

**Teilvorhaben:** Zellassemblierung und Wirtschaftlichkeitsanalyse

**OptiKeraLyt**

**Schlussbericht**

Zuwendungsempfänger: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	Förderkennzeichen:  03ETE016H
Material- und Produktionsprozess <b>optimierung</b> für Lithium-Ionen-Batterien mit <b>keramischen</b> Festkör- perelektrolyten (OptiKeraLyt)	
Laufzeit des Vorhabens:  01.01.2019 – 30.06.2022	
Berichtszeitraum:  01.01.2019 – 30.06.2022	

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Aachen, den 06.02.2023

# I Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>i</b>
<b>II</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>ii</b>
<b>III</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>iv</b>
<b>I.</b>	<b>Kurze Darstellung .....</b>	<b>5</b>
I.1	Aufgabenstellung .....	5
I.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	6
I.3	Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
I.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere 6	
I.4.1	Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden .....	6
I.4.2	Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste .....	7
I.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
<b>II.</b>	<b>Eingehende Darstellung.....</b>	<b>10</b>
II.1	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele .....	10
II.1.1	AP3B Zellauswertung .....	10
II.1.2	AP4B Verwertungspotential.....	22
II.1.3	Inhaltliche Abweichungen.....	35
II.1.4	Zeitliche Abweichungen.....	35
II.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	36
II.2.1	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises .....	36
II.2.2	Finanzielle Abweichungen.....	36
II.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	36
II.4	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans .....	37
II.5	Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit.....	38
II.6	Erfolge oder geplante Veröffentlichung .....	38

## II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bipolare versus parallele Stapelung .....	11
Abbildung 2: Ausschnitt aus dem Lastenheft für die Zellassemblierung.....	12
Abbildung 3: House of Quality für die Zellassemblierung.....	13
Abbildung 4: Priorisierung der techn. Voraussetzungen .....	14
Abbildung 5: Morphologischer Kasten für die Zellassemblierung eines Demonstrators .....	15
Abbildung 6: Grundlegender Aufbau des internen Zelldesigns für verschiedene Formate ....	15
Abbildung 7: Versuchsplattform für den Stapelprozess.....	17
Abbildung 8: Prozessablauf Stapeln .....	17
Abbildung 9: Explosionszeichnung der bipolar gestapelten Zelle.....	18
Abbildung 10: CELLBOT mit FANUC CR-7iA/L Roboterarm.....	19
Abbildung 11: Stapelkonzept für die zylindrische und prismatische Zelle.....	19
Abbildung 12: Initiale Stapelversuche mit Zelldummies .....	20
Abbildung 13: Parameterwürfel mit Messpunkten der Superpositionen .....	21
Abbildung 14: Prozesskette zur Herstellung einer oxidischen Festkörperbatterie .....	23
Abbildung 15: Prozesskette zur Herstellung einer sulfidischen Festkörperbatterie .....	23
Abbildung 16: Prozesskette zur Herstellung einer polymeren Festkörperbatterie .....	24
Abbildung 17: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien.....	25
Abbildung 18: Struktur des entwickelten Kostenmodells.....	28
Abbildung 19: Zellkonfigurator des Kostenmodells .....	29
Abbildung 20: Beispielhafte Annahme für ein industrialisiertes Zelldesign .....	30
Abbildung 21: Auszug aus Prozesskonfigurator.....	30
Abbildung 22: Eingabe Materialkosten .....	31

---

Abbildung 23: Eingabe Fertigungskosten .....	31
Abbildung 24: Ansätze zum Recycling von Lithium-Ionen Batterien.....	33
Abbildung 25: Vergleich einer fiktiven State-of-the-Art NMC-LIB (Pouch) zur ASSB- Projektzelle.....	33
Abbildung 26: Recyclingablauf der Projektzelle .....	34

## III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufgaben von PEM innerhalb des Projekts .....	10
Tabelle 2: Ergebnisse der Nutzwertanalyse.....	26

# I. Kurze Darstellung

## I.1 Aufgabenstellung

Ziel des Verbundprojekts OptiKeraLyt ist es industrielle Verfahren zur Produktion von Batteriezellen mit keramischen Festkörperelektrolyten zu erforschen. Fokus der Forschung soll dabei auf der deutlichen Steigerung der gravimetrischen Energiedichte, sowie der Sicherheit im Vergleich zu konventionellen Lithium-Ionen-Batterien (LIB) liegen.

Das vorliegende Forschungsprojekt fokussiert demnach Solid-State-Systeme und damit die vierte Generation der Zelltechnologien, der von der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) mittelfristig das Potential „eine[r] Verdopplung der Reichweite oder eine[r] Halbierung der Kosten“ zugesprochen wird.<sup>1</sup>

In der Theorie ergeben sich unter konventionellen Annahmen potentielle Energiedichten von über 500 Wh/kg. Dies entspricht einer Verdopplung der Energiedichte im Vergleich zu heute eingesetzten Batteriezellen. Daraus resultiert auch eine theoretische Verdopplung der Reichweite von Elektrofahrzeugen. Solid-State-Zellen, besonders anorganisch – keramisch basierte, sind jedoch von einer Kommerzialisierung noch deutlich entfernt, was vor allem an fehlenden Prozessen und darauf abgestimmten Materialien liegt.

Das Vorhaben umfasst daher die gesamte Wertschöpfungskette, von optimierten Aktivmaterialien (für Mischkathoden) und keramischen Festkörperelektrolyten (erster Fokus: modifizierte Lithium-Lanthanzirkonate, LLZ) über Prozesstechnologien wie Dünnschicht- und Laserverfahren (z.B. für Si-Anoden, Mischkathoden etc.) bis hin zu Assemblierungsprozessen unter definierten Umweltbedingungen (vgl. Trockenraum oder Ar-Schutzgas). Des Weiteren ist über das gesamte Vorhaben hinweg eine starke Rückkopplung zwischen Material-, Prozess- und Fertigungstechnologie gegeben, um die wechselseitigen Abhängigkeiten zu erforschen. Dies wird zusätzlich durch eine umfassende dreidimensionale, mikrostrukturaufgelöste Modellierung gewährleistet, welche Designstrategien und Optimierungspotentiale im Vorfeld abschätzen kann. Die Ausgangsmaterialien sind außerdem im Hinblick auf die späteren Produktionsschritte zu entwickeln und auf die verwendeten Verfahren abzustimmen. Beispielsweise muss das Kathodenaktivmaterial auf den späteren Produktionsschritt des Lasersinterns mit Festkörperelektrolyten (FKE) optimiert werden (Möglichkeit für kurzzeitig hohe Temperaturen sowie niedrige Kationenmobilität). Eine Optimierung des Festkörperelektrolytmaterials (bekannte Vertreter aus dem LLZ-System) erfolgt hinsichtlich der Aspekte Leitfähigkeit, Sinteraktivität sowie Kompatibilität mit dem Aktivmaterial durch konkret geplante Modifikationen der Struktur (u.a. Substitution auf verschiedenen Gitterplätzen). Die Anforderungen an die Umweltbedingungen der Zellassemblierung werden von den eingesetzten

Materialien vorgegeben. Ein geeignetes Konzept zur Zellassemblierung soll entwickelt werden. Eine Verwertbarkeitsanalyse soll Kosten-, Skalierbarkeits- und Recyclingpotentiale aufdecken.

---

<sup>1</sup> Vgl. Nationale Plattform Elektromobilität (2016): Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland, S.19

## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Der Fokus der Forschung im Bereich der Festkörperbatterie liegt auf Material- und Produktentwicklung. Produktionstechnik für die Festkörperbatterie ist aktuell noch nicht im Fokus. Es existiert wenig Forschungsgrundlage im Bereich der Festkörperbatterieproduktion. Vereinzelt beschäftigen sich Forschungsgruppen mit den Herstellungsprozessen der Elektroden- und Elektroden-Elektrolyt-Verbundschichtherstellung. Auch hier liegt der Fokus eher auf der Entwicklung geeigneter Verfahren zur grundsätzlichen Herstellung des Produkts und nicht auf der Skalierbarkeit des Produktionsprozesses. Aktuell sind keine Forschungen im Bereich der Assemblierung von oxidischen Monozellen mittels Roboterarm bekannt.

Am PEM der RWTH Aachen konnte auf einen vorhandenen Kollaborativ-Roboter in Überkopf-Bauweise zurückgegriffen werden. Das Werkzeug wurde für die Versuchsdurchführung entsprechend adaptiert. Der Kollaborativ-Roboter befindet sich in einer Mini-Environment Umgebung, welche mit trockener Luft bzw. Inertgas betrieben werden kann. Hierdurch können Kontaminationen der Materialien reduziert bzw. ausgeschlossen werden.

## **I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben ist zweigeteilt zu betrachten:

In AP3B Zellaassemblierung wurde maßgeblich in Kooperation mit Jonas & Redmann zusammengearbeitet. Hierzu wurde ein Arbeitsplan inkl. Meilensteinen und Zeitplan aufgesetzt. Die Kommunikation erfolgte per Mail und über regelmäßig stattfindende Jour-Fixe. Bei größeren Themenstellungen wurden Workshops angesetzt und durchgeführt.

In AP4B wurde das Verwertungspotential untersucht. Hier wurden hauptsächlich theoretische Inhalte erarbeitet, welche auf Methoden und Literatur basierten. Intern wurde ein Arbeitsplan inkl. Meilensteinen und Zeitplan aufgesetzt. Die Fortschritte wurden in Konsortialtreffen präsentiert. Über die Projektlaufzeit wurden auch immer wieder bedarfsgerecht Workshops mit Konsortialpartnern aufgesetzt und durchgeführt.

## **I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde, insbesondere**

### **I.4.1 Angaben bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Es wurden keine bekannten Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte für die Durchführung des Vorhabens benutzt.

#### **I.4.2 Angaben der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste**

Es wurde auf bekannte Fachliteratur zurückgegriffen. Zusätzlich wurde eine umfangreiche Literaturrecherche im Bereich der Festkörperbatterie und deren Produktion durchgeführt. Hierzu wurden bekannte Informationsdienstportale wie z.B. Elsevier und Google Scholar verwendet. Die Literaturrecherche wurde im Kontext verschiedener Fragestellungen rund um die bearbeiteten Themen systematisch ausgewertet und laufend ergänzt. Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der verfügbaren Literatur im Themenbereich gesichtet wurde.

#### **I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

##### HC Starck:

HC Stark war für die Materialsynthese der Mischkathode verantwortlich. Ein weiterer Fokus lag auf der Optimierung der Sinterfähigkeit & Kompatibilität. Dabei fanden auch Voruntersuchungen zur Skalierbarkeit der Materialien statt. HC Stark befasste sich außerdem mit der Optimierung der Pulverzusammensetzung bzw. -synthese hinsichtlich Kompatibilität mit der als Favoriten identifizierten Anode bzw. Mischkathode. Darüber hinaus wurde Lasersinterfähigkeit des Festelektrolytpulvers untersucht und optimiert. Neben der Synthese LLZ-basierter Elektrolytpulver und der Charakterisierung der synthetisierten Pulver war der Aufbau bzw. die Inbetriebnahme der konti-Fällung und/oder Nassmischmahlung mit größeren Mischaggregat die Aufgabe von HC Starck.

##### LIMO:

Zusammen mit dem Fraunhofer Institut für Lasertechnik (ILT) beschäftigte sich LIMO mit der Aufnahme der Anforderungen für Laserverfahren hinsichtlich Sintertemperatur und Strukturgröße. Es wurde ein konkreter Versuchsplan zur Erfüllung der Anforderungen mittels laserbasierter Verfahren erstellt. Dazu wurden vorhandene Laserbearbeitungsanlagen auf ihre Eignung untersucht und Parameterräume definiert. Des Weiteren wurde ein standardisiertes Verfahren zur Auswertung und Analyse der mittels Laserstrahlung bearbeiteten Schichten festgelegt. Darüber hinaus führte LIMO die Skalierung auf Industriemaßstäbe durch. Dafür wurden die möglichen resultierenden Anlagenkonzepte, deren Komponenten und die materialspezifische Prozessführung beschrieben und bewertet.

##### AIXTRON:

In Zusammenarbeit mit der Universität Duisburg Essen (UDE) fand die Aufnahme der Anforderungen an die Anode statt. Dabei standen das „Matching“ der Anodenkapazität an die gegenüberliegende Kathodenkapazität sowie Anforderungen an das Interface zwischen Festkörperelektrolyt und Si-Schicht in Vordergrund. Zusammen mit dem UDE und dem PEM beschäftigte sich AIXTRON mit der Erarbeitung geeigneter Aufbringungs- und Verbindungsmethoden für unterschiedliche mesoporöse Si-Anoden auf den Festkörperelektrolyten der Mischkathode.

##### Jonas & Redmann:

J&R hat im ersten Schritt die Anforderungen aus dem Lastenheft analysiert und das Pflichtenheft für den Stapelprozess definiert. Auf dem Pflichtenheft basierend wurden geeignete Konzepte für



den Stapelprozess identifiziert und ein Stapelprozess entwickelt. Mittels entwicklungsnaheer Versuche an Testmaterialien wurden die Auswirkung des Greifers auf das Produkt analysiert und ein geeigneter Greifer (Art und Material) ausgewählt. In Zusammenarbeit mit PEM wurden die Anforderungen an die Produktionsumgebung für den Stapelprozess validiert. J&R übernahm die Entwicklung eines Demonstrators für den Stapelprozess zur Integration in die Zellaasemblierung. Die Handhabungstechnik für den Stapelprozess wurde von J&R hergestellt und bei J&R sowohl aufgebaut als auch getestet.

#### Universität Duisburg-Essen:

Die UDE untersuchte die Strukturbildung während der Laserprozessierung mittels einer FEM-Simulation. Dafür wurden die notwendigen Materialparameter bestimmt. Es wurden für den Festkörperelektrolyten und das SI in der Fest- und Flüssigphase die Parameter Dichte, Wärmekapazität, thermische Leitfähigkeit und die dynamische Viskosität bestimmt. Für die Bestimmung wurden zum einen aktuelle Literaturwerte recherchiert, und zum anderen Methoden wie die Laser Flash, BET und Wägetechnik nach dem Archimedes-Prinzip angewendet.

#### Forschungszentrum Jülich:

Das Forschungszentrum Jülich (FZJ) führte ein Materialscreening und Analyse durch, um mögliche Zusammensetzungen für den Elektrolytwerkstoff zu ermitteln. Die Durchführung der anwendungstechnischen Bewertung bzgl. Leitfähigkeit und Kompatibilität des Elektrolyten der zunächst im 100 g Maßstab bei HCST Ta&Nb hergestellten Pulverproben war ebenfalls eine Aufgabe des FZJ. Das FZJ beschäftigte sich zudem mit der Herstellung vollkeramischer Halbzellen auf der Basis von LLZ-Pellets. Die Herstellung von keramischen Mischkathoden als Trägersubstrat über konventionelle Sinterverfahren wurde ebenfalls vom FZJ übernommen. In enger Zusammenarbeit mit dem ILT wurden der Beschichtungsprozess in Hinblick auf die chemische Zusammensetzung und die Sinterfähigkeit optimiert und weiterentwickelt. Die Applikation von Li-Anoden auf Elektrolytschichten, Kathoden und Stromsammler gestützte Halbzellen, mit und ohne Adaptionsschicht wurde zusammen mit UDE und AIXTRON durchgeführt.

#### Fraunhofer-Institut für Lasertechnik:

Zusammen mit LIMO beschäftigte sich das ILT mit der Verfahrensentwicklung der Laserstrukturierung des Elektrolyten sowie der Verfahrensentwicklung des Lasersinterns. In engem Austausch mit dem Konsortium wurden dabei funktionale Analysen durchgeführt und mit den am Fraunhofer ILT erfolgenden Auswertungen mittels LSM (Laser-Scanning-Mikroskopie) und REM (Rasterelektronenmikroskopie) korreliert. Um weiterhin eine Steigerung der Produktivität zu erzielen, wurden im Anschluss eine Prozessskalierung bzw. Beschleunigung untersucht. Dazu wurden systemseitige Parameter optimiert, sodass hohe Flächenraten erzielbar sind. In enger Zusammenarbeit mit LIMO wurde, basierend auf der Analyse der verwendeten Materialien, eine geeignete Laserstrahlquelle inkl. optischem System ausgewählt und geeignete Verfahrensparameter für die vollständige und defektfreie Sinterung der Kathoden- bzw. Elektrolytschichten definiert. Die Parameterstudie wurde durch optische Analysen der Schichten, FEM-Simulation von Temperatur- und Zeitverläufen sowie werkstoffkundliche Untersuchungen gestützt und die Laserverfahrensparameter iterativ angepasst.

#### Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components:

Das PEM erarbeitete die methodische Grundlage für die Zellassemblierung. Dazu wurden zunächst geeignete theoretische Ansätze zur Technologieplanung und -umsetzung auf ihre Eignung in der Batteriezellassemblierung evaluiert und anschließend ausgewählt. In Zusammenarbeit mit J&R wurde die Skalierbarkeit des Stapelprozesses analysiert. Für die Bewertung der Skalierbarkeit wurde zunächst ein Ordnungsrahmen erarbeitet. Dazu wurden bestehende Ansätze weiterentwickelt, um für die Batterieproduktion die geeigneten Parameter und Variablen zu identifizieren. Abschließend wurden aus der Bewertung mögliche Optimierungsmaßnahmen abgeleitet, um die Skalierbarkeit zu verbessern. Des Weiteren wurde eine Kostenanalyse durch das PEM durchgeführt. Im Zuge der Kostenanalyse wurde ein szenariobasiertes Cost-Breakdown Kalkulationstools aufgebaut. Zusammen mit dem FZJ wurde eine Bewertung der Recyclingfähigkeit der entwickelten Festkörperelektrolytzelle durchgeführt.

#### Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt:

Die im Forschungsprojekt produzierten Batteriezellen wurden mittels strukturaufgelöster Modellierung und Simulation vom DLR untersucht. Die Bestimmung der physikalischen Parameter des Elektrolyten und Elektroden anhand der elektrochemischen Messungen der Referenzproben wurde ebenfalls vom DLR durchgeführt. Vergleich der resultierenden Parametrisierung der relevanten Phasen der Festkörper-Batteriezellen mit bestehender Literatur. Neben der Erweiterung des elektrochemischen Modells, wurden die Kompositelektroden mittels FIB-SEM strukturell vermessen und die verschiedenen Strukturmodelle entwickelt, welche als Basis für die elektrochemischen Simulationen dienen.

## II. Eingehende Darstellung

### II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### *Inhaltliche Beschreibung*

In Tabelle 1 sind alle Aufgaben von PEM im Projekt OptiKeraLyt aufgelistet.

**Tabelle 1: Aufgaben von PEM innerhalb des Projekts**

AP	Bezeichnung	Aufgaben
3B	Zellassemblierung	
3B.1	Aufnahme Anforderungen Zellassemblierung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Erarbeitung eines methodischen Ansatzes</li><li>• Darstellung des gesamten Herstellungsprozesses der Festkörperbatterie</li><li>• Lastenheftdefinition für die Zellassemblierung</li></ul>
3B.3	Produktionsumgebung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Validierung der Anforderungen &amp; Planung des Prozesslayouts</li><li>• Planung der Integration in die Linie am PEM</li></ul>
3B.4	Integration Zellassemblierung	<ul style="list-style-type: none"><li>• Integration des Demonstrators für den Stapelprozess in die Zellassemblierung von PEM</li><li>• Inbetriebnahme einer funktionsfähigen Zellassemblierung</li><li>• Versuchsdurchführung mit Halbzellen aus Konsortium</li><li>• Durchführen von Performance-Messungen</li></ul>
4B	Verwertungspotenzial	
4B.1	Skalierbarkeit	<ul style="list-style-type: none"><li>• Auswertung der Versuchsergebnisse und Erarbeitung eines Ordnungsrahmens</li><li>• Analyse, Bewertung &amp; Darstellung der Skalierbarkeit</li></ul>
4B.2	Kostenanalyse	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aufbau eines szenariobasierten Cost-Breakdown Kalkulationstools</li><li>• Evaluierung der verschiedenen Kostenarten</li><li>• Auswertung &amp; Durchführung einer Sensitivitätsanalyse</li></ul>
4B.3	Recyclingfähigkeit	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ableiten eines Recyclingablaufs und Bewertung der Einflüsse</li></ul>

#### II.1.1 AP3B Zellassemblierung

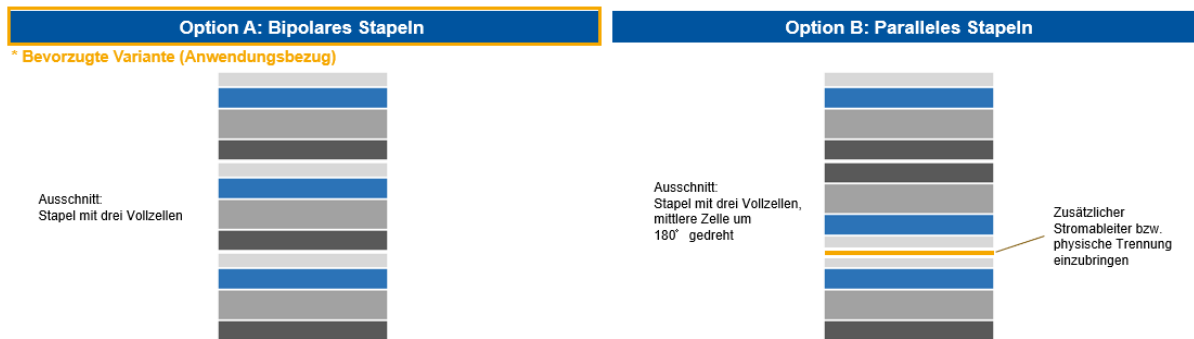
In AP3B wurde gemeinsam mit Jonas & Redmann ein Konzept zur Stapelbildung von Festkörperbatterien erarbeitet und in einem Demonstrator umgesetzt.

## Anforderungen und theoretische Vorarbeiten

In einem initialen Workshop wurden Anforderungen an die Zellausbauelemente erarbeitet. In dem Workshop wurde produktseitig zwischen den folgenden Schichtungsarten für die Batteriezelle unterschieden:

- Fall 1: Mischkathodengestützt
- Fall 2: Elektrolytgestützt
- Fall 3a: Stromableitergestützt (bipolar gestapelt)
- Fall 3b: Stromableitergestützt (parallel gestapelt)

Aus Sicht des Konsortiums wurde vor allem die stromleitergestützte Variante als aussichtsreich eingestuft. Im Projektverlauf wurde sich daher auf diese Variante fokussiert. Hintergrund der Präferenz ist vor allem das Ziel gewesen, Batteriezellen in industrie-relevantem Format (min 100 x 100 mm) aufzubauen, welches ohne einen stabilisierenden Stromableiter als zu herausfordernd eingestuft wurde. Abbildung 1 zeigt dabei die maßgeblichen Unterschiede zwischen den beiden Varianten 3a und 3b auf. Im Konsortium wurde vor allem das bipolare Stapelkonzept als innovativ empfunden und es wurde somit in der Betrachtung präferiert.



**Abbildung 1: Bipolare versus parallele Stapelung**

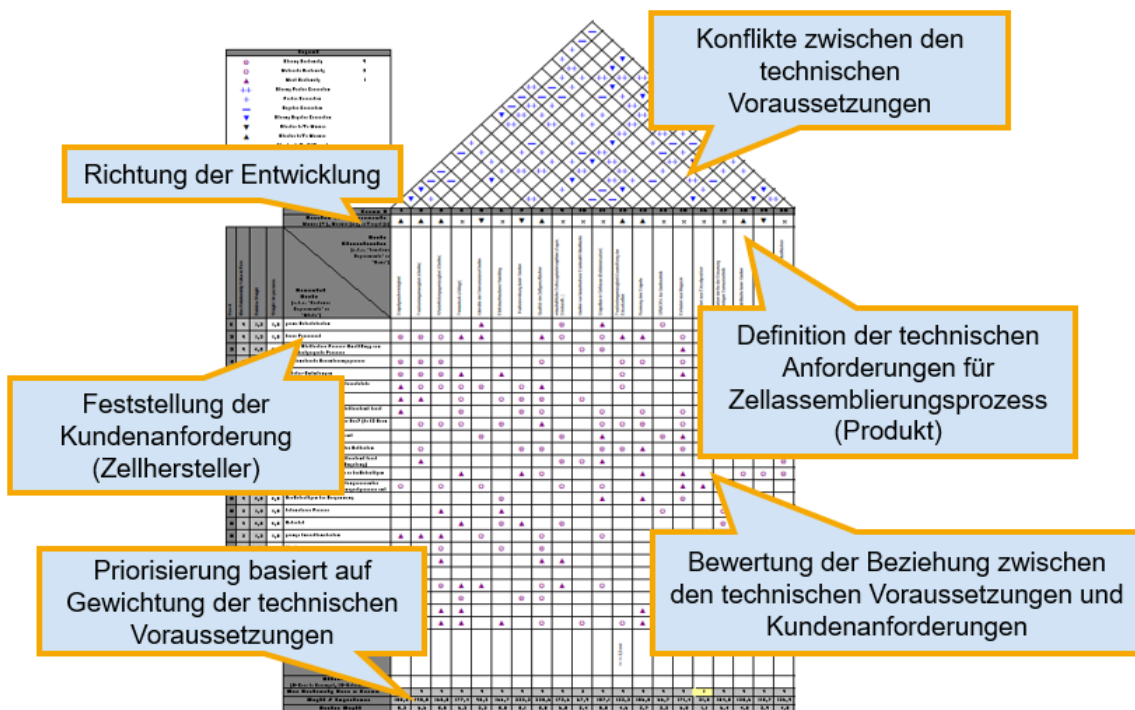
Da zum Zeitpunkt der Untersuchung der Anforderungen noch kein genauer Aufbau der Monozellen durch die entsprechenden Konsortialpartner definiert werden konnte, wurde ein allgemeines Lastenheft entworfen, welches die Anforderungen des Prozesses an die Prozesstechnik näher beleuchtet. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt aus diesem Lastenheft. Für die Identifizierung der Anforderungen wurden mehrere Workshops mit Jonas&Redmann durchgeführt. Eine Vorabauswahl für die Greiftechnik auf Vakuum- bzw. Unterdruckgreifer wurde getroffen.

		Fragen/offene Punkte	Antwort	F, W, I
Zellstapel	Zellstapel	Grundlegende Aufbau der Zelle?	siehe Skizzen von Christoph Schön am Whiteboard (3 Rille) - wir entscheiden	I
		Zelle Abmaße, technische Zeichnung, Toleranzen	Stapel von 5-12 (bipolar, abblittergestützt)	F
		Wiederholbarkeit	Standard (z.B. 40, 5mm)	F
		Welcher Material ist das?	elektrische Schmittstelle klären	W
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Speile nicht relevant für J&R	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?		
		Grundlegende Aufbau der Zelle?		
		Grundlegende Aufbau der Zelle?		
		Grundlegende Aufbau der Zelle?		
		Grundlegende Aufbau der Zelle?		
Pouch	Pouch	Grundlegende Aufbau der Zelle?	Drei Rille: abblittergestützt, mischschicht abblittergestützt, elektrolitgestützt	F
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Fokus auf abblittergestützt: Abblitter, Mischschicht, Elektrolit, Anode	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	technische Zeichnung, 30mmx30mm, 30mmx100mm, (810mm, 815mm), Dicken siehe Tabelle	F
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
Einzelzelle	Einzelzelle	Grundlegende Aufbau der Zelle?	Welche Rille: Li-Ionenstruktur (grob), Li-Metall aufgedampft (dünne)	F
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
Produktionsumgebung	Produktionsumgebung	Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	
		Grundlegende Aufbau der Zelle?	Grundlegende Aufbau der Zelle?	

Abbildung 2: Ausschnitt aus dem Lastenheft für die Zellassemblierung

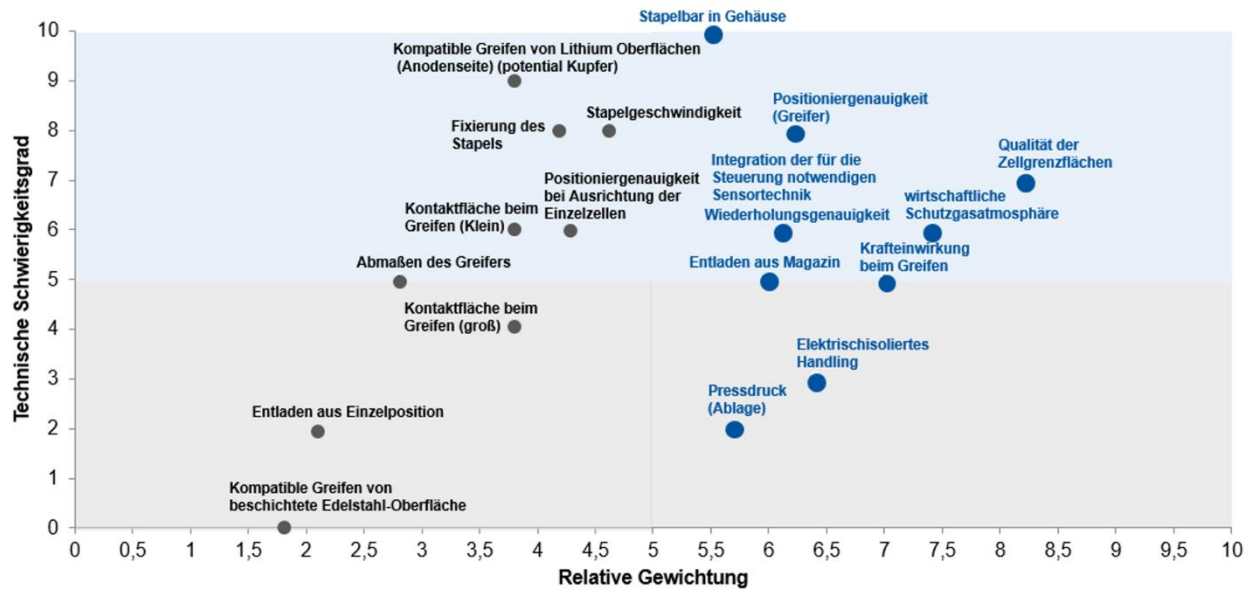
Die Identifizierung der Anforderungen erfolgte methodisch mittels eines House of Quality (HoQ) Ansatzes. Das HoQ wurde als grundlegendes Designinstrument des Managementansatzes 1972 in der Mitsubishi-Werft in Kobe etabliert. Das Grundprinzip des HoQ besteht in einer Methode zur Umsetzung von Kundenwünschen und Kundenanforderungen in konkrete Leistungen eines Unternehmens oder in die Funktionen eines Produktes. Laut Methodik müssen MarketingexpertInnen, KonstrukteurInnen und FertigungsmitarbeiterInnen von der ersten Konzeption eines Produktes intensiv zusammenarbeiten. Diese Methodik ermittelt in mehreren Schritten aus einer Kundenanforderung, welche technischen Anforderungen, welche Funktion oder welche Konstruktion verbessert oder verändert werden müssen. Das Ergebnis des House of Quality ist eine transparente Übersicht über alle Zusammenhänge.

Abbildung 3 zeigt den Aufbau des HoQ für den Zellassemblierungsprozess, der in mehreren Sitzungen mit dem Projektpartner J&R erstellt wurde. Zuerst wurden die Anforderungen aus Sicht des Kunden, in diesem Fall des Zellherstellers, konkretisiert. Im folgenden Schritt wurden die technischen Voraussetzungen für das Produkt, in diesem Fall den Stapelprozess, definiert. Daraufhin wurden die Konflikte zwischen den technischen Voraussetzungen ermittelt. Diese Konflikte sind bei der Konzipierung des Stapelprozess von großer Bedeutung. Anschließend wurde die Relevanz der technischen Voraussetzungen bestimmt, indem ihre Beziehung zu den Kundenanforderungen bewertet wurde. Anhand dieser Erkenntnisse wurden die Ziele für den Stapelprozess festgelegt. Darauf aufbauend wurden die Zielwerte definiert, die für das Pflichtenheft benötigt werden. Das HoQ bietet einen Überblick darüber, welche technischen Voraussetzungen in der Produktentwicklung und im Produktmanagement eine entscheidende Rolle spielen.



**Abbildung 3: House of Quality für die Zellassemblierung**

Die Zusammenhänge zwischen dem Schwierigkeitsgrad und der Gewichtung der technischen Voraussetzungen sind in Abbildung 4 dargestellt. Anhand dieses Diagramms lässt sich feststellen, ob die Umsetzung der hochpriorisierten technischen Voraussetzungen (höhere Gewichtung) mit geringerem oder höherem technischem Aufwand verbunden ist. Beispielsweise ist eine elektrisch isolierte Handhabung für einen sicheren Stapelprozess sehr entscheidend und gleichzeitig leicht zu realisieren. Auf der anderen Seite ist die Positionsgenauigkeit als eine wichtige technische Voraussetzung für den qualitativen Stapelprozess sehr komplex zu implementieren (siehe Abbildung 4). Mittels des HoQ kann die Auswahl der erforderlichen Handlungsschritte, Analyse der Verbesserungsmöglichkeiten im Produkt, Definition der Ziele und Schwierigkeiten bei der Umsetzung für den Pflichtenheft festgestellt werden.



**Abbildung 4: Priorisierung der techn. Voraussetzungen**

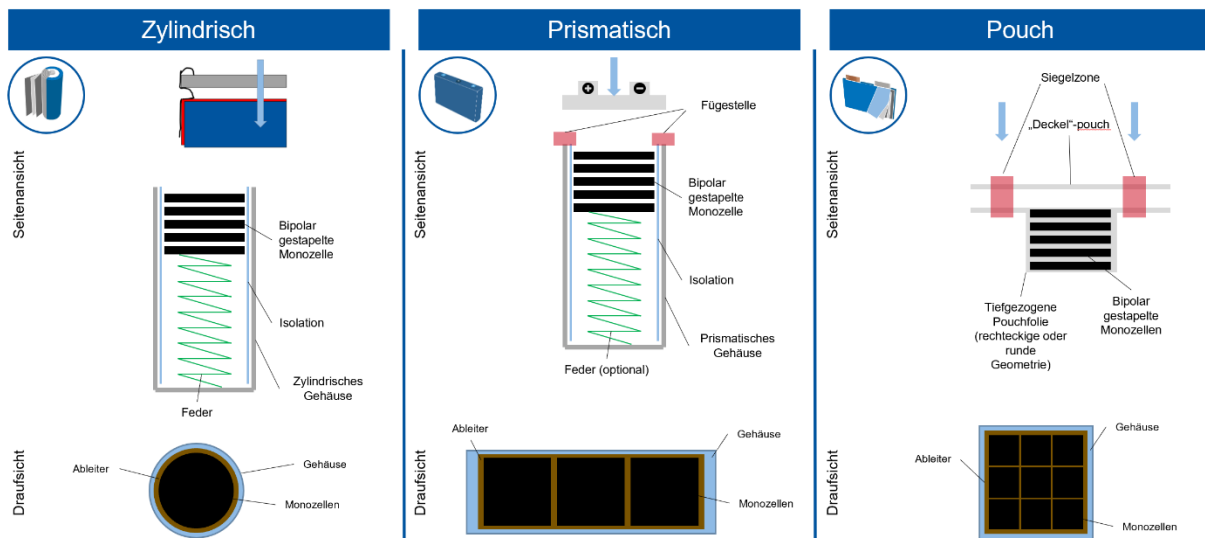
Um Technologiealternativen für den Stapelprozess aufzuzeigen wurde der in Abbildung 5 gezeigte morphologische Kasten erstellt. Dazu wurde der Gesamtprozess des Stapelns inklusive der Schnittstellen zu Vor- und Nachgelagerten Prozessen in möglichst kleinschrittige Subprozesse unterteilt. Für jeden Subprozess können auf diese Weise Verfahrensalternativen ausdetailliert werden. In Abstimmung mit dem Projektpartner J&R wurden die Verfahrensalternativen der Subprozesse bewertet und soweit möglich definiert. Der morphologische Kasten deckt dabei auch bisher nicht identifizierte Subprozessschritte auf. Solche meist nicht explizit definierten Zwischenschritte sind für nicht-industrialisierte Prozesse eventuell unbedeutend, mit Hinblick auf eine mögliche Industrialisierung und damit steigender Automatisierung aber essentiell, um Prozessstabilität gewährleisten zu können. Übergeordnet wurde für den Stapelprozess die Verwendung eines Unterdruckgreifers definiert.

Die morphologische Analyse wurde sowohl für den Stapelprozess des Demonstrators in der Pilotlinie, als auch für eine mögliche industrialisierte Massenproduktion durchgeführt.

Stapelprozess										
Monozellen einschleusen		Verpackt				Entpackt				
Pouchfolie einschleusen		Auf Rolle		Als Sheet		Tiefgezogen auf Rolle		Tiefgezogenes Sheet		
Ableiter einschleusen		Unverpackt				Verpackt				
Warenträger einschleusen										
→	Monozellen entpacken		Händisch		Manuell		Semi-automatisiert		Automatisiert	
	Monozellen greifen		Händisch		Manuell		Semi-automatisiert		Automatisiert	
	Monozellen in WT positionieren		Händisch		Manuell		Semi-automatisiert		Automatisiert	
Warenträger positionieren		Händisch		Manuell		Anschlag händisch		Anschlag manuell		
→	Greifer positionieren		Manuell (auf Befehl, def. Position)		Semi-automatisiert (auf Befehl, mit Erkennung)		Automatisiert (kein Befehl, mit Erkennung)			
	Greifen der Monozelle		Unterdruck		mech. - Druck		Mech. - Form			
	Greifer positionieren		Manuell (auf Befehl, def. Position)		Semi-automatisiert (auf Befehl, mit Erkennung)		Automatisiert (kein Befehl, mit Erkennung)			
	Monozelle auf Stapel ablegen		Manuell (auf Befehl, def. Position)		Semi-automatisiert (auf Befehl, mit Erkennung)		Automatisiert (kein Befehl, mit Erkennung)			
	Stapel fixieren		Druck		Tape		Nicht notwendig			
Greifer wechseln		Manuell		Semi-automatisiert		Automatisiert				
Bereits definiert				Allgemeine Alternative (auch aus LIB Assemblierung)				Definition notwendig!		

**Abbildung 5: Morphologischer Kasten für die Zellaassemblierung eines Demonstrators**

In Abstimmung mit J&R wurden drei verschiedene Konzepte für Demonstratorzellen erarbeitet. Die Konsortialpartner erarbeiteten, dass die herstellbaren Monozellen maximal circa 3 x 3 cm Abmaße haben können. Die drei Konzepte beziehen sich mit Hinblick auf eine Industrialisierung auf alle aktuell etablierten Zellformate zylindrisch, prismatisch und pouch. Abbildung 6 zeigt die grundlegenden Überlegungen für den internen Aufbau der Zellen.



**Abbildung 6: Grundlegender Aufbau des internen Zelldesigns für verschiedene Formate**

Im Falle der zylindrischen Zelle kann auf standardisierte und am Markt erhältliche Gehäuse zurückgegriffen werden. Um eine zu hohe Zellspannung bei bipolarer Stapelung der Monozellen in einem zylindrischen Gehäuse zu vermeiden (bei 60 mm nutzbarer Höhe einer 18650 Zelle ergeben sich bei 0,3 mm Dicke einer Monozelle 200 gestapelte Monozellen und mit 3,7 V Nennspannung je Monozelle insgesamt 740 V), sollen nur wenige Monozellen bipolar in ein Gehäuse gestapelt werden. Im Hinblick auf eine mögliche Industrialisierung sollte trotzdem auf dieses bekannte Zellformat zurückgegriffen werden. Ein Konzept zur Füllung des Leervolumens ist z.B. die



in der Abbildung angedeutete Feder. Diese kann gleichzeitig die Kontaktierung sicherstellen. Die Feder könnte gleichzeitig als Anpressung der Monozellen an die Deckelkontaktierung fungieren.

Ein ähnliches Konzept stellt der prismatische Ansatz dar. Da hier keine standardisierten Formate zur Verfügung stehen, wird ein festes Zellgehäuse gefertigt werden, in welches drei quadratische Monozellen mit einer Kantenlänge von circa 3 mm nebeneinander platziert werden können. Somit entsteht innerhalb der Zelle eine eindimensionale Parallelverschaltung.

Bei einer quadratischen Pouchzelle lässt sich das Verschaltungskonzept noch um eine weitere Dimension erweitern, um eine zweidimensionale Parallelverschaltung zu erzielen.

In Absprache mit dem FZJ wurden zwei Ansätze für den weiteren Verlauf definiert:

1. Zylindrisch: Entwicklung des Stapelprozesses für die zylindrische Zelle und Aufbau eines Demonstrators:

- Vorteile:
  - Es kann auf standardisierte Gehäuse zurückgegriffen werden.
  - Die zu fertigenden Vollzellen haben einen herstellbaren Durchmesser von circa 16 mm.
  - Die Kontaktierung erfolgt durch eine Pressung am Deckel und ans Gehäuse. Dadurch ist kein Fügeprozess zur Kontaktierung notwendig.
- Nachteile:
  - Die standardisierten Zellformate haben eine Höhe von circa 65 mm. Bei vollständiger Füllung des Gehäuses mit bipolar gestapelten Vollzellen ergäben sich Zellen mit extrem hoher Spannung. Um das zu vermeiden, wird die Demonstratorzelle nicht voll gestapelt.

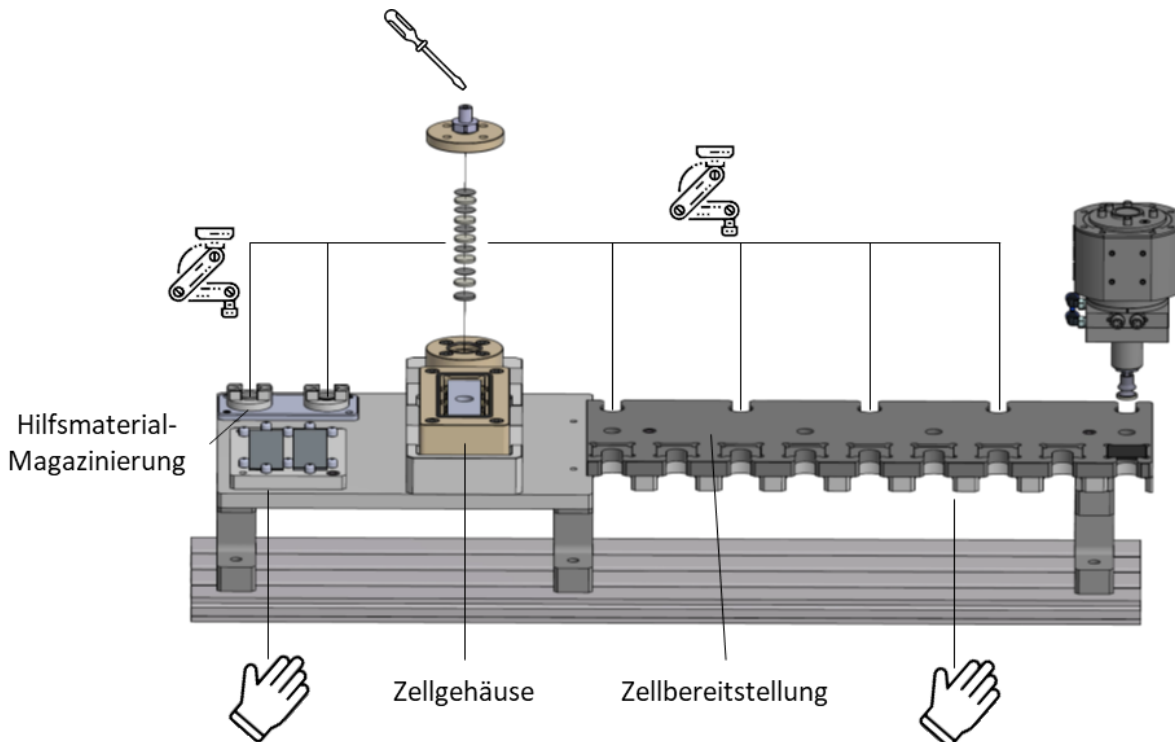
2. Prismatisch: Entwicklung des Stapelprozesses für die prismatische Zelle:

- Vorteile:
  - Durch die parallele Stapelung von Monozellen innerhalb einer Schicht kann eine serielle und parallele Verschaltung schon innerhalb der Zelle erreicht werden, was bei konventionellen Zellen nicht möglich ist.
  - Die Kontaktierung kann bei der prismatischen Zelle individuell gestaltet werden.
  - Das Gehäuse kann individuell gestaltet werden.
- Nachteile:
  - Es ergeben sich Herausforderungen beim Handling der Zellen, durch das parallele Auflegen der Monozellen auf den Stromableiter. Das Verrutschen der Monozellen auf dem Stromableiter muss durch eine geeignete Methode (Fügen, Pressen, etc.) verhindert werden.

Die Pouchzelle wurde in der Entwicklung des Demonstrators nicht weiter verfolgt, um die Variantenvielfalt der Zellen zu reduzieren. Eine Skalierbarkeit von einer eindimensionalen Parallelverschaltung (hier in Form der prismatischen Zelle) auf eine zweidimensionale Parallelverschaltung wurde als denkbar eingestuft.

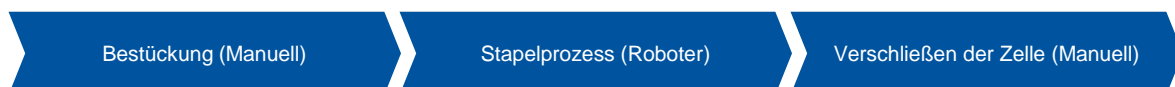
## Umsetzung im Demonstrator

Abbildung 7 zeigt die von Jonas und Redmann und PEM gemeinsam entwickelte Versuchsplattform für den Stapelprozess. Die Plattform bietet die Möglichkeit prismatische und zylindrische Zellen zu stapeln. Auf der linken Seite sind die Ablagen für die kreisförmigen und quadratischen Monozellen zu sehen. Mittig sind die Zellgehäuse der beiden Formate zu sehen. Die Gehäuse wurden aus Polyetheretherketon (PEEK) hergestellt. Die Kontaktierung der Zellstapel erfolgt über Bananenstecker. Der Zellstapel wird über ein Moosgummi an der Innenseite des Deckels verpresst. Auf der rechten Seite sind die Magazine für die Nickelbleche, die als Stromableiterfolie dienen, zu sehen. Die ganze Konstruktion ist auf einem Gestell aufgebaut, welche auf ein Maschinen-Nutenbett montiert werden kann.



**Abbildung 7: Versuchsplattform für den Stapelprozess**

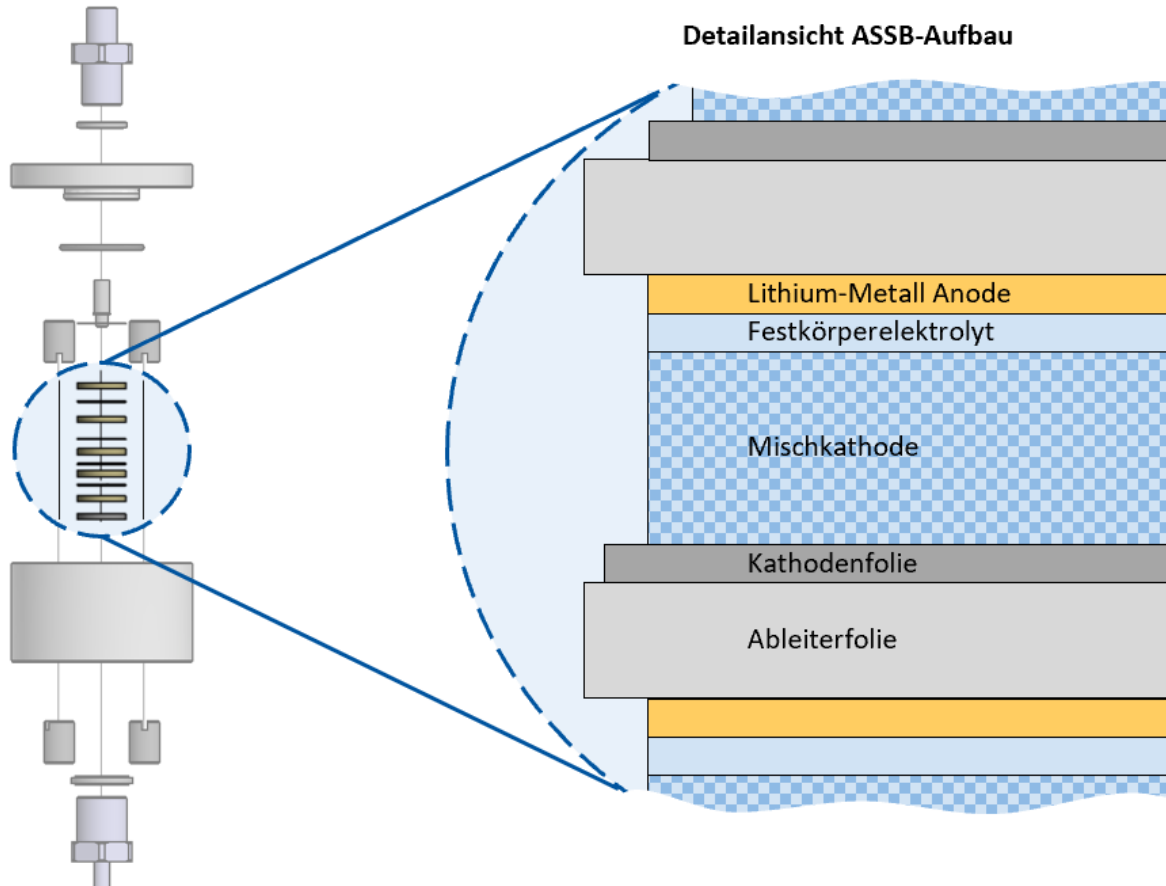
Der in Abbildung 8 dargestellte Prozessablauf wurde entwickelt. Die Magazine werden händisch bestückt. Der Roboterarm führt die Pick-and-Place Operationen von Monozellen und Ableitern in die Zelle durch. Die Zelle wird manuell verschlossen. Im Anschluss kann die dichte Zelle ausgeschleust und konnektiert werden.



**Abbildung 8: Prozessablauf Stapeln**

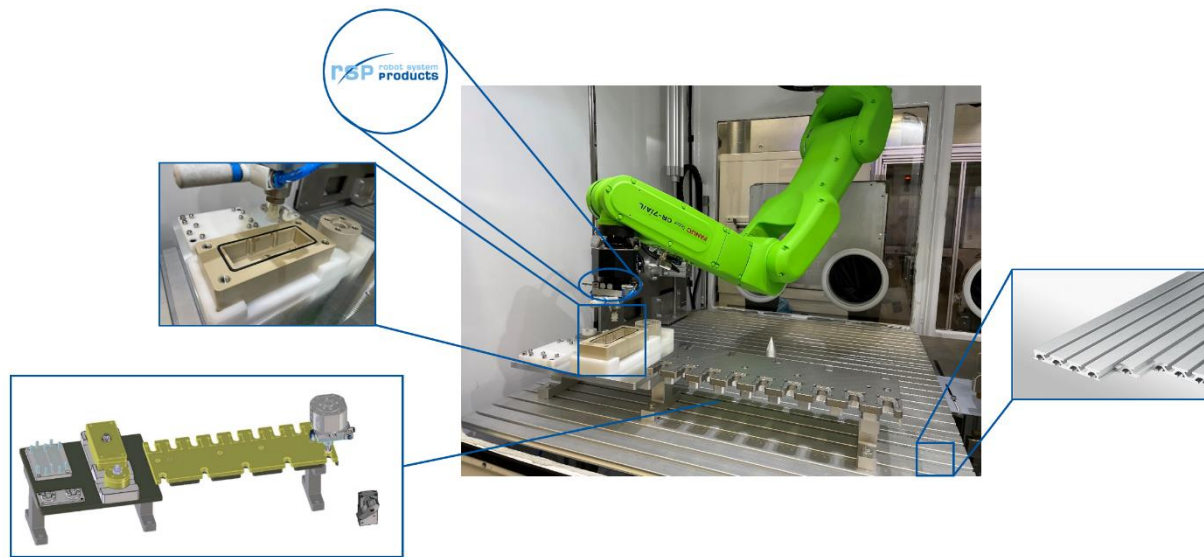
In dem entwickelten Prozess erfolgt die Stapelung direkt in das Zellgehäuse. Abbildung 9 zeigt den Aufbau der zylindrischen Zelle. Als erstes wird ein stabiles Ableiterblech in das Gehäuse

einglegt. Danach wird die erste Monozelle auf das Ableiterblech platziert. Im Anschluss wird eine dünne Ableiterfolie auf die Monozelle gestapelt. Die Stapelung von Monozelle und Ableiterfolie erfolgt dann alternierend bis als Abschluss des Stapels wieder ein stabiles Ableiterblech aufgelegt wird. Der Deckel wird manuell verschraubt und fixiert den Stapel.



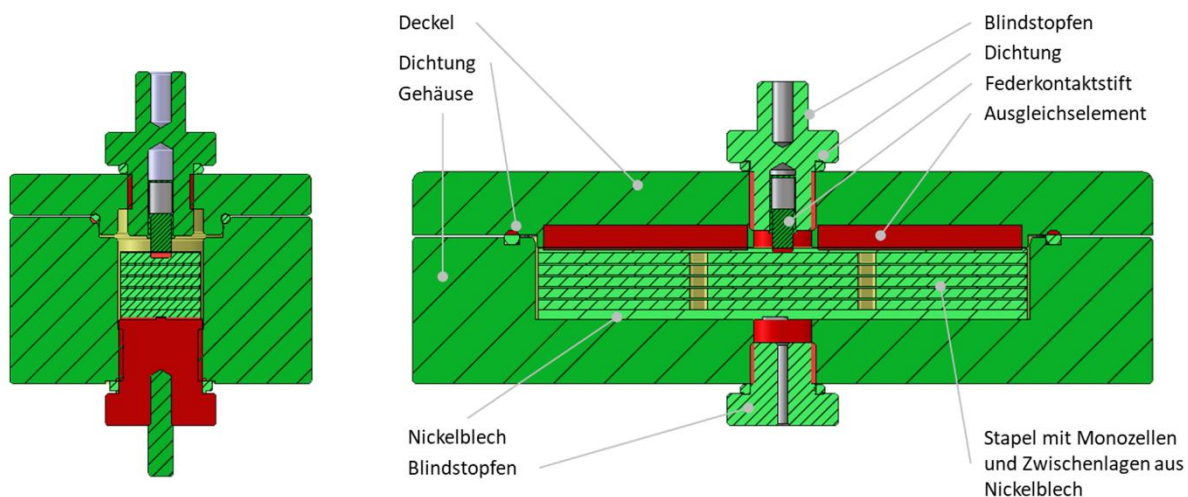
**Abbildung 9: Explosionszeichnung der bipolar gestapelten Zelle**

Die gemeinsam entwickelte Konstruktion wurde von Jonas und Remann in Hardware aufgebaut. Nach Vervollständigung wurde die Assemblierungsstation ans PEM überführt. Abbildung 10 zeigt die Assemblierungsstation im sogenannten CELLBOT in der Zellassemblierung der Pilotlinie am PEM. Die Konstruktion kann auf der Maschinen-Nutenbett-Freifläche des CELLBOT befestigt werden. Durch die Fixierung kann der Roboterarm mit festen Koordinaten im Raum arbeiten. Auf der rechten Seite des mittleren Bildes sind die Ablagen für die kreisförmigen und quadratischen Monozellen zu sehen. Auf der mittigen Abbildung links sind die Zellgehäuse der beiden Formate zu sehen. Zur Verwendung des Unterdruckgreifer-Werkzeugs wurden Wechselaufnahmen beschafft.



**Abbildung 10: CELLBOT mit FANUC CR-7iA/L Roboterarm**

In Abbildung 11 ist der interne Aufbau der Zellen mit Verschaltungslogik gezeigt. Zu sehen ist, dass die zylindrische Zelle (links) eine serielle Verschaltung von runden Monozellen vorsieht, während für die prismatische Zelle (rechts) eine parallele und serielle Verschaltung von quadratischen Monozellen geplant ist. Die Kontaktierung erfolgt durch Nickelbleche unterschiedlicher Dicke. Die untersten und obersten Ableiter bestehen aus 2 mm dicken Nickelblechen, während die Ableitung/Konnektierung zwischen den Monozellen durch 0,2 mm dicke Nickelfolien realisiert wird. Die dickeren Endableiter dienen der gleichmäßigen Druckverteilung der Kontaktelemente auf den Zellstapel, die Nickelfolien ausschließlich der besseren elektrischen Kontaktierung zwischen den gestapelten Monozellen.

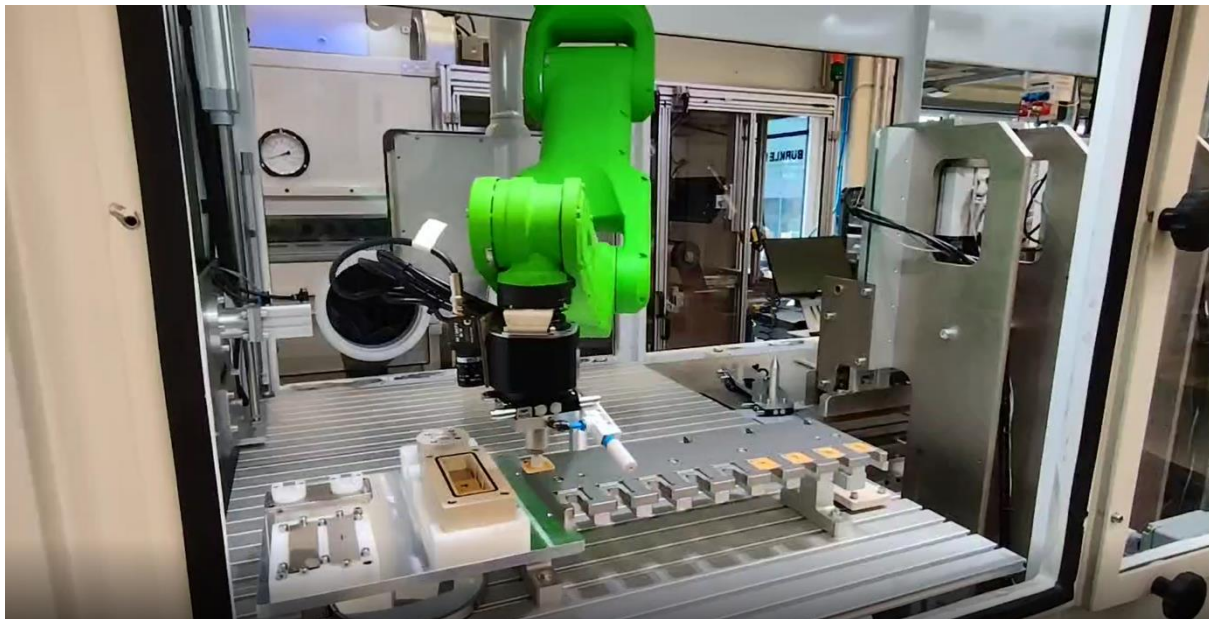


**Abbildung 11: Stapelkonzept für die zylindrische und prismatische Zelle**

Vor der Programmierung von Stapeloperationen wurde der Roboterarm eingemessen und kalibriert. Diese Aufgabe war zeitintensiv, aber notwendig, um die geforderten hohen Genauigkeiten im Stapelprozess sicherstellen zu können. Hierzu wurden die einzelnen Glieder des Roboterarms

zueinander geeicht und der gesamte Roboterarm im Anschluss händisch auf verschiedene Koordinatensysteme eingelernt. Durch den Kalibrierprozess wurde eine ausreichende Genauigkeit für den Stapelprozess (Wiederholgenauigkeit unter 1 mm Toleranz) sichergestellt. Im Anschluss wurde der Roboterarm sowohl manuell als auch auf Koordinaten basierend auf die Positionen des Stapelprozesses eingelernt.

Mit den auf den ersten Programmierungen basierenden Pick-and-Place Operationen wurden Stapelversuche mit Monozelldummies aus perforiertem Hartplastik durchgeführt. Die Perforation simuliert dabei die Porosität der realen Monozellen. Abbildung 12 zeigt einen Screenshot aus einem Video, in welchem ein kompletter Stapelprozess (Monozellen, Ableiterbleche, Konnektierungsfolien) in der prismatischen Zelle zu sehen ist.



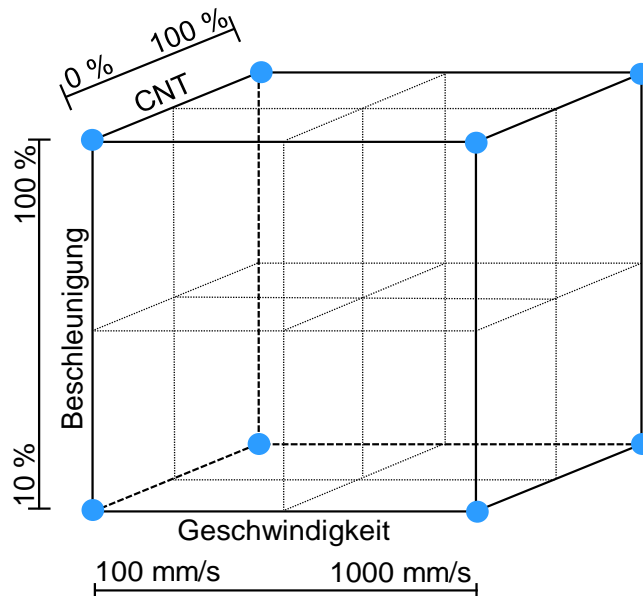
**Abbildung 12: Initiale Stapelversuche mit Zelldummies**

### **Ergebnisse der Stapelversuche und Handlungsempfehlungen**

Es wurden Stapelversuche mit Kunststoffdummies, LLZ-Pallets und zur Verfügung gestellter Edelstahlableiter durchgeführt. Die hohe Sprödigkeit der Materialien verhinderte den Einsatz mechanischer Handhabungstechnik. Bereits bei vorsichtigster mechanischer Beanspruchung wurden Proben des Festkörperelektrolyten zerstört. Als Handhabungstechnik mit vergleichsweise geringer Oberflächeneinwirkung wurden daher verschiedene Unterdruck- und ein Bernoulligreifer getestet. Unter den getesteten fünf Balg- und Sauggreifern zeigte sich ein runder Flachsauggreifer am schonendsten bei maximaler Schwingungsstabilität und Haftkraft. Durch den Einsatz von kontaktlosen Bernoulligreifern konnte eine mechanische Oberflächeneinwirkung vollständig vermieden werden, auch wenn hier niedrigere Beschleunigungen und Verfahrensgeschwindigkeiten erreicht wurden. Alle untersuchten Proben, inklusive der mit porösen Oberflächen, ließen sich mit den beschriebenen Unterdruckgreifern anheben und verfahren. Beim Einsatz von Lithium-Metall sollte ein Kontakt zwischen Greifer und Oberfläche vermieden werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass mit dem gewählten Greifer ohne Reduktion der Genauigkeit die maximale Verfahrensgeschwindigkeit und Beschleunigung erreicht werden kann. Die Taktzeit konnte durch geeignete Glättung bei Änderung der Trajektorie auf ein mit dem Roboter mögliches Minimum von circa 2 Sekunden pro Monozelle reduziert werden.

Zur Untersuchung der Industrialisierbarkeit des Prozesses wurde versucht die Taktzeit (Stapelzeit pro Monozelle) des Stapelprozesses zu verringern. Dazu wurde eine Parametervariation mit den Parametern Bewegungsart, Geschwindigkeit, Positioniergenauigkeit und Beschleunigung durchgeführt. In Abbildung 13 ist der durch die Randbedingungen eingegrenzte Parameterwürfel mit den Dimensionen Beschleunigung, Geschwindigkeit und CNT (Glättung der Kurvenbewegung) gezeigt. Durch Parametervariation konnten alle Kombinationen innerhalb des Würfels abgebildet werden und so ein optimiertes Parameterset definiert werden.



**Abbildung 13: Parameterwürfel mit Messpunkten der Superpositionen**

Es wurde identifiziert, dass der Parameter Beschleunigung die höchste Auswirkung auf eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit hat.

Die Stapelung von oxidischen Monozellen mittels eines 6-Achs-Kollaborativroboters hat einen ersten Einblick in die Industrialisierung des Stapelverfahrens von Festkörperbatteriezellen gegeben. Durch die flexible Gestaltung des Prozessaufbaus können Rückschlüsse auf ein skaliertes Produktionskonzept getroffen werden.

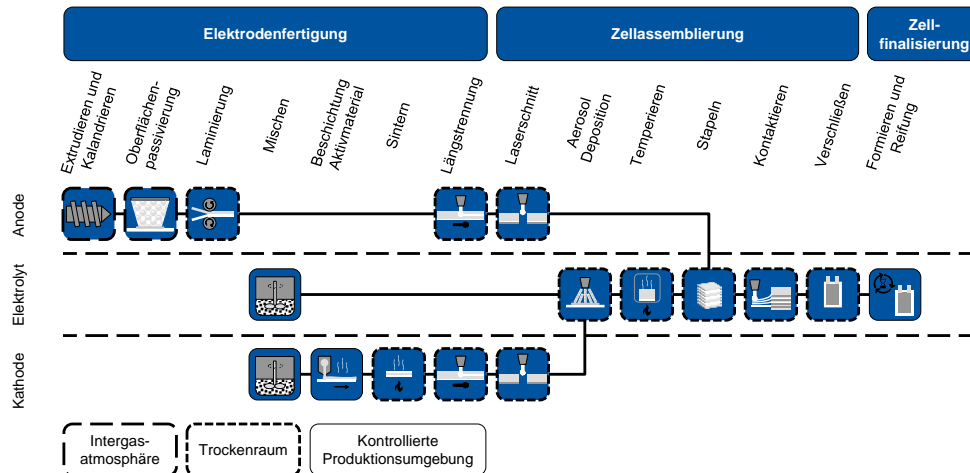
Übertragen auf die sechs Dimensionen der Skalierbarkeit können folgende Rückschlüsse und Handlungsempfehlungen abgegeben werden:



- Quantität:* Die maximale Beschleunigung des Roboterarms ist durch seine Massenträgheit begrenzt. Eine Reduktion des Systemgewichts ermöglicht höhere Dynamik und somit kürzere Prozesszeiten. Ebenso kann der Fahrweg durch eine Magazinierung der Monozellen verkürzt werden. Hierzu muss eine geeignete Magazinierung entwickelt werden, da die einzelnen Monozellen schon im Magazin eine serielle Verschaltung darstellen.
- Größe:* Das Handling der kleinen Monozellen ist mit den eingesetzten Einfachsaugern möglich. Bei Einsatz größerer Zellen müssen die Greifsysteme adaptiert werden. Vor allem biegeschlafe Materialien wie Ableiterfolien stellen hierbei eine Herausforderung dar. Der Einsatz von Mehrfachsaugern muss untersucht werden.
- Komplexität:* Das verwendete Produktdesign wurde speziell auf die Produzierbarkeit ausgelegt. Veränderungen wie z.B. dünnere Schichten und die automatisierte Montage des Deckels können nicht abschließend bewertet werden.
- Funktionalität:* Der betrachtete Prozess erlaubt eine Herstellung von Festkörperbatterien mit keramischen Elektrolyten. Die Voraussetzung für die Nutzung der theoretischen Vorteile einer Festkörperbatterie sind damit gegeben. Zur Ausnutzung der vollen Funktionalität sind jedoch noch Verbesserungen auf Material- und Produktseite zu bringen.
- Flexibilität:* Der 6-Achs-Kollaborativroboter sorgt in der Forschung für maximale Flexibilität in der Prozessführung. Diese Eigenschaft steht in der skalierten Serienfertigung nicht im Vordergrund. Der Einsatz von Linearsystemen ist hier voraussichtlich eine kosteneffiziente und ausreichend flexible Alternative.
- Kosten:* Die System- und Fertigungskosten sind aufgrund von Materialeinsatz, manuellen Arbeiten und komplexer Prozessführung in der Mini-Environment hoch. Kostensteigerungen sind durch eine Steigerung des Automatisierungsgrades und der Materialeffizienz zu erwarten.

### **II.1.2 AP4B Verwertungspotential**

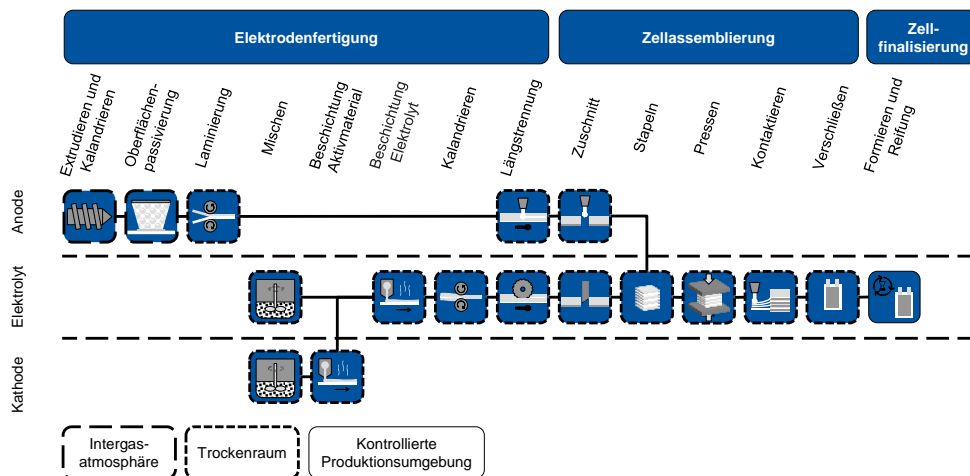
Als Grundlage für das Arbeitspaket AP4B wurden Referenzprozessketten definiert, welche als Grundlage zur Bewertung der Skalierbarkeit, der Kostenanalyse und der Recyclingfähigkeit dienen. Die Referenzprozessketten sind im Folgenden für die 3 wichtigsten Elektrolytklassen aufzeigt:



**Abbildung 14: Prozesskette zur Herstellung einer oxidischen Festkörperbatterie**

In Abbildung 14 ist die Prozesskette zur Herstellung einer Festkörperbatterie mit oxidischem Elektrolyten aufgezeigt. Der Abbildung sind ebenso die erforderlichen Umgebungsbedingungen in den einzelnen Prozessschritten zu entnehmen. Während ältere Literatur (vor 2018) größtenteils noch unter der Annahme vollständiger Inertisierung ganzer Prozesssequenzen arbeitet, kristallisiert sich zunehmend heraus, dass diese Art der aufwändigen Umgebungsbedingungen nur ganz zu Beginn der Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Metallfolie erforderlich ist. Durch die hohe Haftneigung von Lithium-Metall ist es zudem erforderlich statt eines mechanischen Schneidprozesses ein Laserschneidprozess einzusetzen, um die gewünschte Elektrodengeometrie herzustellen.

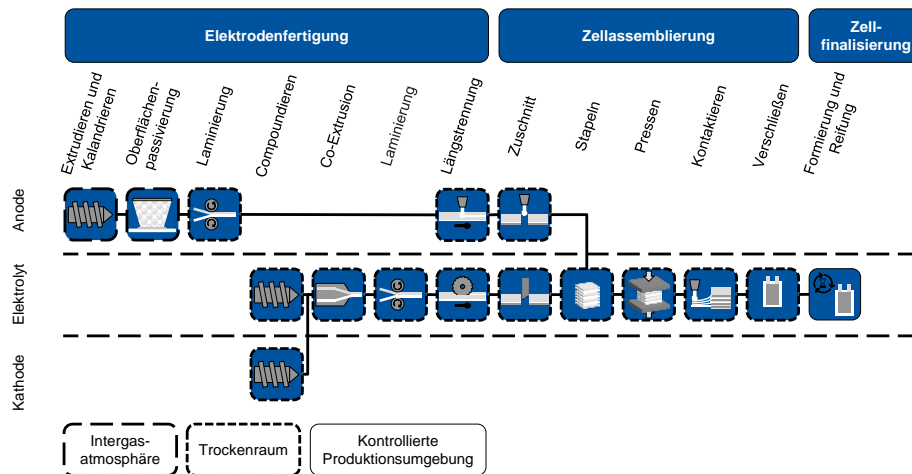
Wie Abbildung 15 und Abbildung 16 zu entnehmen ist, unterscheidet sich die Prozesskette zur Herstellung der Lithium-Metallfolie als Anode für alle drei Elektrolytklassen nicht. Während bei der sulfidischen und Polymer-Festkörperbatterie ein Pressvorgang in der Zellausschleibung notwendig ist, um benötigte Übergangswiderstände zwischen den Schichten zu reduzieren, ist dies bei der oxidischen Festkörperbatterie nicht notwendig.



**Abbildung 15: Prozesskette zur Herstellung einer sulfidischen Festkörperbatterie**



Die oxidische Prozesskette sieht die Kathoden-Elektrolytherstellung mittels Nassbeschichtungsverfahren für die Kathode und anschließender Elektrolyt-Aerosol-Deposition vor. Die sulfidische Prozesskette geht von einem zweistufigen Nassbeschichtungsprozess aus. Gänzlich von konventionellen Beschichtungsmethoden abgesehen wird in der definierten Prozesskette der Polymer-ASSB, in der der Kathoden-Elektrolytverbund durch Co-Extrusion und anschließendem Laminierungsprozess vorgesehen ist.



**Abbildung 16: Prozesskette zur Herstellung einer polymeren Festkörperbatterie**

Im Vergleich mit dem Herstellungsprozess der konventionellen LIB fallen v.a. die folgenden drei Punkte auf:

- Die Elektroden-/Elektrolytherstellung beinhalten bislang nicht benötigte Prozessschritte, welche im aktuellen Entwicklungsstand nicht als in die Großserie industrialisiert bezeichnet werden können.
- Die Materialien stellen erhöhte Anforderungen an die Umgebungsbedingungen der Prozesse.
- In der Zellfinalisierung entfallen Prozessschritte wie z.B. Entgasung und Formierung.

### Skalierbarkeit

Da der Begriff der Skalierbarkeit in der Literatur unterschiedlich ausgelegt wird, wurde zuerst untersucht, welche Bedeutung die Skalierbarkeit im Kontext der Herstellung von Festkörperbatterien hat. Nach Sichtung der Literatur und dem Abgleich mit den Anforderungen wurde eine Definition nach Wang<sup>2</sup> (2018) festgelegt, welche die Skalierbarkeit von Technologien aus den sechs folgenden Perspektiven untersucht:

- Quantität:  
die Fähigkeit eines Systems (Prozess, Maschine, etc.), den Durchsatz zu erhöhen

<sup>2</sup> Vgl. Wang (The Future of Manufacturing: A New Perspective) 2018, S. 726ff.

- **Größe:**  
die Fähigkeit eines Systems (Prozess, Maschine, etc.), ähnliche Produkte mit viel größeren Abmessungen herzustellen (z.B.: Großformat-Batterien)
- **Komplexität:**  
insbesondere geometrische Komplexität: die Fähigkeit eines Systems (Prozess, Maschine, etc.), Produkte herzustellen, die in ihren geometrischen Merkmalen viel komplexer sind als die aktuellen Produkte (Bilayer, 3D-Struktur etc.)
- **Funktionalität:**  
die Fähigkeit eines Systems (Prozess, Maschine, etc.), Produkte herzustellen, die eine wesentlich höhere Funktionalität aufweisen als die derzeitigen Produkte
- **Flexibilität:**  
die Fähigkeit eines Systems (Prozess, Maschine, etc.), die Vielfalt der Produkte, die es herstellen kann, zu handhaben
- **Kosten:**  
die Fähigkeit eines Systems (Prozess, Maschine usw.) mit Menge, Größe, Komplexität, Funktionalität und Flexibilität skalieren zu können, um ähnliche Objekte zu einigermaßen ähnlichen Kosten zu produzieren

Die Technologien der betrachteten Prozesskette und die Bewertungsgrößen wurden mittels eines paarweisen Vergleichs gegenübergestellt.

Abbildung 17 zeigt den paarweisen Vergleich und somit die Gewichtung der Skalierbarkeitskriterien gegeneinander. Die Kriterien der Quantität und der Kosten wurden dabei als wichtigste Faktoren bewertet.

als wichtiger	Quantität	Größe	Komplexität	Funktionalität	Flexibilität	Kosten	Summe	%
Quantität		2	2	2	2	1	9	30,00 %
Größe	0		2	2	2	0	6	20,00 %
Komplexität	0	0		1	0	0	1	3,33 %
Funktionalität	0	0	1		0	0	1	3,33 %
Flexibilität	0	0	2	2		0	4	13,33 %
Kosten	1	2	2	2	2		9	30,00 %
Prüfsumme							100,00 %	

**Abbildung 17: Paarweiser Vergleich der Bewertungskriterien**

Mit Hilfe der Referenzprozessketten und der Bewertungskriterien wurde nun eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse sind in Tabelle 2 dargestellt. Bei der Clustering der Ergebnisse wurde die Anodenherstellung, die Zellaassemblierung und -finalisierung gesammelt und die Kathoden-Elektrolyt-Schichtverbund-herstellung der jeweiligen Klassen getrennt voneinander dargestellt. Die Verfahren beziehen sich dabei auf die im letzten Zwischenbericht vorgestellten Referenzprozessketten aller drei Elektrolytklassen. Es ist zu sehen, dass vor allem die Kathoden-Elektrolyt-Schichtverbund-herstellung der oxidischen und sulfidischen Festkörperbatterien aktuell noch niedrige Nutzwerte in Bezug auf die Skalierbarkeit der Prozessschritte aufweisen. Dies ist vor allem auf ein geringeres TRL (technology readiness level) der eingesetzten Prozesse zurück zu führen. Besonders hervorzuheben sind hier die dis-kontinuierlichen Prozesse der Aerosol-Deposition und des Einzelblattstapelns, sowie die notwendigen Wärmebehandlungsschritte. Die Kathoden-Elektrolyt-Schichtverbundherstellung der polymeren Zelle weist aufgrund der verwendeten und etablierten Rolle-zu-Rolle Verfahren höhere Nutzwerte auf.

**Tabelle 2: Ergebnisse der Nutzwertanalyse**

Komponente	Prozess	Nutzwert [%]
Anodenherstellung	Laminieren	0,93
Anodenherstellung	Oberflächenpassivierung	0,91
Anodenherstellung	Laserstrahlschneiden	0,91
Anodenherstellung	Extrudieren/Kalandrieren	0,78
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Oxid	Laserstrahlschneiden	0,91
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Oxid	Mischen (Kathode)	0,91
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Oxid	Foliengießen	0,84
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Oxid	Mischen (Elektrolyt)	0,81
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Oxid	Aerosol Deposition	0,63
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Oxid	Sintern	0,55
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Oxid	Tempern	0,55
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Polymer	Compoundierung	0,95
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Polymer	Laminierung	0,93
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Polymer	Co-Extrusion	0,90
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Polymer	Rollenmesser und Stanzen	0,78

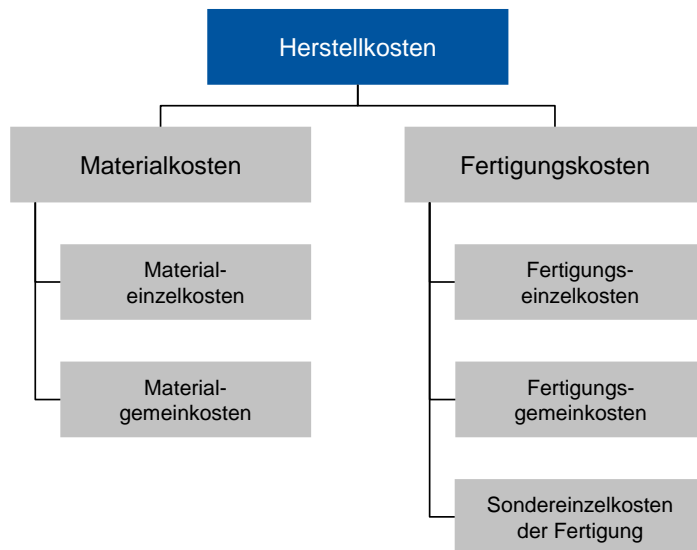
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Sulfid	Mischen	0,91
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Sulfid	Kalandrieren	0,88
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Sulfid	Foliengießen	0,80
Kathoden- und Elektrolytherstellung - Sulfid	Rollenmesser und Stanzen	0,78
Zellassemblierung und -finalisierung	Versiegelung	0,93
Zellassemblierung und -finalisierung	Pressen	0,88
Zellassemblierung und -finalisierung	Laserstrahlschweißen	0,86
Zellassemblierung und -finalisierung	Formierung/Reifung	0,78
Zellassemblierung und -finalisierung	Einzelblattstapeln	0,72

Zusätzlich zur theoretischen Betrachtung konnten auch die Ergebnisse aus den praktischen Stapelprozessen mit in eine Skalierbarkeitsbewertung einbezogen werden.

### **Kostenmodell**

Zur Erstellung des Kostenmodells wurden zunächst existierende Kostenmodelle aus dem Batteriebereich auf eine mögliche Eignung untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass sich vorhandene Kostenmodelle nicht 1:1 auf die Festkörperbatteriefertigung übertragen lassen. Es wurde ein eigenes Kostenmodell entwickelt, welches an ein vorhandenes Kostenmodell aus dem Lithium-Ionen Bereich angelehnt ist. Dadurch sollte eine Vergleichbarkeit der Kosten von Lithium-Ionen Batterien zu Festkörperbatterien erleichtert werden.

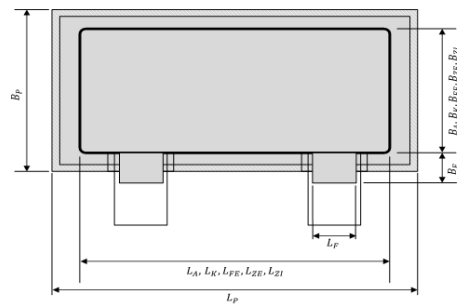
Abbildung 18 zeigt die Struktur des entwickelten Kostenmodells. Das Kostenmodell wurde in Microsoft Excel umgesetzt.



**Abbildung 18: Struktur des entwickelten Kostenmodells**

Das Kostenmodell wurde so entwickelt, dass Rahmenbedingungen der Batteriezelle wie z.B. die Dimensionierung oder Materialien, sowie Rahmenbedingungen der Produktionsprozesse wie Taktzeiten der Anlagen in einem vorgegebenen Rahmen modifizierbar sind. Kalkulationsprämissen und Zahlenwerte wurden aus kollektivem Wissensschatz am Institut, verfügbarer wissenschaftlicher Literatur und ausgewählten Herstellergesprächen hergeleitet. Die Fertigungsproduktivität wurde über die aggregierte Größe der Overall-Equipment-Effectiveness (OEE) für sämtliche Prozesse berücksichtigt. Ein Dashboard aggregiert alle Berechnungsergebnisse und liefert eine Übersicht der einzelnen Kostenpositionen.

Beschreibung	Abkürzung	Wert [mm]	Anmerkungen/Quelle
Schichtdicke Anode ungeladen	S_A	0,014	Schnell, 2020
Schichtdicke Anode geladen	S_A	0,041	Schnell, 2020
Schichtdicke Kathode	S_K	0,1	Schnell, 2020
Schichtdicke Feststoffelektrolyt	S_FE	0,005	Schnell, 2020
Schichtdicke Zellaileiter intern Anode	S_ZIA	0,01	FBF Pouch Standard
Schichtdicke Zellaileiter intern Kathode	S_ZIK	0,015	FBF Pouch Standard
Schichtdicke Zellaileiter extern Anode	S_ZEA	0,01	FBF Pouch Standard
Schichtdicke Zellaileiter extern Kathode	S_ZEK	0,015	FBF Pouch Standard
Länge Anode	L_A	260	FBF Pouch Standard
Breite Anode	B_A	120	FBF Pouch Standard
Länge Kathode	L_K	260	FBF Pouch Standard
Breite Kathode	B_K	120	FBF Pouch Standard
Länge Feststoffelektrolyt	L_FE	260	FBF Pouch Standard
Breite Feststoffelektrolyt	B_FE	120	FBF Pouch Standard
Länge Zellaileiter intern	L_ZI	260	FBF Pouch Standard
Breite Zellaileiter intern	B_ZI	120	FBF Pouch Standard
Länge Zellaileiter extern (ohne Fächer)	L_ZE	260	FBF Pouch Standard
Breite Zellaileiter extern (ohne Fächer)	B_ZE	120	FBF Pouch Standard
Länge Fächer	L_F	45	FBF Pouch Standard
Breite Fächer	B_F	70	FBF Pouch Standard
Länge Pouchbag (nach Tiefziehen)	L_P	300	FBF Pouch Standard
Breite Pouchbag (nach Tiefziehen)	B_P	160	FBF Pouch Standard



Materialbezeichnung	Zulieferer	Funktion		Dichte	Einkaufskosten	Masse pro MZ	Masse ges.		Volumen Schicht
			Anteil [m%]	[kg/m³]	[€/kg]	[kg]	[kg]		[mm²]
Lithium	???	Aktivmaterial	100%	534	129,50 €	0,000233251	0,002332512	Schnell, 2020	436,8
		Summe	100%		Gesamtmasse	0,000233251	0,002332512		Dichte Schicht 534

Materialbezeichnung		Zulieferer	Funktion	Anteil an Endprodukt [m%]	Dichte [kg/m³]	Einkaufskosten [€/kg]	Masse pro MZ [kg]	Masse ges. [kg]	Anmerkungen	Volumen Schicht [mm]
NMC 811	???	Super P	Aktivmaterial	78.99%	2700	22,80 €	0.012568889	0.125688888	Schnell, 2020	3120
LLZO	???		Additiv	16.81%	5100	47,50 €	0.0026748072	0.026748072	Schnell, 2020	Dichte Schicht [kg/m³] 5100
Carbon Black	???		Additiv	2.80%	2000	5,54 €	0.000445636	0.00445636	Schnell, 2020	
NBR	???		Binder	1.40%	1760	3,80 €	0.000222768	0.00222768	Schnell, 2020	
Summe				100%		Gesamtmasse	0.015912	0.15912		Dichte Slurry [kg/m³] 4500
Materialbezeichnung		Kategorie	Zulieferer	Anteil an Suspension [m%]	Dichte [kg/m³]	Einkaufskosten [€/kg]	Masse pro MZ [kg]	Masse ges. [kg]	Anmerkungen	
NMP	organisch	???		10%	1030	2,61 €	0,00177	0,0177	Yan, 2017	
Lösungsmittel Anteil				10%		Gesamtmasse Suspension	0.01768	0.1768		

Materialbezeichnung	Zulieferer	Funktion	Anteil	Dichte	Einkaufskosten	Masse pro MZ	Masse ges.	Anmerkungen
			[m%]	[kg/m³]	[€/kg]	[kg]	[kg]	
LLZO	???	Ionenleiter	100%	5100	47,50 €	0,0007956	0,007956	
		Summe	100%		Gesamtmasse	0,0007956	0,007956	

Volumen Schicht [mm³] 159
---------------------------------

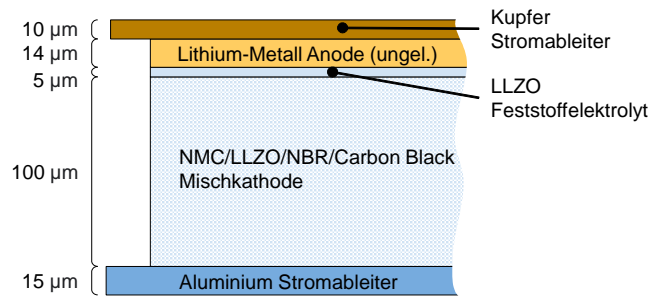
Dichte Schicht [kg/m³] 5100
-----------------------------------

Funktion	Materialbezeichnung	Anzahl [ ]	Zulieferer	Dichte [kg/m³]	Einkaufskosten [€/kg]	Masse pro MZ	Masse ges. [kg]	Fläche [mm²]	Anmerkungen
Zellableiter intern Anode	Kupferfolie	9 ???		8930	14,50 €	0,00278616	0,02507544		
Zellableiter intern Kathode	Aluminiumfolie	9 ???		2700	6,50 €	0,0012636	0,0113724	31200	
Zellableiter extern Anode	Kupferfolie mit Fahn	1 ???		8930	14,50 €	0,003067455	0,003067455	34350	
Zellableiter extern Kathode	Aluminiumfolie mit F	1 ???		2700	6,50 €	0,001391175	0,001391175	34350	

Funktion	Materialbezeichnung	Anzahl [-]	Zulieferer	Einkaufskosten		Fläche [mm²]	Anmerkungen
				[€/Stk]	[€/m²]		
Pouch Folie	xxx	2 ???	-		3,00 €	48000	
Tab Anode	yyy	1 ???		0,10 €	-	-	
Tab Kathode	zzz	1 ???			0,15 €	-	

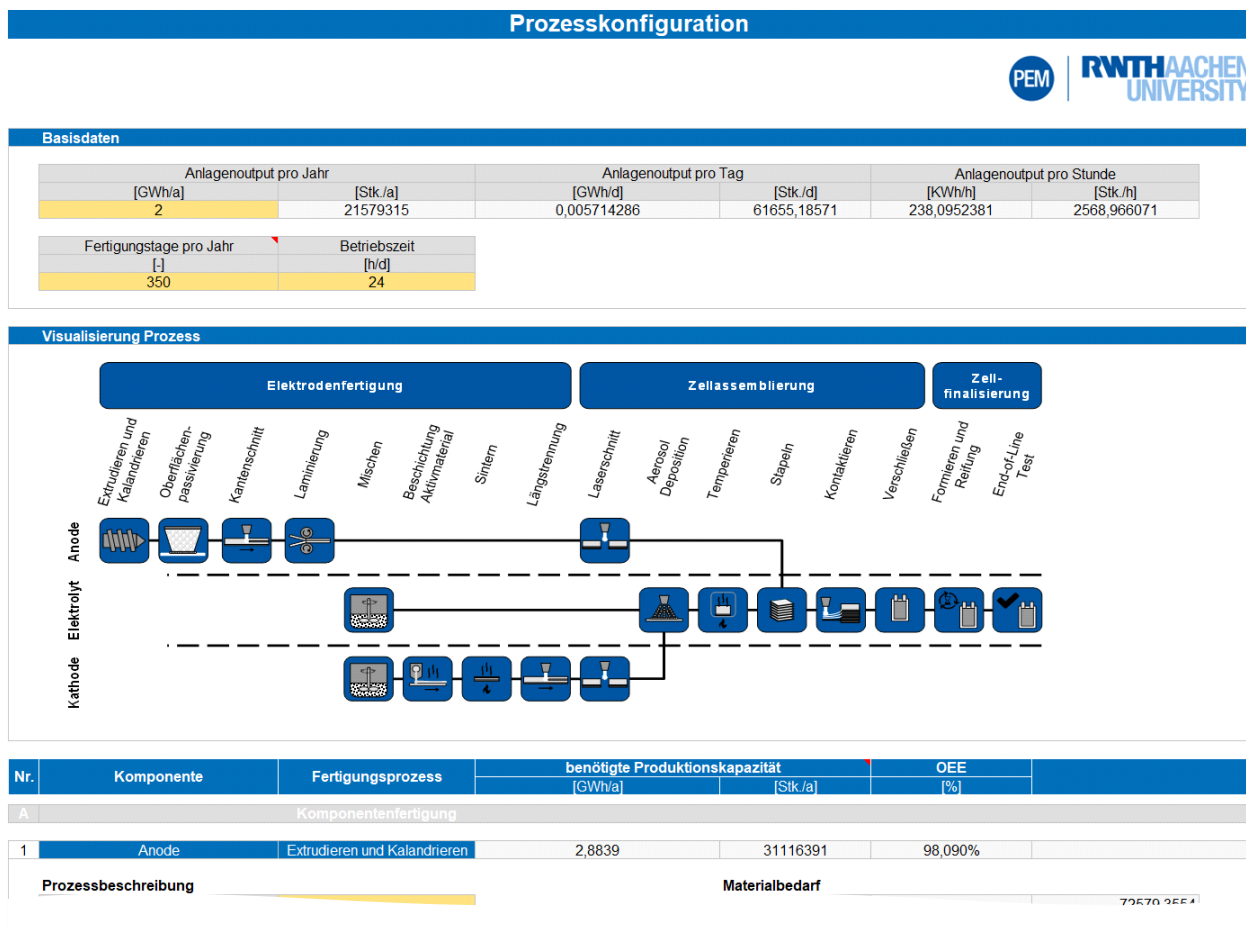
Anzahl MZ	th. Spannung MZ	th. Spannung gesamt	Spannungsfaktor	Spannung	th. Kapazität	Kapazitätsfaktor	Kapazität	Energiegehalt
[-]	[V]	[V]	[%]	[V]	[Ah]	[%]	[Ah]	[Wh]
10	3,7	37	95%	35,15	2	90%	2,636738208	92,68134801

Abbildung 19 zeigt den Zellkonfigurator des Excel-Modells. Neben der Annahme eines industrie-relevanten Zellformats wurden auch Annahmen für ein industrialisiertes Zelldesign (Abbildung 20) getroffen.



**Abbildung 20: Beispielhafte Annahme für ein industrialisiertes Zelldesign**

Abbildung 21 zeigt einen Auszug aus dem Prozesskonfigurator. Hier sind Technologien für jeden Prozessschritt hinterlegt und Prozessparameter können angepasst werden.



**Abbildung 21: Auszug aus Prozesskonfigurator**

## Materialkosten

Komponente	MEK		MGK		MK					
	[€/Stk.]	[€/kWh]	[€/Stk.]	[€/kWh]	[€/Stk.]	[€/kWh]				
<b>Anode</b>	0,42 €	4,54 €	0,04 €	0,45 €	0,46 €	5,00 €				
Material	Anteil [m%]	Einkaufskosten [€/kg]	Materialbedarf Ideal [kg/Stk.]	Verluste [%]	Ausschuss [kg/Stk.]	Materialbedarf Real [kg/Stk.]	Einzelkosten [€/Stk.]	[€/kWh]	Gemeinkostenanteil [%]	Gemeinkosten [€/Stk.]
Lithium	100%	123,50 €	0,002332512	2%	0,00	0,00	0,42 €		10%	0,04 €
							- €			- €
							- €			- €
							- €			- €
<b>Kathode</b>	7,10 €	76,63 €	0,71 €	7,66 €	7,81 €	84,29 €				
Material	Anteil [m%]	Einkaufskosten [€/kg]	Materialbedarf Ideal [kg/Stk.]	Verluste [%]	Ausschuss [kg/Stk.]	Materialbedarf Real [kg/Stk.]	Einzelkosten [€/Stk.]	[€/kWh]	Gemeinkostenanteil [%]	Gemeinkosten [€/Stk.]
NMC 811	79%	22,80 €	0,125688888	2%	0,09	0,21	4,88 €	52,67 €	10%	0,49 €
LLZO	17%	47,50 €	0,026748072	2%	0,02	0,05	2,16 €	23,35 €	10%	0,22 €
Carbon Black	3%	5,54 €	0,00445536	2%	0,00	0,01	0,04 €	0,45 €	10%	0,00 €
NBR	1%	3,80 €	0,00222768	2%	0,00	0,00	0,01 €	0,16 €	10%	0,00 €
							- €	- €		- €
<b>Feststoffelektrolyt</b>	0,59 €	6,36 €	0,06 €	0,64 €	0,65 €	7,00 €				
Material	Anteil [m%]	Einkaufskosten [€/kg]	Materialbedarf Ideal [kg/Stk.]	Verluste [%]	Ausschuss [kg/Stk.]	Materialbedarf Real [kg/Stk.]	Einzelkosten [€/Stk.]		Gemeinkostenanteil [%]	Gemeinkosten [€/Stk.]
LLZO	100%	47,50 €	0,007956	15%	0,003268	0,01	0,59 €		10%	0,06 €
							- €			- €

Abbildung 22: Eingabe Materialkosten

## Fertigungskosten

Basisdaten										
<b>Personal</b>		Standort	Berufsbezeichnung	Wochenstunden	Monatsentgelt Brutto	Faktor Nebenkosten	Lohnnebenkosten	Personalkosten	Zulage 2. Schicht	Zulage 3. Schicht
		Deutschland	Facharbeiter Produktion	35	2.883,50 €	22%	634,37 €	23,11 €	15%	25%
<b>Anlagen</b>		Flächenpreis pro Jahr	Zinssatz	Stromkosten	Druckluftkosten	Wasserkosten	Erdgaskosten	Argonkosten	Stickstoffkosten	Dollar → Euro
		[€/m²]	[%]	[€/kWh]	[€/m³]	[€/m³]	[€/kWh]	[€/m³]	[€/m³]	[€/€]
		80	5%	0,23 €	- €	- €	0,07 €	2,19 €	1,50 €	0,95
Nr.	Komponente	Fertigungsprozess	FER	FGK	BEK	FK				
			[€/Stk.]	[€/kWh]	[€/Stk.]	[€/kWh]				
1	Anode	Extrudieren und Kalandrieren	0,06 €	0,01 €	0,01 €	0,09 €			0,06 €	0,70 €
<b>Personalkosten</b>			Anteil Mitarbeiter	Personalkosten			<b>Gemeinkosten</b>			
			[t]	[€/Stk.]	[€/kWh]		Gemeinkostenanteil			
			1	28,06 €	0,01 €	0,12 €	15%			
<b>Maschinenstundensatz</b>			Anschaffungskosten [€]	Abschreibungen [€/h]	Instandhaltungskosten [€/h]		<b>Sondereinzelkosten der Fertigung</b>			
			4.427.000,00 €	85,88 €	10,54 €		Beschreibung			
			Zubehörskosten [€]	Kalkulatorische Zinsen [€/h]	Stromkosten [€/h]	4,60 €	Kosten			
			13,16 €	0,32 €	- €					
			Investitionskosten ges. [€]	Flächenkosten [€/h]	Wasserkosten [€/h]	- €				
			4.427.000,00 €	79,38 €	- €					
			Abschreibungszeitraum [a]	Erdgaskosten [€/h]	Argonkosten [€/h]	21,85 €				
			8	- €	36,59 €					
			Instandhaltungssatz [%]	MSS [€/h]	MSS [€/Stk.]	116,37 €				
			2%	0,05 €	0,05 €					
			Flächenbedarf [m²]	Wasserkosten [€/h]	MSS [€/kWh]	0,49 €				
			34	- €	- €					
			Strombedarf [kWh/h]	Argonbedarf [m³/h]						
			20	10						
			Druckluftbedarf [m³/h]							
			-							
			Wasserbedarf [m³/h]							
			-							
			Erdgasbedarf [kWh/h]							
			-							
			Argonbedarf [m³/h]							
			-							
2	Anode	Oberflächenpassivierung	0,05 €	0,50 €	0,01 €	0,07 €			0,05 €	0,57 €
<b>Personalkosten</b>			Anteil Mitarbeiter	Personalkosten			<b>Gemeinkosten</b>			
			[t]	[€/Stk.]	[€/kWh]		Gemeinkostenanteil			
			1	28,06 €	0,01 €	0,12 €	15%			
<b>Maschinenstundensatz</b>			Anschaffungskosten [€]	Abschreibungen [€/h]	Instandhaltungskosten [€/h]	9,52 €	<b>Sondereinzelkosten der Fertigung</b>			
			4.000.000,00 €	59,52 €	11,90 €		Beschreibung			
			Zubehörskosten [€]	Kalkulatorische Zinsen [€/h]	Stromkosten [€/h]	0,23 €				
			13,16 €	0,19 €	- €					
			Investitionskosten ges. [€]	Flächenkosten [€/h]	Wasserkosten [€/h]	- €				
			4.000.000,00 €	71,52 €	- €					
			Abschreibungszeitraum [a]	Erdgaskosten [€/h]	Argonkosten [€/h]	21,85 €				
			8	- €	36,59 €					
			Instandhaltungssatz [%]	MSS [€/h]	MSS [€/Stk.]	116,37 €				
			2%	0,05 €	0,05 €					
			Flächenbedarf [m²]	Wasserkosten [€/h]	MSS [€/kWh]	0,49 €				
			34	- €	- €					
			Strombedarf [kWh/h]	Argonbedarf [m³/h]						
			20	10						
			Druckluftbedarf [m³/h]							
			-							
			Wasserbedarf [m³/h]							
			-							
			Erdgasbedarf [kWh/h]							
			-							
			Argonbedarf [m³/h]							
			-							

Abbildung 23: Eingabe Fertigungskosten

Abbildung 22 und Abbildung 23 zeigen die Eingabemaschinen für die Materialkosten und die Fertigungskosten.

Durch die Möglichkeit Werte im Kostenmodell flexibel anpassen zu können, konnten Sensitivitäten aufgedeckt und untersucht werden.

Es wurde identifiziert, dass, wie in der Lithium-Ionen Batteriefertigung, der Hauptkostentreiber die Kathode darstellt. Fast 75% der Materialkosten entfallen auf das Kathodenmaterial. Innerhalb der



Kathode entfallen circa 68% auf das reine Kathodenaktivmaterial (CAM). Circa 30% der Materialkosten der Kathode entfallen auf das in der Kathodenstruktur integrierte Festelektrolyt LLZO. Trotz der hohen Kosten für den Festkörperelektrolyt, fällt dieser aufgrund der niedrigen Schichtdicken bzw. niedrigen Massenanteilen aus Kostensicht weniger stark ins Gewicht. Insgesamt wurden die Materialeinzelkosten auf knapp über 100 €/kWh beziffert.

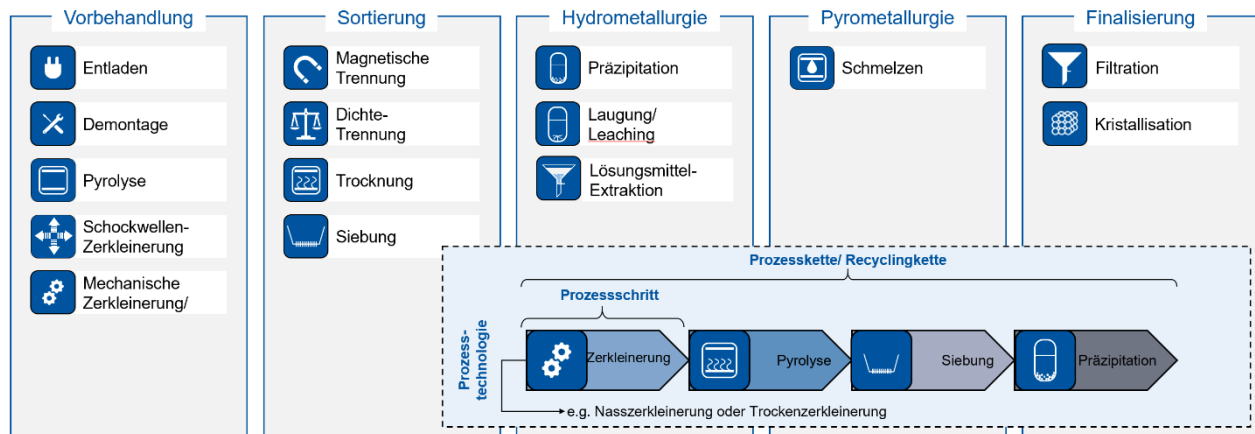
Bei den Fertigungskosten dominieren die Kosten für die Zellaassemblierung, welche über 50% der gesamten Fertigungskosten ausmachen. Dies liegt v.a. an der Aerosol-Deposition, welche durch geringe Prozessgeschwindigkeiten und hohen Anlagenkosten alleine circa 40% der Kosten der Zellaassemblierung stellt. Die Herstellung des Stapels fällt mit 24% der Kosten für die Zellaassemblierung als zweitstärkster Faktor ins Gewicht.

Als Ansätze zur Kostenoptimierung wurden zwei Themen identifiziert, welche somit gleichzeitig auch die höchste Sensitivität auf die Kosten des Gesamtprozesses haben:

- Entwicklung des Aerosol-Deposition Prozesses
  - Durchsatzsteigerung durch *Roll-to-Roll* Prozessführung
  - Erhöhung der Abscheideeffizienz (Düsengeometrie, Prozessauslegung)
  - Erhöhung der Abscheiderate (Mehrstufiges Düsensystem)
  - Wiederverwertung von eingesetztem Material und Trägergas
- Optimierte und skalierbare Materialsysteme
  - Prozessabgestimmte Materialentwicklung
  - Günstige und effiziente Verfahren zur industriellen Aufbereitung von Festelektrolytsystemen
  - Reduktion der Anteile seltener Elemente/ Erden in der Gesamtzusammensetzung der Festelektrolytsysteme

## **Recyclingfähigkeit**

Zur Untersuchung der Recyclingfähigkeit von Festkörperbatterien wurde in Bezug auf den aktuellen Stand der Technik des Batterierecyclings von Lithium-Ionen Batterien aufgearbeitet. Dazu wurde in einem ersten Schritt herausgearbeitet, welche Prozesse im Recycling von Lithium-Ionen Batterien zum Einsatz kommen. Abbildung 24 zeigt aktuell zum Einsatz kommende Recyclingansätze im Bereich der Lithium-Ionen Batterie. Es ist zu sehen, dass sich für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien zugrunde liegende Prozessketten in übergeordnete Bereiche, Prozesstechnologien und Prozessschritte unterteilen lassen können. Die Bereiche bezeichnen dabei mehrere (alternative) Prozesse, welche sich alle einer Verfahrensklasse zuordnen lassen können wie z.B. Trennverfahren zur Sortierung. Durch eine Aneinanderkettung und Kombination einzelner Prozessschritte aus unterschiedlichen Verfahrensklassen, kann eine Prozesskette abgeleitet werden. Zum aktuellen Zeitpunkt herrscht noch keine einheitliche Prozesskette für das Recycling von Lithium-Ionen Batterien. Die Prozessrouten sind hochindividuell und hängen von vielen Faktoren, wie z.B. der Zellchemie, dem Format und dem Grad der Rückgewinnung ab.



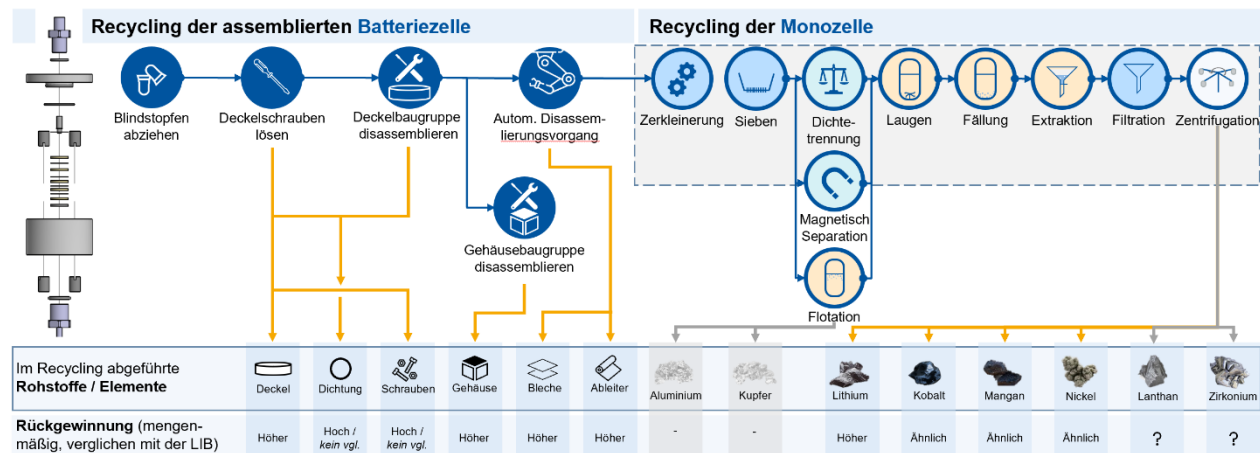
**Abbildung 24: Ansätze zum Recycling von Lithium-Ionen Batterien**

Eine Untersuchung der Recyclingfähigkeit von Festkörperbatterien konnte aufgrund der großen Vielfalt von möglichen Materialkombinationen und den fehlenden praktischen Ansätzen im Zelldesign nur von der im Projekt untersuchten Projektzelle ableitet werden. Abbildung 25 zeigt den Vergleich zwischen einer fiktiven State-of-the-Art Lithium-Ionen Pouchzelle auf NMC-Basis mit der im Projekt betrachteten Projektzelle. Es wurde festgestellt, dass die im Projekt aufgebaute Festkörperbatterie vor allem in Bezug auf die Demontierbarkeit Vorteile gegenüber einer konventionellen Lithium-Ionen Batteriezelle aufweisen kann. Dies liegt nicht zuletzt am Fehlen eines flüssigen Elektrolyten und der lösbaren Kontaktierung in der Projektzelle. Hierdurch kann die Projektzelle mit dem umgekehrten Assemblierungsprozess demontiert werden und wieder in ihren Ausgangszustand vor der Assemblierung gebracht werden. Eine sortenreine Trennung und Rückgewinnung der eingesetzten Zellkomponenten sind somit sichergestellt. Es muss allerdings erwähnt werden, dass die Vergleichbarkeit in der Praktikabilität zwischen den beiden betrachteten Zellen nicht gegeben ist. Während die fiktive LIB-Zelle einen industrialisierten Standard besitzt, ist die im Projekt betrachtete Festkörperbatterie noch weit von diesem Status entfernt. Somit sind auch nicht zu vernachlässigende Eigenschaften wie Energiedichte und Leistung nicht vergleichbar. Es wurde allerdings demonstriert, dass durch Design-for-Recycling eine Demontierbarkeit von Festkörperbatterien möglich ist.

	<b>Lithium-Ionen-Batterie</b> (kommerzielle Zelle)	<b>Festkörperbatterie</b> (Projektzelle)
<b>Anode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Graphit, beschichtet auf Stromkollektor (~50 – 85 µm)</li> <li>Interkalation von Li<sup>+</sup>-Ionen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reines Lithium-Metall</li> <li>Plating/ Stripping von Lithium</li> </ul>
<b>Elektrolyt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fl. Elektrolyt bestehend aus Leitsalzen<sup>1</sup>, Lösungsmittel<sup>2</sup> und Additiven</li> <li>Verwendung toxischer Materialien, leicht entzündlich &amp; hoch reaktiv</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gesinterter und fester Elektrolyt (LLZO)</li> <li>Nicht entzündlich, höhere Stabilität unter Umgebungsbedingungen</li> </ul>
<b>Kathode</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NMC als Aktivmaterial (variierte Mengenanteile möglich)</li> <li>Binder für Kohäsion/Adhäsion, Leitruß für erhöhte el. Leitfähigkeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Materialverbund aus NMC/LLZO ohne weitere Additive</li> <li>Restporosität der Struktur nicht durch flüssigen Elektrolyten infiltriert</li> </ul>
<b>Zelldesign</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximierung der Energiedichte durch Reduktion inaktiver Materialien</li> <li>Trennender Separator (mikroporöser Kunststoff) zwischen den Elektroden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hoher Massen-/Volumenanteil an inaktiven Materialien (insb. Gehäuse)</li> <li>Festelektrolytschicht übernimmt zugleich trennende Funktion d. Separators</li> </ul>
<b>Demontierbarkeit</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zerstörungsfreie Demontage auf Zellebene nicht möglich (fester und mit Elektrolyt durchtränkter Schichtverbund, verschweißte Ableiter)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Stapelung einzelner Schichten und lösbare Kontaktierung (reiner Kraftschluss im Gehäuseinneren) begünstigen die Demontage</li> </ul>

**Abbildung 25: Vergleich einer fiktiven State-of-the-Art NMC-LIB (Pouch) zur ASSB-Projektzelle**

Für die Projektzelle wurde eine Recyclingablauf erstellt, welcher in Abbildung 26 zu sehen ist. Es ist dabei in einen Demontageprozess (auf der linken Seite dargestellt) der Komponenten und einen Recyclingprozess für die Monozellen zu unterscheiden. Der Rückgewinnungsanteil wurde dabei mengenmäßig und qualitativ mit der einer LIB verglichen. Eine sortenreine Demontage der Komponenten ist mit der Projektzelle zu 100% möglich. Für eine Bewertung der Recyclingfähigkeit der Monozellen fehlt zum aktuellen Zeitpunkt noch die Grundlagen. Für in der LIB ebenfalls vorkommende Materialien konnte jedoch eine generische Prozesskette abgeleitet werden. Diese Materialien haben wie im vorangegangenen Kapitel dargestellt auch den höchsten Anteil an den Materialeinzelkosten der Zelle und sind somit aus wirtschaftlicher Perspektive für ein mögliches Recycling am interessantesten.



**Abbildung 26: Recyclingablauf der Projektzelle**

Des Weiteren wurde untersucht, inwiefern ein industrialisiertes Zelldesign für eine Festkörperbatterie die untersuchte Recyclingfähigkeit beeinflussen würde. Hierbei wurden 6 Aspekte identifiziert:

- Zelldesign
  - Industrialisierte Batteriekonzepte optimieren die Energiedichte und reduzieren hierzu inaktive Materialien auf ein Minimum. Dadurch wird es voraussichtlich zu einem Entfall der lösbaren Schraubverbindungen kommen. Ebenfalls werden Elektrolytschichten immer dünner und besser an die Grenzschichten angebunden werden. Im Vergleich zur Projektzelle wird die Wandstärke der Verpackung reduziert werden.
- Dichtung
  - Industrialisierte Batteriezellen verfügen über keine zusätzlichen Dichtelemente, um die Gehäusestruktur gegenüber der Umgebung abzudichten. Alternativ werden voraussichtlich Schweiß- oder Siegelprozesse zum Einsatz kommen.
- Gehäuse
  - Gehäuse industrialisierter Batteriezellen sind fest mit der Deckelbaugruppe verbunden und nicht mehr zerstörungsfrei offenbar. Eine Wiederverwendung der Komponenten wie z.B. des Gehäuses wird durch eine nicht-zerstörungsfreie Demontage ausgeschlossen.
- Deckelbaugruppe

- Deckelbaugruppen industrialisierter Batteriezellen sind aus Sicherheitsgründen mit dem Gehäuse fest verschweißt / versiegelt. Eine Wiederverwendung der Komponenten wie z.B. des Gehäuses wird durch eine nicht-zerstörungsfreie Demontage ausgeschlossen.
- Aktivmaterial / Elektrolyt
  - Industrialisierter Batteriekonzepte setzen bislang auf flüssige Elektrolyte, welche die Elektrodenmaterialien vollständig infiltrieren. Der Entfall des flüssigen Elektrolyten zugunsten eines stapelbaren Festelektrolyten eröffnet die Möglichkeit sortenreinerer Trennung.
- Ableiterbleche
  - Ableiterbleche industrialisierter Batteriezelle werden über verschiedene Schweißverfahren fest mit den nach außen geführten Tabs verbunden. Fest miteinander verschweißte und in die Gehäuse- / Deckelstruktur integrierte Ableiter erschweren den Demontageprozess.

Insgesamt wurde analysiert, dass die Anforderungen an ein industrialisiertes Zelldesign, wie auch bei der LIB, den Anforderungen an die Demontagefähigkeit und somit auch der Recyclingfähigkeit entgegenstehen.

### **II.1.3 Inhaltliche Abweichungen**

Die Verwendung von Edelstahlblechen als Gehäusematerial hat sich innerhalb des Projektes als nicht zielführend herausgestellt. Das mit J&R entwickelte Konzept des Zellbereitstellers sah eine Verwendung von aus PEEK gefertigten Zellgehäusen vor. Trotzdem wurde die Verwendung von Edelstahlblechen als Gehäusematerial untersucht. Es stellte sich aber heraus, dass die Verwendung im Vergleich zu heute etablierten Gehäusematerialien keinen Vorteil aufzuweisen hat, weshalb die Idee im Projektverlauf verworfen wurde.

Auf die Durchführung von Performance-Messungen an gestapelten Vollzellen musste verzichtet werden, da innerhalb des Projekts keine funktionierenden Monozellen von Konsortialpartnern bereitgestellt werden konnten. Die zur Verfügung gestellten Proben des FZJ zeigten keine elektrochemische Aktivität.

### **II.1.4 Zeitliche Abweichungen**

Es wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um 6 Monate bis zum 30.06.2022 bewilligt. Diese kostenneutrale Verlängerung wurde im Projektkonsortium abgestimmt, und alle Projektpartner stimmten dieser zu. Durch das Corona-Virus haben sich die Arbeitsprozesse an der RWTH Aachen kurzfristig erheblich verändert. Aufgrund von Beschränkungen im eLab Technikum konnten Arbeiten nicht mehr im gewohnten Umfang und mit der geplanten Geschwindigkeit sichergestellt werden. Die Kontaktbeschränkungen und Abstandsregeln erschwerten die Zugänglichkeit zu notwendigen Anlagen und das Arbeiten vor Ort. Zusätzlich haben sich dadurch Ausschreibungsvorgänge für Beschaffungen verzögert. Als Resultat blieben noch Teile der bewilligten Zuschüsse für Beschaffungen offen, welche aber für die weitere Forschung notwendig waren. Durch die Verlängerung konnten die verbleibenden Mittel weiter ausgeschöpft werden.

## **II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

### **II.2.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises**

Insgesamt wurden über die Projektlaufzeit 200.983,70 € an Mitteln abgerufen, wovon 95% in Form von Personalmitteln eingesetzt wurden. Hierbei entfielen 63% auf wissenschaftliche Mitarbeiter zur Erarbeitung der theoretischen Projektinhalte- und Ergebnisse. Gut 11% entfielen auf die Position Techniker zur praktischen Umsetzung von Projektinhalten, wie z.B. den Aufbau und die Anpassung einer Einhausung/Glovebox. Unterstützt wurde das Fachpersonal durch studentische Hilfskräfte, für die insgesamt 26% der Personalmittel verausgabt wurden.

Mit dem Einsatz von Technikpersonal konnten durch Eigenbau die Ausgaben in der Pos. 0850 deutlich um 75% unterschritten werden. Aufgrund der Pandemie wurden Ausgaben im Bereich Reisekosten, Pos. 0846 nicht getätigt, da Projekttreffen vorwiegend digital stattfanden, so wurden auch hier fast zwei Drittel der vorgesehenen Mittel nicht verausgabt.

### **II.2.2 Finanzielle Abweichungen**

Innerhalb des Projektvorhabens wurde eine Mittelumwidmung beantragt. Die Mittelumwidmungen in Höhe von 20.000€ von der Position 812 (Wissenschaftliches Personal) in die Position 817 (Nicht-wissenschaftliches Personal), sowie in Höhe von 10.000€ von der Position 812 (Wissenschaftliches Personal) in die Position 822 (Studentisches Personal) wurde genehmigt. In Bezug auf die zum Ende des Projektes terminierten Arbeiten des PEM hatte v.a. die verzögerte Bereitstellung von Versuchsaufbauten starke Auswirkungen. Dadurch konnten praktische Arbeiten erst später als geplant gestartet werden. Die ursprüngliche Planung sah dabei vor, dass im Hinblick auf wissenschaftliche Fragestellungen Anlagenarbeit zum größten Teil von wissenschaftlichem Personal durchzuführen sei. Es ergaben sich zwei Änderungen:

1. Durch den nun strafferen Zeitplan war eine vollständige Umsetzung der Arbeiten durch wissenschaftliches Personal nicht mehr realistisch. Mit Blick auf die Projektinhalte wurde daher vorgesehen, entsprechende Arbeiten (z.B. Hardwareaufbauten, Anlagen-inbetriebnahme, Programmierung) unter der Anleitung von wissenschaftlichem Personal mit nicht-wissenschaftlichem Werkstattpersonal und studentischem Personal zu parallelisieren.
2. Da der für die Versuchsdurchführung erforderliche Roboterarm in der Zellaussammlung zwischenzeitlich für andere Projekte verwendet wurde, ergaben sich höhere Aufwände für die Umrüstung und Programmierung der Anlage vor der eigentlichen Versuchsdurchführung. Auch für diese Arbeiten konnte unter Unterstützung von wissenschaftlichem Personal stärker auf nicht-wissenschaftlichem Werkstattpersonal und studentisches Personal zurückgegriffen werden.

## **II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Mit der Erforschung von Festkörperbatterien und deren Produktionsprozess adressiert das Forschungsvorhaben verschiedene übergreifende förderpolitische Ziele des „7. Energieforschungsprogramms“, speziell zum Punkt 3.3.1 Elektromobilität.

Produktseitig ermöglicht die höhere Energiedichte von Festkörperbatterien im Vergleich zu heutigen Lithium-Ionen-Batterien im Kontext der Elektromobilität höhere Reichweiten bei geringerem Gewicht und höher Sicherheit im Schadensfall. Damit können Treibhausgasemissionen gesenkt werden und die Effizienz und Akzeptanz der Elektromobilität gesteigert werden. Prozessseitig wird die skalierbare Produktion von Festkörperbatterien untersucht. Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse sowie die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen soll zeigen, wie die Herstellkosten neuer Zelltechnologien gesenkt werden können. Nachdem heutige Lithium-Ionen-Zellen vorwiegend im asiatischen Raum in Massenproduktion hergestellt werden, wird der noch in der industriellen Forschung befindlichen Festkörperbatterie das Potenzial zugesprochen, wirtschaftlich in Deutschland herstellbar zu sein. Vor allem der deutsche Maschinen- und Anlagenbau benötigt Erkenntnisse zur Entwicklung der Produktionsanlagen für zukünftige Batterietechnologien.

Die neu zu entwickelnden Batterien sollen außerdem die Anforderungen an den Produktionsprozess berücksichtigen und möglichst kostengünstig prozessierbar sein. So kann die Festkörperbatterie ein Stück näher an die wettbewerbsfähige Serienproduktion geführt werden.

Die Produktionsforschung im Bereich der Festkörperbatterien steckt aufgrund von noch nicht gelösten Herausforderungen auf Material- und Produktebene noch in ihren Anfängen. Das Projekt OptiKeraLyt und v.a. der Teilumfang des PEMs haben erste Erkenntnisse im Bereich der Festkörperbatterieproduktion gegeben. Durch die geleistete Arbeit wurden zahlreiche Herausforderungen und weiterer Forschungsbedarf identifiziert.

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

Das Verwertungspotential wurde inhaltlich bereits in Kapitel II.1.2 als Teil der Projekthinhalte dargestellt.

Zusätzlich lässt sich zusammenfassen, dass die im Projekt erarbeitenden Ergebnisse umfangreiche Erkenntnisse bezüglich des weiteren Vorgehens im Forschungsfeld geliefert haben.

Die in AP3.B abgeschlossenen Forschungsarbeiten und insbesondere der Aufbau und die Integration des Demonstrators in die Pilotlinie haben den Grundstein für weitere Forschungsaktivitäten im Bereich der Festkörperbatterieproduktion am Lehrstuhl gelegt. Das mit dem Aufbau einhergehend erarbeitete Wissen kann sowohl Basis von weiteren Forschungsprojekten als auch von Drittmittelprojekten sein. Durch die Sichtbarkeit des Projekts und der Projektergebnisse durch den Hardwareeinbau in die Pilotumgebung werden die Projektergebnisse auch nach Projektende weiter für Forschungs- und Industriepartner präsent bleiben. Hierdurch wird v.a. die Verwertung in der Industrie gefördert.

Die theoretisch erarbeiteten Inhalte aus AP4.B haben die Herausforderungen und Potentiale der Festkörperbatterieproduktion aufgedeckt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich v.a. durch den hohen Neuheitsgrad vieler Technologien in der gesamten Wertschöpfungskette der Festkörperbatterieproduktion inklusive nachgelagerter Re-X Prozesse enorme Potentiale ergeben. Ebenfalls zeichnet sich die Festkörperbatterieproduktion durch ein sehr uneinheitliches Verständnis der Technologiekette aus. Durch eine frühzeitige Positionierung deutscher Unternehmen könnten

Technologien vorangetrieben und die Produktion durch die Definition von Standards und Vereinheitlichungen wirtschaftlich gemacht werden.

Nicht zu vernachlässigen sind ebenfalls die geschaffenen Qualifikationen der Projektarbeitenden. Über die Zeit des Projekts haben mehrere Doktoranden und studentische Mitarbeitende am Projekt mitgewirkt und sich im Themenbereich Festkörperbatterie weiterqualifiziert. Durch die Bearbeitung zahlreicher Abschlussarbeiten wurden im Projekt auch Studierende eingebunden und somit potentielle nachwachsende wissenschaftliche Mitarbeitende an das Themenfeld Festkörperbatterieproduktion herangeführt. Durch die hohe Nähe des Lehrstuhls zur Industrie gelingt hierdurch auch der Wissenstransfer in die Industrie.

## **II.5 Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen während der Projektlaufzeit**

Zum Zeitpunkt des Verfassens des Abschlussberichts sind keine weiteren praktischen Forschungsaktivitäten im Bereich des Stapelverfahrens von Festkörperbatterien bekannt. Besonders der kombinierte Ansatz von bipolarer Stapelung, erster Automatisierung und integrativem Zelldesign wurde bisher in keinem anderen Forschungsprojekten beleuchtet. Somit stellen die in AP3.B erzielten Ergebnisse ein Novum der Forschung im Bereich der Festkörperbatterieproduktion dar.

Die im AP4.B erzielten Ergebnisse entsprechen größtenteils dem internationalen Stand der Technik. Die Größenordnungen der Ergebnisse sind im Einklang mit den Ergebnissen anderer internationaler Forschungsgruppen.

## **II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichung**

Im Rahmen des Projektes veröffentlichte das PEM einen Beitrag im 9. Heft der Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (ZWF) mit dem Titel „Automatisierter Stapelprozess zur Herstellung von Festkörperbatterien“ (DOI 10.1515/zwf-2022-1116). Im Beitrag werden die notwendigen Prozessschritte zur Herstellung einer Festkörperbatterie mit oxidischem Elektrolyten anhand einer generischen Prozesskette methodisch auf Ihre Fähigkeit zur Skalierung bewertet. Darauf aufbauend wird der Prozessschritt des Stapelns, als ein Prozessschritt mit niedriger Bewertung in der Skalierbarkeitsuntersuchung, herausgegriffen und der im OptiKeraLyt-Projekt entwickelte Stapelprozess erläutert. Die Ergebnisse der Stapeluntersuchung wurden diskutiert und Handlungsbedarfe abgeleitet.

---

(Hochschulreinrichtung Stempel, Unterschrift)

---

(Stempel, rechtsverbindliche Unterschrift)