

Aktive Balancing-Systeme für Lithium-Ionen Batterien und deren Auswirkungen auf die Zellalterung

Promotionsvortrag

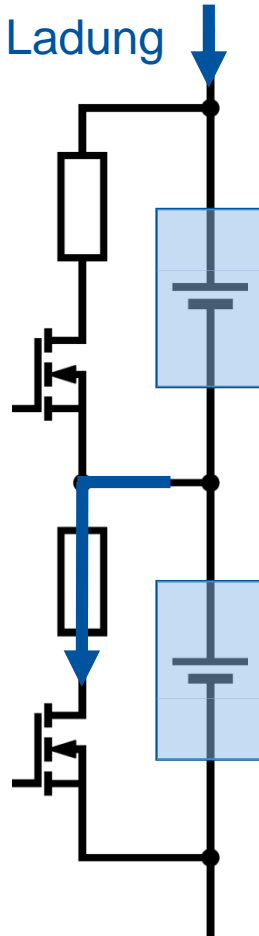
30.06.2017

Manuel Brühl

Passives Balancing

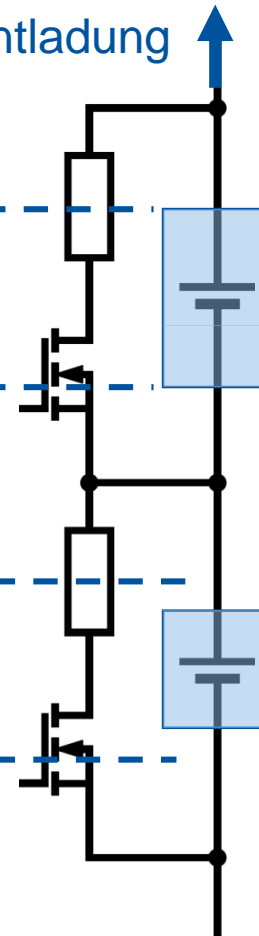
SOC Ausgleich

Ladung



ΔC Ausgleich nicht möglich!

Entladung



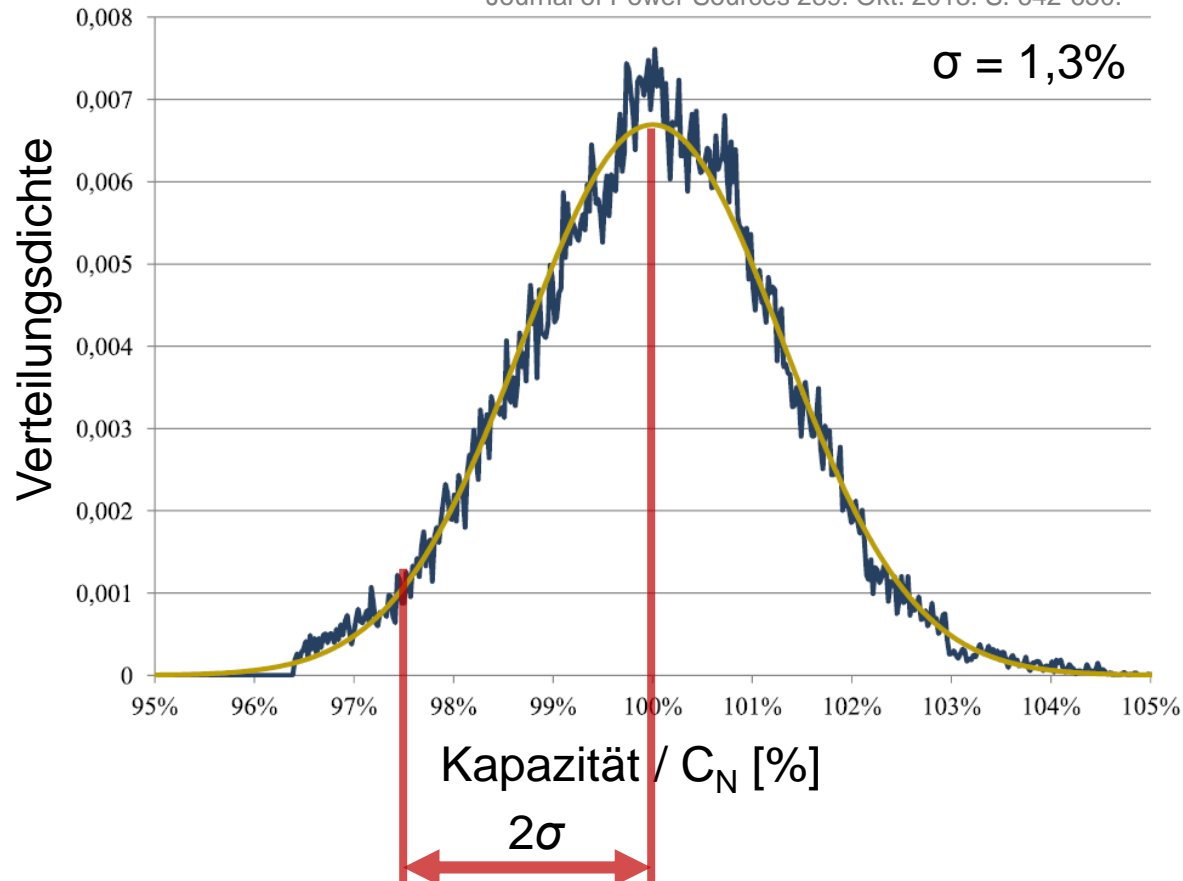
Ungenutzte Kapazität!

Aktives
Balancing

Welche Zellstreuung ist zu erwarten?

Kapazitäten von 20.000 neuen Zellen

Journal of Power Sources 239. Okt. 2013. S. 642-650.



Kapazitätsverlust: $\Delta s = 2,6\%$

Wahrscheinlichkeit, dass
eine Zelle $x < \mu - 2\sigma$
 $P_1 = 2,3\%$

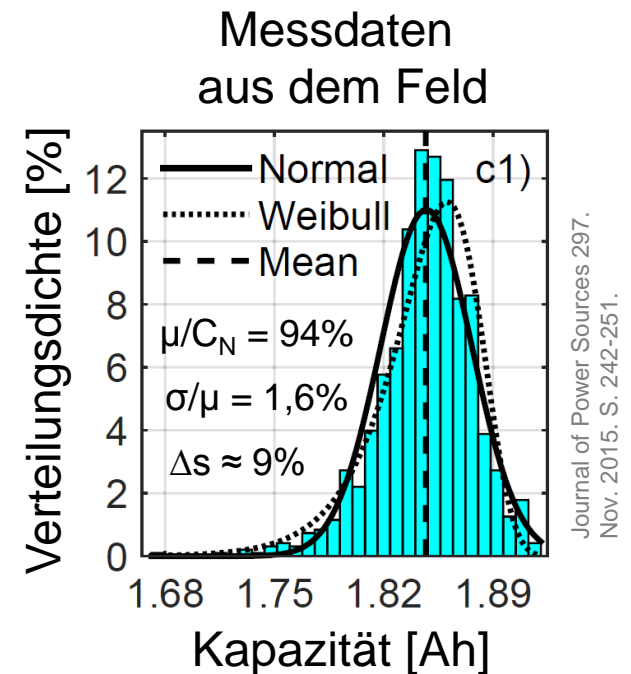
Wahrscheinlichkeit bei 100
Zellen, dass min eine Zelle
 $x < \mu - 2\sigma$
 $P_{100} = 1 - (1 - P_1)^{100} = 90\%$

Stärkere Ausreißer sind
bei vielen Zellen in Serie
sehr wahrscheinlich!

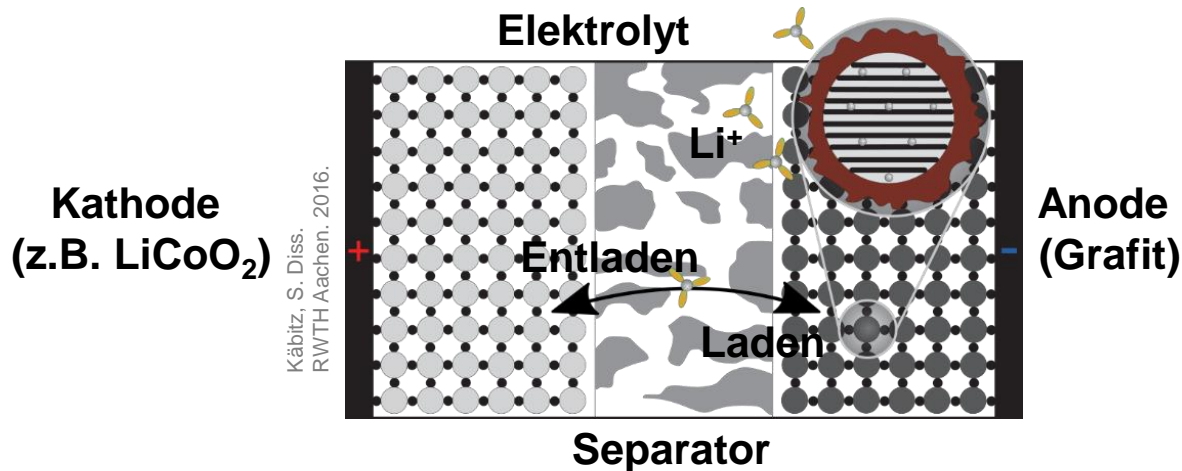
Einfluss auf die Streuung und deren Reduktion



- Verbesserte Produktionsqualität
- Aussortieren von schlechten Zellen
- Verbesserte Kühlung
- Erkennen von Ausreißern und austauschen von Zellen bzw. Modulen
- Mittelung durch Parallelschaltung von Zellen
- **Beeinflussung der Zellalterung durch Veränderung der Zellbelastung**
- **Umladen der Zellen im Betrieb durch aktives Balancing**

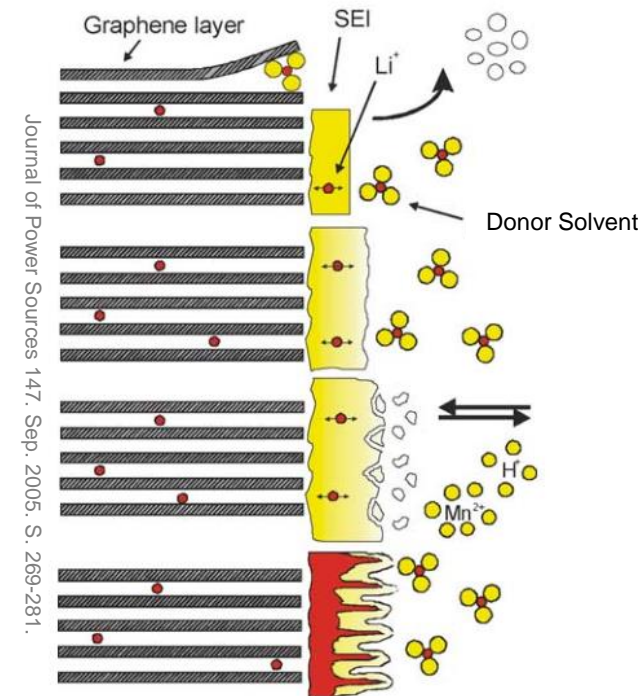


Zellaufbau und Alterungsmechanismen



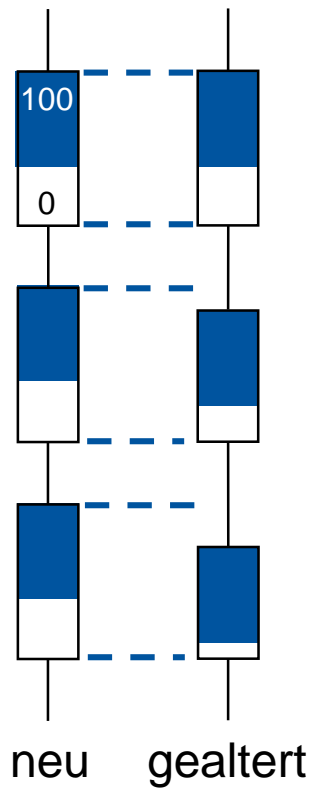
■ Verstärkte Alterung

- hohe Entladetiefen (DODs)
- hohe Zellspannungen bzw. Ladezustände (SOCs)
- hohe Temperaturen

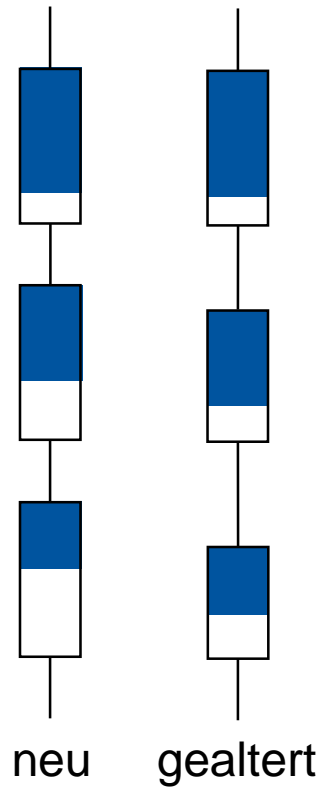


Fragestellung – Zellalterung im Serienbetrieb?

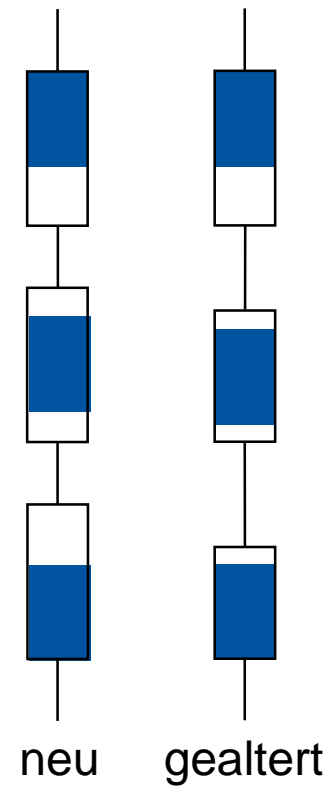
Referenz-
Test



DOD (Entladetiefe)-
Anpassung

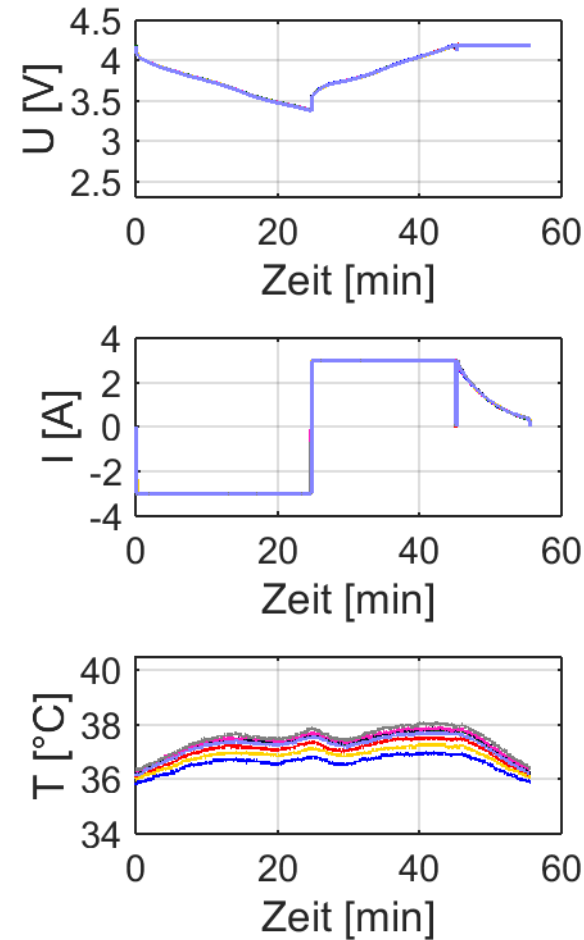


ΔU -
Anpassung

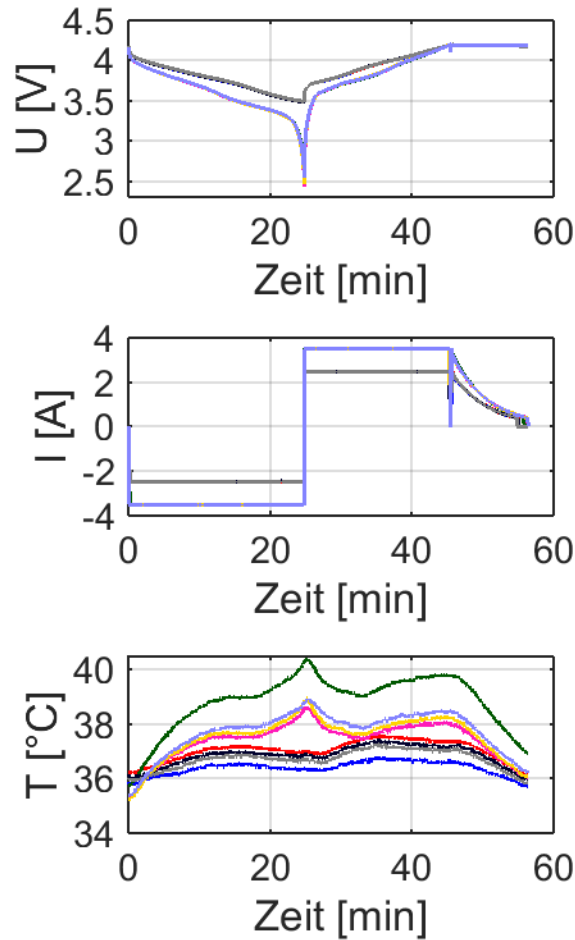


Beispiel-Zyklus der drei Tests

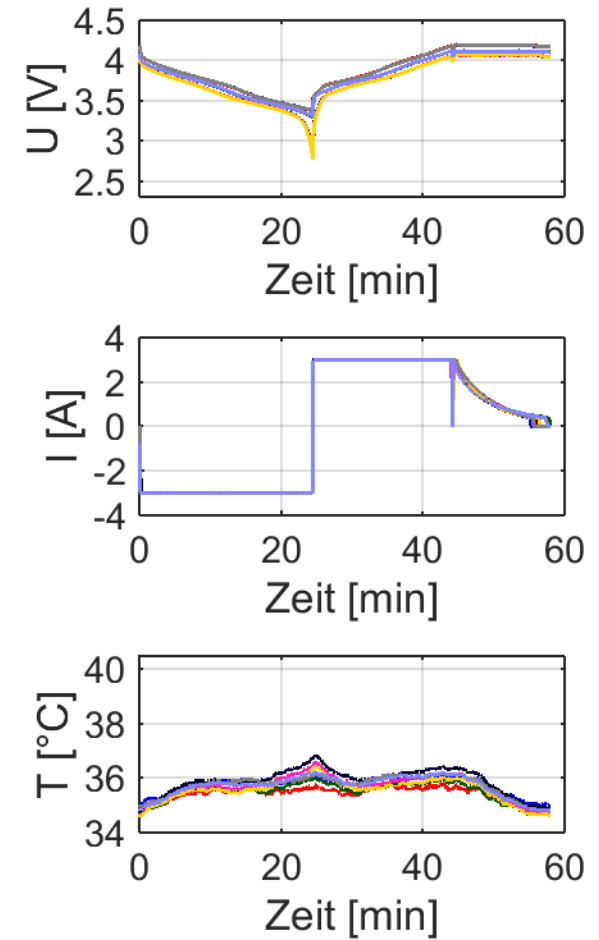
**Referenz-
Test**



**DOD-
Anpassung**



**ΔU -
Anpassung**



Verlauf der Entlade-Kapazitäten und deren Streuung

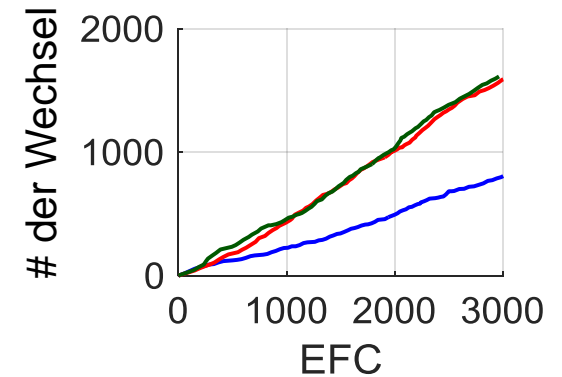
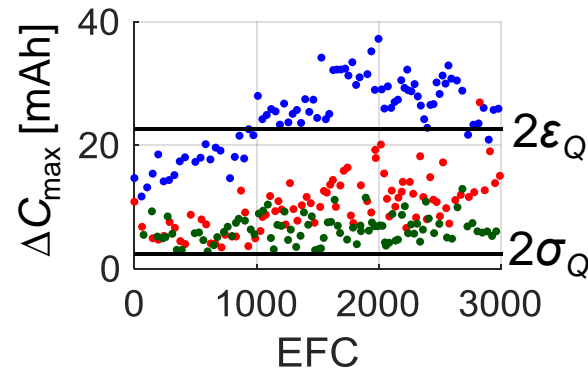
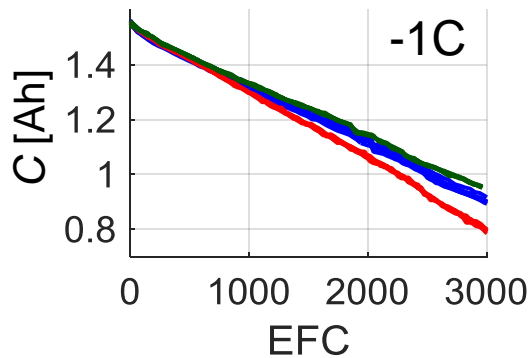
Referenz



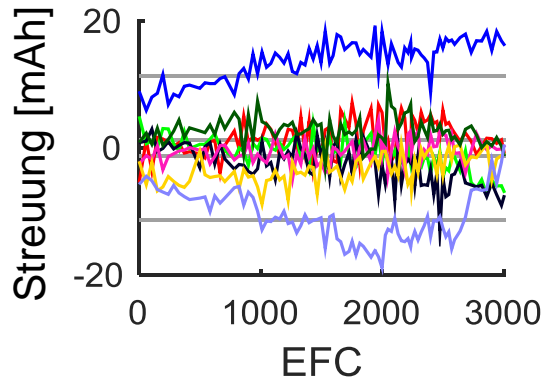
DOD



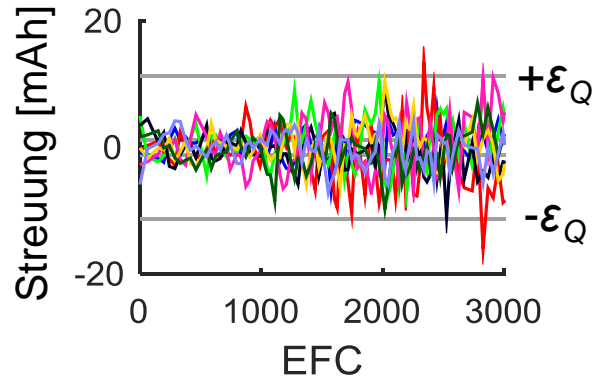
ΔU



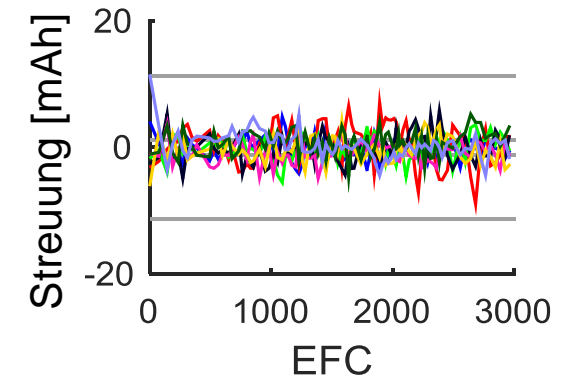
Referenz



DOD



ΔU



Verlauf der Lade-Kapazitäten und Entlade-Pulswiderstände

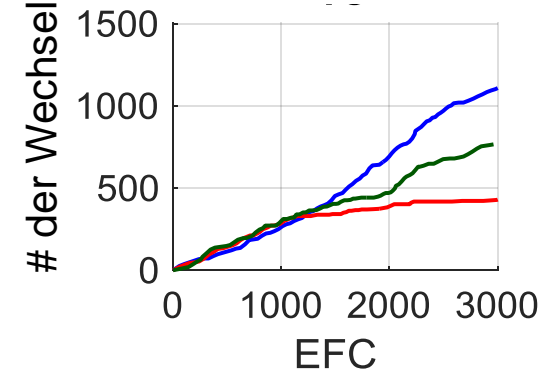
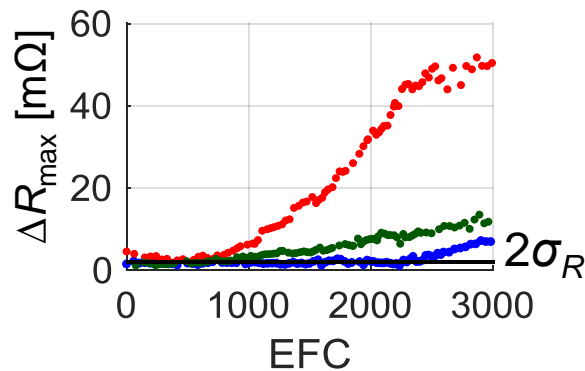
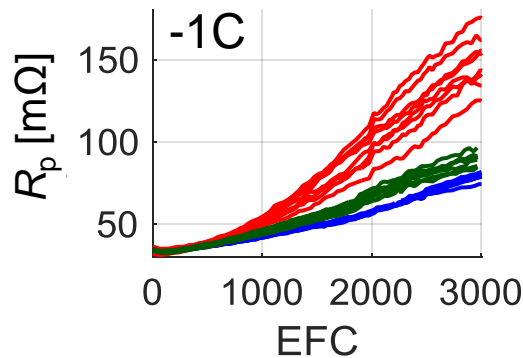
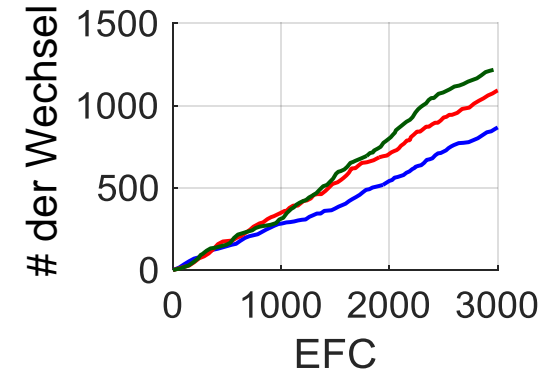
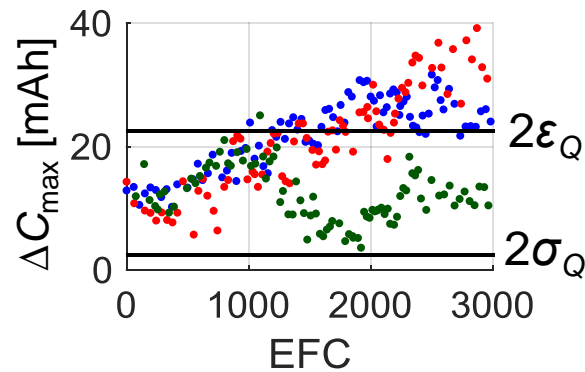
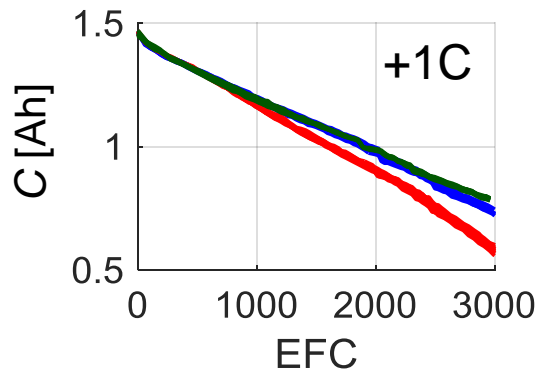
Referenz



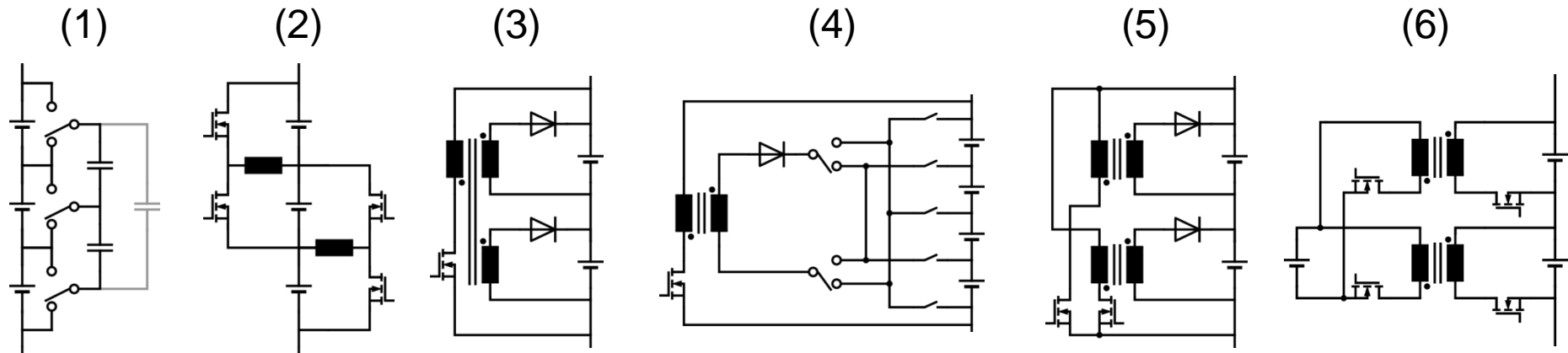
DOD



ΔU



Anforderungen an das aktive Balancing



■ Basis-Anforderungen zum SOC-Abgleich

- Robust gegen kritische Fehler (Zellkurzschluss, Zellüberladung)
- Umladen auch zwischen Modulen möglich
- günstig, klein, (leicht)
- Modular erweiterbar (für große Zellstränge), einfach kontaktierbar
- gleichmäßige Bauteilbelastung (Spannungsfestigkeit)

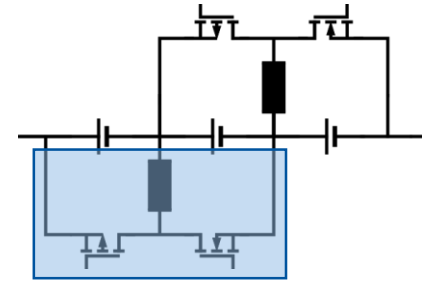
■ Anforderung zum Ausgleich von Kapazitätsunterschieden im Betrieb

- Zellspannungsunabhängiges Umladen
- schnelles Ausgleichen von schlechten Zellen
- hoher Wirkungsgrad

Hardware-Entwicklung der Zelle ↔ Zelle Topologie

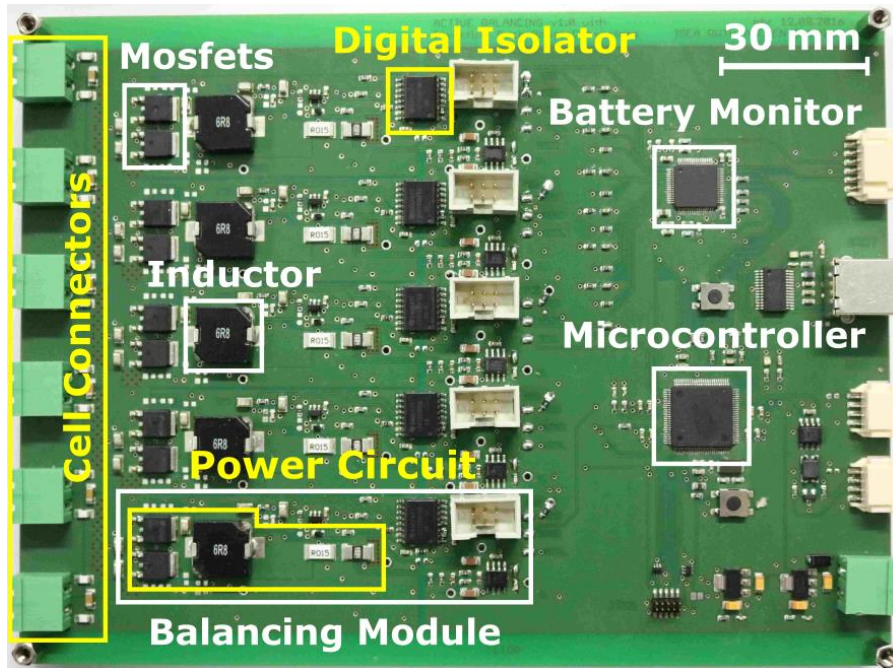
■ Ziele:

- hoher Wirkungsgrad
- Konverter-Ansteuerung

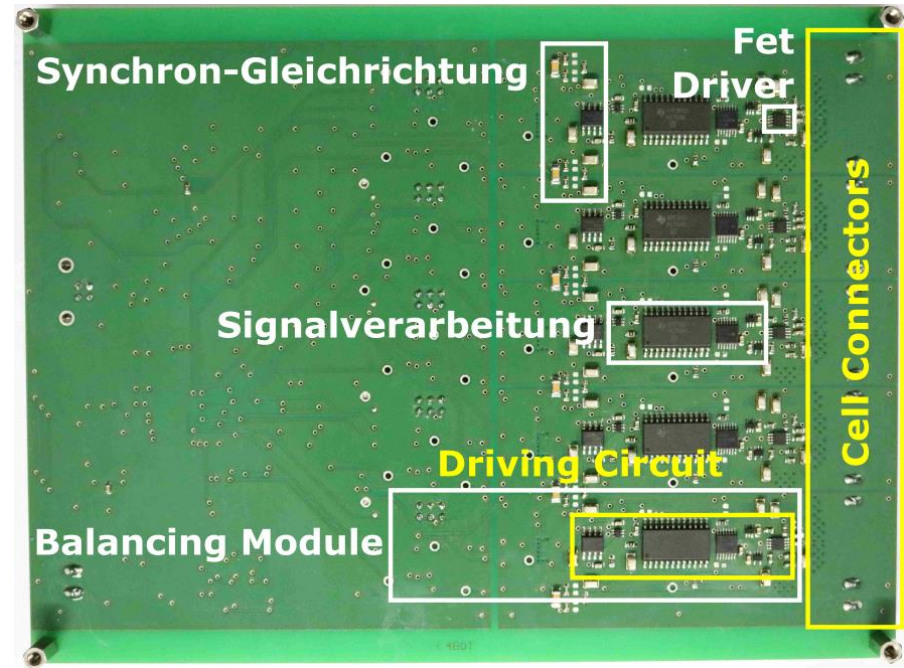


Balancing-Module

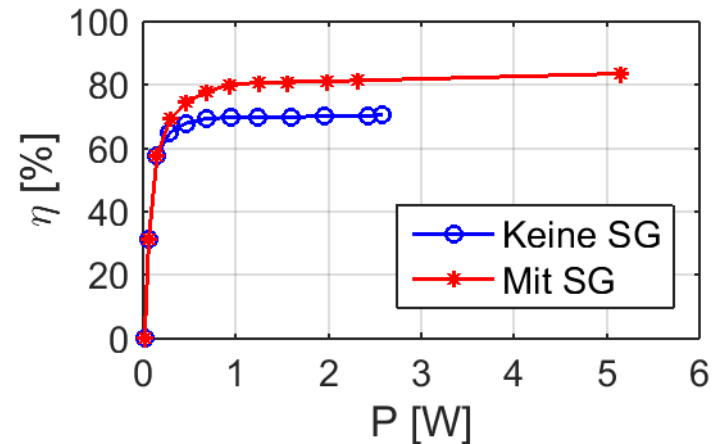
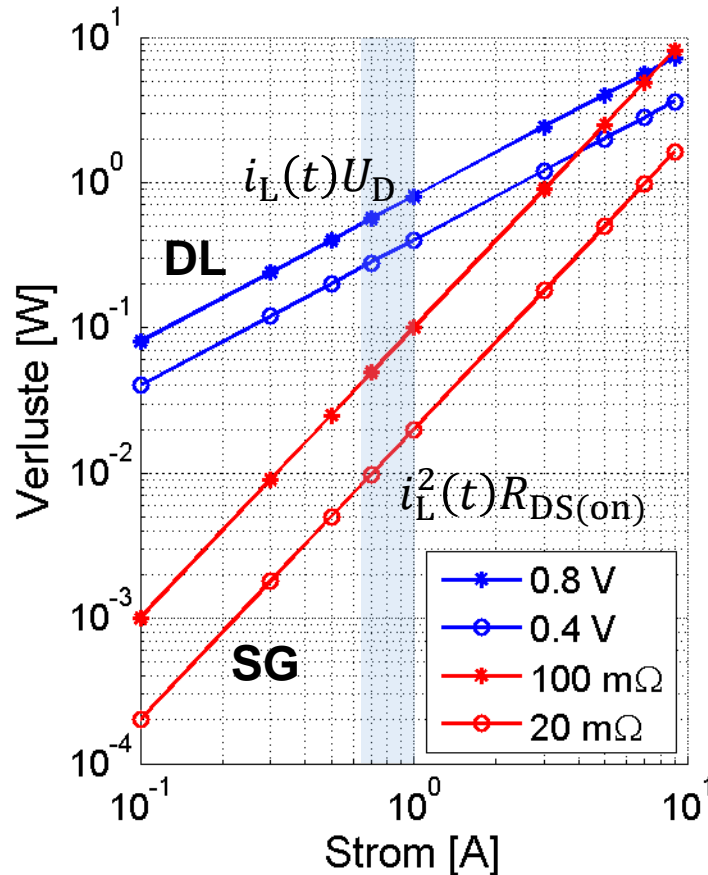
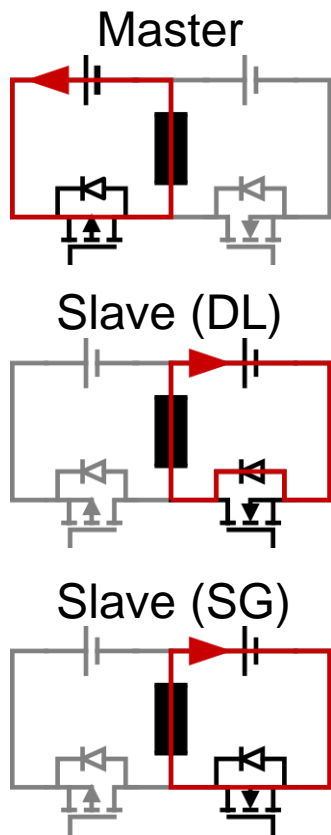
TOP



BOTTOM



Dioden-Leitung (DL) vs. Synchron-Gleichrichtung (SG)



	Body-Diode	Schottky-Diode
U_D	0,8 bis 1 V	0,4 bis 0,5 V
I_{leak}	< 1 μA	> 100 μA

Zusammenfassung und Ausblick

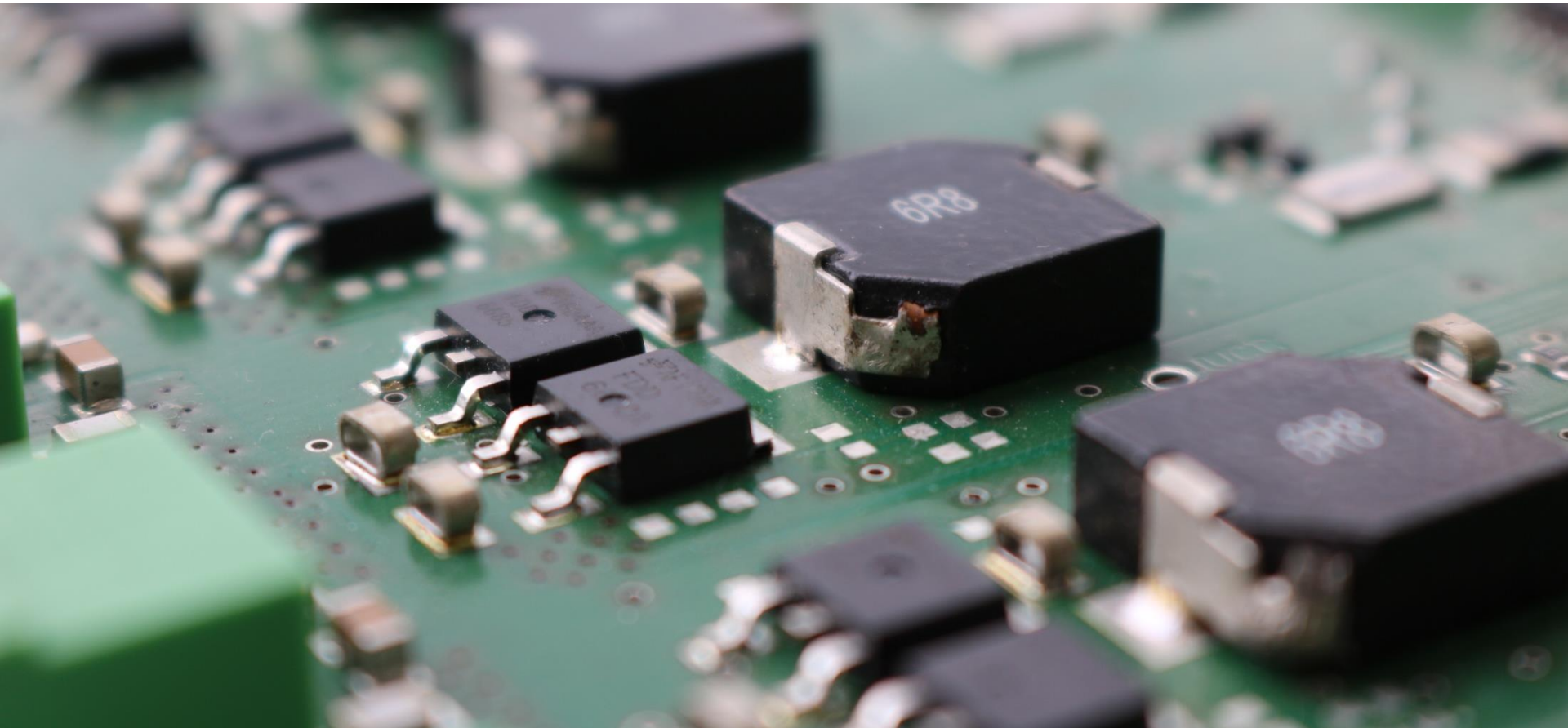
■ Zellstreuung

- Streureduktion funktionierte nur eingeschränkt
 - mit umgekehrter Sortierung
 - ohne Erreichen der Zellbetriebsgrenzen
- Zellstreuung bei diesen Zellen sehr gering ($\Delta s < 1,5\%$)
 - mit Pouchzellen?
- Einzelzellzustandsschätzung mit Angabe der Fehlergrenzen
 - Zellstreuung im Feld und Detektieren von Ausreißern

■ Aktives Balancing

- Hardware-Entwicklung: $\eta = 80\%$
 - Wirkungsgrad im realen Betrieb?
 - Einfluss des Stromrippels auf Zellalterung?
 - Vereinfachung der Spannungsversorgungen und PWM-Übertragung

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit





Aktive Balancing-Systeme für Lithium-Ionen Batterien und deren Auswirkungen auf die Zellalterung

Promotionsvortrag

30.06.2017

Manuel Brühl

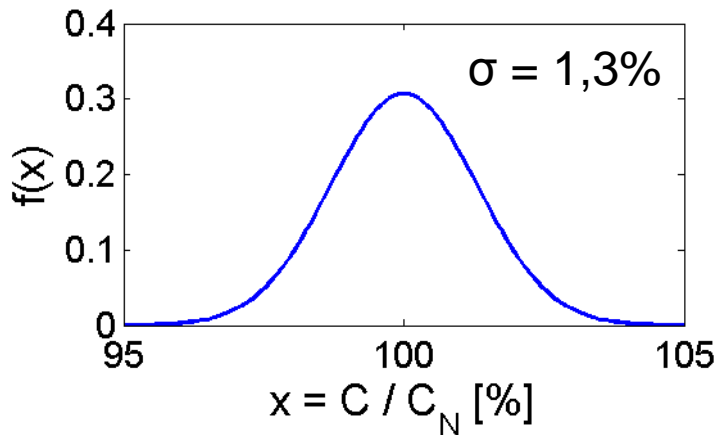


Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

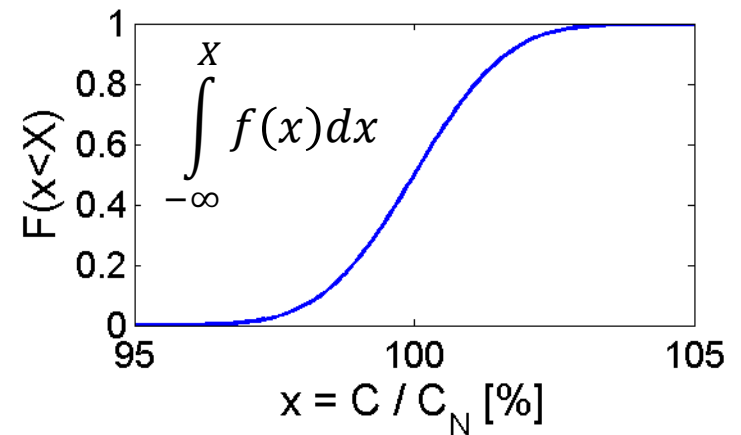


Welche Zellstreuung ist zu erwarten?

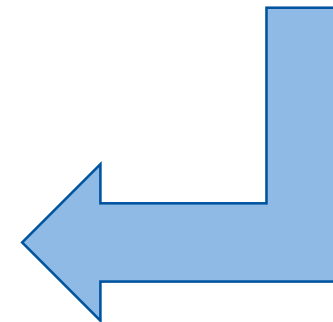
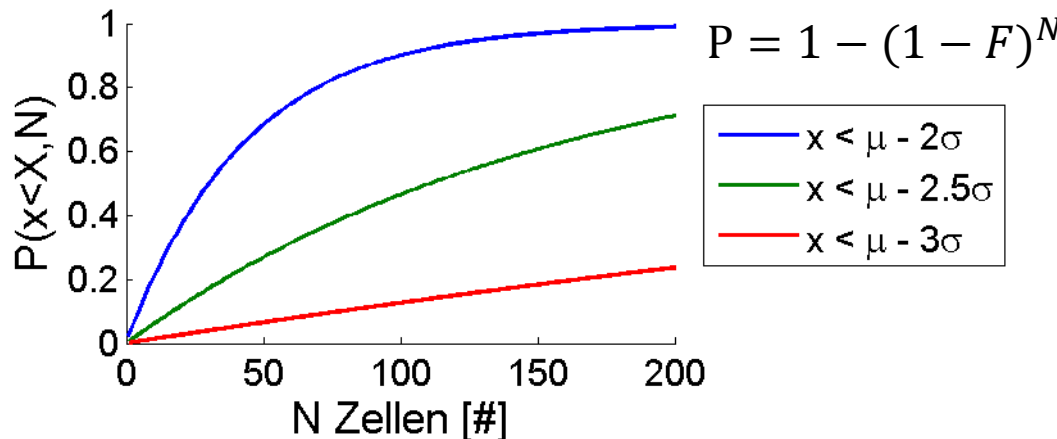
Wahrscheinlichkeitsdichte



Wahrscheinlichkeitsverteilung

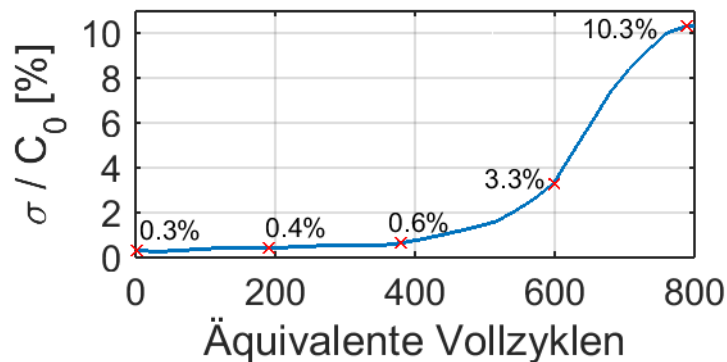
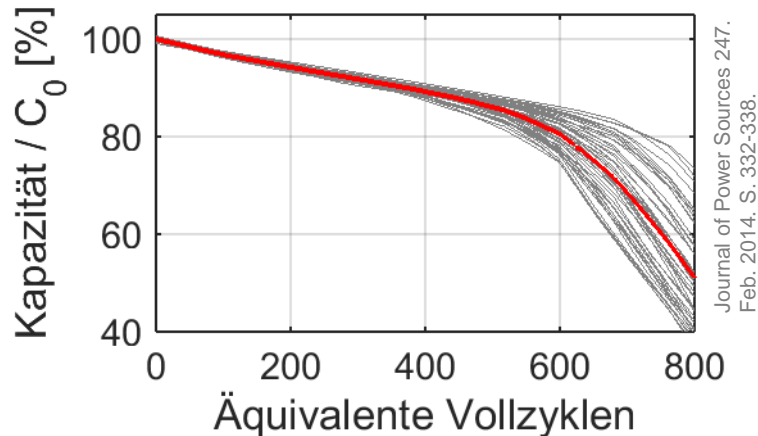


P für einen Ausreißer bei N Zellen

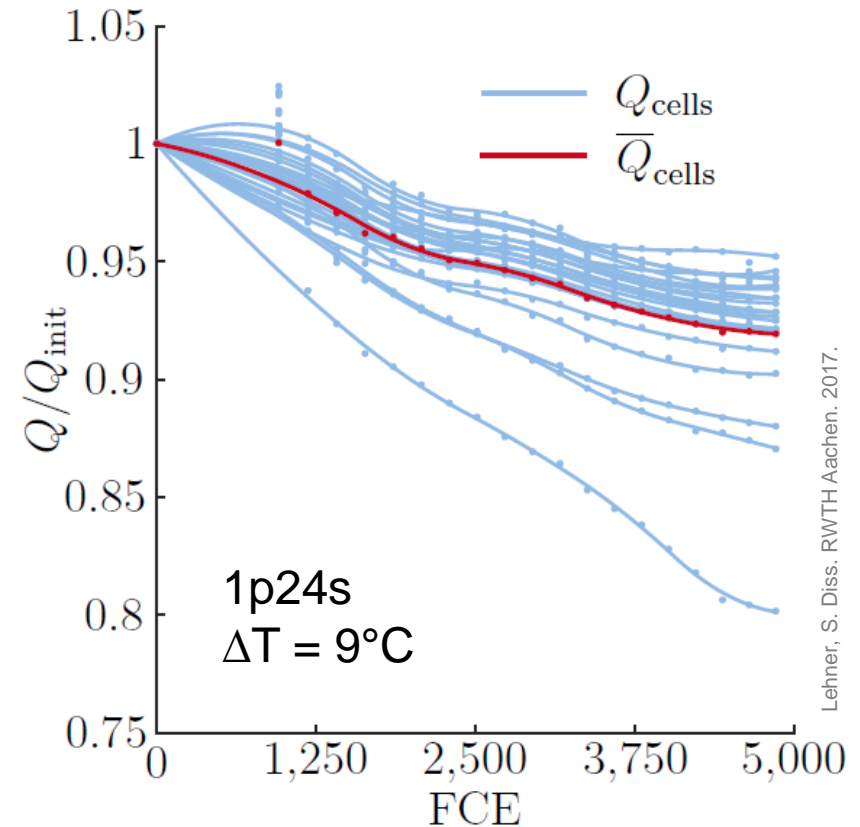


Experimentelle Alterungsuntersuchungen zur Zellstreuung bei zyklischer Belastung

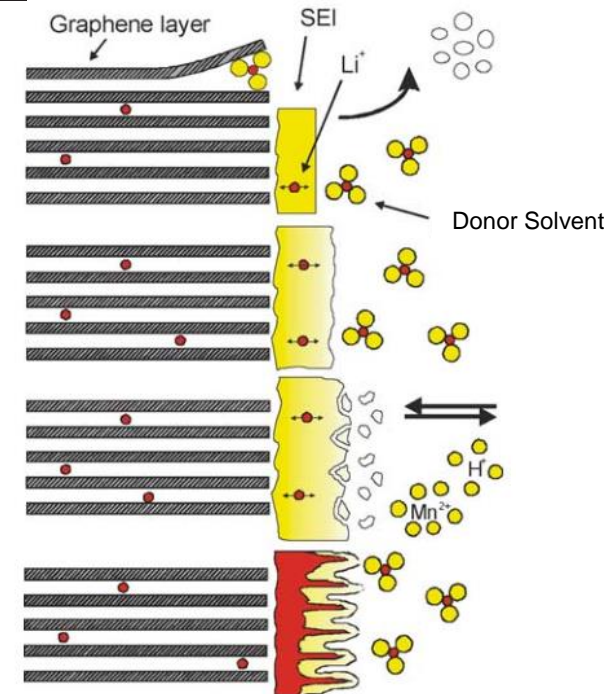
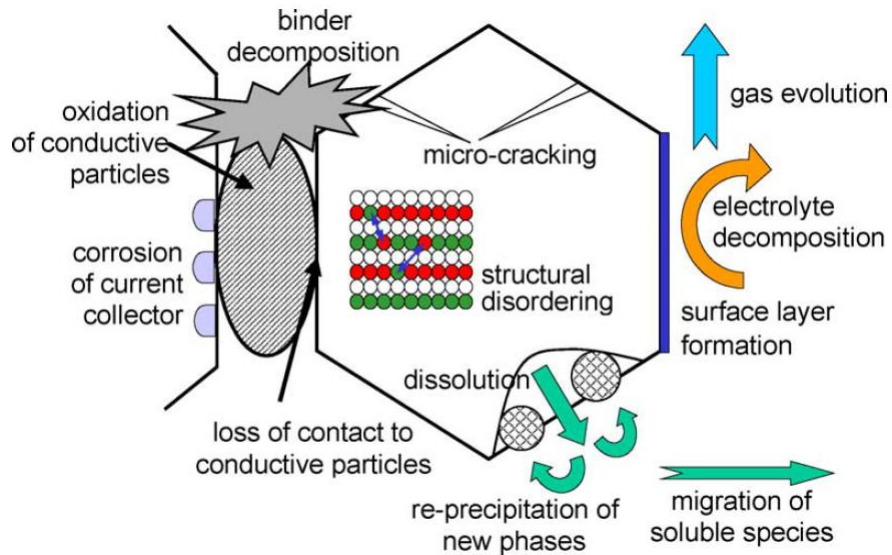
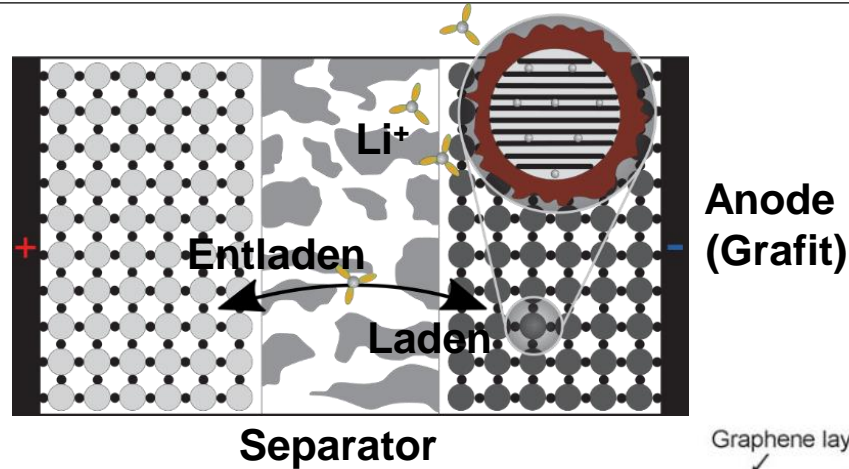
Natürliche Streuung während der Alterung



Streuung wegen Temperaturgradient



Zellaufbau und Alterungsmechanismen



Journal of Power Sources 147. Sep. 2005. S. 269-281.

Prüfstand für den Alterungstest



18650er Zelle von Samsung

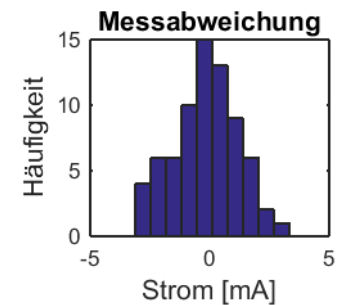
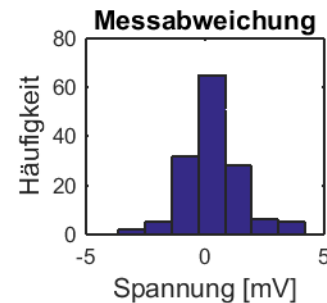
Aktivmaterial	Graphit NMC
Nennkapazität	1.5 Ah
Ladestrom	<4 A (2.7C)
Entladestrom	<18 A (12C)

Temperaturkammer (Binder)

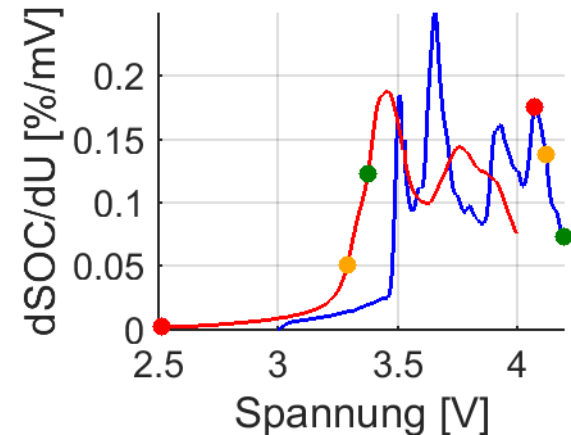
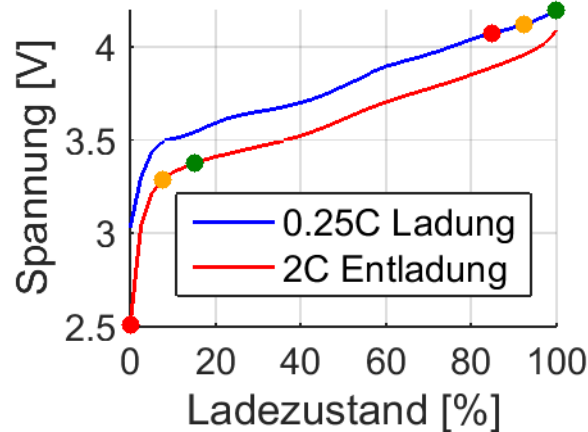
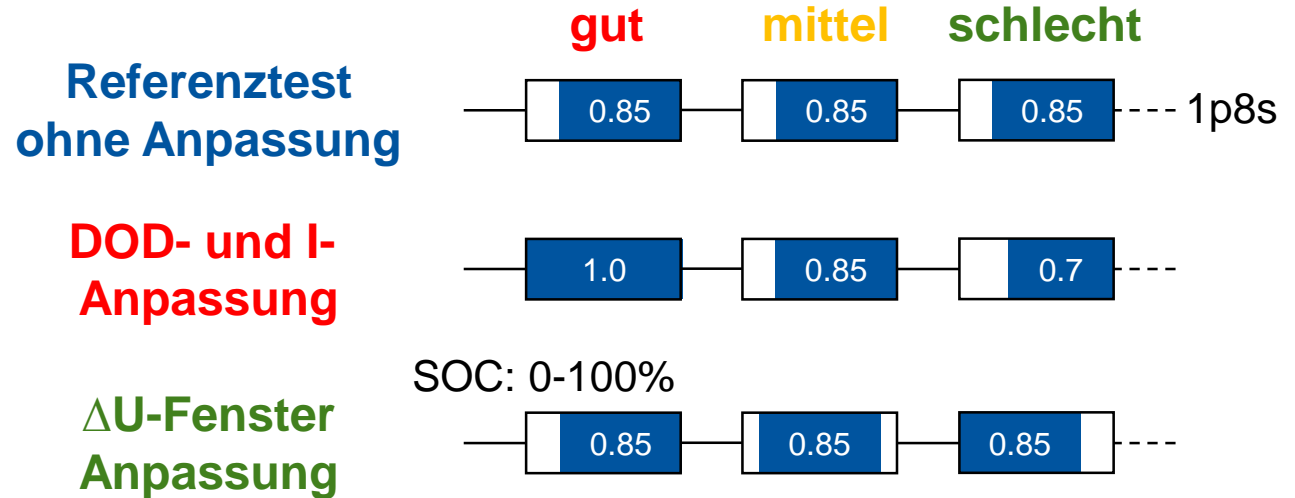
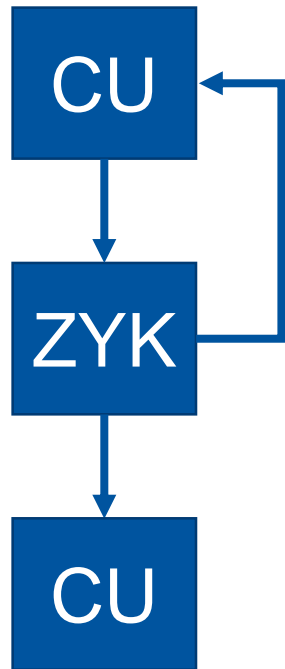
Temperatur	35 °C
Abweichung	±1 K

Zelltester (Digatron)

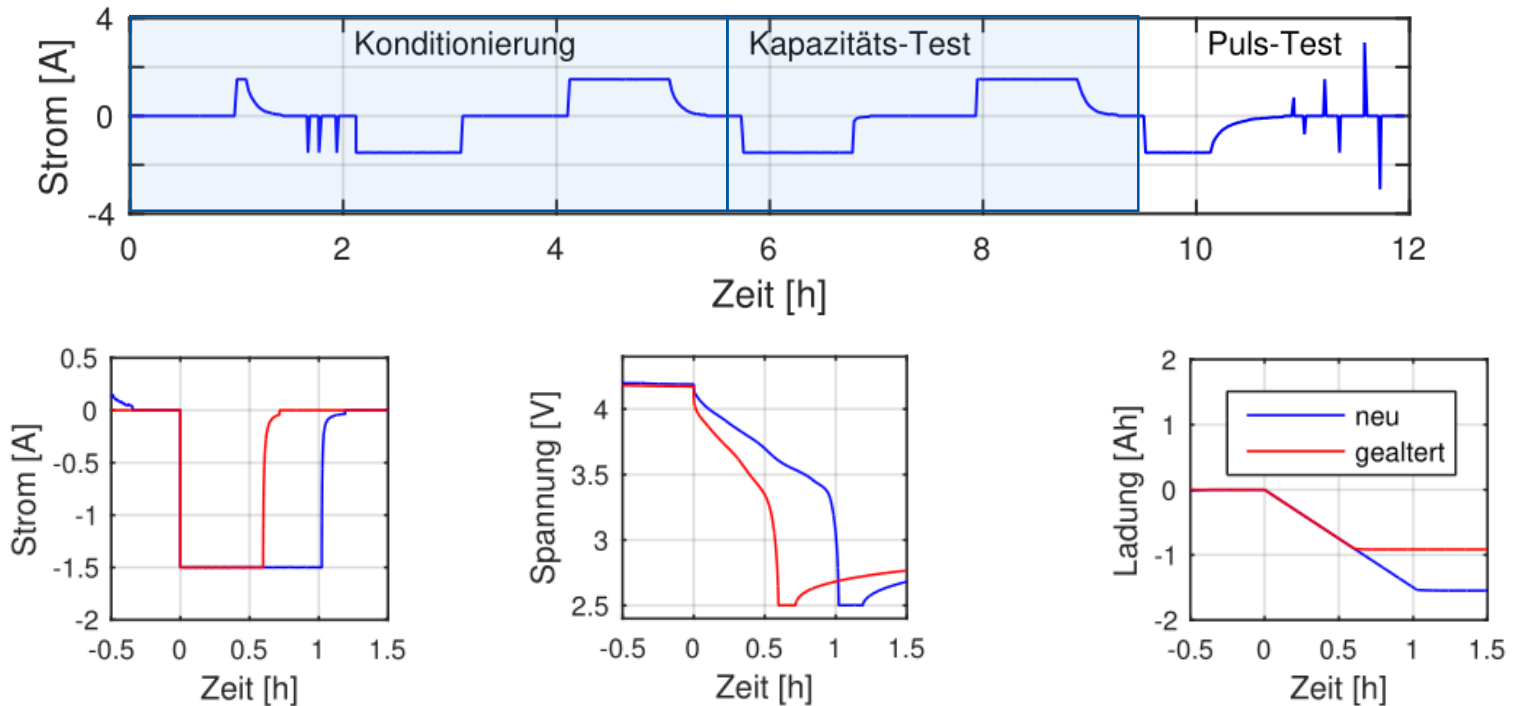
Messspannung	10 mV bis 5 V
Stell- & Messstrom	40 mA bis 20 A
Abtastzeit	>100 ms



Beeinflussung der Zellalterung zur Zellstreuungsreduktion



Check-Up-Test

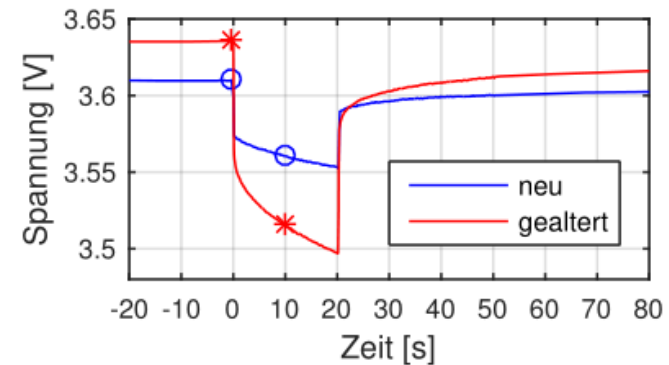
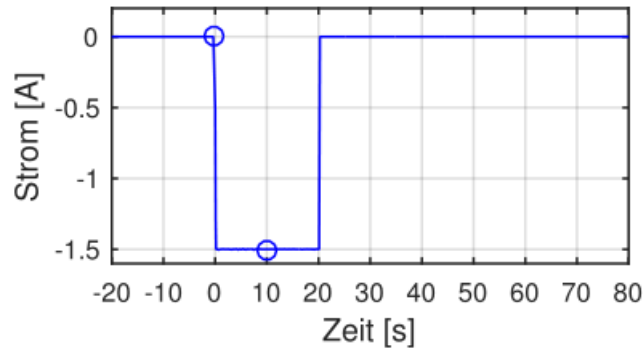
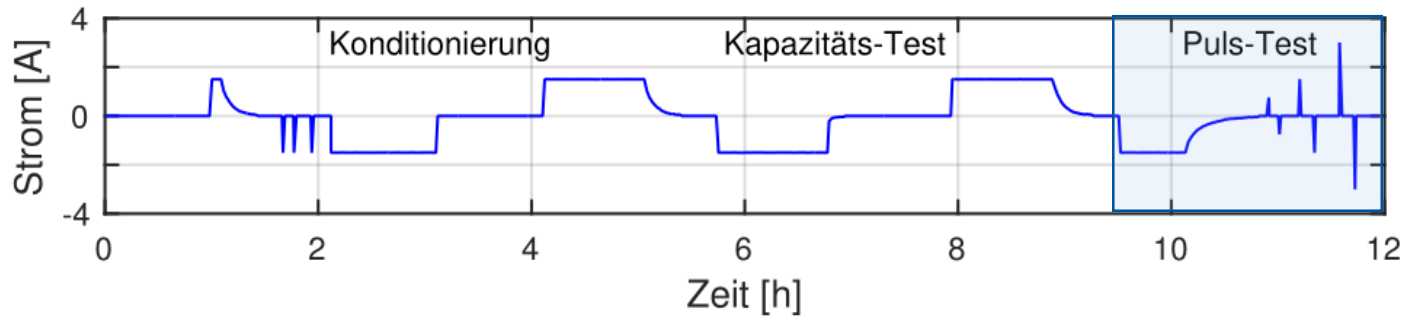


$$Q = \int_0^{t_{\text{end}}} i(t) dt$$

$$\varepsilon_Q \approx \varepsilon_U \frac{\partial Q}{\partial U} + \varepsilon_I \frac{Q}{I} \approx \pm 11,3 \text{ mAh} \approx \pm 1\% C_N$$

$$\sigma_Q \approx \sigma_U \frac{\partial Q}{\partial U} \approx \pm 1,2 \text{ mAh} \approx \pm 0,1\% C_N$$

Check-Up-Test



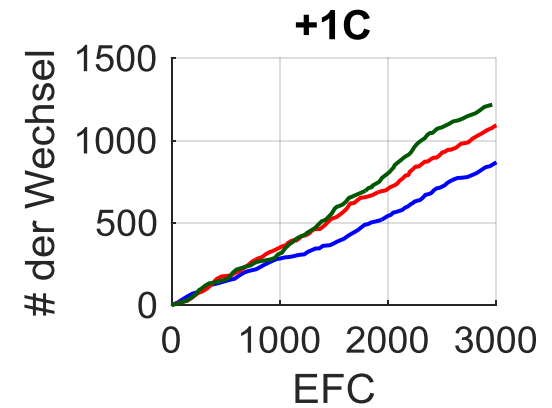
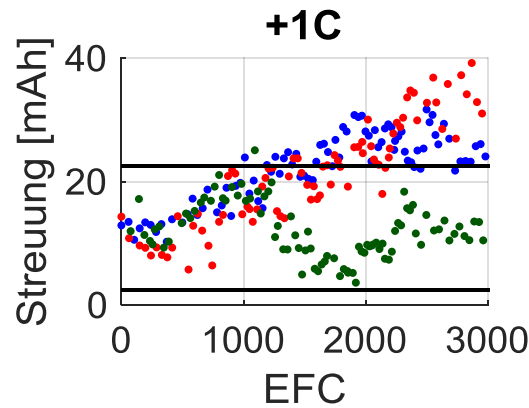
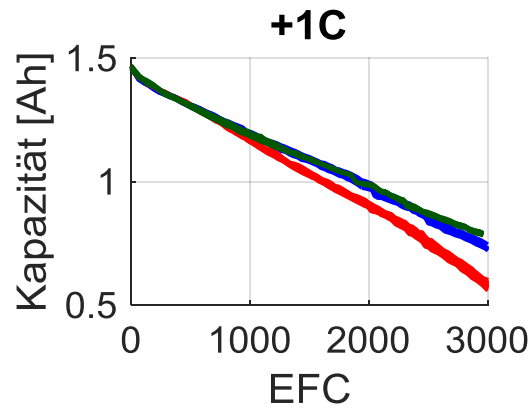
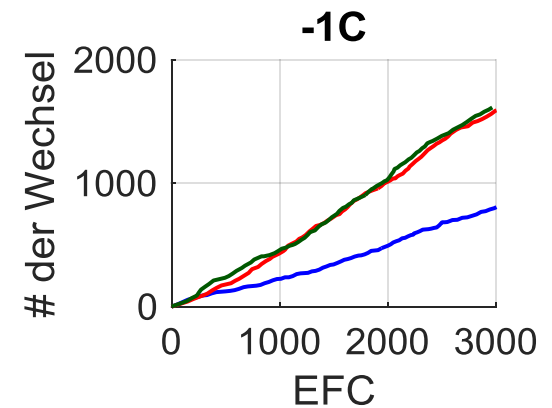
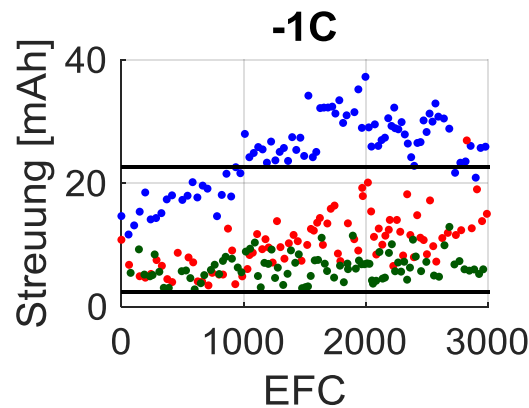
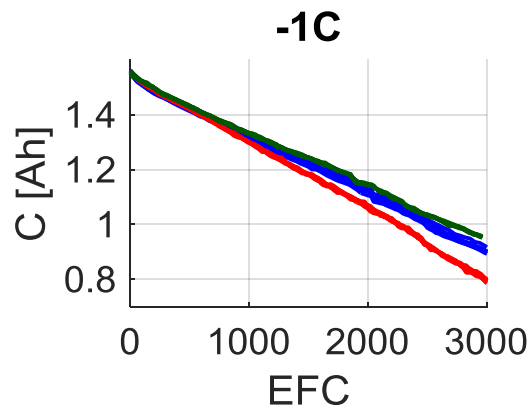
$$R_P = \left. \frac{\Delta U}{\Delta I} \right|_{\Delta t = t_2 - t_1} = \frac{U(t_2) - U(t_1)}{I(t_2) - I(t_1)}$$

$$\varepsilon_{R_P} = \left(\frac{\varepsilon_{\Delta U}}{\Delta U} + \frac{\varepsilon_{\Delta I}}{\Delta I} \right) \cdot \frac{\Delta U}{\Delta I} \approx 0$$

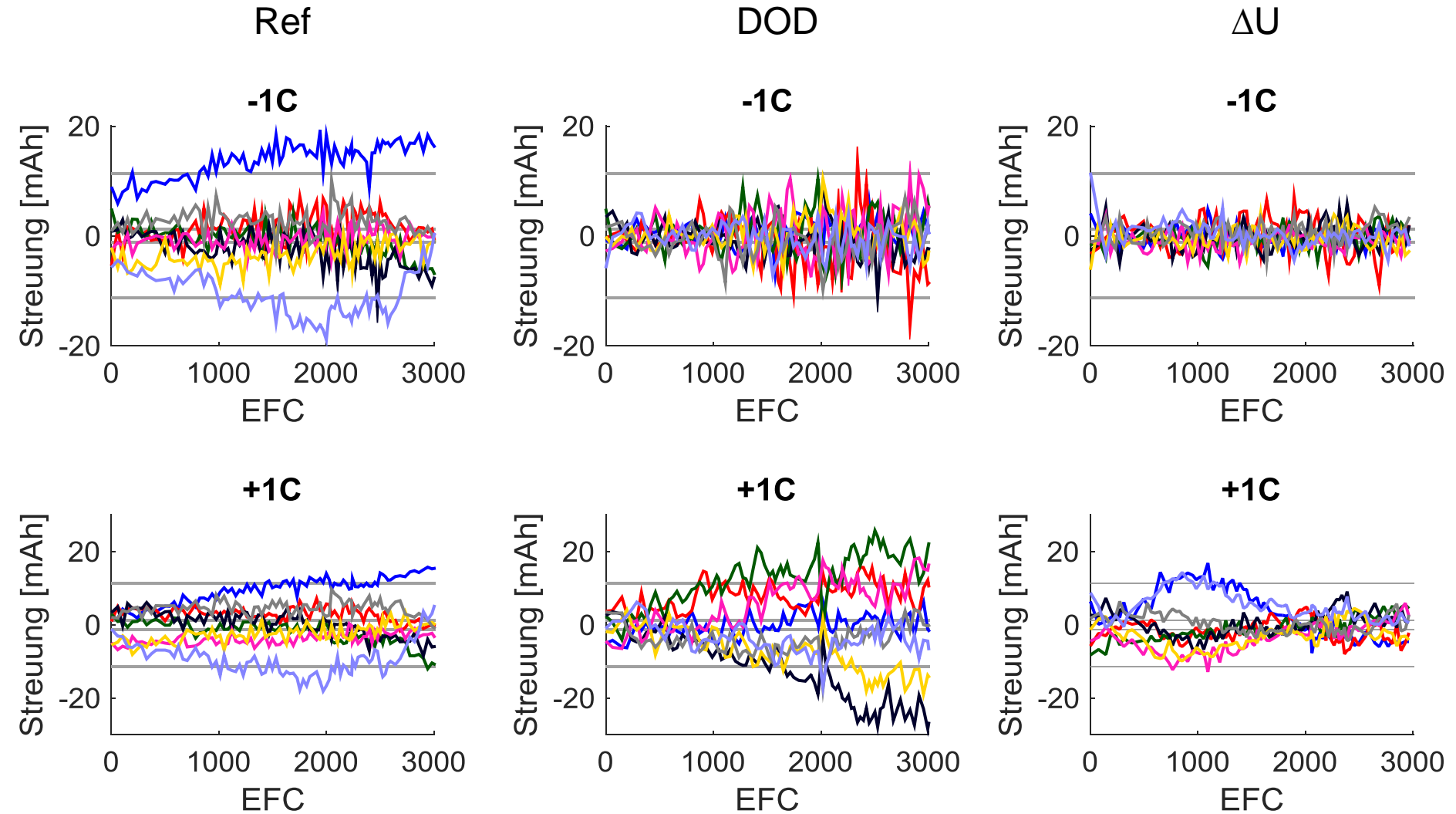
$$\sigma_{R_P} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta U}}{\Delta U} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta I}}{\Delta I} \right)^2} \cdot \frac{\Delta U}{\Delta I} \approx \pm 1 \text{ m}\Omega \approx \pm 3\%$$

Verlauf der Lade-Kapazitäten und Entlade-Pulswiderstände

ΔU
 DOD
 Ref
 Messunsicherheit: $\sigma_Q \approx \pm 1.2 \text{ mAh}$
 T [°C]: 34.5 35 35.5 Fehlergrenze: $\varepsilon_Q \approx \pm 11,3 \text{ mAh}$



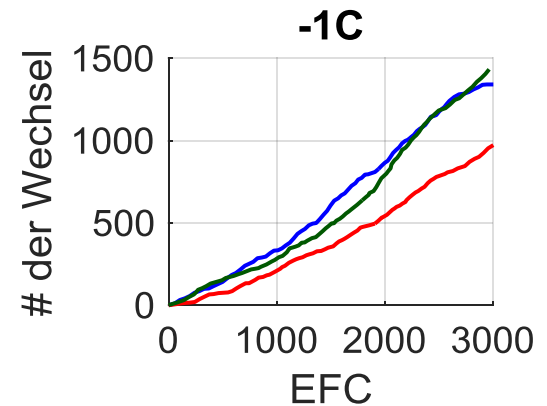
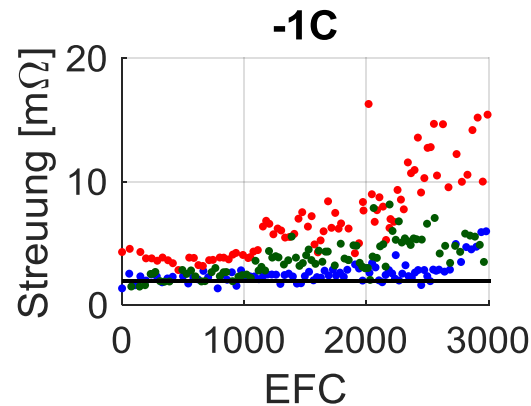
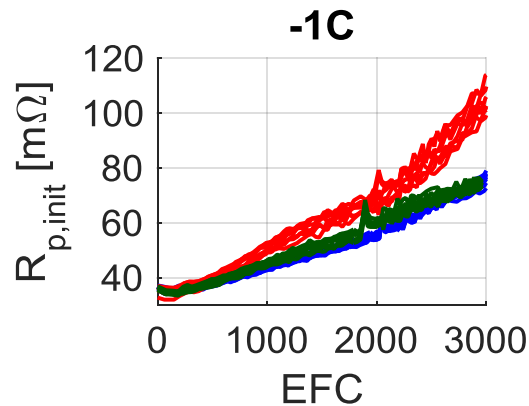
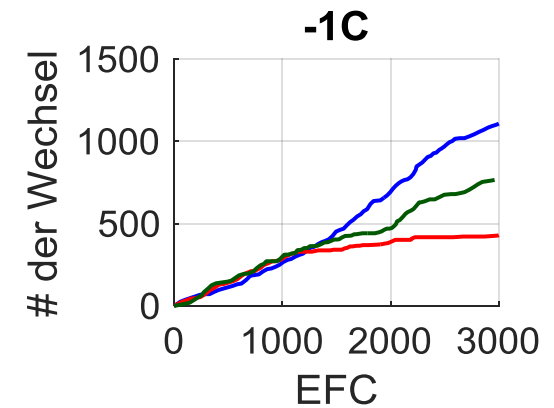
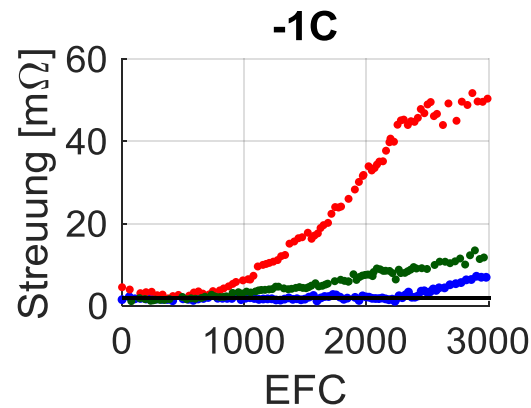
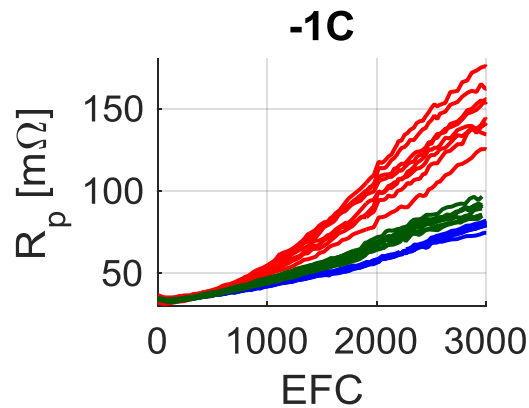
Mittelwertfreie Streuung der Kapazitäten (Dch/Cha)



Zunahme des Puls-Widerstands

ΔU
 DOD
 Ref

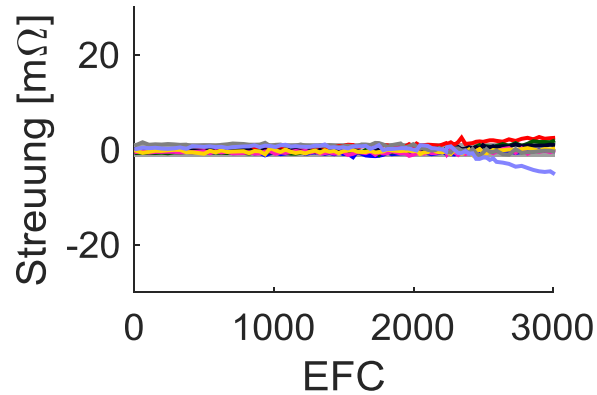
Messunsicherheit: $\sigma_Q \approx \pm 1 \text{ m}\Omega$



Mittelwertfreie Streuung der Puls-Widerstände

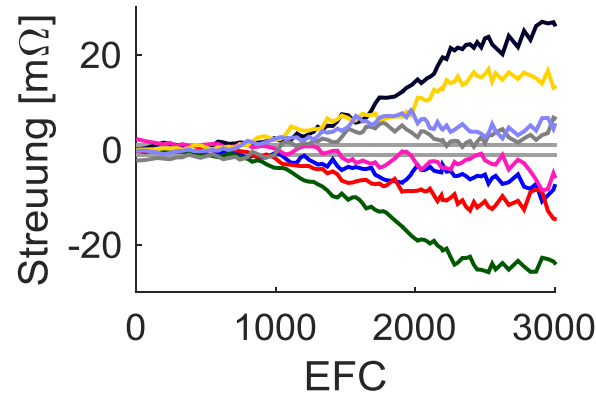
Ref

-1C



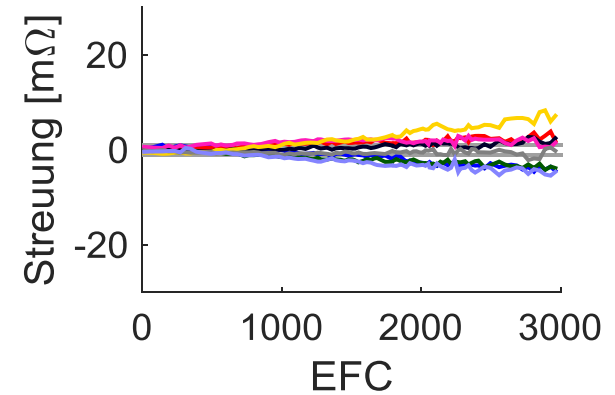
DOD

-1C

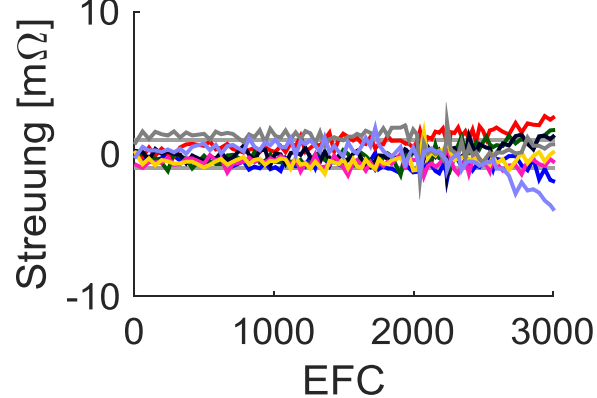


ΔU

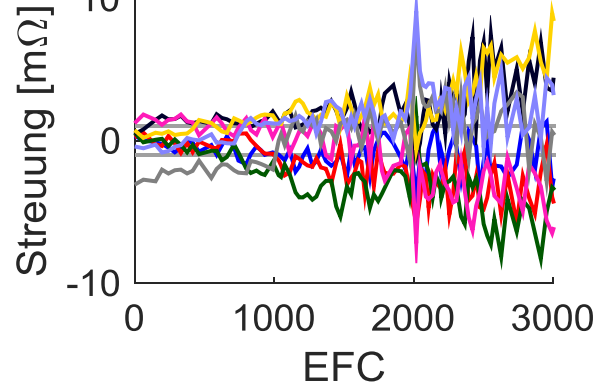
-1C



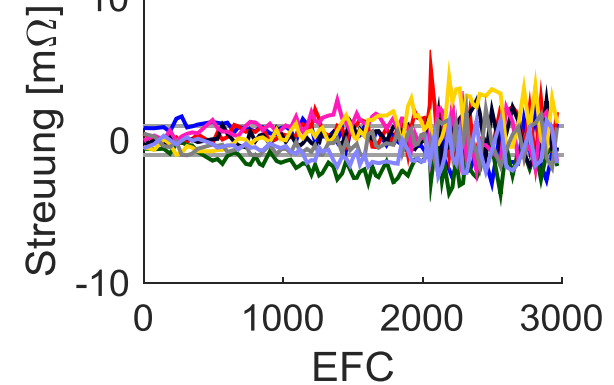
1. Puls -1C



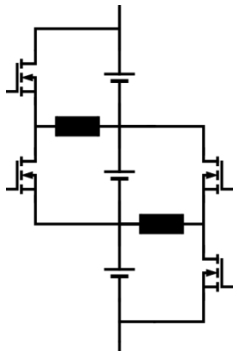
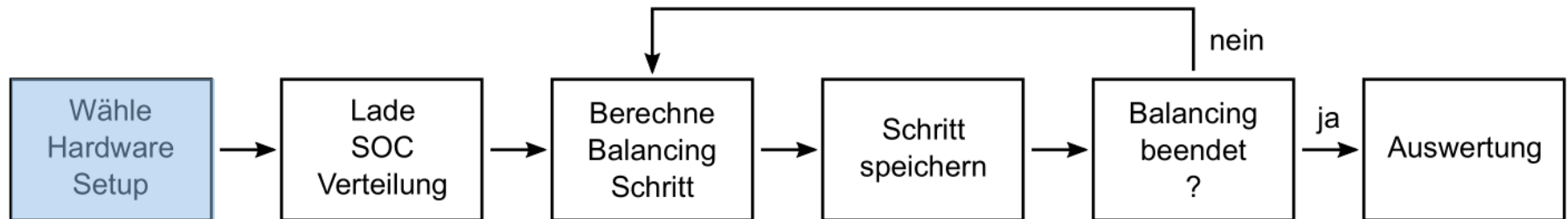
1. Puls -1C



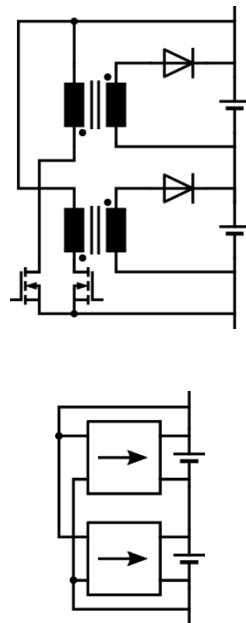
1. Puls -1C



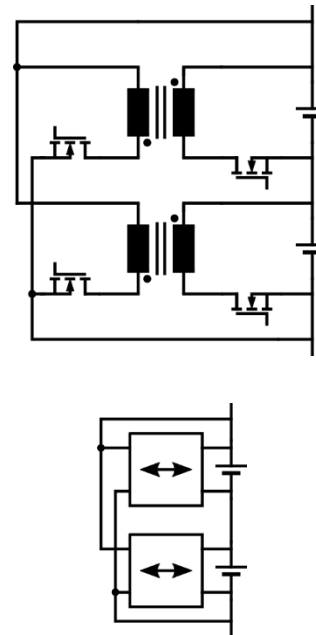
Simulationsablauf – Wahl der Topologie & Zellanzahl



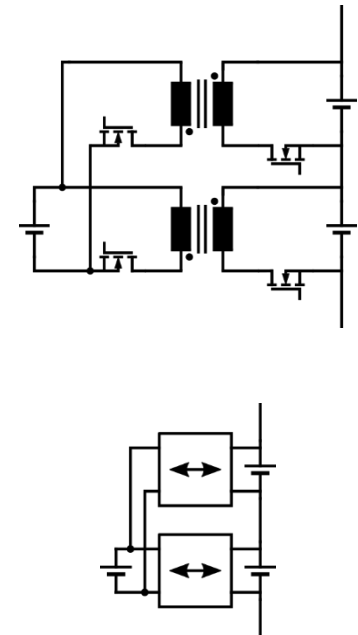
Zelle ↔ Zelle



Pack → Zellen

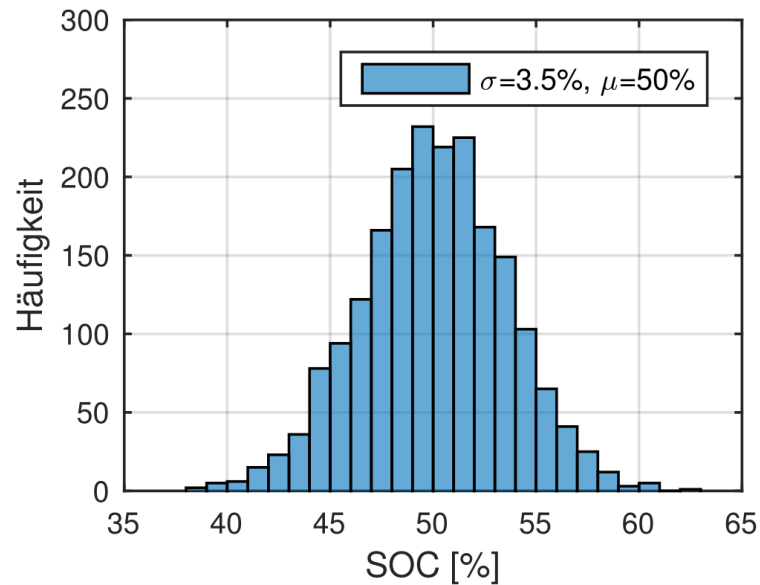
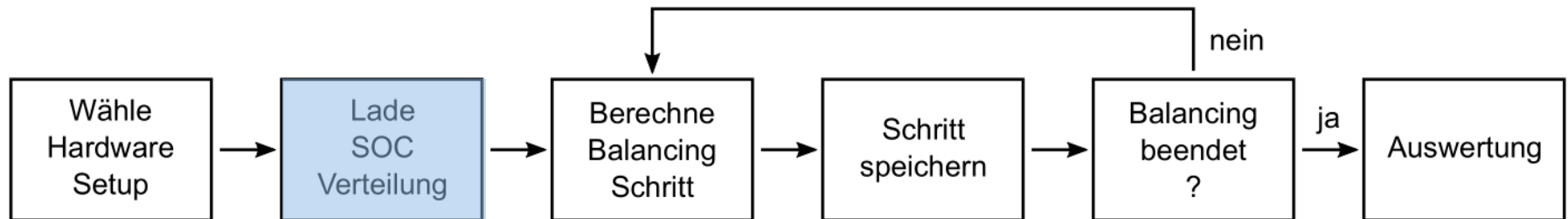


Zellen ↔ Pack



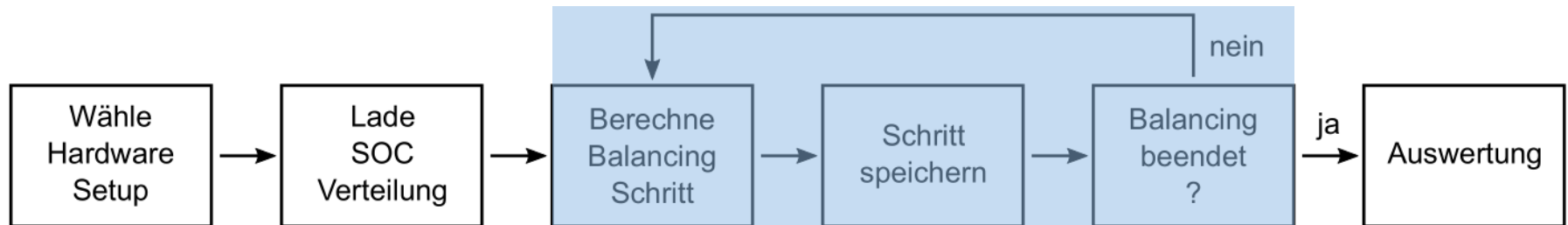
Zellen ↔ DC-Bus

Simulationsablauf – Lade SOC-Verteilung



2.000 SOC-Verteilungen
pro Hardware-Setup

Simulationsablauf – Berechne Balancing



■ Zellspannungen konstant

- $U_Z = 3.7V$
- $Q_{SOC}(t_i + \Delta t) = Q_{SOC}(t_i) + I_Z \Delta t$

■ Konverter alle gleich

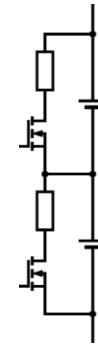
- $P_C = U_Z \bar{I}_{bal} = 3.7 V \cdot 100 mA = 370 mW$
- $\eta = 90\%$

■ Balancing-Zielwert

- $Q_{bal,soll,i} = \bar{Q}_{SOC} - Q_{SOC,i}$

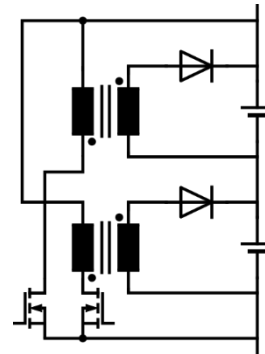
■ Simulationsabbruch & -schritt

- $\Delta SOC = \frac{\Delta Q_{SOC}}{C_N} < 0.1\%$
- $\Delta t \frac{P_C}{U_Z} = \frac{\min\{\max(Q_{bal,soll}), \min(Q_{bal,soll})\}}{100}$



$$R = \frac{U_Z}{\bar{I}_{bal}} = \frac{3.7 V}{100 mA} = 37 \Omega$$

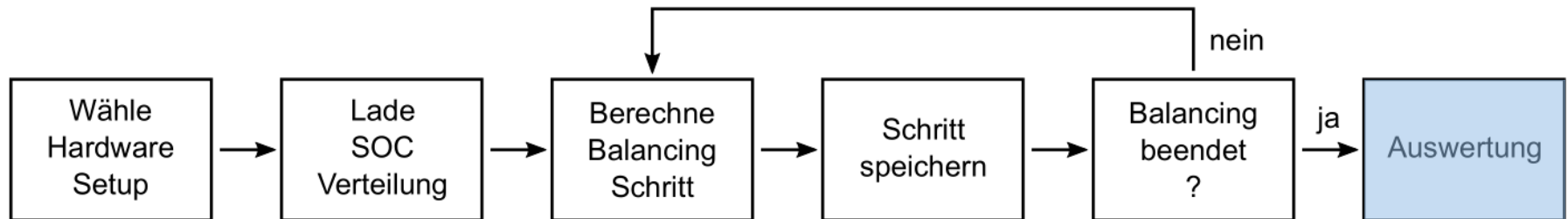
$$I_{Z,i} = -\frac{P_{C,i}}{U_Z}$$



$$L = \frac{U_Z}{2 \bar{I}_{bal}} \times \frac{d^2}{f_s} = 46 \mu H$$

$$I_{Z,i} = \frac{\eta \cdot P_{C,i}}{U_Z} - \frac{1}{N \cdot U_Z} \cdot \sum_{k=1}^N P_{C,k}$$

Simulationsablauf – Auswertung



■ Balancing-Wirkungsgrad

$$\square \eta_{bal} = \frac{\sum Q_{cha}}{\sum Q_{dch}}$$

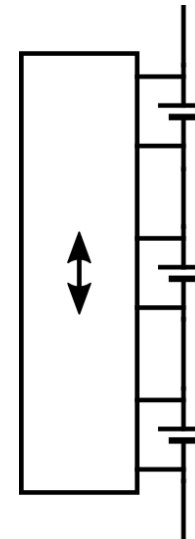
■ relative Balancing-Zeit

$$\square t_{bal} = \frac{T_{bal}}{T_{bal,ideal}} = \frac{T_{bal}}{\max\{|Q_{bal,soll}|\}} \times \frac{P_C}{U_Z}$$

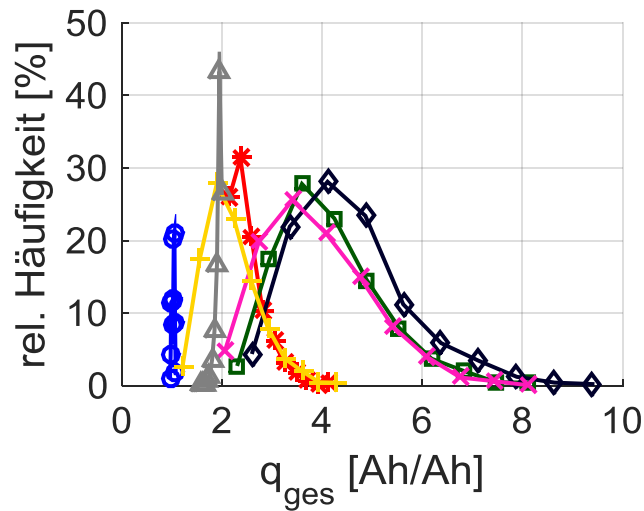
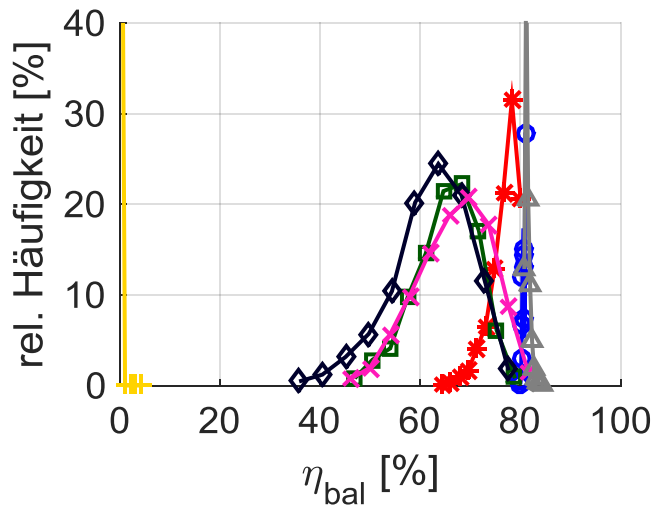
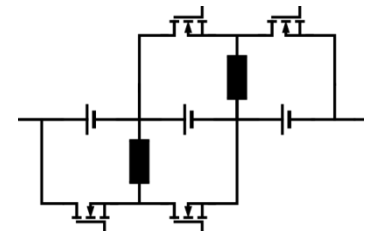
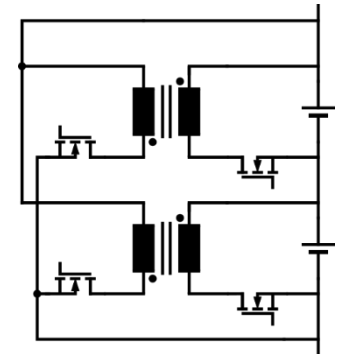
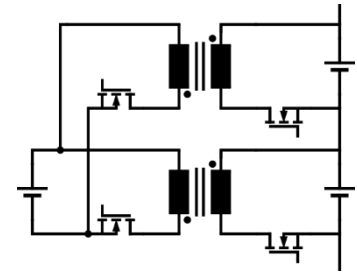
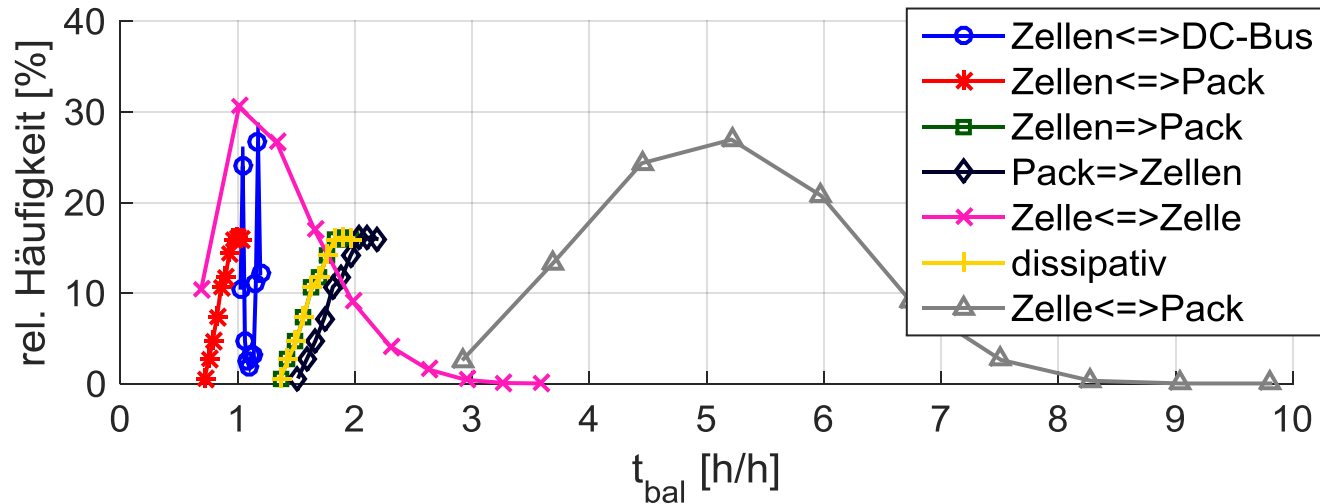
■ relativer Ah-Durchsatz in den Zellen

$$\square q_{ges} = \frac{\sum |Q_{bal}|}{\sum |Q_{bal,ideal}|} = \frac{\sum |Q_{bal}|}{\sum |Q_{bal,soll}|}$$

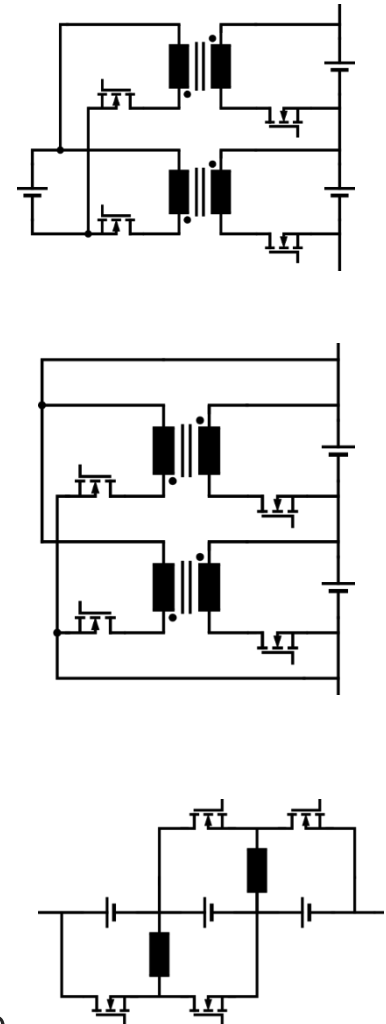
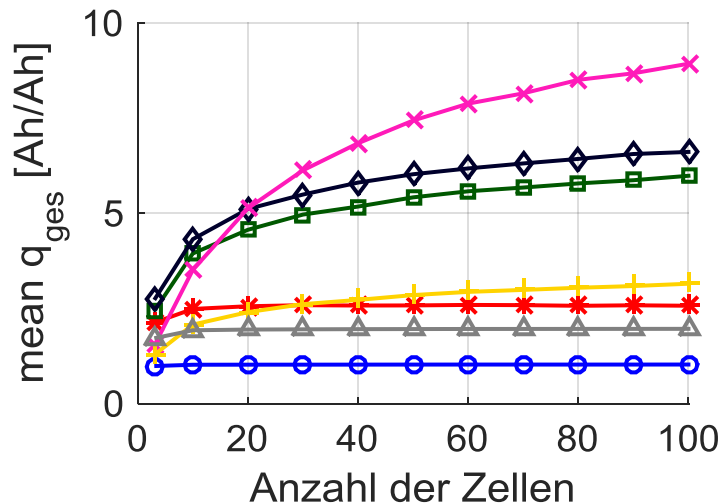
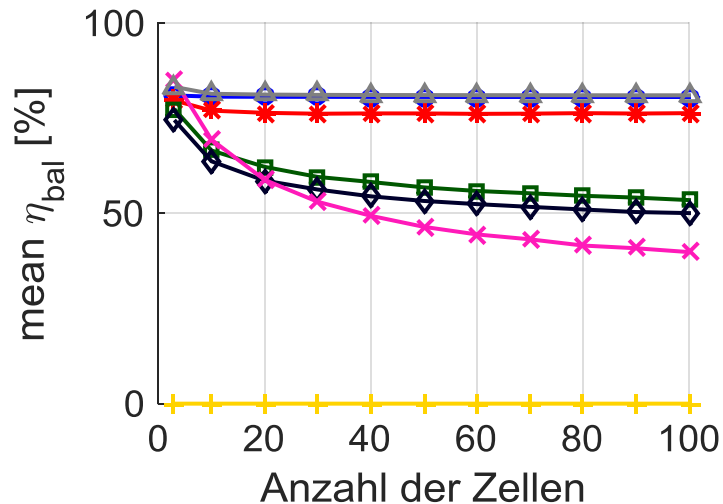
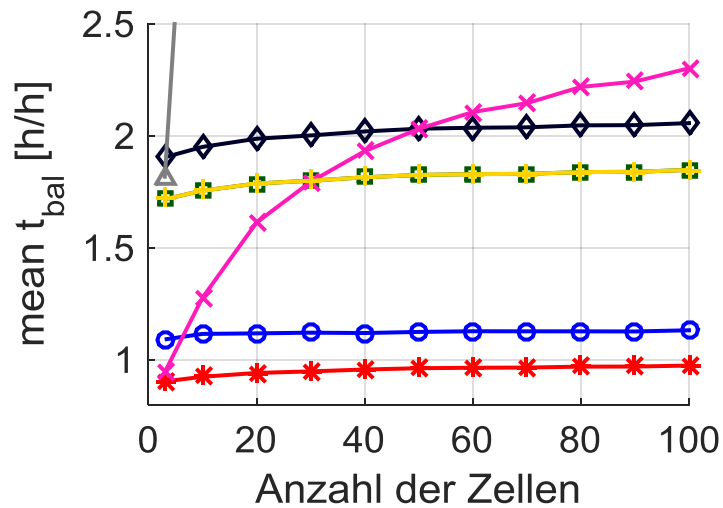
ideales Balancing



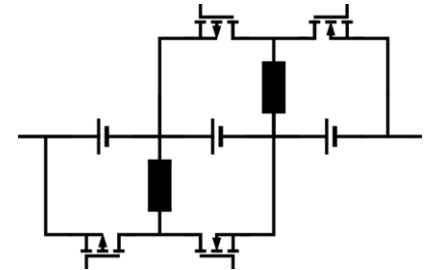
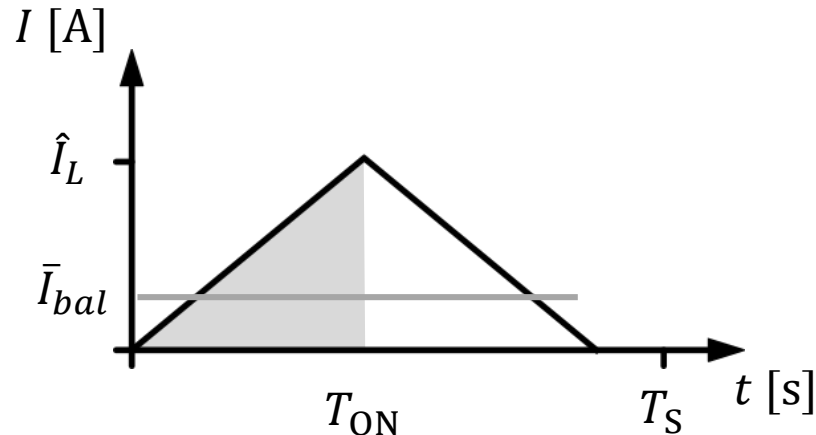
Ergebnis für 12 Zellen in Serie



Ergebnis in Abhängigkeit der Anzahl der Zellen in Serie



Dimensionierung



■ Konverterleistung

$$\square P_C = U_N \times C_{\text{rate}} \times C_{\text{akt}} \times \frac{\Delta C}{C_{\text{akt}}} = 3,7 \text{ V} \times \frac{1}{3} \frac{\text{A}}{\text{Ah}} \times 40 \text{ Ah} \times 5\% = 2,5 \text{ W}$$

$$\square \bar{I}_{\text{bal}} = \frac{P_C}{U_N} = 675 \text{ mA}$$

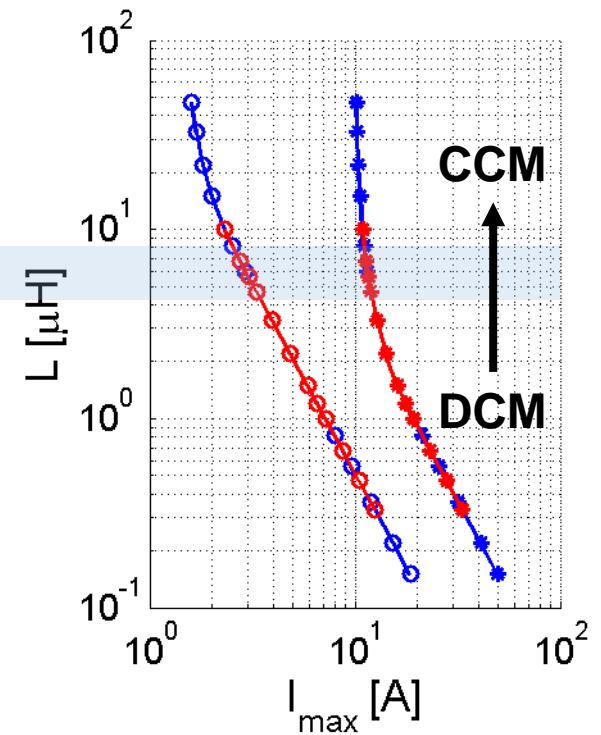
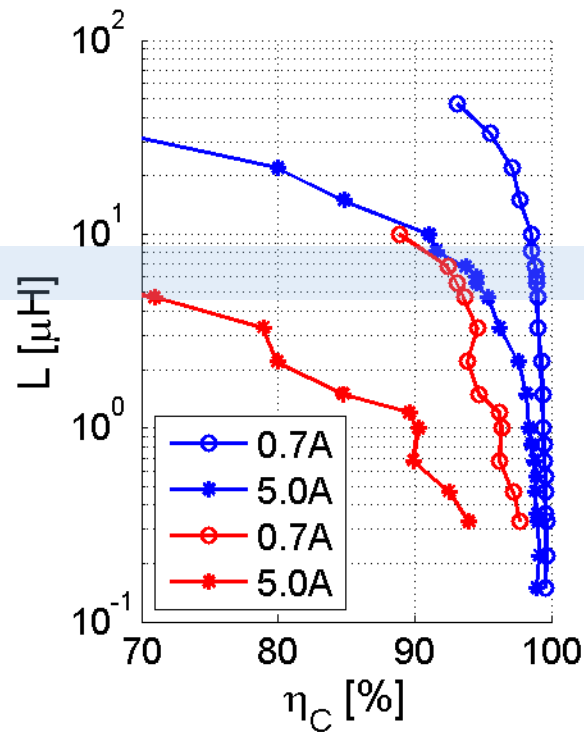
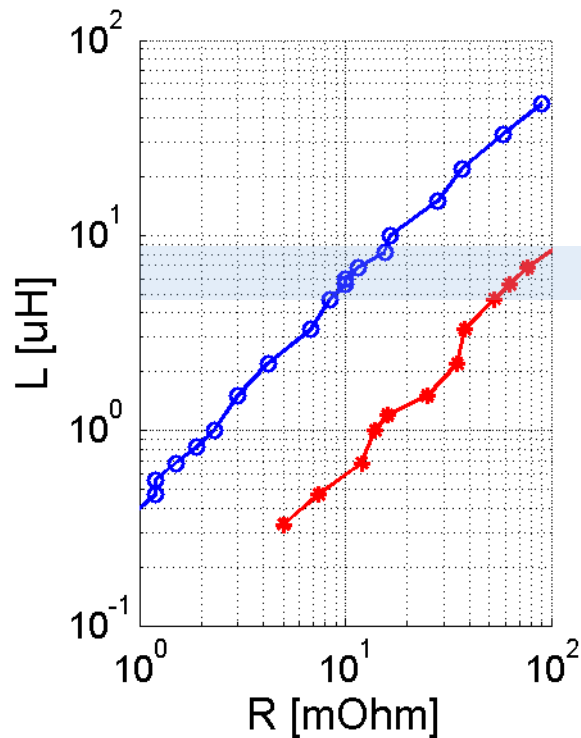
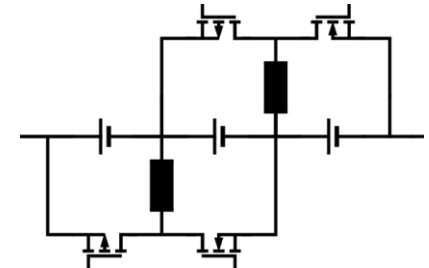
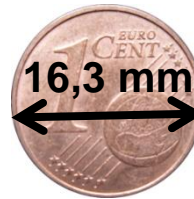
■ Wahl der Spule für Discontinuous Conduction Mode (DCM)

$$\square \hat{I}_L = \frac{U_Z \times T_{\text{ON}}}{L_{\text{min}}} < I_{\text{max}} = \frac{1}{10} \frac{\text{A}}{\text{Ah}} \times C_{\text{akt}} \rightarrow L_{\text{min}} > \frac{3,7 \text{ V}}{2 \times 100 \text{ kHz} \times 4 \text{ A}} = 4,6 \mu\text{H}$$

$$\square \bar{I}_{\text{bal}} = \frac{\hat{I}_L}{2} \times \frac{T_{\text{ON}}}{T_S} = \frac{U_{Z,\text{max}}}{2 L_{\text{max}}} \times \frac{(T_{\text{ON}})^2}{T_S} \rightarrow L_{\text{max}} < \frac{4,2 \text{ V}}{8 \times 675 \text{ mA}} \times \frac{1}{100 \text{ kHz}} = 7,8 \mu\text{H}$$

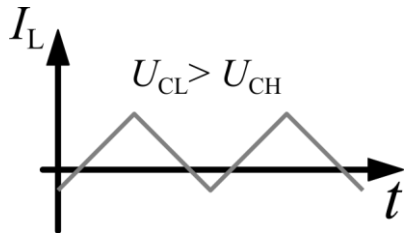
Dimensionierung der Spule

- Bourns SRP1265A 13.5x12.5x6.2 mm³
- *— Bourns SRP5030T 5.7x5.2x2.8mm³

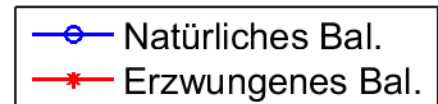
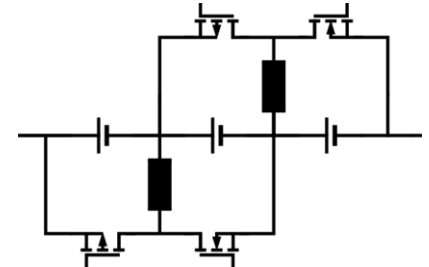
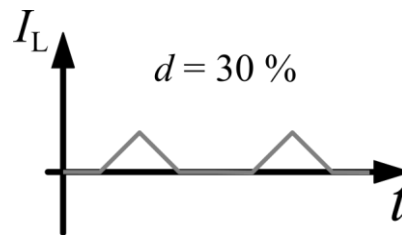
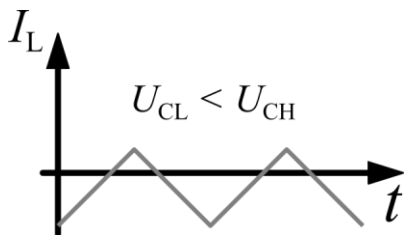
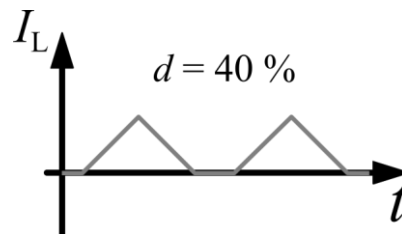
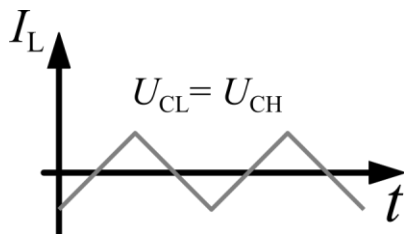
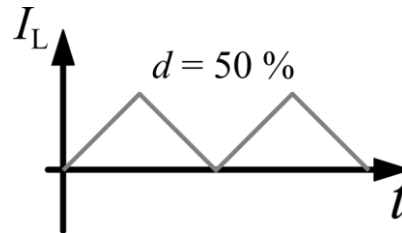


Mosfet-Ansteuerung

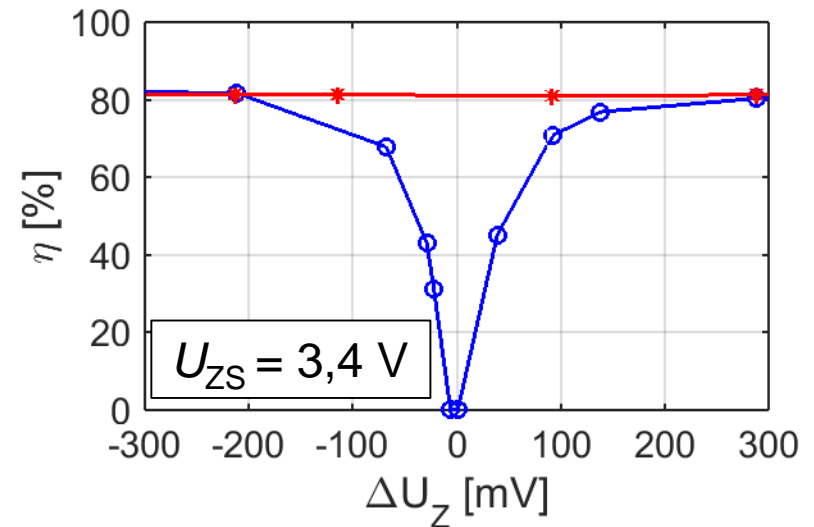
Natürliches-
Balancing
 $d = 50\%$



Erzwungenes-
Balancing
 d variabel

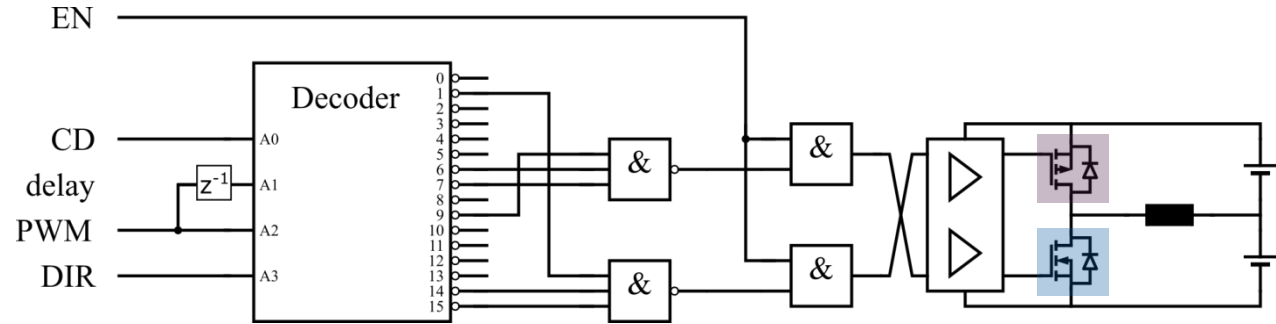
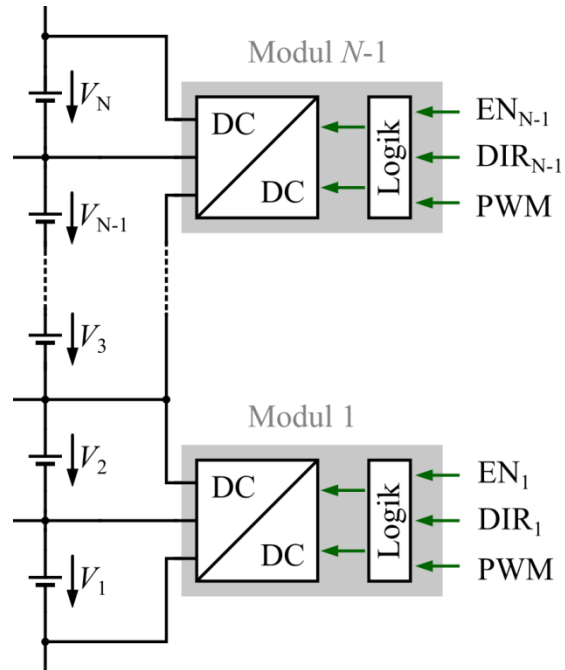


Low-Side Mosfet ist Master



Mosfet-Ansteuerung

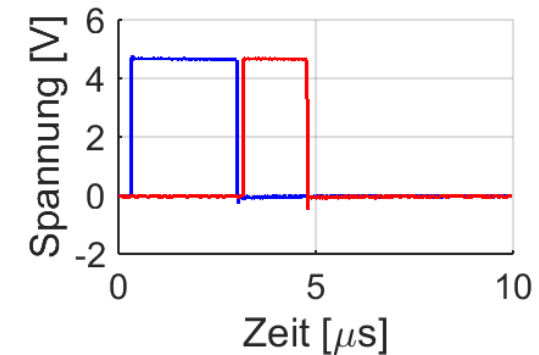
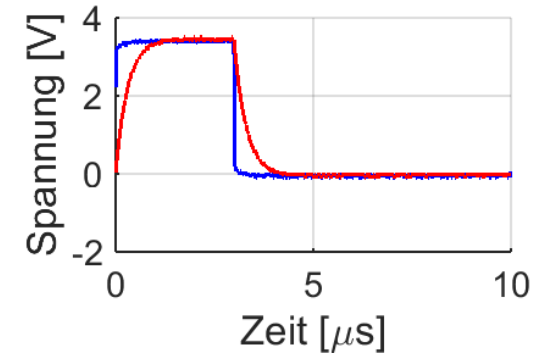
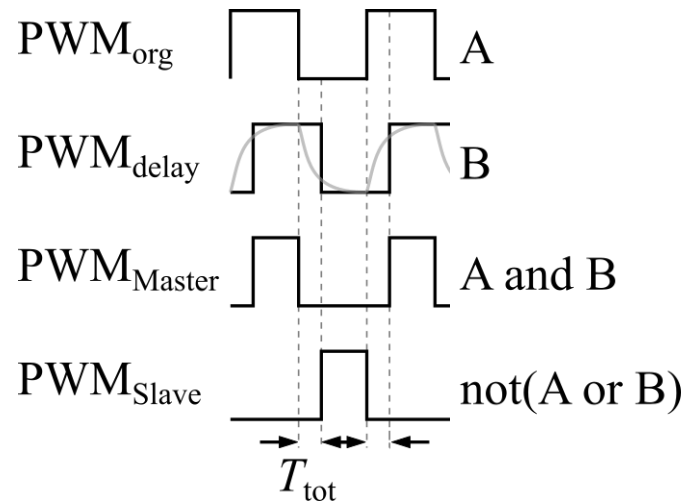
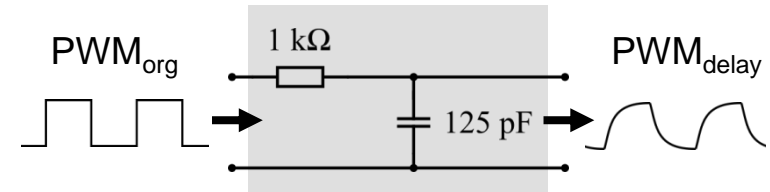
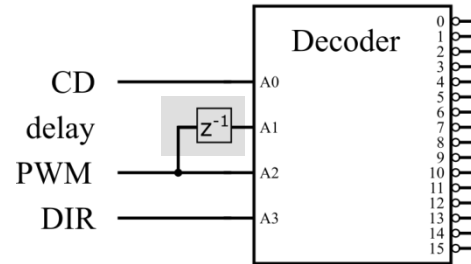
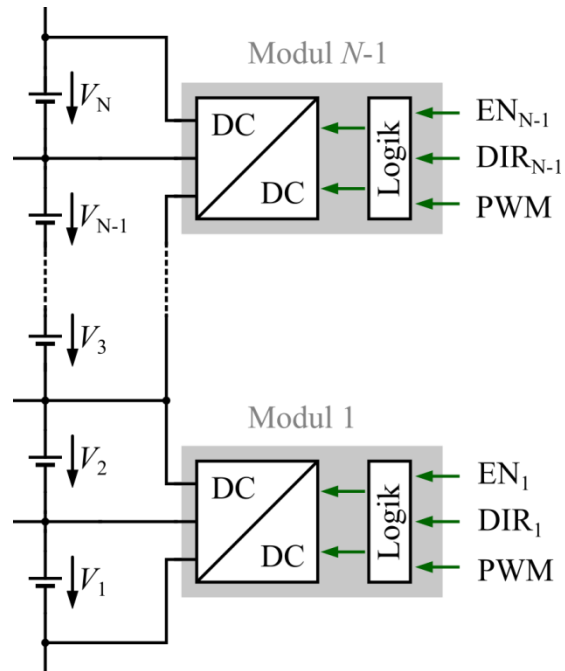
- Logik-Schaltung
- PWM-Verzögerung
- Stromerkennung



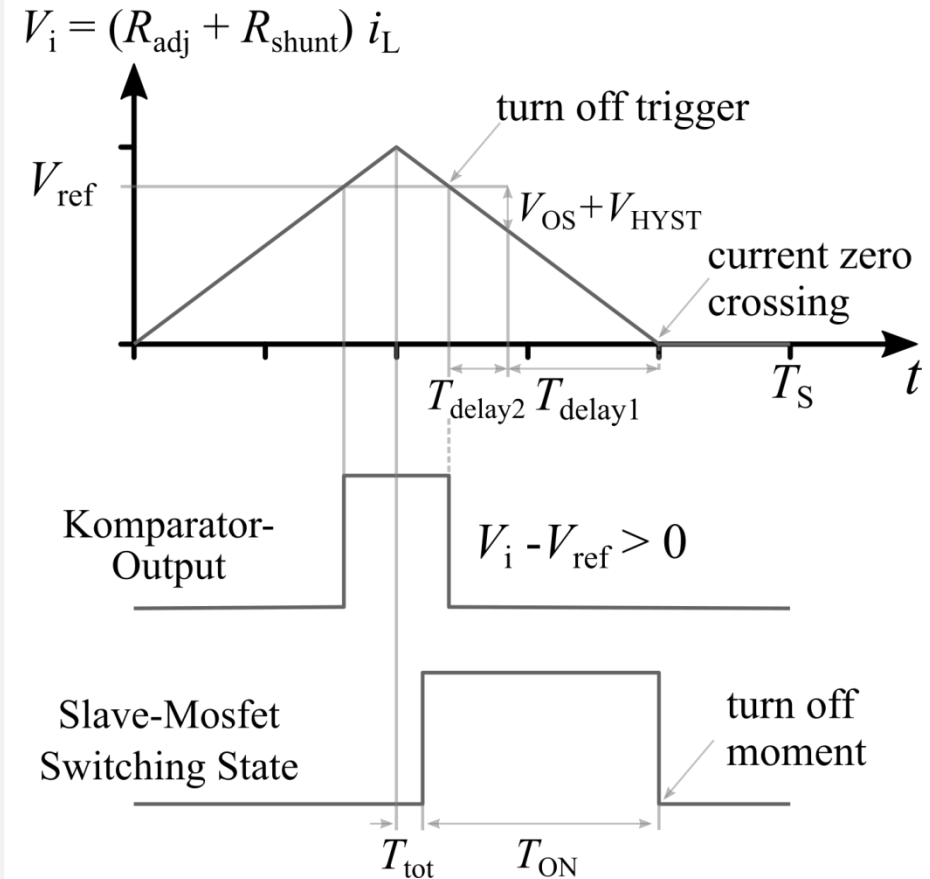
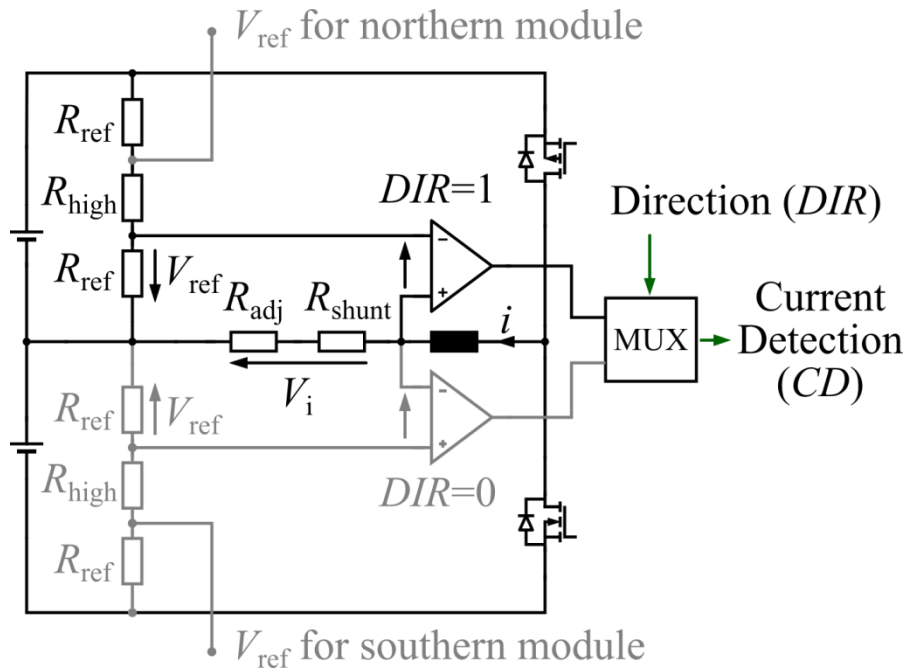
	#	EN	DIR	PWM	delay	CD	Y ₁	Y ₀	
off		0	X	X	X	X	0	0	
South-to-North	0	1	0	0	0	0	0	0	North is Slave
	1	1	0	0	0	1	1	0	
	2	1	0	0	1	0	0	0	
	3	1	0	0	1	1	0	0	
	4	1	0	1	0	0	0	0	South is Master
	5	1	0	1	0	1	0	0	
	6	1	0	1	1	0	0	1	
North-to-South	7	1	0	1	1	1	0	1	
	8	1	1	0	0	0	0	0	South is Slave
	9	1	1	0	0	1	0	1	
	10	1	1	0	1	0	0	0	North is Master
	11	1	1	0	1	1	0	0	
	12	1	1	1	0	0	0	0	
	13	1	1	1	0	1	0	0	
	14	1	1	1	1	0	1	0	North is Master
	15	1	1	1	1	1	1	0	

Mosfet-Ansteuerung

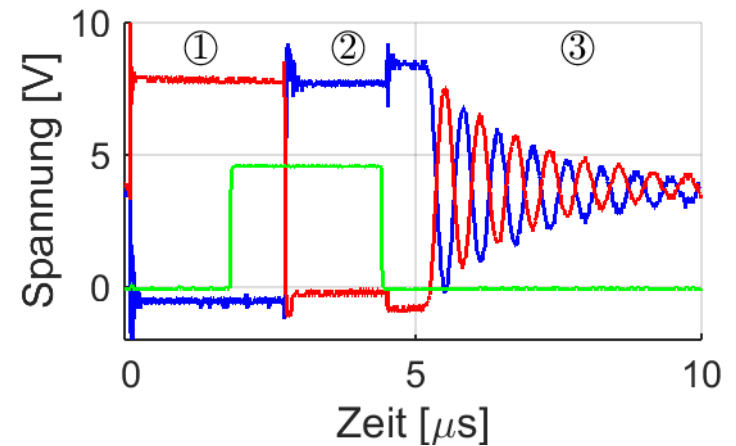
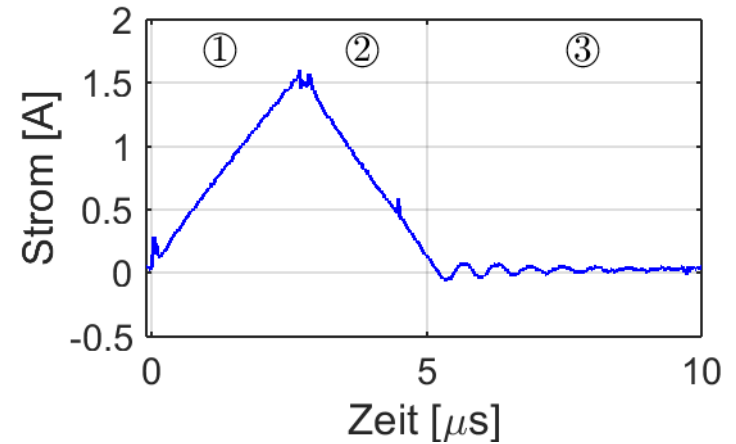
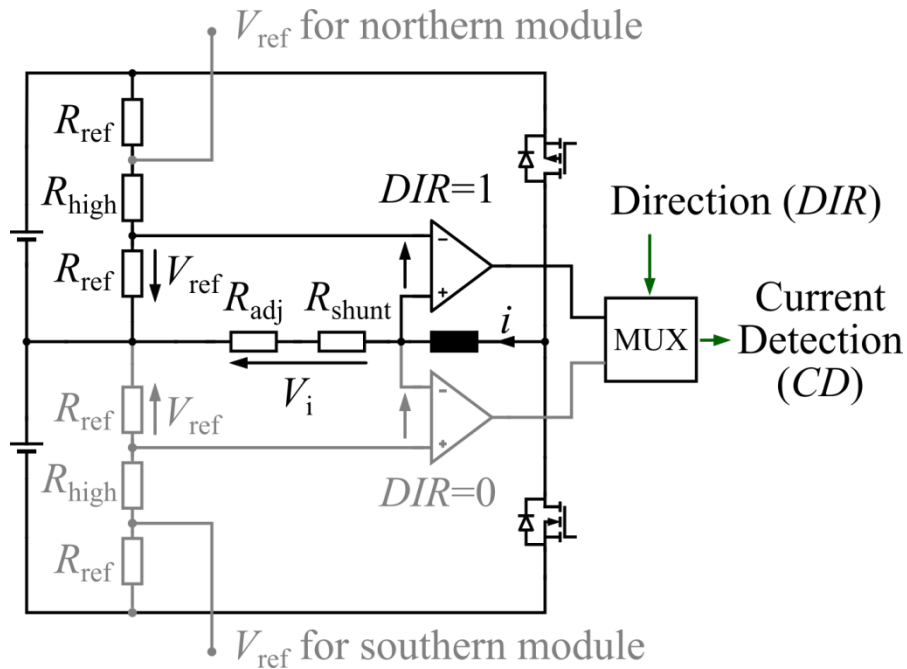
- Logik-Schaltung
- **PWM-Verzögerung**
- Stromerkennung



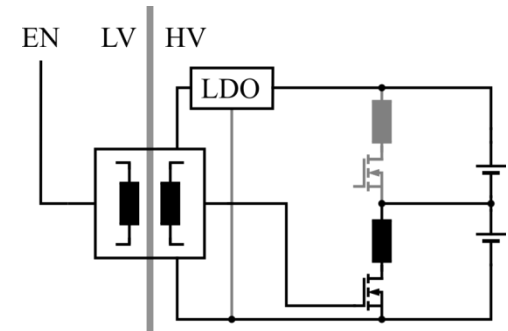
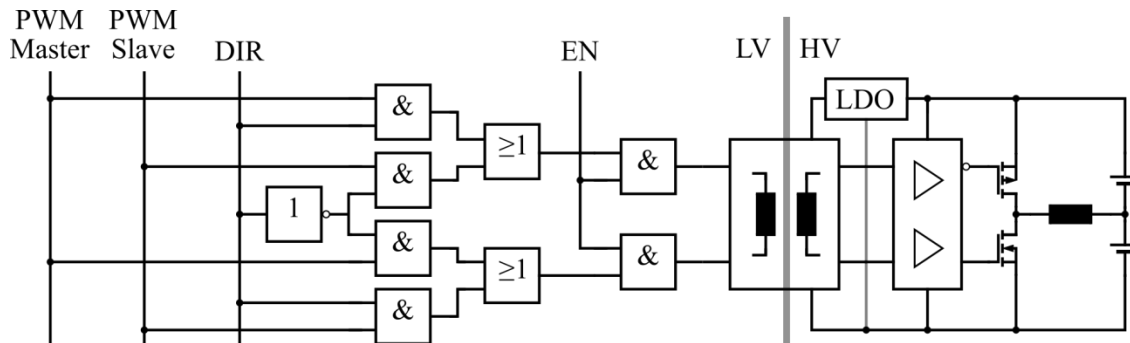
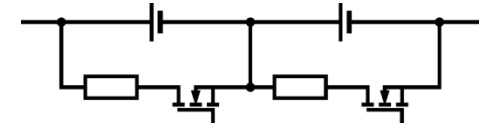
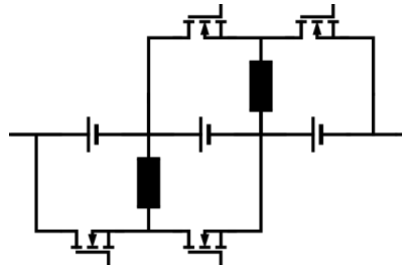
Stromerkennung (CD)



Stromerkennung (CD)



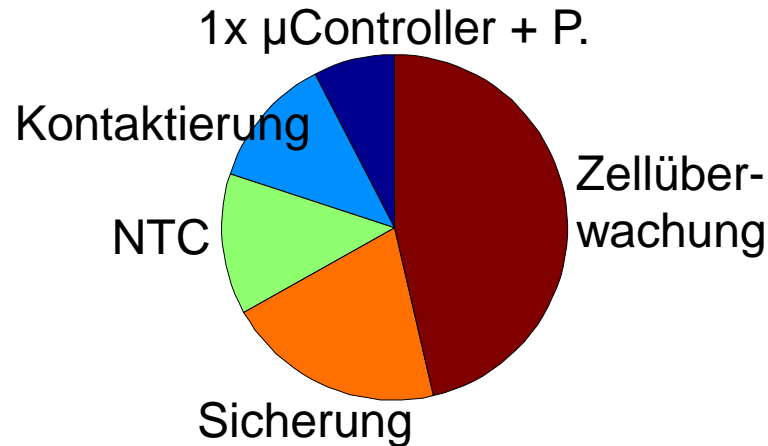
Komponentenvergleich aktives vs. passives Balancing



Bauteilkosten für ein Batteriesystem mit 96 Zellen

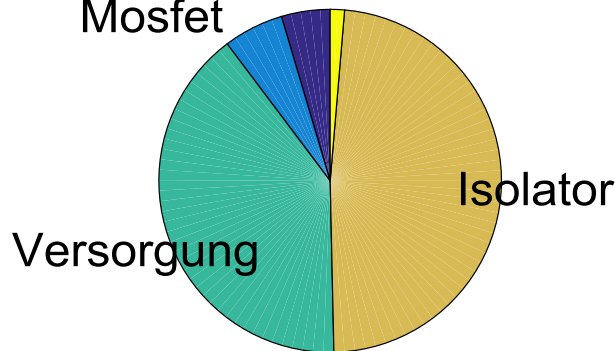
Einzelpreise Farnell
Stand: Mai 2017

Basiskosten
377 € (3,9 €/Zelle)



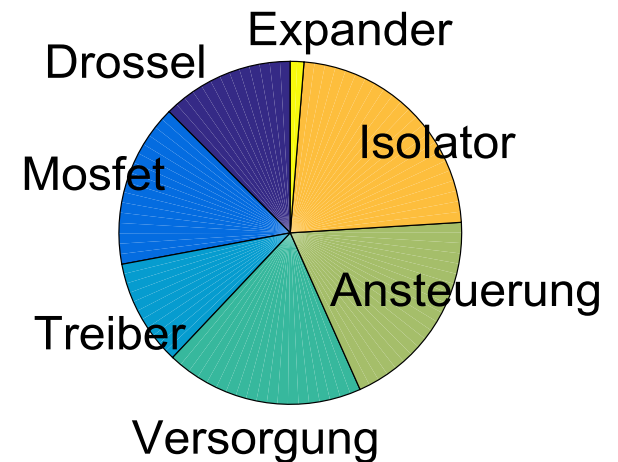
Passives Balancing
618 € (6,5 €/Zelle)

Widerstand Expander
Mosfet



Mehrkosten ca.
 $\Delta K = 7\text{ €/Zelle}$

Aktives Balancing
1.300 € (13,5 €/Zelle)



Zulässige Mehrkosten des aktiven Balancings

$$\Delta K_{\text{bal}} \leq \eta_{\text{bal}} \cdot \Delta s \cdot U_N \cdot C_N \cdot k_{\text{Zelle}}$$

