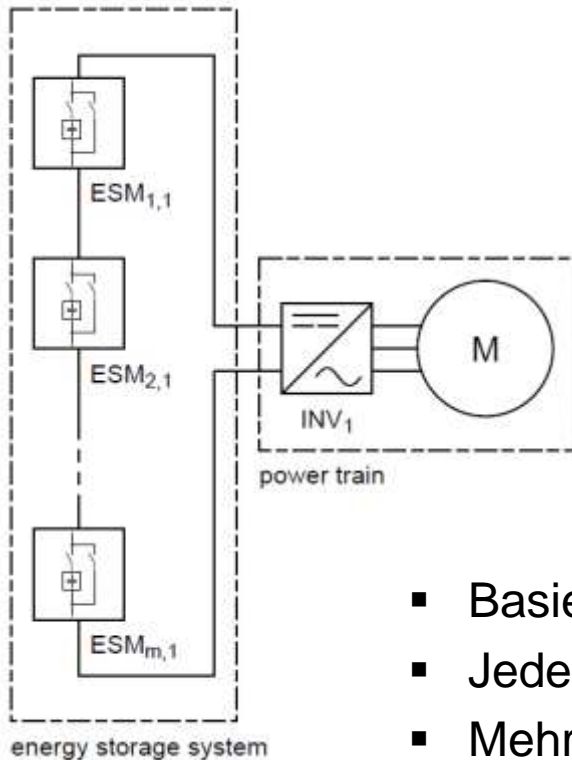
Modular multilevel full-active hybrid energy storage topology

- Entkopplung der Speichersysteme durch dc/dc Wandler
- Aktive Regelung aller Speicher möglich
- Zusätzliche Wandlerverluste
- Maximale Ausnutzung des Speichers möglich

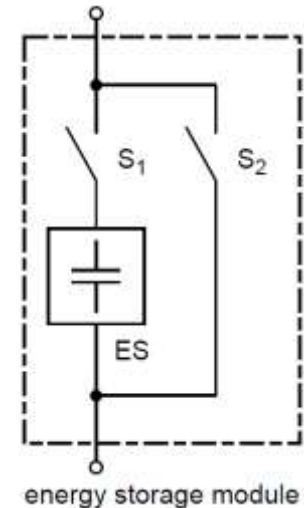


Hybrid energy storage systems – Discrete topologies

Serial discrete hybrid energy storage topology



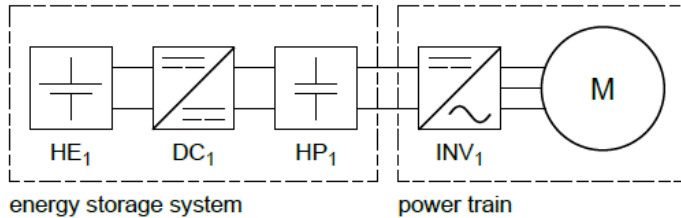
Active energy storage module or cell



- Basiert auf aktiven Modulen/Zellen
- Jedes Modul hat 3 Zustände, ein, aus, gebrückt
- Mehr Module/Zellen als für die Spannung erforderlich n notwendig, m ($m > n$) verwendet, nur n gleichzeitig aktiv
- Maximale Ausnutzung aller Zellen/Module möglich
- Unterschiedliche Betriebsstrategien denkbar.

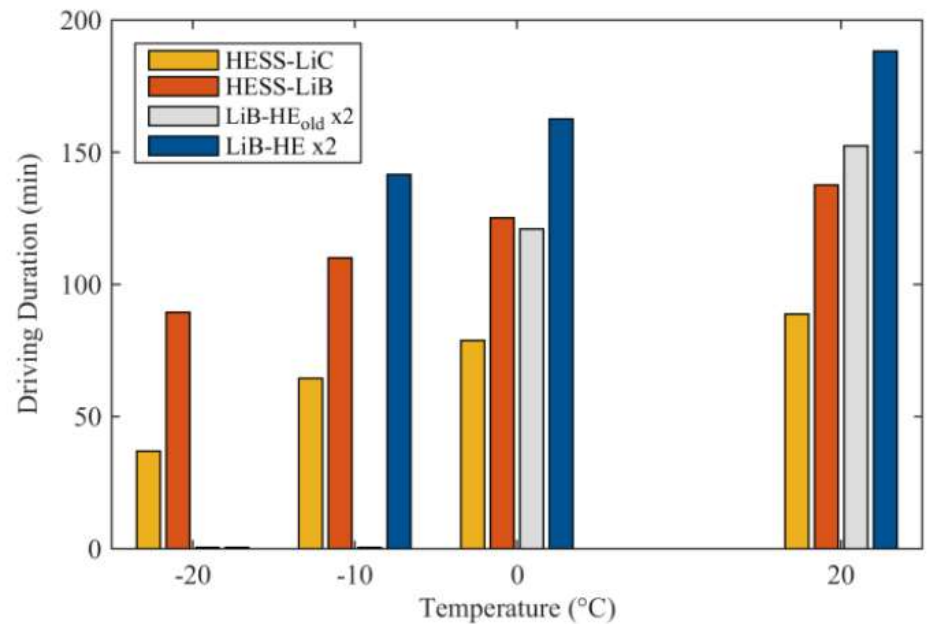
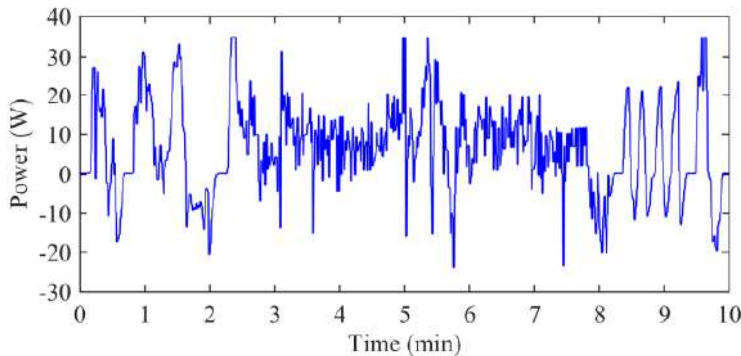
Hybride Energiespeichersysteme – Semi-aktive Topologie

Untersuchungen für unterschiedliche Hybridsysteme in einem Fahrzeug



Randbedingungen:

- Identisches Volumen der Speicher
- Fahrzyklus US06



Peter Keil, Matthias Englberger, and Andreas Jossen, Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles: An Experimental Analysis of Performance Improvements at Subzero Temperatures, IEEE Transactions 2016

Workshop Dezentrale Sektorkopplung und Hybride Energiespeichersysteme

Modellierung und Simulation moderner Batteriesysteme und hybrider Energiespeicher Topologien

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Prof. Dr.-Ing. Andreas Jossen
Technische Universität München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Lehrstuhl für Elektrische Energiespeichertechnik

Dresden, 15.11.2016

