



Alterung von Lithium-Ionen-Batterien Lithium-Plating

Prof. Dr.-Ing. Julia Kowal, TU Berlin

Herbsttagung des Arbeitskreises Energie der DPG 2026 | 2. Oktober 2026

Vorstellung

Prof. Dr.-Ing. Julia Kowal

- 1999-2004 Studium Elektrotechnik RWTH Aachen
- 2010 Promotion RWTH Aachen, Prof. Dr. Sauer
2010-2013 Abteilungsleitung „Modellierung, Analytik
und Lebensdauerprognose von Batterien“ RWTH
Aachen
- Seit März 2014 TU Berlin, Elektrische
Energiespeichertechnik



Vorstellung Fachgebiet Elektrische Energiespeichertechnik



Vermessung von Batterien

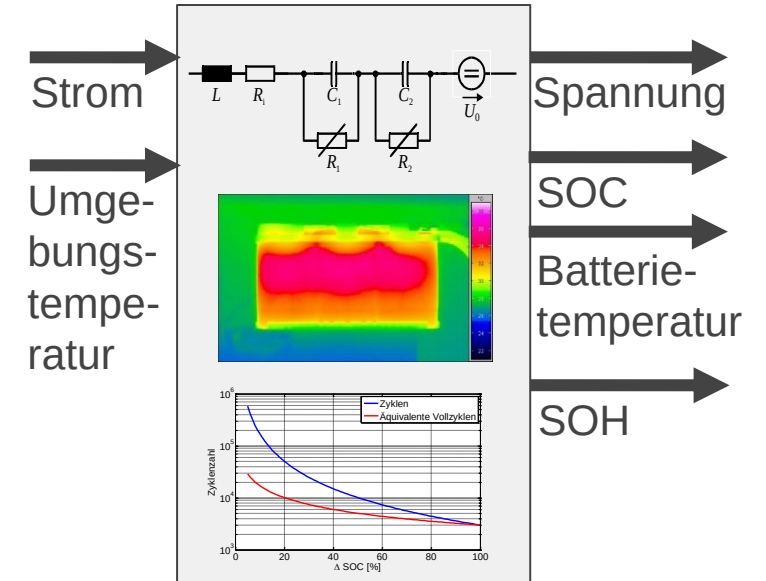
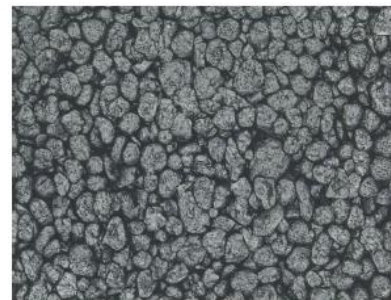
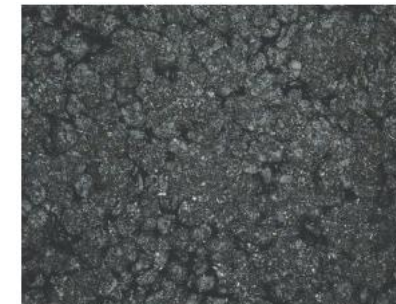
- Untersuchung des Verhaltens
→ welche Prozesse treten auf?
- Parametrierung der Modelle
- Entwicklung von Messmethoden

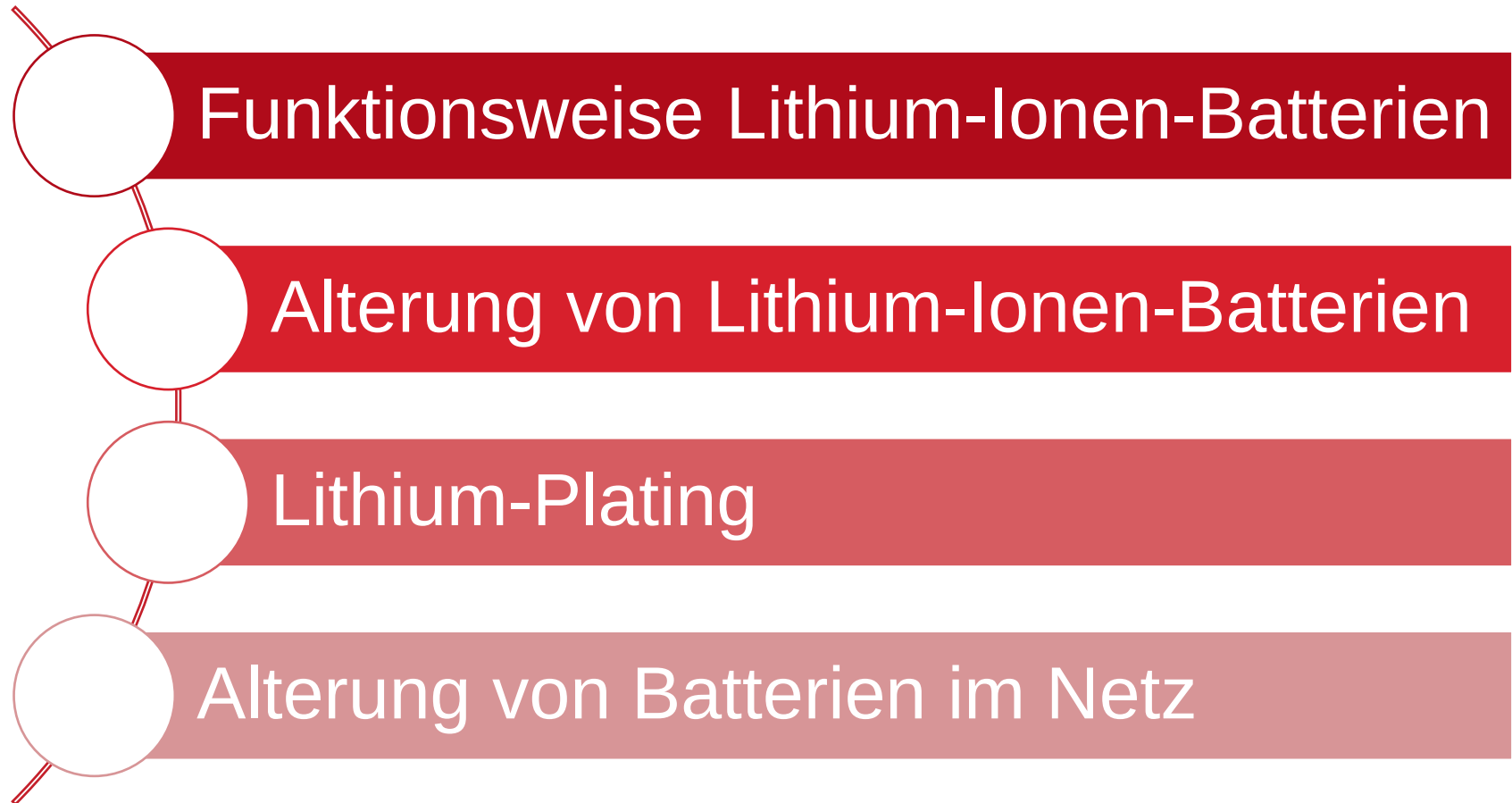
Entwicklung von Simulationsmodellen

- Elektrisches und thermisches Verhalten
- Lebensdauervorhersage
- Bestimmung des Ladezustands

Chemische und physikalische Analyse

- Oberflächenanalyse
- (begrenzt) Materialanalyse

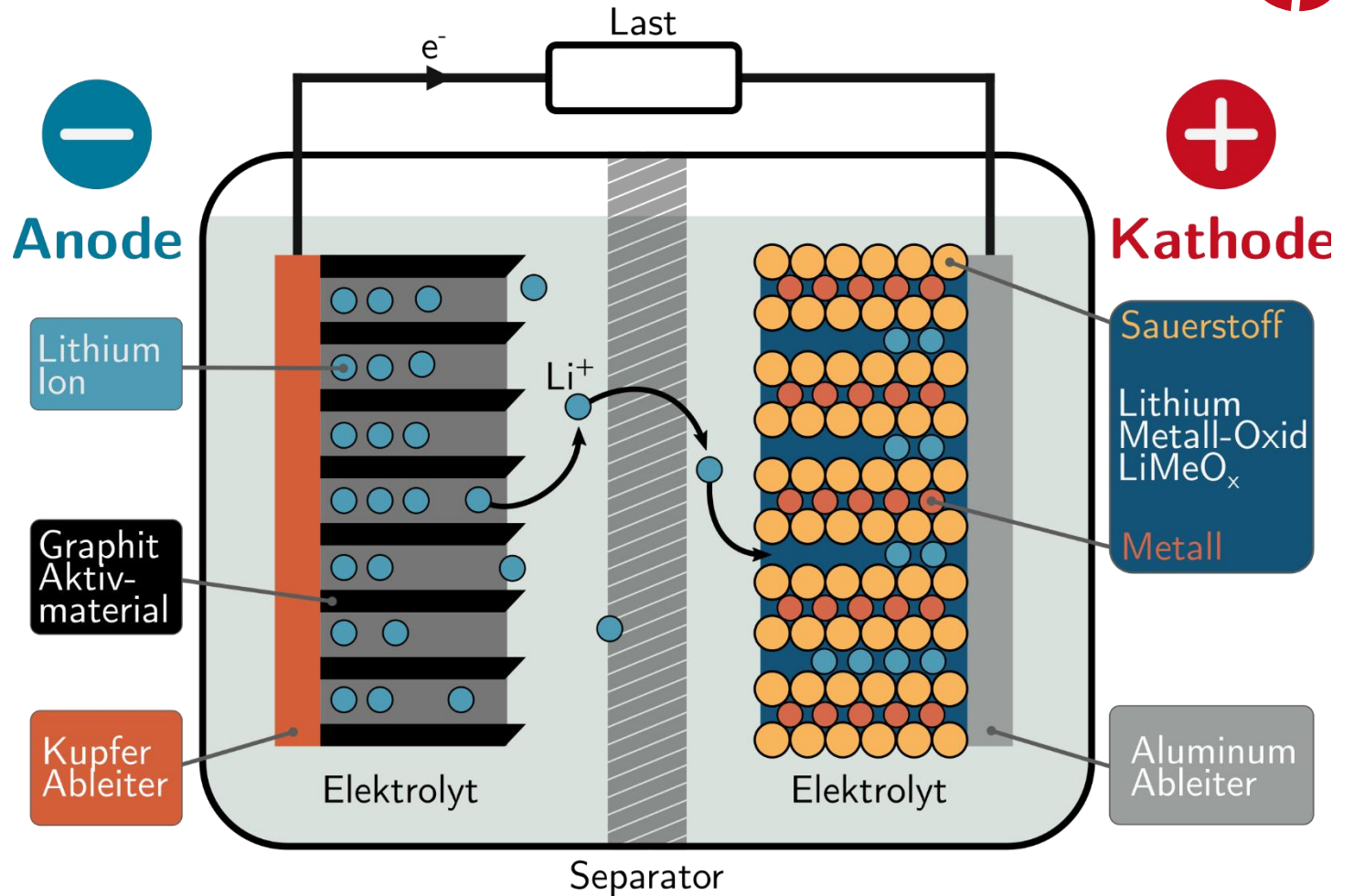




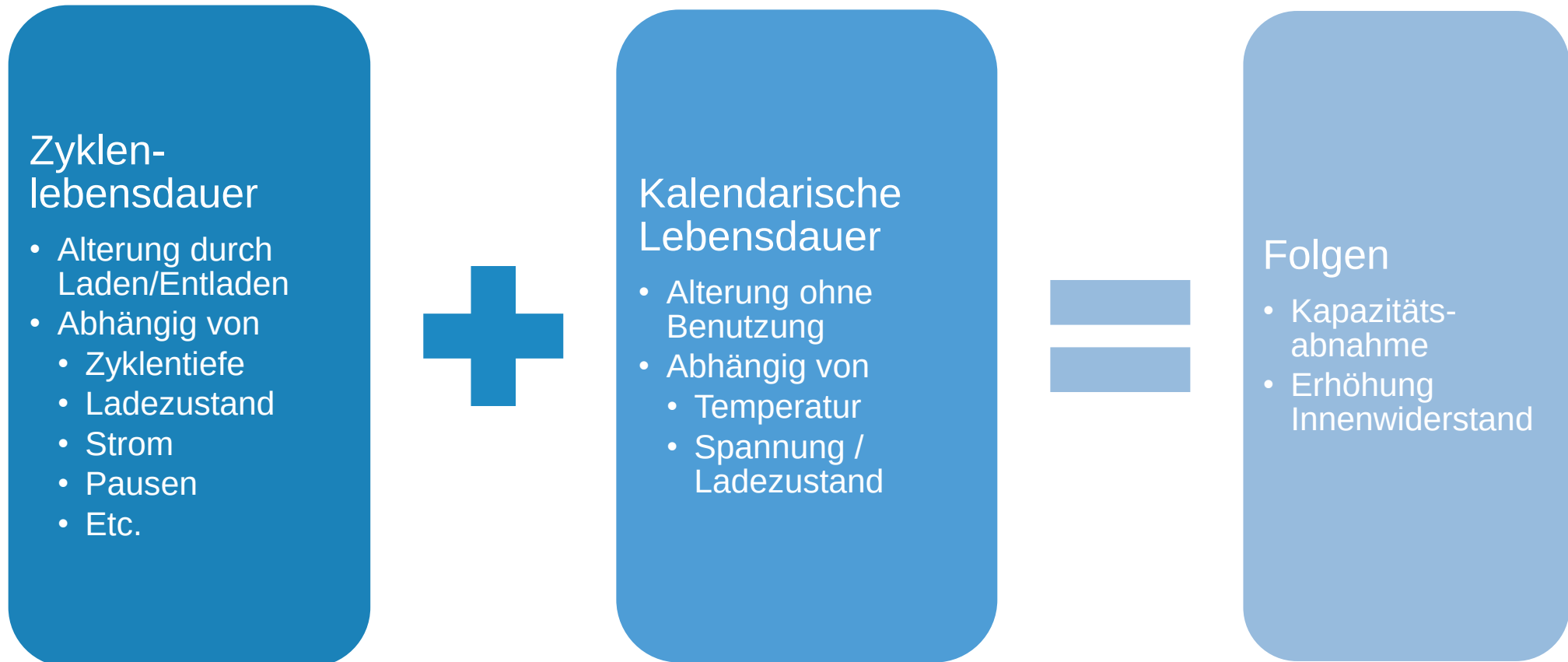
Lithium-Ionen-Batterien – Aufbau

Lithium:

- Leichtester Feststoff
- Geringstes Standardpotenzial
- Bewegung und Interkalation der Lithium-Ionen
- Organischer Elektrolyt LiPF_6
- Kathode meistens NMC, NCA oder LFP
- Anode meistens C oder LTO



Lebensdauer von Batterien allgemein



Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Zellen – Ergebnisse

Kalendarische Alterung

- Temperaturerhöhung beschleunigt die Alterung
- Höherer Ladezustand (höhere Spannung) beschleunigt die Alterung
- Starke Zunahme bei 100 %

Alterung reduzieren durch:

- **Temperatur nicht zu hoch**
- **Nicht dauerhaft vollladen**

Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Zellen – Ergebnisse

Zyklische Alterung

- Große Zyklen beschleunigen die Alterung
- Lage der Zyklen ist auch wichtig
- Nicht gezeigt: meistens führen hohe Ströme zu stärkerer Alterung

Alterung reduzieren durch:

- **Lieber kleine als große Zyklen**
- **Geringe Ströme**
- **Wo ist der ideale Betriebsbereich??**

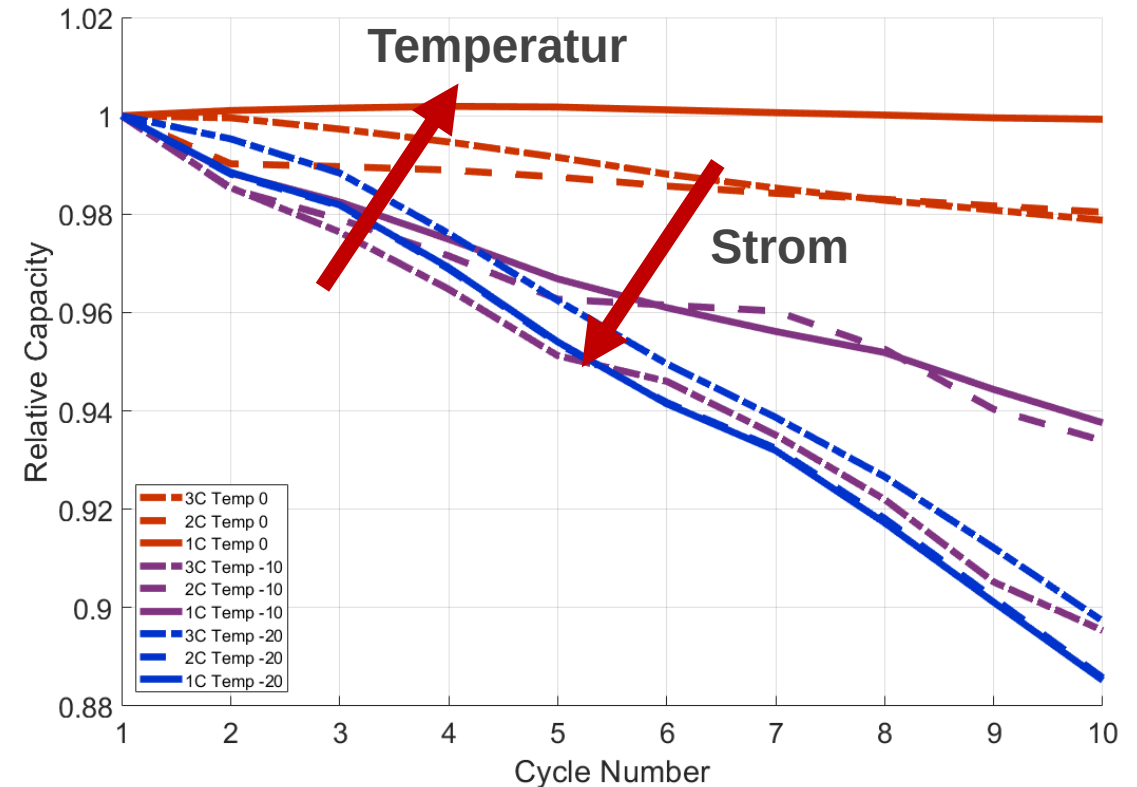
Untersuchung der Alterung von Lithium-Ionen-Zellen – Ergebnisse

Zyklische Alterung bei tiefen Temperaturen

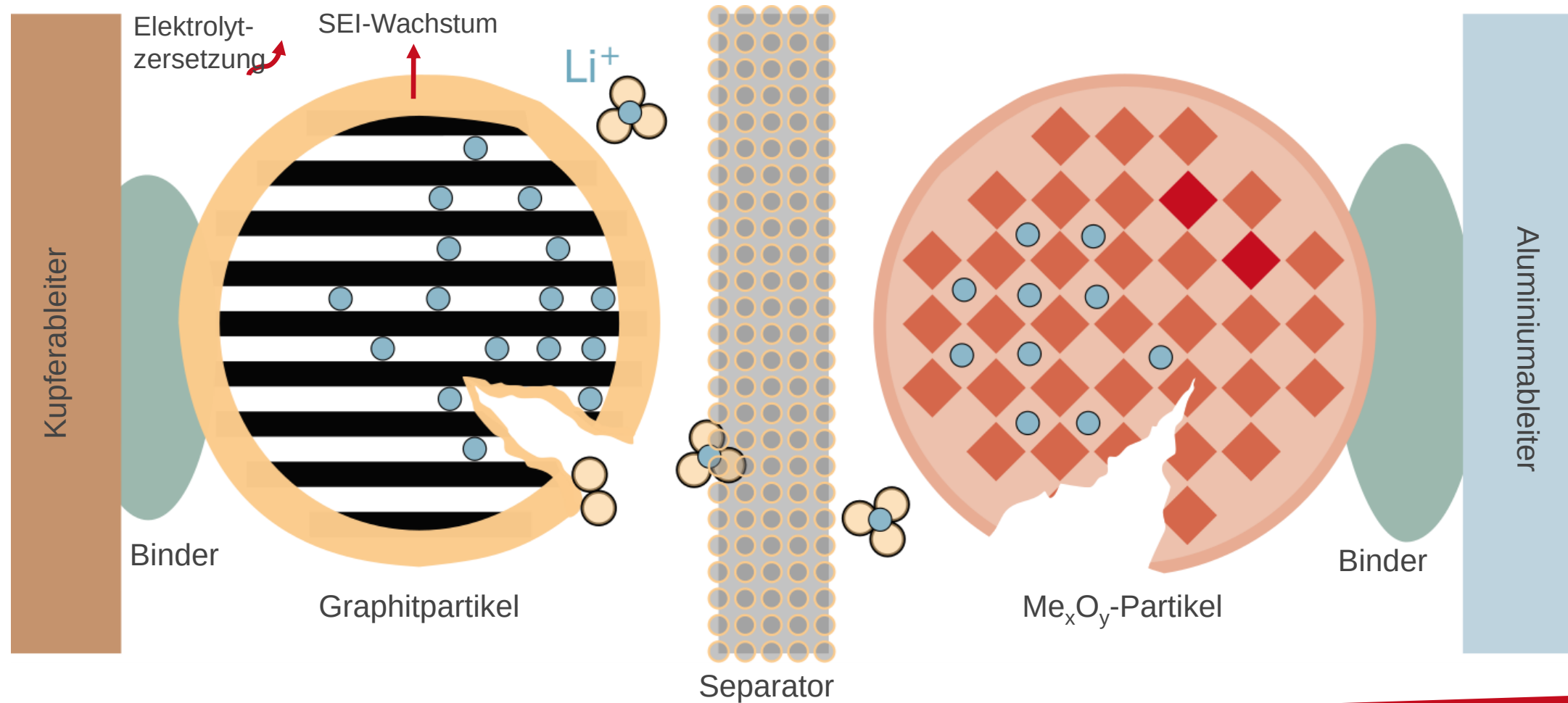
- Innerhalb von 10 Zyklen bis zu 10 % Kapazitätsverlust
- Problem: Laden bei tiefen Temperaturen, vor allem mit großen Strömen
- Einschränkung Laden von Elektroautos!

Alterung reduzieren durch:

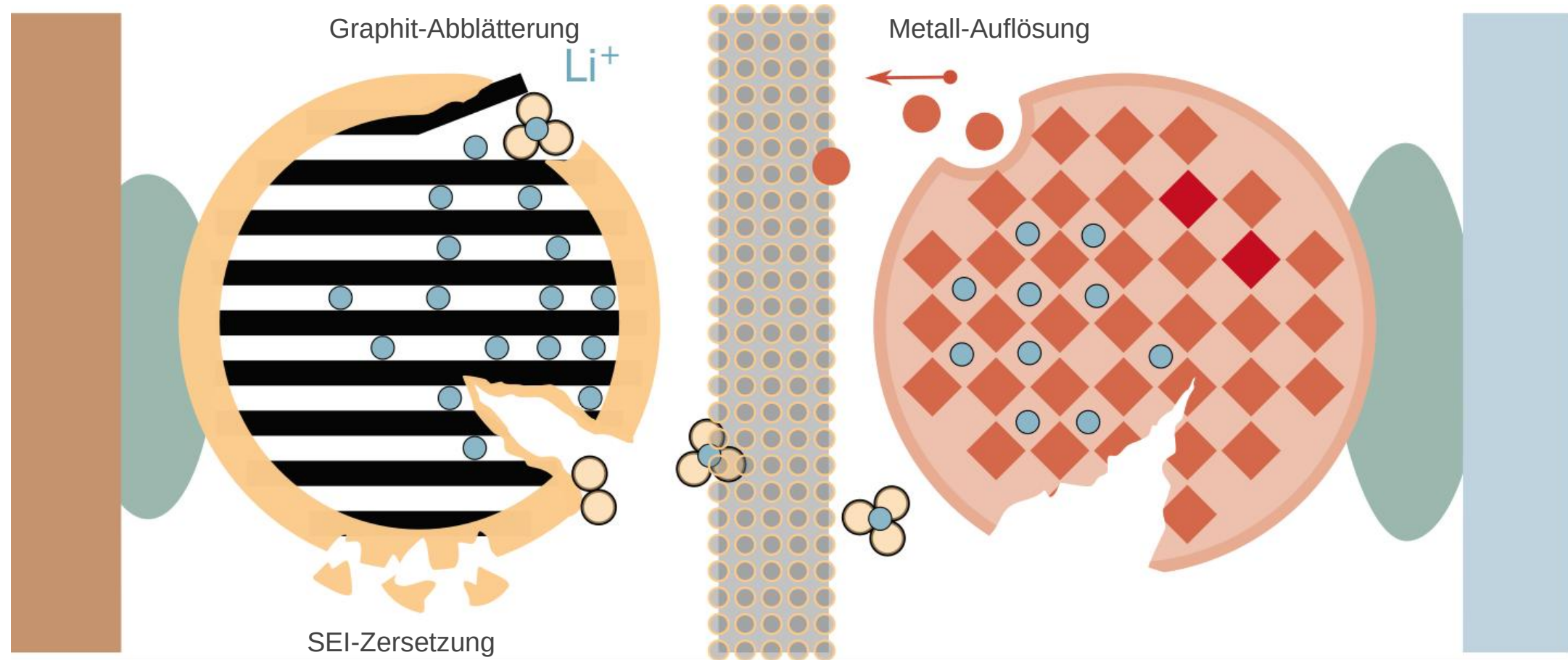
- Temperatur nicht zu tief
- Geringe Ladeströme
- Schnellladung ist besonders im Winter ein Problem



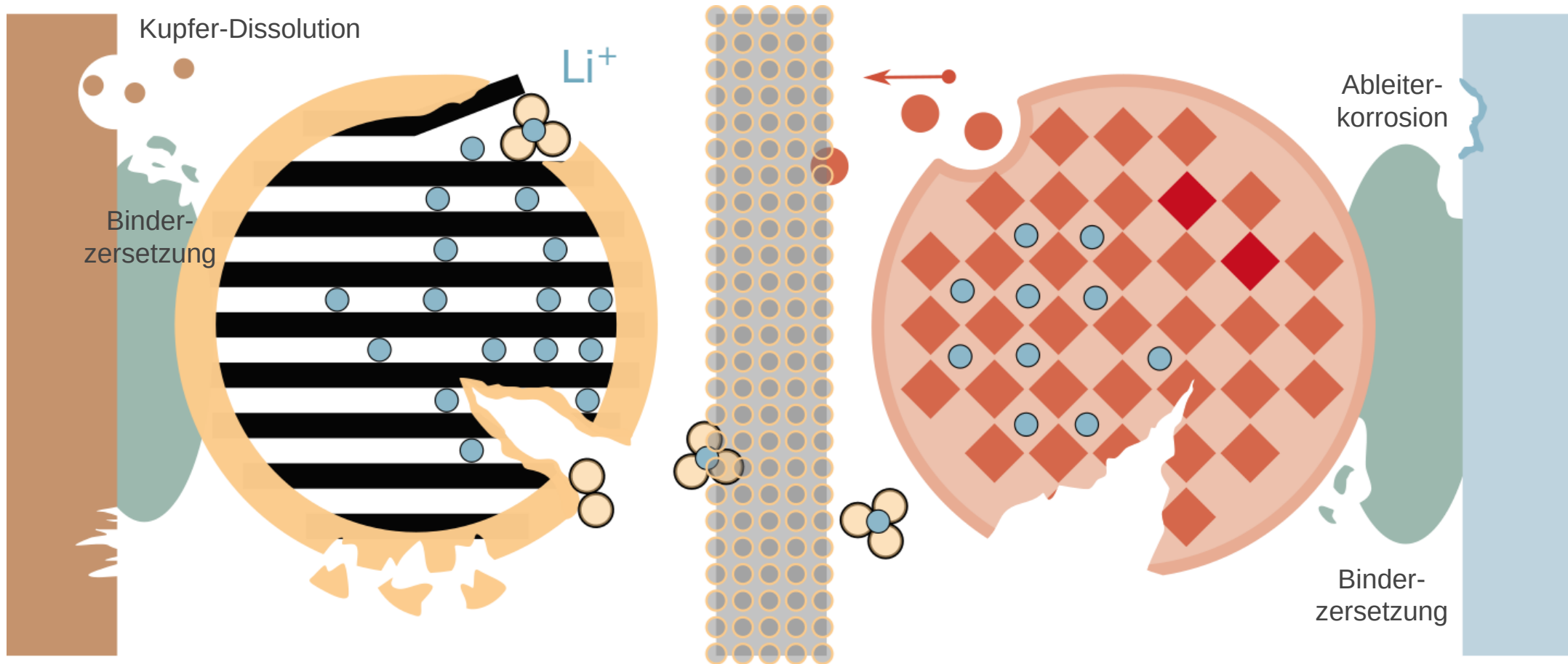
Degradationsmechanismen - Überblick



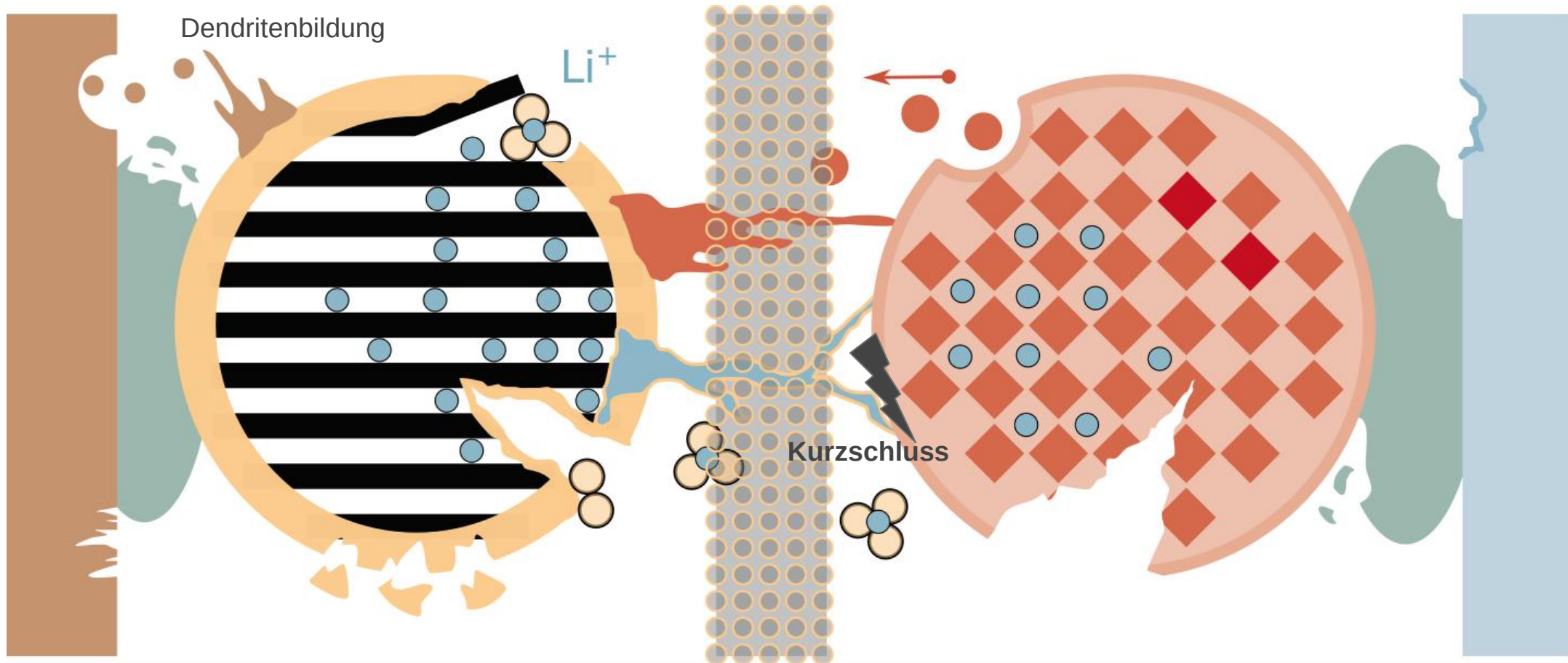
Degradationsmechanismen - Überblick



Degradationsmechanismen - Überblick



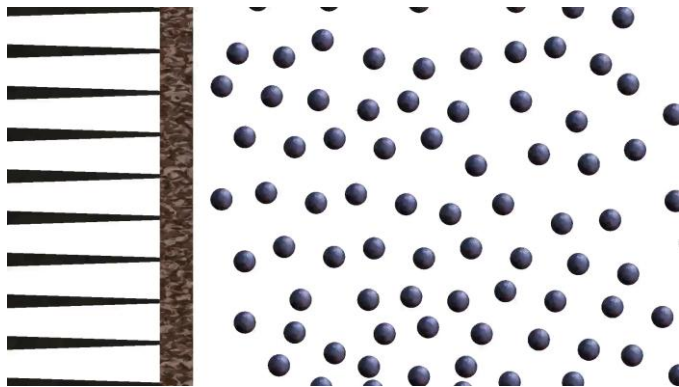
Degradationsmechanismen - Überblick



Alterung - Plating

Plating – Abscheidung von metallischem Lithium an der Anode:

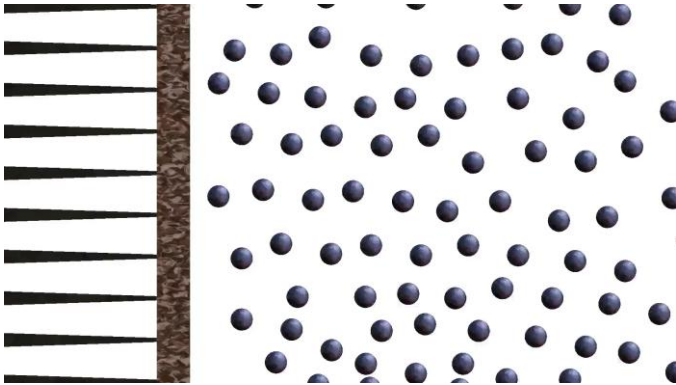
- Wenn lokale Potential an Anode auf 0 V gegen Lithium sinkt
- Bei vollgeladener Anode liegt Potential im Bereich von $\sim 0.2\text{V}$ vs Li/Li^+
- Potential an der Anode kann noch weiter abfallen



Plating durch Überladung

- Bei Einhaltung der Strom- und Temperaturgrenzen läuft Diffusion in Anode für Ionenfluss schnell genug ab
- Bei Überladung steigen Konzentration Li^+ und damit die Überspannung an
 - Anodenpotential fällt unter 0V vs Li/Li^+ , Plating tritt bei zu hohen SOC auf

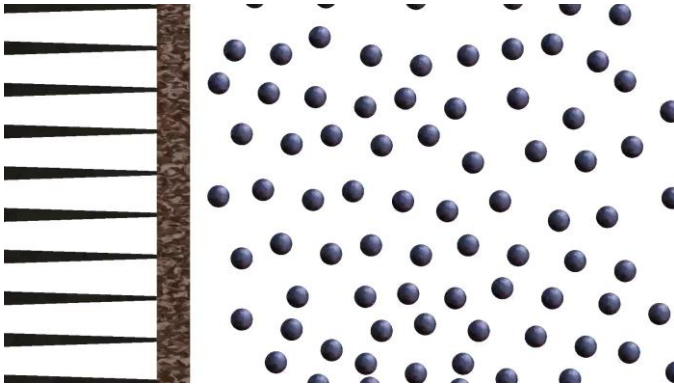
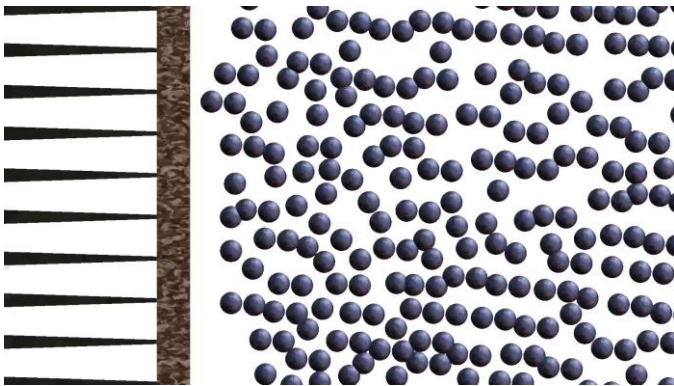
Alterung - Plating



Plating bei niedrigen Temperaturen

- Verminderte Diffusion ist zu langsam für die Ionenfluss
- Hohe Konzentrationen an Li^+ an Anodenoberfläche
- Plating kann bereits bei niedrigen SOC auftreten

Alterung - Plating



Plating bei niedrigen Temperaturen

- Verminderte Diffusion ist zu langsam für die Ionenfluss
- Hohe Konzentrationen an Li^+ an Anodenoberfläche
- Plating kann bereits bei niedrigen SOC auftreten

Hohe Ladeströme

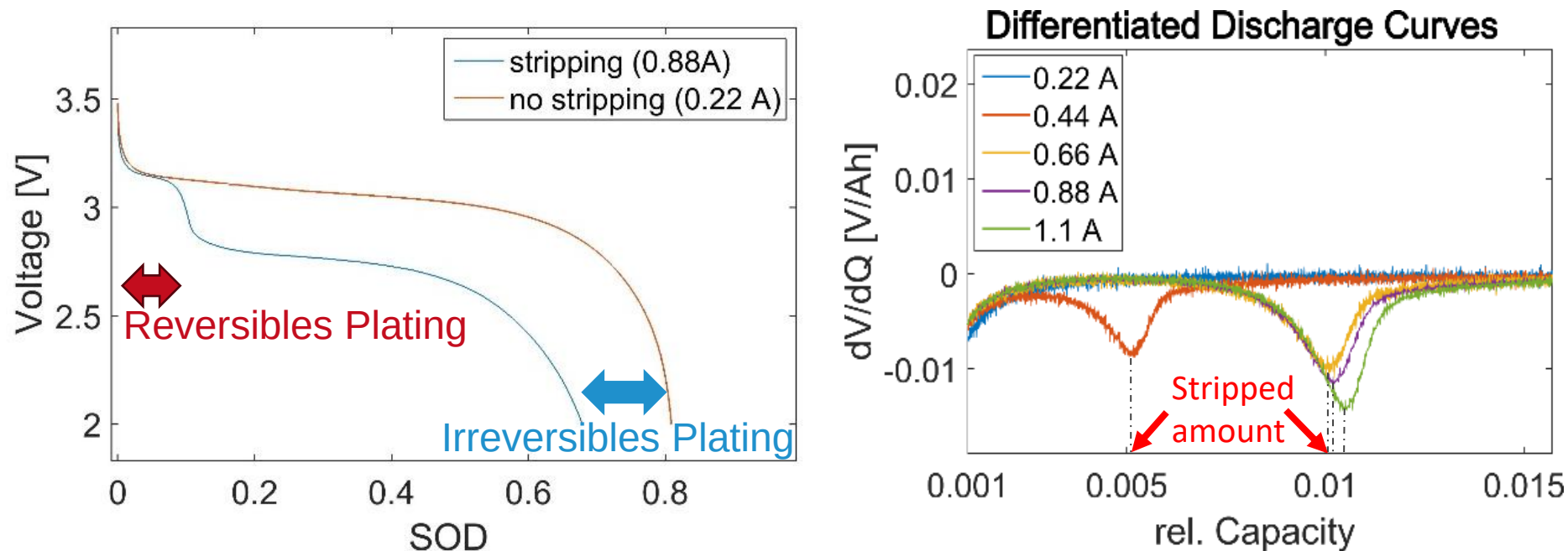
- Ionenfluss ist höher als Diffusionsgeschwindigkeit
- Hohe Konzentrationen an Li^+ an Anodenoberfläche
- Plating kann bereits bei niedrigen SOC auftreten

Einflussfaktoren: SOC, Temperatur, Ladestrom

Detektion von Lithium Plating

Detektion von Lithium Plating anhand von Entladekurven

- Stripping von metallischem Lithium → zusätzliches Spannungsplateau
- **Stripping = reversibles Plating ohne Kapazitätsverlust**



Methode nach: Petzl, M.; Danzer, M. A., Journal of Power Sources 254, 2014, 80-87

Alterung - Plating

Plating tritt auf bei

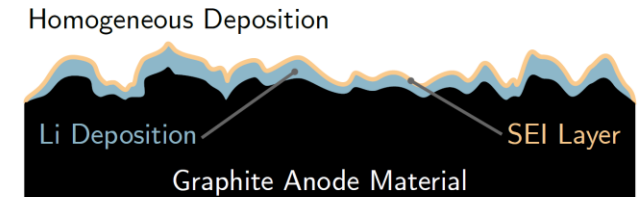
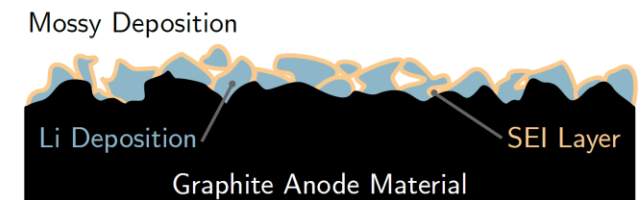
- Laden bei niedrigen Temperaturen → z.B. Elektrofahrzeug im Winter
- Laden mit hohen Strömen → z.B. Schnellladestationen

Aber:

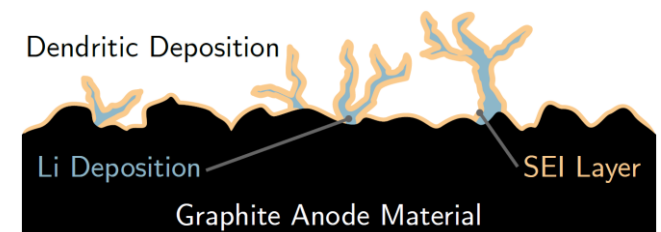
- Abhängigkeiten von Materialien, Bauformen etc.
- Unterschiedliche Ausprägungen
- Genaue Grenzen sind nicht allgemeingültig

→ Jeder Zelltyp ist anders, Auftreten von Plating ist statistisch

→ Entwicklung eines „Schnelltests“ zur Charakterisierung von Zellen im Projekt LiPi, gefördert vom BMW



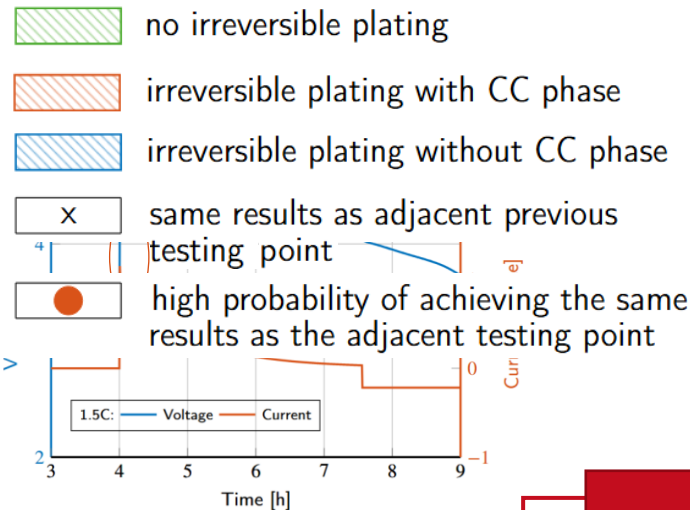
VS.



Dr.-Ing. Julian Long "Detection and Characterization of Lithium Plating in in Lithium-Ion-Batteries ". 2022.

Li-Plating Schnelltest

T \ I	-20°C	-15°C	-10°C	0°C	10°C
0.25C			x	x	x
0.5C			Start	x	x
0.75C			Start		
1C	●	●			
1.5C	x	x	Start	●	
2C	x	x	x	●	



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



Matrix: 30 mögliche Bedingungen

Anforderungen: 2 neue Zellen pro Bedingung, max. 2 Wochen, max. 24 Zellen

Ablauf: Start bei -10°C, mit 0.5C, 0.75C und 1.5C

Weitere Punkte: 4 vertikale und 4 horizontale Punkte für Strom- und Temperaturabhängigkeit

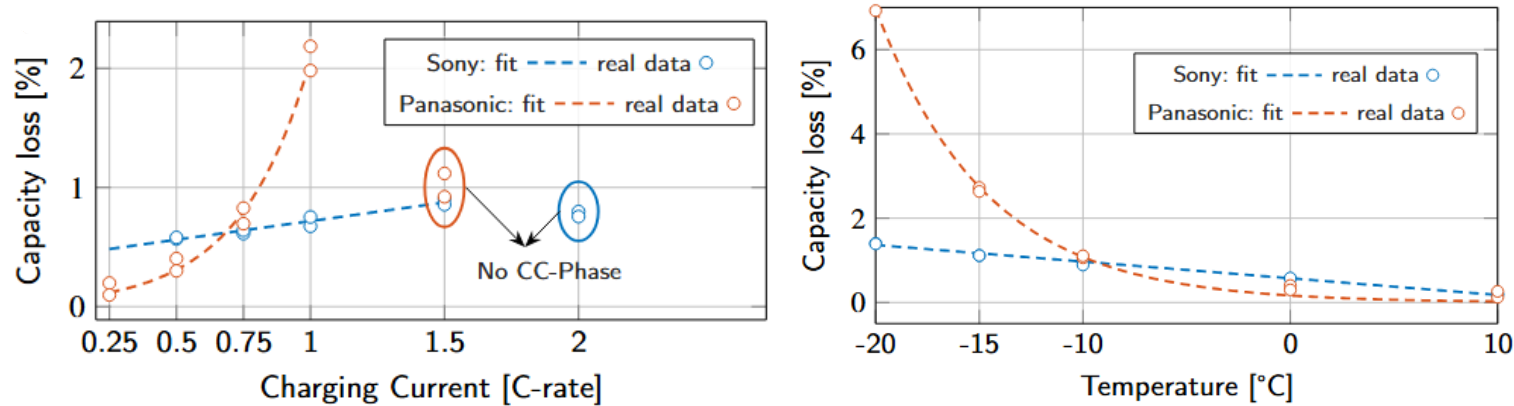
A. Grapentin, T. Rüwald, L. Magaña, J. Kowal, *A unified electrical testing method to characterize lithium plating in commercial lithium-ion batteries*, J. Power Sources 689, 2026, 240741, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2026.240741>

Cells

Manufacturer	Sony	Panasonic	Lithiumwerks
Model	US18650VTC6	NCR18650B	APR18650M1B
Format	18650	18650	18650
Anode	Graphite + Si	Pure Graphite	Pure Graphite
Cathode	NCA	NCA	LFP
Nominal Capacity	3.1 Ah	3.2 Ah	1.1 Ah



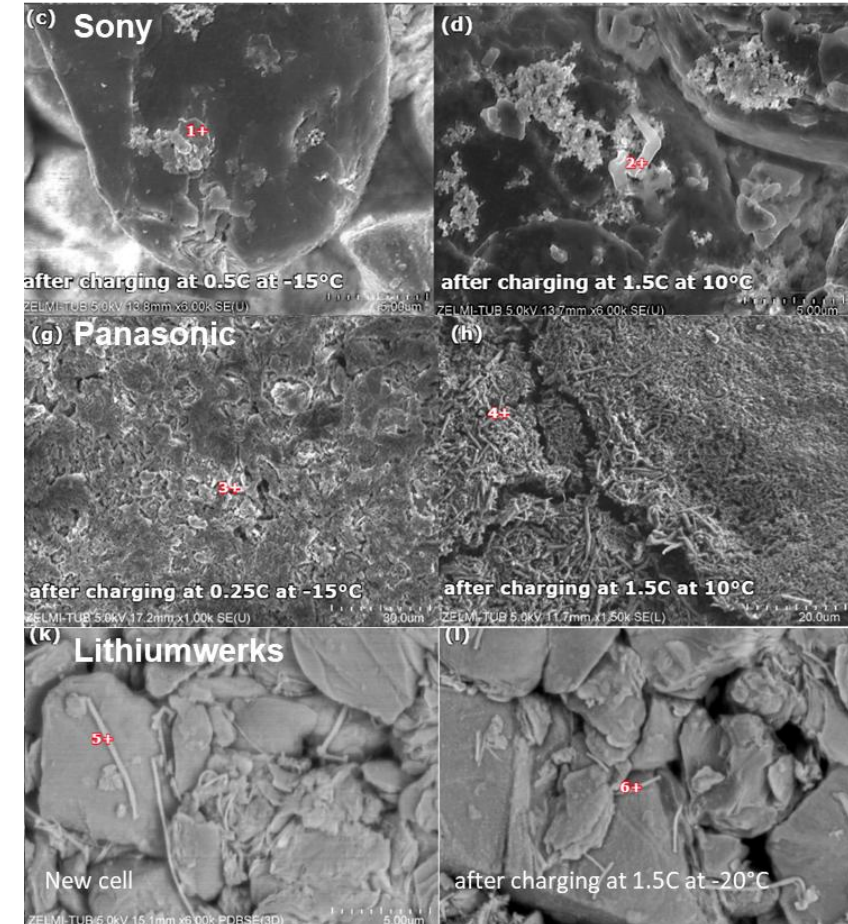
Ergebnisse – Strom- und Temperaturabhängigkeit



- Unterschiedliche Abhängigkeiten bei Sony und Panasonic
- Unterschiede reversible/irreversible und auch bei der Morphologie des Platings
- Lithiumwerks zeigt kein Plating unter egal welchen Bedingungen

- Noch offen: weitere Zellen testen für Klassifizierung und Plating Index

A. Grapentin, T. Rüwald, L. Magaña, J. Kowal, *A unified electrical testing method to characterize lithium plating in commercial lithium-ion batteries*, J. Power Sources 689, 2026, 240741, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2026.240741>



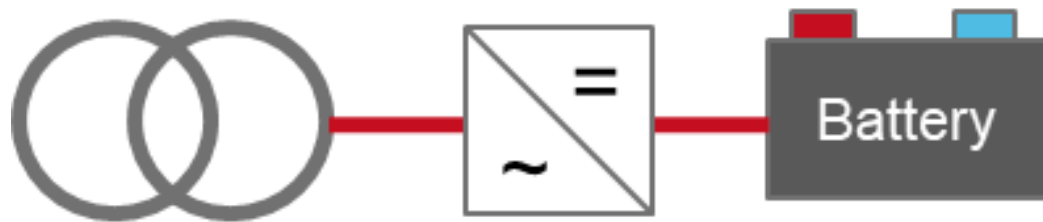
Relevanz für stationäre Batterien?

Plating tritt auf bei

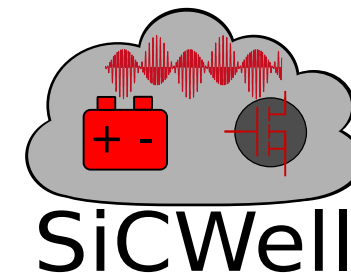
- Laden bei niedrigen Temperaturen → eher nicht, weil in temperierten Räumen
- Laden mit hohen Strömen → je nach Auslegung und Anwendung

Aber: Batterien werden immer mit Leistungselektronik verwendet

Untersuchung der Einflüsse auf Alterung im Projekt SiCWell, gefördert vom BMBF



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung





Einfluss von Rippelströmen auf die Alterung

Amplitude					
Frequency	0 A	6.25 A	12.5 A	25 A	Ripple Test
0 kHz					
10 kHz					
20 kHz					
40 kHz					

Alterungsbedingungen:

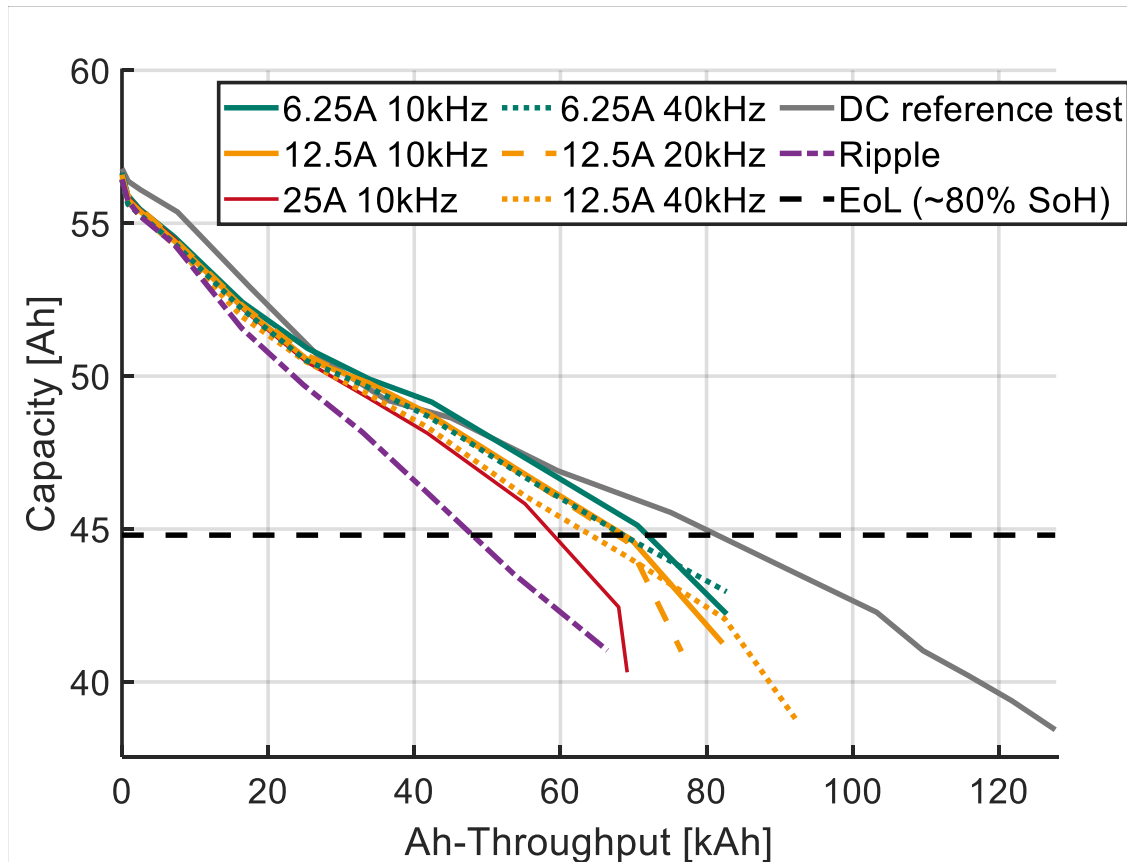
- DC Ladestrom: 0.75 C, DC Entladestrom: 1.6 C
- Zyklentiefe: $\approx 30\%$, mittlerer SOC $\approx 60\%$
- Umgebungstemperatur 25 °C, 3 Zellen pro Test

Ripple Test: Überlagerung von mehreren Frequenzen

Goldammer, E.; Gentejohann, M.; Schlüter, M.; Weber, D.; Wondrak, W.; Dieckerhoff, S.; Gühmann, C. & Kowal, J. (2022). The Impact of an Overlaid Ripple Current on Battery Aging: The Development of the SiCWell Dataset. *Batteries*, 8(2), 11.

All measurements open-access available: <https://ieee-dataport.org/open-access/sicwell-dataset>

Einfluss von Rippelströmen auf die Alterung



Ergebnisse:

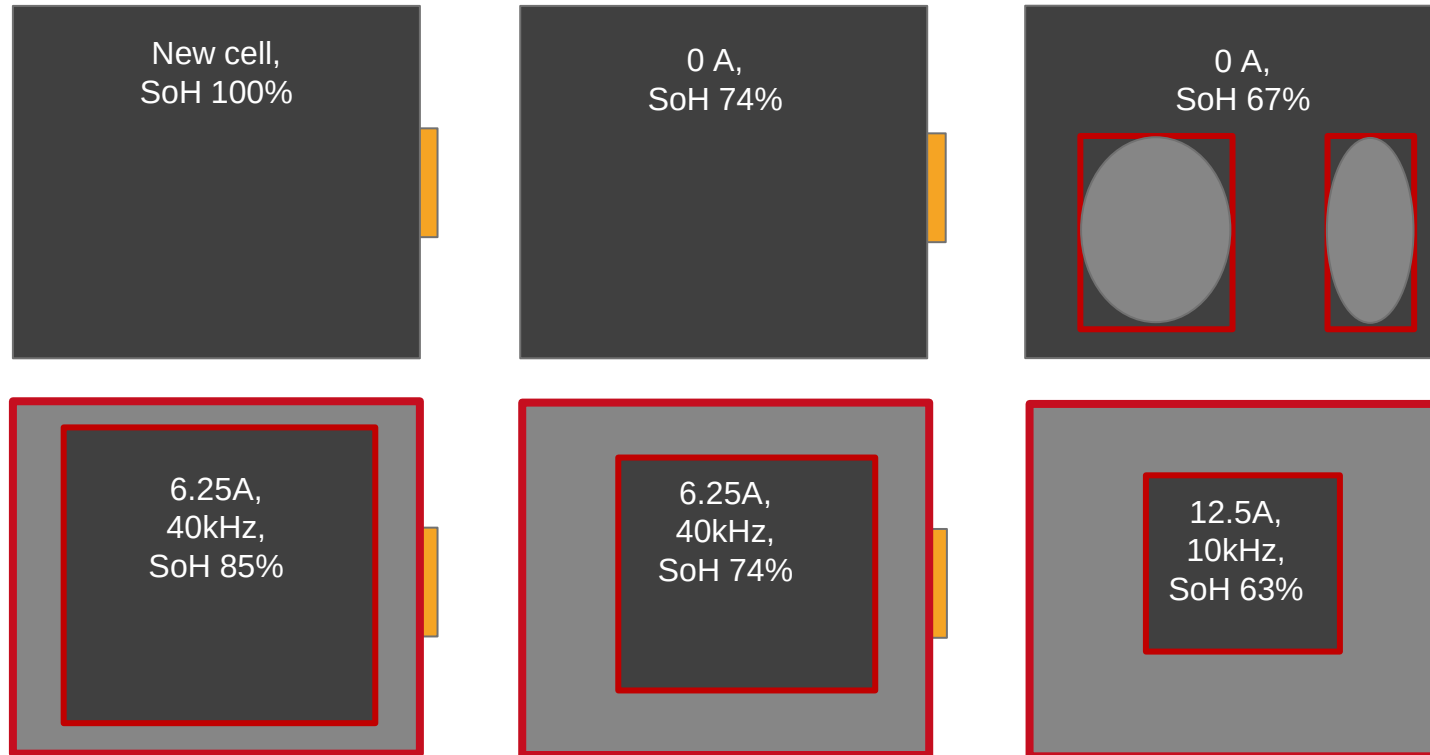
- Verstärkte Alterung für Zellen mit überlagertem Rippel und noch mehr bei mehreren Frequenzen
- Einfluss der Amplitude größer als der der Frequenz

Zusätzlich:

- Größere Streuung mit Rippel
- Mehr und frühere Ausfälle

Goldammer, E.; Gentejohann, M.; Schlüter, M.; Weber, D.; Wondrak, W.; Dieckerhoff, S.; Gühmann, C. & Kowal, J. (2022). The Impact of an Overlaid Ripple Current on Battery Aging: The Development of the SiCWell Dataset. *Batteries*, 8(2), 11. All measurements open-access available: <https://ieee-dataport.org/open-access/sicwell-dataset>

Einfluss von Rippelströmen auf die Alterung



Stellen mit Ablagerungen, vermutlich Lithium-Plating

SoH = State of Health = aktuelle Kapazität / Anfangskapazität

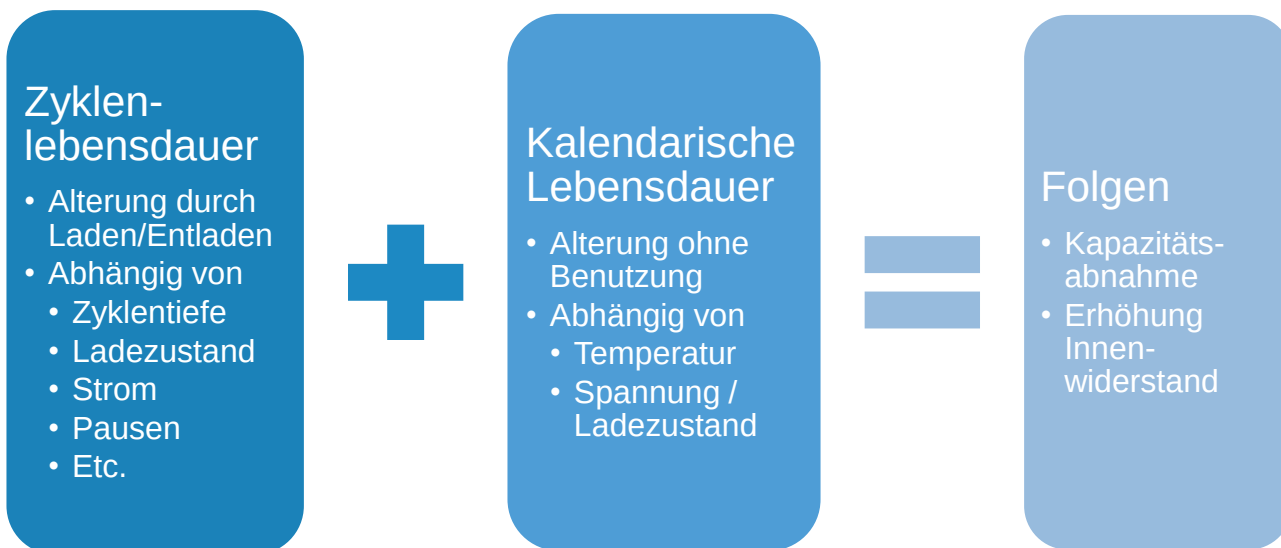
Zellöffnungen:

Mit Rippel zeigen sich Lithium-Ablagerungen an den Kanten

→ Höhere Stromdichten an den Rändern

→ Lokale Alterung an den Rändern, zusätzlich Austrocknung und Kontaktverlust

Auslegung von Batterien für beste Ausnutzung



Annahme:
Kalendarisch Lebensdauer
20 Jahre

Zykluslebensdauer
5.000 Zyklen 100 %
50.000 Zyklen 30 %

Zyklen/Tag	Kalendarisch	Gesamt
1 → 13,7 Jahre	20 Jahre	13,7 Jahre
0,5 → 27,4 Jahre	20 Jahre	20 Jahre
0,68 → 20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre
6,8 → 20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre

Zusammenfassung

- Batterien altern durch Benutzung und Nichtbenutzung → beachten bei der Dimensionierung
- Für Langzeitspeicher brauchen wir Speicher mit hoher kalendarischer Lebensdauer
- Es gibt verschiedene Alterungsprozesse, die je nach Benutzung auftreten
- Plating ist vor allem ein Problem beim Laden von Elektrofahrzeugen, aber auch bei hohen Frequenzanteilen im Strom
- Verschiedene Ausprägungen von Plating je nach Zelltyp und Nutzungsbedingungen

Ausblick:

- Weitere Zellen testen für Kategorisierung von Zellen
- Einfluss von Leistungselektronik: noch viele offene Fragen

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!