Zink-Ionen-Batterien für die stationäre Energiespeicherung – Fertigung und Assemblierung (InFab)

Teilvorhaben: ***Produktionstechnik für ZIB***

acp systems AG

Schlussbericht
Januar 2021 – Juni 2024

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:

Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

acp systems AG	Förderkennzeichen: 03EI3040A
Vorhabenbezeichnung: Zink-Ionen-Batterien für die stationäre Energiespeicherung - Fertigung und Assemblierung (INFAB) Teilvorhaben: Produktionstechnik für ZIB	
Projektbeteiligte: acp systems AG, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), Helmut Hechinger GmbH & Co. KG, Universität Stuttgart - Institut für Photovoltaik	
Laufzeit des Vorhabens: 01/2021 – 12/2023 – verlängert bis 06/2024	
Berichtzeitraum: 01/2021 – 06/2024	
Bearbeiter: Dr. F. Stubhan B. Düperthal	

Datum: 16.06.2025

Inhaltsverzeichnis

I. Projektbeschreibung 5
I.1 Aufgabenstellung 5
I.2 Projektvoraussetzungen 6
I.3 Vorhabenplanung & -ablauf 6
I.4 Stand der Wissenschaft & Technik 6
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 6
II. Projektdarstellung 7
II.1 Verwendung der Zuwendung & Ergebnisse 7
II.1.1 Verwendung der Zuwendung & Ergebnisse AP1 7
II.1.2 Verwendung der Zuwendung & Ergebnisse AP2 18
II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 23
II.3 Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeit 23
II.4 Nutzen & Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 24
II.5 Fortschritt bei anderen Stellen 24
II.6 Veröffentlichung der Ergebnisse (erfolgt & geplant) 24
III. Anhang 25
III.1 A1 Literaturverzeichnis 25

I. Projektbeschreibung

Im ersten Teil des Schlussberichts erfolgt die kurze Darstellung zu der Projektaufgabenstellung, den Voraussetzungen des Vorhabens, der Planung und dem Ablauf des Vorhabens, dem wissenschaftlich-technischen Stand sowie der Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

I.1 Aufgabenstellung

Im Verbundprojekt INFAB wurde ein Batteriespeichersystem für stationäre Anwendungen auf Basis einer Zink-Ionen-Batterie (ZIB)-Zellchemie mit wässrigem Elektrolyten entwickelt. Ziel war die Erforschung und Entwicklung einer Anlagen- und Prozesstechnik zur automatisierten Herstellung, um den Weg für die Großserienproduktion des Speichersystems zu bereiten.

Der Bedarf an stationären Stromspeichern zur Speicherung erneuerbarer Energien, insbesondere für Heimspeicheranwendungen, wird in Zukunft stark zunehmen. Die ZIB-Technologie überzeugt durch einen einfachen Systemaufbau, hohe Betriebssicherheit, ungiftige Materialien und umweltfreundlichen Rohstoffabbau in der EU. Zentrale Ziele des Vorhabens für die acp waren die anwendungsspezifische Erforschung der Zink-Ionentechnologie sowie die Entwicklung von Herstellungsprozessen der kritischen Batteriekomponenten und des Batteriestacks.

Dazu wurden flexible und automatisierte Fertigungsprozesse sowie mehrere Prozess- und Montageanlagenmodule erforscht und aufgebaut. Diese Forschungs- und Entwicklungsarbeiten schaffen die Voraussetzungen für die Großserienproduktion der Batteriespeicher.

Das Projekt steht im Kontext der Batterieforschung für stationäre Batteriespeicher (SBS). Die Herausforderungen liegen in den Bereichen Sicherheit, Langlebigkeit, Investitionskosten, anwendungsspezifische Speicherkosten (Levelized Cost of Energy Storage, LCOS), Rohstoffverfügbarkeit sowie Umwelt- und Sozialverträglichkeit im gesamten Produktlebenszyklus.

Im Rahmen des Projekts wurden neuartige dreidimensionale Elektrodenstrukturen entwickelt, um eine hohe Energiedichte pro Zelleinheit und gleichzeitig hohe Leistungsdichte zu erzielen. Diese Strukturen reduzieren den Innenwiderstand und verbessern die Stabilität der Elektroden sowohl mechanisch (Kathode) als auch elektrisch (Anode).

Die Entwicklungen auf Material- und Zellebene flossen in eine nachhaltige Zell-, Modul- und Systemarchitektur ein, einschließlich der Entwicklung geeigneter Herstellungsverfahren für wiederaufladbare ZIB-Zellen, die für die industrielle Großserienproduktion skaliert werden können. Ziel war es, den Technologiereifegrad der ZIB-Technologie und der zugehörigen Fertigungstechnik auf TRL 6 (Prototyp in Einsatzumgebung) anzuheben.

Zentrale Ziele des Vorhabens sind:

- Modellierung der ZIB-Zellchemie,
- Entwicklung von Herstellungsprozessen und einer Architektur für ein Zink-Ionen-SBS auf Basis wässriger Elektrolyte,
- Bau und Charakterisierung von Zell- und Stackprototypen,
- Entwicklung geeigneter Batterie- und Energiemanagementsysteme,
- Implementierung von flexiblen automatisierten Fertigungsprozessen für die Herstellung eines Batteriesystems und Entwicklung von einzelnen Anlagenmodulen,
- Schaffung der technologischen Grundlagen und Konzepte für eine Großserienproduktion der SBS.

I.2 Projektvoraussetzungen

I.3 Vorhabenplanung & -ablauf

Das Gesamtvorhaben ist in mehrere Teile unterteilt, die sich mit den Bereichen Zellchemie, Zell- und Modularchitektur, Prozesstechnik, Produktionstechnik und Steuerungstechnik (BMS und EMS) befassen.

Im Bereich der Zellchemie kommen verschiedene Varianten in Frage. In großen Phasen des Projekts wurden diese Varianten auf Basis eines im Projekt erarbeitenden Anforderungsprofils erforscht und entsprechend ausgewählt. Parallel wurde auch an einer geeigneten fertigungsgerechten Architektur der Einzelzellen und Module geforscht. Nach Auswahl der Architektur und der geeigneten Prozesstechnologie zur Herstellung der Batteriezellen wurden die jeweiligen Einzelprozesse erforscht, mit dem Ziel, neben dem Erfüllen der geforderten Betriebseigenschaften der Zellen auch eine effiziente Großserienproduktion zu ermöglichen. Für die jeweiligen Teilprozesse wurden Anlagenmodule zur Durchführung der Forschungsarbeiten auf einer relevanten Skala entwickelt und es erfolgten Prozessentwicklungsarbeiten an den einzelnen Anlagen. Zur Vorbereitung einer effizienten Großserienproduktion wurde der Produktionsablauf entsprechend dem „Industrie 4.0"-Gedanken entwickelt. An den jeweiligen Schnittstellen erfolgt ein ständiger Austausch mit den jeweils anderen Projektpartnern, damit die jeweiligen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ineinandergreifen konnten. Hierzu wurde an regelmäßigen Treffen, die online aber auch als Präsenztreffen stattfanden, teilgenommen. Des Weiteren gab es bilaterale Treffen zwischen der acp und dem ISE als auch Hechinger, um sich abzustimmen und Fortschritte zu erzielen.

I.4 Stand der Wissenschaft & Technik

Über einen längeren Zeitraum hinweg prägten Bleibatterien den Markt für stationäre Energiespeicher. In den letzten Jahren wurden sie jedoch zunehmend von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) verdrängt, die aufgrund sinkender Preise und besserer Lebensdauer Vorteile in der Elektromobilität bieten. Während LIBs im Mobilitätssektor durch ihre hohe Energiedichte eine größere Zahlungsbereitschaft ansprechen, stellen stationäre Anwendungen andere Anforderungen und ermöglichen eine größere Flexibilität bei der Wahl der Speichertechnologie und -architektur. Die Entwicklungsziele fokussieren sich darauf, Batteriespeicher mit geeigneten Zellchemien und Zellarchitekturen zu schaffen, die sowohl geringere Investitionskosten als auch niedrigere spezifische Betriebskosten ermöglichen. Neben der rasant ansteigenden globalen Nachfrage nach Batteriefertigungskapazität stellen also weitere Trends in Bezug auf Materialvielfalt, Zelldesign und Zellformate eine Herausforderung sowohl für Anlagenbauer als auch für Zellhersteller gleichermaßen dar. Im Bereich der Investitionen wurde deshalb zu Beginn des Projektes im Wesentlichen auf Prozesse, die dem Stand der Technik entsprechen, zurückgegriffen. Dies trifft insbesondere auf den Herstellungsprozess des Rahmens, den Granulierungsprozess und die Handhabung und Weiterverarbeitung des Granulats zu. Im Bereich des Heißverpressens wurde intern ein entsprechendes Werkzeug entwickelt, in dem die weitreichenden Erfahrungswerte der acp eingeflossen sind. Das gleiche gilt für die Entwicklung der Stackpresse. Verfahren oder Schutzrechte Dritter sind nicht benutzt worden.

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben den Projektpartnern im Konsortium 'InFab' hat die acp systems AG mit den folgenden anderen Stellen erfolgreich zusammengearbeitet:

1) ***Formstoff-Weiser*** - Austausch zu und Durchführung von Pulvermischprozessen für Batterieelektrodenmaterial
2) ***EIRICH Maschinen- und Anlagenbau GmbH*** - Austausch zu und Durchführung von Pulvermischprozessen für Batterieelektrodenmaterial

3) ***Berger Maschinenbau*** – Austausch zu und Durchführung von Nivellierungsversuchen zur Elektrodenherstellung
4) ***Wehl & Partner GmbH*** – Herstellung von Mustern und Rahmenprototypen zur Evaluierung des Rahmendesigns
5) Werner Koch Maschinentechnik GmbH – Austausch zu und Durchführung von Versuchen zur volumetrischen Dosierung des Elektrodengranulats

II. Projektdarstellung

Im zweiten Teil des Schlussberichts erfolgt die eingehende Darstellung zur Zuwendungsverwendung und den erzielten Ergebnissen, den Positionen des zahlenmäßigen Nachweises, der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit, dem voraussichtlichen Nutzen und der Verwertbarkeit der Ergebnisse, dem parallelen Fortschritt auf dem Arbeitsgebiet bei anderen Stellen sowie den erfolgten bzw. geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse.

II.1 Verwendung der Zuwendung & Ergebnisse

Darstellung der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,

Nachfolgend werden die durchgeführten Tätigkeiten und die erarbeiteten Ergebnisse von acp systems AG in den verschiedenen Arbeitspaketen dargestellt. Diese Ergebnisse beziehen sich auf folgenden Arbeitspakete: AP 1.4 und AP 2.3. Alle geplanten Arbeiten wurden durchgeführt.

II.1.1 Verwendung der Zuwendung & Ergebnisse AP1

In AP 1 erfolgte die Entwicklung der Batteriezelle und die Evaluation verschiedener Prozesstechnologien für deren Herstellung. Es wurde ein Produktionskonzept für die Batteriezellen entwickelt.

Nach der Festlegung der Ableiter- und Zellarchitektur in AP 1.3 erfolgte in AP 1.4 die Entwicklung einer geeigneten Produktions- und Automatisierungstechnik, auf Basis derer im weiteren Verlauf des Projekts einzelne Prototypenanlagenmodule zur Herstellung der Batteriezellen aufgebaut wurden.

Im Vergleich zum ursprünglichen Plan konnte das Zelldesign und damit das Produktionskonzept aufgrund der aktuellen Entwicklungsergebnisse vereinfacht werden. Im bipolaren Aufbau wird nur noch eine Ableiterfolie pro Zelle benötigt und als Separator kann eine einfache Zelluloseschicht in Form von handelsüblichen Büropapier verwendet werden. Durch ein innovatives Dichtungskonzept konnte die Zahl der Komponenten im geplanten Aufbau weiter reduziert werden. Der in der Produktion schwierig handzuhabende Klebeprozess wurde durch Heißverstemmen ersetzt, wodurch auch der Klebstoff als weitere ‘bill of material’ Komponente entfällt.

Die Herstellung des Aktivmaterials in Form von Pulver oder Granulat wird aufgrund der stark unterschiedlichen Anforderungen an die Produktionstechnologie (chemische Verfahrenstechnik) und die Reinheit nicht als Bestandteil der Zellfertigung (automatisiertes Assembly) betrachtet, sondern als Zuliefereraufgabe. Um die Herstellparameter für das Granulat zu definieren, hat die acp in Zusammenarbeit mit dem ISE und Granulierungsexperten den Prozess in mehreren Iterationsschritten vom Labormaßstab auf Produktionsmaßstab hochskaliert. In Kombination mit den Kathodenpressversuchen, die parallel durchgeführt wurden, war es dadurch möglich, eine Granulatspezifikation zu erstellen. In dieser sind die wichtigen Parameter wie Komposition, Korngröße und Restfeuchte definiert.

Entsprechend wurde folgendes Ausgangsmaterial für die Zellfertigung vorläufig festgelegt:

1 Stromableiter, Edelstahlfolie, gestanzt (vorläufig gelasert), gereinigt mit CO_2
2 Rahmen aus Kunststoff Polypropylen (PP) mit thermoplastischem Polyethylen (TPE) Dichtung, 2K-Spritzguss
3 (vorläufig: Rahmen PP mit Nut für Dichtung 3D-Druck und Quad-Ring Dichtung aus TPE)
4 Aktivmaterial: Granulat: $MgSO_4$/$ZnSO_4$/Kohlenstoffpulver/Graphit/Binder
5 Separatorfolie aus Papier, gestanzt (vorläufig geschnitten)

Das in diesem AP entwickelte effiziente, kostenoptimierte Produktionskonzept für die Zellfertigung (MS1.4.1) beinhaltet folgende Produktionsprozessschritte:

1 Einlegen des Rahmens in Pressform, topside down
2 Auflegen des gereinigten Stromableiters , topside down
3 Heissverstemmen von Rahmen und Stromableiter (alternativ Kleben)
4 Wenden von Rahmen/Stromableiter topside up
5 Einlegen in Presswerkzeug
6 Vorbereitung Aktivmaterial (vortrocknen, sieben)
7 Dosierung Aktivmaterial durch Wiegen
8 Einfüllen/Nivellierung des Aktivmaterial über die Zellfläche mit Rakelvorrichtung
9 Heißpressen des Aktivmaterials
10 Trocknung Kathode (Raumtemperatur für 24 Stunden)

Die obigen Produktionsprozessschritte wurden zwar aus Laborversuchen abgeleitet, müssen aber in weiteren Vorversuchen durch acp auf die Produktionsanforderungen hin weiterentwickelt und verifiziert werden. In der bisherigen Projektplanung wurde davon ausgegangen, dass die im Labor entwickelten Prozessschritte direkt in der Produktion einsetzbar wären. Dies hat sich im bisherigen Projektverlauf leider nicht bestätigen lassen (z.B. ersetzen von Kleben im Labor durch Heißverstemmen; Heißpressen im Labor benötigt lange Vorheizzeiten, die nicht produktionstauglich sind; Dosieren und Nivellierung des Aktivmaterials erfolgen im Labor manuell, nicht produktionstauglich). Ebenso dauert die Trocknung des Aktivmaterials noch zu lange, was aber durch geeignete Durchlauföfen industrietauglich umgesetzt werden kann.

Der Stromableiter sollte vor der Verarbeitung gereinigt werden. Dies verhindert, dass eventuelle Verunreinigungen das Aktivmaterial kontaminieren und so die chemischen Reaktionen negativ beeinflussen. Hier kann es insbesondere zu erhöhter Wasserstoffentwicklung kommen, die sich negativ auf die Kapazität der Zelle auswirkt. Ebenso wird sichergestellt, dass es zu keinen negativen Einflüssen in der elektrischen Leitfähigkeit kommt.

Im Rahmen des Projekts wurde eine Anlage zum innovativen, trockenen Reinigungsverfahren auf Basis der CO_2-Schneestrahl-Technologie angeschafft und in Betrieb genommen. Dazu wurde die Anlage inklusive einem Vakuumwerkstückhalter so konstruiert, dass die empfindliche Stromleiterplatte unbeschadet und effizient in einem Umlauf gereinigt werden kann.

Abbildung 1: Schneestrahlreinigungsanlage

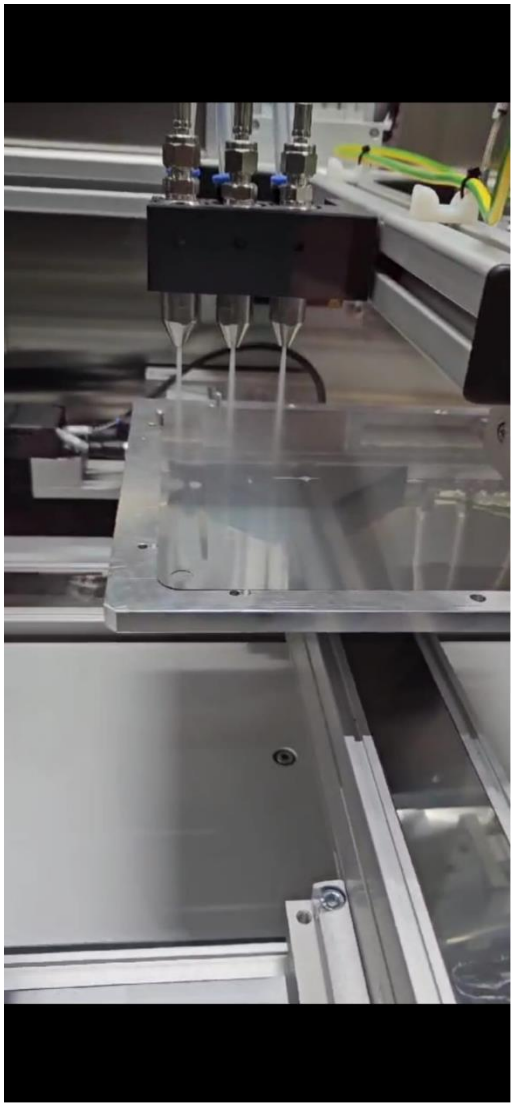

Abbildung 2: Schneestrahldüsen bei Reinigung der Bipolarplatte auf Vakuumtisch

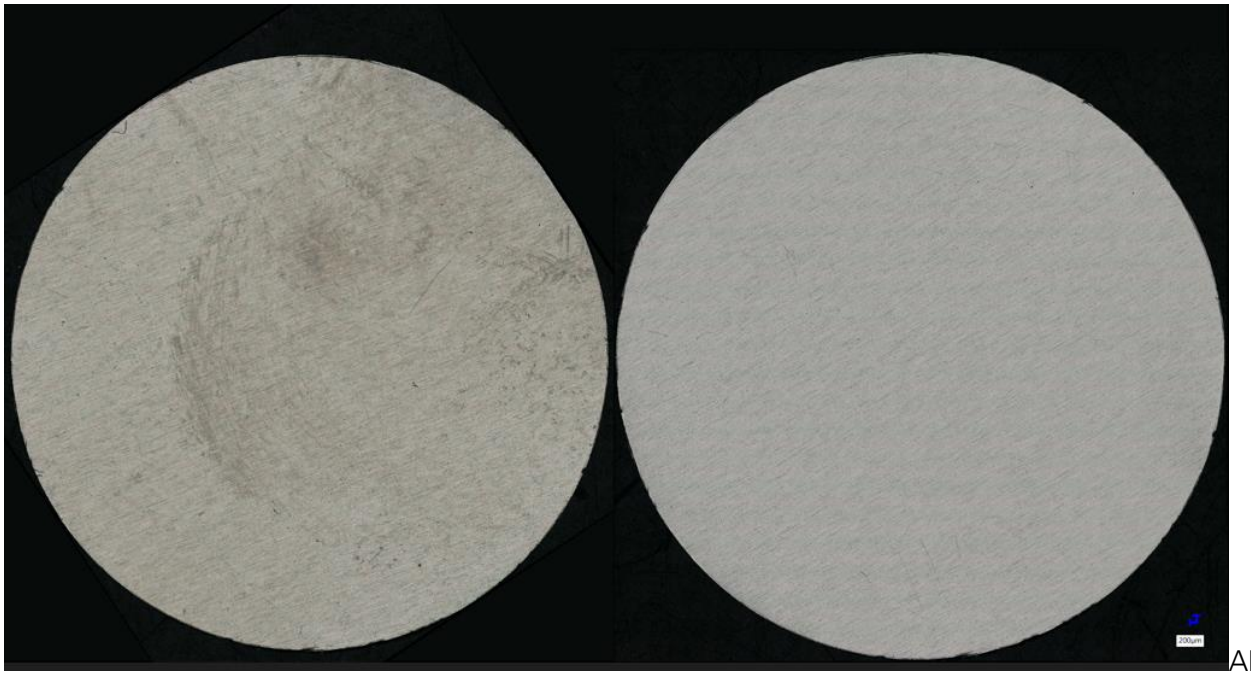

ABB:

Abbildung 3: Vergleich Stromableiter vor und nach der Reinigung

Das Dispensen des Elektrolyten, die Kombination mehrerer Zellen mit Kopf- und Fußplatte und das Einbringen und Verspannen der Zuganker gehören zum folgenden Stacking-Prozess und wurden in AP 2.3.3 abgehandelt.

Daraus wurde folgendes Automatisierungskonzept für die Zellfertigung (MS1.4.2) entwickelt, das bezüglich Taktzeit an das neuentwickelte Automatisierungskonzept der Stackfertigung (Kap. 1.3.3) angepasst wurde, um eine Taktzeit von 22,5 s zu erreichen:

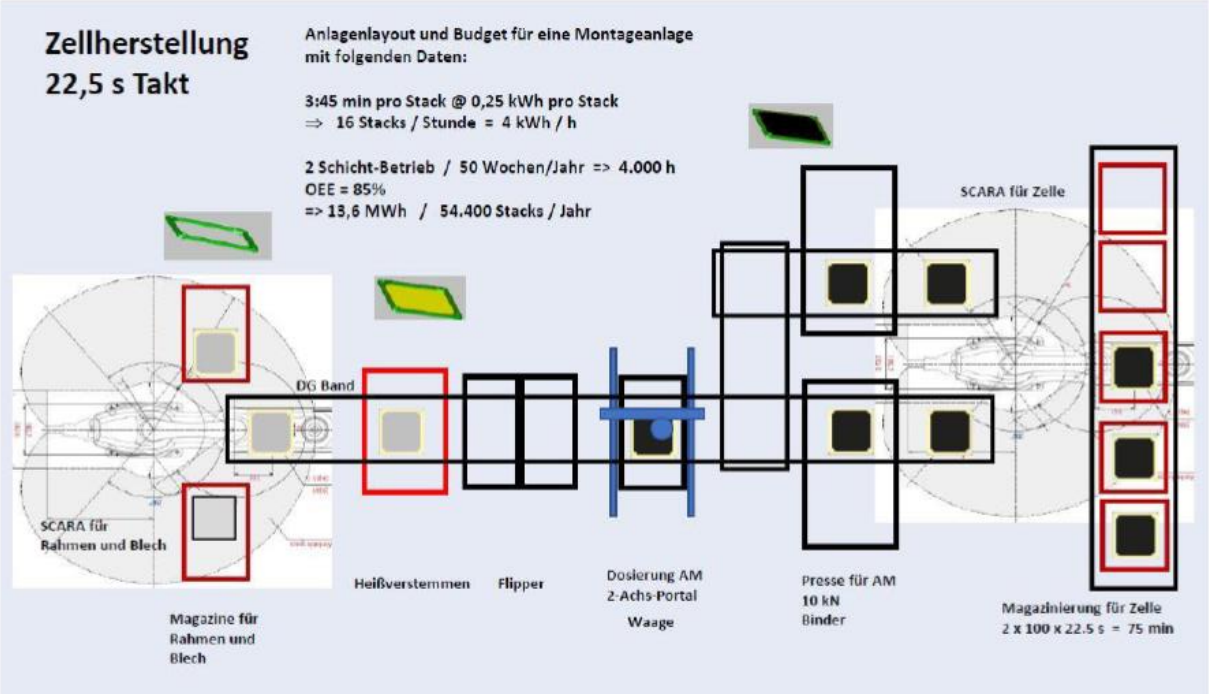

Abbildung 4: Skizze Optimiertes Automatisierungskonzept Zellfertigung (22,5 s Takt)

Verschiedene Versuche zur Auslegung der Heizleistung des acp Kathodenpresswerkzeuges als Teil der Presse wurden durchgeführt. Entsprechende Temperaturverläufe zur Ermittlung der Wärmekapazität von Zelle und Werkzeug sind in der nachfolgenden Abbildung 5 dargestellt. Das entsprechende Werkzeug wurde konstruiert und aufgebaut.

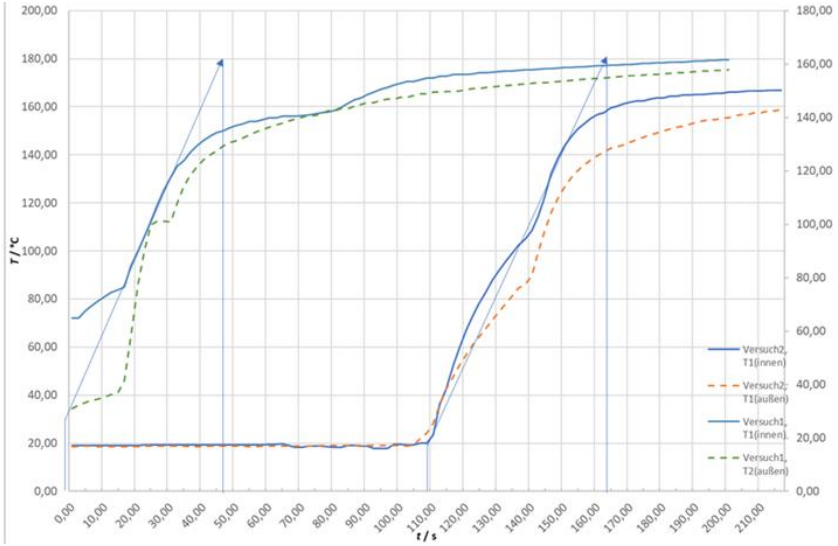

Abbildung 5: Temperaturverläufe der Kathode im ISE-Presswerkzeug

Die Prozessschritte Dosierung des Aktivmaterials, Nivellierung des Aktivmaterials und das anschließende Heißpressen wurden in einem Produktionsmodul realisiert. Die Presse und das acp Heißpresswerkzeug sind in Abbildung 6 dargestellt.

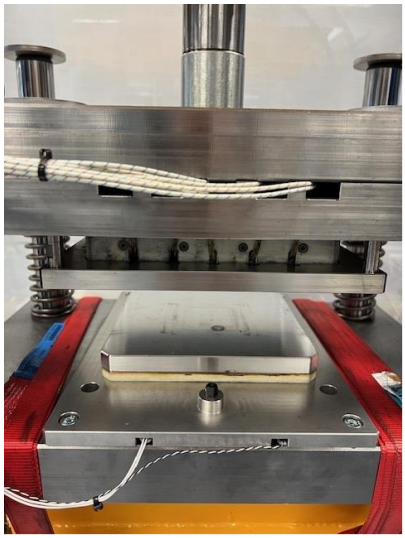

Abbildung 6: Heißpresse (links) und acp Heißpresswerkzeug rechts

Der Aufbau der ersten Prototypen der Produktionsmodule hat sich verzögert, da zahlreiche Vorentwicklungs-, Montage- und Inbetriebnahme Tests durchgeführt werden mussten, die mehr Personalkapazität und auch mehr Zeit als ursprünglich geplant erforderten.

Abbildung 7: acp Werkzeug zum Heißverstemmen

Das Prototyp-Produktionsmodul zur Herstellung von Zellen für die Prozessschritte Dosierung des Aktivmaterials, Nivellierung des Aktivmaterials und das anschließende Heißpressen wurde in Betrieb genommen. Versuche zur Ermittlung der geeigneten Prozessparameter wurden durchgeführt. Dabei wurde ein Schwerpunkt auf das Erreichen der angestrebten Taktzeit in der Prototypenphase von 45s gelegt. Es wurden zahlreiche Kathoden durch Heißpressen des Aktivmaterial-Granulats hergestellt. Parallel zur Entwicklung der Produktionsprozesse erfolgte eine Optimierung des Designs des Prototyp-

Produktionsmoduls. Ein optimiertes acp Kathodenpresswerkzeug (siehe c) in Abbildung 8 wurde entwickelt und aufgebaut.

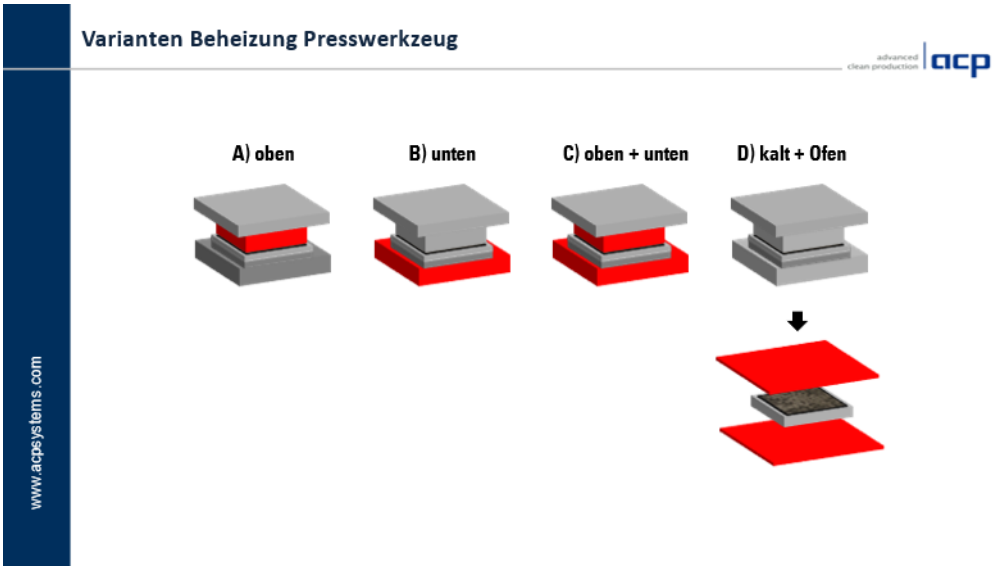

Abbildung 8: Varianten Beheizung acp Presswerkzeug

Das Prototyp-Produktionsmodul Zellherstellung im neuen Batterietechnikum der acp ist in Abbildung 9 dargestellt.

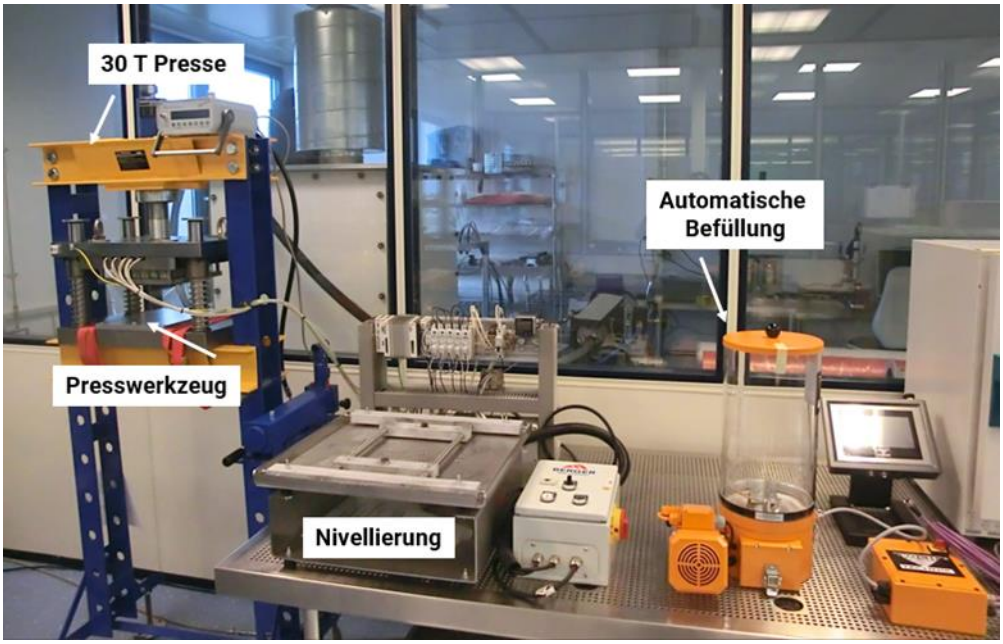

Abbildung 9: Prototyp-Produktionsmodul Zellherstellung

Das oben dargestellte Prototyp-Produktionsmodul wurde in Betrieb genommen und zahlreiche Versuche zur Prozessentwicklung wurden durchgeführt:

Abbildung 10: Pressergebnisse PVDF Binder mit Aktivkohle

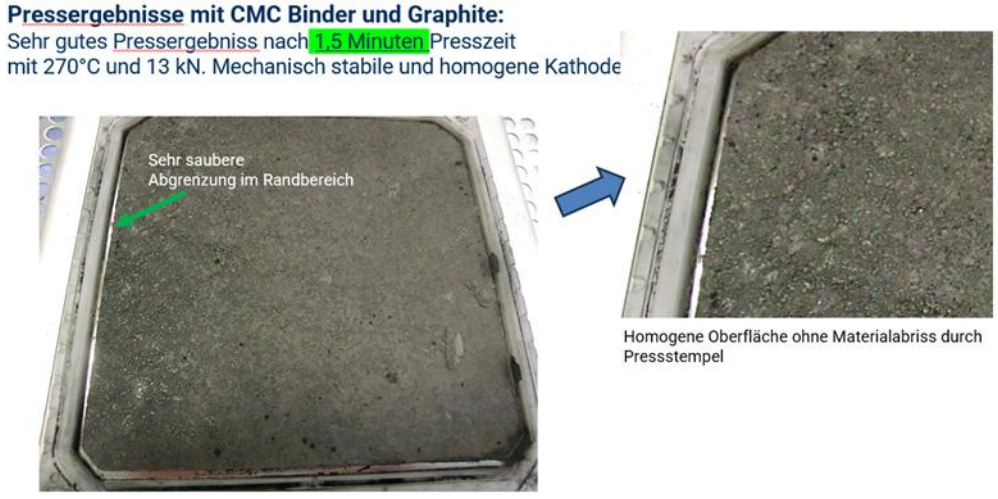

Abbildung 11: Pressergebnisse CMC Binder und Graphit (90s Presszeit)

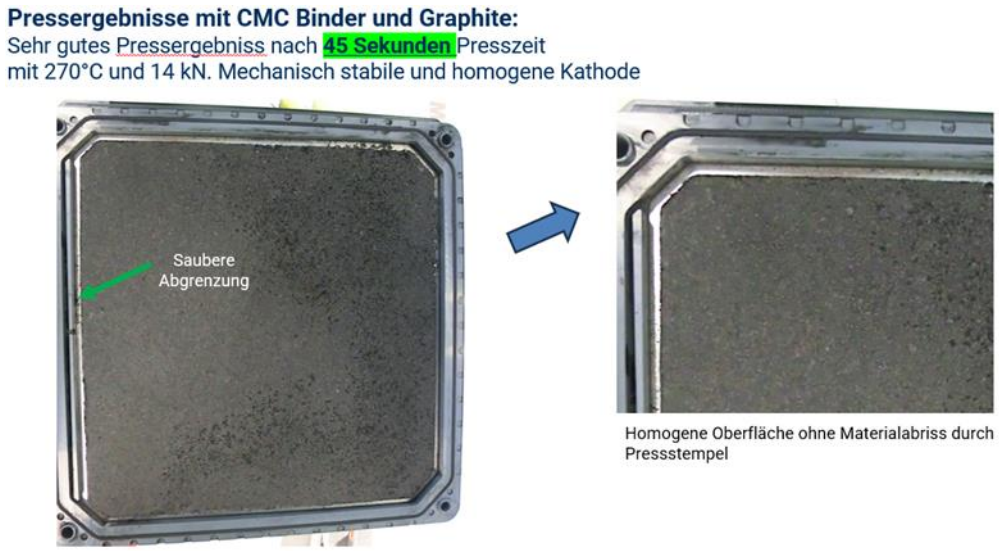

Abbildung 12: Pressergebnisse CMC Binder und Graphit (45s Presszeit)

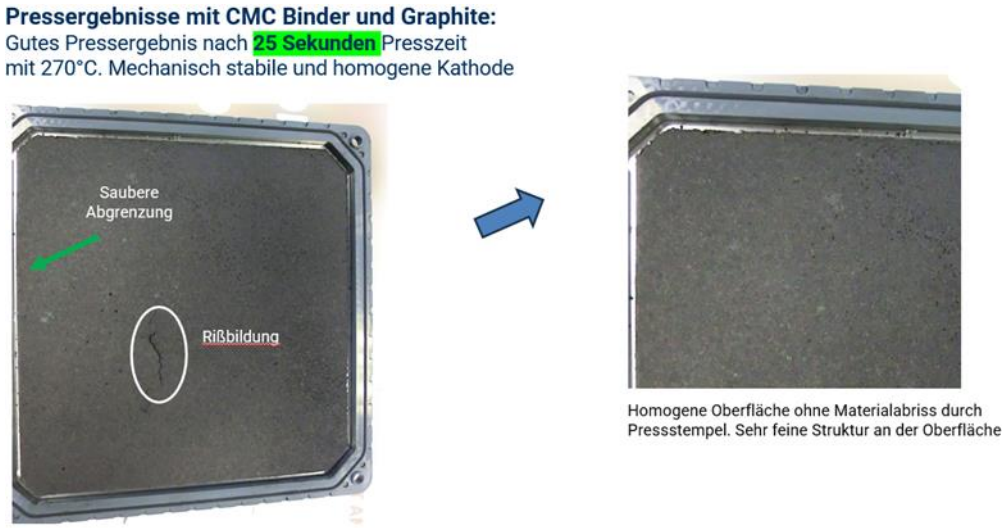

Abbildung 13: Pressergebnisse CMC Binder und Graphit (25s Presszeit)

Der Meilenstein MS1.4.3 „Erste Prototypen der Produktionsmodule aufgebaut und in Betrieb genommen“ wurde in M27 erreicht. Der Meilenstein MS1.4.4 „Transfer der Prototyp-Produktionsmodule (Zelle) ans Fraunhofer ISE für Testzwecke“ fand in Abstimmung mit ISE erst kurz vor Projektende statt, da die weitere Prozessentwicklung im betriebseigenen Technikum Batterie der acp geplant waren.

Die intensive Prozessentwicklung bei acp hat zu guten bis sehr guten Ergebnissen geführt, wie oben gezeigt. Die angestrebte Taktzeit von 45s des Heißpressens der Kathode ist erreichbar, muss aber durch eine Fortführung der Prozessentwicklung abgesichert werden. Außerdem müssen in der Prozessentwicklung noch weitere Parameter wie die Stabilität der Kathode, die Benetzbarkeit des Aktivmaterials mit Elektrolyt, die Porosität und die elektrochemische Performance optimiert werden.

Das Prototyp-Produktionsmodul zur Herstellung von Zellen für die Prozessschritte Dosierung des Aktivmaterials, Nivellierung des Aktivmaterials und das anschließende Heißpressen wurde weiter optimiert. Versuche zur Ermittlung der geeigneten Prozessparameter für die vom ISE modifizierte, weiterentwickelte Zellchemie (neuer Elektrolyt, Granulat mit PU Binder) wurden durchgeführt.

Es wurden insgesamt neun Parameter identifiziert, die das Ergebnis der Pressung beeinflussen. Insbesondere die Restfeuchte, die Dosierung nach Volumen und die genaue Nivellierung sind hier kritisch.

Parameter	Kommentar
Restfeuchte	sehr kritisch
Dosierung (Volumen)	sehr kritisch
Dosierung (Gewicht)	Kritisch
Korngrösse und Verteilung	Kritisch
Nivellierung	sehr kritisch
Presskraft	Kritisch
Presstiefe	Kritisch
Presszeit	Kritisch
Temperatur	Kritisch

Nach mehreren Iterationen, um den Pressvorgang zu stabilisieren und zu optimieren, wurde eine sehr gute Wiederholgenauigkeit in der Kathodenherstellung erreicht.

Pressprotokoll

Ergebnisse

#	Name	Trocknungbatch	Restfeuchte des Granulats, %	Granulatbatch	Trockenmasse des Granulats, g	Presskraftbereich, psi	Kathodendicke, mm					
							a	b	c	d	e	mittelw
1	P0605-03	T0604-02 T0604-03	36,33	G0515-02 G0515-07	91,0	500	4,84	4,95	4,92	4,95	5,00	4,93±0,04
2	P0605-04	T0604-02 T0604-03	36,33	G0515-02 G0515-07	91,0	450	4,87	4,84	4,93	4,86	4,92	4,88±0,03
3	P0605-05	T0605-01 T0605-02	35,20	G0515-02	91,0	600	4,89	4,80	4,83	4,81	4,86	4,84±0,03
4	P0605-06	T0605-01 T0605-02	35,20	G0515-02	91,0	550	4,91	4,88	4,85	4,84	4,87	4,87±0,02
5	P0605-07	T0605-01 T0605-02	35,20	G0515-02	91,0	600	4,87	4,86	4,82	4,94	4,90	4,88±0,03
6	P0606-01	T0606-01	40,54	G0515-03	92,1	500	4,95	4,87	4,98	4,90	4,97	4,93±0,04
7	P0606-02	T0606-01	40,54	G0515-03	92,0	-	4,75	4,69	4,84	4,71	4,81	4,76±0,05
8	P0606-03	T0606-02	41,15	G0515-03	92,0	400	4,84	4,84	4,81	4,92	4,87	4,86±0,03
9	P0606-04	T0606-02	41,15	G0515-03	92,0	500	4,85	4,87	4,83	4,89	4,91	4,87±0,02
10	P0606-05	T0606-03	42,60	G0515-03	92,0	400	4,94	4,98	4,91	4,88	4,98	4,94±0,03
11	P0606-07	T0606-03	42,60	G0515-03	92,0	450	4,92	4,92	4,89	5,00	4,98	4,94±0,04
12	P0606-08	T0606-03 T0606-04	42,60	G0515-03	92,0	450	4,92	4,93	5,00	4,92	4,97	4,95±0,03
13	P0606-09	T0606-04	42,79	G0515-03	92,0	450	4,93	4,94	4,90	5,00	4,97	4,95±0,03
14	P0607-01	T0606-01 T0606-02 T0606-03 T0606-04	41,24	G0515-03	92,0	500	4,90	4,90	4,90	4,96	4,94	4,92±0,02
15	P0607-02	T0606-05	43,15	G0515-01	92,0	500	4,93	4,88	4,87	4,84	4,91	4,89±0,03
16	P0607-03	T0606-05	43,15	G0515-01	92,0	500	4,95	4,88	4,99	4,89	4,94	4,93±0,04
17	P0607-04	T0606-05	43,15	G0515-01	92,0	500	5,00	4,93	4,91	4,88	4,93	4,93±0,03
18	P0607-05	T0606-05	43,15	G0515-01	92,0	600	4,91	4,98	4,89	4,97	4,99	4,95±0,04
19	P0607-06	T0606-06	43,63	G0515-01	92,0	600	4,93	4,84	4,92	4,84	4,90	4,89±0,04
20	P0607-07	T0606-06	43,63	G0515-01	92,0	600	4,95	4,86	4,97	4,86	4,97	4,92±0,05
21	P0607-08	T0607-01	39,58	G0515-04	92,0	400	4,92	4,85	4,95	4,84	4,93	4,9±0,04
22	P0607-09	T0607-01	39,58	G0515-04	92,0	400	4,85	4,89	4,90	4,87	4,94	4,89±0,02
23	P0607-10	T0607-01	39,58	G0515-04	92,0	400	4,90	4,90	4,85	4,99	4,96	4,92±0,04
24	P0607-11	T0607-01	39,58	G0515-04	92,0	500	4,91	4,84	4,95	4,91	4,94	4,91±0,03
25	P0607-12	T0604-01 T0604-05 T0603-02 T0603-03 T0603-04 T0605-01 T0605-02	35,24	G0515-xx	92,0	500	4,88	4,95	4,91	4,90	4,97	4,92±0,03

Abbildung 14: Pressergebnisse

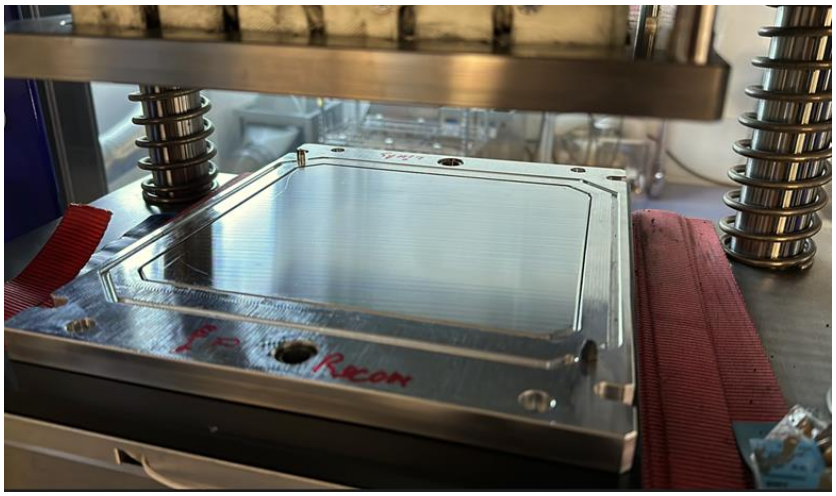

Abbildung 15: Optimiertes acp Kathodenpresswerkzeug

Mit dem Prototyp-Produktionsmodul wurden zahlreiche Versuche zur Prozessentwicklung durchgeführt, mit einem Schwerpunkt auf folgenden Prozessschritten:

1 Granulattrocknung: Es hat sich gezeigt, dass die Restfeuchte den Heißpressvorgang maßgeblich beeinflusst. Sie muss deshalb kontrolliert werden.

2 Dosierung und Nivellierung: Ein genaues Dosieren und Nivellieren sind wichtig für die Herstellung von gleichmäßigen, reproduzierbaren Presslingen.

3 Heißpressen (Reduzierung der Pressdauer)

4 Kathodentrocknung

5 Elektrolytdosierung (Benetzung) (siehe auch AP 2.3)

Abbildung 16: Kathodentrocknung vor weiterer Verarbeitung

Elektrolytdosierung (Benetzung) (siehe auch AP 2.3)

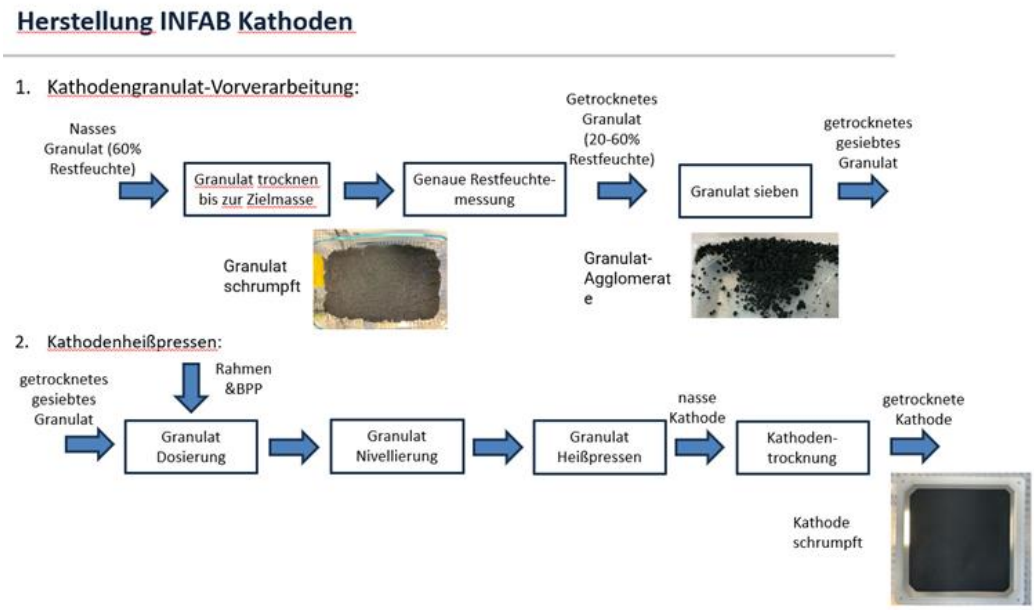

Abbildung 17: Prozessschritte optimierte Kathodenherstellung

Abbildung 18: Ergebnisse optimierte Kathodenherstellung

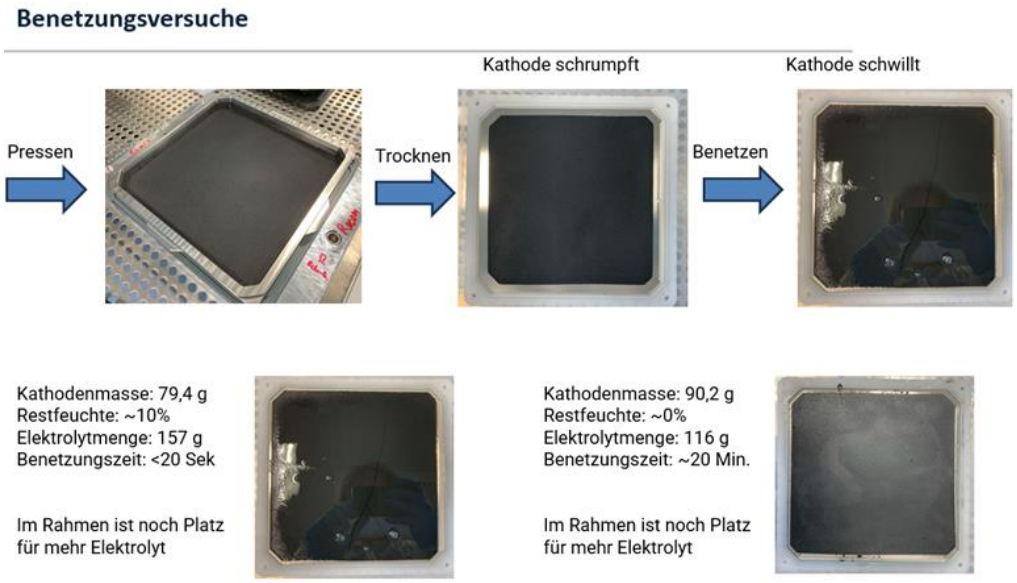

Abbildung 19: Initiale Ergebnisse Benetzungsversuche mit Elektrolyt

II.1.2 Verwendung der Zuwendung & Ergebnisse AP2

Das AP2.3 beschäftigte sich mit dem Produktionskonzept und Anlagenentwicklung zur Herstellung der Batteriestacks

Die in AP 1 entwickelten Zellen sind so gestaltet, dass eine einfache Integration der Zellen in ein Batteriemodul für die Verwendung in Heimspeicher möglich ist. Dabei ist eine Reihe von Varianten bei der Verschaltung und der Einhausung möglich, die aufgebaut, getestet und insbesondere hinsichtlich der spezifischen Herstellungskosten evaluiert werden mussten.

Die Herstellung der Batteriemodule aus den Einzelzellen (in Form sogenannter Stacks) sollte ebenfalls, wie die Zellherstellung, vollständig automatisiert erfolgen. Sobald hierfür die notwendigen Anforderungen an eine Produktions- und Automatisierungstechnik aus den Ergebnissen der APs 2.1

und 2.2 ermittelt waren, erfolgte in AP 2.3 die Konzipierung einer modularen Fertigungsanlage zur automatisierten Herstellung der Batteriestacks. Auf Basis des Produktionskonzepts wurden dann für die wesentlichen Prozessschritte Prototyp-Produktionsmodule unter Anwendung von Lean Design for Manufacturing-Methoden entwickelt (MS2.3.1). Anschließend erfolgte die Konstruktion und der Bau dieser Module, die nach erfolgreichem Test, Validierung und Optimierung bei acp dem ISE für Funktionstests und zum Aufbau von ZIB-Modulen als Funktionsmuster zur Verfügung gestellt wurden.

Ein erster Prototyp des Produktionsmoduls (Stack) wurde aufgebaut und in Betrieb genommen. Damit wurde der Meilenstein MS2.3.2 erreicht. Mit dem manuellen Produktionsmodul wurden erste Stacks erfolgreich aufgebaut, siehe Abbildung 20.

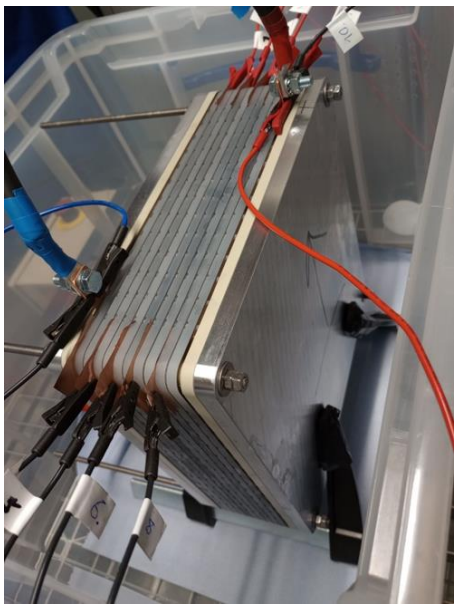

Abbildung 20: Stack der INFAB-Batterie, bestehend aus 10 Zellen

Ein semiautomatisiertes Prototyp-Produktionsmodul wurde auf Basis des ersten Prototyps (Stack) entwickelt und konstruiert, siehe Abbildung 21. Durch die Modifikationen der Zellchemie und, damit verbunden der Produktionsprozesse, wurden zahlreiche Anpassungen notwendig, durch die sich der Aufbau verzögerte, letztendlich aber erfolgreich abgeschlossen werden konnte.

Abbildung 21: Prototyp-Produktionsmodul (Stack)

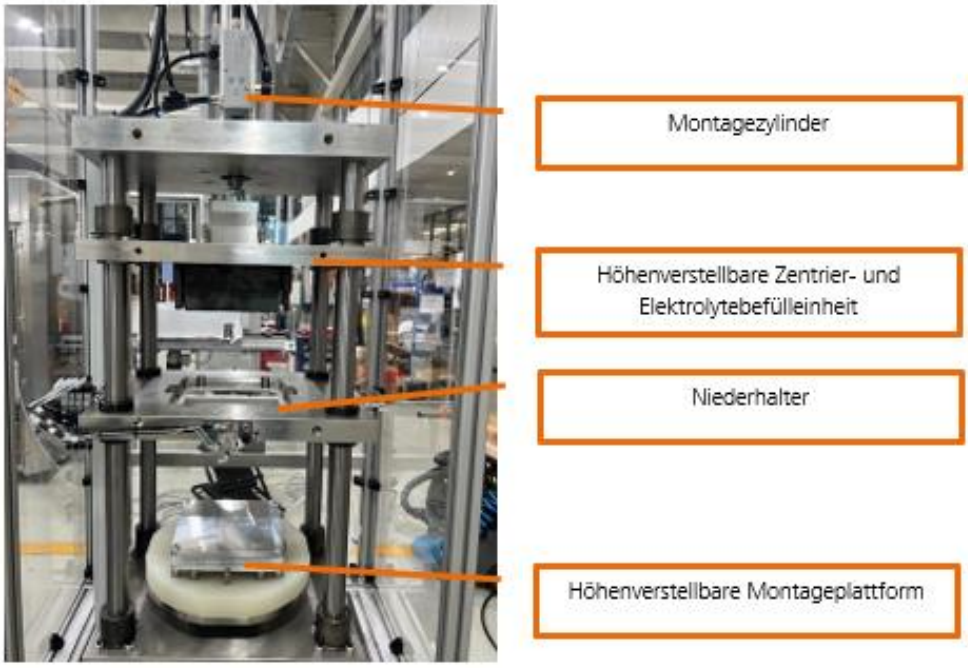

Abbildung 22: Detailaufnahme Stackpresse

Insbesondere die Füllung der Zellen mit dem Elektrolyten stellt eine Herausforderung dar, die in mehreren Iterationsschritten optimiert wurde. Letztendlich hat sich erwiesen, dass eine Kombination aus Druck (Einpumpen) und Vakuum (Evakuierung der Luft in der Zelle) für eine gleichmäßige Durchdringung der Kathode mit Elektrolyt sorgt.

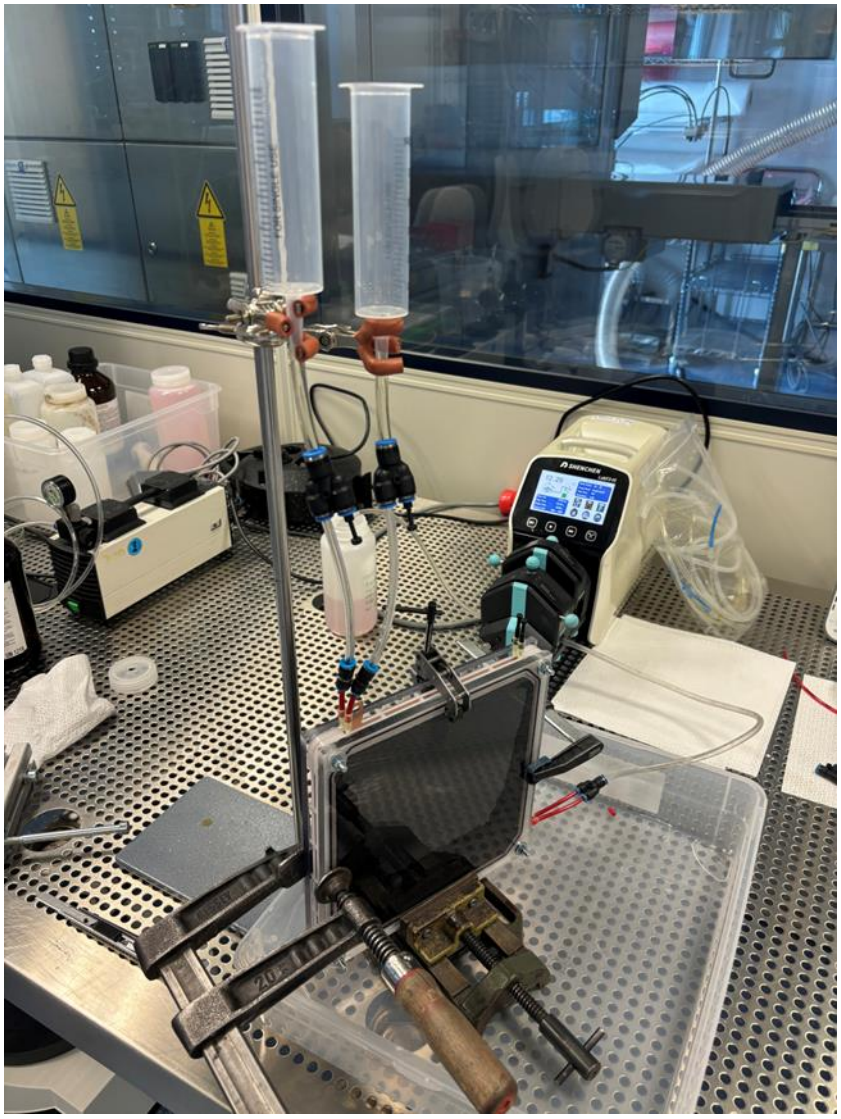

Abbildung 23: Versuchsaufbau zur Optimierung der Elektrolytdosierung

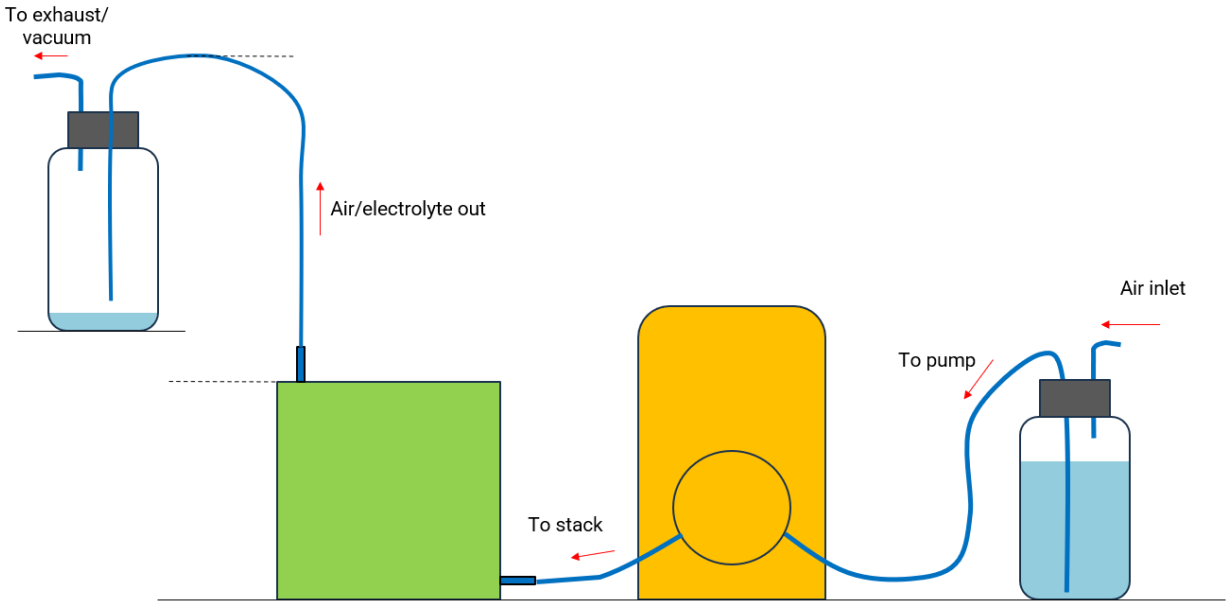

Abbildung 24: Skizze zum Prinzip der optimalen Elektrolytdosierung

Um die genaue Menge Elektrolyt zu dosieren, wurde eine Schlauchpumpe mit 4 Kanälen angeschafft, mit der die entsprechende Menge Elektrolyt in mehreren Schritten am unteren Ende der Zelle in selbige dosiert wird. Um die Füllung zu beschleunigen und zu optimieren, wird am oberen Ende der Zelle die Luft durch ein sehr geringes Vakuum entfernt. Aufgrund der hohen Porosität des Kathodenmaterials ist es notwendig die Luft aktiv zu entfernen. Ein einfaches Ersetzen der Luft durch Elektrolyt hat sich als nicht ausreichend erwiesen, da Lufteinschlüsse in der Zelle zurückbleiben, was sich negativ auf die Zellleistung auswirkt.

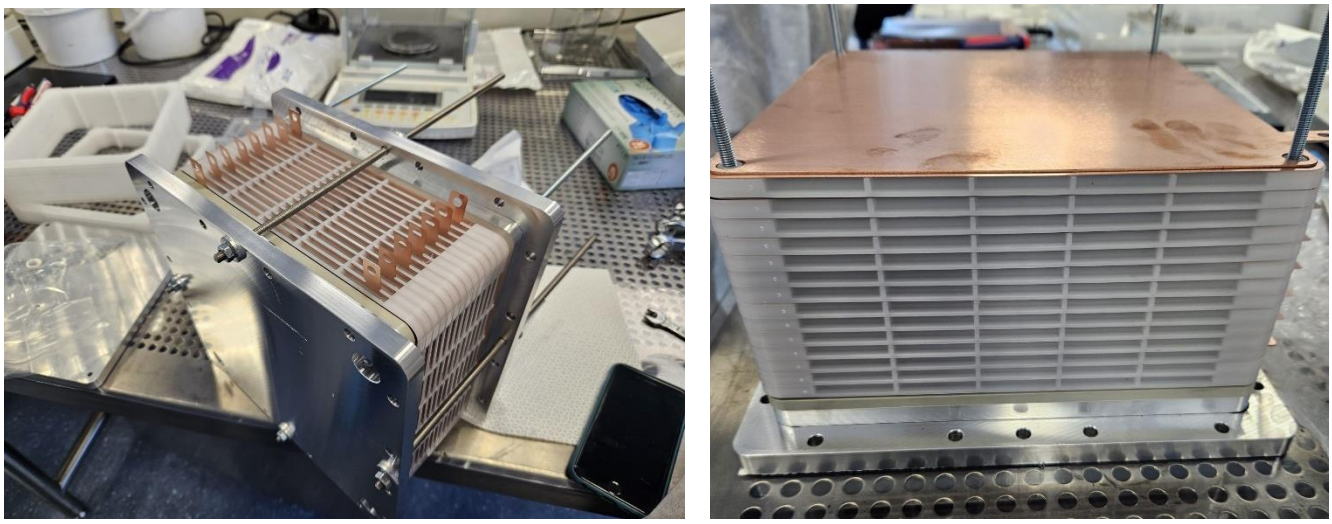

Abbildung 25: Aufbau von ZIB-Modulen als Funktionsmuster

Zum Ende des Projekts sind die Prototyp-Produktionsmodule bei der acp verblieben, um optimiert zu werden. MS2.3.3 muss deshalb als nicht vollständig erreicht bezeichnet werden. Der Transfer ist im Laufe des Jahres 2025 geplant.

II.2 Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die für das Forschungsvorhaben InFab aufgewendeten Kosten teilten sich in Materialkosten, Personalkosten, F&E Fremdleistungen und Reisekosten auf. In der folgenden Tabelle sind die laut Zuwendungsbescheid bewilligten sowie die aufgebrachten Mittel dargestellt:

Kostenart		Laut Zuwendungsbescheid		Aufgebrachte Mittel
Summe				

Die genaue Darstellung der Kosten können dem separat erstellten zahlenmäßigen Nachweis entnommen werden.

Mit den aufgebrachten Mitteln konnten die Projektziele erreicht werden.

II.3 Notwendigkeit & Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Das Projekt INFAB und dessen Ziele waren ambitioniert und daher mit hohen Risiken behaftet.

Die Forschungsarbeiten im Rahmen dieses Projekts sind aufgrund der großen Innovationshöhe mit einem hohen Risiko behaftet und ohne die Zusammenarbeit in einem geeigneten Konsortium nicht umsetzbar. Eine EU-Förderung im Rahmen von Horizon 2020 war zwar grundsätzlich möglich, allerdings waren zum Zeitpunkt der Antragsstellung keine passenden Calls offen und das hier zusammengestellte sehr effiziente Konsortium aus in Deutschland ansässigen Projektpartnern hätte, um den EU-Förderrichtlinien zu entsprechen, um internationale Partner erweitert werden müssen.

Die an dem Forschungsvorhaben beteiligten Industriepartner haben einen signifikanten Teil der Gesamtfinanzierung des Vorhabens getragen. Darüber hinaus beteiligten sich die Unternehmen an den Entwicklungsarbeiten und den Projektkosten des Fraunhofer ISE. Dies unterstreicht die deutliche Absicht der Industriepartner zur Anschlussverwertung der Projektergebnisse.

Die Vorarbeiten und die Arbeiten während des Projekts haben gezeigt, dass trotz guter Voraussetzungen, dass Restrisiko beim Beherrschen der einzelnen Prozesse und insbesondere bei deren Skalierung auf einen industriellen Maßstab sehr groß war.

Der hohe Aufwand der durchzuführenden Arbeiten im Bereich der Prozessentwicklung und Qualitätssicherung, verbunden mit den verbleibenden Entwicklungsrisiken machte eine Förderung des Projektes durch Dritte notwendig. Die hohe Übereinstimmung der Inhalte und der Ziele des Vorhabens

mit den aktuellen gesellschaftlichen Herausforderungen und mit den förder- und den klimapolitischen Zielen der Bundesregierung rechtfertigten die Unterstützung durch öffentliche Mittel. Durch den im Anschluss an das Projekt geplanten Aufbau einer Großserienproduktion für die Speichersysteme durch die Fa. Hechinger entstehen perspektivisch neue und langfristig gesicherte Arbeitsplätze mit hohem Wertschöpfungsanteil. Dieser geplante Aufbau ist weiterhin geplant und die acp ist in engem Austausch mit der Firma Hechinger in Bezug auf das Fertigungsequipment, welches in Kapitel II.1.2 beschrieben ist.

II.4 Nutzen & Verwertbarkeit im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war es, die Voraussetzungen für eine Großserienproduktion von Zink-Ionenbatteriezellen, -modulen und -systemen zu schaffen. Für die acp systems ist es aus strategischer Sicht als Zulieferer für Firmen, die in der Automobilindustrie aktiv sind und die sich aktuell in einer schwierigen wirtschaftlichen Lage befinden, sinnvoll, sich von diesem Industriezweig weiter unabhängig zu machen und stattdessen in einen Wachstumsmarkt wie den der Stromspeicher zu investieren. Aufgrund der hervorragenden Marktaussichten im Bereich der stationären Energiespeicher dienen, die im Projekt entwickelten, modularen Fertigungsanlagen bereits als Vorlage zum Design einer Serienproduktion in einer verknüpften Fertigungslinie.

Die Firma acp nutzt die im Vorhaben erlangten Kompetenzen, um zum einen die Fertigungsanlagen für die Großserienproduktion der Speicher für die Firma Hechinger zu bauen. Zum anderen sollen die neu erlangten Kompetenzen genutzt werden um gleiche oder ähnliche Anlagen zur Batteriezellproduktion als Produkt am Markt zu platzieren.

II.5 Fortschritt bei anderen Stellen

In Bezug auf den Fortschritt bei anderen Stellen wird auf die Abschlussberichte der jeweiligen Konsortialpartner verwiesen. Ein nennenswerter Fortschritt bei den anderen in Abschnitt I.5 genannten Partnern liegt unserer Erkenntnis nach nicht vor.

II.6 Veröffentlichung der Ergebnisse (erfolgt & geplant)

Die acp systems AG unterstützt die Publikationen von wissenschaftlichen und technischen Ergebnissen aus dem Projekt, die auf Fachkonferenzen durch die wissenschaftlichen Projektpartner (Fraunhofer ISE und IPV) präsentiert und somit veröffentlicht wurden und werden.

III. Anhang

III.1 A1 Literaturverzeichnis

Literatur zum Stand der Technik

Literatur

1. Verma, V., Kumar, S., Manalastas, W., Satish, R. & Srinivasan, M. Progress in Rechargeable Aqueous Zinc- and Aluminum-Ion Battery Electrodes. Challenges and Outlook. *Adv. Sustainable Syst.* ***79,*** 1800111; 10.1002/adsu.201800111 (2018).

2. Huang, J. *et al.* Recent Progress of Rechargeable Batteries Using Mild Aqueous Electrolytes. *Small Methods* ***334,*** 1800272; 10.1002/smtd.201800272 (2018).

3. Liu, J., Xu, C., Chen, Z., Ni, S. & Shen, Z. X. Progress in aqueous rechargeable batteries. *Green Energy Environ.* ***3,*** 20–41; 10.1016/j.gee.2017.10.001 (2018).

4. Song, M., Tan, H., Chao, D. & Fan, H. J. Recent Advances in Zn-Ion Batteries. *Adv. Funct. Mater.* ***28,*** 1802564; 10.1002/adfm.201802564 (2018).

5. Li, Y. *et al.* Reaction Mechanisms for Long-Life Rechargeable Zn/MnO 2 Batteries. *Chem. Mater.* ***31,*** 2036–2047; 10.1021/acs.chemmater.8b05093 (2019).

6. Pan, H. *et al.* Reversible aqueous zinc/manganese oxide energy storage from conversion reactions. *Nat. Energy* ***1,*** 16039; 10.1038/nenergy.2016.39 (2016).

7. Marktübersicht Batteriespeicher, September 2018.

8. VARTA Storage GmbH. Energiespeicher von VARTA Storage. Available at https://www.varta-storage.com/produkte/energiespeicher/ (2019).

9. sonnen GmbH. Unsere Stromspeicher-Lösung für Ihr Heim: die sonnenBatterie. Available at https://sonnen.de/stromspeicher/ (2019).

10. Sun, W. *et al.* Zn/MnO_2 Battery Chemistry With H^+ and Zn^{2+} Coinsertion. *J. Am. Chem. Soc.* ***139,*** 9775–9778; 10.1021/jacs.7b04471 (2017).

11. Ming, J., Guo, J., Xia, C., Wang, W. & Alshareef, H. N. Zinc-ion batteries: Materials, mechanisms, and applications. Materials, mechanisms, and applications. *Mater. Sci. Eng. R Rep.* ***135,*** 58–84; 10.1016/j.mser.2018.10.002 (2019).

12. Chao, D. *et al.* An Electrolytic Zn-MnO2 Battery for High-Voltage and Scalable Energy Storage. *Angew. Chem. Int. Ed.* ***58,*** 7823–7828; 10.1002/anie.201904174 (2019).

13. Li, L. *et al.* Functioning Mechanism of the Secondary Aqueous Zn-β-MnO2 Battery. *ACS Appl. Mater. Interfaces* ***12,*** 12834–12846; 10.1021/acsami.9b22758 (2020).

14. Guo, X. *et al.* Zn/MnO_2 battery chemistry with dissolution-deposition mechanism. *Mater. Today Energy* ***16,*** 100396; 10.1016/j.mtener.2020.100396 (2020).

15. Qiu, C. *et al.* The function of Mn2+ additive in aqueous electrolyte for Zn/δ-MnO2 battery. *Electrochim. Acta* ***351,*** 136445; 10.1016/j.electacta.2020.136445 (2020).

16. Xu, W. & Wang, Y. Recent Progress on Zinc-Ion Rechargeable Batteries. *Nano-Micro Lett.* ***11***; 10.1007/s40820-019-0322-9 (2019).

17. Deng, Y.-P. *et al.* The Current State of Aqueous Zn-Based Rechargeable Batteries. *ACS Energy Lett.* ***5,*** 1665–1675; 10.1021/acsenergylett.0c00502 (2020).

18. Lee, B. *et al.* Critical Role of pH Evolution of Electrolyte in the Reaction Mechanism for Rechargeable Zinc Batteries. *ChemSusChem* ***9,*** 2948–2956; 10.1002/cssc.201600702 (2016).

19. Huang, Y. *et al.* Novel Insights into Energy Storage Mechanism of Aqueous Rechargeable Zn/MnO2 Batteries with Participation of Mn2+. *Nano-Micro Lett.* ***11,*** 860; 10.1007/s40820-019-0278-9 (2019).

20. Olbasa, B. W. *et al.* High-Rate and Long-Cycle Stability with a Dendrite-Free Zinc Anode in an Aqueous Zn-Ion Battery Using Concentrated Electrolytes. *ACS Appl. Energy Mater.* ***3,*** 4499–4508; 10.1021/acsaem.0c00183 (2020).

21. Mai, T. Technology Readiness Level. Available at https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/txt_accordion1.html (2012).

22. Projekt sucht nach Alternativen zur Lithium-Ionen-Batterie. *ep Elektro Praktiker* ***78,*** 8.

23. Sarah Michaelis et al., "Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030: Update 2023," 2023.

24. M. Aydemir, R. Mooy, A. Müller, A. Glodde, and F. Dietrich, "High throughput feeding of battery electrode sheets: accuracy vs. throughput vs. electrode-damage," 2021.

25. M. Aydemir, "Modellbasierte Prozessgrenzenermittlung in der Entwicklung und Inbetriebnahme von Hochdurchsatz-Batteriestapelverfahren," Dissertationsschrift, TU Berlin, Berlin, 2021.

26. K. Husseini, N. Schmidgruber, H. W. Weinmann, K. Maibaum, J. Ruhland, and J. Fleischer, "Development of a Digital Twin for Improved Ramp-Up Processes in the Context of Li-Ion-Battery-Cell-Stack-Formation," Procedia CIRP, vol. 106, pp. 27–32, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.150.