



Batteriealterung • Batteriemodelle • Batteriediagnostik • Batteriepackdesign • Elektromobilität • Stationäre Energiespeicher • Energiesystemanalyse

Alterungsmechanismen von Lithium-Ionen Batterien

Elektrotechnisches Kolloquium an der
TU Paderborn

09.04.2019

Kai-Philipp Kairies, Dirk Uwe Sauer



Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung
und Speichersystemtechnik

JARA | Jülich Aachen
Research
Alliance



E.ON Energy Research Center

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

HI MS | HELMHOLTZ-INSTITUTE
IONICS IN ENERGY STORAGE

ISEA | Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

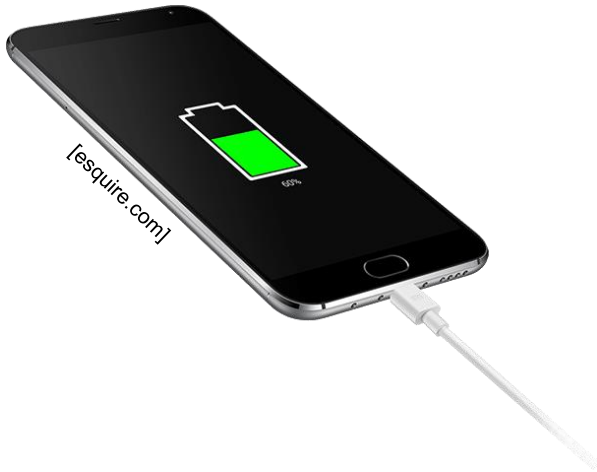
RWTH AACHEN
UNIVERSITY

Leistungsfähige Batteriespeicher werden immer wichtiger ...und damit ein gutes Verständnis ihrer Alterungsmechanismen

~25 €

Batteriekosten

> 25.000 €



2 Jahre

Lebensdauerziel

10 Jahre

Leistungsfähige Batteriespeicher werden immer wichtiger ...und damit ein gutes Verständnis ihrer Alterungsmechanismen



[zeit.de]

[Der-Postillon.de]

Ohne Kenntnis der Alterungsvorgänge, können folgende Fragen nicht beantwortet werden:

Garantie? Leasingraten?
Ausfallwahrscheinlichkeiten?

Betriebsgrenzen? Sicherheitsgrenzen?
Betriebsstrategie? Max. Ladeströme?

Gliederung

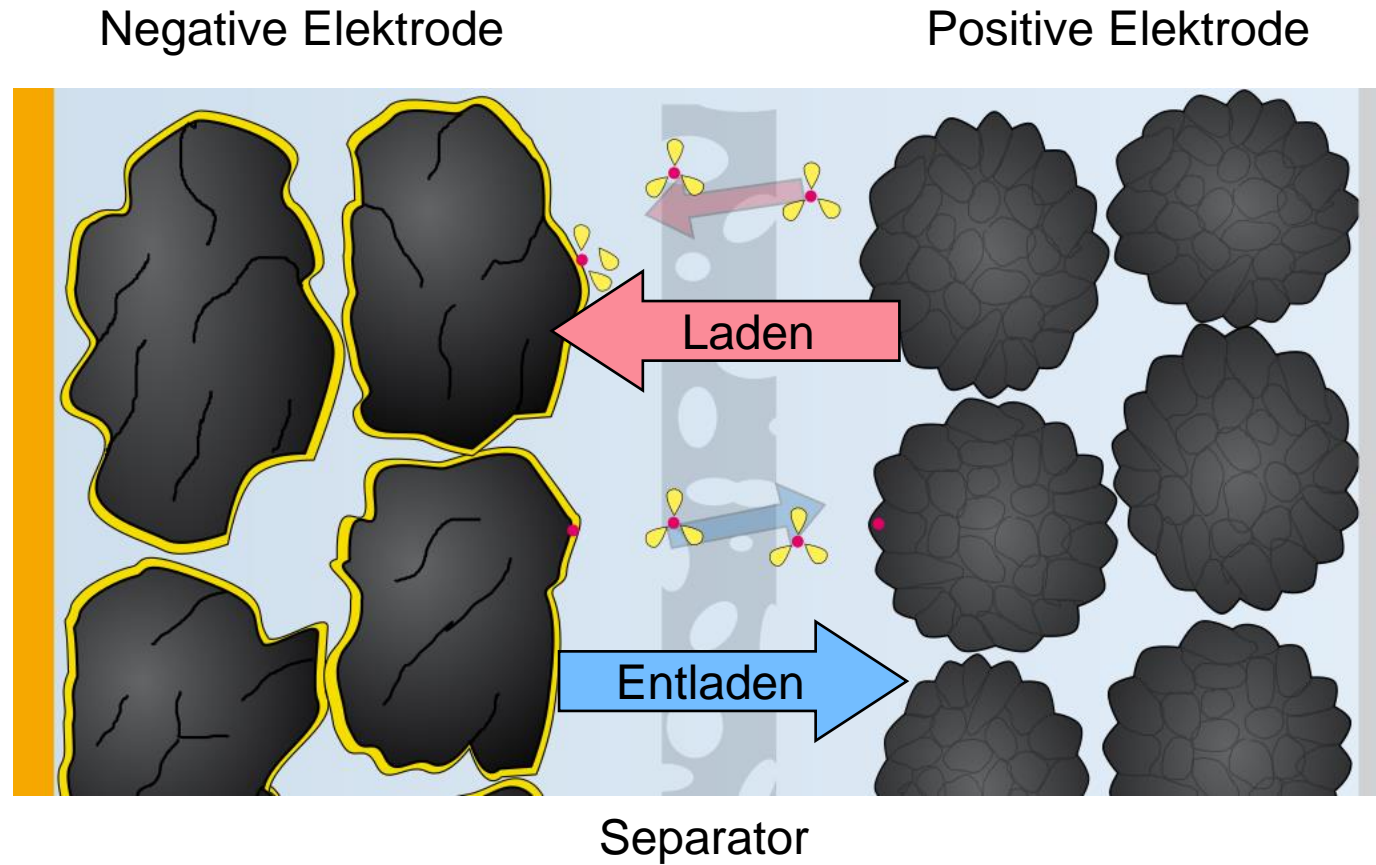
- 1 Motivation
- 2 **Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien**
- 3 Alterung von Batteriespeichern
- 4 Kalendarische Alterung
- 5 Zyklische Alterung
- 6 Alterungsbestimmung im Feld
- 7 Zusammenfassung

Lithium-Ionen Batterien

Große Zahl von Materialkombinationen – ein Funktionsprinzip

Materialien:

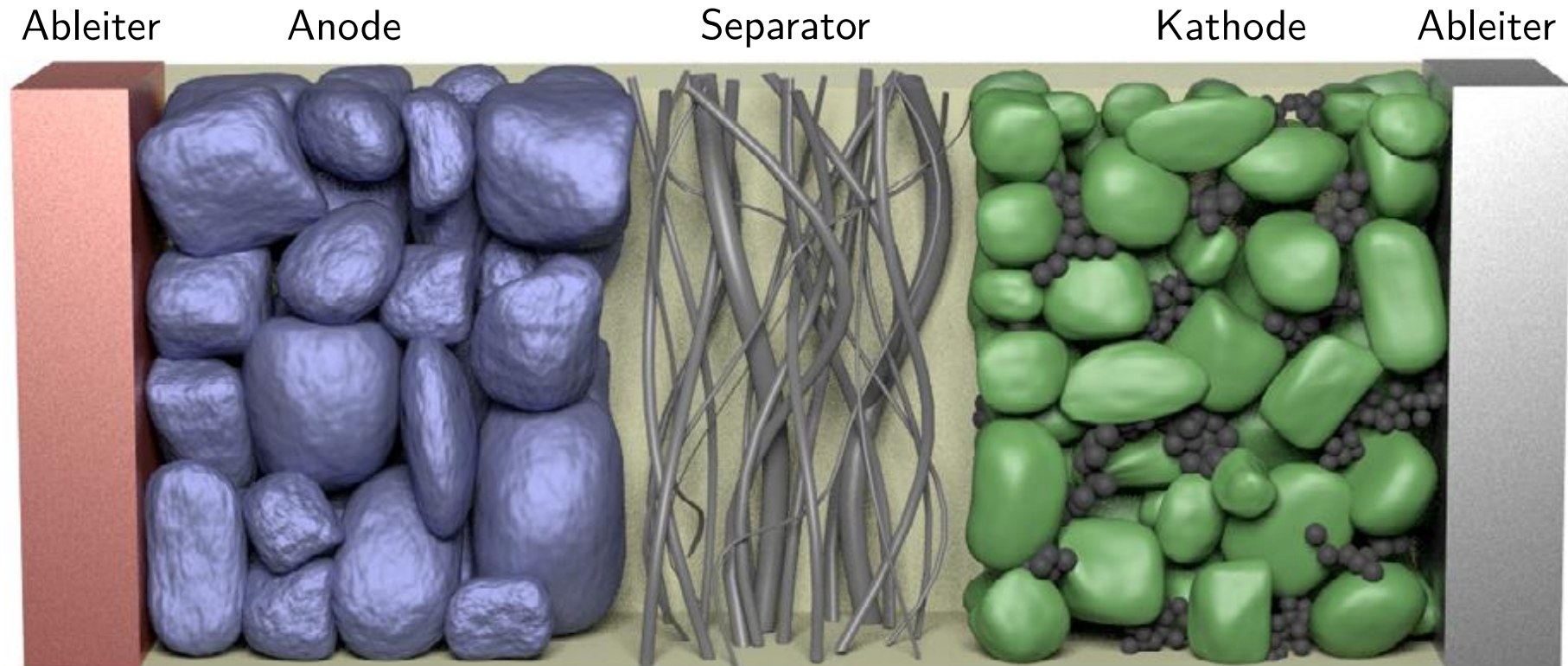
- Graphit
- Graphit & Silizium
- $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$



Materialien:

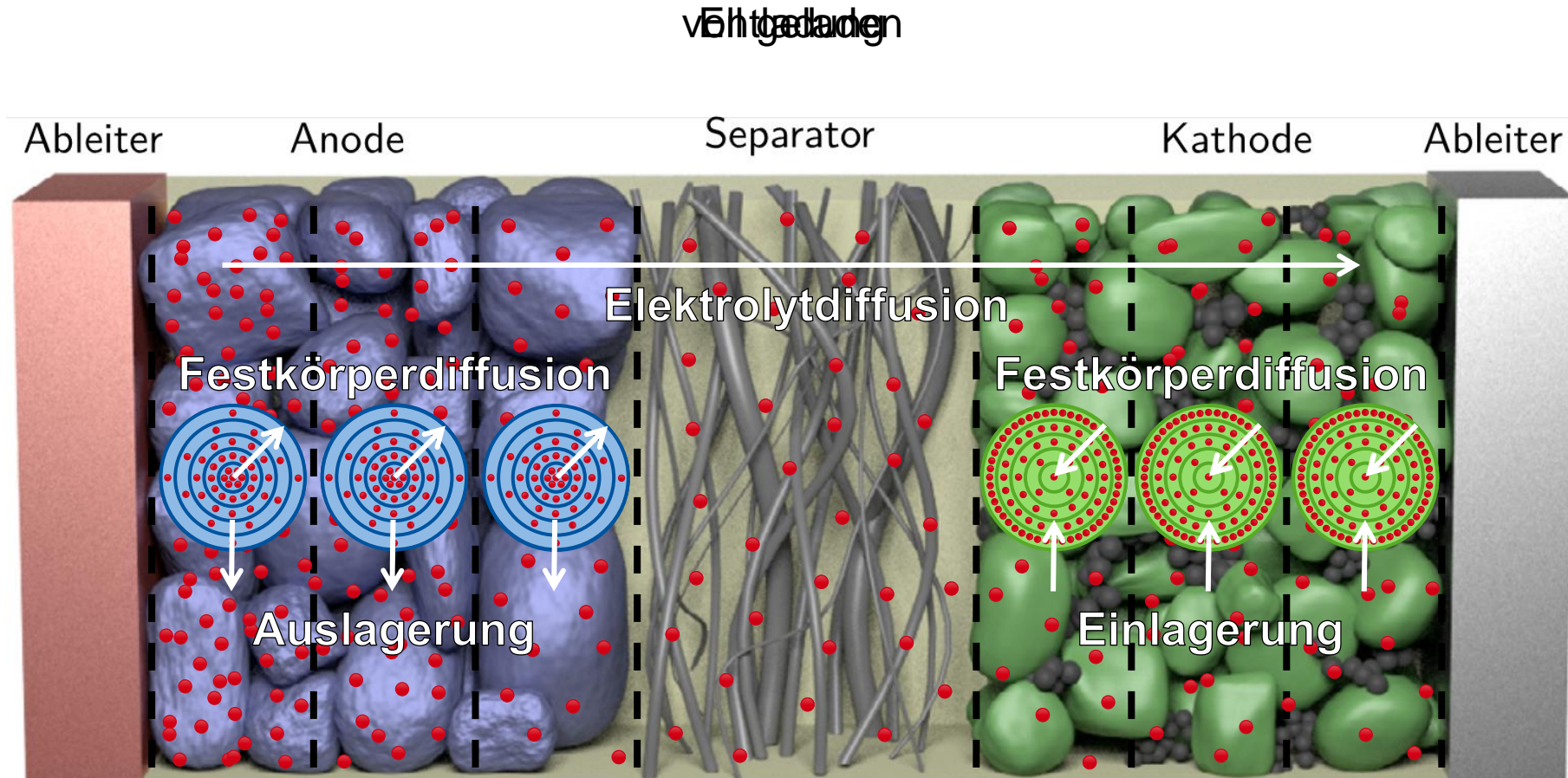
- LiCoO_2
- LiMn_2O_4
- LiFePO_4
- $\text{Li}(\text{Ni}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05})\text{O}_2$
- $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y})\text{O}_2$
-

Mikroskopischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie



M. Ender. „Mikrostrukturelle Charakterisierung, Modellentwicklung und Simulation poröser Elektroden für Lithiumionenzellen“. Dissertation. KIT, 2014

Modell: Abgebildete Reaktionen



M. Ender. „Mikrostrukturelle Charakterisierung, Modellentwicklung und Simulation poröser Elektroden für Lithiumionenzellen“. Dissertation. KIT, 2014

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien
- 3 Alterung von Batteriespeichern
- 4 Kalendarische Alterung
- 5 Zyklische Alterung
- 6 Alterungsbestimmung im Feld
- 7 Zusammenfassung

Was bedeutet eigentlich „Alterung“?



Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

Alterung



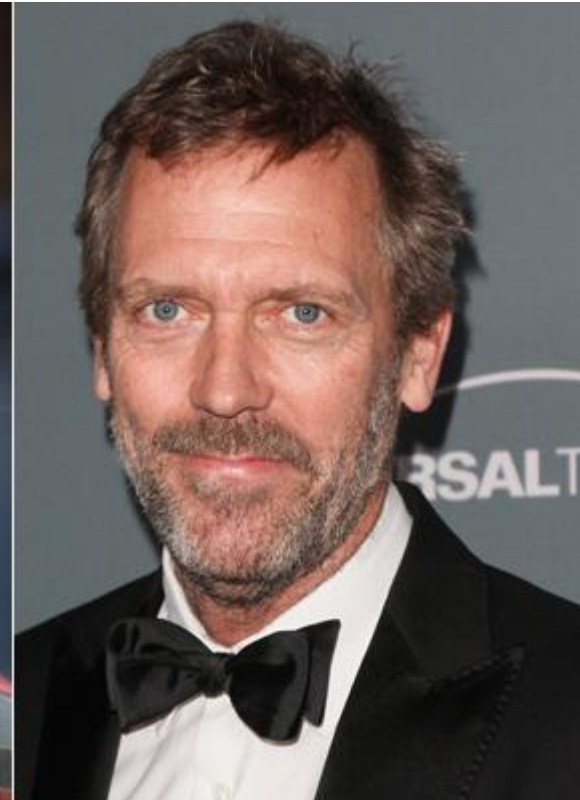
Hugh Laurie
~90er Jahre

Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

Alterung



Hugh Laurie
~90er Jahre



Hugh Laurie
~2015

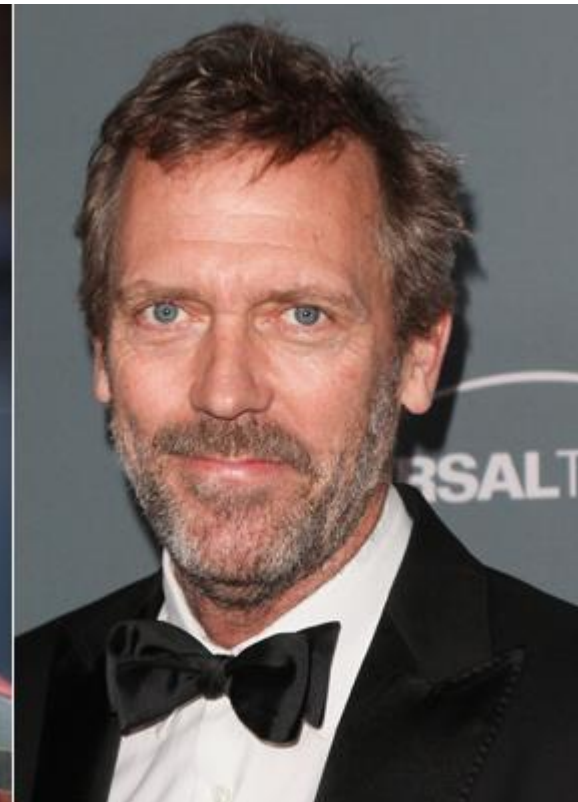
Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

Alterung

Mehr Bart



Hugh Laurie
~90er Jahre



Hugh Laurie
~2015

Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

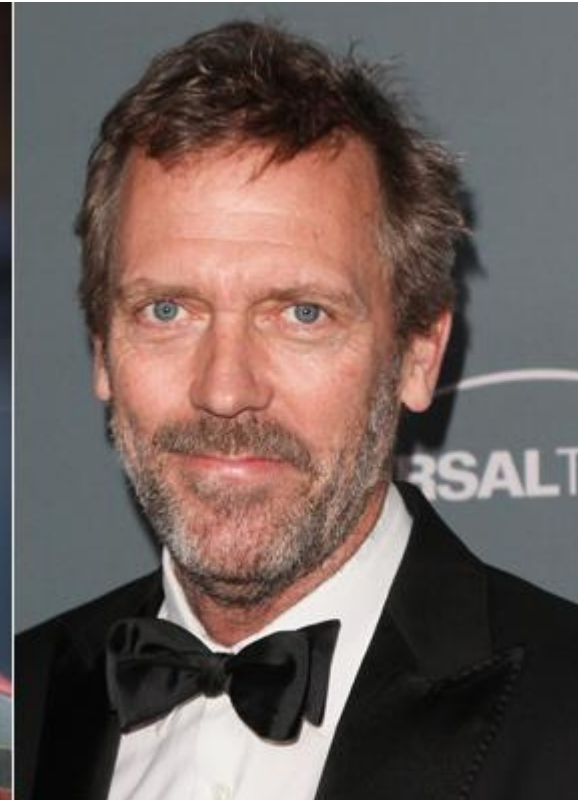
Alterung

Mehr Bart

Schickeres Outfit



Hugh Laurie
~90er Jahre



Hugh Laurie
~2015

Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

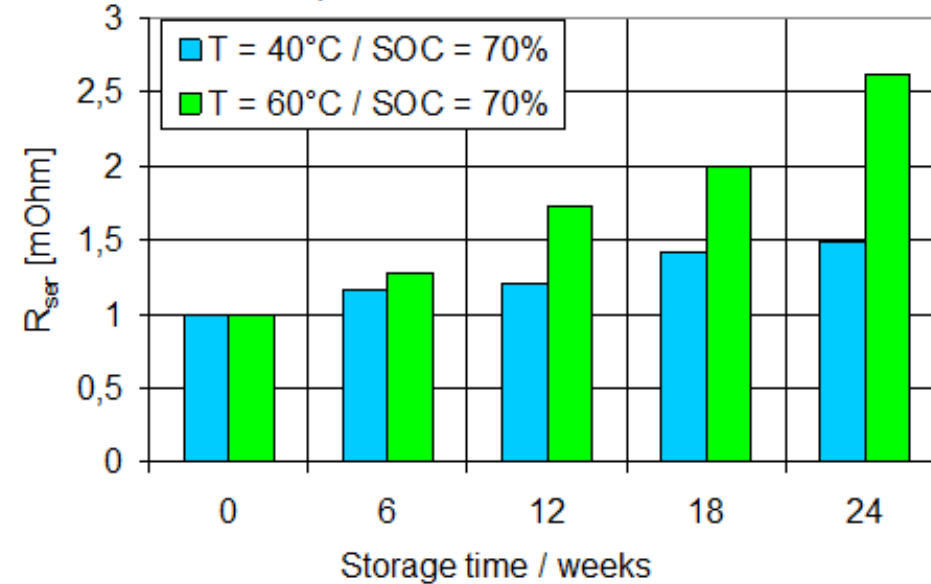
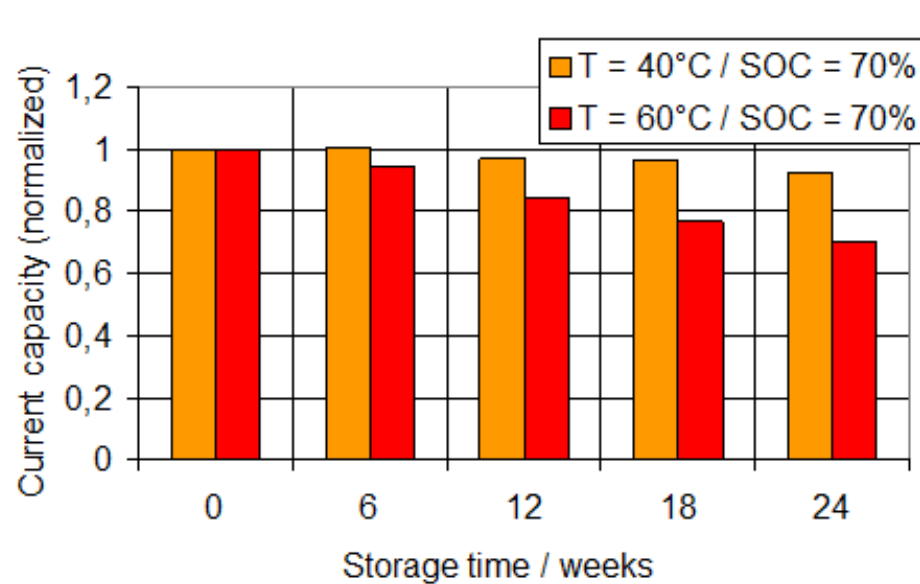
Alterung



Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

Alterung

Calendar Life Tests with Li-Ion Batteries (NMC-Cathode)

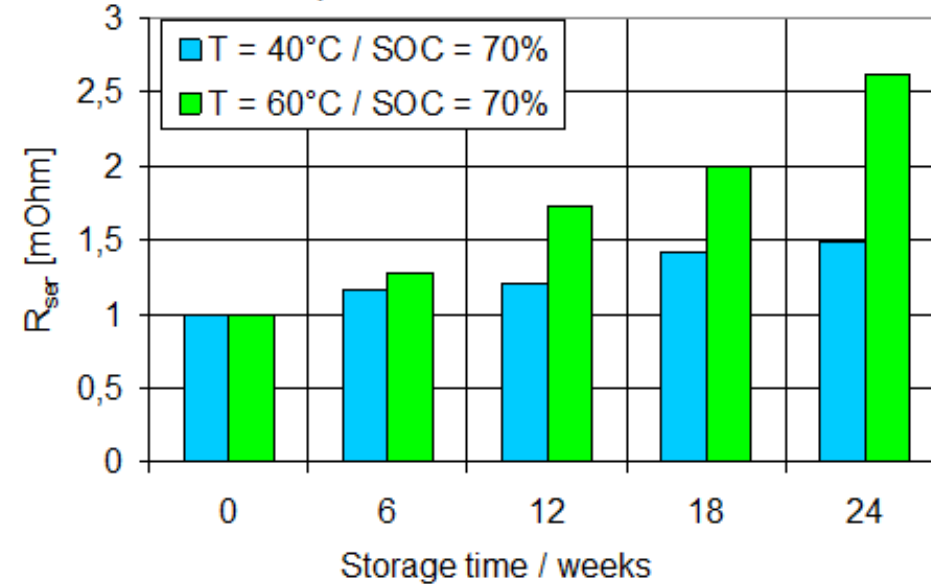
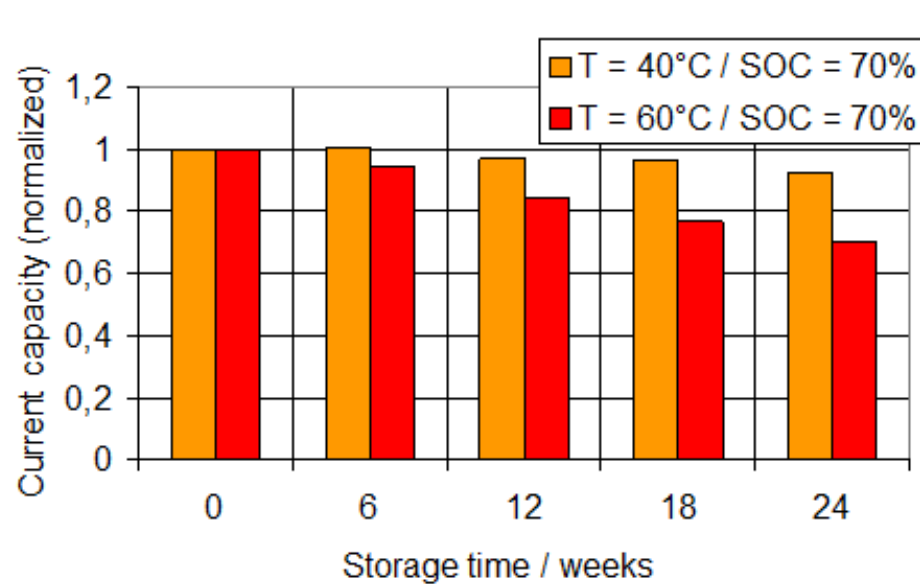


Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

Alterung

Reduzierung der Kapazität

Calendar Life Tests with Li-Ion Batteries (NMC-Cathode)



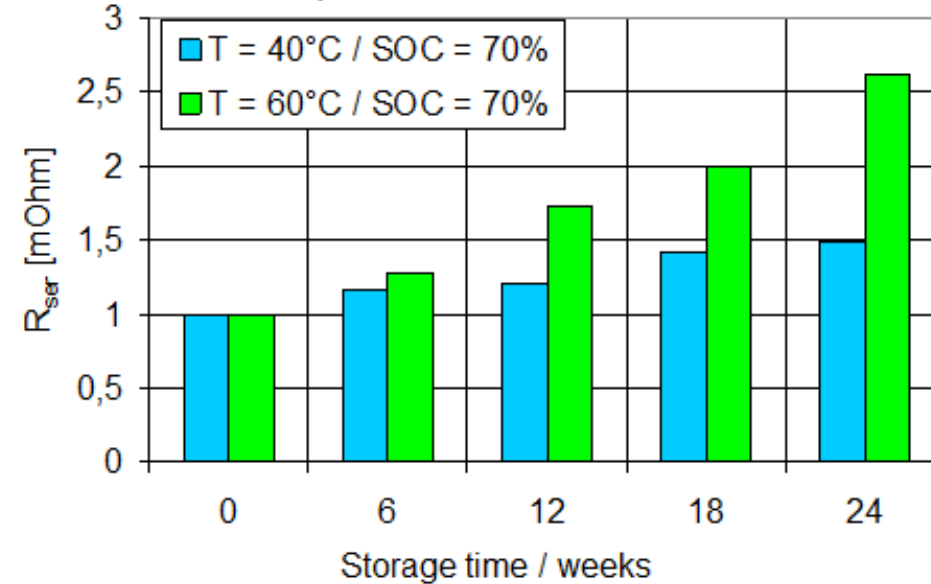
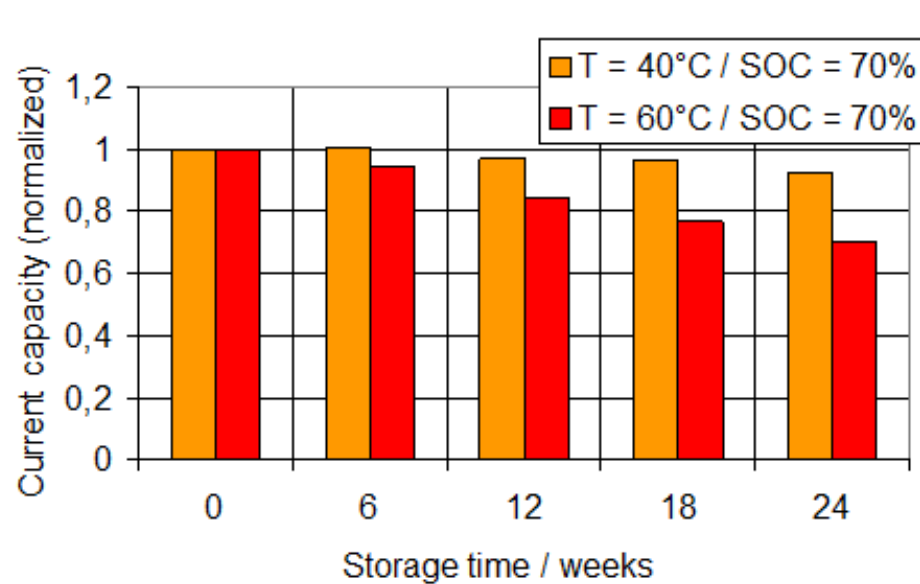
Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

Alterung

Reduzierung der Kapazität

Erhöhung des Innenwiderstands

Calendar Life Tests with Li-Ion Batteries (NMC-Cathode)



Was bedeutet eigentlich „Alterung“?

Alterung

Reduzierung der Kapazität

Erhöhung des Innenwiderstands

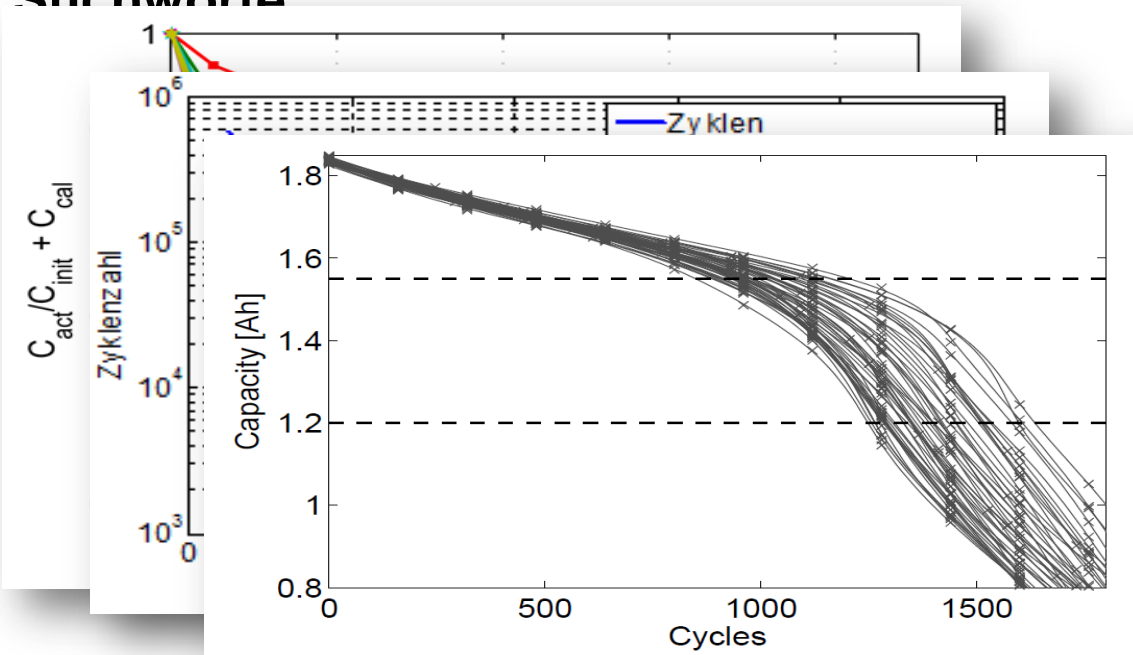


Externe Alterung vs. interne Alterung

Externe Alterungsfaktoren

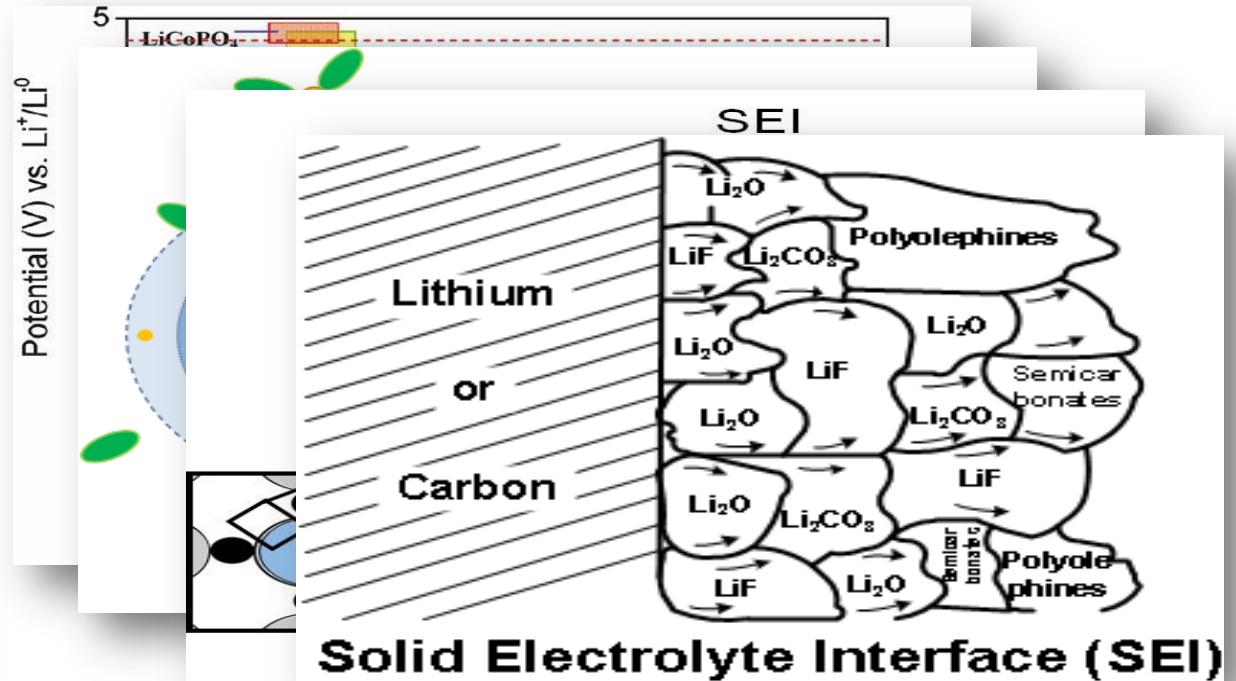
„Welche Faktoren beeinflussen die Alterung?“

Stichworte:



Interne Alterungsfaktoren

„Was passiert in der Batterie?“



Externe Alterungsfaktoren

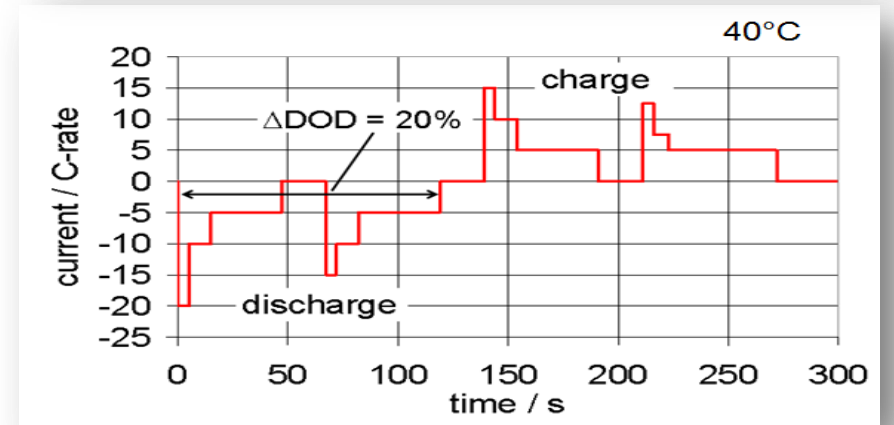
■ Kalendarische Alterung

- Beschränkt die Lebensdauer einer Batterie ohne Belastung.
- Unter anderem abhängig von der Lagerdauer.

■ Zyklische Alterung

- Zusätzliche Alterung durch elektrische Nutzung der Batterie.
- Wird stets durch kalendarische Alterung überlagert.
- Unter anderem abhängig vom Energiedurchsatz.

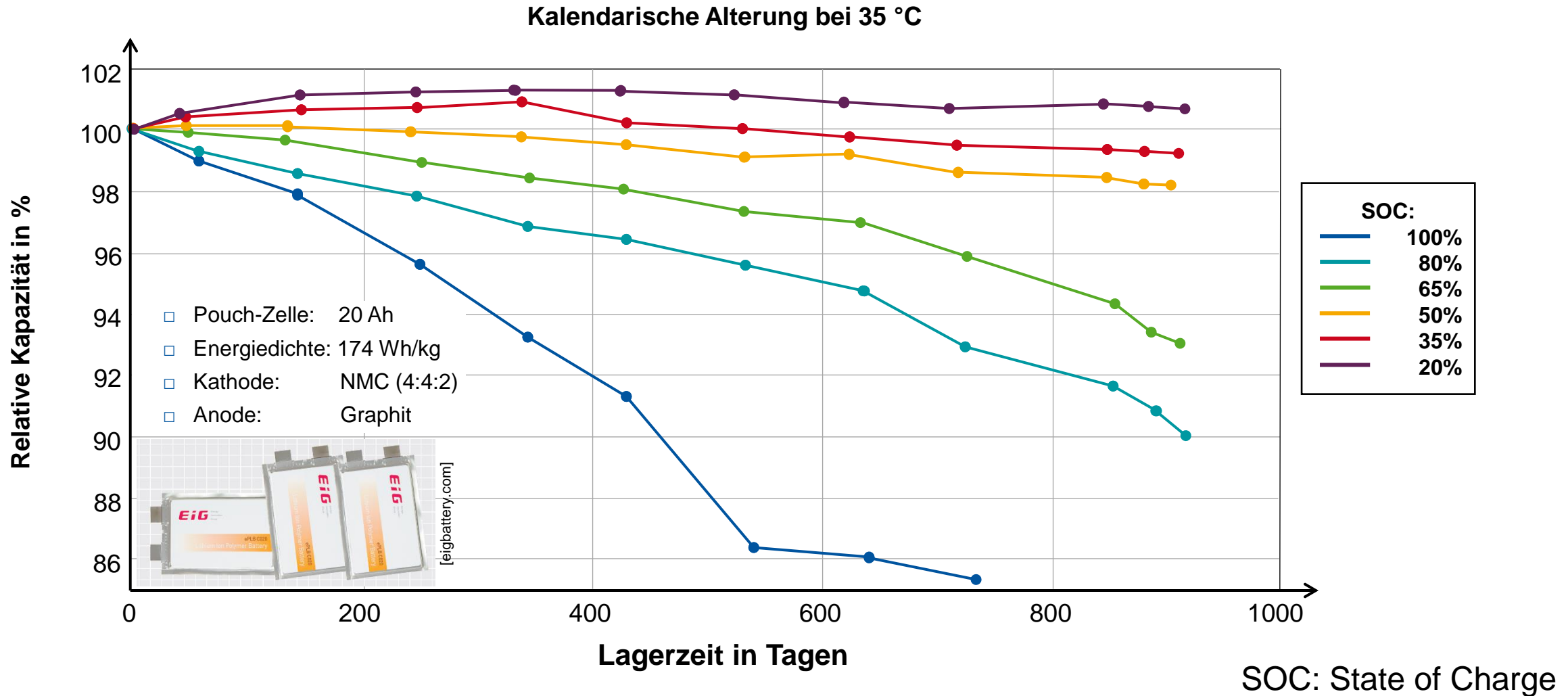
■ Die Superposition von kalendarischer und zyklischer Alterung ist nicht trivial und eine andauernde Forschungsthematik.



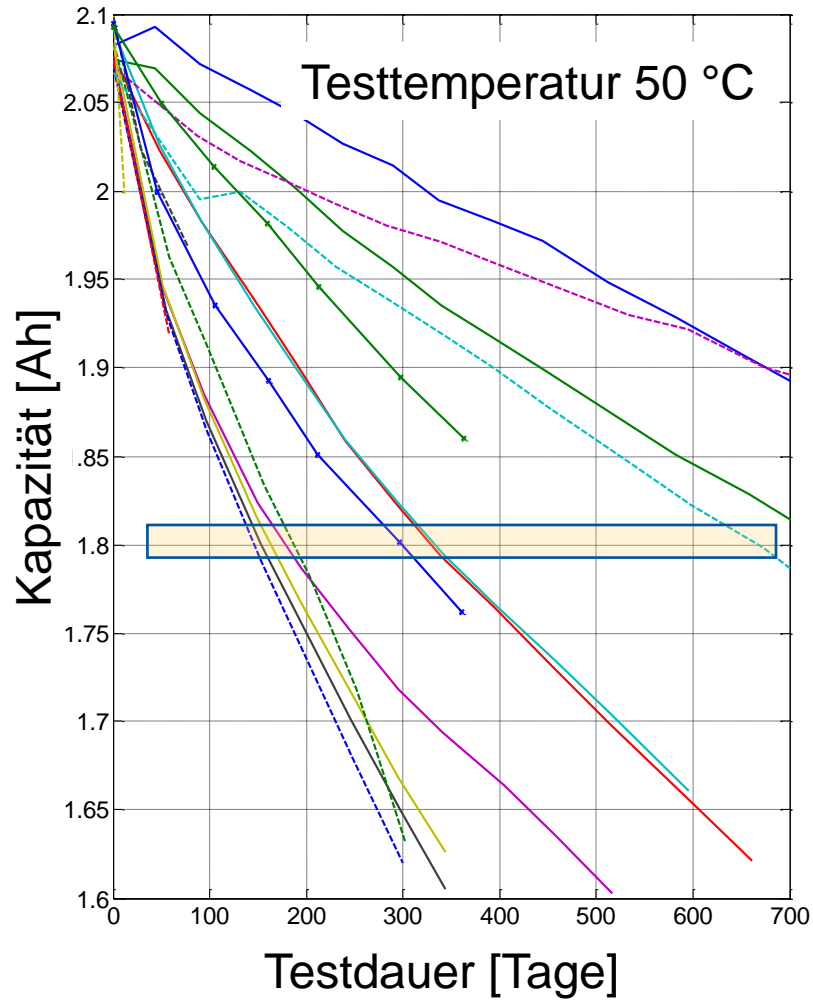
Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien
- 3 Alterung von Batteriespeichern
- 4 **Kalendarische Alterung**
- 5 Zyklische Alterung
- 6 Alterungsbestimmung im Feld
- 7 Zusammenfassung

Kalendarische Alterung Bedeutung des Ladezustands

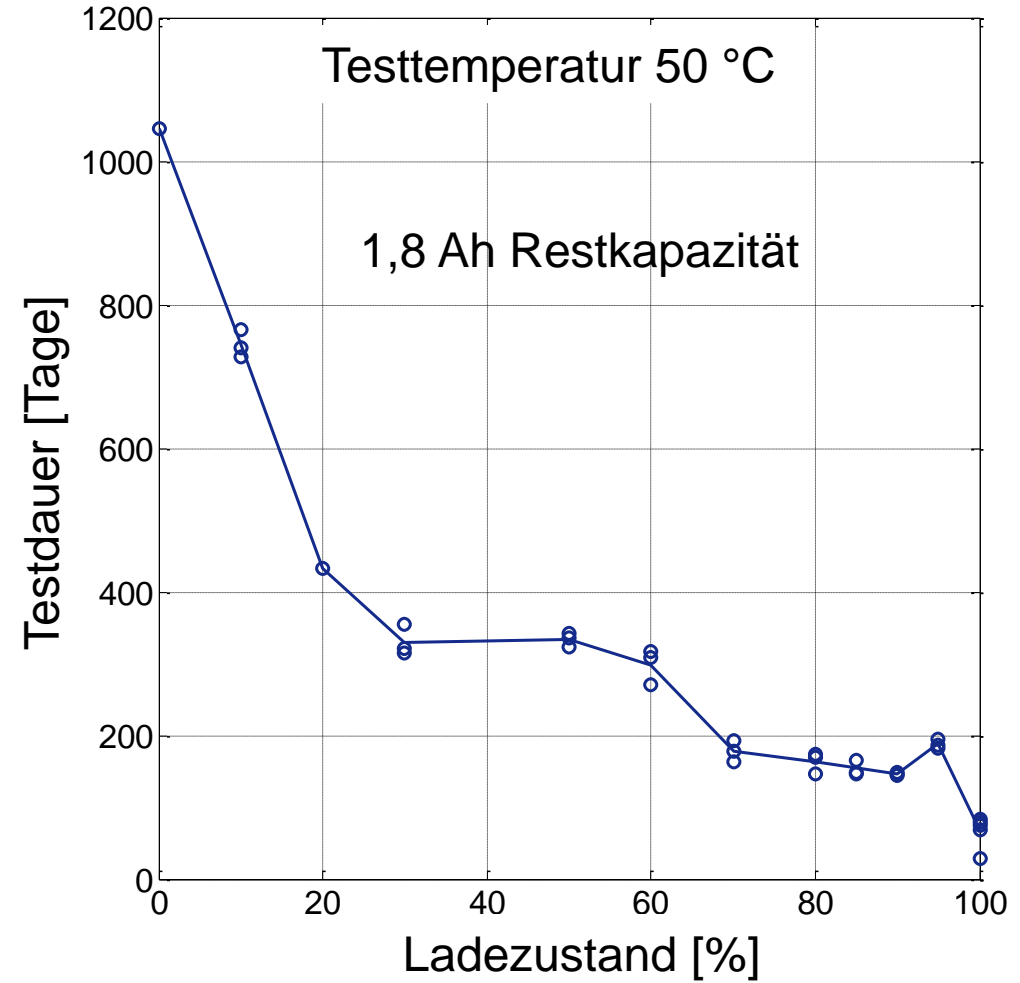
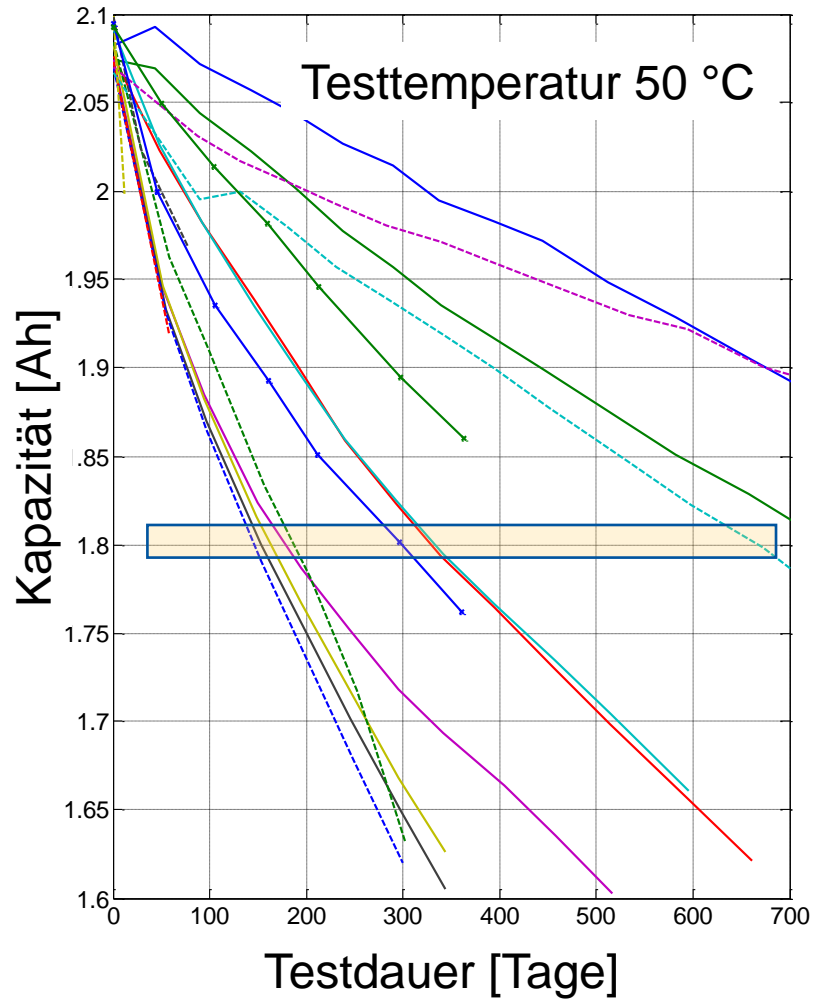


Kalendarische Alterung Bedeutung des Ladezustands



**Wie lange braucht es, bis eine Batteriezelle
15% ihrer Kapazität verliert?
(in Abhängigkeit ihres Ladezustands)**

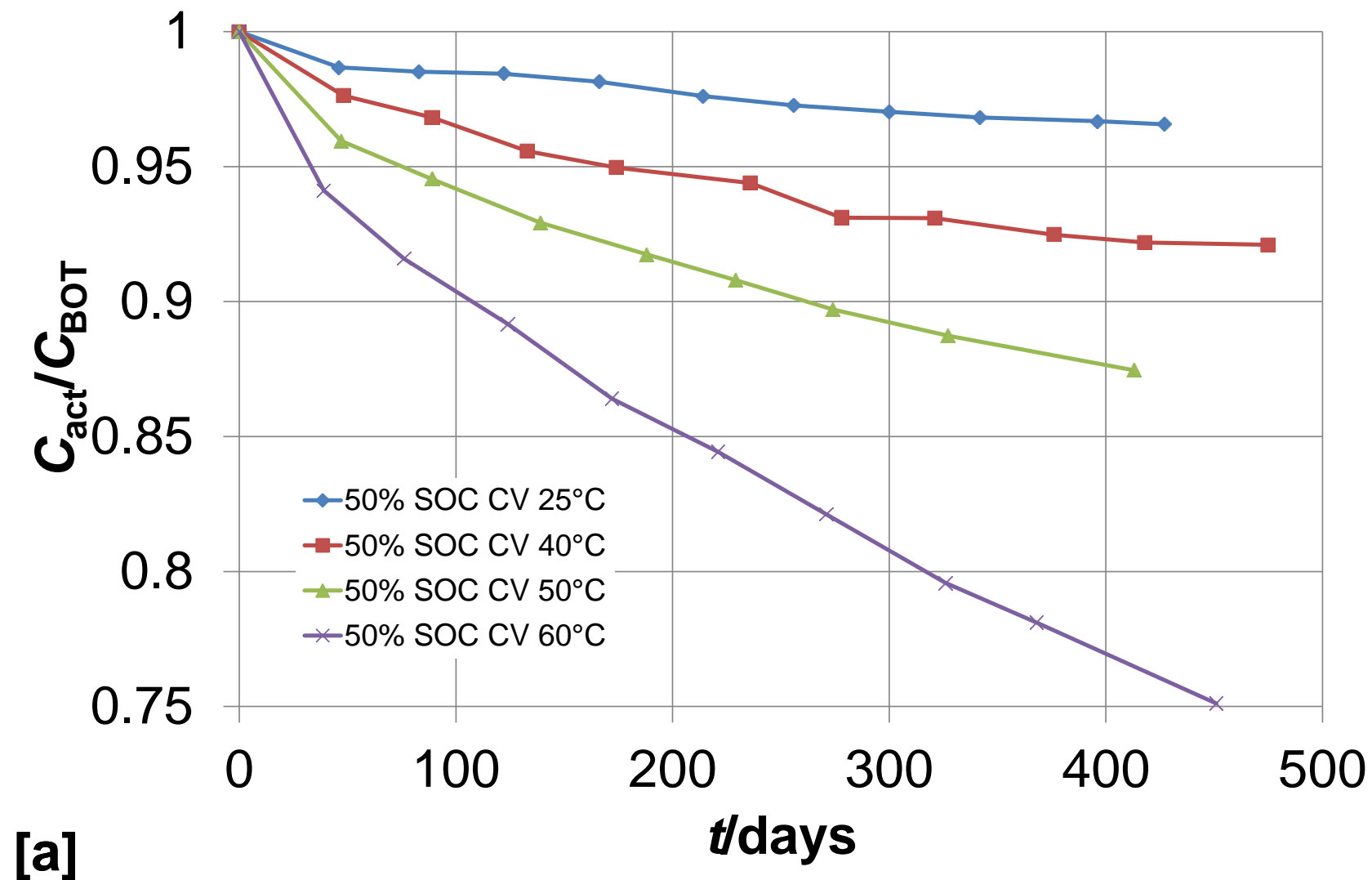
Kalendarische Alterung Bedeutung des Ladezustands

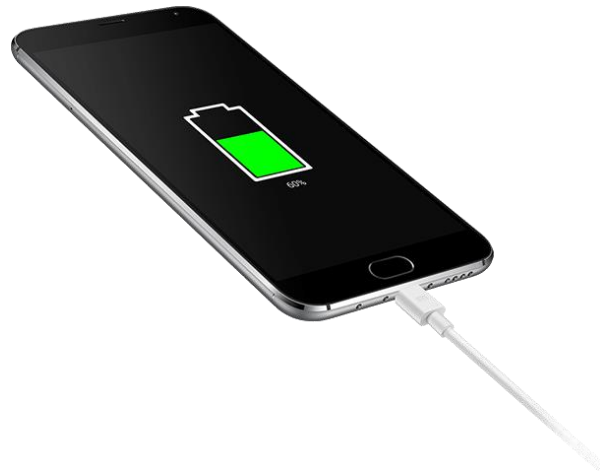


Kalendarische Alterung

Bedeutung der Temperatur

- Eine Erhöhung der Temperatur um 10 K **verdoppelt** die Alterungsgeschwindigkeit von elektrochemischen Komponenten
- Nenntemperatur typischerweise 20...25°C, Lebensdauer garantien gelten nur in engem Temperaturbereich





Praxisfrage

Wie sollten wir unsere Smartphones laden?

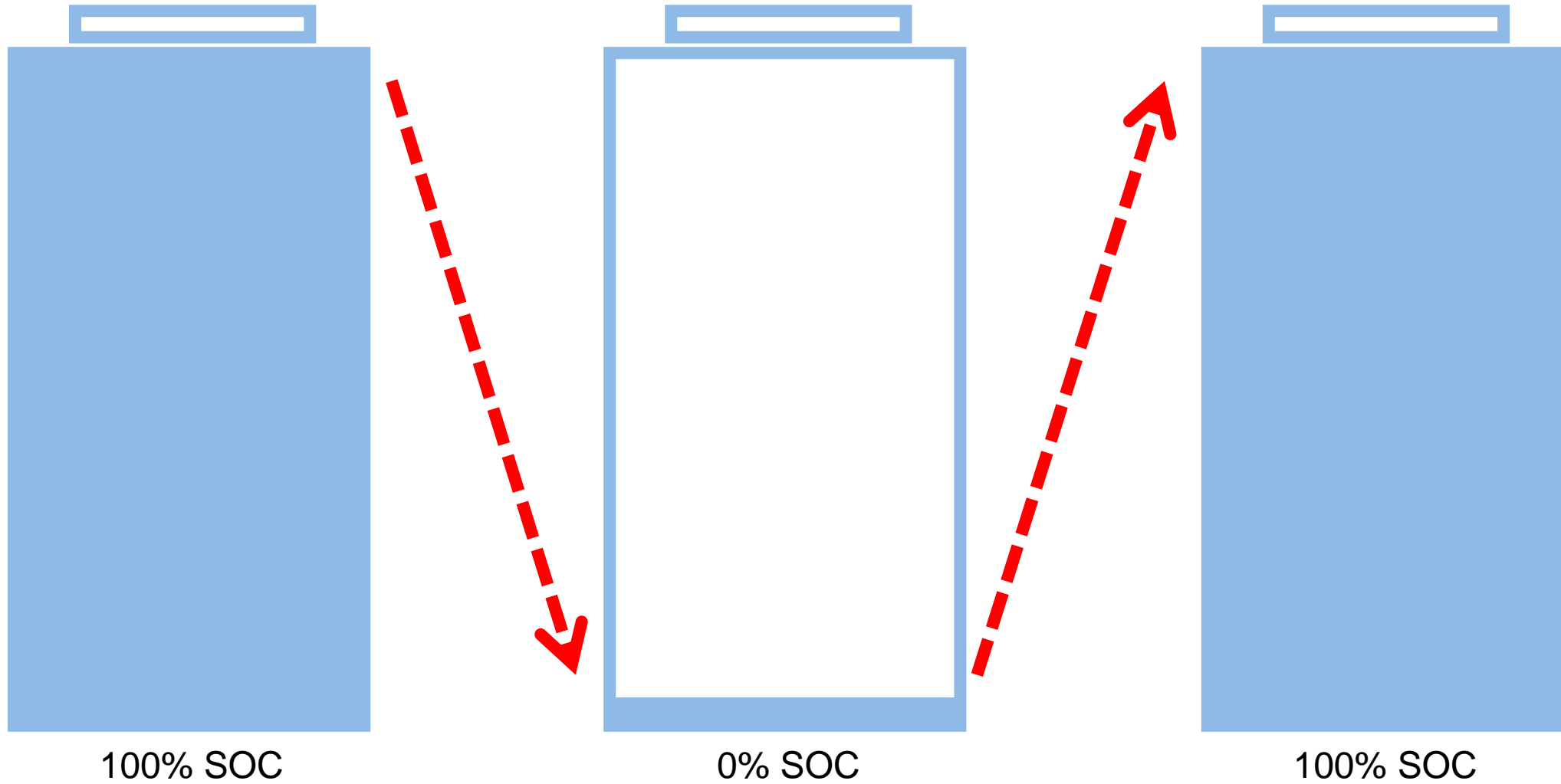
Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien
- 3 Alterung von Batteriespeichern
- 4 Kalendarische Alterung
- 5 Zyklische Alterung
- 6 Alterungsbestimmung im Feld
- 7 Zusammenfassung

Zyklische Alterung Bedeutung der Zyklentiefe

DOD = 100%
[1 äquivalente Vollzyklen]

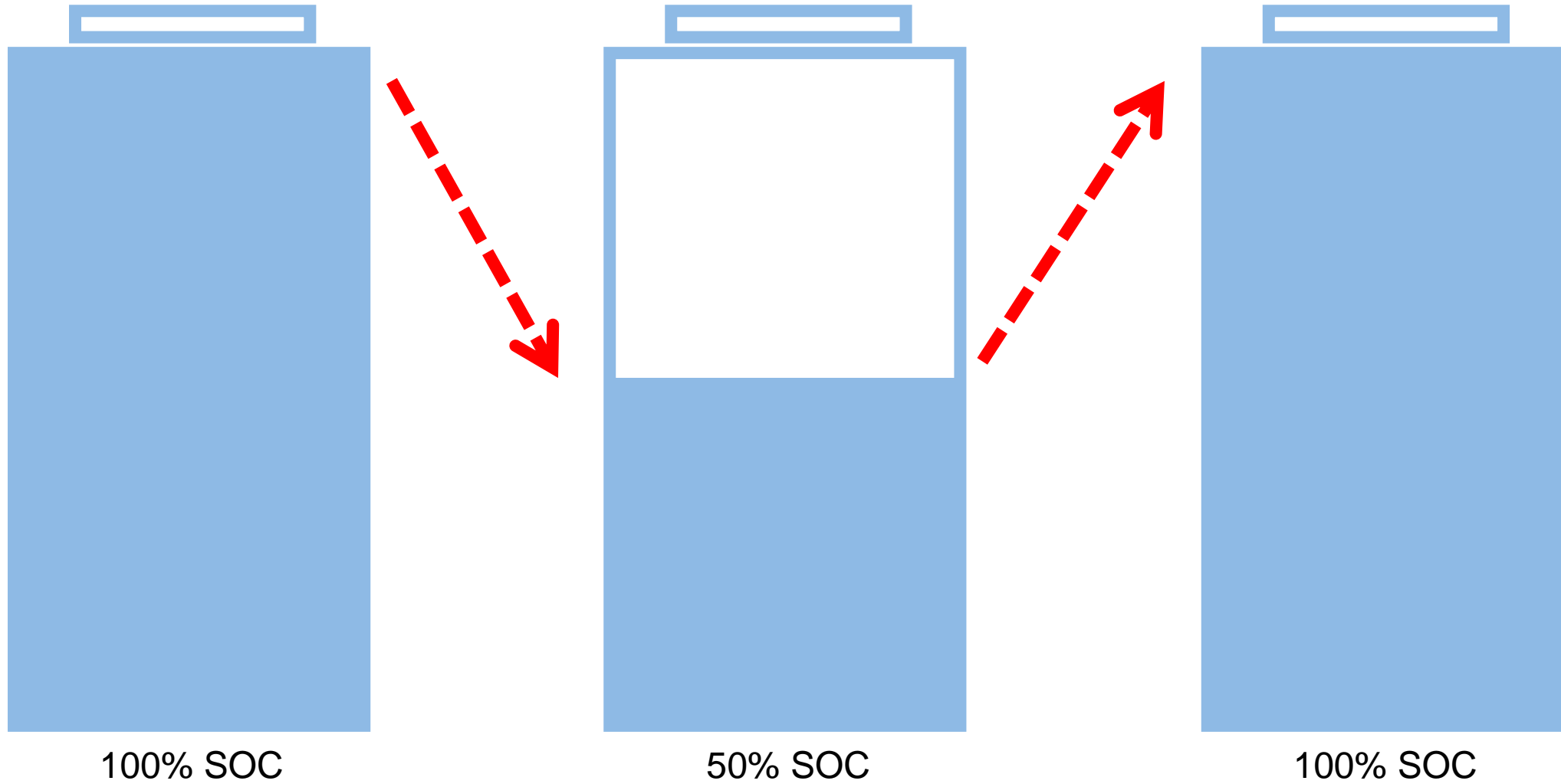
SOC: State of Charge
DOD: Depth of Discharge



Zyklische Alterung Bedeutung der Zyklentiefe

DOD = 50%
[0,5 äquivalente Vollzyklen]

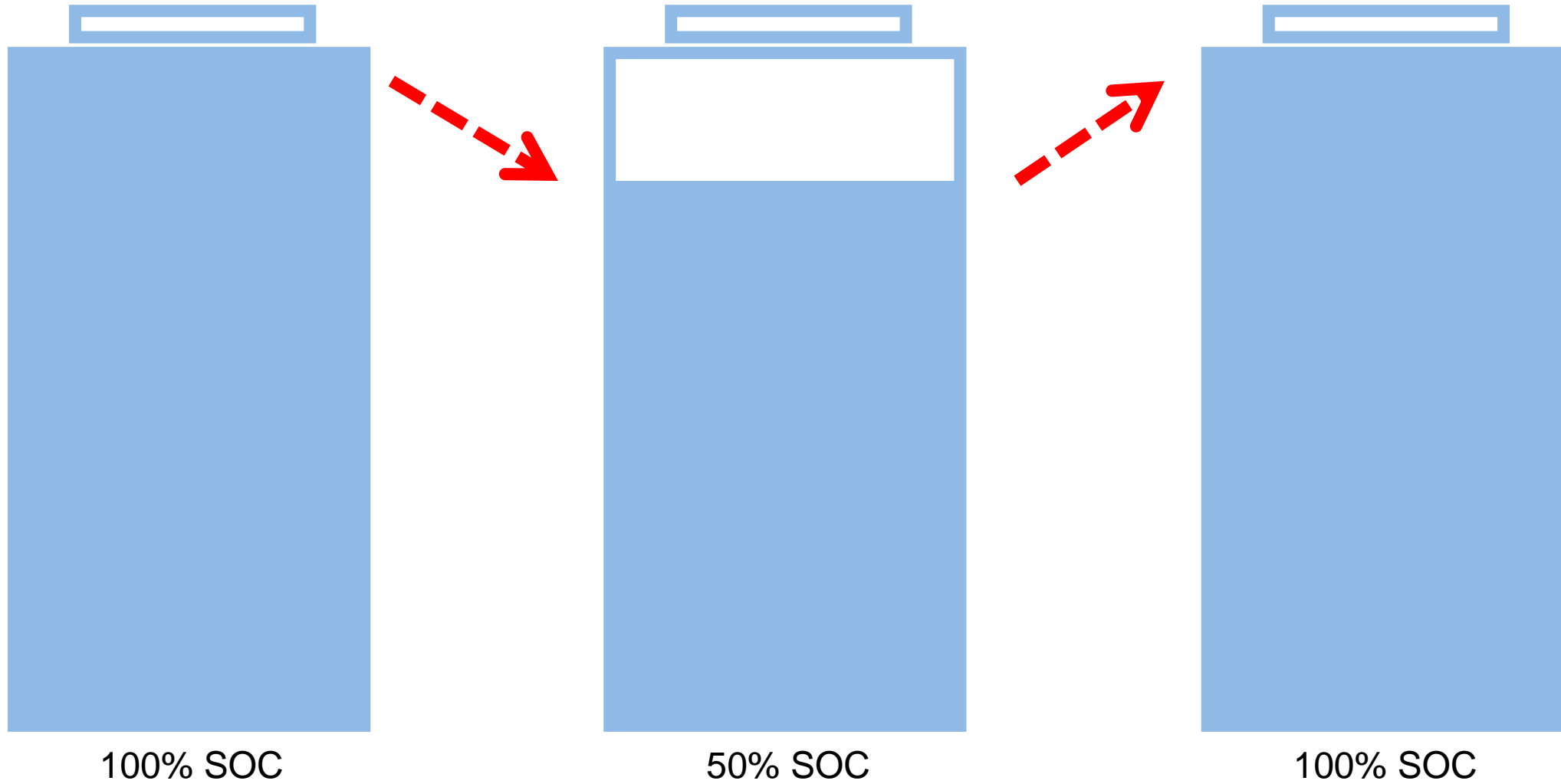
SOC: State of Charge
DOD: Depth of Discharge



Zyklische Alterung Bedeutung der Zyklentiefe

DOD = 20%
[0,2 äquivalente Vollzyklen]

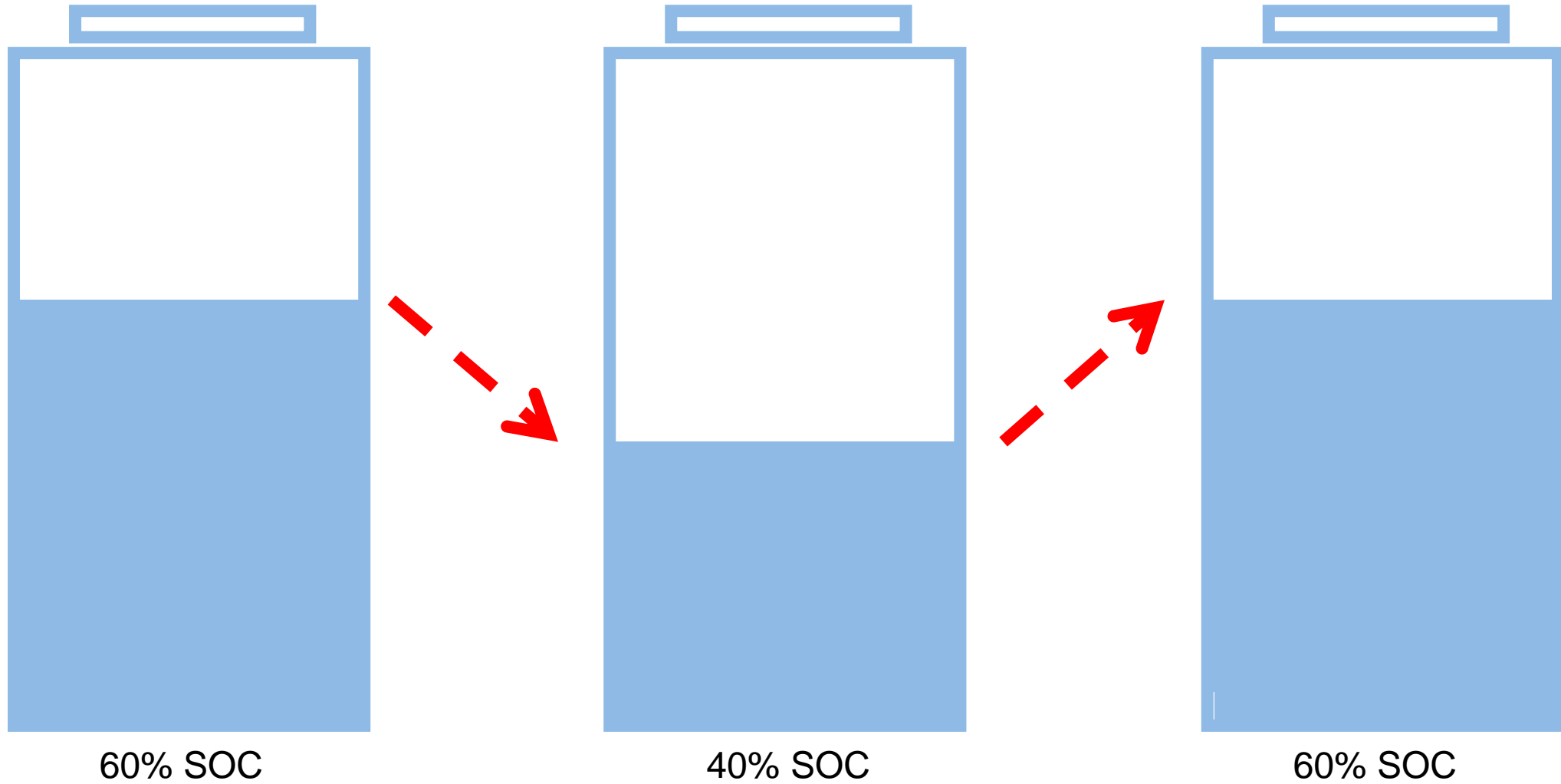
SOC: State of Charge
DOD: Depth of Discharge



Zyklische Alterung Bedeutung der Zyklentiefe

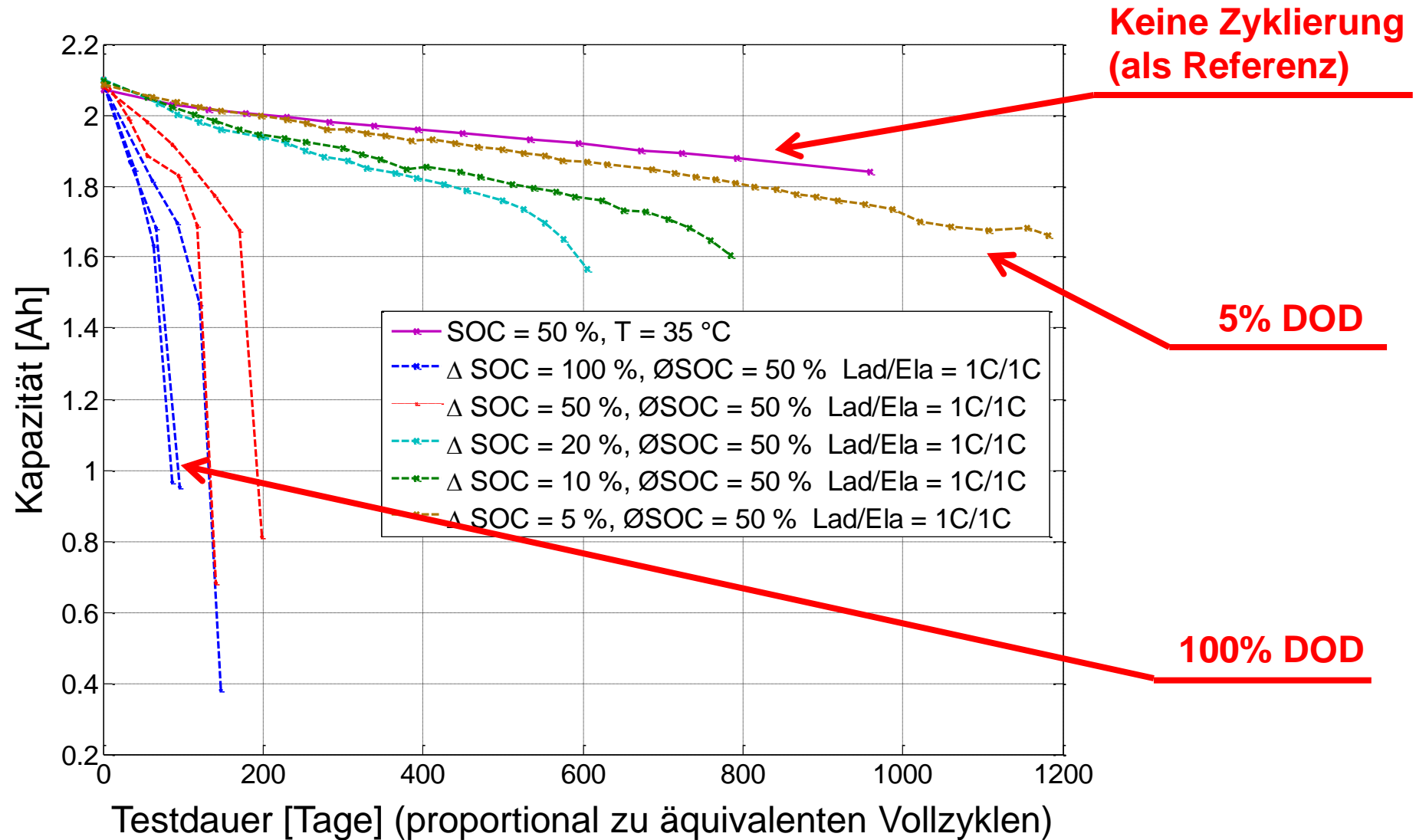
DOD = 20%
[0,2 äquivalente Vollzyklen]

SOC: State of Charge
DOD: Depth of Discharge



Zyklische Alterung Bedeutung der Zyklentiefe

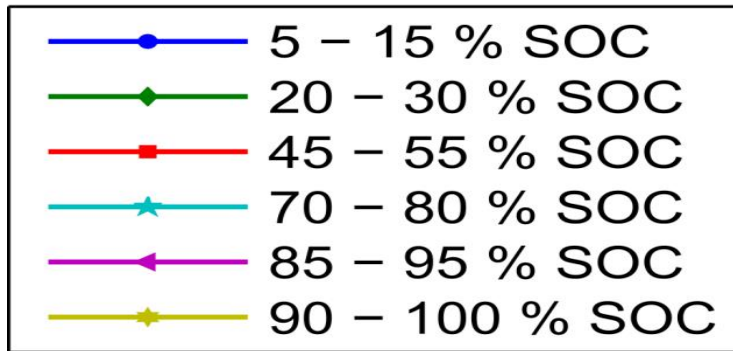
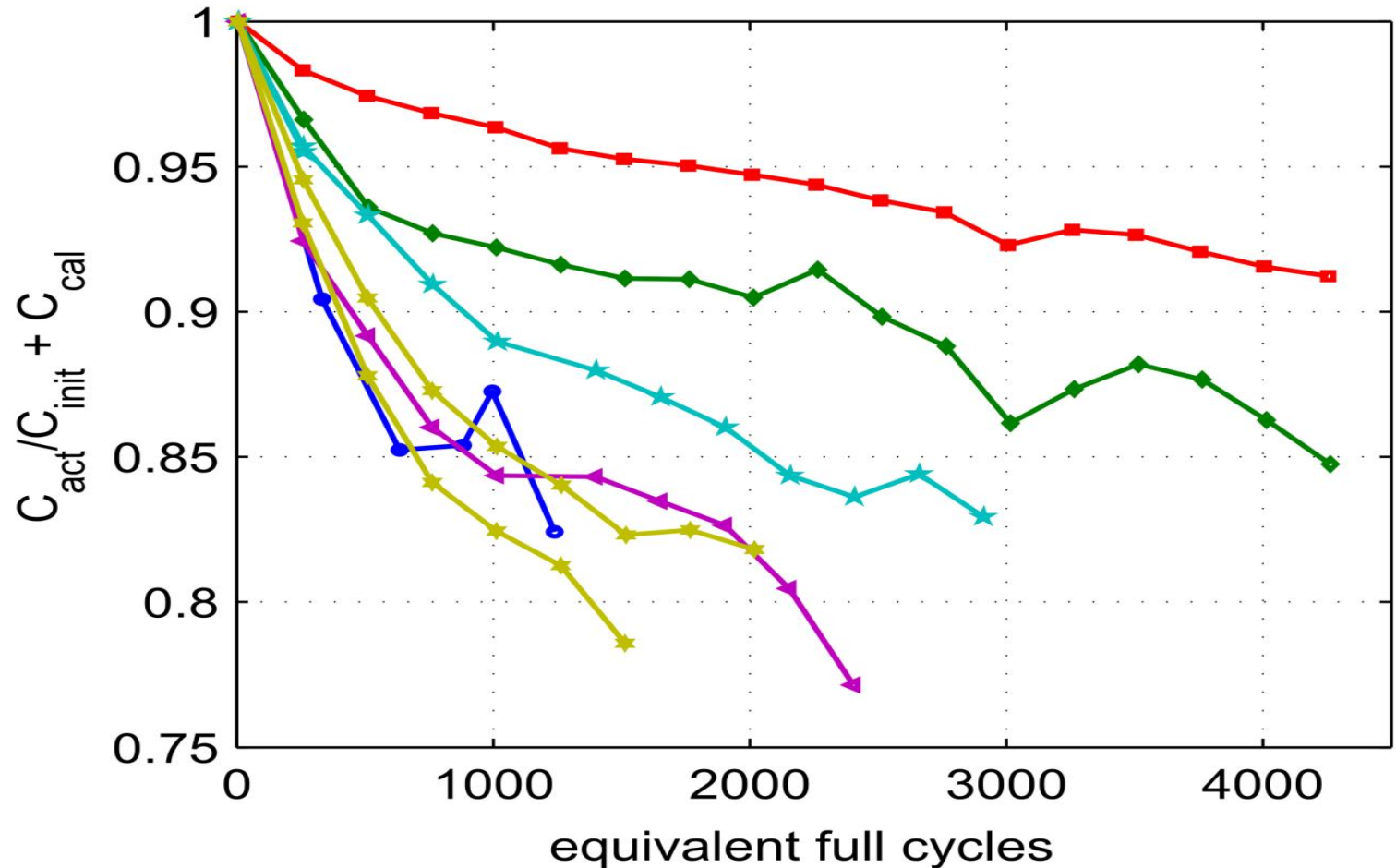
SOC: State of Charge
DOD: Depth of Discharge



Zyklische Alterung

Bedeutung des genutzten SOC-Fensters

- Der Bereich der Zyklisierung hat einen hohen Einfluss auf die Batteriealterung (unter anderem wegen Phasenübergängen in der Batterie)
- Dieser Effekt kann (aber muss nicht) gegensätzlich zur kalendarischen Alterung sein

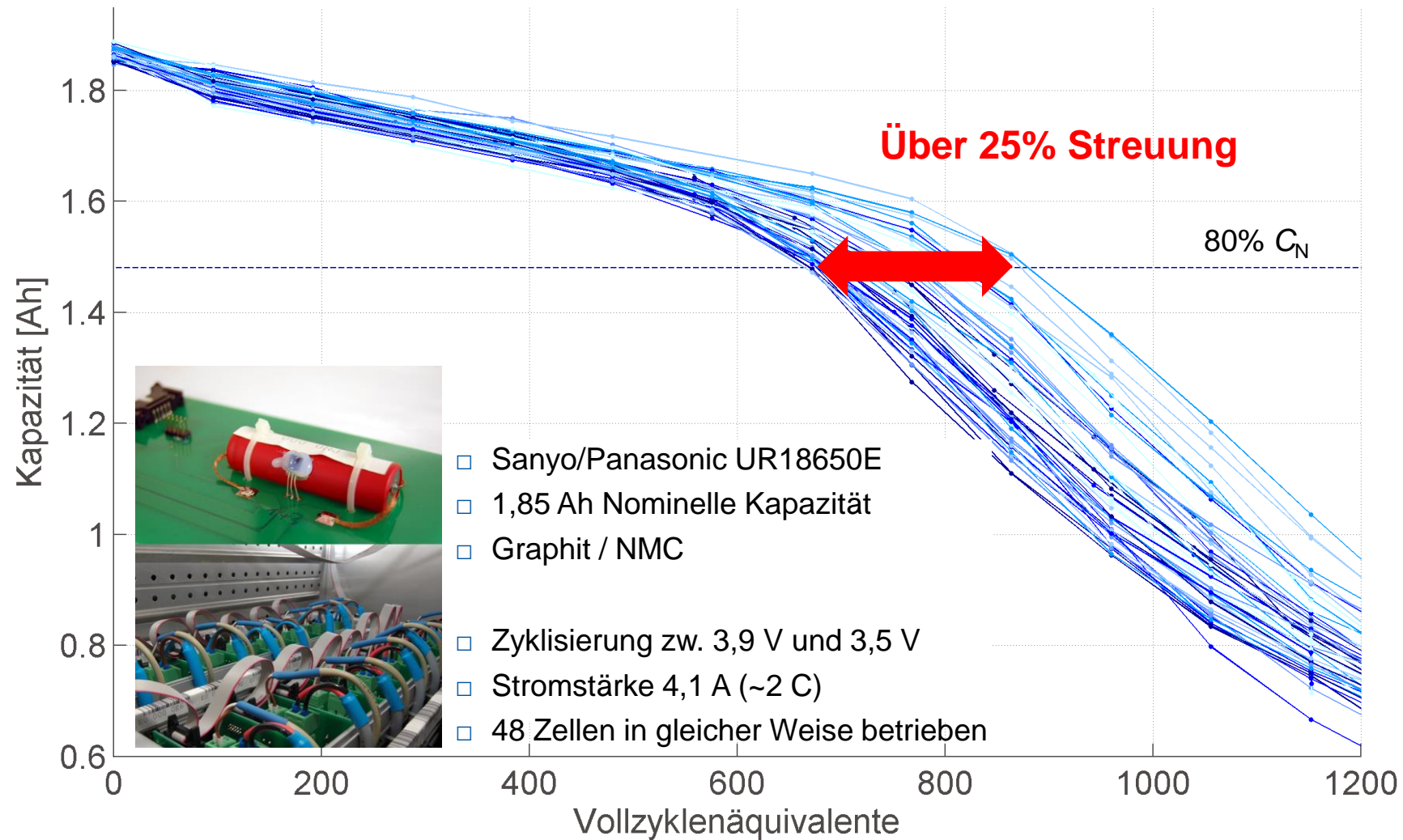




Praxisfrage

Wie stellen wir eine Lebensdauer von 10 Jahren sicher?

Gleiche Zellen unter gleichen Betriebsbedingungen altern unterschiedlich



Gliederung

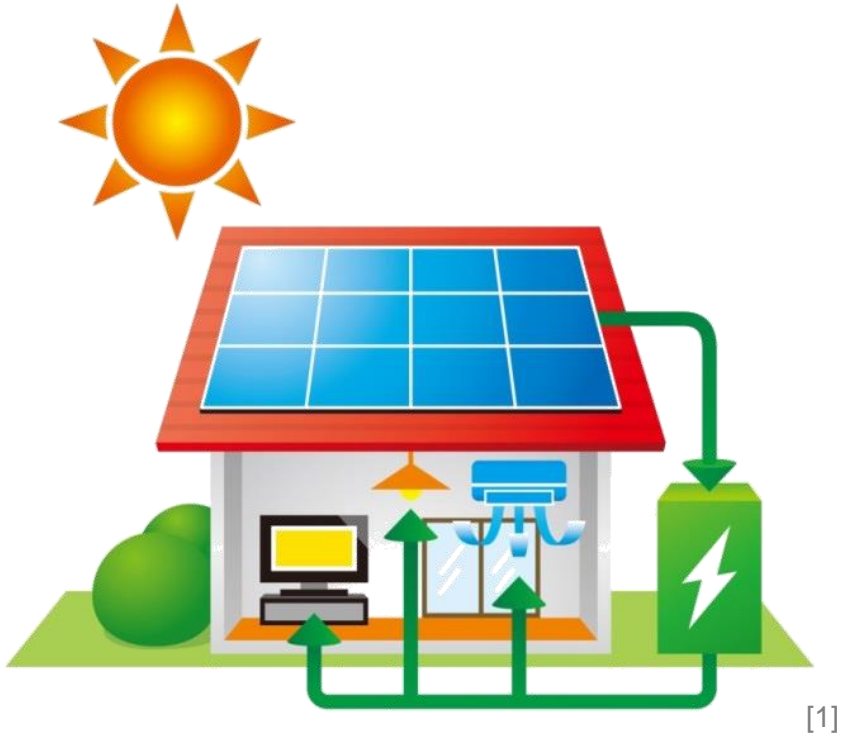
- 1 Motivation
- 2 Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien
- 3 Alterung von Batteriespeichern
- 4 Kalendarische Alterung
- 5 Zyklische Alterung
- 6 Alterungsbestimmung im Feld
- 7 Zusammenfassung

Heimspeicher

Die Energiewende zuhause

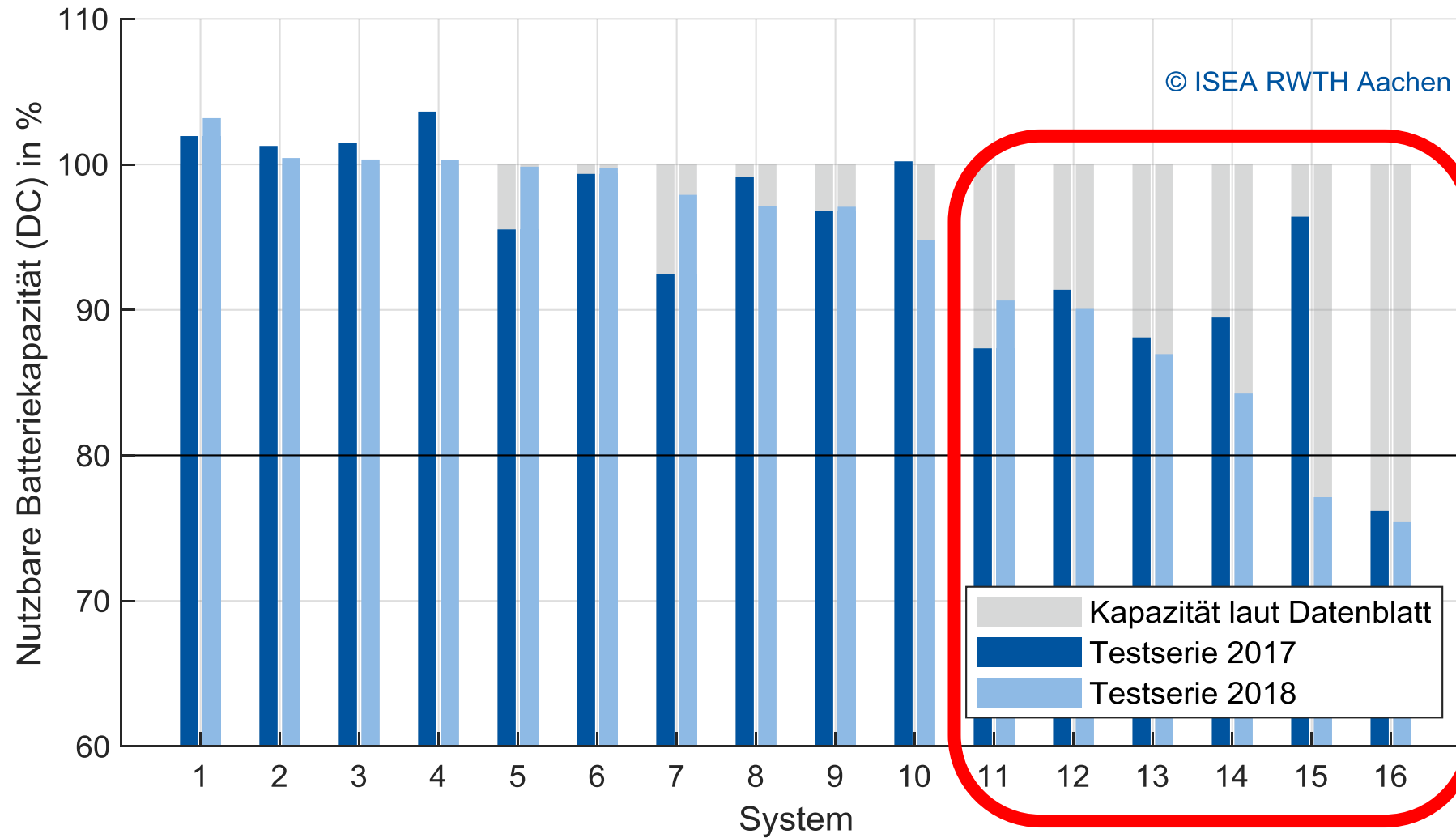


Heimspeicher: Die Energiewende zuhause



- Batteriespeicher verschieben Solarstrom vom Tag in die Nacht
- Mehr Eigenverbrauch = Weniger Strombezug
- Welche Bedeutung hat die Thematik Batteriealterung für Heimspeicher?

Kapazitätsverluste von privat betriebenen Heimspeichern

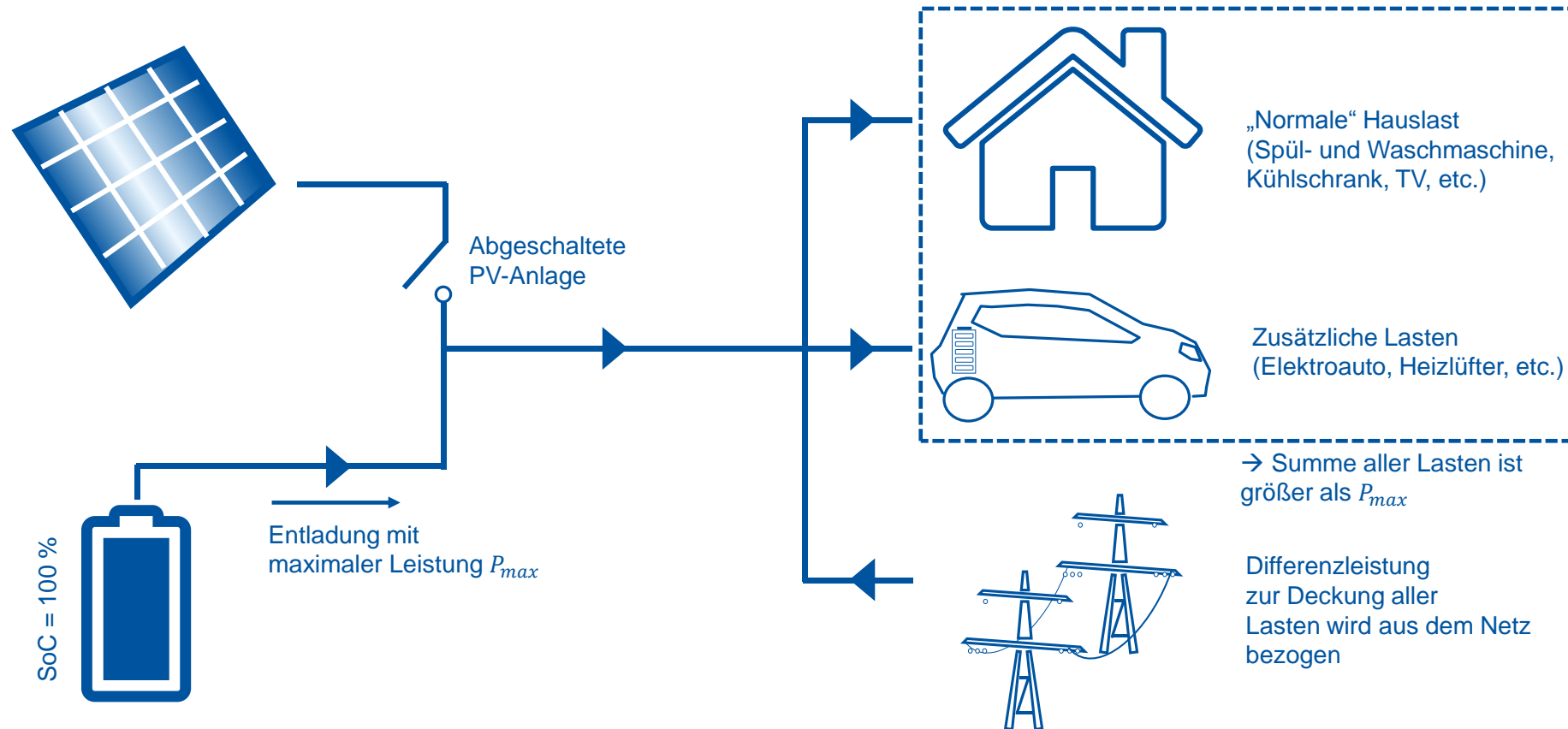


Garantiefälle?

Manuelle Kapazitätstests im Feld

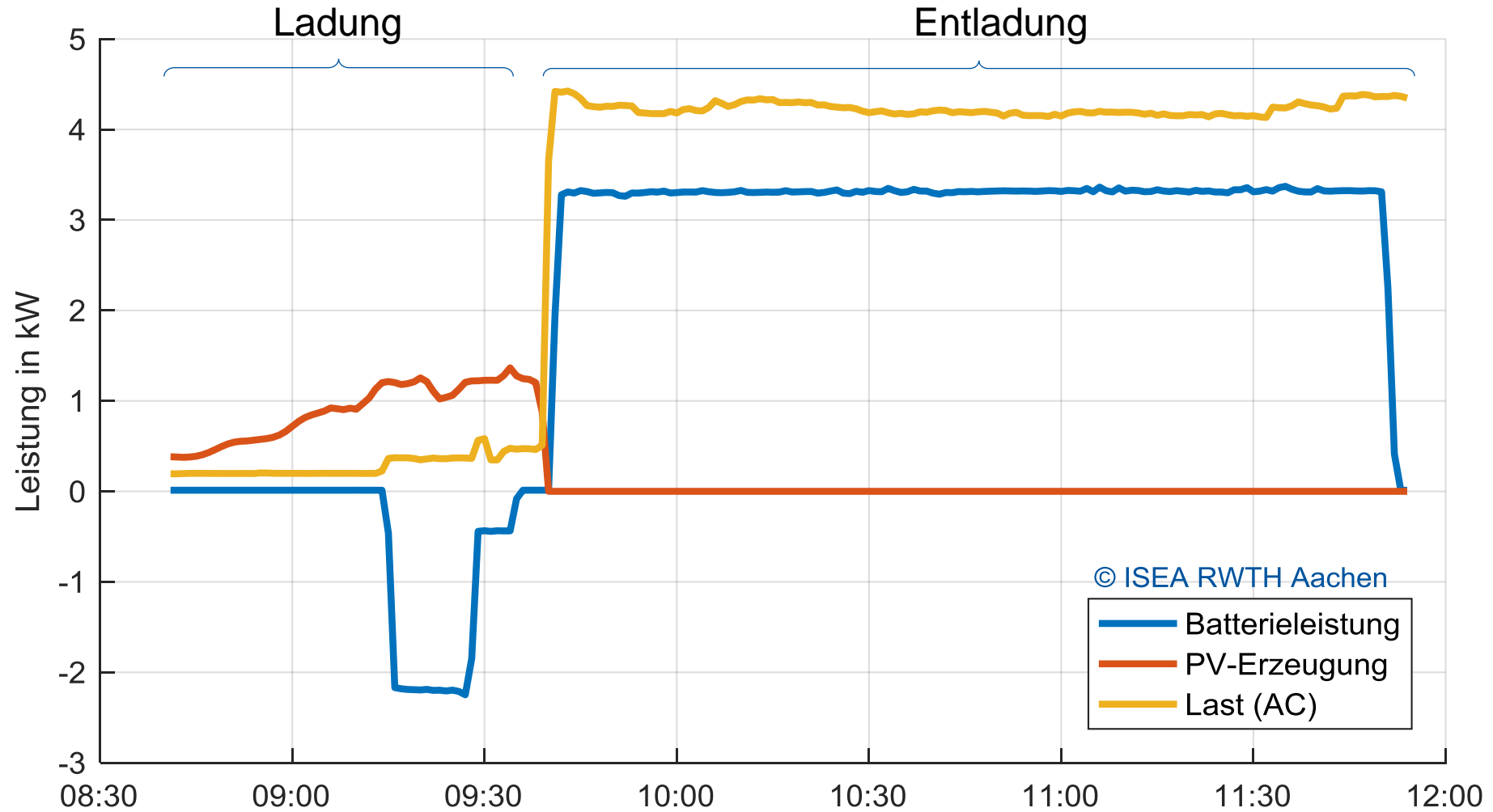
Messaufbau

- Das derzeit übliche Verfahren zur Prüfung der Kapazität von Heimspeichern ist ein manueller Kapazitätstest vor Ort



Manuelle Kapazitätstests im Feld

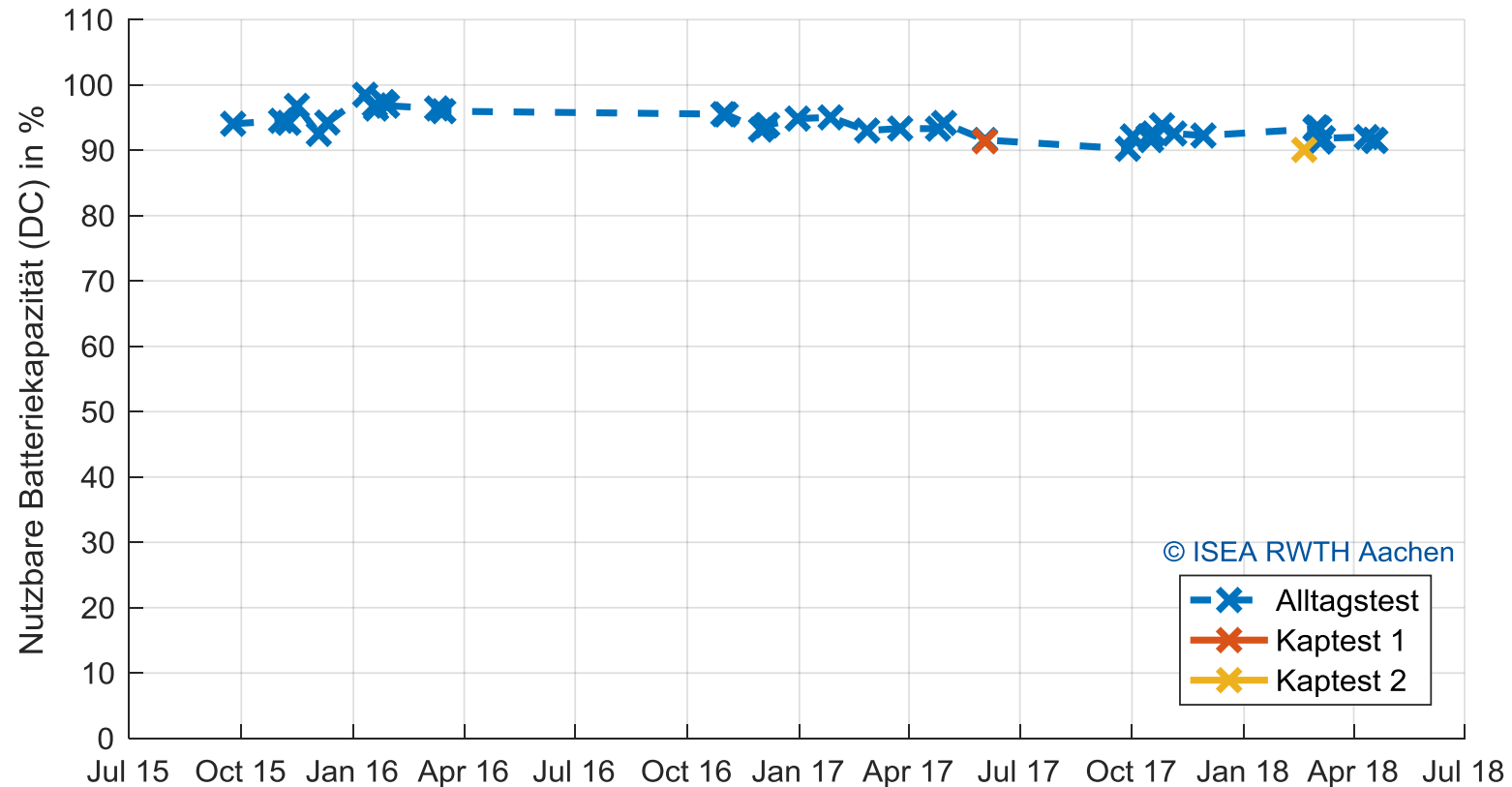
Lade- und Entladevorgang



Virtuelle Kapazitätstests

Grundkonzept

- Können wir anhand der Logfiles von Heimspeichersystemen virtuelle Kapazitätstests durchführen, die eine stabile Aussage zur nutzbaren Kapazität der Batterie treffen?



Ja!

Virtuelle Kapazitätstests

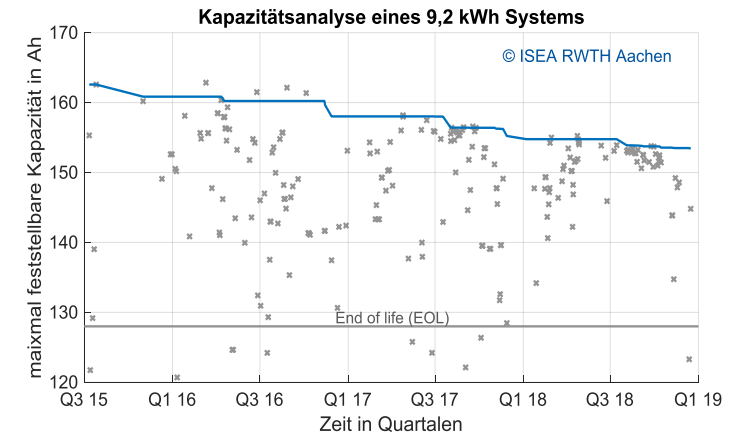
Grundkonzept

	72	1496076140	50,19	49,97
	A	B	50,19	49,97
1	1496076069	51,23	50,19	49,93
2	1496076070	51,23	50,19	49,93
3	1496076071	51,23	50,18	49,93
4	1496076072	51,23	50,18	49,93
5	1496076073	51,23	50,18	49,93
6	1496076074	51,22	50,18	49,93
7	1496076075	51,22	50,18	49,93
8	1496076076	51,22	50,16	49,93
9	1496076077	51,22	50,16	49,93
10	1496076078	51,22	50,16	49,93
11	1496076079	51,14		

Logfiles

ISEA Analysetools
 Data Cleansing
 Batteriemodelle
 Pattern Matching
 ...

$C_{\text{Bat}}(t)$



Virtuelle Kapazitätstests In der Anwendung

- Gründung eines Startups zum in-die-Praxis-bringen der Methodik
 - Zusammenarbeit mit mehrere großen Herstellern im Heimspeicherbereich
 - Erweiterung der Algorithmen auf andere Anwendungsfelder
- Ab Oktober: Möglichkeit von (bezahlten) Praktika im Bereich
 - Batteriespeicher
 - Künstliche Intelligenz
 - Wirtschaftsingenieurwesen
- Fragen gerne formlos an:
kka@isea.rwth-aachen.de



Generisches Bild zu Start-Ups ;-)



Der Aachener Dom

Gliederung

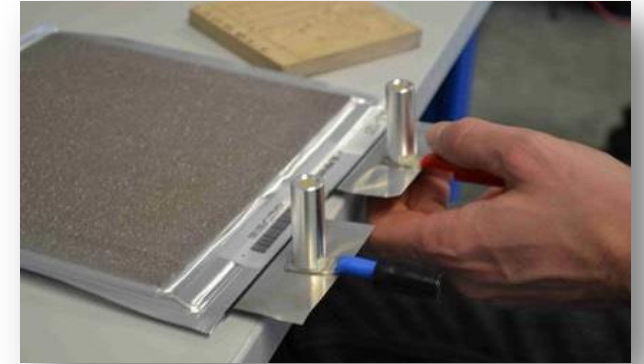
- 1 Motivation
- 2 Aufbau und Funktionsweise von Lithium-Ionen-Batterien
- 3 Alterung von Batteriespeichern
- 4 Kalendarische Alterung
- 5 Zyklische Alterung
- 6 Alterungsbestimmung im Feld
- 7 Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Die Bedeutung von leistungsfähigen Batteriespeichern nimmt in allen Lebensbereichen stetig zu
 - Elektromobilität (zu Wasser, zu Land und in der Luft)
 - Energiewirtschaft
 - Power Tools (Akkuschrauber, Bohrmaschinen, Hochdruckreiniger, ...)
 - Verbraucherelektronik (Smartphones, Laptops, Tablets, ...)
- Im Betrieb altern Batteriespeicher kontinuierlich
- Durch geschicktes Design und intelligente Steuerung kann die Lebensdauer von Batterien deutlich verlängert werden
 - Bei allen Anwendungen sollte das Batteriedesign von vorneherein mitgedacht werden

Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik

- Der **Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung und Speichersystemtechnik** ist Europas größte öffentliche Forschungseinrichtung für Batteriespeichersysteme.
 - 60+ Wissenschaftler
 - 40+ Masterstudenten
 - 40+ Bachelorstudenten
 - 1.000+ Batterietestkreise bis zu 240 kW
- Drei Forschungsgruppen decken die gesamte Wertschöpfungskette von modernen Speichern ab:
 - Modellierung und Lebensdaueranalyse
 - Batteriesystemtechnik und Fahrzeugintegration
 - Netzintegration und Speichersystemanalyse
- Der Lehrstuhl bildet durch 6 Vorlesungen und Seminare zum Thema Batteriespeichersysteme an der RWTH Aachen die nächste Generation Batteriespezialisten aus.



Vorbereitung einer Li-Ionen Zelle



Batterietestsysteme am ISEA

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Kontakt

Kai-Philipp Kairies

Tel.: +49 241 80-49367

kka@isea.rwth-aachen.de



Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung
und Speichersystemtechnik
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Kai-Philipp Kairies
RWTH Aachen University

Jägerstraße 17/19
52066 Aachen
GERMANY

www.isea.rwth-aachen.de



Wir danken



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

MEET Hi-EnD: 03X4634B



Dr. Alexander Warnecke
Dr. Madeleine Ecker
Dr. Stefan Käbitz
Dr. Thorsten Baumhöfer
Dr. Johannes Schmalstieg
Christiane Rahe
Prof. Egbert Figgemeier



Batteriealterung • Batteriemodelle • Batteriediagnostik • Batteriepackdesign • Elektromobilität • Stationäre Energiespeicher • Energiesystemanalyse

Alterungsmechanismen von Lithium-Ionen Batterien

Elektrotechnisches Kolloquium an der
TU Paderborn

09.04.2019

Kai-Philipp Kairies, Dirk Uwe Sauer



Lehrstuhl für Elektrochemische Energiewandlung
und Speichersystemtechnik

JARA | Jülich Aachen
Research
Alliance



E.ON Energy Research Center

JÜLICH
FORSCHUNGSZENTRUM

HI MS | HELMHOLTZ-INSTITUTE
IONICS IN ENERGY STORAGE

ISEA | Stromrichter-
technik und
Elektrische
Antriebe

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

[logitech.com]



Backup

Alterung bei Schnellladung von Elektrofahrzeugen: Lithium Plating

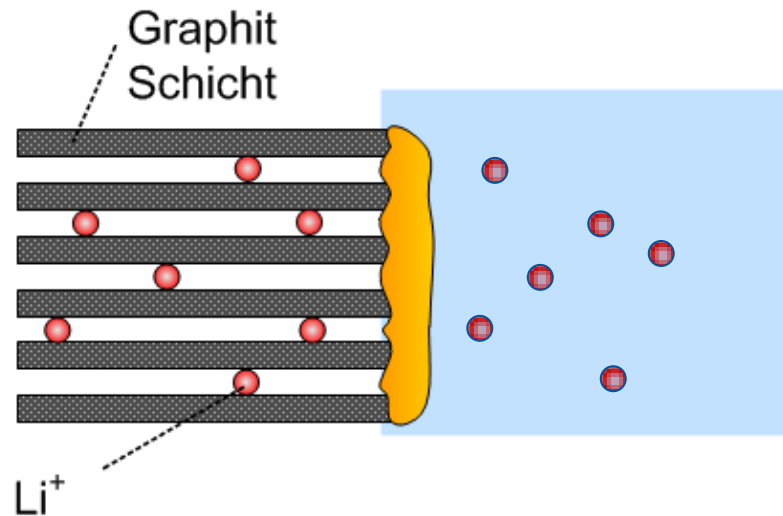
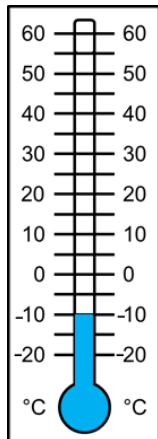
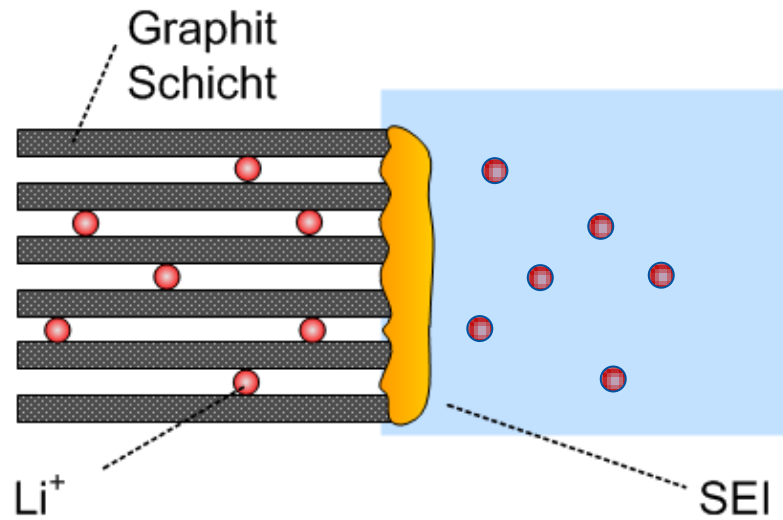
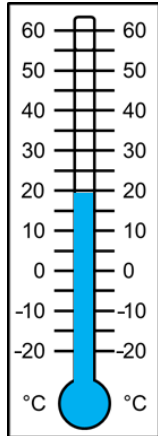
09.04.2019

Kai-Philipp Kairies, Dirk Uwe Sauer

Winter- und Schnellladeproblematik der Elektromobilität – Wie schnell kann die Batterie aufgeladen werden?

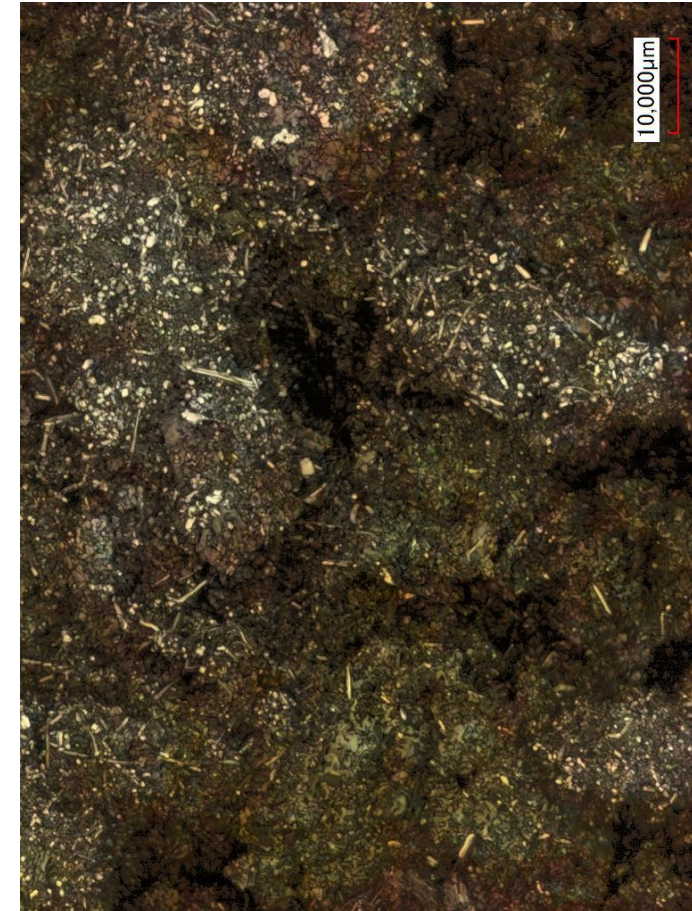
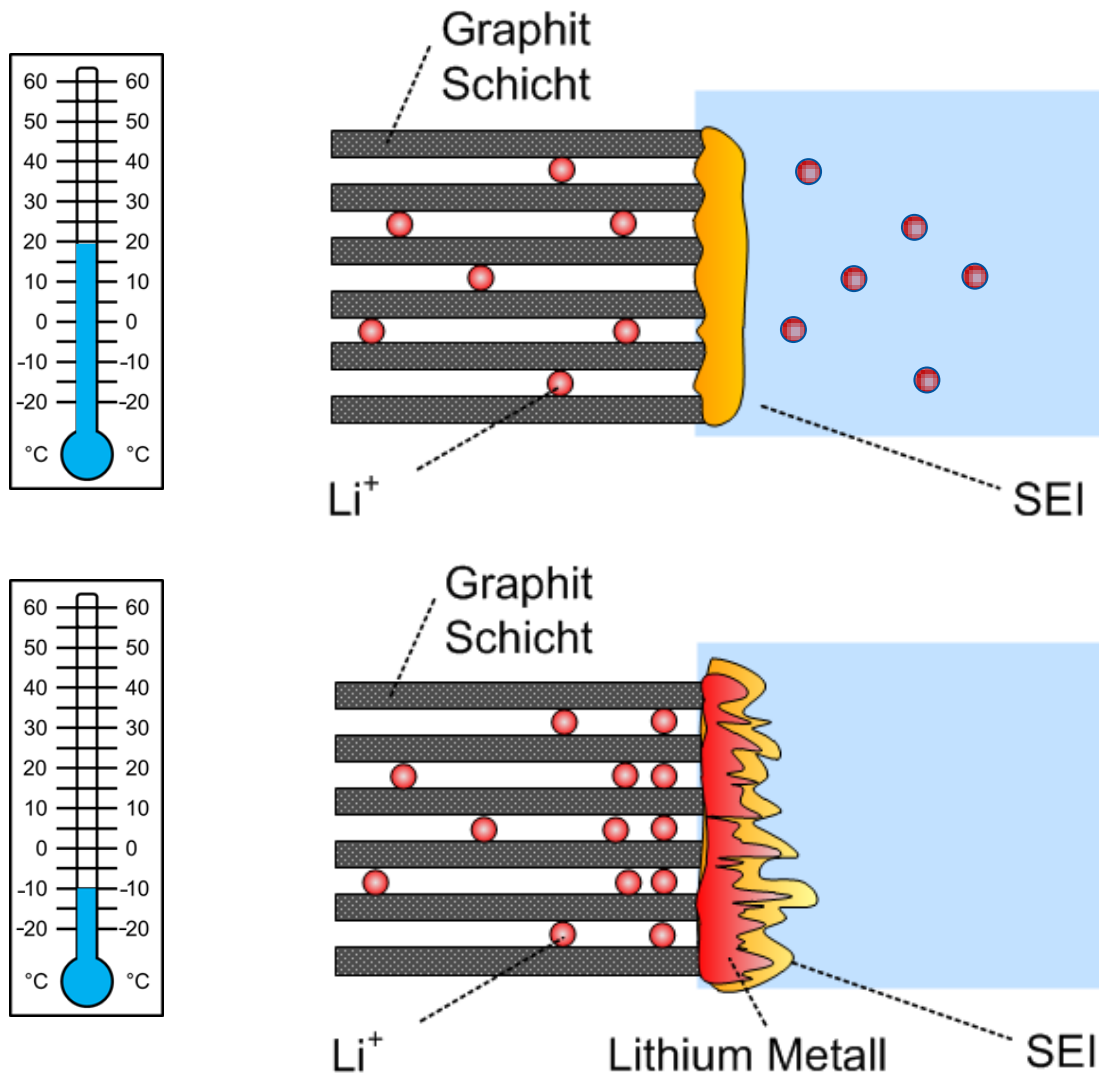


Was ist Lithium-Plating?



- Sicherheitsrisiko
- Alterung

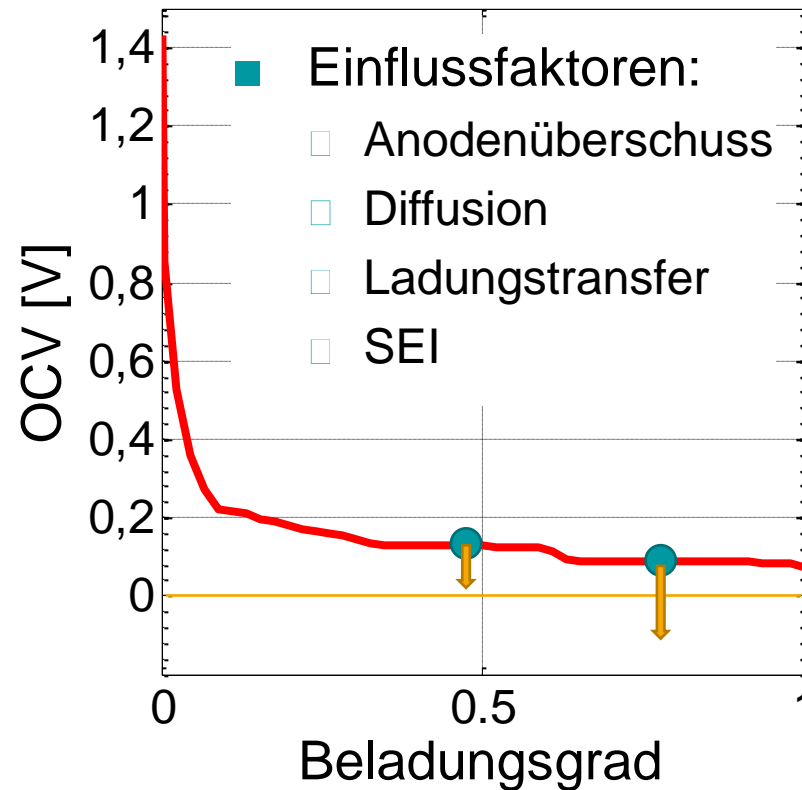
Was ist Lithium-Plating?



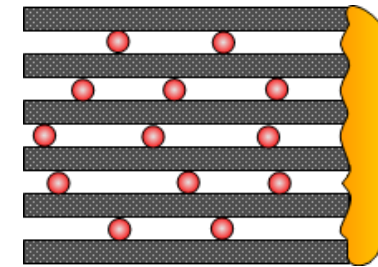
■ Lasermikroskopaufnahme einer geplatteten Anode

Wann entsteht Lithium-Plating?

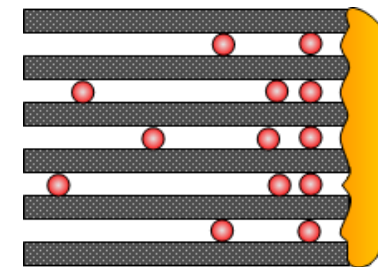
- Gesteuert durch lokales Anodenpotential < 0 V



moderate Temperatur

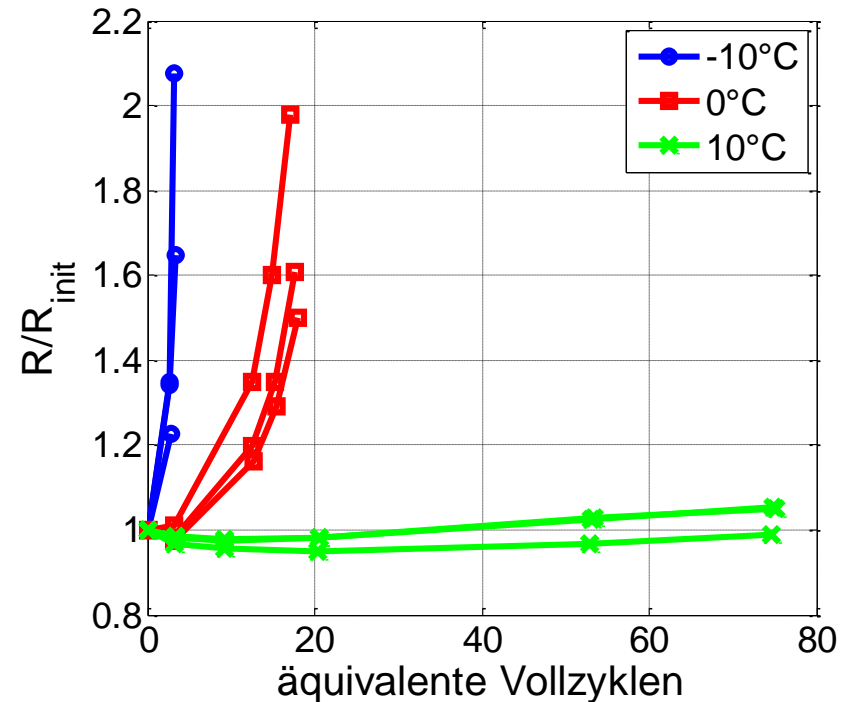
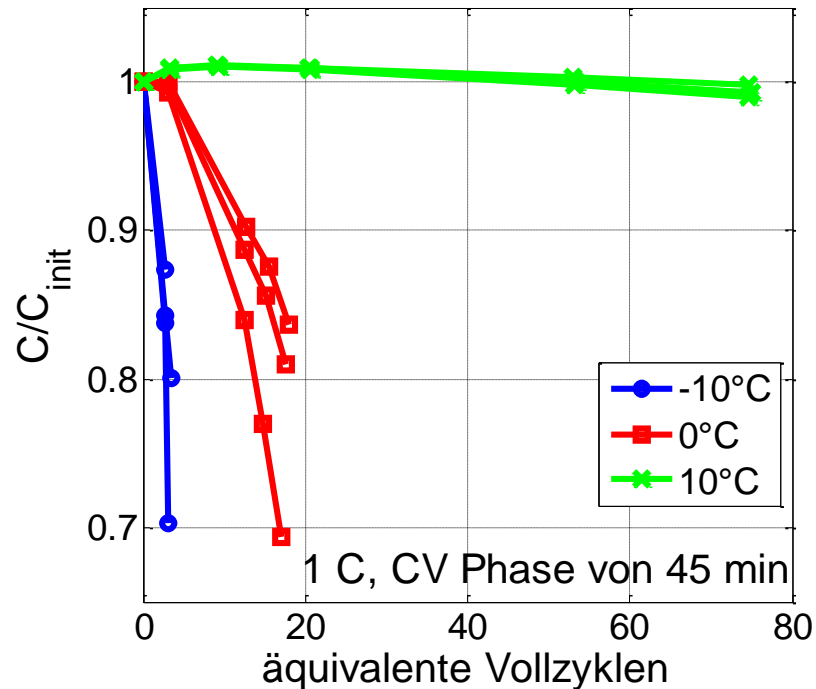


tiefe Temperatur



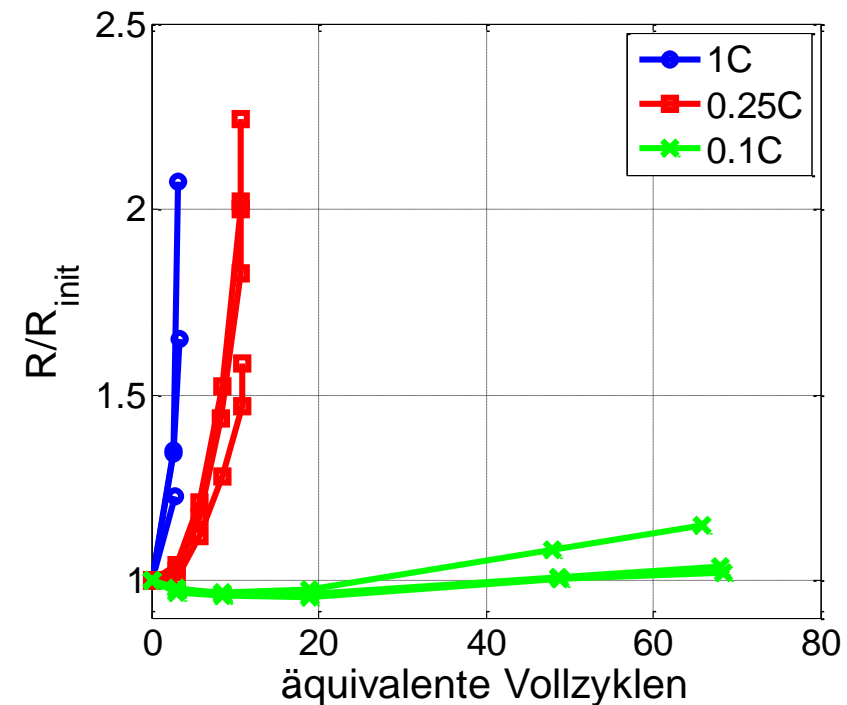
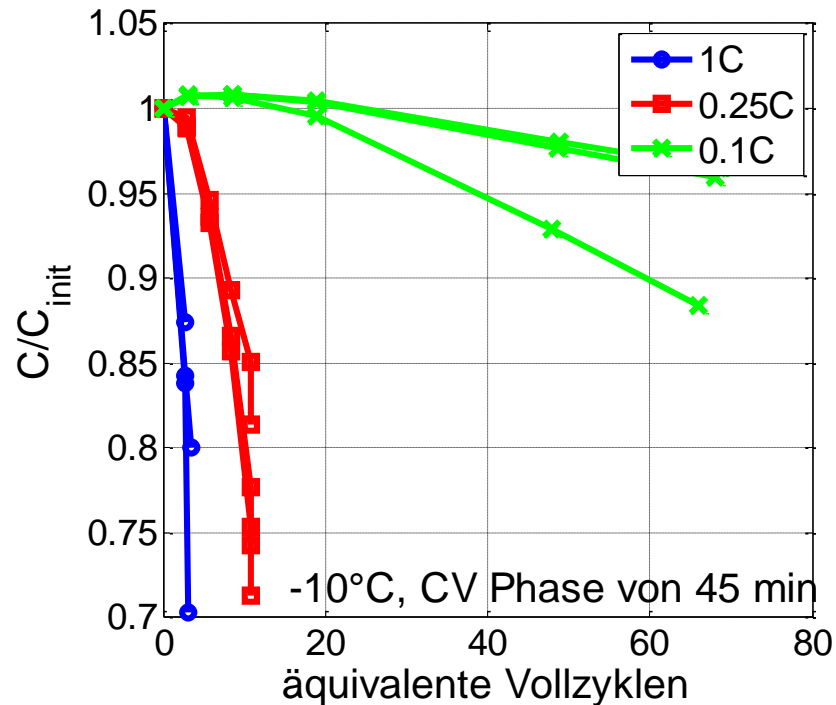
Jede Zelle verhält sich anders!

Temperaturabhängigkeit – Kokam 40 Ah Hochleistungszelle



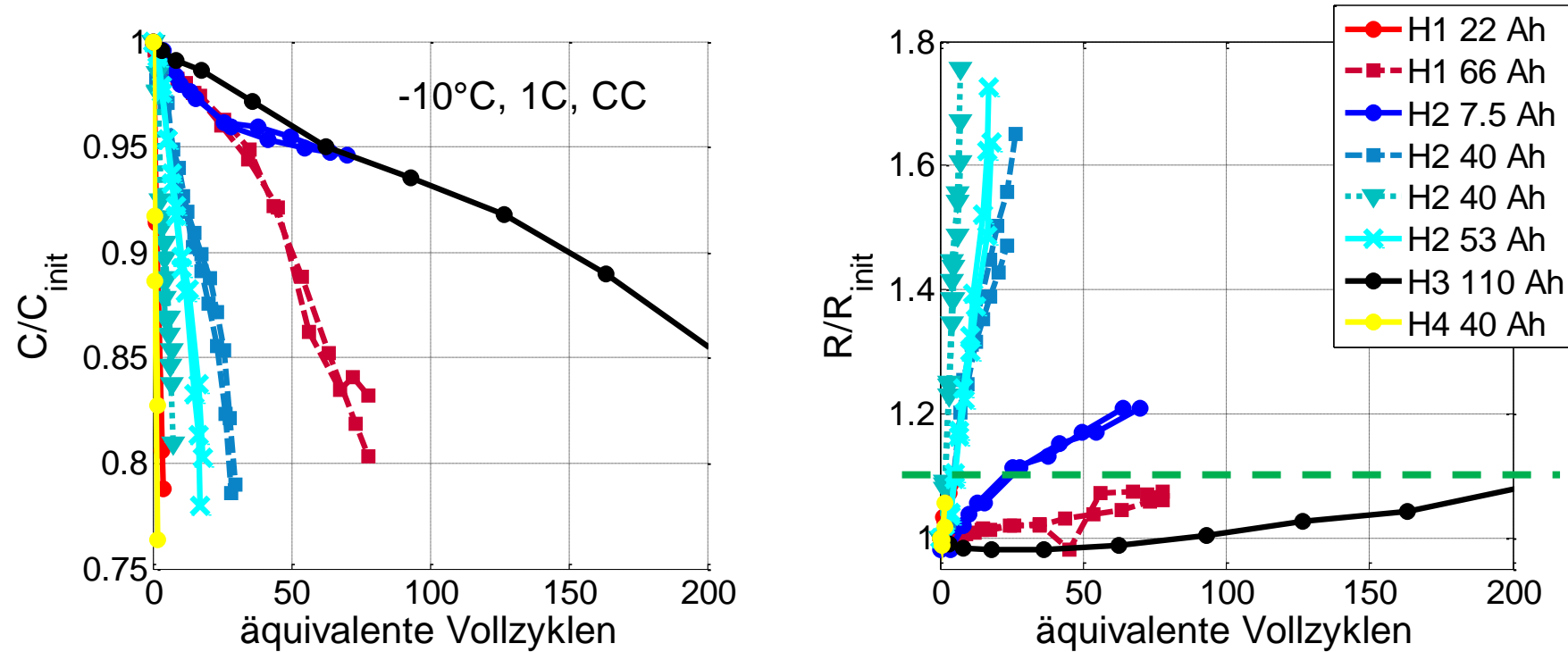
- Tiefere Temperatur führt zu stärkerer Alterung
- Zelle ist für 0 °C Laden spezifiziert

Einfluss von Stromstärke – Kokam 40 Ah Hochleistungszelle



- Höhere Ströme führen trotz Temperaturerhöhung zu stärkerer Alterung

Vergleich verschiedener Zelltechnologien von verschiedenen Herstellern



- Zellen altern sehr unterschiedlich unabhängig von Hersteller

Maximale Ladestromrate muss eingeregelt werden

