Einfluss des elektrischen Netzwerkes auf die Lebensdauer und Performance von kommerziellen und hybriden Energiespeichersystemen

Thorsten Grün

Fachrichtung: Energietechnik

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Nanotechnologie – Projekt Competence E

Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, Gebäude 276, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Telefon: 0721-608-28282

E-Mail: thorsten.gruen@kit.edu

Einfluss des elektrischen Netzwerkes auf die Lebensdauer und Performance von kommerziellen und hybriden Energiespeichersystemen

1. Einleitung

Mit dem Ausbau der regenerativen Energien und der Notwendigkeit von alternativen Antriebstechniken nimmt die Bedeutung von Energiespeichern stetig zu. Die Aufgaben der Energiespeicher reichen von der Sichererstellung der Energieversorgung bei fluktuierender Einspeisung der Regenerativen, bis hin zur Steigerung der Energieeffizienz in Industrieanlagen sowie dem Verkehrssektor.

Das Verhalten von kommerziellen Einzelzellen unter unterschiedlichen Belastungskriterien ist bereits recht weit erforscht, jedoch bestehen Energiespeicher in den Applikationen aus einer Vielzahl von Einzelzellen, welche je nach Anforderung der Applikation zur Spannungs-und Kapazitätserhöhung seriell und/oder parallel miteinander verschaltet werden. Hierbei entscheidet die Form des elektrischen Netzwerkes, welche durch die Assemblierung der Einzelzellen zu Modulen sowie den eingesetzten Zellen wie auch der genutzten Materialien festgelegt wird darüber, in wie weit Asymmetrien in der Einzelzellbelastung hervorgerufen werden. Ungleiche Zellbelastungen führen zu unterschiedlichen Alterungsverhalten der Einzelzellen, was wiederum die Performance und Leistungsfähigkeit des kompletten Energiespeichersystems beeinflusst.

Das Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist es daher auf Systemebene ein besseres Verständnis zu bilden, in wie weit der Modulaufbau Einfluss auf die Lebensdauer und die Performance von Energiespeichern hat. Darauf aufbauend sollen hier Ansätze für kostengünstige und leistungsstarke Energiespeicher vorgestellt werden.

2. Grundlagen und Stand der Technik

Energiespeichersysteme basierend auf der Lithium-Ionen (Li-Ionen) Technologie werden auf Grund ihrer hohen Energiedichte und ihrem sehr hohen Wirkungsgrad in heutigen mobilen und stationären Anwendungen verwendet.

Die Nutzung konventioneller Rundzellen, welche beispielsweise von Tesla Motors Inc. genutzt werden, stellen bisher das kostengünstigste Zellformat dar, jedoch verursacht die geringe Energiedichte eine hohe zu verbauende Zellanzahl (bsp. Tesla Roadster ca. 7000 Zellen), welche eine Herausforderung für die Assemblierung darstellt. Aus wirtschaftlichen, wie auch technischen Gründen, stellt der Schweißprozess den sinnvollsten Prozess dar um die Vielzahl an Zellen miteinander zu verbinden. Jedoch bestehen die Verbindermaterialien beispielsweise aus Nickel-Kupferlegierungen, welche neben ihrer guten Schweißbarkeit mit den Hüllkörper der Batterie, schlechte elektrische Leitfähigkeiten im Vergleich zu reinem Kupfer mit sich bringen. Dies kann asymmetrische Zellbelastungen in Abhängigkeit der Verschaltungsart zur Folge haben. Eine weitere Möglichkeit wäre, die Fläche oder den Querschnitt des Leiters zu erhöhen um somit den spezifischen Widerstand zu reduzieren, jedoch sind diese Flächen individuell und in ihrer Einzelherstellung kostenreich. Schweißprozesse sind hier aber nicht immer durchführbar und durch die weiteren Verbindungstechniken wie Schrauben oder Drahtbonding, würde sich der Übergangswiderstand um den Faktor 30 erhöhen, was eine zusätzliche thermische Belastung zur Folge hat.

Li-Ionen Systeme sind trotz ihrer Vorteile jedoch nicht für zukünftige Aufgabenfelder, wie beispielsweise 48 V-Hybride (bsp. 15 kW) oder die Intralogistik geeignet. Die hohen Leistungsanforderungen sowie die starken Zyklenbelastungen können nur durch eine Überdimensionierung des Speichersystems gelöst werden um adäquate Lebensdauern zu erreichen. Superkondensatoren beispielsweise oder auch heutige

Hybridkondensatoren können der Zyklenanforderungen sowie den Leistungen gerecht werden, jedoch besitzen sie eine zu geringe Energiedichte.

Mit Hilfe von Leistungselektronik kann eine Hybridisierung, sprich die Kombination mehrerer Speichertechnologien, eines Energiespeichersystems gewährleistet werden, jedoch bedeutet dies zusätzliche Kosten, Wirkungsgradverluste sowie zusätzlich notwendiger Bauraum.

Im Ansatz dieser Arbeit soll diese Hybridisierung ohne Leistungselektronik stattfinden und mit Hilfe des Systemdesigns die gewünschten Eigenschaften erzeugt werden.

Ziel ist es daher ein Systemverständnis zu bilden, um kostengünstige und effiziente Energiespeicher zu entwickeln. Hierbei wird das Entwicklungspotential in kommerziellen Li-Ionen Speicher untersucht, wie auch der Entwurf von innovativen Hybridspeichern unternommen, welche eine Verbesserung in Leistungsdichte und Lebensdauer mit sich bringen.

3. Methodik

3.1. Modell-gestützte Untersuchung

Eine Methode zur Beschreibung von Energiespeichern ist diese in ein elektrisches Netzwerk zu überführen. Im Vergleich zu weiteren Modellen trifft diese Methode den besten Konsens zwischen Modellgenauigkeit, Parametrierungsaufwand sowie der Rechenzeit.

3.1.1. Modellierung und Charakterisierung

Für unser Modell werden die Leerlaufspannungen (U_{OCV}) (s.h. Abbildung 1 b)) für verschiedene Ladezustände (SOC) aufgenommen, sowie die inneren Widerstände der Zellen R_{cell} in Abhängigkeit der Temperatur, des SOC, sowie der zyklischen Alterung (Abbildung 1 c-d)). Die Größen des elektrischen Netzwerkes (s.h. Abbildung 1 a)), wie beispielsweise die Schweißwiderstände zwischen Zellkörper und Verbinder $R_{transfer}$, sowie der Widerstand des Zellverbinders zwischen den parallel-geschalteten Zellen R_{inter} , werden mit Hilfe eines Widerstandsmessgerätes ermittelt. Die Größen R_p und C_p beschreiben Überspannungen durch Diffusionvorgänge innerhalb der Zellen und werden mit Optimierungsalgorithmen bestimmt. Die Einzelzellbelastung wird in der Folge durch ein dynamisches lineares Optimierungsproblem unter Nebenbedingungen bestimmt.

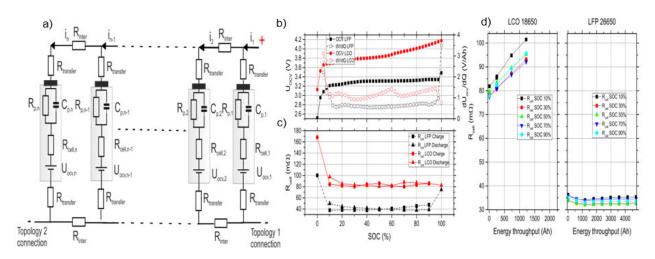


Abbildung 1. a) Elektrisches Ersatzschaltbild zur Systembeschreibung parallel-geschalteter Energiezellen; b-d) Charakterisierung von Energiezellen durch Aufnahme der Leerlaufspannung OCV, sowie des inneren Widerstandes in Abhängigkeit des Ladezustandes und der zyklischen Alterung.

3.1.2. Alterungsbeschreibung

Die Lebensdauer eines Energiespeichersystems ist ein entscheidender Faktor, der neben den Investitionskosten die spezifischen Kosten eines Energiespeichersystems bestimmt. Grundsätzlich wird zwischen zyklischer und kalendarischer Alterung unterschieden, für unser Modell jedoch wird nur die zyklische Alterung berücksichtigt. Die zyklische Alterung beschreibt grundsätzlich die Veränderung der Parameter der Energiezelle (bsp. steigender Zellwiderstand, Kapazitätsabfall,...etc), welcher mit steigender Zyklenzahl, sprich mit steigendem Energiedurchsatz einhergeht und auch später für den Ausfall (End of Life-EoL) verantwortlich ist. Zusätzlich hängt die Alterung noch von den Rahmenbedingungen ab, unter denen die Belastung stattfindet. So können erhöhte Temperaturen, sowie erhöhte Lastströme die Alterung beschleunigen. Ein weiterer Faktor ist der Depth of Discharge (DOD), sprich wie viel der vorhandenen Kapazität genutzt wird.

Der Aufbau eines möglichst exakten Alterungsmodell ist eine sehr komplexe und zeitaufwendige Aufgabe, da die Alterung einer Zelle abhängig ist von der verwendeten Zellchemie, der Bauform aber auch vom Hersteller. So können Zellen gleicher Zellchemie, aber von unterschiedlichen Herstellern unterschiedliche Lebensdauern bei gleichem Belastungszyklus erreichen.

In unserem Fall nutzen wir ein vereinfachtes Ampere-Stunden-Modell, in welchem der Energiedurchsatz mit Hilfe von ereignisbasierenden Gewichtungsfaktoren beeinflusst wird, um somit eine virtuelle Alterung zu erzeugen. Je mehr über das Zellverhalten bekannt ist, desto genauer können diese Modelle ausfallen und auch realistische Ergebnisse erzeugen.

3.2. Experimentelle Untersuchung

Die experimentelle Untersuchung der elektrischen Netze eines Energiespeichersystems soll neben der Validierung des Modells auch dazu dienen, die entdeckten Effekte und Verbesserungen zu belegen. Abbildung 2 zeigt zwei Beispiele, in welchem zum einen Experimente für kommerzielle Li-Ionen Systeme durchgeführt werden a), sowie in b) Untersuchungen sogenannter Hybridsysteme, bestehend aus verschiedenen Li-Ionen Systemen und Super-und auch Hybridkondensatoren stattfinden. Hierbei wird als Verbindungsmaterial zwischen den Zellen Stahl, aber auch Kupfer genommen, um verschiedene Assemblierungsformen und Zellverbindermaterialien emulieren zu können. Neben standardisierten Testprotokollen können auch Lastprofile aus realen Anwendungen genutzt werden (siehe c)), um das Verhalten unter verschiedenen Belastungsarten untersuchen zu können.

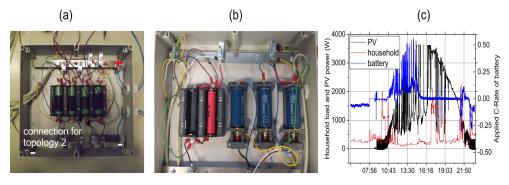


Abbildung 2. a-b) Teststände zur experimentellen Untersuchung kommerzieller Li-Ionen Systeme sowie neuartiger Hybridspeichersysteme; c) Beispiel eines realen Lastprofils (PV-Heimspeicheranwendung) unter deren Nutzung ausgewählte Applikationen emuliert werden können.

4. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel soll in Kürze die bisherigen Ergebnisse vorgestellt werden, welche aus den Experimenten sowie den validierten Modellen entstanden sind.

> Topology Topology 2

> > 0.8

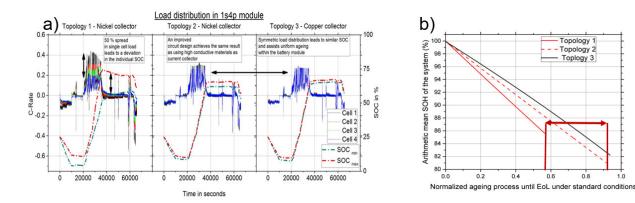


Abbildung 3. a) Lastverteilung innerhalb des Speichersystems in Abhängigkeit der Topologie in Form der Einzelzellströme sowie des minimalen und maximalen SOC; b) Alterungssimulation der verschiedenen Topologien aus a).

In Abbildung 3 a) werden die Messergebnisse bezüglich der Einzelzellbelastung innerhalb eines emulierten Li-Ionen Speichers mit unterschiedlichen Schaltungskonfigurationen in Form der Einzelzellbelastung aber auch des minimalen und maximalen SOC innerhalb des Speichers vorgestellt. Topologie 1 und Topologie 2 (s.h. Abbildung 1) nutzen kommerzielle Nickelverbinder (experimentell emuliert durch Stahl), wohingegen Topologie 3 einen Kupferleiter verwendet. Der Einfluss eines schlechtleitenden Zellverbinders ist deutlich an der großen Laststreuung in Topologie 1 zu erkennen. Topologie 2 hingegen, zeigt durch eine verbesserte Netzwerkstruktur die gleiche Lastverteilung wie der Kupferverbinder.

Die Messergebnisse wurden auch verwendet um das vorgestellte Energiespeichermodell zu validieren. Der maximal aufgetretene Fehler innerhalb der Simulationen (Li-Ionen Systeme, wie auch Hybridsysteme) bezogen zu den Messwerten ist für den Einzelzellstrom (I_{cell}) 0.17 A, den Energiedurchsatz (Q_{cell}) 0.11 Ah, sowie der Zelltemperatur (T_{cell}) 1.35 °C.

Auf Basis des validierten Modells wurden Alterungsuntersuchungen für verschiedene Netzwerkstrukturen beispielhafter Photovoltaik-Heimspeicher durchgeführt. Abbildung 3 Alterungsverhalten der vorgestellten Systeme aus Abbildung 3 a). Die Alterung wird hierbei auf den Energiedurchsatz der Einzelzezellmessung aus Abbildung 1 d) normiert um verschiedene Zellchemien/ Hersteller miteinander vergleichen zu können. Es ist deutlich zu erkennen, dass durch eine verbesserte Netzstruktur die Lebensdauer um 30 % gesteigert werden kann und auch Lebensdauern erzeugt werden können, welche mit hochleitenden Materialien, wie auch Spezialanfertigungen zu Stande kommen.

Das Potential von innovativen Hybridspeichern wurde am Fallbeispiel eines 48 V Mild-Hybrid-Systems (15 kW) untersucht und mit einem dazu ausgelegten kommerziellen Li-Ionen Speicher verglichen. Für die Belastung wurde ein Dynamic Stress Test Profile (DST) gewählt, welches sich an die Testprozedur des United States Advanced Battlery Consortium für Elektrofahrzeuge anlehnt.

In Abbildung 4 a) kann die Aufteilung des Lastflusses innerhalb des Hybridsystems untersucht werden, sowie der Energiedurchsatz je nach Komponente (Abbildung 4 b)). Hierbei wurde das Hybridsystem (Li-Ionen sowie Lithium-Ionen Kondensator) auf das gleiche Volumen und Gewicht, wie das Vergleichsmodul (s.h. Abbildung 4 c); Gewicht: ca. 9 kg; Volumen: ca. 24 l) ausgelegt. In Abbildung 4 b) lässt sich bereits erkennen, dass der Li-Ionen Speicher im Hybridsystem ca. 30 % weniger belastet wird, als das Vergleichsmodul. Alterungsabschätzungen müssen hierbei noch erfolgen.

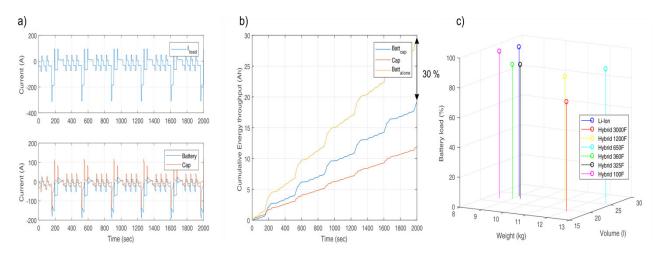


Abbildung 4. a) Simulation eines 48 V-15 kW Mild-Hybridspeicher, der aus Li-Ionen sowie Li-Ionen Kondensator Technologie besteht; Vergleich der Batteriebelastung aus a) in Form des Energiedurchsatzes zwischen einem kommerziellen Li-Ionen System (Battalone) und des verwendeten Hybridsystems (Battcap) bei gleichem Gewicht und Bauvolumen; c) Beispielhafte Möglichkeiten der Hybridisierung unter Nutzung verschiedener Kondensatorgrößen sowie Auswirkungen auf die Batteriebelastung, das Systemgewicht und Bauvolumen.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Assemblierung von Einzelzellen zu Modulen hat einen erheblichen Einfluss auf die Performance und Lebensdauer des Energiespeichers, was wiederum die Gesamtkosten des Systems beeinflusst. Kostengünstige und standardisierte Zellverbinderformate und Materialien können innerhalb eines Speichersystems Asymmetrien erzeugen, jedoch kann in einer verbesserten Netzwerkstruktur die gleichen symmetrischen Belastungsprofile und Lebensdauern erzeugt werden, wie mit hochleitenden Materialien.

Um Energiespeichersysteme für die Aufgaben von morgen vorzubereiten ist es sinnvoll die Stärken verschiedener Speichertechnologien zu kombinieren. Am Beispiel eines 48 V Systems für zukünftige Hybridfahrzeuge wurde gezeigt, dass bei gleichem Volumen und Gewicht die Belastung der Batterie deutlich reduziert werden kann, was eine erhöhte Lebensdauer zur Folge hat.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit sollen weitere Untersuchungen der Hybridisierung von Li-Ionen Systemen mit Hybrid-und Superkondensatoren vorgenommen werden mit dem Ziel, solche Systeme zu klassifizieren und nach Energie-und Leistungsbedarf auslegen zu können.



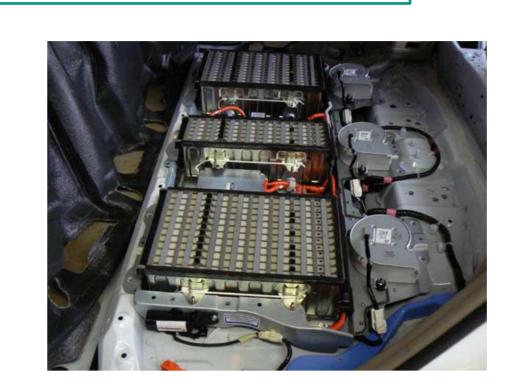
Einfluss der elektrischen Netzwerke innerhalb von kommerziellen wie auch neuartigen Energiespeichermodulen auf Performance und Lebensdauer

Thorsten Grün

Motivation und Fragestellung

Energiespeichermodule bestehen aus seriell und/oder parallel (XsYp) verbundenen Einzelzellen. Speziell in Parallelschaltungen können Unterschiede in der Einzelzellbelastung auftreten durch:

- ☐ Zellverbindermaterial und Netzwerkstruktur (Topologie)
- ☐ Bauform der Einzelzellen (Pouch, Prismatisch...etc.)
- ☐ Abhängigkeit von Zelltechnologie
 - ☐ Li-Ionen
 - ☐ Supercap, Lithium-Ionen Kondensatoren (LiC)



Fragen:

- ☐ Einfluss der Topologie auf Einzelzellbelastung und Lebensdauer?
- ☐ Effekte/Vorteile entstehen durch Nutzung unterschiedlicher Technologien?

Ampere-

Vorgehensweise

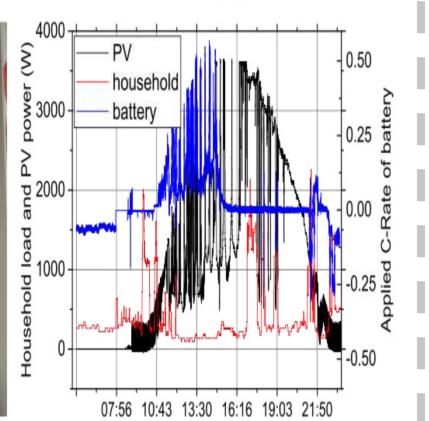
Experimentelle Untersuchung

Modellbildung und Validierung

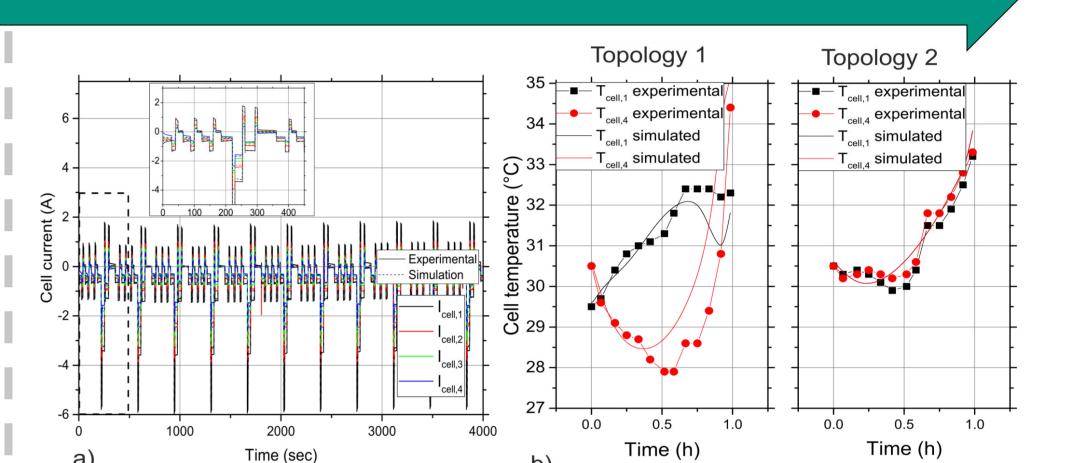
Modellgestützte Untersuchung







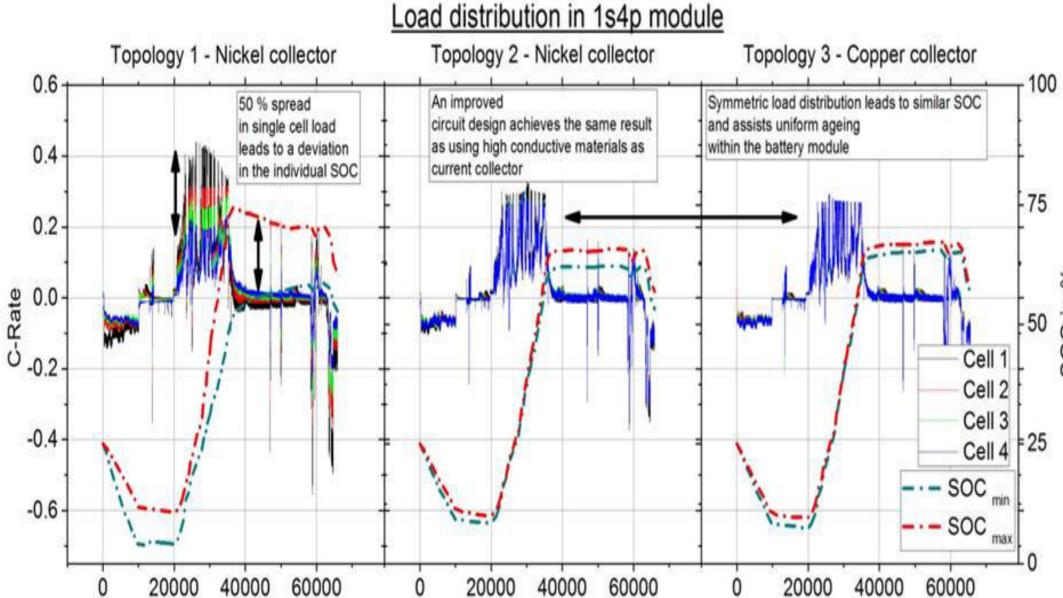
- ☐ Aufbau exemplarischer Energiespeichersysteme
 - ☐ Einheitssysteme (Li-Ionen) ☐ Hybridsysteme (Li-Ionen / X-Cap)
- Nutzung unterschiedlicher Zellverbindermaterialien
 - □ Stahl
- □ Kupfer
- - ☐ Charakterisierung von Einzelzellen
 - ☐ Aufbau eines elektrischthermischen Modells
 - ☐ Abgleich mit experimentellen Ergebnissen

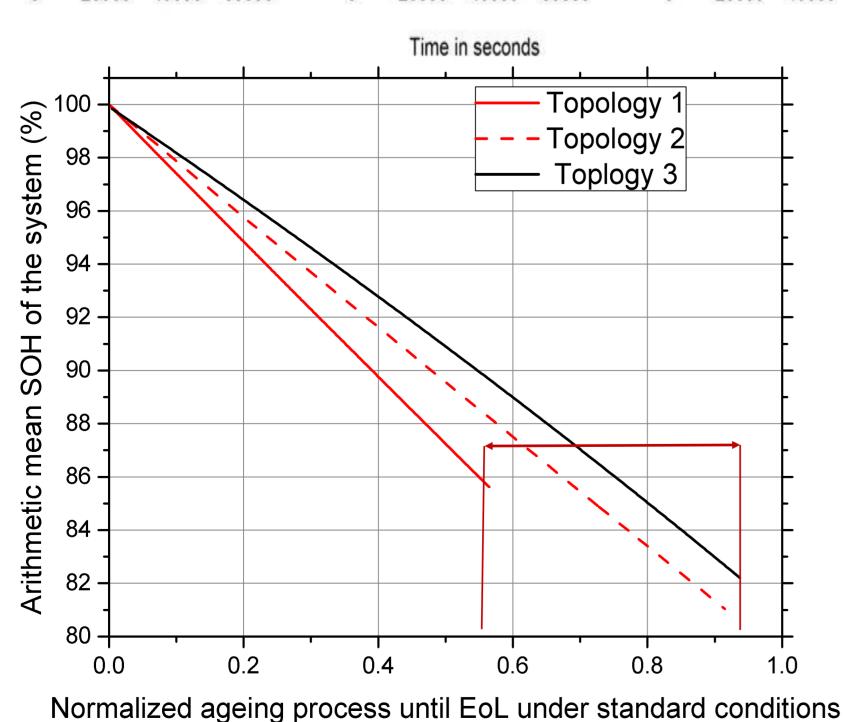


- Lebensdaueruntersuchung mittels Stunden-Modell
- ☐ Untersuchung von Fallbeispielen □ PV-Heimspeicheranwendung
 - ☐ 48 V HEV Anwendung
- Systemauslegung

☐ Nutzung synthetischer und realer Lastprofile <u>Ergebnisse</u> – PV-Heimspeicheranwendung

Topologieeinfluss





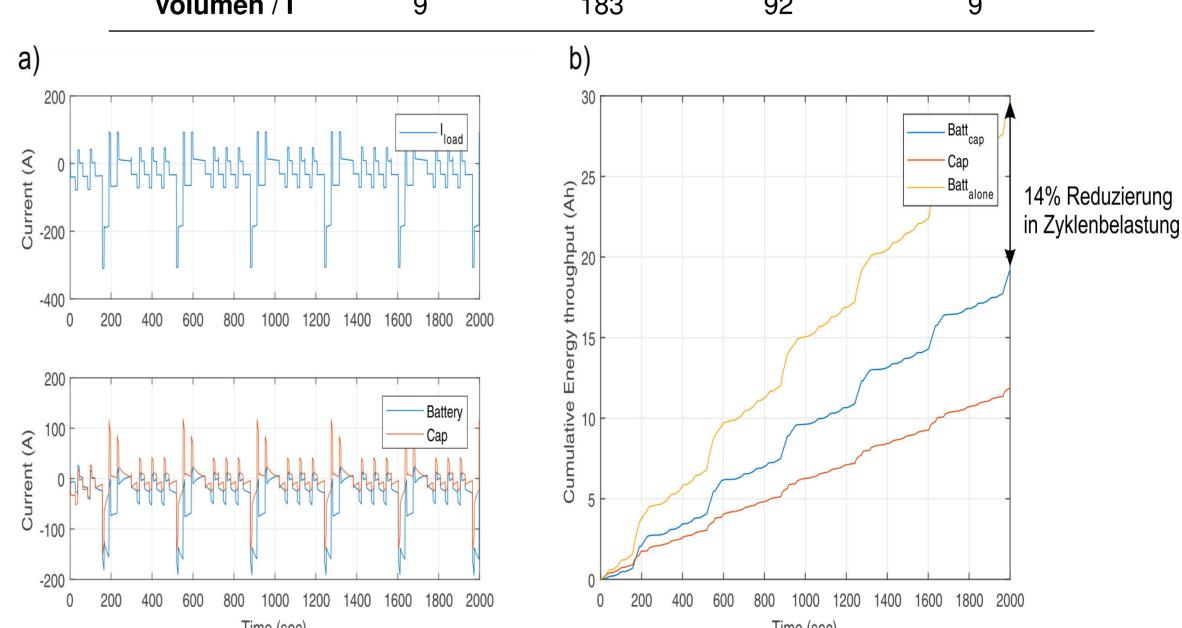
Ergebnisse

- □ Analyse der Lastverteilung unter Verwendung eines realen PV-Lastprofil
- ☐ Betrachtung von 3 Systemen
- ☐ Topologie 2 erreicht mit Stahl-Verbinder gleiche Lastverteilung wie Topologie 3 mit Kupfer-Verbinder
- ☐ Erhöhung der Lebensdauer um ca. 30 % zwischen Topologie 1 und Topologie 2 durch Unterschiede in der Netzwerkstruktur
- ☐ Topologie 2 und Topologie 3 erreichen gleiche Lebensdauer

Ergebnisse – 48 V Hybridspeicher Systemvergleich

- ☐ Kenndaten 48 V Speicher
 - ☐ Energie: 3 kWh
 - ☐ Leistung: 15 kW
 - ☐ Systemspannung: 48 V
- ☐ Lastprofil: Dynamic Stress Test Profile

	LiB (LCO 18650)	Supercap 3200 F	LiC 3000 F	Hybrid-System LiB / LiC
Energie - Zelle/ Ah	2.45	2.4	1.3	-
Spannung - Zelle / V	4.2	2.7	3.8	-
Topologie	12s43p	18s26p	13s47p	12s34p LiB / 13s1p LiC
Masse / kg	25	230	152	23
Volumen / I	9	183	92	9



Email:

Website:

thorsten.gruen@kit.edu

http://www.competence-e.kit.edu/

