



## Fachlicher Sachbericht

**Fördermaßnahme:** Batterie 2020 – Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen

**Projektname:** KoDI – Kompensation von Druckschwankungen im Inneren von Batteriezellen

**Teilvorhaben:** KoDI - Entwicklung druckausgleichender Elemente und anwendungsorientierter Prüfverfahren

Zuwendungsgeber:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen:	03XP0399D
Projektlaufzeit:	01.09.2021 bis 28.02.2025
Berichtslaufzeit:	01.09.2021 bis 28.02.2025

Berichtspflichtiger: ITP GmbH Gesellschaft für Intelligente Textile Produkte

Projektleitung: Dr. Daniela Zavec

## I. Kurze Darstellung zu

### *1. Aufgabenstellung, sowie wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde*

Das Projekt „KoDI – Kompensation von Druckschwankungen im Inneren von Batteriezellen“ hat das Ziel, einen mechanischen Kompensationsmechanismus für großformatige Batteriezellen zu entwickeln. Damit sollen die durch Lade- und Entladezyklen verursachten Volumen- und Druckschwankungen im Zellinneren ausgeglichen werden, um die Lebensdauer und Sicherheit insbesondere neuartiger Batterien mit Hochenergieelektroden (z. B. Silizium-Anoden, Lithium-Metall-Anoden) zu erhöhen.

Die in der Batterieproduktion eingesetzten Fertigungsprozesse hängen maßgeblich von Rahmenbedingungen, wie z.B. Stückzahl, Durchlaufzeit und Ausschussrate ab. Gleichzeitig beeinflussen die gewählten Fertigungstechniken das finale Zelldesign. Übliche Verfahren zur Stapelbildung legen fest, welche Gehäusetyper eingesetzt werden. Während gewickelte Zellstapel überwiegend in festen Hardcase-Gehäusen verbaut werden, kommen bei gestapelten oder Z-gefalteten Zellstapeln meist flexible Pouchgehäuse zum Einsatz. Die Wahl der Prozesstechnologie beeinflusst somit direkt die mechanischen Eigenschaften der entstehenden Batteriezelle. Eine der größten Probleme für den praktischen Einsatz von Batteriezellen sind etwaige Undichtigkeiten über die gesamte Gehäusefläche, durch Risse aus dem Tiefziehprozess oder Beschädigungen beim Handling.

Neben dem etablierten Tiefziehprozess für Pouchgehäuse werden alternative Fertigungsmethoden wie der falt-Biege-Prozess erforscht. Diese zielen jedoch primär auf die Schaffung tieferer Kavitäten ab und integrieren keine Kompensationsmechanismen für Volumen- und Druckschwankungen im Inneren einer Zelle. Im Betrieb variiert das Volumen von Lithium-Ionen-Zellen. Diese sogenannte Zellatmung kann zu mechanischen Belastungen führen, die die Struktur der Zelle schädigen und ihre Lebensdauer verkürzen.

Besonders Pouchzellen, deren Gehäuse formflexibel sind, können diese Druck- und Volumenschwankungen nicht aufnehmen. Deshalb wird der Druck häufig über eine Verspannung der Zellen im Modul geregelt. Laborversuche zeigen, dass sich die Lebensdauer großformatiger Pouchzellen durch eine Feder-Verspannung um bis zu 80 Prozent erhöhen lässt. Mechanische Lösungen zur Fixierung von Zellen im Modul, wie die von Bosch patentierten Verspanneinrichtungen, basieren jedoch meist auf einer konstanten Vorspannung. Diese passt sich nicht dynamisch an die Zellatmung an und toleriert daher nur geringe Volumenänderungen.

Durch den Einsatz neuartiger Materialien als Anodenmaterial steigt die Energiedichte und die Sicherheit der Batteriezellen signifikant. Gleichzeitig verursachen diese Materialien wesentlich größere Volumenschwankungen.

Bisherige Lösungsansätze konzentrierten sich auf materialeitige Optimierungen. Diese Maßnahmen konnten im Labormaßstab zwar die Lebensdauer erhöhen, jedoch nicht die kritischen Druckschwankungen vollständig beseitigen. Die Materialmodifikationen gehen zudem oft mit einer Reduzierung der Energie- und Leistungsdichte einher. Da sich auch geringe Volumenänderungen auf Modul- und Systemebene summieren, ist eine Lösung auf Zellebene unerlässlich.

## *2. Ablauf des Vorhabens*

Das Vorhaben wurde in fünf Arbeitspakete und dazugehörigen Unterarbeitspunkten gegliedert. Basierend auf einer Anforderungsanalyse wurden für die einzelnen Teil-Systeme ein Anforderungskatalog erstellt und als Grundlage für die weiteren Arbeiten verwendet. Mit Hilfe der definierten Anforderungen wurden verschiedene Kompensationsmechanismen als potentielle Kandidaten ausgewählt und auf Ihre Eignung hin untersucht. Parallel wurden verschiedene Verfahren zur Messung von Volumen- und Druckänderungen untersucht. Auch hier erfolgte zunächst eine theoretische Auswahl von möglichen Kandidaten-Systemen, die anschließend eingehend untersucht wurden. Da kein geeignetes System zur Vermessung der Volumenausdehnung in Batteriezellen gefunden werden konnte, wurde dies in weiteren Schritten entwickelt und in mehreren Iterationen verbessert. Abschließend wurden alle Ergebnisse gemeinsam mit den Partnern zusammengefasst und mündeten in einer wirtschaftlichen Bewertung des Gesamtsystems, sowie der einzelnen Komponenten. Der Schwerpunkt lag während des Projektes insbesondere auf der Entwicklung und Validierung von Mess- und Prüfsystemen zur Quantifizierung von Volumen- und Druckänderungen sowie auf der methodischen Unterstützung bei der Konzeption von Kompensationsmechanismen auf Zellebene.

## *3. Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen*

Während des Projektes fand eine enge Zusammenarbeit mit allen Partnern statt. Diese beinhaltete die Fertigung von Komponenten, die Evaluation von Komponenten und Prozessen und das Teilen von Ergebnissen und Feedback zur weiteren Optimierung. Im Ergebnis entstand neben einem Kompensationsmechanismus auch ein System von Messinstrumenten zur Bewertung von Druck- und Volumenänderungen in Batteriezellen, sowie eine wirtschaftliche Bewertung für eine zukünftige Anwendung. Es zeigte sich auch, dass das System zur Messung von Volumenveränderung auch in anderen Feldern eingesetzt werden kann und so neue Impulse für weitere Produkte schafft.

## II. Eingehende Darstellung

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

Es wurde ein neuartiger mechanischer Kompensationsmechanismus zum Ausgleich von Volumen- und Druckschwankungen in großformatigen Batteriezellen entwickelt und in Prototypen umgesetzt. Die Validierung erfolgte auf Zell- und Modulebene unter realitätsnahen Bedingungen.

Hierzu wurden verschiedene Lösungsansätze (u. a. Federmechanismen, elastische Gehäuseelemente und modulare Kompensationssysteme) konzipiert und bewertet. Die Auswahl erfolgte nach funktionalen, fertigungstechnischen und wirtschaftlichen Kriterien.

Die entwickelten Prüf- und Referenzsysteme ermöglichen eine präzise Quantifizierung der Volumenänderungen und die Validierung der Kompensationswirkung.

Die Zusammenarbeit der Partner führte zu einem effizienten Know-how-Transfer und zur Optimierung der Prozessschritte entlang der gesamten Wertschöpfungskette.

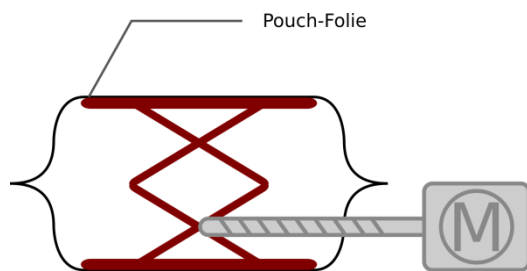


Abbildung 1: Lösungsvorschlag 1

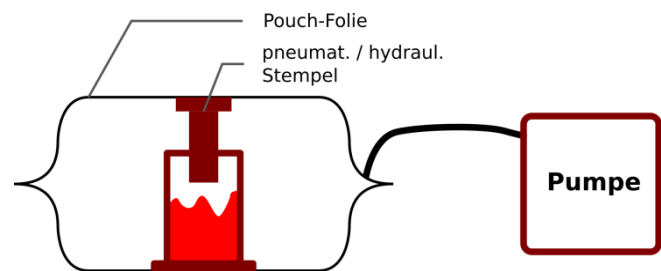


Abbildung 2: Lösungsvorschlag 2

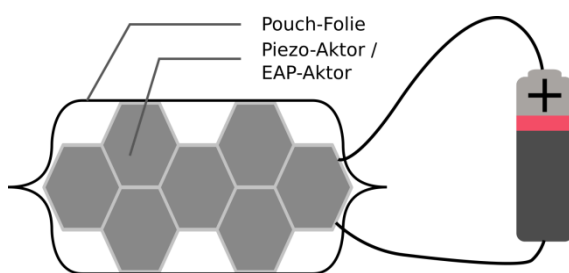


Abbildung 3: Lösungsvorschlag 3

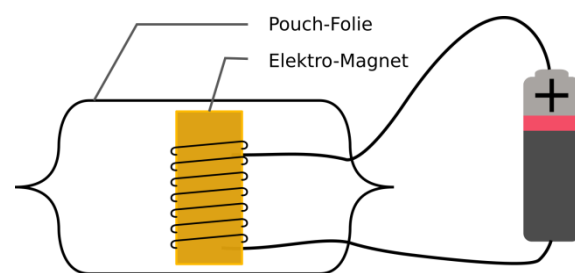


Abbildung 4: Lösungsvorschlag 4

Zu Beginn des Projektes wurde zunächst in AP1, zusammen mit den Partnern, ein Lastenheft zur Beschreibung des Kompensationssystems und des Messsystems erarbeitet. Dies diente als Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte. Basierend auf den erarbeiteten Lastenheften wurden zunächst verschiedene Kompensationsmechanismen auf Zellebene (siehe Abbildung 5 - 7) vorgeschlagen. Der rein textile Ansatz wie im Antrag beschrieben, stellt sich als nicht zielführend

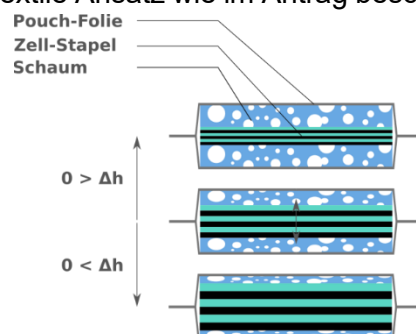


Abbildung 5 - Vorschlag zur Kompensation von Druckschwankungen in Batteriezellen - Schaum

heraus, die zu erwartenden Belastungen zu groß gewesen wären für das Material. Zusammen mit dem Projekt-Konsortium wurde die Variante „Kompensation mittels Schäume“ (siehe Abbildung 5) als Aussichtsreichster Kandidat gewählt. Daraufhin wurden Proben diverser Schäume beschafft und dem IWF für Versuche übergeben.

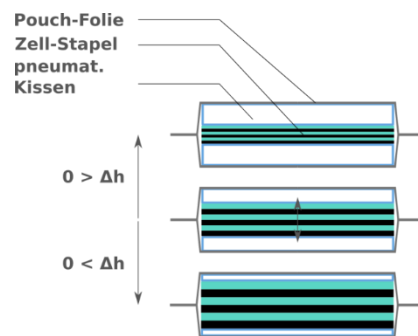


Abbildung 7 - Vorschlag zur Kompensation von Druckschwankungen in Batteriezellen - pneumatisches Kissen

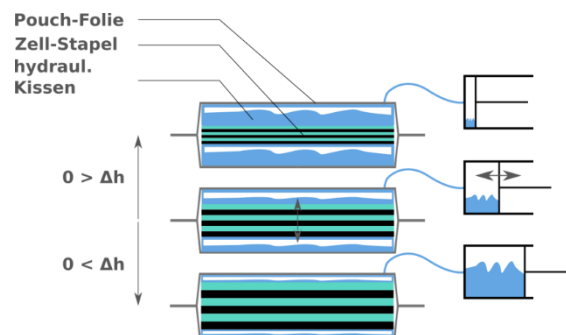
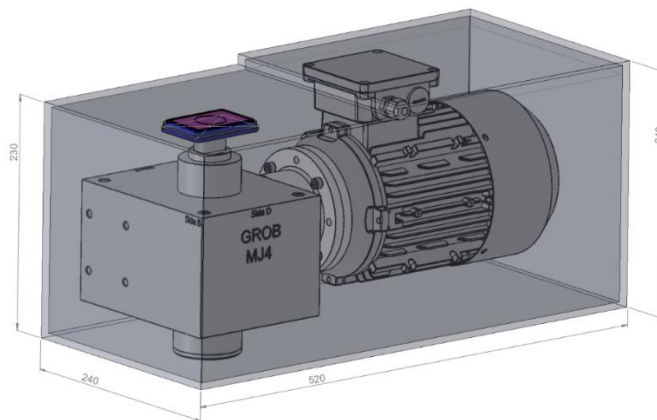


Abbildung 6 - Vorschlag zur Kompensation von Druckschwankungen in Batteriezellen - hydraulisches Kissen

Im Verlaufe des Projektes zeigte sich, dass die Betrachtung einer Halbzelle, die gleichen Erkenntnisse liefern kann, wie die Untersuchungen an einer Vollzelle. Jedoch kann durch den Einsatz einer Halbzelle der Aufwand beim bei der Erstellung der Demonstratoren / Teststände / Untersuchungen stark reduziert werden.

Mit diesem Schritt wurde dann im Arbeitspaket 3.1 – Entwicklung einer Methodik zur Referenzdarstellung der Volumenänderung eines trockenen Zellstapels ein erster Entwurf für ein System zur Darstellung der Ausdehnung von Pouch-Zellen vorgestellt. Als Basis diente der Lösungsvorschlag 1 (siehe Abbildung 1).



**Abbildung 5: Schematische Darstellung Vorschlag Referenzsystem zur Darstellung der Volumenausdehnung von BLB1-Zellen  
(Abmessungen ca. 240 x 240 x 520 mm)**

Zur Entwicklung und Validierung eines Druckprüfverfahrens sowie zur Dichtheitsprüfung wurde im Arbeitspaket 3.3 eine innovative Drucksensormatte der BaMoS (Battery Monitoring Solution) beschafft, siehe Abbildung 8. Diese Sensormatte zeichnet sich durch ihre hohe Flexibilität aus. Sie lässt sich problemlos an unterschiedliche Geometrien und Konturen anpassen und ist somit für eine Vielzahl von Prüfanwendungen geeignet.

Ein wesentliches Merkmal der Sensormatte ist die Möglichkeit, verschiedene Messbereiche individuell einzustellen. Dadurch kann das System sowohl für niedrige als auch für höhere Druckbereiche kalibriert werden, was eine hohe Anwendungsvielfalt im Testbetrieb ermöglicht.

Für die präzise Auswertung der Messdaten ist eine Kalibrierung erforderlich, bei der jedem gemessenen ADC-Code (Analog-Digital-Converter-Code) eine entsprechende Kraft zugeordnet wird. Dieser Kalibrierungsprozess gewährleistet, dass die erfassten Rohdaten zuverlässig und reproduzierbar in physikalisch relevante Kraftwerte umgerechnet werden.

Die Datenauswertung erfolgt automatisiert. Ein speziell entwickeltes Skript übernimmt die Umwandlung der ADC-Codes in Kraftwerte und speichert die Ergebnisse strukturiert als JSON-Datei ab. Dies ermöglicht eine effiziente Weiterverarbeitung und Analyse der Messdaten, unterstützt die Nachvollziehbarkeit der Prüfergebnisse und erleichtert die Integration in bestehende Auswertungsumgebungen.

Insgesamt stellt die eingesetzte Drucksensormatte somit ein leistungsfähiges und vielseitiges Sensorsystem dar, das einen wichtigen Beitrag zur Validierung und Optimierung von Kompensationsmechanismen für Druck- und Volumenschwankungen in großformatigen Batteriezellen leistet.



Abbildung 8: „BaMoS- Battery Monitoring Solution“, Flexoo (Hrsg.), S. 5,

[https://www.flexoo.de/zoep63/flexoo\\_2024/content/e3870/e3872/e4212/e4214/e3907/BaMoS\\_Flexoo\\_q2\\_2024.pdf](https://www.flexoo.de/zoep63/flexoo_2024/content/e3870/e3872/e4212/e4214/e3907/BaMoS_Flexoo_q2_2024.pdf), heruntergeladen am 25.02.2025, 10:12 Uhr

Die BaMoS-Sensormatte stellte bereits eine flexible und anpassbare Lösung für die Druckmessung dar.

Im Projektverlauf zeigte sich, dass die Messung der Volumenausdehnung, durch die projektspezifischen Anforderungen, etwa hinsichtlich geometrischer Integration, Messbereich, Auflösung und Datenverarbeitung, eine Eigenentwicklung, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, erforderlich machten. Das System sollte insbesondere eine Erfassung lokaler Änderungen in der Volumenausdehnung ermöglichen. Dem Messsystem (siehe

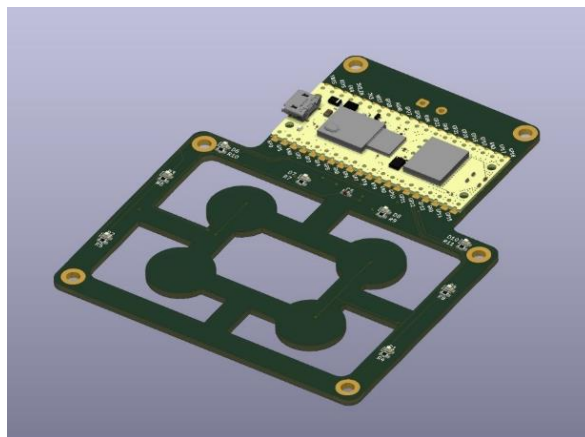


Abbildung 9 - Rendering der entwickelten Hardware zur Messung der Volumenausdehnung (Version 1)

Abbildung 9) liegt die Annahme zu Grunde, dass die Volumenausdehnung sich auf die Ausdehnung in Z-Richtung (entlang der Normalen der größten Fläche) beschränkt und die Ausdehnung entlang anderer Raum-Achsen vernachlässigbar klein ist. Damit ist es möglich die Volumenausdehnung auf eine Längenänderung entlang der Z-Achse zurückzuführen.

Um eine geeignete Technologie für die Messung einer Längenänderung zu identifizieren, wurden zunächst verschiedene Verfahren recherchiert und verglichen (siehe Abbildung 9).

Methode	Ultraschall	Radar	TOF	LVDT	Laser-triangulation	Hall-Sensoren	Potentiometer
Auflösung	1 mm [2]	43 mm[1]	15 mm [3]	Abhängig von Ausleseinheit	1 µm [4]	< 1mm Abhängig von Ausleseinheit	Abhängig von Ausleseinheit
Messpunkte	1	1	1 ... x*y	1	1	1	1
Mindestentfernung	> 40 mm [10]	abhängig von Objektgröße [1]	> 20 mm [3] [5]	0 mm	> 40 mm [6]	> 2 mm Abhängig von Ausleseinheit	0 mm
Preis	10,84 € [11]	12,30 € [12]		12,36€ [7] – 2653 € [7] (Signalgeber) 1,412.542 € [8] (Ausleseinheit)	10,08[6] - 1380€ [4]	1,51 € [13]	21,95 € [9]
Als Modul / SoC verfügbar	X	X	X	-	X	-	-

Abbildung 10 - Vergleich verschiedener Messverfahren

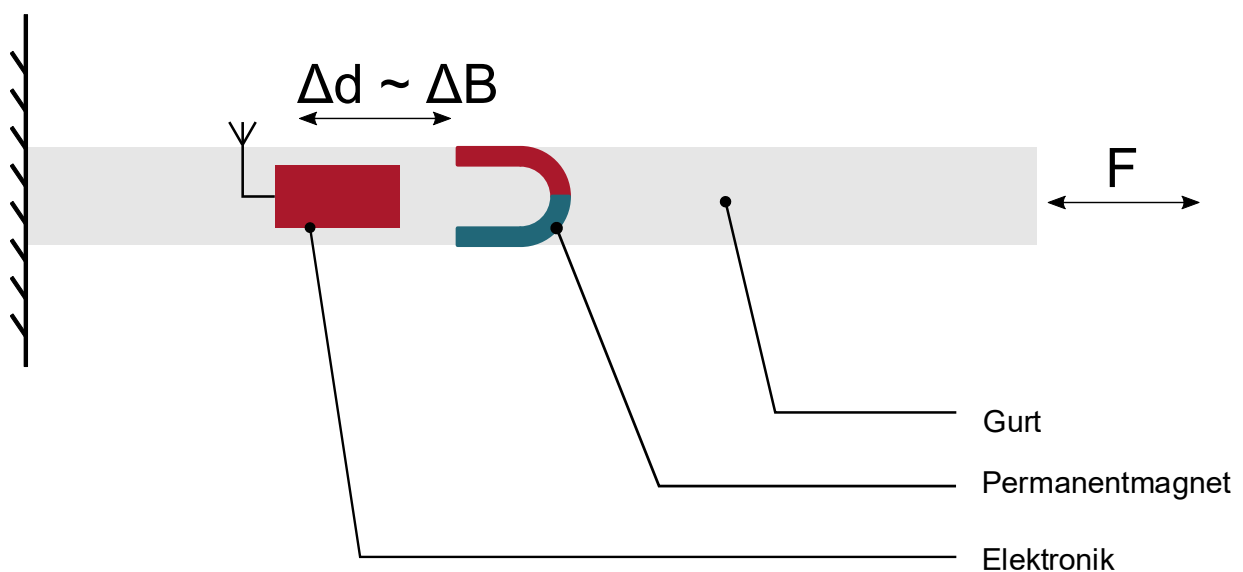


Abbildung 11 - Funktionsprinzip magnetische Messung

Die Kombination aus geringen Preis und hoher Auflösung (<1mm , 1,51€) führte zu der Entscheidung einen Hall-Sensor für die Überwachung der Längenänderung einzusetzen. Damit wird die Messung der Volumenänderung der Batteriezelle auf eine Längenänderung zurückgeführt, die auf die Messung eines magnetischen Feldes zurückgeführt werden. Abbildung 11 zeigt schematisch das Funktionsprinzip dieser Messmethode: Auf einem Zellstapel wird ein Permanentmagnet befestigt, der durch eine Kraft ausgelenkt wird. Ursächlich für diese Kraft ist die Ausdehnung der Batteriezelle.

In Abbildung 12 ist der Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Distanz zwischen Hall-Sensor und Permanent dargestellt.

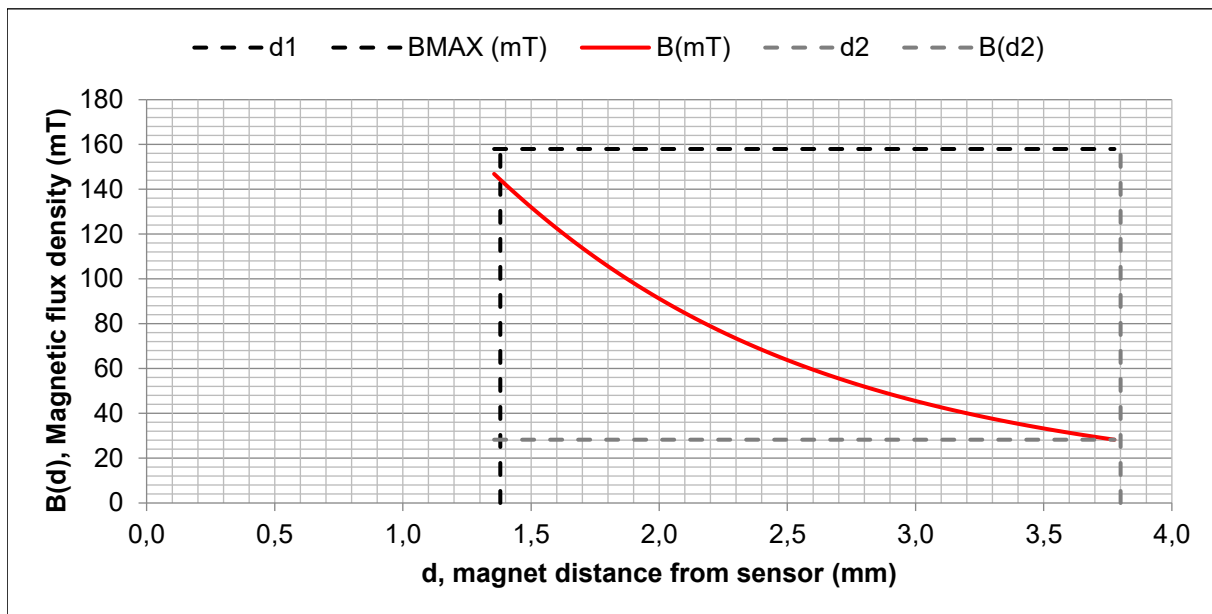


Abbildung 12: Abhängigkeit der magnetischen Feldstärke von Distanz zwischen (Hall-)Sensor und Permanentmagnet

Nach der erfolgreichen Entwicklung und Integration des Systems zur Messung der Volumenänderung wurden im Rahmen von Arbeitspaket 3.3 eine Vielzahl weiterführender Tests durchgeführt. Ziel dieser Versuchsreihen war es, die Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit des Prüfsystems unter realitätsnahen Bedingungen zu evaluieren sowie die Wirksamkeit der entwickelten Kompensationsmechanismen umfassend zu validieren.

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen exemplarisch die Vermessung von unterschiedlichen Prüfkörpern. Man kann gut erkennen, dass auch Längenänderungen  $<0.05$  mm noch differenziert werden können. Da der verwendete Sensor eine dem Magnetfeld indirekt proportionale Spannung ausgibt, sind in Abbildung 13 und Abbildung 14 die Spannung als Maß für die magnetische Feldstärke dargestellt.

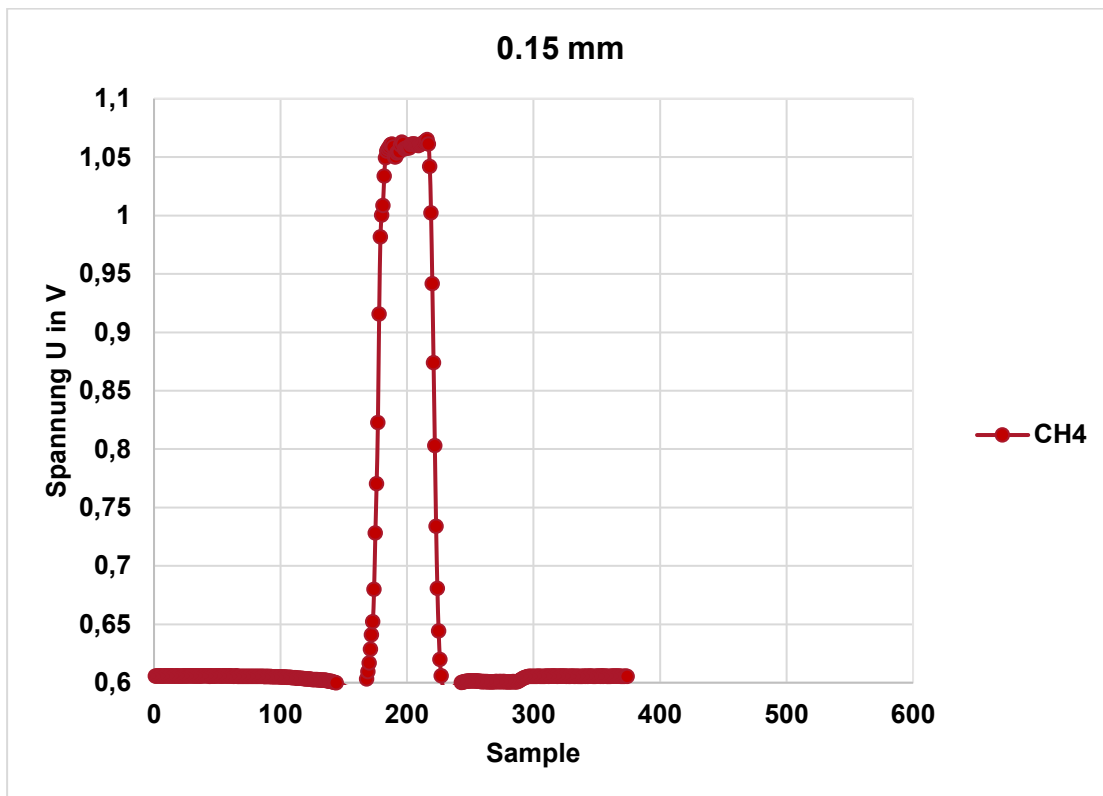


Abbildung 13: Vermessung eines Prüfkörpers mit einer Höhe von 0,15mm

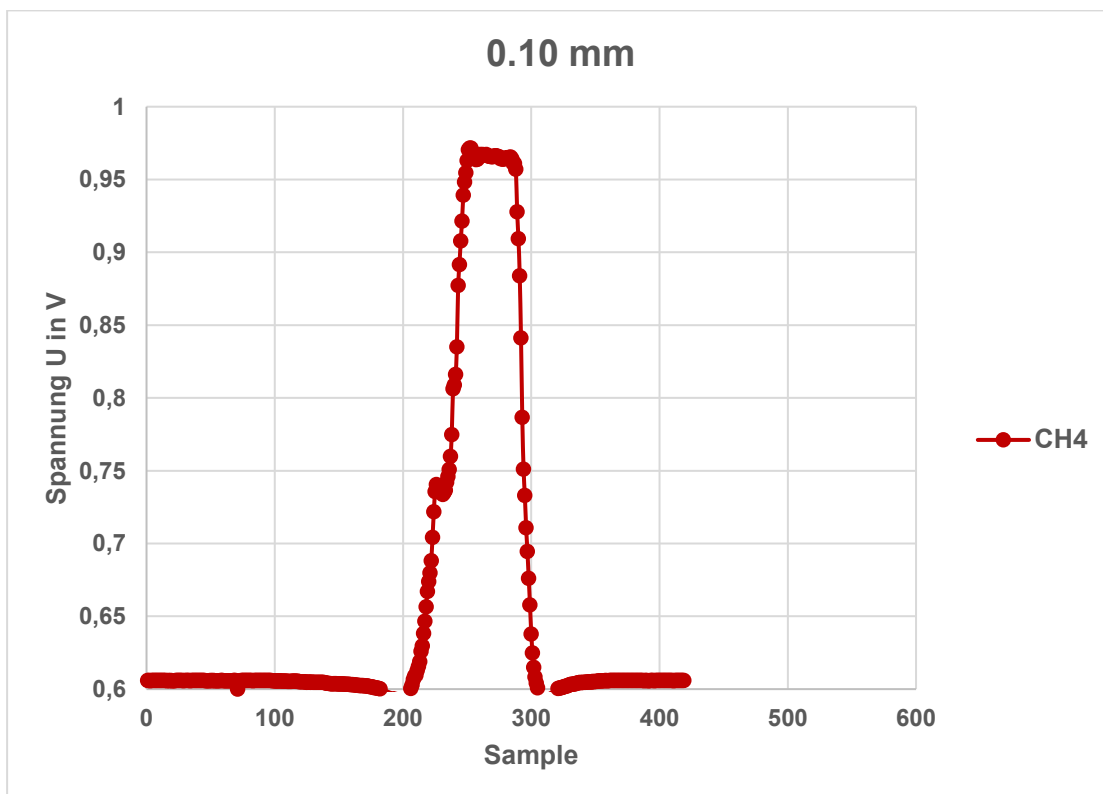


Abbildung 14: Messsignal der Vermessung eines Prüfkörpers mit einer Höhe von 0,15mm

Auf Basis der Erkenntnisse aus den ersten Testreihen und der praktischen Anwendung wurde das Messsystem im Rahmen von Arbeitspaket 3.3 gezielt weiterentwickelt und in einer zweiten, optimierten Version umgesetzt. Während der Test zeigte sich beispielsweise, dass die Positionierung des Messsystems parallel zur Grundfläche der Batteriezelle für die praktische Anwendung verbessert werden musste.

Ein wesentlicher Entwicklungsschritt bestand in der Auftrennung der Messkanäle. Während in der ersten Version die Sensorkanäle noch gemeinsam ausgewertet wurden, ermöglicht die neue Architektur eine separate Erfassung und Auswertung der einzelnen Kanäle. Dadurch kann das System nun Messungen in drei Raumrichtungen (x-, y- und z-Achse) gleichzeitig durchführen. Diese Erweiterung ist insbesondere für die Analyse komplexer Deformations- und Belastungsszenarien in Batteriezellen von großem Vorteil, da sie eine dreidimensionale Erfassung der Volumen- und Druckverteilung ermöglicht.

Zudem wurde die Elektronik gezielt miniaturisiert. Die kompaktere Bauweise erleichtert die Integration in bestehende Zell- und Modulstrukturen und reduziert den zusätzlichen Bauraumbedarf. Dies ist insbesondere bei der Entwicklung von Prototypen und bei der Anwendung in realen Batteriesystemen von Vorteil.

Ein weiteres zentrales Merkmal der zweiten Systemgeneration ist die verbesserte Kombinierbarkeit mit unterschiedlichen Befestigungslösungen. So kann das System nun problemlos mit (Gurt-) Bändern oder anderen Befestigungsmodi kombiniert werden. Dadurch ist eine flexible und positionsgenaue Anbringung an verschiedenste Zell- und Modulgeometrien möglich. Darüber hinaus wurde der Messbereich signifikant erweitert: Während die erste Version Volumenänderungen lediglich im Bereich von 1,4 bis 4,0 mm erfassen konnte, deckt die neue Version einen Messbereich von 0 bis 9 mm ab. Damit kann das System sowohl kleinste als auch größere Deformationen zuverlässig detektieren und eignet sich somit für ein breiteres Spektrum an Zelltypen und Anwendungsszenarien (siehe Abbildung 16). Die Verbesserungen der Messgenauigkeit und -Bereich sind in Abbildung 16 dargestellt. Die orangen Strich-Linien zeigen die Streuung der Messwerte um den Mittelwert ( $6\sigma$ ). Der horizontale Abstand zwischen Strich-Linien sind ein Maß für die Präzision des Sensors. Je kleiner der horizontale Abstand ist, desto größer ist die Präzision. Man erkennt, dass mit zunehmender Distanz zwischen Sensor und Magnet die Präzision abnimmt. Die Präzision ist in Abbildung 16 unterschätzt dargestellt. Für die Berechnung der Präzision (orange Strichlinien) wurde die größte Standardabweichung gewählt.

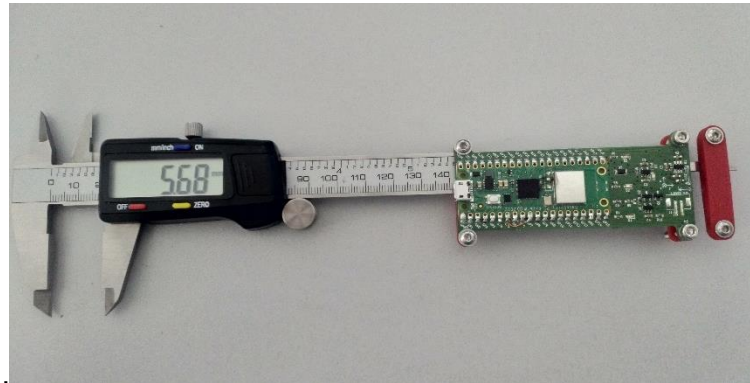


Abbildung 15: Messsystem

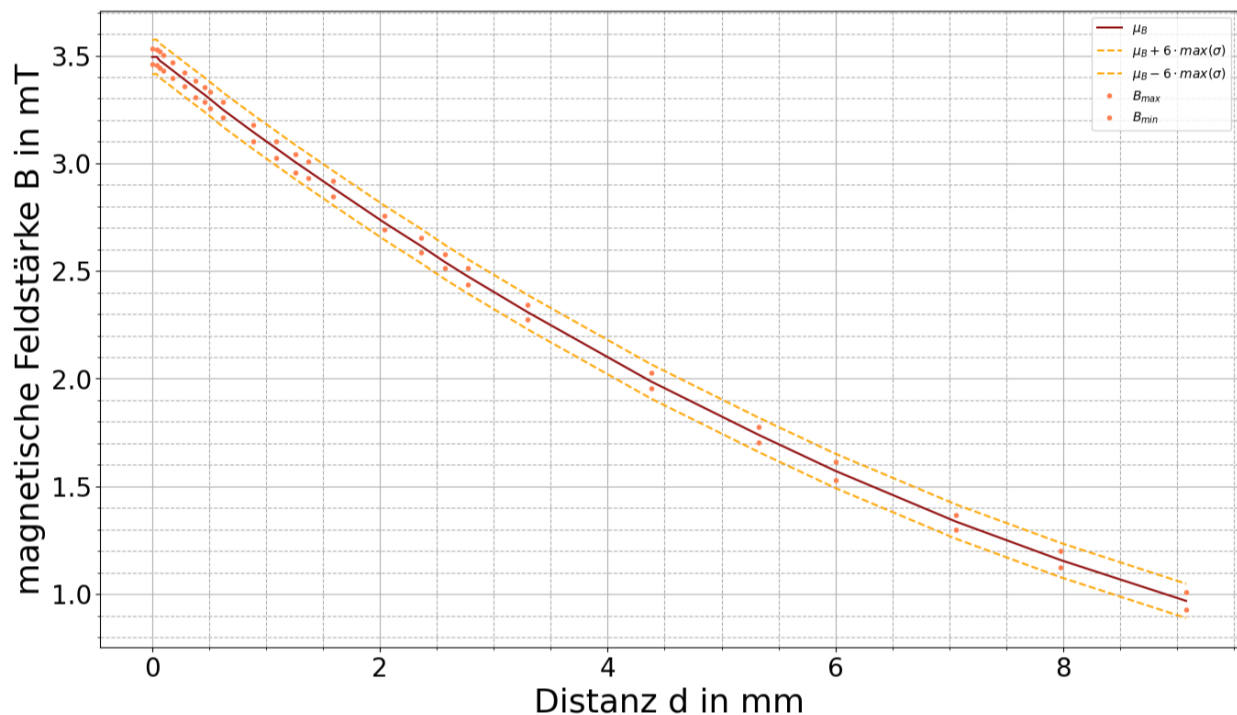


Abbildung 16: Abhängigkeit von magnetischer Feldstärke und Abstand Sensor / Permanentmagnet: Die orangen Strich-Linien zeigen die Streuung der Messwerte um den Mittelwert ( $6\sigma$ )

Neben der Präzision wurde auch das zeitliche Verhalten, namentlich die zeitliche Veränderung bei konstanter Volumenausdehnung oder Drift, untersucht. Für die Auswertung der Drift wurde Abbildung 17 herangezogen. Dort ist der Frequenzbereich für eine Messung mit konstanter Längenänderung dargestellt. Man erkennt, dass kein dominierender Anteil im niederfrequenten Bereich vorhanden ist (fallender Verlauf für  $f > 0\text{Hz}$ ). Jedoch wird ein starkes Rauschen ab 0.1 Hz sichtbar. Zur weiteren Verbesserung des Messsignals sollte hier eine zusätzliche Filterung stattfinden. Eine Absenkung des Rauschteppichs auf 80 dB wäre wünschenswert.

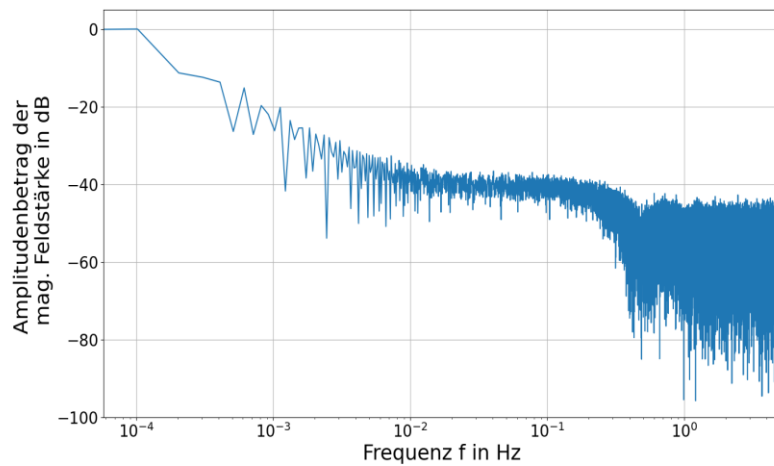


Abbildung 17: Frequenzgang Messsignal mit konstanter Volumenausdehnung

Durch die flexible Gestaltung dieses Messsystems kann nicht nur das Volumen einer Batteriezelle vermessen werden. Bei den Versuchen zeigten sich weitere Anwendungsfälle, so zum Beispiel der Einsatz als Atemsensor. Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen exemplarisch den Einsatz des Sensors als Atemsensor. Zu diesem Zweck wurde der Sensor, wie in , auf einem Gurt-Band befestigt und einer Testperson umgeschnallt.



Abbildung 18 - Beispiel für Befestigung des Sensor an einem Gurtband. Hier eingespannt in einer Universalprüfmaschine

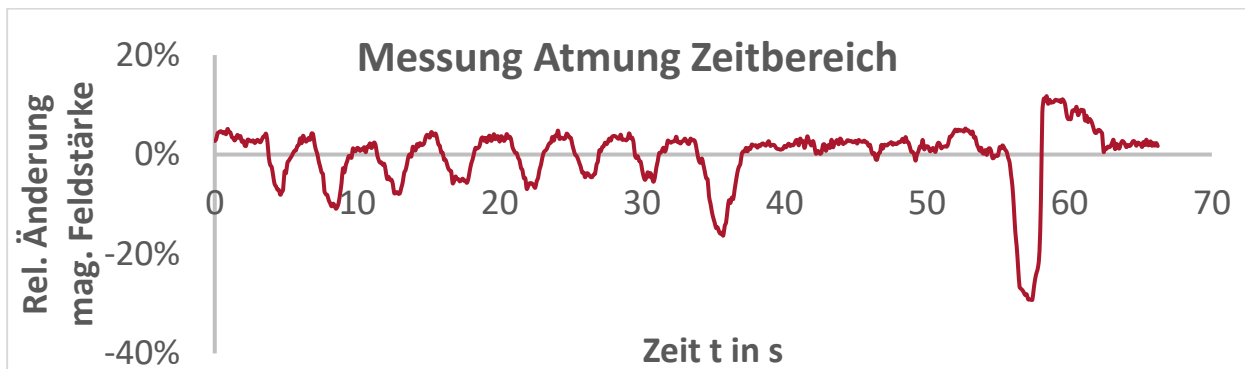


Abbildung 19: Messung Atmung Zeitbereich

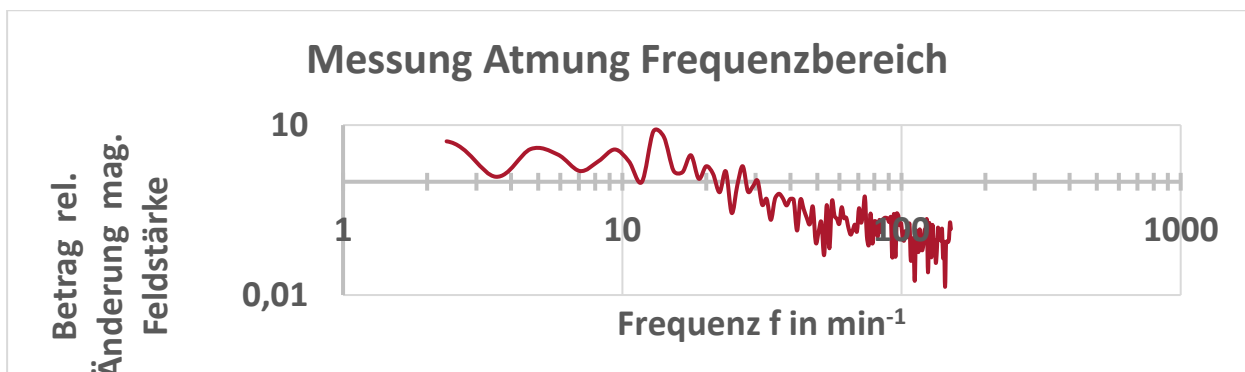


Abbildung 20: Messung Atmung Frequenzbereich

Die abschließende wirtschaftliche und technologische Bewertung im AP 5.1 zeigt, dass die notwendigen (kennzeichnet mit F in Abbildung) erfüllt wurden. Die Wunschkriterien, wie die Normhöhe der Zellstapel, die Mindestauflösung der Volumenausdehnung und die Elektrolytbeständigkeit (Mangel freiverfügbares Material), wurden teilweise erfüllt bzw. sind noch nicht getestet worden (siehe Abbildung 21 und Abbildung 22).

Volumenmesssystem				Druckmesssystem ("Druckmessmatte")					
Anforderung	Wertebereich	Art	Bewertung	Anforderung	Wertebereich	Art	Bewertung		
<b>Zellebene</b>				<b>Zellebene</b>					
Geometrisch	Format	BLB1	F	erfüllt, besitzt in Version 1 selbe Grundfläche, wie BLB1-Zelle	Geometrisch	Format	BLB1	F	erfüllt, kann sowohl zugeschnitten als auch im Herstellungsprozess an beliebige Kontour angepasst werden
	Skalierbarkeit	BLB4	W	erfüllt, in Version 2 wurden die Messkanäle aufgetrennt -> einzelne Sensoreinheiten für jeden Messpunkt -> beliebige Größe und Anzahl möglich		Skalierbarkeit	BLB4	W	
	Normhöhe Zellstapel	12 mm	W	zusätzliche Bauraum für Elektronik und Magnet notwendig -> je nach Platzierung min 3mm zusätzliche Höhe notwendig		Normhöhe Zellstapel	12 mm	W	zusätzlicher Bauraum für Elektronik notwendig, Messmatte jedoch sehr dünn (<= 250µm [1])
	Flächige Veränderung der Zellhöhe messbar	Gegeben	F	erfüllt		Flächige Druckveränderung messbar	Gegeben	F	erfüllt
	Sektorweise Veränderung der Zellhöhe messbar	Gegeben, möglichst feingliedrig	W	erfüllt		Sektorweise Druckveränderung messbar	Gegeben, möglichst feingliedrig	W	erfüllt
<b>Funktion</b>				<b>Funktion</b>					
	Messbereich bezogen auf Normhöhe	0% - 20 %	F	erfüllt, Messungen im Bereich von 0 mm - 9mm möglich (0% - 75% der Normhöhe)		Messbereich	0 - 12 MPa	M	Messbereich aktuell: 0 - 5 MPa
	Mindestauflösung Volumenänderung (<= 0.1 mm)	Im Betrieb einstellbar	M	teilweise erfüllt, abhängig von Abstand zwischen Sensor-System und Magnet (zwischen 0.1 mm und 0.5 mm)		Mindestauflösung Druckänderung	100 kPa	M	erfüllt, aktuell: 1kPa
	zeitliche Auflösung (>= 0.01Hz)	Im Betrieb einstellbar	M	erfüllt, aktuelle Standard-Einstellung 10Hz		zeitliche Auflösung (>= 0.01Hz)	Im Betrieb einstellbar	M	erfüllt
<b>Chemisch</b>				<b>Chemisch</b>					
	Elektrolytbeständigkeit	gegeben	W	noch nicht getestet		Elektrolytbeständigkeit	gegeben	F	noch nicht getestet

Abbildung 21: Wirtschaftliche Bewertung

	Volumenmesssystem		Druckmesssystem ("Druckmessmatte")	
	Anzahl = 1	Anzahl = 4 (eine Zelle)	Anzahl = 1 (eine Zelle)	
Strom-Bedarf I [mA]			Auslese-Elektornik	500
	Hall-Sensor	2,3		
	Rpi-Pico	360		
	LED	45		
	Batter-Management	2		
Leistungsaufnahme @5V P [W]	2,0465	8,186		2,5
Kosten Herstellung / Einkauf 1x [€]	10,06	40,24		4289
Gewicht [g]	50	200		400
Lebensdauer	?	?		?
Reparierbarkeit / Austauschbarkeit	?	?		?
Volumen [cm^3]	1,6324	6,5296		

Abbildung 22: Technologische Bewertung

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die Durchführung des Projekts wurden insgesamt 185.527,25 € für Personalkosten aufgewendet. Die Entwicklung innovativer Lösungen im Bereich der Batterietechnik und Sensorintegration erforderte den gezielten Einsatz hochqualifizierter Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus verschiedenen Fachrichtungen. Sie waren maßgeblich an der Konzeption,

Entwicklung und Validierung der Kompensationsmechanismen beteiligt und trugen durch ihre Expertise entscheidend zum Erfolg des Projekts bei.

Für Materialien wurden im Projektzeitraum insgesamt 13.778,66 € eingesetzt. Diese untergliedern sich in verschiedene Komponenten, die für die Entwicklung und Erprobung der Prototypen notwendig waren. Ein wesentlicher Teil entfiel auf mechanische Komponenten (9.250,00 €), die für die Umsetzung der Kompensationsmechanismen und die Fertigung der Prüfsysteme benötigt wurden.

Weitere Materialkosten entfielen auf elektronische Bauteile, die für die Entwicklung der Sensorik (Volumenmessung) benötigt wurden.

Für sonstige unmittelbare Vorhabenskosten wurden insgesamt 8.832,75 € aufgewendet. Hierunter fällt die Entwicklung der Druck-Sensorik. Weitere Kosten entstanden durch Textilbeschichtung.

### *3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten*

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um das Ziel – die Entwicklung eines mechanischen Kompensationsmechanismus für Druck- und Volumenschwankungen in großformatigen Batteriezellen – zu erreichen. Die Aufgabenverteilung und die Arbeitspakete wurden im Konsortium abgestimmt und regelmäßig evaluiert. Die gewählten Methoden (z. B. Entwicklung von Referenzsystemen, Validierung auf Zell- und Modulebene, Prototypenfertigung) waren für das Erreichen der Projektziele geeignet und angemessen. Dies zeigte sich auch in der engen Abstimmung und iterativen Optimierung zwischen den Partnern.

### *4. Voraussichtlicher Nutzen, Verwertbarkeit, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans*

**Wissenschaftlicher und technischer Nutzen:** Die entwickelten Methoden und Prototypen bilden die Grundlage für die Weiterentwicklung von Batteriezellen mit neuartigen Anodenmaterialien (zum Beispiel Silizium oder Lithium-Metall), bei denen Volumenschwankungen besonders kritisch sind. Die Projektergebnisse können direkt in zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Zell- und Modulgestaltung einfließen.

**Wirtschaftliche Verwertbarkeit:** Die entwickelten Kompensationsmechanismen und die zugehörigen Fertigungsprozesse bieten Zellherstellern und Systemintegratoren Wettbewerbsvorteile, da sie die Lebensdauer und Sicherheit von Batterien erhöhen. Die

Vermarktung der Projektergebnisse erfolgt über Netzwerkaktivitäten (z. B. Smarttex Netzwerk), Messen und die gezielte Ansprache potenzieller Industriepartner.

**Weitere Verwertungsoptionen:** Die entwickelten Technologien lassen sich auch auf andere Zellformate und Anwendungen übertragen, beispielsweise auf stationäre Energiespeicher, Elektromobilität sowie Spezialanwendungen in den Bereichen Medizintechnik und Luftfahrt.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass das System zur Vermessung der Volumenänderung auch geeignet ist in anderen (Batterie-fernen) Feldern eingesetzt zu werden. Dies wird gegenwertig weiter verfolgt.

#### *5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen*

Während der Projektlaufzeit wurden in der Literatur oder durch Wettbewerber keine vergleichbaren Lösungen für einen dynamischen mechanischen Kompensationsmechanismus für großformatige Batteriezellen veröffentlicht. Die im Projekt entwickelten Ansätze sind nach aktuellem Kenntnisstand einzigartig und stellen einen Innovationsvorsprung dar.

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

Die Projektergebnisse wurden bisher noch nicht veröffentlicht. Geplant sind Veröffentlichungen auf Fachmessen, in wissenschaftlichen Publikationen sowie auf den Webseiten der beteiligten Partner. Darüber hinaus ist eine Präsentation der Ergebnisse im Rahmen von Netzwerkveranstaltungen (z. B. SmartTex Netzwerktreffen) vorgesehen.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

### **III. Erfolgskontrollbericht**

#### *1. Beitrag der Ergebnisse zu den förderpolitischen Zielen*

Das Vorhaben wurde im Rahmen der Förderinitiative „Batterie2020“ durchgeführt und adressiert den nationalen Entwicklungsplan „Batteriematerialien für zukünftige Elektromobile, stationäre Anwendungen und weitere industrielle Anwendungen“. Die entwickelten Kompensationsmechanismen und die zugehörigen Fertigungsprozesse bieten Zellherstellern und Systemintegratoren Wettbewerbsvorteile, da sie die Lebensdauer und Sicherheit von Batterien erhöhen. Darüber hinaus können Materialien sicherer eingesetzt werden, die eine höhere Leistungsdichte als bestehende Systeme versprechen. Durch die größere Lebensdauer kann zur Verringerung von Abfällen beigetragen werden, die in Verbindung mit dem Einsatz von wiederverwendbaren Energiespeichern stehen. Damit ermöglicht es diese Technologie den Wandel hin zu einer grüneren Industrie und Produkten zu beschleunigen und die Akzeptanz zu erhöhen.

#### *2. Wissenschaftlich-technisches Ergebnis des Vorhabens, erreichten Nebenergebnisse und gesammelte wesentliche Erfahrungen*

Siehe II. 3 Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

#### *3. Fortschreibung des Verwertungsplans*

Derzeit stehen noch keine Schutzrechtsanmeldungen an.

Die hier erlangten Erkenntnisse und Entwicklungen helfen der ITP GmbH bei zukünftigen Projekten und Unternehmungen. Die entwickelten Technologien und das Know-how stärken die Wettbewerbsfähigkeit der beteiligten Unternehmen und Forschungseinrichtungen.

Mit den erworbenen Kenntnissen wird an einem Atemsensor gearbeitet. Eine weitere vielversprechende Option ist ein Dehnungssensor dafür ist angedacht mit dem Unternehmen Oppermann die Zusammenarbeit anzustreben um ein Tool für die Ladungssicherheit an LKWs zu entwickeln.

#### *4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse*

Zusätzlich zu der oben aufgeführten marktlichen Verwertung stellen die hier erlangten Erkenntnisse auch einen wesentlichen Baustein für weitere Projekte der ITP GmbH im Bereich Medizintechnik und Sensorik allgemein dar. Sensoren zur Bestimmung der Volumenausdehnung, sowohl in medizinischer Hinsicht, als auch für Logistik-Anwendungen, sind ein wiederkehrendes Thema. Vor allem die Verwertung des Volumensensors als Messinstrument für die Erkennung von Kräften beim Verspannen von Gütern und Lasten in einem Logistik-Szenario wird nun vorangetrieben. Dazu werden in den nächsten Schritten weitere Optimierungen am Sensor durchgeführt. In einem ersten Schritt wird nun Kontakt zu potentiellen Kunden aufgebaut, um eine bessere Einsicht in den Bedarf des Endanwenders zu erhalten und frühzeitig diese für ein Produkt zu interessieren. Anschließend müssen Feldversuche in der Anwendungs-Domäne durchgeführt und eine Lieferkette für alle Komponenten aufgebaut werden.

#### *5. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben*

Einige der untersuchten Lösungsansätze, beispielsweise bestimmte Feder- oder Gehäusekonzepte, wurden aufgrund mangelnder technischer oder wirtschaftlicher Eignung verworfen. Die Auswahl und Weiterentwicklung erfolgte iterativ auf Basis der Versuchsergebnisse.

Im Arbeitspaket 2.1: Konzeptionelle Untersuchung auf Zellebene wurden Faltenbalg, Versteifung und Schäume untersucht. Zunächst stellten sich die Schäume als vielversprechend dar, siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** Tabelle 1, woraufhin Muster verschiedener Schäume beschafft und den Partner IWF für Test zur Verfügung gestellt wurden. Bei Test die vom Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Braunschweig durchgeführt wurden, zeigte sich, dass die Schäume für die vorgesehene Dauerbelastung nicht geeignet waren. Die Rückstellkräfte der untersuchten Schäume nahm mit der Anzahl der Belastungszyklen ab. Es ist zu erwarten, dass die Ausdehnung der Batteriezellen vor Ende der Lebenszeit der Batteriezellen nicht mehr kompensiert werden kann. Als Alternative zu den Schäumen wurden die Konzepte Faltenbalg und Versteifungen von den Partnern weiterverfolgt. Zusätzlich wurde von Ansmann ein neues Konzept „Flaschenzug“ erarbeitet und untersucht.

Tabelle 1: Abgleich der Konzepte mit den identifizierten Teilfunktionen

Mechanismus auf Zellebene		Faltenbalg	Versteifungen	Schäume
Funktionen	1. Volumenexpansion aufnehmen	erfüllt	erfüllt	erfüllt
	2. Volumenschrumpfung ausfüllen	erfüllt	erfüllt	erfüllt
	3. Außendruck homogen verteilen	Nicht erfüllt, kann auf Modulebene erfolgen	Nicht erfüllt, kann auf Modulebene erfolgen	erfüllt
	4. Kontaktierung der intrazellulären Stromableiter	Muss noch geprüft werden, wird an dieser Stelle vorerst zurückgestellt		
	5. Schutz der Pouch-Folie vor Beschädigungen	erfüllt	erfüllt	erfüllt

## 6. Einhaltung der Kosten- und Zeitplanung

Die Kostenplanung des Projektes wurde eingehalten.

Im Bezug auf die Zeitplanung ist zu sagen, dass es durch die Corona-Krise zu zeitlichen Verzögerungen bei allen Partnern kam, zusätzlich führte der Abgang von am Projekt beteiligten Mitarbeitern und die Suche nach neuem Personal zu weiteren Verzögerungen. Deswegen wurde eine Verlängerung beantragt. Die vorgegebenen Ziele konnten dann innerhalb der Verlängerungsperiode erfüllt werden.