

Vorhabenbezeichnung: Kompensation von Druckschwankungen im Inneren von Batteriezellen (KoDI)	
Zuwendungsempfänger: acp systems AG	Förderkennzeichen: 03XP0399C
Projektleiter Stefan Dazer	Projektlaufzeit: 01.09.2021 – 28.02.2025

Teil I - Kurzbericht

Ursprüngliche Aufgabenstellung sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Für eine Optimierung von Lithium-Ionen-Batteriezellen wurden und werden fortlaufend neue Elektrodenmaterialien erforscht, die eine höhere Energiedichte, eine verbesserte Schnellladefähigkeit, höherer Sicherheit und elektrochemische Performance bieten können. Dies sind unter anderem Hochenergieelektroden aus Siliziumkompositen oder reine Lithium-Metall Anoden, die in zukünftigen Batteriezelltechnologien Anwendung finden. Es bestehen jedoch Herausforderungen für einen stabilen, zyklischen Langzeitbetrieb dieser neuen Materialien, da für diese teilweise sehr hohe Volumenänderungen während der Lade- und Entladezyklen auftreten. Während auf Elektrodenebene beispielsweise durch Anpassung der Kompositzusammensetzung an der Gewährleistung der mechanischen Stabilität der Elektroden bei gleichzeitiger Maximierung der Energiedichte geforscht wurde und wird, fokussierten sich zum Zeitpunkt des Projektbeginns keine Forschungen/Arbeiten auf die Auswirkungen der sich aufsummierenden Volumenänderungen auf die Zell- und Modulebene. Für bisherige Systemaufbauten mit nahezu starren Gehäusen und Einspannungen resultieren aus diesen Volumenänderungen Druckschwankungen im Inneren der Zellen, die zur Degradation der Elektrodenmaterialien führen und die interne Kontaktierung beeinträchtigen können. Diese Druckschwankungen können durch eine angepasste Systemgestaltung mit Aufbringung einer flächigen, homogenen Druckverteilung auf die Zellen verhindert werden. Ziel des Projekts KoDI war daher eine Erforschung der Anpassungsbedarfe auf Zell-, Modul- und Systemebene durch eine methodische Entwicklung und prototypische Umsetzung von Kompensationsmechanismen für die Volumenänderung der Zellen. Darüber hinaus war besonders eine Funktionsvalidierung mit eigens entwickelten Prüfsystemen im Fokus.

Ablauf des Vorhabens

Die im Vorhaben KoDI durchgeführten Arbeiten fußen auf der Motivation einer materialgerechten und gleichzeitig kosteneffizienten Prozessierung des Mechanismus auf Zell-, Modul- und Systemebene zur Kompensation der Druck- und Volumenänderungen. Die Arbeiten lassen sich anhand ihrer wesentlichen Informationsflüsse vernetzen: Für die methodische Entwicklung eines fertigungsgerechten Lösungskonzeptes zur Druckkompensation wurden im Projektkonsortium Zielwerte als Basis der Entwicklung definiert und in einem Pflichtenheft dokumentiert (AP 1). Anschließend wurde der konzeptionelle Lösungsraum für die Zell- (AP 2.1) und Modul-/Systemebene (AP 2.2) aufgespannt. Darüber hinaus wurde die Prototypenfertigung vorgeplant (AP 2.3) und der Lösungsraum durch eine technische und wirtschaftliche Bewertung auf favorisierte Konzepte eingegrenzt (AP 2.4). Im weiteren Verlauf des Projektes wurde das ausgewählte Konzept umfassenden Analysen unterzogen. Dazu wurden zur Simulation der Zellatmung parametrierbare Referenzsysteme auf Zell- (AP 3.1) und Modulebene (AP 3.2) zur Validierung und Erprobung der der Kompensationsmechanismus entwickelt. Außerdem wurden zusätzlicher Prüfverfahren zur Quantifizierung der der Druckverteilung, Dichtigkeit und Volumenänderung umgesetzt (AP 3.3). Für die favorisierten Konzepte wurden Demonstratoren für die Fertigungsprozesse auf Zell- (AP 4.1) und Modul-/Systemebene (AP 4.2) aufgebaut. In einer anschließenden Fertigungserprobung (AP 4.3) und Qualitätskontrolle wurde mithilfe der Referenzsysteme und Prüfverfahren (AP 4.4) ein Prototyp des Kompensationsmechanismus

gefertigt und validiert sowie einer iterativen Produkt-/Prozessoptimierung unterzogen. Eine technische und wirtschaftliche Bewertung durch das Projektkonsortium (AP 5.1) und der Entwurf eines Skalierungskonzeptes (AP 5.2) schließen das Projekt ab.

Wesentliche Ergebnisse sowie Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Im Rahmen des Vorhabens konnte wesentliche Erkenntnisse in Hinblick auf die technische Umsetzbarkeit der Volumenänderungskompensation und Verspannung von Festkörperbatteriezellen sowie in Hinblick auf die notwendigen Fertigungsprozesse der dafür benötigten Kompensationsmechanismen gewonnen werden.

Im Fokus des systematischen Entwicklungsprozesses standen insbesondere die zu erwartenden Zell-Volumenänderungen und der erforderliche Verspanndruck. Literaturrecherchen legten nahe, dass die von der Zellchemie abhängige Volumenänderung primär als Höhenänderung auftritt. Mittels eines eigens entwickelten Berechnungsmodells wurde die Höhe dieser auf einen Worst-Case von 20 % abgeschätzt. Für Hochenergieelektroden bieten sulfidische Feststoffelektrolyte nach aktuellen Studien großes Potenzial, erfordern jedoch eine Vor- bzw. Verspannung mit einem Druck von etwa 25 MPa. Unter Berücksichtigung optimierter Materialien ist künftig ein geringerer Verspanndruck zu erwarten, sodass konservativ ein Mindestwert von 10 MPa festgelegt wurde.

Die methodische Ableitung von Lösungen für die Zell- sowie die Modul- und Systemebene zeigte, dass neben elastischen Schaum-/ Polymerelementen in oder zwischen den Zellen insbesondere nachgiebige Gehäuse auf Zellebene in Kombination mit druckaufbringenden Komponenten auf Modulebene zur Erfüllung der Anforderungen geeignet sein können. Nachfolgend wurden daher nachgiebige Gehäuse auf Zellebene untersucht, wobei diese Untersuchungen bei den Projektpartnern durchgeführt wurden.

Für den zweiten Ansatz wurden passive und aktive Lösungen mit zusätzlichen Getrieben verfolgt. Unter diesen wurden ein hydraulisches Kolbengetriebe sowie eine Lösung mittels Flaschenzugmechanismus als besonders vielversprechend identifiziert. Beide Mechanismen wurden getrennt voneinander entwickelt und aufgebaut. Weiterhin wurde die Nutzbarkeit der Systeme unter Verwendung eigens dafür entwickelter Referenzsysteme validiert. ACP war in diesem Zusammenhang insbesondere an der Entwicklung einer Modulumhausung für die Hydraulikkolbengetriebe mittels metallischen Spannbändern und der Evaluation deren Fertigbarkeit beteiligt.

Teil II - Eingehende Darstellung

Ausführliche Darstellung der im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten mit Vergleich zur ursprünglichen Vorhabenbeschreibung.

AP 1: Anforderungsdefinition

Zur vollständigen Definition der Anforderungen wurden in Kooperation mit den Projektpartnern die Randbedingungen für die Wirksamkeit der Kompensationsmechanismen erarbeitet. Wird ein konventioneller Batterieaufbau angestrebt (mit Zellen in Modulen, die in ein Gesamtsystem integriert sind), muss die Kompensation der Volumenänderung auf Modulebene erfolgen. Werden die Zellen direkt im Gesamtsystem ohne Zwischeneinhausung durch Module verbaut (als „Cell2Pack“), muss die Volumenänderung auf Systemebene kompensiert werden. Daher wurden jeweils eine Anforderungsliste für den Mechanismus auf Zellebene und eine für die Modul-/Systemebene erarbeitet.

Ein wesentliches Merkmal der zu entwickelnden Mechanismen ist die zu kompensierende Volumenänderung konventioneller und zukünftiger Batterie-Materialsysteme. Diese wird vorwiegend vom verwendeten Materialsystem auf Elektrodenebene bestimmt. Recherchen Volumenänderung in Pouch-Zellen für ein konventionelles Batterie-Materialsystem (LCO/Graphit) zeigen eine über der Elektrodenfläche annähernd gleich verteilte Volumenänderung auf [1], die sich vorwiegend als Höhenänderung der Zelle äußert. Für die Auslegung der Kompensationsmechanismen wurde angenommen, dass dies unter der Voraussetzung einer

gleichmäßigen Oberflächenbelastung auch auf andere Materialsysteme übertragen werden kann. Die dabei auftretende Höhenänderung auf Zellebene ist aufgrund einer Vielzahl an möglichen Materialkombinationen im Stand der Forschung insbesondere für Hochenergiezellen allerdings wenig dokumentiert. Daher wurde die Volumenänderung basierend auf einem durch das IWF entwickelten Berechnungsmodell zu 20 % (Zelle ungeladen → geladen) angenommen und für die Auslesung der Kompensationsmechanismen in die Anforderungen übernommen. Die Kompensation sollte dabei als Wunschanforderung möglichst passiv erfolgen.

Besonders hohe Volumenänderungen treten vorwiegend bei Hochenergiematerialien wie Lithium-Metall-Anoden auf. Mit Blick auf zukünftige mobile Anwendungen erscheint die Verwendung von Feststoffelektrolyten (SSE) in Kombination mit diesen Hochenergiematerialien wahrscheinlich [2, 3]. Diese erfordern hohe Verspanndrücke, die sich je nach verwendetem SSE stark unterscheiden, bisher aber noch im Entwicklungsstadium sind. Für sulfidische SSE, die aufgrund einer hohen Ionenleitfähigkeit aus Forschungssicht vielversprechend erscheinen [4], werden hohe Drücke im Bereich von 5 – 30 MPa als zielführend diskutiert [5, 6, 7]. Da mit zunehmender Entwicklung der SSE eine Senkung der benötigten Drücke zu erwarten ist und davon auszugehen ist, dass die Abbildung der Drücke im höheren Druckbereich mit hohen Materialaufwänden und Gewichten in der mechanischen Konstruktion verbunden ist, wurde ein Zieldruck von 10 MPa für die Anforderungen übernommen. Für die zulässige Druckänderung bei der Volumenkompensation auf Zellebene konnten im Rahmen von Recherchen keine optimalen Bereiche identifiziert werden. Verschiedene Untersuchungen zeigen jedoch, dass eine Minimierung der Druckschwankungen den zyklischen Kapazitätsverlust von Batteriezellen deutlich verringert [8, 9], sodass eine Wunschanforderung von 0 MPa für die Druckänderung übernommen wurde.

Neben diesen funktionellen Randbedingungen sind weitere äußere Randbedingungen für die spätere Nutzung der Batterien mit integrierten Volumenkompensationsmechanismen zu berücksichtigen. In Kooperation mit den Projektpartnern wurde hierfür eine Übersicht über bekannte Normen erarbeitet (siehe Abbildung 1). Unter den identifizierten Normen erschien die UN38.3 besonders relevant, da diese Norm international für den Transport aller Lithium-Ionen-Batterien vorgeschrieben wird [10]. Basierend hierauf wurden die Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit (bei Funktionsbeibehaltung) auf – 45 °C bis 75 °, an die Vibrations- und Beschleunigungsfestigkeit sowie an die Dichtheit von Zellen (im Druckbereich 100 mbar – 1 bar Absolutumgebungsdruck) präzisiert.

Automotive	Mobilität (ohne Automotive)	Elektrowerkzeuge und Consumer-Produkte	Stationäre Energiespeicher
UN 38.3: United Nations Norm für den Transport von Lithium-Metall- und -Ionen-Zellen und -Batterien			
UL 1642 Lithium Batterien für Anwendungen mit Austausch durch Techniker oder Endanwender			
DIN EN IEC 62281: Sicherheit von Primär- und Sekundär-Lithiumbatterien beim Transport			
ISO 12405-4:2011-08: El. Fahrzeuge – Prüfspezifikationen für Li.-Ion.- Batteriepakete und -systeme – Teil 4: Leistungsprüfungen	DIN EN 62133-2 (VDE 0510-82): Tragbare gasdichte Li.-Sek.-zellen und -batterien mit nicht-säurehaltigen Elektrolyten		
	DIN EN 62619 (VDE 0510-39): Li.-Sek.-zellen und -batterien für industrielle Geräte, inkl. stationären Geräten		
DIN EN 50604-1 (VDE 0510-12): Prüfverfahren und Sicherheitsanforderungen der Leistungssicherheit für entnehmbare Li.-Ion.Bat.-(Packs und)- Systeme der Spannungsclassen A und B zur Verwendung in el. Straßenfahrzeugen, inklusive Fahrrädern (Gilt nicht für Batterien, die durch ISO 12405 abgedeckt sind; Zellprüfung in IEC 62660)		UL 2054 Household and Commercial Batteries	
UL 2580: Batteries for Use In electric Vehicles		DIN EN 62620 VDE 0510-35: Lithium-Akkumulatoren und -batterien für industrielle Anwendungen mit alkalischen oder anderen nicht-säurehaltigen Elektrolyten	
DIN EN IEC 62660-1 (VDE 0510-33): Prüfung des Leistungsverhaltens und der Lebensdauer von Li.- Ion.-Sek.-Zellen in Elektro- & Hybridfahrzeuge	DIN EN 15194:2018-11: Fahrräder - Elektromotorisch unterstützte Räder - Electrically power assisted cycles (EPAC)	DIN EN 61960-1 und 61960-2: Lithium-Sekundärzellen und - bat-terien für tragbare Geräte, Li.-Sek.-zellen (T. 1) und - batterien (T. 2)	VDE AR-E 2510-2: Stationäre el. Energiespeicher- systeme vorgesehen zum Anschluss an das Niederspannungsnetz
DIN EN IEC 62660-2 (VDE 0510-34): Prüfverfahren der Zuverlässigkeit und des Missbrauchverhaltens von Li.- Ion.-Sek.-Zellen und -Zellen- blöcken in Elektro- & Hybridfzg.	UL 2271 ANSI/CAN/UL/ULC Standard for Batteries for Use LEV- Applications	DIN EN 62841 (VDE 0740): Sicherheit von elektromotorisch oder -magnetisch betriebenen: handgeführten Werkzeugen (T. 2); transportablen Werkzeugen (T. 3); Rasen- & Gartenmaschinen (T. 4)	DIN EN 63056 (VDE 0510-56): Sek.-zellen und -batterien mit alkalischen oder anderen nicht säurehaltigen Elektrolyten - Sicherheitsanforderungen für Li.-Sek.-zellen und -batterien für el. Energiespeichersysteme
DIN EN IEC 62660-3 (VDE 0510-49): Prüfverfahren für das sichere Betriebsverhalten von Li.-Ion.- Sek.-Zellen und -Zellenblöcken als Antrieb von Elektro- und Hybridfahrzeuge		DIN EN 60745-1 VDE 0740-1: Handgeführte motorbetriebene Elektrowerkzeuge – Sicherheit	VDE AR-E 2510-50: Stationäre Energiespeicher- systeme mit Lithiumbatterien
ISO 6469-1:2019-04: El. Straßenfahrzeuge – Sicherheits-spezifikation für wiederaufladbare Energiespeichersysteme (RESS)		DIN EN 61029-1 VDE 0740-500: Sicherheit transportabler motorbe-triebener Elektrowerkzeuge	

Abbildung 1: Übersicht über Anwendungen und zugehörige Normen für Lithium-Ionen-Batterien

Weiterhin wurden mit der Eignung für rechteckige Elektroden und horizontale/ vertikale Zellstapelanordnungen sowie der Festlegung von Beispielformaten für die Gehäuse (Kavitätsflächen 54 mm x 74 mm „BLB1“ für die Entwicklung sowie 94mm x 254 „BLB4“ mm für die Skalierungsprüfung) auch geometrische Anforderungen definiert.

AP 2: Fertigungsgerechte Konzeption eines Kompensationsmechanismus

Basierend auf den in AP 1 definierten Anforderungslisten wurden in AP 2.1 mit der Aufnahme der Volumenexpansion, der Ausfüllung der Volumenschrumpfung und einer homogenen Verteilung des Außendrucks drei Funktionen ermittelt, die durch den Mechanismus erfüllt werden müssen.

In Workshops in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern wurden Teillösungen und Ausprägungen für diese Funktionen identifiziert und in einem morphologischen Kasten zusammengeführt. Zudem wurden Ansätze zur zyklenbeständigen Kontaktierung der Ableiter gesammelt (AP 2.1). Der vollständige morphologische Kasten ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Morphologischer Kasten zur Volumenkompensation auf Zellebene

Funktion	Lösungsansätze							
1. Volumenexpansion aufnehmen	(1) Falten in den seitlichen Kavitätswänden des Gehäuses	(2) Auxetische Materialstrukturen als Gehäusestruktur im Zellinneren	(3) Aktivierte hydraulische Kissen als zusätzliche Lage im Zellinneren	(4) Elastische Schaumstrukturen als zusätzliche Lage im Zellinneren	(5) Federbalg zum Ausgleich der Volumenänderung auf dem Zellgehäuse	(6) Elastische Vliesstoffe als Zusatzlage im Zellinneren	(7) Aktivierte hydraulische Kissen auf dem Zellgehäuse	(8) Federnde Gehäusekonstruktion mit Dichtung
	(9) Vergrößerter Abstand der Siegelnaht	(10) Folienersteifung durch vorgeformte Außenhülle des Zellgehäuses (Schaffung von Vorzugsdehnbereichen)	(11) Wellenförmige Membranfedern als zusätzliche Lage im Zellinneren	(12) Verwendung äußerer federnder Deckplatten zur Einspannung der Zellen	(13) Lokal verteilte unterschiedliche Schäume zur Schaffung von Vorzugsdehnbereichen als zusätzliche Lagen im Zellinneren	(14) Pneumatische Elemente (gasgefüllte Kissen im Zellinneren oder als zusätzliche Lage auf dem Zellgehäuse)	(15) Vertikale Taschen seitlich der Kavität	
2. Volumenschrumpfung auffüllen	(1) Wird durch Expansionsmechanismus übernommen				(2) Ein äußerer Druck (aufzubringen auf Modul-/Systemebene) wirkt zusammen mit dem Expansionsmechanismus			
3. Außendruck homogen verteilen	(1) Wird durch Expansionsmechanismus übernommen	(2) Zusätzliche Schaumstrukturen auf oder in den Zellen	(3) Starre Platten mit Polymerbeschichtung					
4. Zellen zyklisch kontaktieren	(1) Ableiter aus elastischem Material	(2) Biegbare Ableitergeometrie	(3) Entfaltbare/streckbare Ableitergeometrie	(4) Biegbare Ableiter in elastischer Kleber-Matrix zum Rückzug	(5) Starre Ableiter mit Verschiebbarer Lagerung auf Modulebene			

Basierend auf den abgeleiteten Lösungskonzepten zeigte sich, dass der Aufbau des Mechanismus im Wesentlichen von der Funktion 1 (Volumenexpansion aufnehmen) bestimmt wird. Daher wurden die jeweiligen Vor- und Nachteile der Lösungsansätze in Hinblick auf Funktionalität und Umsetzbarkeit, Komplexität, erwarteten Kosten der Fertigung sowie mögliche Beeinflussungen des Thermomanagements diskutiert und eine Bewertung der Lösungsansätze durchgeführt (AP 2.4). Besonders geeignet erschienen auf Basis der Bewertung im Konsortium (siehe Abbildung) 1. die Integration von einem oder mehreren elastischen Schaummatten oder Vollmaterialien in das Zellinnere, 2. die Integration von Faltenstrukturen in die Seitenwände der Kavität des (Pouch-)Zellgehäuses zur Realisierung einer Nachgiebigkeit des Zellgehäuses und 3. die Integration von Strukturen ohne Hinterschneidungen zur Bildung von Vorzugsdehnbereichen im Pouchgehäuse zur Realisierung eines nachgiebigen Zellgehäuses.

Die weiteren Funktionen werden im Fall der Schäume bereits durch den Mechanismus und bei den nachgiebigen Gehäusegestaltungen durch Schäume auf Zwischenlagen oder dem Mechanismus auf Modulebene erfüllt, sodass sich unter Kombination dieser Ansätze direkt die Konzepte für die Kompensation auf Zellebene ergaben. Weiterhin waren die so abgeleiteten Konzepte mit allen identifizierten Lösungsansätzen zur Ableiterkontaktierung kompatibel, sodass hierdurch keine weitere Anpassung notwendig wurde.

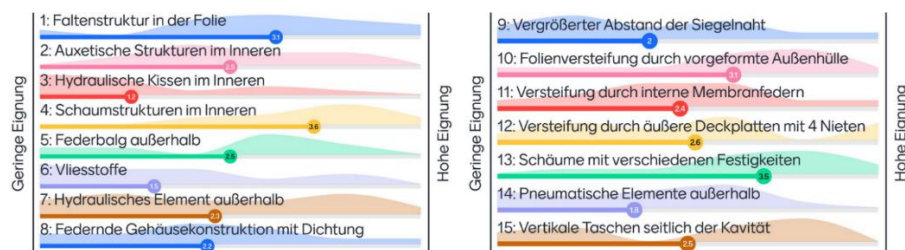


Abbildung 3: Durchgeführte Bewertung der Lösungskonzepte für die Teilfunktion 1 (13 abgegebene Bewertungen)

Im Nachgang fokussierte sich ACP auf die Untersuchung des Konzepts „Schaumstrukturen“. Um die Machbarkeit dieses Konzepts zu bewerten (AP 2.1), wurden in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern IWF und Ansmann Literatur- sowie Marktrecherchen erstellt. Unter der Anforderung einer für eine hohe volumetrische Energiedichte der späteren Zelle benötigten möglichst hohen elastische Dehnung des Materials (>15%) bei gleichzeitiger minimaler Druckänderung um den Zieldruck von 10 MPa wurden Metall- und Elastomerschäume sowie Elastomervollmaterialien evaluiert. Die Recherchen zeigen, dass konventionelle metallische Schäume sich allerdings bereits ab einer Kompression von etwa 5 % plastisch verformen [11] und somit nicht für die Anwendung geeignet erscheinen.

Für die Polymere zeigte sich, dass bereits die benötigte Druckfestigkeit von 10 MPa nur durch wenige Materialien abgebildet werden kann. Auf Basis bekannter Materialkennwerte erschienen initial nur sehr wenige Varianten aus der Klasse der Polyurethane (PU) für die Anwendung geeignet. Zusätzlich konnten in Zusammenarbeit mit den Partnern drei weitere thermoplastische PU und ein Silikon-Gummi als potenziell geeignet und in Zusammenarbeit mit der Universität Manchester ein weiterer PU identifiziert werden. Die identifizierten Materialien wurden nachfolgend verschiedenen Druckversuchen unterzogen.

Da Untersuchungen der Projektpartner die Machbarkeit der Ansätze zur nachgiebigen Gehäusegestaltung auf Zellebene zeigten, wurden diese nachfolgend fokussiert.

Für die Vorbereitung der Fertigung der Mechanismen auf Modul-/Systemebene wurden die Konzeptsuche auf Modul-/Systemebene erweitert. Hierzu wurden in einer Funktionsanalyse in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern IWF, Ansmann und INFICON relevante Funktionen für die Kompensationsmechanismen der Modul-/Systemebene abgeleitet (AP 2.3). Bei den Hauptfunktionen müssen analog zur Zellebene die Aufnahme der Volumenexpansion und die Ausfüllung der Volumenschrumpfung berücksichtigt werden. Zusätzlich muss der Stapeldruck aufgebracht und gehalten werden. Als Nebenfunktionen wurde eine zusätzliche Homogenisierung des Stapeldrucks mit aufgenommen. Weiterhin darf eine zyklenbeständige Kontaktierung auch auf Modul-/Systemebene nicht durch die Kompensationsmechanismen behindert werden. Zur Kompatibilitätsprüfung wurde daher auch diese Funktion als Nebenfunktionen mit aufgenommen.

Für die Funktionen wurde in Workshops in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern IWF, Ansmann und INFICON Teillösungen und Ausprägungen für die Funktionen identifiziert (AP 2. und in einem morphologischen Kasten zusammengefasst (siehe Tabelle 3). Im Rahmen der Lösungsableitung für die „Aufnahme der Volumenexpansion“ konnten aber nur Lösungen identifiziert werden, die gleichzeitig auch die Hauptfunktion „Ausfüllen der Volumenschrumpfung“ erfüllen, sodass diese im morphologischen Kasten gemeinsam dargestellt wurden.

Tabelle 3: Morphologischer Kasten zur Volumenkompensation auf Modul-/Systemebene

Funktion	Lösungsansätze							
1. Volumenexpansion aufnehmen und Volumenschrumpfung ausfüllen	(1) Über Keilgetriebe	(2) Federbalg als elastisches Element	(3) Gasgefüllte Kissen (zentral oder zwischen den Zellen)	(4) Aktuierbare Fluidgefüllte Kissen (zentral oder zwischen den Zellen)	(5) Hydraulikkolbengetriebe	(6) Pneumatik-Kolben/Gasdruckfeder	(7) Spindelgetriebe	(8) Kurbeltrieb
	(9) Zahnstangengetriebe	(10) Kurvenscheibenge triebe	(11) Gurt- Spann- getriebe (analog zu Palettenspanngurt)	(12) Elastische Modul- einhausung (z. B. durch federnde Strukturen)	(13) Flaschen- zug	(14) Knie- hebel- getriebe (einseitig/ zweiseitig)	(15) Schaum- strukturen	
2. Stapeldruck aufbringen und halten	(1) Vorspannen des Mechanismus aus Funktion 1		(2) Feder- systeme	(3) Hydro- speicher	(4) Elektrischer Rotations- antrieb		(5) Elektrischer Linearantrieb	
3. Stapeldruck homogen verteilen	(1) Wird durch den Mechanismus aus Funktion 1 übernommen		(2) Zusätzliche Elastomermatten zwischen den Zellen		(3) Über Hydro- speicher	(4) Fluidgefüllte Kissen (zentral oder zwischen den Zellen)		
4. Ansätze zur Zyklen- beständigen Kontaktierung der Zellen (Kontaktierung wurde nicht untersucht, muss mit Kompensationsmechanismus aber möglich sein)	(1) Ausführung der Kontaktierung als Gleitkontakt (z. B. mit Kohle-bürsten)		(2) Flexible Verkabelung der Zellen	(3) Federnde Kontaktierung der Zellen				

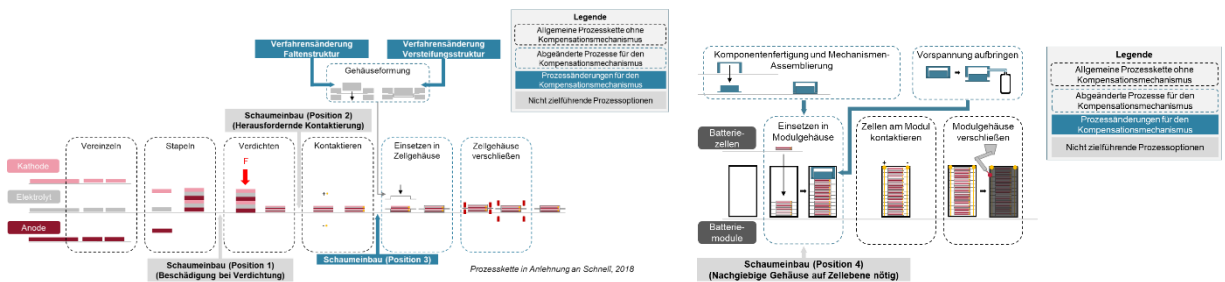
Anschließend wurde mit den Projektpartnern IWF, Ansmann, INFICON und ACP die Kombinierbarkeit der Teillösungen für die Hauptfunktionen 1 und 2 geprüft und eine Bewertung mit Fokus auf Teilfunktion 1 durch einen paarweisen Vergleich der Systeme durchgeführt (AP 2.4). ACP unterstützte hierbei durch Einschätzungen zur fertigungstechnischen Umsetzbarkeit der Mechanismen. Neben den Schaumstrukturen, die später im Rahmen der Untersuchungen im AP 2.1 verworfen werden mussten, erschien unter den Systemen in der Bewertung (siehe Tabelle) insbesondere die Verwendung von Flaschenzugsystemen sowie Hydraulikkolbengetrieben geeignet. Recherchen zur Umsetzbarkeit der Systeme zeigten die Machbarkeit der Druckaufbringung im Zieldruckbereich auf, sodass diese Systeme für die nachfolgenden Arbeitspakete fokussiert wurden. Die Lösungen Keilgetriebe sowie Flaschenzugsysteme wurden

dabei nachfolgend durch den Projektpartner Ansmann und die Lösung Hydraulikkolbengetriebe durch den Projektpartner IWF untersucht. ACP fokussierte sich auf die Einhausung der Mechanismen zur Kraftaufnahme.

Tabelle 4: Kompatibilitätsprüfung zu und Bewertung der ermittelten Lösungsansätze im paarweisen Vergleich

Kompatibilitätsprüfung und Bewertung - Falls kombinierbar: X - Bewertungskriterien bei paarweisem Vergleich: 1. Funktionalität (Kräfte für Druck von 10 MPa → BLB1: 35 kN/ BLB4: 225 kN) 2. Kosten 3. Gewicht 4. Volumen	Lösungsansatz Hauptfunktion 1														
	(1) Über-Keilgetriebe	(2) Elastischer Federhagig	(3) Gas-gefüllte Kissen	(4) Fluid-gefüllte Kissen	(5) Hydraulik-Kolbengetriebe	(6) Gas-druckfeder	(7) Spindel-getriebe	(8) Kurbeltrieb	(9) Zahn-stangengetriebe	(10) Kurven-schiebenge triebe	(11) Gurt-Spann-getriebe	(12) Elastisches Modulgehäuse	(13) Flaschen-zug	(14) Kriechel-getriebe	(15) Schaum-strukturen
Ansatz Hauptfunktion 2. (1) Vorspannen des Mechanismus aus Funktion 1 (2) Federsysteme (3) Über Hydropspeicher b (4) Elektrischer Rotationsantrieb (5) Elektrischer Linearantrieb		X	X		X	X		Ungünstig für Kräfte			X	X	X	X	X
		X		X	X	X	X				X			X	X
		X		X	X	X	X			X	X			X	X
		X												X	X
															X
Bewertung aus paarweisem Vergleich	13	6	5	4	13	15	3	2	9	10	1	0	12	7,5	13

Um die Fertigung der favorisierten Mechanismen im Rahmen des AP 4 vorzubereiten, wurden für die Kompensationskonzepte auf Zellebene (Schaumstrukturen, Faltenstrukturen und Versteifungsstrukturen) sowie auf Modulebene (Hydraulikstempel) zusammen mit den Projektpartnern IWF und Wirth Fertigungsprozessketten abgeleitet (AP 2.3). Für die Zellebene wurde hierzu die in der Literatur diskutierte Prozessreihenfolge [13] für die Fertigung von Feststoffbatterien auf die Einbringung der Kompensationsmechanismen hin untersucht (siehe Abbildung sechs a). Für die Versteifungsstrukturen bestehen wesentliche Änderungen bei der Gehäuseumformung. Weiterhin ergeben sich Anpassungsbedarfe beim Einsetzen der Zelle in das Zellgehäuse sowie beim Verschluss, die in einem Handhabungsablauf zusammengeführt wurden. Analog zur Zellebene wurde auch die Fertigungsprozesskette der Modul-/Systemebene auf die Einbringung des Hydraulikstempels sowie dessen Handhabung hin untersucht (siehe Abbildung sechs b) (AP 2.3). Der Mechanismus kann vor der Modulmontage assembliert und dann im eingefahrenen Zustand zusammen mit den Zellen in das Modulgehäuse eingesetzt werden. Anschließend wird der Hydropspeicher oder das jeweils verwendete Pumpsystem mit dem Hydraulikstempel verbunden und der Verspanndruck aufgebaut. Für den Hydropspeicher muss dies im Rahmen der Fertigung durch eine externe Pumpe erfolgen, bei vorhandener Pumpeinheit kann der Druckaufbau durch das interne Pumpsystem vorgenommen werden.



a) ASB-Zellfertigungsprozesskette (Prozesskette nach [27]) b) Modul-/System-Fertigungsprozesskette

Abbildung 6: Änderungsbedarfe der Fertigungsprozesskette zur Fertigung und Einbringung der favorisierten Kompensationskonzepte

AP 4: Gestaltung des Fertigungsprozesses

Eine Analyse der konzeptionierten Systeme zeigte, dass die Fertigungsprozesse für die Kompensationsmechanismen stark abhängig von der konzeptionellen und konstruktiven Ausgestaltung der Mechanismen waren. ACP systems unterstützte folgend bei der konstruktiven Ausgestaltung der hydraulischen Kompensationsmechanismen und fokussierte sich im Zuge der Gestaltung des Fertigungsprozesses (AP 4.2) insbesondere auf die Einhausung der Systeme. Die auf die die Zellfläche aufgebrauchten Kräfte müssen auf Seiten der Modulumhausung

abgestützt werden. Somit bestehen hohe Anforderungen an die mechanische Stabilität der Modulumhausung. Weiterhin bestehen Anforderungen in Hinblick auf ein geringes Gewicht sowie eine einfache Montierbarkeit.

AP 5: Technische und wirtschaftliche Bewertung

Die im Projekt entwickelten Systeme wurden zur technisch-wirtschaftlichen Bewertung (AP 5.1) gegenübergestellt und einem Elektroroller Referenzsystem verglichen. Das hydraulische Kompensationssystem mit AramidSchlingen zeigt im Vergleich eine deutlich erhöhte gravimetrische Energiedichte, sodass technisch von einer guten Eignung für mobile Anwendungen ausgegangen werden kann. Aufgrund des Bauraums für die Kompensationskomponenten müssen allerdings geringere volumetrischen Energiedichten beachtet werden. Weiterhin wird ein vergleichsweise hoher Preis für die Ausgangskomponenten ersichtlich. Es ist allerdings zu bedenken, dass deutliche Skalierungseffekte bei einer Serienproduktion bestehen. Bei Änderung zum Modulaufbau mit Stahlbändern kann zudem eine Kostenreduktion zu Lasten der Energiedichte erfolgen. Durch die im Vergleich zum Referenzsystem geringere volumetrische und nur leicht höhere gravimetrische Energiedichte ist dieses System eher für stationäre Anwendungen geeignet. Das Flaschenzugsystem liegt in der Energiedichte deutlich unter und im Preis deutlich über dem Referenzsystem. Es bestehen aber noch deutliche Optimierungspotentiale in der Konstruktion des Prototyps.

Abschließend wurde die Skalierbarkeit der entwickelten Kompensationsmechanismen sowie der Fertigungsprozesse in die industrielle Produktion geprüft und in einem Leitfaden zusammengefasst (AP 5.2). Entscheidend für die Skalierbarkeit der Prozesse sind insbesondere die Zellformate. Da die entwickelten Systeme für ein Laborzellformat (54 mm x 74 mm) konzipiert wurden, erscheint für eine Industrialisierbarkeit eine Skalierung auf großformatige Zellen zweckmäßig. Die Gehäuse mit eingebrachten Versteifungsstrukturen können durch Anpassung der Längen- und Breitenmaße direkt auf großformatige Zellen übertragen werden. Die Fertigung der Gehäuse kann unter Anpassung der Tiefziehkomponenten sowie einer Neuevaluation der Niederhaltekräfte sowie der Tiefziehggeschwindigkeiten ebenfalls in einem dem entwickelten Werkzeug ähnlichen Werkzeug erfolgen. Da der Prozess mit dem konventionellen Tiefziehprozess vergleichbar ist, sind hierdurch keine Taktzeiteinbußen für die Zellfertigung zu erwarten. Je nach Zellgewicht muss die Weiterführung der Pouchgehäuse mittels Förderband nach Einlage des Zellstapels aber einer Machbarkeitsprüfung unterzogen werden. Weiterhin muss eine Anpassung der verwendeten Flächensauggreifer auf die größeren Pouchgehäuse erfolgen. Insgesamt werden die Änderungen aber als geringfügig eingeschätzt.

Wesentliche Änderungen ergeben sich insbesondere für die Modul- und Systemebene, da eine Zellformatänderung auch eine Änderung der Konstruktion der Mechanismen nach sich zieht. Für die Hydraulikkolbengetriebe muss hierzu eine Neuauslegung mit dem geometrischen Ziel der Maximierung Kolbenfläche erfolgen. Diese Gestaltung ist dabei stark abhängig vom gewählten Zellformat. Bei atypischen eher quadratischen Zellformaten bietet sich eine Gestaltung aus einem einzelnen Stempel an. Bei typischerweise vorliegenden länglichen Zellformaten wäre einerseits die Gestaltung von mehreren Einzelkolben, die als separate Systeme miteinander gekoppelt werden können, oder andererseits die Gestaltung eines einzelnen Kolbengehäuses mit mehreren Kolben möglich. Zur Maximierung der Kolbenfläche wäre dabei die Wahl eines Zellformats vorteilhaft, bei dem die lange Seite einem Vielfachen der kurzen Seite entspricht. Weiterhin wird durch eine Steigerung des Hubvolumens größere Fluidströme und somit größere Pumpsysteme notwendig. Bei deutlichen Steigerungen der Fluidströme (ab schätzungsweise ca. 0,2 L/Min) könnten an Stelle der entwickelten Axialkolbenpumpe auch Radialkolbenpumpen Anwendung finden und müssten somit im Rahmen einer weiteren Optimierungsschleife betrachtet werden. Für den Flaschenzug muss im Rahmen der Skalierung eine Neuauslegung der Boden- und Deckelkontur inklusive der Umlenkachsen- und Rollenanzahl sowie je nach benötigter Übersetzung eine Anpassung des Getriebes erfolgen. Eine deutliche Erhöhung der gravimetrischen Energiedichte wäre hier durch die Stapelung Zellstapeln (schätzungsweise bis

zu 4), ggf. unter Verlagerung des Getriebes zwischen die Zellstapel denkbar. Zudem könnten als Systemgestaltung mehrere Flaschenzüge durch auf Systemebene vorliegendes Getriebe gekoppelt werden. Es ist davon auszugehen, dass die im Projekt ermittelten Montagereihenfolgen sich direkt auf die skalierten Systeme übertragen lassen. Durch die geänderten Formate werden auch auf Modul- und Systemebene Anpassungen der Handhabungstechnik notwendig. Hierzu zählen insbesondere die Größe der verwendeten Greifer sowie der aufgebauten Vorrichtungen.

Insgesamt wird die Skalierbarkeit der Systeme in den industriellen Kontext auf Basis dieser Analysen als gut übertragbar eingeschätzt. Entscheidender für die Einsetzbarkeit der entwickelten Systeme als auch der skalierten Systeme im industriellen Kontext sind allerdings die Entwicklungen der sulfidischen ASSB. Forschungen in Hinblick auf die Verlängerung der Lebensdauer durch die Konstantdruckbereitstellung (durch Anwendung der entwickelten Systeme), der Erschließbarkeit von Systemsicherheitspotentialen, der Steigerbarkeit der Maximalbetriebstemperatur und Entwicklungen zur Verfügbarkeit sowie zum Preis der sulfidischen ASSB Zellen sind abzuwarten, um eine abschließende und umfassende Bewertung der Systeme zu treffen.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die **Entwicklung der Kompensationsmechanismen** auf Modulebene wurden hochstabile Endplatten für das Stahlspannband hergestellt, um die hohen Zugkräfte gleichmäßig auf den Batteriestapel verteilen zu können. Für Tests wurden zudem mehrere Stahlbänder und Spannbolzen angeschafft.

Für erste Tiefziehversuche wurden Komponenten für einen prototypisches Werkzeug entwickelt und angeschafft.

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die Arbeiten wurden wie vorgesehen unter Einhaltung der Budget- und Personalvorgaben durchgeführt, sodass alle Arbeitspakete bearbeitet und ausgewertet werden konnten. Ohne die finanzielle Förderung wären Aufwand und Kosten nicht darstellbar gewesen.

Wissenschaftliche Mitarbeiter übernahmen konzeptionell-analytische Aufgaben – von Anforderungsanalyse und Systementwurf über Komponentenwahl und Prozessentwicklung bis zur Planung, Durchführung und Auswertung. Technisches Personal realisierte die Konstruktionen und den praktischen Aufbau von Demonstratoren.

Die erzielten Ergebnisse belegen, dass dieser Ressourceneinsatz sowohl notwendig als auch zielführend war.

Verwertungsplan

Wirtschaftliche Verwertung

Sobald Feststoffbatterien (ASSLB) auf den Markt kommen (lieferbar sind), können die in 4.1 aufgeführten Spannänder vor Ort oder in einer Ausgründung hergestellt werden und somit können neue Arbeitsplätze geschaffen werden und Ertrag und Umsatz gesteigert werden. Auch die Herstellung von teillautomatisierten Anlagen zur Montage der Stahlbänder und Einbringung der Akkuzellen kann die bestehenden Märkte für die acp systems AG sichern. Dies trifft auch auf Tiefziehanlagen um Pouchfolien mit Vorzugsdehnbereichen herzustellen.

Wissenschaftliche und technische Verwertung

Die Ergebnisse und Methoden aus der Entwicklung des Exoskelettes/Spannband und der elastischen Gehäusestruktur für die Batteriezellen, können auch auf Produktionsmodule für andere Anwendungsbereiche übertragen werden.

Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

In einem Folgeprojekt könnten die oben gezeigten Kompensationsmechanismen mit realen Zellen validiert werden.

Die ACP unterstützt die Publikation von wissenschaftlichen und technischen Ergebnissen aus dem Projekt, die auf Fachkonferenzen durch das Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik von der Technischen Universität Braunschweig präsentiert und somit veröffentlicht werden. Durch die aktive Mitgliedschaft der ACP in der Fachabteilung VDMA Batterieproduktion kann die ACP über diese Plattform die wissenschaftlichen und technischen Ergebnisse des Projektes auch hervorragend präsentieren und kommunizieren, so dass in der Batterieindustrie sehr schnell auf die Ergebnisse zurückgegriffen werden kann.

Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritt auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Patente:

Firma	Verfahrensname	Patent
Volkswagen AG	Batterieanordnung	DE102020126752A1
AVL LIST GMBH	Batteriezelle	AT000000514326A4
Hitachi Zosen Corp, Hitachi Shipbuilding and Engineering Co Ltd	All-solid state battery (Übersetzung)	JP2019036422A
SB LiMotive Company Ltd., KRSB LiMotive Germany GmbH	Verfahren und Einrichtung zum Aufbringen eines Druckes auf eine Batterie	DE102009028986A1

Veröffentlichungen:

Autor	Titel	Veröffentlichung
T. Asakura et al.	Stack Pressure Dependence of Li Stripping/Plating Performance in All-Solid-State Li Metal Cells Containing Sulfide Glass Electrolytes	10.1021/acsami.3c03552
C. Lee et al.	Enhancing electrochemomechanics: how stack pressure regulation affects all-solid-state batteries	10.1016/j.ensm.2024.103196
L. K. Willenberg	High-Precision Monitoring of Volume Change of Commercial Lithium-Ion Batteries by Using Strain Gauges	10.3390/su12020557

Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NABF und NKBF

Es wurden seitens ACP keine Veröffentlichungen im Rahmen des Projekts getätigt oder Patente in Anspruch genommen.

Literaturverzeichnis

- [1]: Rieger, B.; Schlueter, S.; Erhard, S. V.; Schmalz, J.; Reinhart, G.; Jossen, A.: „Multi-scale investigation of thickness changes in a commercial pouch type lithium-ion battery“. in *Journal of Energy Storage*, 2016
- [2]: Xia, S.; Wu, X.; Zhang, Z.; Cui, Y.; Liu, W.: “Practical Challenges and Future Perspectives of All-Solid-State Lithium-Metal Batteries” in *Chem*, 2019
- [3]: Fan, L.; Wei, S.; Li, S.; Li, Q.; Lu, Y.: “Recent Progress of the Solid-State Electrolytes for high-Energy Metal-Based Batteries” in *Advanced Energy Materials*, 2018
- [4]: Reddy, M. V.; Julien, C. M.; Mauger, A.; Zaghbi, K.: „Sulfide and Oxide Inorganic Solid Electrolytes for All-Solid-State Li Batteries: A Review“ in *10th Anniversary of Nanomaterials—Recent Advances in Nanomaterials for Energy and Catalysis*, 2020
- [5]: Lee, C.; Han, S. Y.; Lewis, J. A.; Shetty, P. P.; Yeh, D.; Liu, Y.; Klein, E.; Lee, H.-W. McDowell, M. T.: „Stack Pressure Measurements to Probe the Evolution of the Lithium–Solid-State Electrolyte Interface“ in *ACS Energy Letters*, 2021
- [6]: Doux, J.-M.; Nguyen, H.; Tan, D. H. S.; Banerjee, A.; Wang, X.; Wu, E. A.; Jo, C.; Yang, H.; Meng, Y. S.: „Stack Pressure Considerations for Room-Temperature All-Solid-State Lithium Metal Batteries“ in *Advanced Energy Materials*, 2019
- [7]: Zhang, X.; Wang, Q. J.; Harrison, K. L.; Roberts, S. A.; Harris, S. J.: „Pressure-Driven Interface Evolution in Solid-State Lithium Metal Batteries“ in *Cell Reports Physical Science*, 2020
- [8]: Müller, V.; Scurtu, R.-G.; Richter, K.; Waldmann, T.; Memm, M.; Danzer, M. A.; Wohlfahrt-Mehrens, M.: „Effects of Mechanical Compression on the Aging and the Expansion Behavior of Si/C-Composite|NMC811 in Different Lithium-Ion Battery Cell Formats“ in *Journal of The Electrochemical Society*, 2019
- [9]: Ebert, F.; SEXTL, G.; Lienkamp, M.: „Effect of a flexible battery module bracing on cell aging“ in *Twelfth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2017
- [10]: Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V.: "Versand von Lithium-Ionen-Batterien und Lithium-Ionen-Batterien in/mit Geräten: Umsetzung der Gefahrgut-Vorschriften", 2020
- [11]: Felten, M.; Diebels, S.; Jung, A.: „Experimental investigation of initial yield surfaces of solid foams and their evolution under subsequent loading“ in *Materials Science and Engineering*, 2020
- [12]: Yousaf, Z., Smith, M., Potluri, P., & Parnell, W.: “Compression properties of polymeric syntactic foam composites under cyclic loading” in *Composites Part B: Engineering*, 2020
- [13]: Schnell, J., Günther, T., Knoche, T., Vieider, C., Köhler, L., Just, A., ... & Reinhart, G.: “All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries – paving the way to large-scale production” in *Journal of Power Sources*, 2020
- [14]: Schmalz, T., Wicke, T., Weymann, L., Voß, P., Neef, C., & Thielmann, A.: “Solid-state battery roadmap 2035+”, 2022.