

Schlussbericht des Verbundes

- öffentlich einsehbar -

Next gEneration poWer BatterIEs (NEWBIE)

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des Zuwendungsempfängers (ZE) oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den Zuwendungsgeber (ZG) ausdrücklich darauf hinzuweisen.

Zuwendungsempfänger: A - Mercedes-Benz AG (Konsortialführer) B - Trumpf C - BLB D - MAHLE	Förderkennzeichen: 01MV21013A
Kontakt Konsortialführer: Dr. Ümit Tastan Mercedes-Benz AG	Tel.: +49 160 8615994 Email: uemit.tastan@mercedes-benz.com
Laufzeit des Vorhabens: von: 1.6.2021 bis: 30.11.2024	
Datum Bericht: 28.05.2025	

Inhalt

1.	Kurzdarstellung.....	3
1.1.	Aufgabenstellung	3
1.2.	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	3
1.3.	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	4
	Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	5
	Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste .	5
1.5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	5
2.	Eingehende Darstellung	5
2.1.	Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
2.2.	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	36
2.3.	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	38
2.4.	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans	39
2.5.	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	41
2.6.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen	41

1. Kurzdarstellung

Die Ziele des NEWBIE Projekts sowie die erreichten Ergebnisse werden in den weiteren Abschnitten von allen Projektpartnern ausführlich dargestellt.

1.1. Aufgabenstellung

Energiespeichersysteme, insbesondere Akkumulatoren, sind die Schlüsseltechnologien beim Übergang zu einer klimaneutralen Gesellschaft. Um den Übergang im Bereich Elektromobilität zu fördern, ist vor allem das schnelle Laden der Batterie entscheidend. Je bequemer, nutzerfreundlicher und routinierter der Gebrauch von Akkumulatoren wird, desto weniger Zweifel haben die Verbraucher bezüglich batterieelektrischer Fahrzeuge (engl. battery electric vehicles, BEVs), z. B. Angst vor zu geringer Reichweite. Nach Einschätzung der Mercedes-Benz AG (MERC) würden Ladezeiten kleiner 15 Minuten die Akzeptanz der Technik deutlich erhöhen. Damit wird der Ladevorgang problemlos auch unterwegs machbar. Heim-Ladestationen sind dann nicht mehr zwingend notwendig. Zudem können die Batterien kleiner ausgelegt werden, da sie nicht mehr für den Großteil der Strecke ausreichen müssen, sondern auf dem Weg schnell nachgeladen werden können. Die Ladezeit aktueller Batterien liegt je nach Ausführung in der Größenordnung von 15 bis 30 Minuten.

1.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Herz des NEWBIE Projektkonzeptes ist die Entwicklung von nachhaltigen, sicheren, schnell aufladbaren Lithium-Ionen-Batterien (LIB) der nächsten Generation mit langer Lebensdauer in der Elektromobilitätsanwendung. **Die Ziele des NEWBIE Projektes waren:**

- 1) Eine Ladezeit von <15 min 10-80 % SOC in Modulebene
- 2) Material- und Kosteneinsparungen durch genauere und zuverlässigere Konstruktion der Li-Ionen Zellen/Batterien
- 3) Energie- und Kosteneinsparungen bei der Herstellung von Li-Ionen Zellen/Batterien

Damit deckt das Projekt NEWBIE eine Reihe von kritischen Punkten in der Wertschöpfungskette der Batterie ab und führt in einem gesamtheitlichen Ansatz zu einer Verbesserung von Produkt und Produktion: von der Optimierung der Zellen (Mikrostruktur der Elektrode), Optimierung der Fertigungsverfahren der Zellen (geringerer Lösungsmittelgehalt beim Mischen und Beschichten, Ökobilanz Trockenraum) und verbesserten Kühlmöglichkeiten im Modul (Ultra High Performance Charging durch Immersion Cooling) werden in diesem Projekt zielführende Lösungsansätze kombiniert.

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Projektstart Juni 2021.

Erstes Jahr:

- Ableitung der Zielspezifikation für Zelle und Modul sowie Definition des gesamten Zelldesigns.
- Lieferantenauswahl und Bestellung Materialien und Anlagen.
- Beginn Entwicklung Batteriemodule GEN1

Zweites Jahr:

- Produktionsstart GEN1, Produktion und Testing GEN1 Zellen, Aufbau und Testing GEN1-Module
- Rezeptauswahl für Slurries mit niedrigerem Lösungsmittelgehalt
- Entwicklung und Voruntersuchung neue Trocknungstechnologien
- Beginn Entwicklung Batteriemodule GEN2

Drittes Jahr:

- Produktion und Testing GEN2 Zellen, Aufbau und Testing GEN2-Module
- Herstellung Elektroden aus Slurries mit niedrigerem Lösungsmittelgehalt
- Erprobung neue Trocknungstechnologien und Untersuchung der Energiereduktion bei der Herstellung von Li-Ionen Batterien/Zellen

Die Corona-Pandemie mit ihren Nachwirkungen hatte einen negativen Einfluss auf den gesamten Projektablauf. Das Projekt startete während der Corona-Pandemie und der Projektstart sowie die ersten Projektabstimmungen konnten nicht im geplanten Zeitraum durchgeführt werden. Dazu gab es viele Schwierigkeiten mit Bestellungen und Lieferungen, sodass die geplanten Vorhaben dadurch auch verzögert wurden. Deshalb gab es eine kostenneutrale Projektverlängerung um 6 Monate bis zum 30.11.2024.

1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

A. Mikrostruktur der Elektrode:

Nach heutigem Stand der Technik liegen die Aktivmaterialien und andere Beschichtungsbestandteile mehr oder weniger in ungeordneter Durchmischung in der Elektrode vor [i]. Durch diese zufällige Anordnung der Mischungsbestandteile innerhalb der Elektrode ist der Li-Ionen Transport innerhalb der porösen Schichten jedoch nicht optimal. Insbesondere der durch die Tortuosität entstehende, komplexe Pfad für den Li-Ionen Transport innerhalb der Elektrode, führt bei hohen Ladegeschwindigkeiten zu einem starken Li-Ionen Gradienten innerhalb der Zelle und damit auch zu geringeren erreichbaren Kapazitäten [ii].

Durch eine Strukturierung der Elektrode können Leitkanäle für einen effizienteren Li-Ionen Transport innerhalb der Zelle geschaffen werden. In wissenschaftlichen Untersuchungen wurden Strukturierungen der Elektrode auf verschiedene Art und Weise vorgenommen: mechanisch, optisch, elektrisch / magnetisch. Trotz einiger erfolgreicher Ansätze zur Elektrodenstrukturierung bleibt es eine Herausforderung die Elektroden so zu strukturieren, dass sich eine bessere Schnellladefähigkeit ergibt und die Energiedichten erhalten bleiben.

B. Geringerer Lösungsmittelgehalt beim Mischen und Beschichten:

Die heutige Produktion von Elektroden (Stand 2020) basiert hauptsächlich auf der nassen Verarbeitung: Typischerweise werden niederviskose Anodenpasten (ca. 50% Feststoffgehalt) und Kathodenpasten (ca. 70% Feststoffgehalt, meist NMP/NEP-basiert) hergestelltⁱⁱⁱ. Die Pasten werden in einem komplizierten Beschichtungsverfahren (Schlitzdüse) auf die Stromableiterfolien aufgetragen; in einem Heißluftofen/IR-Trocknung wird durch Verdampfen des Lösemittels die Elektrodenschicht immobilisiert. Mit diesem Prozess korrelieren lange Trocknungszeiten und damit verbunden hohe Energie- und Investitionskosten^{iv}. Die etablierten Batch-Mischverfahren bringen diverse Nachteile mit sich: Qualitätsabweichung zwischen verschiedenen Batches, viele manuelle Arbeitsschritte und Reinigungsaufwand. Außerdem sind diese Prozesse äußerst energie- und arbeitsintensiv und beruhen auf schädlichen Lösungsmitteln.

C. Ökobilanz Trockenraum:

Innerhalb der Zellproduktion ist die Elektrodenproduktion mit dem energieintensiven Trocknungsprozess wesentlicher Treiber für Energieverbräuche [v]. Die zugrundeliegenden Analysen des Energieverbrauchs sind allerdings meist nur annahmen- bzw. modellbasiert [vi, vii]. Von den Maßnahmen, die im Projekt adressiert werden (alternative Prozessrouten für die Materialverarbeitung, Bewertung von lösemittelarmer Beschichtung) geht jedoch ein hohes Potenzial zur Senkung der Umweltauswirkungen aus [viii].

D. Ultra High Performance Charging - Immersion Cooling:

Das Thermomanagement der Batterie muss sowohl eine Kühl- als auch eine Heizfunktion bereitstellen, um unter allen Betriebs- und Umweltbedingungen optimal betrieben werden zu können. Aktuell gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie diese Umfänge erfüllt werden können. Zwei davon sind: die Batterie über eine Batteriekühlpatte aus Aluminium und einen separaten Kühlwasserkreislauf zu temperieren, oder (eine sehr

ähnliche Möglichkeit) Kältemittel anstelle von Kühlwasser zu verwenden (z.B. Wasser-Glykol). Dies bedeutet eine deutliche Erhöhung der Entwicklungskomplexität sowie die Notwendigkeit, im Kühlungsfall stets den Klimakompressor betreiben zu müssen, selbst bei geringen Außentemperaturen.

E Kunststoffgehäuse:

Modul- bzw. Batteriegehäuse werden derzeit ausschließlich aus Metall hergestellt. Hauptgründe hierfür sind die hohen mechanischen Anforderungen an die Batteriesysteme (z.B. hinsichtlich Crush/Crash). Sowohl beim Einsatz von Aluminium (Aluminium-Druckguss oder Schweißkonstruktionen aus Strangpressprofilen) und Stahl (wannenförmige Stahl-Umformteile und aussteifenden Profilen) ist die Konstruktionsfreiheit stark eingeschränkt. Die Integration von z.B. Kühlmittelkanälen, aber auch Anbindungspunkte zur Montage von Zellmodulen oder anderen Strukturen ist mit hohem Aufwand verbunden und dementsprechend kostenintensiv. Metallgehäuse müssen wegen ihrer elektrischen und thermischen Leiteigenschaften isoliert werden. Eine hocheffiziente Temperierung der Zellen ist nur umsetzbar, wenn möglichst wenig Kühlleistung über andere Bauteile wie beispielsweise das Gehäuse unnötig abfließen und dadurch den Zellen vorenthalten wird.

Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Nicht zutreffend.

Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste

Bitte siehe den Referenzen in den vorherigen und folgenden Kapiteln.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Nicht zutreffend.

2. Eingehende Darstellung

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

Tabelle 1: Verwendung Teilvorhaben Konsortialführer (Mercedes-Benz AG)

Ziele	Ergebnisse
Projektkoordination	Die Koordination des Gesamtprojekts wurde seitens Mercedes bis zum Projektende erfolgreich durchgeführt.
Definition der Zellspezifikationen und KPIs sowie Lieferung von Dummy-Zellen für die Moduluslegung	Definition der Zellspezifikationen und Ziel KPIs wurden abgestimmt. Die Dummy-Zellen wurden von MAHLE gebaut. Dazu wurden die nötigen Materialien, tiefgezogene Pouchfolien und Ableiter an MAHLE geliefert.
Aufbau Lieferantennetzwerk, Beschaffung von Mustern und Sicherstellung der Lieferung in benötigten Mengen für die Zellherstellung	Lieferanten in Europa, Asien und Nordamerika wurden kontaktiert, Mustermaterialien angefordert und das Benchmarking durchgeführt.
Entwicklung von Anoden- und Kathodenrezepten sowie Festlegung der Materialkombinationen sowie Implementierung der Projektanforderungen in die Zellauslegungen	Es wurden zwei Rezepte für GEN1 und GEN2 im Rahmen der Projektanforderungen entwickelt. Die besten Kombinationen für hohe Energiedichte

	(>600 Wh/L) und Zyklenstabilität (>80% SoC nach 1000 Zyklen) wurden festgelegt.
Mikrostrukturierung der Elektroden für die Erreichung der definierten Schnellladefähigkeit (< 15 min, 10 - 80 % SoC). (Das Ziel aus der Gesamtvorhaben (< 15 min, 5 - 95 % SoC) wurde an Use-Case angepasst).	Die Mikrostrukturierung der Elektroden wurden untersucht. In Prototypenmaßstab wurden die Schwierigkeiten bei der Implementierung in den Produktionsprozessen erkannt. Jedoch konnte die Schnellladefähigkeit bei einer Ladezeit von <15 min (10 - 80 % SoC) durch Einsatz eines Si/C-Graphit-Blends an der Anodenseite erreicht werden.
Entwicklung und Implementierung der Sensorzellen in beiden Zellgenerationen zur Optimierung der Lebensdauer und Schnellladeprofile	Die Sensorzelltypen wurden definiert und ausgewählt. Die ersten Tests wurden in kleinformatigen Zellen durchgeführt. Die Sensorzellen wurden in beiden Zellgenerationen (GEN1 und GEN2) implementiert und die Ergebnisse wurden für die Auslegung der Schnellladeprofile in Zell- und Modulebene verwendet.
Kopplung Simulation elektrochemisch & thermisch-fluidisch und auf Simulationsmodelle für GEN1 und GEN2	Erste elektro-chemische Simulationsmodelle der Zelle wurden in zwei Softwaretools für GEN1 erstellt und Conjugate Heat Transfer (CHT) Modelle auf Zell- und Modullevel für GEN1 entwickelt.
Definition einer Referenzformulierung und Inbetriebnahme eines 20mm Extruder bei Mercedes	Referenzen wurden nach Festlegung der Material- und Analysestandards gefertigt und ein 20 mm-Extruder bei Mercedes in Betrieb genommen.
Slurry Herstellung mit reduziertem Lösungsmittelgehalt (Semi-Dry Mixing)	Die Slurries mit reduziertem Lösungsmittelgehalt wurden hergestellt.
Beschichtung von Elektroden mit reduziertem Lösungsmittelgehalt	Elektroden mit reduziertem Lösungsmittelgehalt wurden hergestellt. Es wurden Verfahren entwickelt, um mit hochviskosen Slurries zu arbeiten.
Scale-Up auf Pilotgröße (30 mm Extruder, industrielle Maßstab)	Slurryproduktion auf 30 mm Extruder wurde durchgeführt und Herausforderungen identifiziert und Konzepte entwickelt.
Analyse von Elektrodenschichten und Aufbau / Test von Zellen	Es wurden die mechanischen, elektrischen und elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden untersucht. Daraus konnten Unterschiede in der Beschichtung und im Mischprozess erkannt werden.
Untersuchung und Evaluierung neuartiger Trocknungstechnologien	Induktionstrocknung wurde an dem bestehenden Beschichter bei Mercedes integriert und nötige Anpassungen für optimale Trocknung der Elektrode durchgeführt. Durch die Verwendung von Induktionstrocknung konnte die Trocknungsenergie 30 % reduziert werden.
Herstellung und Lieferung von GEN1 Zellen	Innerhalb des Projektzeitraums wurden 211 GEN1 Zellen hergestellt, 126 Zellen an MAHLE geliefert sowie 23 Zellen fürs externe Testing verwendet und 14 Sensorzellen gebaut
Herstellung und Lieferung von GEN2 Zellen	Innerhalb der Projektzeitraum wurden 372 GEN2 Zellen hergestellt und 286 Zellen an MAHLE geliefert, sowie 23 Zellen wurden fürs externe Testing verwendet.

Testing der GEN1 Zellen	Die Zellen der GEN1 erreichen bereits fast die Zielenergiedichte von 600 Wh/L (579 Wh/L). Die Zelle zeigt bereits eine gute elektrische Performance. Die Sicherheitstest verliefen ebenfalls überwiegend positiv, lediglich die Lebensdauer zeigte deutliches Potential für Verbesserungen.
Testing der GEN2 Zellen	Die GEN2 Zellen mit einer Energiedichte von 727 Wh/L bieten eine höhere Kapazität (+33 %) und Energie (+29 %). Die Lebensdauer konnte trotz hohem Silizium-Anteil verbessert werden. Die hohe Energiedichte führte in den Sicherheitstests zu höheren Herausforderungen für ein sicheres Design.

Die **Projektkoordination** wurde von Mercedes mit der Zielsetzung Delegation von Verantwortung, verbesserte Kommunikation, Vertrauen und realistische Ziele durchgeführt. Um die Probleme rechtzeitig zu erkennen und damit die Auswirkungen zu reduzieren, wurden zwölf regelmäßige Besprechungen online (Wissenschaftlicher Beirat) sowie sieben Präsenstreffen (Projekttreffen) organisiert und durchgeführt. Dabei wurden in erster Linie die wissenschaftlichen und technischen Fortschritte vorgestellt und der Gesamtablauf sowie Probleme und Auswirkungen mit allen Projektpartnern diskutiert. Alle Besprechungen wurden protokolliert und archiviert. Die Ergebnisse, die im Rahmen des Projektes erreicht wurden, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Uniresearch wurde mit der Unterstützung der Projektleitung beauftragt. Alle Meetings und Projekttreffen wurden mitorganisiert und protokolliert. Die Projektunterlagen wurden auf der Online-Plattform Mett gespeichert, und es wurde jederzeit Zugang für alle Partner gewährleistet. Nach Projektende bleiben die Dokumente noch weitere sechs Monate zugänglich. Danach werden alle Unterlagen von der Plattform entfernt. Die Homepage des Projekts (www.newbie-projekt) wurde von Uniresearch zu Beginn des Projekts erstellt und während des Projektverlaufs regelmäßig aktualisiert. Nach Projektende bleibt die Seite noch fünf Jahre zugänglich.

Aufgrund der Verzögerungen in mehreren Arbeitspaketen wurde in Absprache mit allen Projektpartnern eine kostenneutrale Projektverlängerung von 6 Monaten beantragt und genehmigt. Somit wurde das Projekt am 30.11.2024 erfolgreich abgeschlossen.

Im Rahmen des **Arbeitspakets 1** wurden die Zellspezifikationen und Ziel KPIs definiert. Das Ziel für die Schnelladebereich aus der Gesamtvorhabensbeschreibung (GVB) 5-95 % SoC in <15 min entspricht nicht der relevante Use-Case, daher wurde die Definition für Automobilanwendung an Use-Case von 10-80 % <15 min, idealerweise <10 min angepasst. Die Anlagen für die Zellfertigung wurden bei Mercedes im Jahr 2022 in Betrieb genommen und die Produktion der Zellen in Automotivformat im Rahmen des Projekts gestartet. Es wurden innerhalb des Projekts zwei Generationen von Zellen - GEN1 und GEN2 - entwickelt. Dabei wurde bei der Definition der GEN1 Zellen hauptsächlich der Stand der Technik dargestellt, um die Reproduzierbarkeit der Zellen mit der Prototypenanlagen gewährleisten zu können. Daher wurden für die Produktion der GEN1 Zellen eine Graphit Anode und eine NMC811 Kathode mit eine Energiedichte von 579 Wh L⁻¹ ausgewählt. Das Ziel des Gesamtvorhabens (GVB) in der Zellebene konnte mit der Produktion der GEN2 Zellen durch das Einsatz von Si/C an der Anodenseite mit eine Energiedichte von 727 Wh L⁻¹ erreicht werden.

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurden weitere Einflussparameter wie Porosität, Tortuosität, elektronischer Widerstand in der Elektrode sowie elektronischer Kontaktwiderstand zwischen dem Stromsammel und Aktivmaterial der jeweiligen Elektrode untersucht. Die Erkenntnisse und Resultate waren wichtige Parameter für die digitale Zellauslegung sowie Simulation der Zellen und Kopplung der Simulation Zelle & Modul, damit das Kühlkonzept und die Auslegung des Gesamtmoduls erfolgreich durchgeführt werden konnten. Des Weiteren wurden die Sensoren, um einen sicheren und zyklensfesten Betrieb bei maximalem Ladestrom möglichst unter Vermeidung von Li-Plating zu ermöglichen, entwickelt und in beiden Zellgenerationen (GEN1 und GEN2)

implementiert. Mit den Ergebnissen aus der sensorgestützten Betriebsfensteroptimierung wurden die Lade- und Entladeströme fürs Schnellladen der Zellen/Module definiert.

Arbeitspaket 2 umfasste die Entwicklung und Herstellung von Slurries mit höheren Feststoffanteilen. Dadurch wird grundsätzlich der Anteil der verwendeten Lösungsmittel reduziert und die Energie zu der Trocknung der Elektroden minimiert. Für die Entwicklung, Verarbeitung und Herstellung von hochviskosen Slurries zur Beschichtung der Anoden- und Kathodenaktivmaterialien auf Ableiterfolien wurde bei Mercedes ein Extruder mit einem Pulver sowie 3 Flüssigdosierern beschafft. Damit können bei Anoden- und Kathodenrezepten die benötigten Flüssigkeiten an mehreren Positionen zugeführt werden. Dies ermöglicht verschiedene Lösungsmittelkonzentrationen innerhalb der Prozesszone. Die mit dem Extruder hergestellten Slurries benötigen aufgrund der hohen Viskositäten zusätzliche Pumpensysteme sowie eine dafür ausgelegte Schlitzdüse am Beschichter. In Abbildung 1 ist der Extruder mit dazugehörigem Pumpenwagen zu sehen. Nach dem Herstellen und Überführen der Slurry im Pumpenwagen, wird der Pumpenwagen an den Beschichter gekoppelt und die Beschichtung durchgeführt.

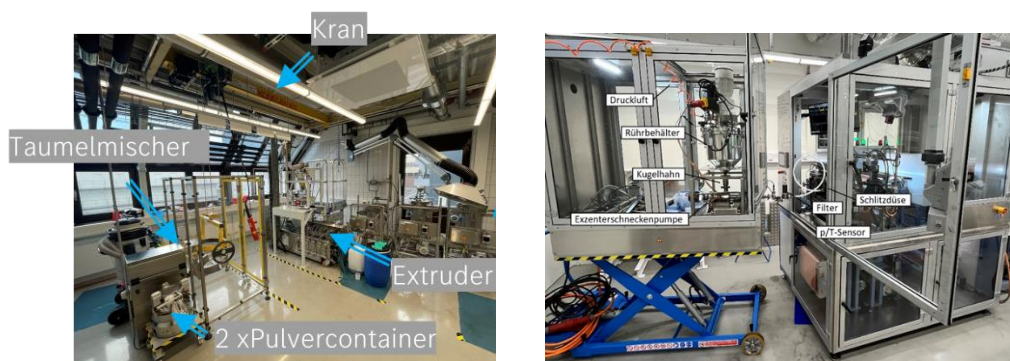


Abbildung 1: Extruder und Pumpenwagen (Links) und Aufbau am Beschichter (Rechts).

Im Rahmen des Projekts wurden bei Mercedes in Abstimmung mit dem BLB Anoden- und Kathodenrezepten mit geringem Lösungsmittelanteil hergestellt. Die hergestellten hochviskosen Slurries mit höherem Feststoffanteilen (FS) konnten mit Hilfe einer Exzentrerschneckenpumpe am Pumpenwagen beschichtet werden. Die mit Hilfe dieses Prozesses (Extrudieren) hergestellten Slurries erreichen im Vergleich zur konventionell (Batch-Mischer) hergestellten Slurries deutlich höhere FS-Anteile. Ein Vergleich der beiden Prozesse ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Feststoffanteile und Reduktion des Lösungsmittels im Vergleich der konventionellen Methode zum Extruder

Elektrode/Slurry	FS-Anteil Batch (%)	FS-Anteil Extruder (%)	Reduktion Lösungsmittel (%)
GEN1 Anode	60	66	15
GEN1 Kathode	75	80	20

Die Viskosität der Referenzslurries (GEN1 Kathode) wurde aus 7 verschiedenen Batches und 19 Messungen gemittelt, die Extruderslurry (Ex_Kathode) mit einem FS-Anteil von 80 % aus 3 Messungen. Die Viskosität steigt bei einer Scherrate = 100 s^{-1} aufgrund des höheren Solid Contents von ca. 3 Pa s auf 23 Pa s . Die Viskosität der Referenzslurries GEN1 Anode wurde aus 4 verschiedenen Batches und 12 Messungen gemittelt. Der Extruderslurry Ex_Anode mit einem FS-Anteil von $\text{SC}=66 \%$ aus 3 Messungen. Die Viskosität steigt bei einer Scherrate = 100 s^{-1} aufgrund des höheren Solid Contents von ca. 3 Pa s auf 10 Pa s . Damit ist die Kathode im für die Schlitzdüse relevanten Bereich etwa doppelt so viskos wie die Anodenslurry und auch als die Auslegung der Schlitzdüse. Die um Faktor 2 erhöhte Viskosität gegenüber der Anodenslurry Ex_Anode betrifft den gesamten Scherratenbereich. Die gemessenen Viskositäten der Referenzslurries und Extruderslurries sind in Abbildung 2 dargestellt.

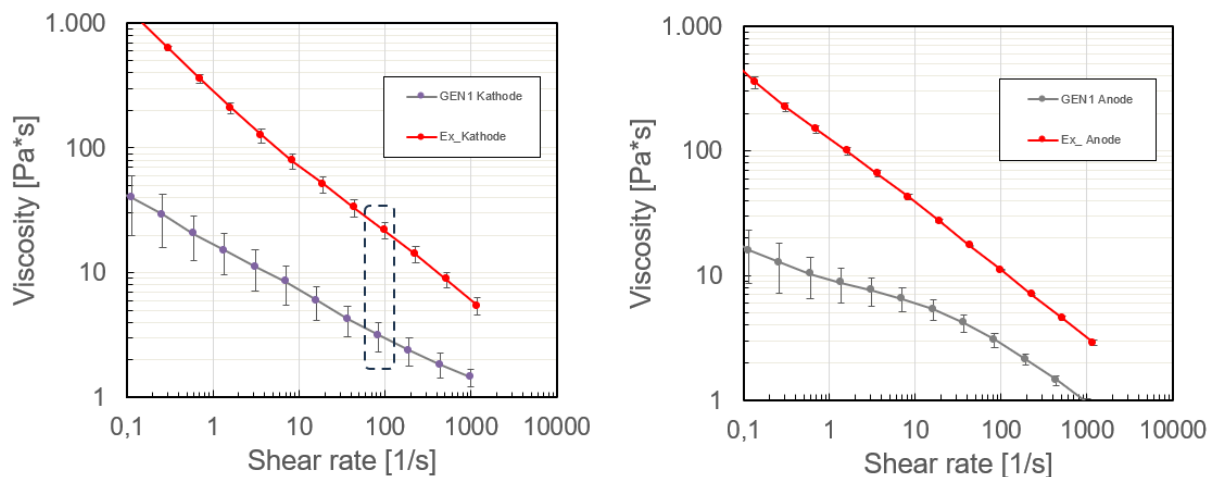


Abbildung 2: Viskositätsdiagramme der GEN1 Kathode und Extruderanode (Links), sowie der GEN1 Anode und Extruderanode (Rechts).

Im Rahmen des Projektes wurde der Extruder sowie der Pumpenwagen für die Beschichtung von hochviskosen Slurries in Betrieb genommen und die ersten Versuche durchgeführt. Die ersten Untersuchungen zeigen, dass die Reduzierung des FS-Anteils für die Elektrodenherstellung möglich ist. Die Eigenschaften der Zielelektroden (Adhäsion, Elastizität, el. Widerstand) sind ähnlich wie die der Referenzelektroden. Jedoch treten im Prozess vielfältige Herausforderungen auf. Besonders das Entgasen des Anodenslurries ist ein kritischer Schritt, bei dem die Slurry entweder nicht vollständig entgast wird oder es bei zu intensivem Entgasen zur Agglomeratbildung kommt. Die Reduktion des Lösungsmittels in den jeweiligen Slurries ermöglichen die Reduktion der benötigten Energie zum Trocknen der Elektroden beim Beschichten. Das Erhöhen des FS-Anteils von 75 % auf 80 % bedeutet, dass die Gesamtmenge des Lösungsmittels um 20 % reduziert wird. Somit reduziert sich auch die Energiemenge, die zur Trocknung der Elektrode verwendet werden soll, in einer ähnlichen Größenordnung ohne Änderung der Anlageneigenschaften.

Die Erkenntnisse aus den Versuchen mit 20 mm Extruder wurden im Rahmen des NEWBIE-Projektes vom Labor auf den Pilotmasstab skaliert. Der Mischprozess auf Laborstufe wurde in einem Extruder mit 20 mm Schneckendurchmesser erfolgreich durchgeführt. Die Pilotgröße entspricht einem Extruder von 30 mm Schneckendurchmesser, welcher einen ca. 5-fachen Durchsatz ermöglicht. Für das Upscaling war im Konsortium die Fa. Bühler vorgesehen. Nach dem Ausscheiden dieses Projektpartners wurden die Arbeiten auf den 30mm Extruder von Mercedes verlagert. Dieser Extruder im Pilotmaßstab ist von der Firma Coperion und wurde im Frühjahr 2024 bei Mercedes in Betrieb genommen, wodurch die geplanten Arbeiten verzögert wurden. Das Upscaling der Prozesse wurde anhand der Kathodenmaterialien getestet. Dafür wurde der Extruder im Pilotmaßstab von der Firma Coperion verwendet. Das Rezept aus dem Laborextruder wurde 1:1 übertragen, wobei die Schneckenkonfiguration nicht exakt übernommen werden konnte. Jedoch konnte die Schneckenkonfiguration, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen, angepasst werden. Im Rahmen des Upscaling konnte erfolgreich ein Slurry von Labormaßstab auf industriellen Maßstab hergestellt werden.

Innerhalb des **Arbeitspakets 3** Ressourceneffiziente Prozessstrategien wurden die wettbewerbsfähigen Elektrodentrocknungsprozesse und Technologien für die Herstellung von Elektroden mit dem BLB zusammen untersucht. Ein Großteil der Energie wird bei dem Beschichtungsprozess der Elektroden für die Herstellung der Li-Ion Batterien/Zellen verwendet. Zur Reduktion der CO₂-Emission/des Energieverbrauchs im gesamten Elektrodentrocknungsmanagement und entlang der Prozesskette der Zellherstellung bei Einhaltung guter Schichtqualitäten und Zellperformance wurden neben der Reduktion des Lösemittels in der Slurry auch neue Trocknungsmethoden evaluiert. Firma TRUMPF als Projektpartner hat die Lasertrocknung für unseren Beschichter (Firma Mathis, Mercedes und BLB haben die gleichen Beschichter) im Rahmen des Projekts entwickelt und am Beschichter bei BLB integriert. Die ersten Versuche wurden bei BLB durchgeführt, da sich der

Beschichter bei Mercedes im Trockenraum befindet und somit keine aussagekräftigen Ergebnisse bei der Trocknung der Anodenbeschichtungen liefern konnte. In einem Trockenraum trocknet sich die Anodenbeschichtung ohne zusätzliche Trocknungsprozesse, daher kann eine energetische Betrachtung bei der Beschichtung einer Anode nicht durchgeführt werden. Des Weiteren wurden von der Firma Mathis Induktionsmodule für die Integration in den bestehenden Beschichter beschafft. Die Induktionsmodule wurden im Juni 2023 bei Mercedes geliefert und in Betrieb genommen. Jedoch wurde festgestellt, dass die Induktoren die gesamte Folienbreite bestrahlten und somit auch die Ableiter beschädigten. Dadurch wurden von Firma Mathis sogenannte Abschirmungen entwickelt und eingebaut. Die Induktionsmodule konnten auch bei Mercedes am Beschichter im März 2024 eingebaut und geprüft werden. Jedoch konnten die Induktoren erst am Ende des Projektzeitraum (08.2024) am Beschichter vollständig eingebaut und in Betrieb genommen werden. Da der Beschichter sich bei Mercedes in einem Trockenraum befindet, mussten die einzelnen Verbräuche von Trockenraum, Beschichter und den Induktionsmodulen jeweils separat erfasst werden. Dazu wurden an allen Anlagen Stromzähler installiert und die einzelnen Verbräuche beim Beschichten der jeweiligen Elektroden erfasst.

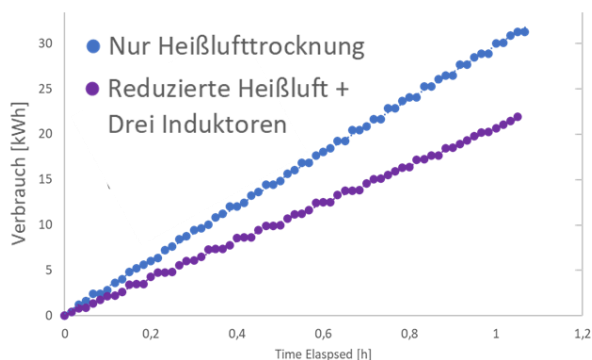


Abbildung 3: Gesamtenergieverbrauch bei der Beschichtung der GEN2 Kathode durch Heißluft und Induktionstrocknung.

In Abbildung 3 ist der Gesamtenergieverbrauch über die Zeit während der Beschichtung einer GEN2 Kathode durch Heißlufttrocknung (konventionell) und Induktionstrocknung dargestellt. Für die Ermittlung der absoluten Energieverbräuche wurden jeweils eine GEN2 Kathode beschichtet und nach den gleichen Produktionsparametern (Beladung, Länge, Endfeuchte) mit unterschiedlichen Systemen getrocknet. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass die Gesamtenergie (Elektrische Energie für die Trocknung der Elektrode am Beschichtungsprozess) für die Herstellung von Elektroden mit gleichen Eigenschaften bis zu 30 % reduziert werden konnte. Eine Aussage über die elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden kann seitens Mercedes nicht getroffen werden, da diese Elektroden innerhalb des Projektzeitraums nicht in Zellen eingebaut und getestet werden konnten.

Im Rahmen des **Arbeitspakets 4** wurden bei Mercedes in Prototypenanlagen Li-Ionen Zellen in automobilerem Format nach der Inbetriebnahme der Elektroden- und Zellfertigungsanlagen im Juli 2022 gestartet. Die Elektroden, die für die Zellfertigung hergestellt wurden, wurden seit Beginn der Produktion kontinuierlich auf physikalisch chemische Eigenschaften überprüft (AP 2.4). Es wurden unter anderem Rheologische Untersuchungen, Mikroskopieaufnahmen, Haftfestigkeitsmessungen, elektrische Leitfähigkeit, Porengrößenverteilung und die Ermittlung der Beladung und Dichte der Elektroden für alle hergestellten Elektroden und Elektrodenchargen durchgeführt. Somit konnte die Reproduzierbarkeit während der Produktion verfolgt und sichergestellt werden. Die Ergebnisse wurden durch die Mercedes Benz AG für die Zellherstellung dokumentiert und gespeichert, so dass zu einem späteren Zeitpunkt über die für einzelne Zellen vergebenen Zell-IDs die in die Zellen eingebauten Elektroden und somit alle Ergebnisse nachverfolgt werden können. Dadurch ist es möglich, die Probleme, die ggf. bei der Herstellung entstanden sind, aber eventuell deutlich später erkannt werden, zu identifizieren und zu verbessern. Die Probleme in der Zellebene bzw. innerhalb der Zelle können innerhalb der ersten Zyklen auftreten aber es kann auch bis zu 500 Zyklen dauern, bis diese erkennbar werden.

Die ersten GEN1 Zellen konnten somit im Q3 2022 hergestellt werden. Jedoch wurde die Reproduzierbarkeit der Zellen für die Lieferung an Projektpartner MAHLE und das externe Testinstitut erst in Q4 2022 sichergestellt. Damit wurde die Zellproduktion im Rahmen des Projektes gestartet und die Zellen fürs Testing an externe Testinstitut und an MAHLE geliefert. Die Produktion und die Lieferung der GEN1 Zellen an MAHLE und zu dem externen Testinstitut wurden im Juni 2023 vollständig abgeschlossen. Es wurden im Rahmen des Projektes insgesamt 212 funktionsfähige GEN1 Zellen produziert und verwendet. Die Anzahl der hergestellten GEN1 Zellen und die Verwendung der Zellen sind in Abbildung 4 graphisch dargestellt. Die genauen Spezifikationen und Eigenschaften der hergestellten Zellen wurden von Mercedes intern dokumentiert und über die Zell-ID können jederzeit die nötigen Informationen abgerufen werden.

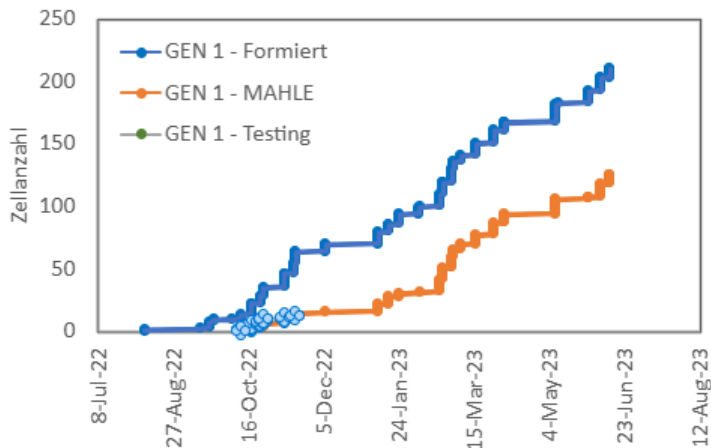


Abbildung 4: Anzahl der hergestellten GEN1 Zellen und deren Anwendung.

Die Produktion der GEN2 Zellen wurde nach Abschluss der GEN1 Produktion im Juli 2023 gestartet. Die Herstellung der GEN2 Kathode lief problemlos. Bei der GEN2 Anode waren die Gasblasen beim Beschichten der zweiten Seite das erste Problem. Die erste Seite konnte bis zu 250 Meter problemlos beschichtet werden. Jedoch wurden Gasblasen beim Beschichten der zweiten Seite der Elektrode beobachtet. Dieses Problem verursachte mehrere Fehlversuche bei der Beschichtung der Anode. Um die Gasblasen aus der Slurry zu entfernen, wurden Versuche mit weniger Feststoffanteil durchgeführt. Allerdings wurde dabei über die Beschichtungsbreite ein sogenanntes Bauchprofil beobachtet. Um dieses Problem zu beheben, wurden mehrere Versuche mit unterschiedlichen Shimdicken sowie Schlitzdüsen am Beschichter durchgeführt. Zum Schluss konnte die Schlitzdüse, welche für die Beschichtung der hochviskosen Slurries (Extruder Slurries mit geringem Lösungsmittelanteil) beschafft wurde, für die Beschichtung der GEN2 Anode verwendet werden. Dadurch konnte das Bauchprofil eliminiert und die Reproduzierbarkeit sichergestellt werden.

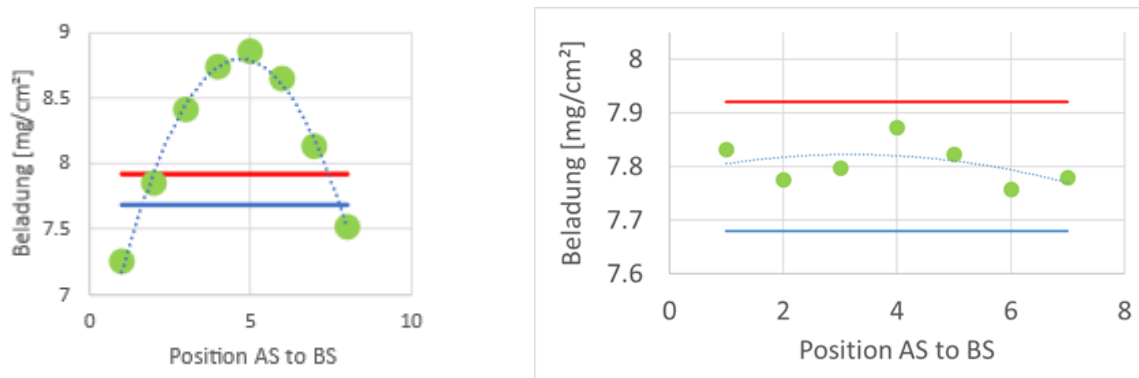


Abbildung 5: Beschichtungsprofil der GEN2 Anode über die Breite der Elektrode mit Bauchprofil (Links) und ohne Bauchprofil (Rechts).

In Abbildung 5 ist die Beschichtungsprofil der GEN2 Anode mit oberen und unteren Toleranzen über die Beladung graphisch dargestellt. Es konnte dann die Produktion der GEN2 Zellen in Q4 2023 gestartet werden. Die hergestellten Zellen wurden an MAHLE und an externe Testinstituts versendet. Im Rahmen des Projekts wurden insgesamt 372 GEN2 Zellen gebaut und 286 Zellen an MAHLE für die Modulaufbau versendet. Die Anzahl der hergestellten GEN2 Zellen und die Verwendung der Zellen sind in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Die Herstellung sowie Lieferung der Zellen im Rahmen des Projektes wurde im Juli 2024 vollständig abgeschlossen.

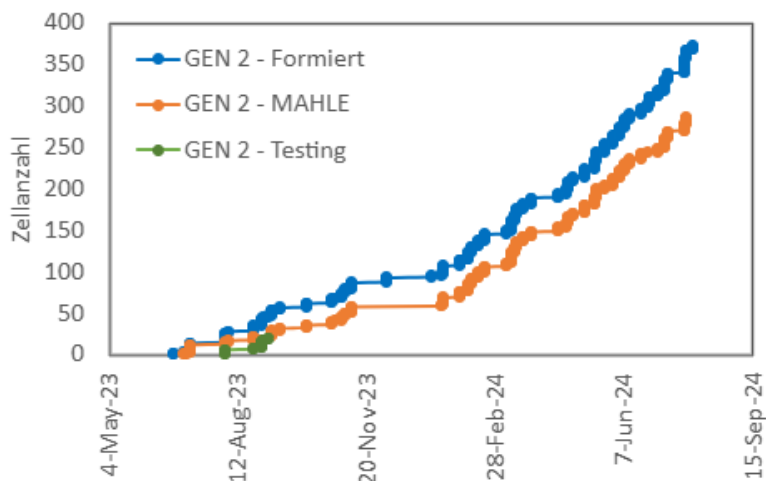


Abbildung 6: Anzahl der hergestellten GEN2 Zellen und deren Anwendung.

Die hergestellten Zellen wurden kenngrößenbasiert mittels Kapazitäts-, Stromraten und Innenwiderstandstests charakterisiert. Dadurch kann sowohl die kalendarische Alterung, C-Raten- und Zyklenperformance untersucht und auf die Lebensdauer geschlossen werden.

Tabelle 3: Vergleich einiger Performance-Parameter zwischen GEN1 und GEN2 Zellen

	NEWBIE – GEN1	NEWBIE – GEN2
Zellchemie	NMC811 / Gr.	NMC811 / 85 % Gr. + 15 % SiC
Dimensionen @ 100 % SoC ohne Ableiter/Falz	424 x 92 x 15.2	424 x 92 x 15.2
Kapazität @ C/3 – gemessen / berechnet	77.9 Ah / 78 Ah	104.28 Ah / 105 Ah
Volumen / Gewicht	0.511 m ³ / 1.15 kg	0.511 m ³ / 1.20 kg
Nominalspannung @ C/3 – gemessen / berechnet	3.67 V / 3.65 V	3.52 V / 3.5 V
Energie @ 0.1C, 25°C	296 Wh 579 Wh/ℓ 257 Wh/kg	372 Wh 727 Wh/ℓ 311 Wh/kg
Internal Resistance Dch continous @ 0.1C / 0.5C	1.95 mΩ	1.39 mΩ

In Tabelle 3 sind die relevantesten Performance-Parameter der beiden untersuchten Zellen enthalten. Der große Unterschied zwischen den beiden Zellen liegt in der unterschiedlichen Zusammensetzung des Anodenmaterials. Dadurch kann im identischen Format eine deutlich höhere Kapazität (+ 33 %) und Energie (+ 29 %) gespeichert werden. Die Betrachtung der Energiedichte wird hier anhand des tatsächlichen Zellvolumens vorgenommen.

Ein Vergleich mit auf dem Markt verfügbaren Zellen ist nur schwer möglich, da die Energiedichten auf

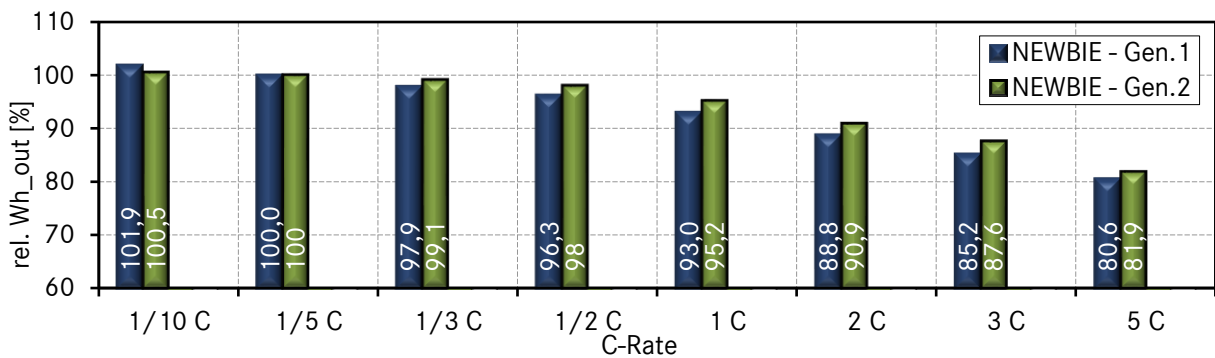


Abbildung 7: Relative Entladeenergie über C-Raten.

unterschiedliche Volumenberechnungen und Entladeraten basieren. Grundsätzlich erreicht aber die GEN1 bereits marktübliche Werte, die GEN2 übertrifft diese deutlich. Auch ein Vergleich der erreichten Energiegehalte bei verschiedenen C-Raten in Abbildung 7 zeigt eine Verbesserung zwischen den beiden Generationen. Dies gilt insbesondere für höhere C-Raten, bei denen die zweite Generation durch einen verringerten Innenwiderstand weniger Energie verliert. Weiterhin spielt hier auch die Erwärmung der Zelle eine Rolle. Da sich die Geometrie nicht verändert, aber der Energiegehalt größer wird, entstehen bei GEN2 erhöhte Kühlbedarfe. Ein kontinuierliches Ladeprofil mit über 5 C konnte nur für die GEN1 ohne aktive Kühlung erreicht werden.

In Abbildung 8 ist der Verlauf des Alterungszustands bei langsamer Zyklisierung mit C/3 dargestellt, in dem ein Zyklus ungefähr 7 Stunden dauert. Während die ersten 300 Zyklen in beiden Generationen nur zu geringem Verlust der verfügbaren Restkapazität führten, zeigt sich anschließend ein unterschiedliches Verhalten: Die Generation 2 verläuft weiterhin stabil, die Generation 1 zeigt einen leicht abknickenden Verlauf und damit eine beschleunigte Alterung. Durch einen optimierten Elektrolyten in der GEN2 und verbesserte Elektrodeneigenschaften konnte bereits in diesem nicht leistungsorientiertem Profil eine Verbesserung erreicht werden.

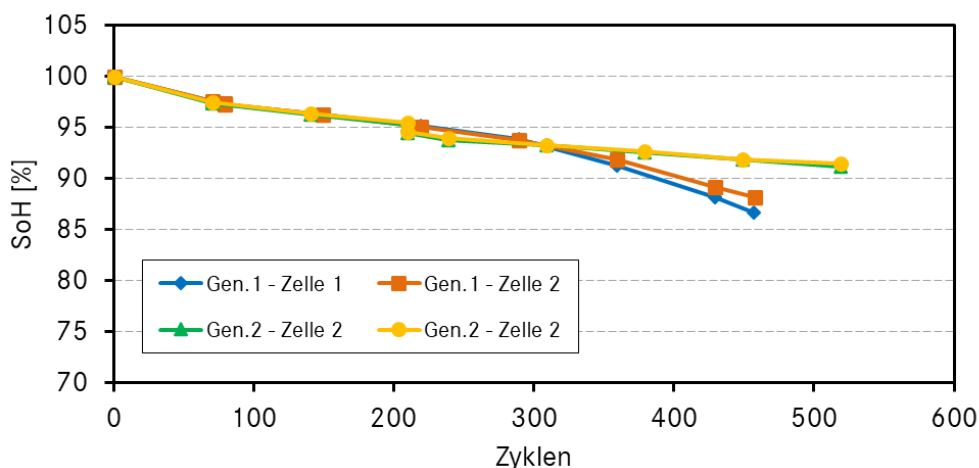


Abbildung 8: Alterungszustand (State of Health, SoH) bei zyklischer Alterung mit Profil 1 (0.3C / 0.3C) im Vergleich zwischen GEN1 und GEN2 Zellen.

In der kalendarischen Alterung zeigen beide Generationen ein sehr ähnliches Verhalten. Dabei altert die bei 60 °C gelagerte Zelle innerhalb der ersten 50 Tage deutlich schneller, bevor sie anschließend annähernd linear mit geringer Rate weiter an verfügbarer Kapazität verliert. Dies ist neben der hohen Temperatur auch durch den hohen Ladezustand begründet, durch welchen die Bildung von Grenzschichten zusätzlich beschleunigt wird. Wird die Kurve bei 45°C und 60 % SoC extrapoliert, werden bis 80 % SoH fast 3 Jahre vergehen (s. Abbildung 9). Dieser

Wert ist für die meisten automotiven Applikationen ausreichend, da immer mit Tag-/Nacht-Zyklen zu rechnen ist und 45 °C selbst in warmen Ländern nicht ständig vorherrscht.

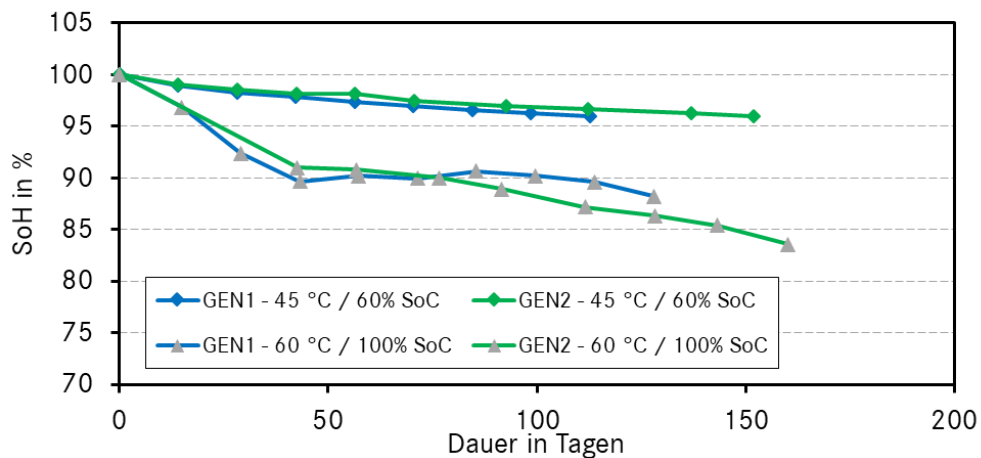


Abbildung 9: Kalendarische Alterung der GEN1 und GEN2 im Vergleich.

Die Ergebnisse der drei verschiedenen Sicherheitstests sind in Tabelle 4 dargestellt. Der deutlich erhöhte Energiegehalt in der GEN2 zeigt sich auch in den Auswirkungen der Sicherheitstests, wobei hier für die GEN1 im Allgemeinen bessere Ergebnisse erzielt werden konnten. Vergleichbar sind die Ergebnisse für GEN1 und GEN2 im Test **Thermal Stability**, die Zelle öffnet bei ca. 90 °C gemessen auf der Zelloberfläche und stößt ca. 5 % des Zellgewichts aus. Die Zellöffnung erfolgte in allen Versuchen auf der Kathodenseite, die Versiegelung an diesem Ableiter ist etwas schwächer ausgeprägt und kann als „Sollbruchstelle“ bezeichnet werden. Nach Ende des Tests wurden die Zellen weiter geheizt, mit voller Leistung der Heizplatten, um ein thermisches Event zu provozieren. Dieses tritt für beide Zellgeneration bei ca. 180 °C auf und liegt hauptsächlich im verwendeten Kathoden-Aktivmaterial begründet, das ab diesem Zeitpunkt Sauerstoff freisetzt. Da die Reaktion der GEN2 deutlich stärker ausgefallen ist, wurde dieses thermische Event mit EHL 7, der höchsten Stufe bewertet.

Tabelle 4: Ergebnisse der Sicherheitstests der GEN1 und GEN2 im Vergleich

Test-Spec	GEN1	GEN2
Thermal Stability 100% SoC in heat plates Steps: 5°C/ 30 min	Cell opening at ~90 °C → EHL 3-4 Forced Thermal Event at ~180 °C → after test EHL ≥ 5	Cell opening at ~90 °C → EHL 4 Forced Thermal Event at ~175 °C → after test EHL = 7
Overcharge @60 °C & 120% SoC 10s pulse 1C	EHL ≤ 2 , no event	EHL ≤ 2 Leakage: $\Delta m \approx 2\%$
Short Circuit @60 °C & 100% SoC Resistance < 5 mΩ	Cell opening at ~90 °C → EHL 3 Leakage: $\Delta m \approx 5.3\%$	Cell 1 catching fire → EHL 5 , $\Delta m \approx 5\%$ Cell 2 leakage → EHL 3 , $\Delta m \approx 1\%$

Im **Overcharge** Test konnten beide Generationen gut abschneiden und erreichten ein Hazard-Level von unter 2, die Zellen hätten damit auch den bekannten UN38.3-Test bestanden. Auch der **Short Circuit** ist Bestandteil des UN38.3, allerdings lautet die Anforderung an den Kurzschlusswiderstand lediglich $<0.1 \Omega$, in diesem Test liegt der Innenwiderstand um Faktor 20 tiefer. Während die GEN1 ebenfalls bei einer Zelltemperatur von 90 °C öffnet, fängt die GEN2, bedingt durch ein etwas schnelleres Aufheizen, beim Öffnen Feuer und erreicht damit ein Hazard-Level von 6. Es kommt jedoch nicht zu einem thermischen Event und der Massenausstoß liegt mit 5 % in einem ähnlichen Rahmen wie die GEN1. Außerdem ist zu erwähnen, dass in diesem Test nur eine der

standardmäßig zwei getesteten Zellen das beschriebene Verhalten zeigt. Die andere Zelle öffnet nur minimal und erreicht EHL 3.

Die hergestellten Zellen wurden durch Kapazitäts-, Stromraten- und Innenwiderstandstests charakterisiert. GEN2 verwendet eine verbesserte Zellchemie, was zu einer um 33 % höheren Kapazität und 29 % mehr Energiegehalt führt. Die Zellen der GEN1 und GEN2 haben einen relativ geringen Innenwiderstand über einen großen Betriebsbereich. In der zyklischen Alterung ist ein deutlicher Fortschritt von GEN1 zu GEN2. Beide Zellen zeigen bei kalendarischer Alterung ein ähnliches Verhalten, verlieren jedoch bei hohen Temperaturen und Ladezuständen schneller an Kapazität. Der gesteigerte Energieinhalt in der zweiten Generation erfordert noch weitere Anpassungen am Zelldesign, um ein thermisches Durchgehen der Zellen zu verhindern bzw. die Reaktion zu verringern.

Tabelle 5: Verwendung Teilvorhaben (Trumpf, B)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Erste Tests im Verbund mit vorläufigem Lasermodul	Aufbau eines kleinen Lasersystems (2.4 kW) für erste Trocknungsversuche beim BLB-ifs.
Verbesserung der elektro-optischen Effizienz der Laserdioden	Entwicklung und Realisierung hocheffizienter VCSEL-Laserdioden für den cw-Betrieb auf Basis der Multi-Junction-Technologie, Chip-Effizienz > 53% demonstriert.
Verbesserung der Systemeffizienz	Entwicklung und Realisierung einer hocheffizienten Treiberelektronik, optimal angepasst an die obigen VCSEL-Laserdioden, mit einer Konversionseffizienz von 98,5%.
Aufbaukonzept für Lasermodule	Entwicklung und Realisierung einer neuartigen Verbindungs- und Aufbautechnologie zur kosteneffizienten Realisierung großflächiger VCSEL-Lasersysteme mit optimaler Effizienz und Lebensdauer.
Kühlkonzept	Entwicklung und Realisierung eines optimierten Kühlkonzepts für die obengenannten VCSEL-Laserdioden, für maximale Energieeffizienz.
Anpassungen auf die Randbedingungen in der Trocknungsanlage	Entwicklung und Realisierung eines Modulgehäuses für die obengenannten VCSEL-Laserdioden, welches in die Trocknungsmodule der Mathis-Anlagen im BLB-iPAT integriert werden kann, d.h. beständig gegen hohe Temperaturen (bis 120°C), Wasserdampf und das Lösungsmittel NMP.
Einbau der Lasermodule	Integration des Lasermodules in die Mathis-Anlage beim BLB-iPAT.

Die wesentlichen Beiträge von TRUMPF finden sich in Arbeitspaket 3. Zur Ermöglichung früher Vorversuche im Konsortium hat TRUMPF eine 2.4kW VCSEL-Quelle (s. Abbildung 10) bekannter Bauart BLB-ifs zur Verfügung gestellt (Lasersystem LS-0). Aus den Vorversuchen konnten genaue Spezifikationen und Möglichkeiten zur Verbesserung der endgültigen Module abgeleitet werden. Das 2.4kW Modul umfasst ca. 740.000 individuelle VCSEL Laser, welche hier auf kleinstem Raum zusammengepackt wurden. Die Leistungsdichte des Moduls ist höher als zur Batterietrocknung dienlich, eine Vergrößerung des Abstandes zwischen Modul und Elektrodenfolie und ein Betrieb bei gedimmter Leistung ermöglichte aber die geplanten Experimente.

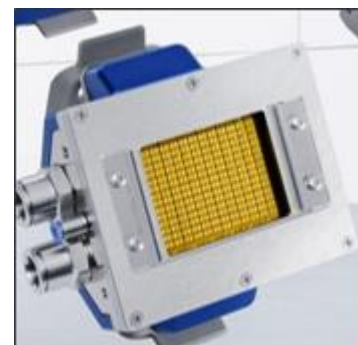


Abbildung 10: 2,4kW VCSEL Modul

In einem optimierten System wurde die Leistungsdichte auf den benötigten Wert gesenkt, um keine unnötigen Beabstandungen im System zu erzwingen

und um einen Betrieb im Optimum der Effizienz zu gewährleisten. Außerdem ermöglicht die Erniedrigung der Leistungsdichte günstigere Kühlverfahren und damit eine deutliche Kostenreduktion. Wesentliche Maßnahme zur Erniedrigung der Leistungsdichte war eine weniger dichte Packung der VCSEL.

Die bedeutendste Verbesserung der VCSEL wurde im Bereich der elektro-optischen Effizienz erzielt. Diese beeinflusst unmittelbar den Energieverbrauch in der Elektrodentrocknung. Außerdem ermöglicht eine höhere elektro-optische Effizienz eine Verkleinerung der für eine bestimmte Leistung benötigten Chipfläche und damit der Kosten.

Die Effizienz konnte von rund 40% in der konventionellen Technologie auf >53% unter Verwendung eines verbesserten VCSEL Designs mit gestapelten Aktivschichten gesteigert werden. Abbildung 11 zeigt die Messergebnisse der neuesten Generation von Chips.

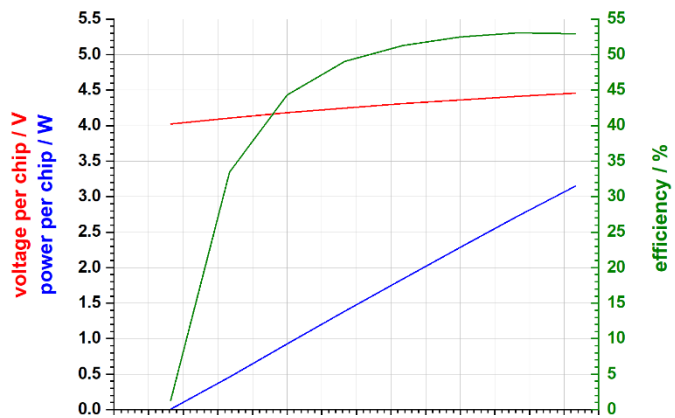


Abbildung 11: Messung der elektro-optischen Charakteristika eines neu entwickelten VCSEL chips (incl. Einhausung).

Die verbesserten Chips werden eingehaust und auf einer Wärmesenke montiert. Mehrere dieser Wärmesenken

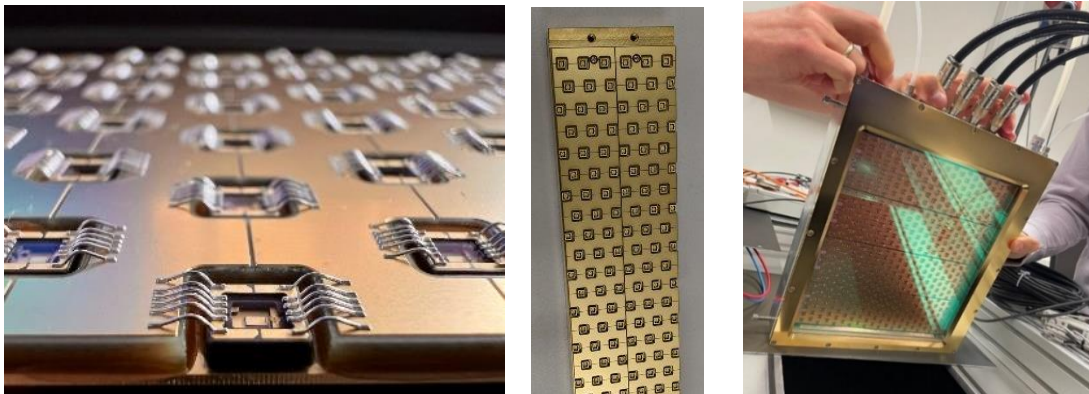


Abbildung 12: Einbau von eingehausten VCSEL Chips in die Kühlkörper. Vollständiger Kühlkörper. 4 Kühlkörper beim Einbau in das Test- und Charakterisierungssystem. (von links nach rechts)

können zu einem Modul kombiniert werden. Abbildung 12 zeigt das im Projekt erstellte Modul bei der Charakterisierung.

Abbildung 13 zeigt den Einbau des besonders flachen VCSEL Moduls in die Pilotanlage und eine Messung der Homogenität. Durch die Verteilung der einzelnen VCSEL Chips über einen großen Kühlkörper konnte auch bei geringem Arbeitsabstand eine exzellente Homogenität der Intensitätsverteilung erzielt werden. Dies ist für ein befriedigendes Trocknungsergebnis unabdingbar.

Neben diesen Fortschritten auf dem Gebiet der Halbleiterlaser wurde im Projekt auch eine Treiberelektronik mit einer Konversionseffizienz >98% realisiert. Um die flache Bauform, welche in der BLB-ifs Anlage benötigt wird, zu ermöglichen, wird die Treiberelektronik separat geliefert. Eine Integration auf der Rückseite der Lasermodule ist möglich und bei späteren Installationen ggfs. vorzuziehen. Ebenso wurde eine optimierte Kühlung entwickelt. Der Arbeitspunkt der Anlage liegt im Bereich optimaler Gesamteffizienz. Durch umfangreiche Simulationen wurde im Vorfeld die Packungsdichte der einzelnen Chips und deren Beabstandung auf dem Kühlkörper so gewählt, dass dieser optimale Arbeitspunkt auch erreicht werden konnte.

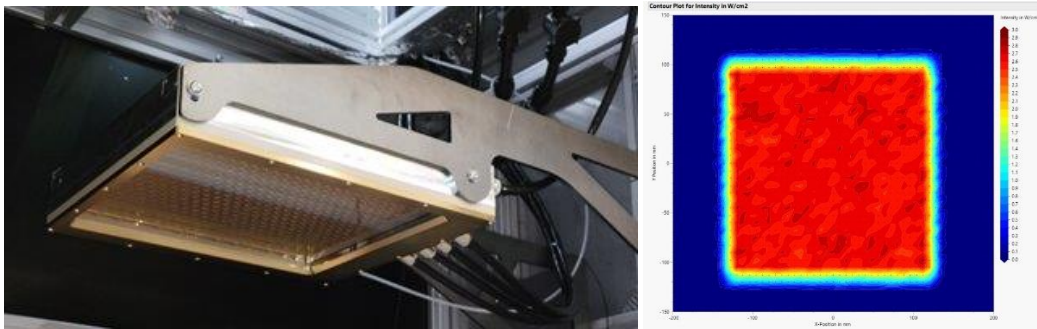


Abbildung 13: Einbau des VCSEL Trocknungsmoduls in die Pilotanlage und eine Messung der Homogenität.

Die kompletten Module wurden in die Pilotanlage beim BLB-iPAT eingebaut und erfolgreich betrieben. Die Versuche mit wasserbasierten Anoden als auch mit NMP-basierten Kathoden waren sehr erfolgreich, die Elektroden konnten deutlich schneller und mit deutlich weniger Energieeinsatz getrocknet werden, ohne dass die Materialqualität negativ beeinflusst wurde. Die wesentlichen Ergebnisse wurden in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 6: Verwendung Teilvorhaben (BLB, C)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
AP2	
UAP2.1: Upscaling konventionelles Mischverfahren zur Herstellung von Referenzen (MERC) Herstellung der Referenzen zum Vergleich mit Extrusion (MERC) und zum Vergleich mit Düsenbeschichtung (BLB)	UAP2.1: MERC: Upscaling des Batch-Mischverfahrens erfolgreich durchgeführt (1l → 40l) MERC: Binderanpassung auf 3,5 m.-% nach Herausforderungen bei Haftfestigkeit
UAP2.2: Herstellung von Elektroden mittels Extrusion bei herkömmlichem Feststoffgehalt Adaptive Prozessentwicklung für Anode und Kathode zur Verarbeitung der lösemittelreduzierten Pasten: Prozesslösung 1 (MERC) und Prozesslösung 2 (BLB) →Energie- und CO2-Einsparung von >30 %	UAP2.2: BLB: Prozessierung Anode: Lösemittelreduktion um 20 % mit Prozesslösung 2 umgesetzt Prozessierung Kathode: Lösemittelreduktion um 25 % mit Prozesslösung 2 umgesetzt MERC: Prozessierung Anode: Lösemittelreduktion um 15 % mit Prozesslösung 1B umgesetzt Prozessierung Anode: Lösemittelreduktion um 20 % mit Prozesslösung 1B umgesetzt
UAP2.3: Bewertung und Vergleich der Prozesslösungen MERC/BLB Übertragung auf 30 mm-Extruder Aufzeichnung Prozessparameter/Modellierung	UAP2.3: Upscalingversuche über Kathode durchgeführt, Slurry hergestellt, Qualität der Beschichtung teilweise i.O., Slurry aber zu hochviskos für Beschichtung Defizit auf Labor-Extruder erfolgreich nachgestellt Defizit bei Pilot-Extruder abgestellt, aber Zielviskosität nicht erreicht
UAP2.4: Charakterisierung über Zellzyklisierung für Kleinformat und Großformat	UAP2.4: Graphitanode (BLB) zeigt verringerte Kapazität bei Feststoffanteilerhöhung im Extruder, Tortuosität

	<p>wird erhöht, Degradation/Abschere von Graphitschichten</p> <p>Erhöhung des Feststoffanteils auf Kathodenseite (BLB) führt bei gleicher Beanspruchung zu ähnlichen Kapazitäten</p>
AP3	
Prozessentwicklung der Trocknungstechnologien	<p>VCSEL:</p> <p>Entwicklung und Aufbau eines Prüfstands zur stationären, homogenen Lasertrocknung mit Modul LS-0</p> <p>Thermografische Untersuchungen zeigen homogene Temperaturverteilung sowie hohe erreichbare Heizraten und Beharrungstemperaturen mittels VCSEL</p> <p>Stand-Alone-Technologie ermöglicht Steigerungen der Trocknungsrate um bis zu 72% im Vergleich zum Referenzprozess ohne Beeinträchtigung der mechanischen, elektrischen u. elektrochemischen Elektrodeneigenschaften</p> <p>Erfolgreiche Integration der VCSE-Laser-Technologie in einen hybriden Rolle-zu-Rolle Trocknungsprozess</p> <p>Induktion:</p> <p>Entwicklung und Integration eines Induktionsmoduls in einen hybriden Rolle-zu-Rolle Trocknungsprozess</p> <p>Signifikante Steigerung der Trocknungsrate von wässrigen Anoden um etwa 23 % und NMP-basierten Kathoden um etwa 13 % bei zufriedenstellender Elektrodenqualität</p> <p>Vergleich:</p> <p>Vergleichbare Trocknungsratensteigerung für beide Materialsystem bei gleichem spezifischen Energieeintrag</p>
Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen bei der Elektrodentrocknung ermitteln	<p>Zu hohe Energieeinträge führen zu einer deutlichen Reduktion der Elektrodenqualität in Form von reduzierten Haftfestigkeit und der elektrischen Leitfähigkeit als Folge von Binder- und Rußsegregationsprozessen</p> <p>Dies ist verbunden mit einer abnehmenden Oberflächenrauheit</p> <p>Negativer Einfluss auf den ionischen Widerstand und die elektrochemische Performance</p>
Ermittlung der materialspezifisch notwendigen Konditionierung der Prozessatmosphäre zur Reduzierung des Energie- und Kosteneinsatzes	<p>Die Wasseraufnahme von Referenzelektroden bei Rebefeuchtung wurde ermittelt und ermöglicht das Schließen von Querrelationen zwischen Befeuchtungsdauer und Feuchtigkeit der Prozessatmosphäre.</p> <p>Kapazitätstests sowie Pulstests zeigen für vorher befeuchteten Zellen auf, dass der Taupunkt der</p>

	<p>Prozessatmosphäre auf - 30 °C reduziert werden kann.</p> <p>Abschätzungen zum Kosteneinsatz für den Betrieb von Labortrockenräumen (4 Personen) in Abhängigkeit der Konditionierung der Prozessluft zeigen unter Dauerbetrieb bei Reduktion des Taupunkts von - 45 °C auf - 30 °C eine Energiereduktion um ca. 60 % und eine Gesamtkosten-reduktion von ca. 13 % auf.</p>
<p>Reduzierung der Ausschussrate durch Charakterisierung prozessrelevanter Materialeigenschaften zur materialangepassten Prozessgestaltung</p>	<p>Die Folgen ausgewählter prozessimmanenter Belastungen auf die Haftfestigkeit sowie Beschädigung der Beschichtung wurden evaluiert und Grenzwerte der Belastungen abgeleitet. Unter Verwendung der Grenzwerte konnten kritische Prozessstellen erfasst und die Ausschussraten bei der Zellproduktion im Laborprozess reduziert werden.</p>
<p>Ökoeffizienzbewertung und Identifizierung von Verbesserungsmaßnahmen durch Digitalisierung der neuen Prozesse und Multi-Skalen-Modellierung der Stoff- und Energieströme</p>	<p>Digitalisierung durch Infrastrukturaufbau und Datenerfassung umgesetzt</p> <p>Prozesskettensimulation identifizierte Einsparpotenziale in Material- und Energieflüssen</p> <p>Ökoeffizienzanalyse belegt Energieeinsparungen bei induktiver/Lasertrocknung (bis zu 32,8 % weniger Verbrauch bei höherer Induktionsspannung)</p> <p>Zielgerichtete Verbesserungsmaßnahmen für die Elektrodenfertigung abgeleitet</p>
AP4	
<p>UAP4.2:</p> <p>Entwicklung standardisierten Referenz Formierung und Zyklisierung</p> <p>Festlegung auf Formierung und Zyklisierung unter Einbezug der Vorversuche und Integration der Schnellladefähigkeit in Testprozedur</p> <p>Validierung der Voruntersuchungen an kleinformatigen Pouch-Zellen, um Skalierbarkeit zu sichern</p> <p>BLB-Zellen werden mit Variationen aus Analyse der Elektrodenschichten, Lasertrocknung und Wechselwirkungsanalyse im Trockenraum formiert, zyklisiert und die Schnellladefähigkeit erprobt</p> <p>Langzeituntersuchungen der Variationen</p> <p>Bewertung hinsichtlich der Schnellladefähigkeit</p>	<p>BLB:</p> <p>Standardisierte Formierung und Zyklisierung wurde an Experimentalzellen durchgeführt</p> <p>Formierung, Zyklisierung wurden unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Vorversuchen angepasst und ein Schnellladungstest in die in die Prozedur der Laborzellen integriert</p> <p>Ergebnisse der kleinformatigen Pouch-Zellen spiegeln die Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen der Laborzellen wider</p> <p>BLB-Zellen wurden bei unterschiedlichen Feststoffanteil, Trocknungsverfahren (konvektiv, induktiv) und Taupunkten untersucht</p> <p>Langzeitergebnisse zeigen, dass ein Heraufsetzen des Taupunkts von - 45 °C auf - 30 °C in den ersten 100 Zyklen keinen Einfluss auf die Zellperformance hat</p> <p>Langzeitergebnisse zeigen, dass induktives Trocknen im Vergleich zu konvektivem Trocknen keinen negativen Einfluss auf die Zellperformance hat</p> <p>Die Zellmaterialsysteme konnte hinsichtlich der Schnellladefähigkeit bewertet werden</p>

AP2 Fließtext

In Arbeitspaket 2 wurde sich vorrangig mit dem Mischen und Beschichten von Elektrodenpasten befasst. Zur Überwindung der unter 1.4 beschriebenen Hürden der diskontinuierlichen Verfahren mit hohen Lösemittelanteilen wurden in einem ersten Schritt kontinuierliche Verfahren erprobt und in einem weiteren Schritt die Lösemittelanteile reduziert. Die Herstellung der Referenzelektroden erfolgte in der BLB kontinuierlich über einen Zweiwellenextruder unter Verwendung etablierter Rezepturen mit üblichen Feststoffanteilen (Anode 50 wt.-%, Kathode 70 wt.-%). Anschließend wurden die Pasten im Rolle-zu-Rolle-Verfahren beschichtet und getrocknet. In einem weiteren Schritt wurde der Lösemittelanteil verringert. Auf Seiten der Anode wurde der Lösemittelanteil (schrittweise um 10, 14 und) um 20 % verringert. Abbildung 14 gibt einen Überblick über die Ergebnisse. Neben einer grundsätzlichen Viskositätszunahme der scherverdünnenden Paste bei Reduktion des Lösemittelanteils konnten Analysen der Schichten verschiedene Aspekte zeigen: verbesserte elektrische Leitfähigkeit, Steigerung der Haftfestigkeit, Verschiebung zu kleineren Porenradien. Bei Verbau zu Impedanzzellen mit nicht-interkalierendem Elektrolyten konnte eine starke Erhöhung des ionischen Widerstands ermittelt werden, welche sich in einer erhöhten Tortuosität niederschlägt. In elektrochemischen Vollzellen lässt sich dieser Trend gut nachvollziehen: insbesondere bei Lösemittelreduktionen größer als 10 % weisen die Zellen merkbare Kapazitätsverluste über 50 Zyklen bei 1C/1C auf. Eine zu starke Beanspruchung und somit Delamination, möglicherweise Fraktionierung des Aktivmaterials im Zweiwellenextruder ist hier wahrscheinlich ein ähnlicher Effekt konnte in der Literatur bei selbigem Material gefunden werden. Aus neu geschaffenen Feinanteilen resultierten verringerte Porosität, erhöhte Tortuosität und verringerte Diffusivität, was sich bei den ionisch limitierten Graphitanoden negativ auf die Ratenfähigkeit und Zyklenstabilität auswirkt. Der Anstieg in der (bereits ausreichend hohen) elektrischen Leitfähigkeit hat hier somit keinen nennenswerten Einfluss. Über die Lösemittelreduktion konnten jedoch Energie- und Kosteneinsparungen realisiert und hierüber auch die CO₂-eq-Emissionen gesenkt werden. Bei der maximalen Lösemittelreduktion von 20 % konnten Kosten in Höhe von 28,3 % eingespart werden, für eine Reduktion um 10 % sind es 16,1 %. Folglich kann hier bei ausreichend geringer Beanspruchung aus den vorliegenden Ergebnissen ein sinnvoller Kompromiss aus elektrochemischer Performance und Nachhaltigkeit sowie Kosten der Prozessierung gefunden werden.

Für die Kathode kann im Extruder aufgrund der verwendeten Materialien anders verfahren werden. Über Kneten können die Rußstrukturen gezielt modifiziert werden. Im Folgenden wurden die Lösemittelanteile um (8,3 %, 25 % und um) 33 % reduziert. Die Viskosität steigt im Zuge der Lösemittelverringering an und es bilden sich teilweise viskoelastische Festkörper aus. Über die Steuerung des Energieeintrags lassen sich bei bis zu 25 % Lösemittelverringering annähernd gleiche Elektrodenqualitäten bei unterschiedlichen Lösemittelanteilen erzeugen. Abbildung 15 gibt einen Überblick über die Ergebnisse. Schichtanalysen zeigen ähnliche Porositäten, in der Haftfestigkeit sowie der elektrischen Leitfähigkeit treten kaum signifikante Änderungen auf. Die ionischen Widerstände unterscheiden sich nur zu geringem Maße. In einem Vollzellaufbau zeigen die Zellen geringe Abweichungen zueinander. Bei Entladeraten $\geq 2C$ ergibt sich bei Lösemittelreduktion um 25 % eine kleine Verbesserung (+5 %) bei der Entladekapazität. Eine weitere Lösemittelverringering (33 %) führt zu Stabilitätsproblemen, welche mit verstärkter Strukturbildung einhergehen. Jene Pasten ließen sich nach mehreren Versuchen unter Rühren und Druckbeaufschlagung fördern und bei hohem Druck und starker Scherung im Düsenpalt zwar noch beschichten, die Einstellung des Ziel-Flächengewichts über den Einwellenextruder (Förderverhalten druckabhängig) ist hierbei jedoch besonders herausfordernd. Mehrere Versuche mit verschiedenen Düsen und Düsenpalt wurden hierzu durchgeführt, um das Beschichtungsbild zu verbessern. Höhere Binderanteile oder andere Bindersysteme, ggf. eine andere Art der Prozessierung werden ab diesem Lösemittelanteil erforderlich.

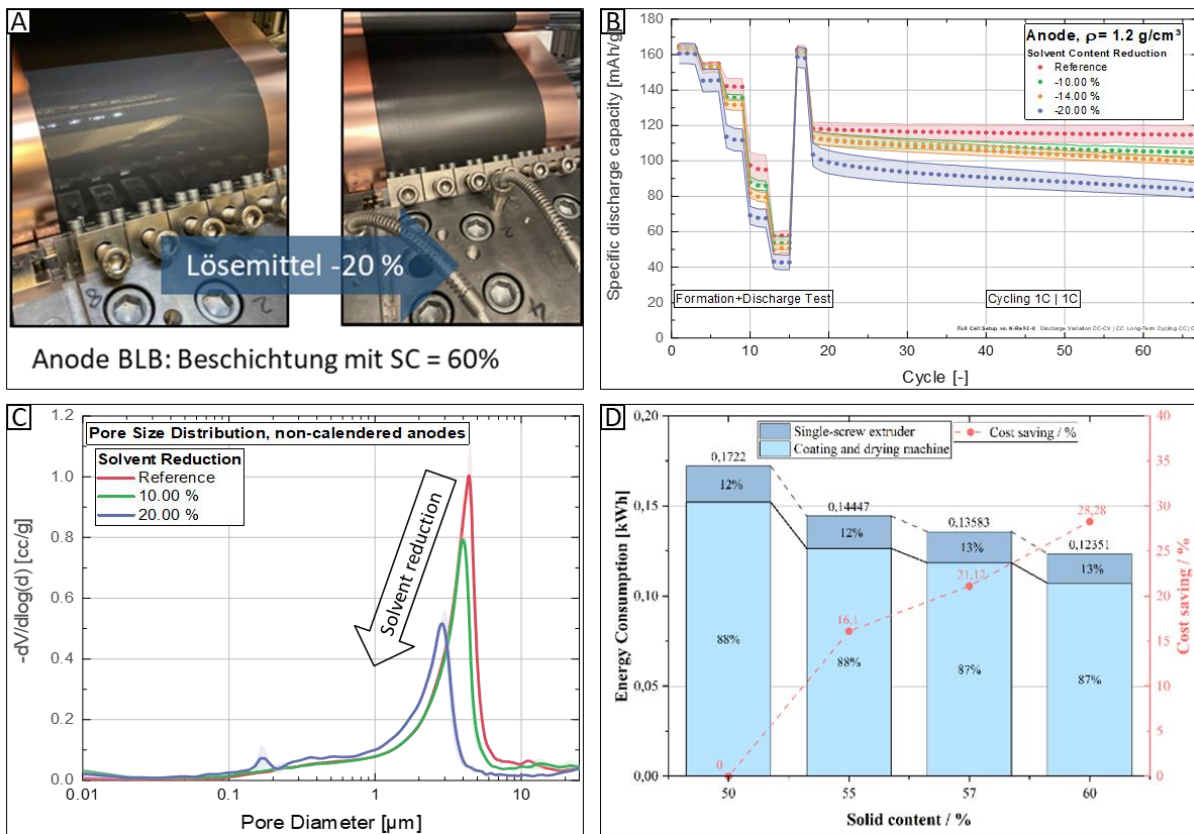


Abbildung 14: Lösemittelverringerng, Anode – A: Änderung Beschichtungsbild bei Lösemittelreduktion, B: Zyklisierung, C: Porengrößenverteilungen, D: Energetische Betrachtung

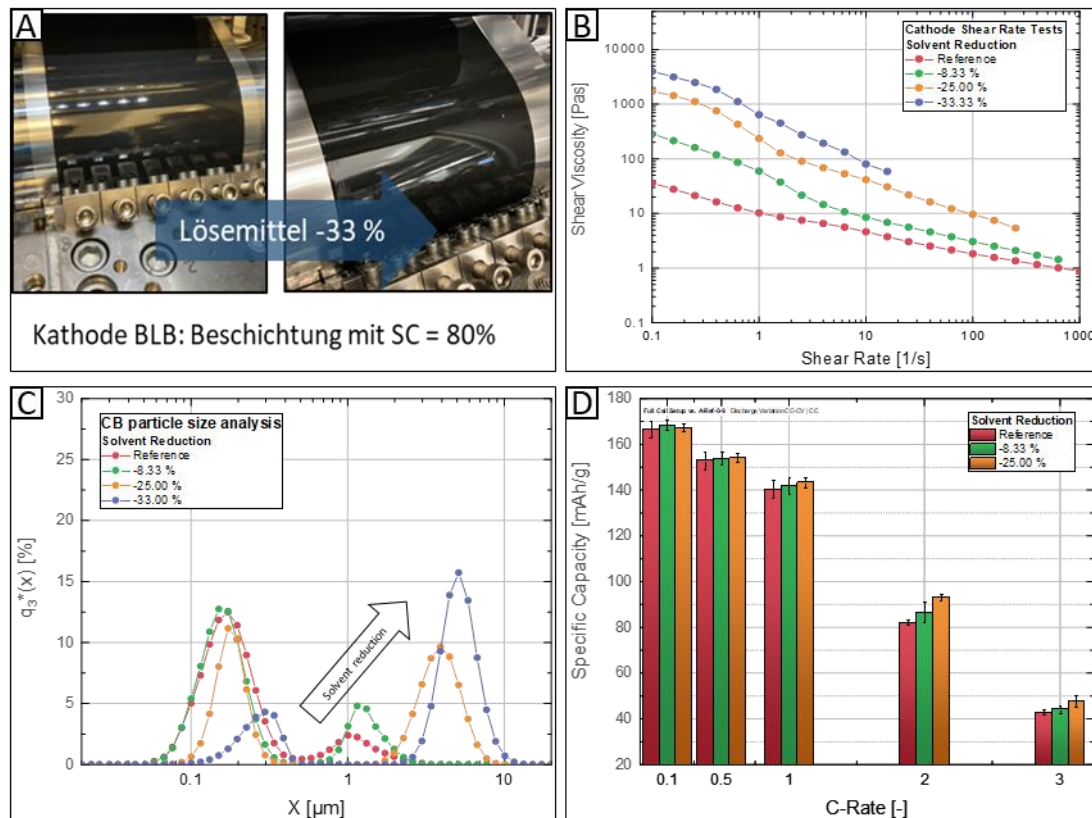


Abbildung 15: Lösemittelverringerng Kathode – A: Änderung Beschichtungsbild bei Lösemittelreduktion, B: Scherratenuntersuchungen, C: Partikelgrößenanalyse des Leitrußes, D: Zyklisierung

AP3, BLB-Fließtext

Im Bereich der Elektrodentrocknung wurden im Wesentlichen zwei Verfahren entwickelt: die Induktionstrocknung und die Lasertrocknung.

Entwicklung Induktionstrocknung:

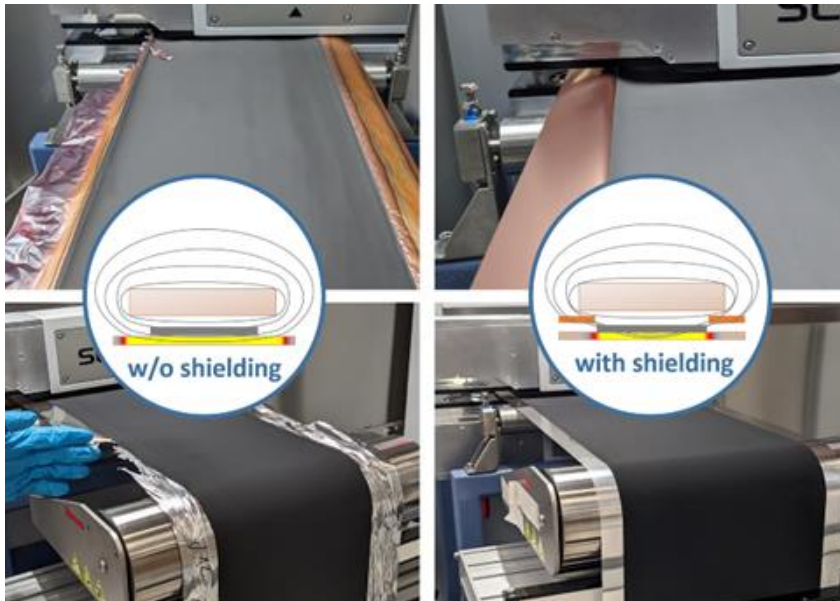


Abbildung 16. Elektroden aus Induktionstrocknung ohne und mit elektro-magnetischer Schirmung

Für die Induktionstrocknung erhielt die Werner Mathis AG den Auftrag, entsprechende Module in den bestehenden Beschichter nachzurüsten. Durch die enge Zusammenarbeit entstand eine leistungsfähige, maßgeschneiderte Lösung. Im März 2022 wurden erste Versuche mit einem Prototyp des Induktionsmoduls in der Schweiz durchgeführt, die das prinzipielle Funktionskonzept sowie die generelle Leistungsfähigkeit bestätigten. Daher standen im Anschluss insbesondere Anpassungen zur Optimierung der Handhabung im Vordergrund. Anschließend wurde die erste Generation des Induktionsmoduls an der TU Braunschweig mit unterschiedlichen Beschichtungsbreiten getestet. Dabei kam es jedoch zu einer Überhitzung der unbeschichteten Ränder der Metallfolie, was nicht nur die Qualität und Integrität der Folie beeinträchtigte, sondern auch potenzielle Risiken für die Anlage barg. Daher wurde eine zweite Generation von Induktionsmodulen entwickelt, bei denen die unbeschichteten Ränder der Metallfolie elektromagnetisch abgeschirmt sind (Abbildung 16). Dadurch konnte die Trocknungsrate von Anode und Kathode erhöht und gleichzeitig eine Beschädigung der Metallfolie vermieden werden. Die Eignung des optimierten Verfahrens wurde schließlich im Pilot-Maßstab (TRL5) validiert, wobei Elektrodenbänder mit einer Breite von 250 mm beidseitig beschichtet wurden. Durch den Einsatz der Induktionstrocknung konnten im Vergleich zur konvektiven Referenz niedrigere Trocknertemperaturen realisiert werden, was zu einer Energieeinsparung und Prozessbeschleunigung führte. Später wurden die Elektroden in großformatigen Zellen mit 5,5 Ah eingesetzt, die eine vergleichbare Leistung wie die konventionelle Trocknung zeigten.

Entwicklung VCSEL-Trocknung:

Als Grundlage der Arbeiten im UAP 3.2 wurde ein Prüfstand konzipiert und aufgebaut, der die stationäre VCSEL-Trocknung mithilfe des LS-0-Moduls im Labormaßstab ermöglicht. Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Lasertrocknungsprozess in Abhängigkeit des Arbeitsabstandes, des Laserleistungsprofils und des spezifischen Wärmeeintrags thermografisch charakterisiert. Darauf aufbauend wurde der Einfluss der Trocknungsintensität auf die resultierenden Elektrodeneigenschaften analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden auf den kontinuierlichen Betrieb an einer Großanlage der BLB übertragen, wobei die Lasertrocknung zur initialen Erwärmung der beschichteten Elektroden eingesetzt wurde. Hierbei wurde ein an die Beschichtungsanlage

angepasstes Modul eingesetzt, um die Auswirkungen spezifischer Wärmeeinträge bei der Aufheizung der beschichteten Elektroden zu bestimmen. Analog zur stationären Lasertrocknung wurden die kontinuierlich prozessierten Elektroden hinsichtlich potenzieller Prozess-Material-Wechselwirkungen untersucht.

Im Rahmen der stationären Lasertrocknungsversuche wurden mithilfe des umgesetzten Prüfstands Erwärmungsversuche bei variierten Leistungsverteilungen und Arbeitsabständen zwischen Lasermodul und Elektrode durchgeführt und die resultierende Heizzone thermografisch hinsichtlich ihrer Temperaturverteilung und Größe charakterisiert. Diese Versuche hatten zum Ziel, geeignete Prozessparameter für die Erzeugung einer möglichst flächigen und homogenen Heizzone zu identifizieren. Dabei zeigte sich, dass sich durch eine Verringerung des Arbeitsabstandes sowie einer Kombination aus äußerer intensiver Bestrahlung an den Modulrändern und moderater mittlerer Bestrahlung eine näherungsweise homogene Heizzone erzeugen lässt. Basierend auf den Untersuchungsergebnissen wurde der Arbeitsabstand auf $d=100$ mm festgelegt und die maximale Dimension der erzeugbaren homogenen Heizzone zu 300×600 mm identifiziert (Prozesscharakterisierung Abbildung 17).

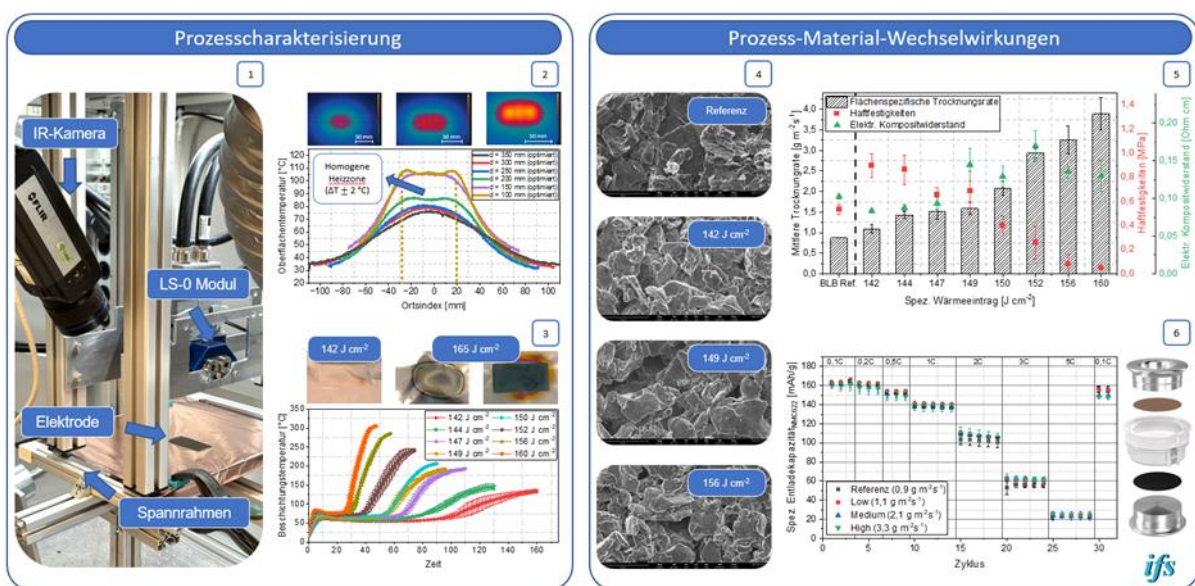


Abbildung 17: Übersicht der durchgeführten Untersuchungen zur stationären VCSEL-Trocknung

Aufbauend auf der Erwärmungscharakterisierung wurden Lasertrocknungsversuche bei variierten Energieeinträgen an Anodenbeschichtungen durchgeführt. Die Temperaturkurven (Abbildung 17) zeigen, dass mithilfe des Lasermoduls sowohl hohe Heizraten, als auch hohe Beharrungstemperaturen erzielt werden können. Eine Steigerung des Energieeintrages führt zu einer Erhöhung der Beschichtungstemperaturen während der Trocknung, einer Verkürzung der Aufheizzeit sowie zu einer signifikant kürzeren Trocknungszeit und somit höheren Trocknungsraten. Zu beachten ist allerdings, dass höhere Energieeinträge zu visuellen Schädigungen der Beschichtungen führen, die sich in der Entstehung thermisch bedingter Anlauffarben auf der Stromsammelfolie sowie Rissbildung in der Elektrodenbeschichtung äußern. Somit kann das Leistungspotenzial des Lasermoduls nicht vollständig ausgenutzt werden. Um Schädigungen zu vermeiden, sollten Elektroden innerhalb eines Energieeintragsbereichs von ca. 142 bis $160\ J\ cm^{-2}$ getrocknet werden.

Vergleichende REM-Aufnahmen der Oberflächen einer konvektiv prozessierten Referenzelektrode sowie von bei verschiedenen Energieeinträgen lasertrockneten Elektroden zeigen keinen erkennbaren Einfluss der Trocknungsintensität auf die Partikelmorphologie des Aktivmaterials. Demgegenüber hat der Energieeintrag einen nachweisbaren Einfluss auf die die mechanischen und elektrischen Elektrodeneigenschaften. Eine Steigerung des Energieeintrags führt zu einer Steigerung der Trocknungsrate bei einer gleichzeitigen Verringerung der Haftfestigkeit sowie einer Erhöhung des elektrischen Widerstandes der Beschichtungen (Abbildung 17). Die mit steigender Trocknungsrate einhergehende Abnahme der Elektrodenqualität kann auf Segregationsprozesse der Binder- und Leitrußkomponenten innerhalb der Beschichtung zurückgeführt werden.

Dennoch lässt sich die Trocknungsrate mittels stationärer Lasertrocknung im Vergleich zum Referenzprozess um bis zu 72% bei mit der Referenz vergleichbaren Elektrodeneigenschaften steigern. Abschließend durchgeführte C-Ratentest zur Untersuchung der elektrochemischen Performance der Elektroden zeigen keinen statistisch relevanten Einfluss der Lasertrocknung sowie der Trocknungsintensität auf die erreichten Entladekapazitäten bei verschiedenen C-Raten und validieren somit die Funktionsfähigkeit der mittels VCSEL prozessierten Elektroden (Abbildung 17).

Vergleich der Technologien im hybriden Rolle-zu-Rolle Trocknungsprozess:

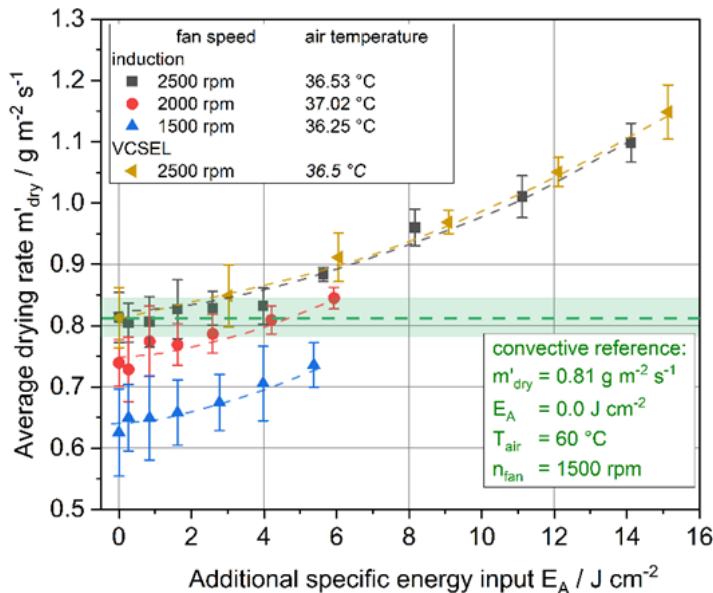


Abbildung 18. Mittlere Trocknungsrate in Abhängigkeit der zusätzlich eingebrachten Energie mittels Induktion- oder VCSEL-Technologie

Im Rahmen eines weiteren Versuchsansatzes wurde die Induktions- und VCSEL-Trocknung als Booster im zweiten von insgesamt sechs Trocknersegmenten der 6 m langen Rolle-zu-Rolle-Anlage vom Typ KTF-S 350 der Werner Mathis AG integriert wurde. Bei einer konstanten Bahngeschwindigkeit von 2 m/min, einem einheitlichen Trockengewicht von 115 g/m² und einem Feststoffanteil von 50% in der Suspension wurde die zugeführte Leistung in jeder neuen Versuchsanordnung schrittweise erhöht. Mit Hilfe von Infrarot-Pyrometern, die in regelmäßigen Abständen entlang der Trocknerstrecke installiert wurden, konnte der Zeitpunkt des charakteristischen Temperaturanstiegs, der das Ende des Trocknungsprozesses der Elektrode markiert, genau bestimmt und daraus eine mittlere Trocknungsgeschwindigkeit abgeleitet werden. Die Ergebnisse zeigten, dass die mittlere Trocknungsrate der Anoden in erster Linie von der eingebrachten spezifischen Energie und nicht direkt von der gewählten Therapiemethode (Induktion vs. VCSEL) abhängt (Abbildung 18).

Zur Bewertung der Elektrodenqualität wurden fünf Parameter herangezogen: die Haftfestigkeit (ermittelt mittels Stirnabziehversuch), der Helligkeitswert der Elektrodenoberfläche (gemessen mit einem ColorLite Farbwertsensor), die Oberflächenrauheit (mittels Keyence Lichtmikroskop), der ionische Widerstand (mittels Impedanzmessung unter Verwendung eines nicht interkalierenden Elektrolyten) sowie die elektrochemische Performance. Unabhängig von der verwendeten Trocknungstechnologie erwies sich die mittlere Trocknungsrate als wesentlicher Einflussfaktor auf die resultierende Elektrodenqualität. Eine erhöhte Trocknungsrate führte zu einer Abnahme der Haftfestigkeit, was als Hinweis auf eine erhöhte Bindermigration.

interpretiert wurde [Westphal et al. 2018]. Des Weiteren nahm die Helligkeit der Elektrodenoberfläche ab, was auf eine erhöhte Rußmigration zurückgeführt werden kann [Weber&Schoo et al. 2022]. Darüber hinaus wurde eine Verringerung der Oberflächenrauigkeit beobachtet, die möglicherweise auf eine verstärkte Füllung der oberflächennahen Poren durch Ruß und Binder zurückzuführen ist.

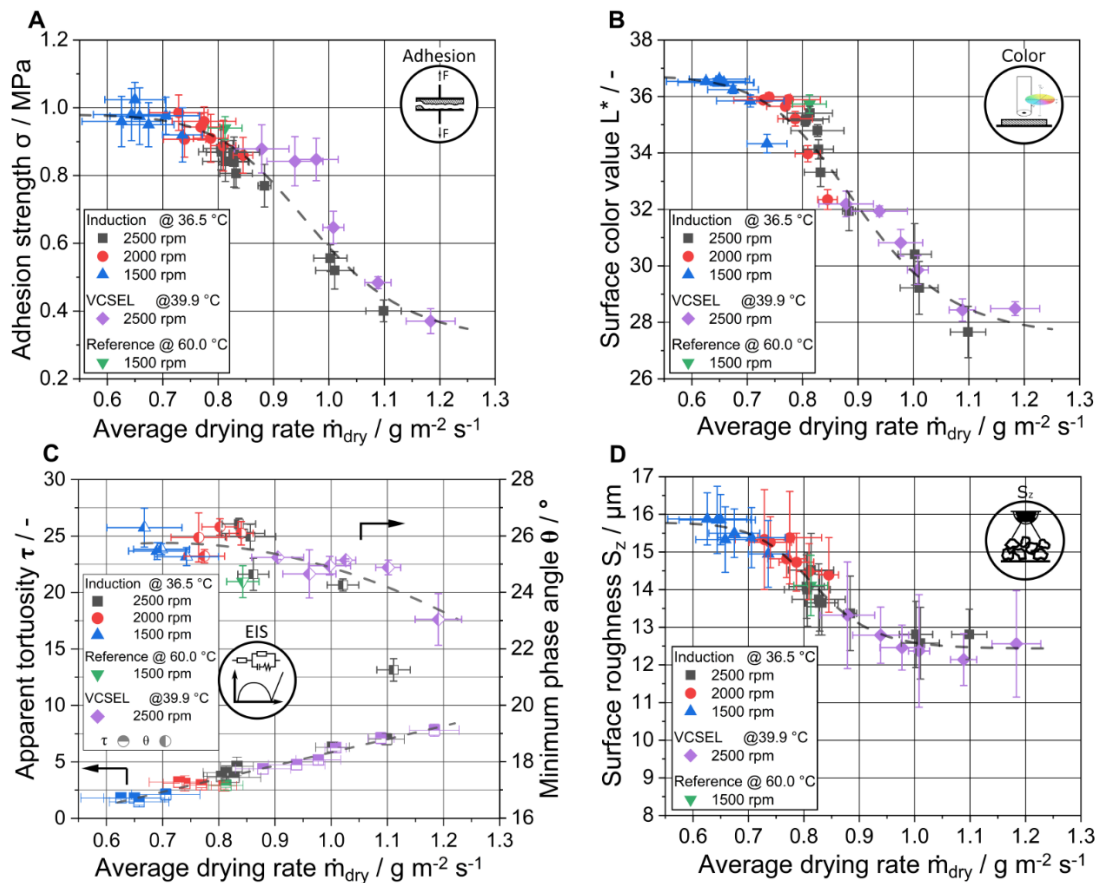


Abbildung 19: Elektrodenqualität in Abhängigkeit der mittleren Trocknungsrate für Anoden aus Induktions- und Laserunterstützter Trocknung; (A) Haftfestigkeit, (B) Oberflächenhelligkeit, (C) Scheinbare Tortuosität und Minimum des Phasenwinkels, (D) Oberflächenrauheit.

Diese Phänomene könnten die Ursache für den bei Impedanzmessungen beobachteten Anstieg des ionischen Widerstandes an Anoden mit erhöhter mittlerer Trocknungsrate sein, der sich letztlich in einer höheren scheinbaren Tortuosität niederschlägt, berechnet nach Landesfeind et al. [Landesfeind et al. 2016]. Die dichte Oberflächenstruktur der Elektroden, bedingt durch die Migration von Binder und Ruß, behindert den Elektrolyten und spiegelt sich somit in der elektrochemischen Performance wider. Darüber hinaus konnte eine signifikante Verschlechterung der Langzeitstabilität der Elektroden mit zunehmender mittlerer Trocknungsrate festgestellt werden. Bei vergleichenden Impedanzmessungen und elektrochemischen Tests schnitten die induktiv getrockneten Elektroden bei sehr hohen Energieeinträgen schlechter ab als die mittels VCSEL-Trocknung hergestellten Proben, was sich in einem niedrigeren Minimum des Phasenwinkels bei der Impedanzmessung, sowie in einer stärkeren Alterung bei der Langzeitzyklisierung niederschlug. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass bei der Induktion die Energie in einem wesentlich kürzeren Zeitraum eingebracht wird, was zu einem stärker ausgeprägten Peak in der zusätzlich eingebrachten Wärmeleistung führt und damit möglicherweise die Effekte verstärkt, die zu einer Erhöhung der Segregationsphänomene beitragen.

Wechselwirkungsanalyse der Elektroden- und Zellproduktion im Trockenraum

Um die Auswirkungen unterschiedlicher Konditionierungen der Trockenraumatmosfera (Luft mit Taupunkt: -25 °C bis -45 °C) zu untersuchen und Energieeinsparungspotentiale zu identifizieren, wurde die Wasseraufnahme bei einer Rebeefeuchtung von Referenzelektroden (Kathode NMC622-Beschichtung auf Aluminium, Anode Graphit-Beschichtung auf Kupfer) in einer Glovebox nach Durchführung eines Trocknungsschrittes in Abhängigkeit der Befeuchtungsdauer ermittelt (Abbildung 20). Sowohl bei der Anode als auch bei der Kathode kam es zu einem nichtlinearen Anstieg der Wasseraufnahme mit steigendem Taupunkt, der für die Anode deutlich größer ausfällt als für die Kathode. Dies ist vermutlich auf das hydrophobe PVDF Kathodenbindersystem

im Vergleich zum hydrophilen CMC/SBR-Anodenbindersystem zurückzuführen. Mit Hilfe der ermittelten Messergebnisse können über die aufgenommene Wassermenge Querrelationen zwischen der Befeuchtungsdauer und der mit dem Taupunkt angegebenen Atmosphärenfeuchtigkeit geschlossen werden.

Für die Untersuchungen zur Zellqualität wurden Zellen mit einer Anode, einer Kathode und einem dazwischenliegenden Separator gefertigt, nach einer Befeuchtungsdauer von 60 Minuten bei unterschiedlichen Taupunkten (5 °C) mit Elektrolyt befüllt und entgast. Anschließend wurden die Zellen formiert und über 100 Zyklen zyklisiert, wobei wiederholte Kapazitäts- und Puls-Tests durchgeführt wurden. Nach 100 Zyklen lässt sich kein negativer Einfluss eines höheren Taupunkts auf die Entladekapazität feststellen. Aus der Entwicklung der Widerstände ist beim Vergleich der Taupunkte ersichtlich, dass die Zellen aller Taupunkte ähnliche Widerstandswerte und Widerstandsschwankungen aufweisen. Diese Schwankungen lassen sich vermutlich auf Fertigungsungenauigkeiten im Laborzellbau (z. B. durch ungenügende Fixierung) zurückführen. Insgesamt lässt sich nach 100 Zyklen keine eindeutige Tendenz erkennen, sodass eine Energieeinsparung durch Konditionierung der Trockenraumatmosfera auf einen Taupunkt von -30 °C möglich erscheint. Es verbleibt aber ein weiterführender Forschungsbedarf in Hinblick auf die Entwicklung der Zellen bei höheren Zyklenzahlen.

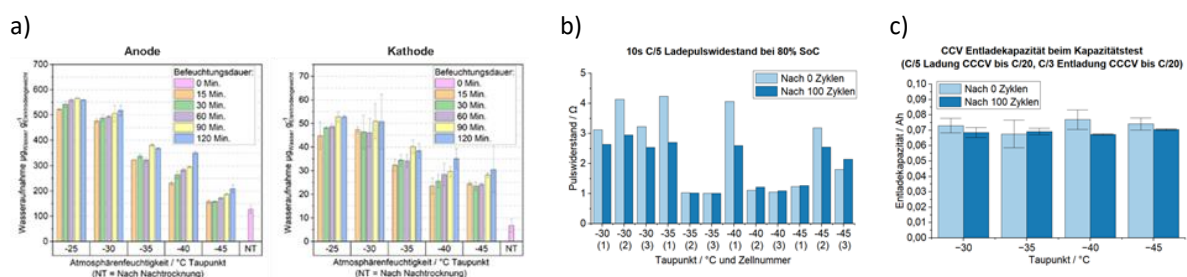


Abbildung 20. a) Ermittelte Wasseraufnahme bei Rebefeuchtung, b) CCCV Entladekapazität des Kapazitätstest (C/5 Ladung CCCV bis C/20, C/3 Entladung CCCV bis C/20) nach der Formierung (0 Zyklen) sowie nach 100 Zyklen und c) Ladepuls-widerstand bei einem Ladezustand von 80% nach Formierung (0 Zyklen) und nach 100 Zyklen

Ermittlung prozessrelevanter Zwischen- und Endprodukteigenschaften

Bei der Ermittlung materialgerechter Prozessfenster lag ein besonderer Fokus auf der Veränderung der Haftfestigkeit der Aktivmaterialbeschichtung, da diese einen wesentlichen Indikator für strukturelle Veränderungen innerhalb der Beschichtung darstellt. Insbesondere begünstigen lokale Veränderungen und durch mechanische Belastungen induzierte Fehlstellen – wie sie beispielsweise beim Ablösen von Partikeln auftreten – in der aktuellen Forschungslage eine erhöhte Anfälligkeit für Lithium-Plating und damit eine vorzeitige Alterung von Lithium-Ionen-Batterien. Zur Ermittlung der Haftfestigkeit wurden Stirnabzugsversuche durchgeführt. Als prozessimmanente Belastungen wurden Druckbelastungen, Reibbelastungen unter Einsatz verschiedener prozesseitig vorkommender Reibkörpermaterialien sowie Stoßbelastungen untersucht (Abbildung 21). Unter Druckbeanspruchung, wie sie beispielsweise im industriellen Stapelprozess beim Niederhalten auftritt, zeigt sich bereits ab einer Überschreitung einer Belastung von 0,5 N/mm² eine Verminderung der Haftfestigkeit der Kathodenbeschichtung. Dieses Resultat erscheint überraschend, da im vorangegangenen Kalandrierprozess der Kathoden Druckbelastungen im zweistelligen MPa-Bereich aufgebracht wurden. Es wird vermutet, dass die unterschiedliche Kontaktart – linienförmig beim Kalandrierprozess und flächig im Versuch – einen maßgeblichen Einfluss auf die Binderstruktur der Beschichtung ausübt. Folglich sollten Niederhaltekräfte für die Kathoden minimiert werden und nicht oberhalb von 0,5 N/mm² liegen. Für die Anoden konnte eine Abnahme der Haftfestigkeit in Abhängigkeit von Druckbelastungen nicht identifiziert werden. Bei Reibbelastung zeigte sich ein unterschiedliches Verhalten in Abhängigkeit der Elektrodenart und des Kontaktkörpers. Für die Anoden konnte keine Abnahme der Haftfestigkeit nach Reibbelastung beobachtet werden. Sie weisen nach Reibbelastung aber mit steigender Härte des Kontaktkörpers (Edelstahl > Aluminium > POM) zunehmende Riefenbildungen auf der Oberfläche auf, die nur bei Wahl von POM als Kontaktkörper vermieden werden konnten. Die Abhängigkeit der Riefenbildungen von der Härte wurde ebenfalls für die belasteten Kathoden beobachtet, war hier aber weniger stark ausgeprägt. Mit abnehmender Härte der

Kontaktmaterialien zeigt sich für diese allerdings eine zunehmende Verringerung der Haftfestigkeit. Ein geeigneter Kontaktkörper ohne Reduzierung der Haftkraft und mit geringer Riefenbildung stellte für die Kathoden eloxiertes Aluminium dar. Reibbelastungen sollten im industriellen Prozess auf Basis dieser Versuche daher möglichst vermieden werden. An Stellen, wo eine Vermeidung nicht möglich ist, empfiehlt sich eine Verwendung von POM als Kontaktwerkstoff für die Anode und eloxiertem Aluminium für die Kathode. Um den Einfluss von Stoßbelastungen zu ermitteln, wurden Falltests der Elektroden sowohl auf einen ebenen Aufprallblock als auch auf einen um 10° geneigten Aufprallblock durchgeführt. Hierbei kam es bereits bei einer Fallhöhe von 100 mm zu einer Verringerung der Haftfestigkeit, die sich auch in Beschädigungen der Beschichtung im Eckbereich zeigten. Stoßbelastungen, wie sie beispielsweise bei der Führung mit Förderbändern zur Umlenkung denkbar sind, sollten daher zur Qualitätssteigerung in industriellen Prozessen vermieden werden.

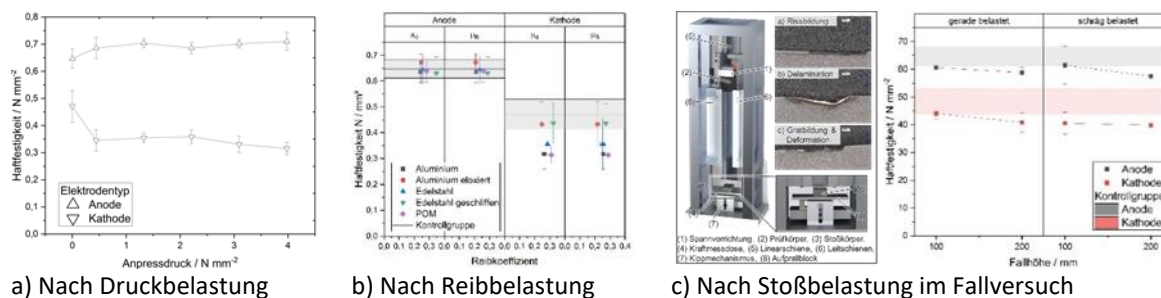


Abbildung 21. Mechanische Veränderung der Haftfestigkeit nach Aufbringung prozessimmanenter Belastungen (siehe auch voraussichtliche Dissertationsveröffentlichung von Christina von Boeselager)

Ökoeffizienzbewertung

Zur Bewertung der Ökoeffizienz der konventionellen Batteriezellenproduktion sowie der neu entwickelten Prozesstechnologien (Induktions- und Lasertrocknung) wurden sämtliche prozessrelevanten Parameter, Maschinendaten und Energieverbrauchswerte systematisch erfasst. Die Datenerhebung erfolgte entweder über das integrierte Messsystem der Produktionsanlagen oder durch den Einsatz mobiler Messgeräte, wodurch eine vollständige und konsistente Datengrundlage für die nachfolgende Analyse und Digitalisierung gewährleistet wurde.

Die umfassende Analyse der Zellproduktion basierte zunächst auf einer Energie- und Materialflussanalyse (Energy Value Stream Mapping – EVSM), die zur Identifikation von Energie- und Materialeffizienz-Hotspots diente. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde in der Simulationssoftware *AnyLogic* ein multiskaliges Modell der Batteriezellenproduktion entwickelt. Dieses Modell bildet die gesamte Prozesskette – von der Elektrodenfertigung über die Zellaufbau bis hin zur Formierung – unter Berücksichtigung der Material- und Energieflüsse digital ab (Abbildung 22). Unter Verwendung von Referenzzellendaten und produktionsspezifischen Szenarien (z. B. Schichtpläne, Maschinenkapazitäten) ermöglicht das Modell die Quantifizierung von Einsparpotenzialen sowie die frühzeitige Detektion von Engpässen entlang der Prozesskette. Zusätzlich wurde ein Trockenraummodell in die Prozessketten-Simulation integriert, das den Energiebedarf für die Klimatisierung des Trockenraums während der Zellaufbauphase berechnet. Das Trockenraummodell basiert auf einem physikalisch fundierten Ansatz, der die Leistungsaufnahme der raumklimatisierenden Anlagen (HVAC-Systeme) in Abhängigkeit von variablen Eingabeparametern bestimmt. Zu diesen Parametern zählen unter anderem: Anzahl der im Raum arbeitenden Personen, Zielwerte für Raumtemperatur und Luftfeuchtigkeit, Spezifische Geräteleistungen. Diese Parameter werden zu Simulationsbeginn definiert (vgl. rote Kontur in Abbildung 22), sodass das Modell die aggregierte Leistungsaufnahme der HVAC-Systeme sowie den daraus resultierenden Energieverbrauch über die Produktionsdauer berechnen kann.

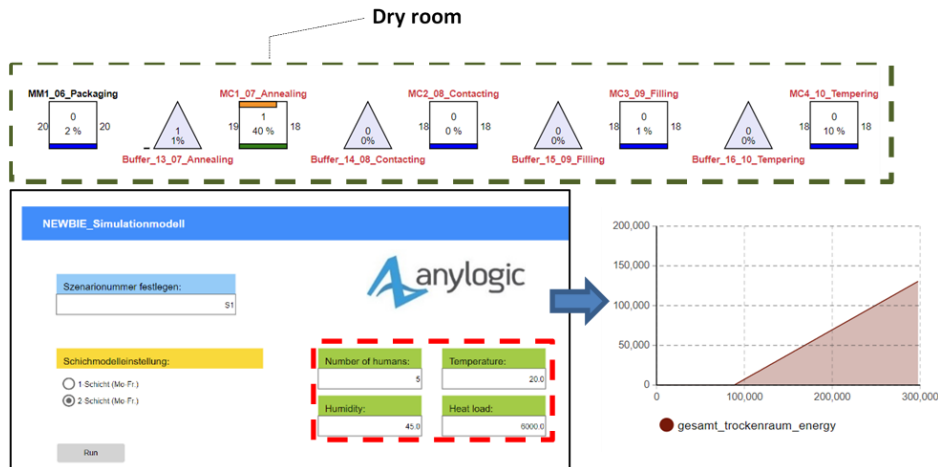


Abbildung 22. Modellierung des Trockenraums für Zellassemblierung im Prozesskettenmodell

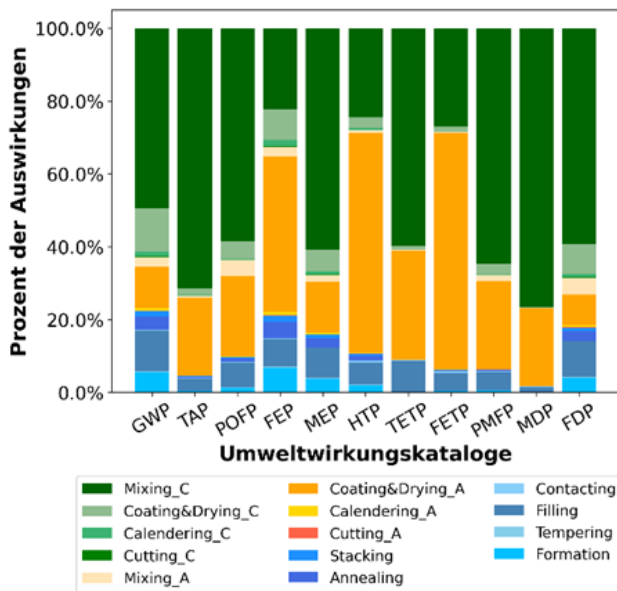


Abbildung 23. Beitragsanalyse, die die Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCIA) der Referenzzelle mit reiner Konvektionstrocknung zeigt (links, GWP: global warming potential; TAP: terrestrial acidification; POFP: photochemical oxidant formation; FEP: freshwater eutrophication; MEP: marine eutrophication; HTTP: human toxicity; TETP: terrestrial ecotoxicity; FETP: freshwater ecotoxicity; PMFP: particulate matter formation; MDP: metal depletion; FDP: fossil depletion)

Für die ökologische Bewertung der Batteriezellenproduktion wurde eine Schnittstelle zum LCA-Tool *Brightway 2* implementiert. Diese ermöglicht die automatische Analyse der Energie- und Materialverbräuche (einschließlich produktionsbedingtem Ausschuss) und deren Umweltauswirkungen. Die Ergebnisse der Ökobilanzierung sind in Abbildung 23 am Beispiel der Referenzzelle (Anode: Grafite, Kathode: NMC 622) zusammengefasst. Die funktionelle Einheit ist eine Zelle im Format von BLB 1 (Anode: 50mm x 70mm, Kathode: 45mm x 65mm) mit einem Kompartiment (ein Anode-Kathode-Verbund). Die Analyse zeigt, dass die Kathodenmischung den dominierenden Einfluss auf die gesamten Umweltauswirkungen der Zellproduktion hat. Dies ist primär auf den Einsatz kritischer Rohstoffe wie Nickel, Kobalt und Lithium zurückzuführen, die sowohl in der Herstellung als auch in der Beschaffung mit erheblichen ökologischen Belastungen verbunden sind. Abbildung 23 veranschaulicht

diese Effekte im Kontext der gesamten Prozesskette und quantifiziert die Beiträge einzelner Material- und Energieflüsse.

Bezüglich der neuen entwickelten Trocknungsprozesse wurde im Vorversuch zur Anodenfertigung der Energieverbrauch konventioneller konvektiver Trocknung mit kombinierter konvektiv-induktiven Methode bei variierenden Induktionsspannungen verglichen, wobei Energieverbrauch, Durchsatz, CO₂-äq Emissionen und Kosten analysiert wurden. Die genauen Darstellungen der Kernergebnisse wurden bereits in Meilenstein 3.2 gegeben. Aufbauend auf den Ergebnissen wurde eine weitere vergleichende Analyse der Energieeffizienz von konvektiver, induktiver und Lasertrocknung durchgeführt. Die Versuchsparameter und Elektrodenqualitätsbewertungen sind bereits in UAP 3.1 und 3.2 dokumentiert. Der berechnete spezifische Energiebedarf unter Temperaturanpassung der Trocknungsraten für die VCSEL-Versuche ist in der Abbildung 24-A dargestellt. Die Abbildung 24 zeigt eine deutliche Reduktion des spezifischen Energiebedarfs um 51,4 % (von 0,319 auf 0,155 kWh m⁻²) bei deaktivierter Trocknerluftheizung und 1500 U min⁻¹ Lüfterdrehzahl. Diese Einsparung ist primär auf die um 63 % geringere Leistungsaufnahme des Konvektionstrockners zurückzuführen (3463,8 W ohne Heizung gegenüber 9262,0 W bei 60 °C). Durch die Erhöhung der Lüfterdrehzahl auf 2000 bzw. 2500 U/min bei 36,5 °C konnte der spezifische Energiebedarf aufgrund verbesserter Konvektion und reduzierter Trockenlänge weiter auf 0,131 kWh m⁻² (-15,5 %) bzw. 0,119 kWh m⁻² (-23,2 %) gesenkt werden. Zusätzliche Wärmezufuhr führte generell zu höherem Energiebedarf, wobei bei 6 J cm⁻² der VCSEL-Wärmeeintrag mit 0,142 kWh m⁻² um 5,6 % über dem induktiven Wert (0,134 kWh m⁻²) lag, was auf den geringeren Systemwirkungsgrad der VCSEL-Technologie zurückzuführen ist.

Die Gegenüberstellung von spezifischem Energiebedarf und Trocknungsraten (Abbildung 24-B) zeigt, dass zusätzlicher Wärmeeintrag sowohl die Energieeffizienz als auch die Produktionskapazität verbessern kann. Durch die Steigerung der Lüfterdrehzahl auf 2500 U min⁻¹ konnte der durch Heizungsabschaltung verursachte Rückgang der Trocknungsrate (0,813 g m⁻² s⁻¹) ausgeglichen werden, während gleichzeitig der Energiebedarf um 37,4 % auf 0,119 kWh cm⁻² sank. Bei induktiver Zusatzheizung (5,6 J cm⁻²) erhöhte sich die Trocknungsrate um 8 % auf 0,884 g m⁻² s⁻¹ bei einem moderaten Anstieg des Energiebedarfs um 12,6 % auf 0,134 kWh m⁻², wobei die Elektrodenqualität erhalten blieb. Diese Ergebnisse demonstrieren das Optimierungspotenzial durch gezielte Anpassung der Prozessparameter, wodurch eine Steigerung der Produktivität bei gleichzeitiger Energieeinsparung ermöglicht wird. Die Ergebnisse der im Projekt durchgeführten Versuche ermöglichen die Ableitung zielgerichteter Verbesserungsmaßnahmen für die Elektrodenfertigung, wobei die konkrete Ausgestaltung von den jeweiligen Produktionszielen abhängt.

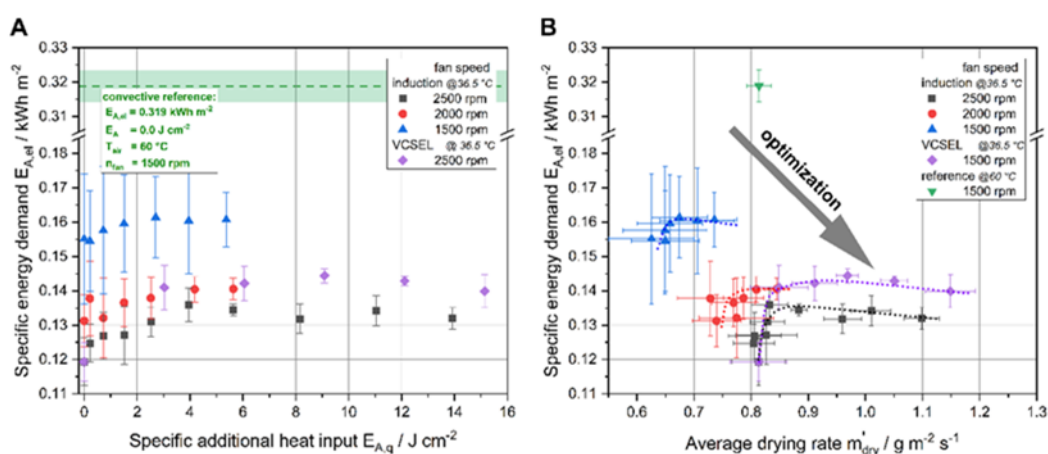


Abbildung 24. Gesamter spezifischer Energiebedarf pro Quadratmeter Elektrode (A), skaliert mit dem spezifischen zusätzlichen Wärmeeintrag (B) im Vergleich zur durchschnittlichen Trocknungsrate als Maß für den Durchsatz

AP4, BLB-Fließtext

Zunächst wurden konventionelle Formierungsprozeduren an Experimentalzellen mit Referenzelektrode erprobt, um sicher zu stellen, dass während der Formierung kein Lithium-Plating auftritt. Die formierten Zellen wurden elektrochemisch mit Kapazitätstest, C-Raten-Test und Impedanzspektroskopie charakterisiert. Auf Basis der Ergebnisse wurden Formierungsstrategie, C-Raten-Test und Zyklierungsprozedur angepasst. Die daraus abgeleiteten Testprotokolle wurden auf mehrlagige Pouch-Zellen hochskaliert und es konnte festgestellt werden, dass sich das Zellverhalten von den Experimentalzellen auf die Pouch-Zellen übertragen lässt. Die Experimentalzellen wiesen bei einer geladenen C-Rate ab 3,8 V ein negatives Elektrodenpotential auf, was die Schnellladefähigkeit bei einer C-Rate oberhalb von 0,5 C beschränkte. In Abbildung 25 ist die Zyklierung der Referenz-Pouch-Zellen bei den Laderaten 0,5 C, 1 C, 2 C und 3 C bei einer jeweiligen Entladerate von 1 C dargestellt.

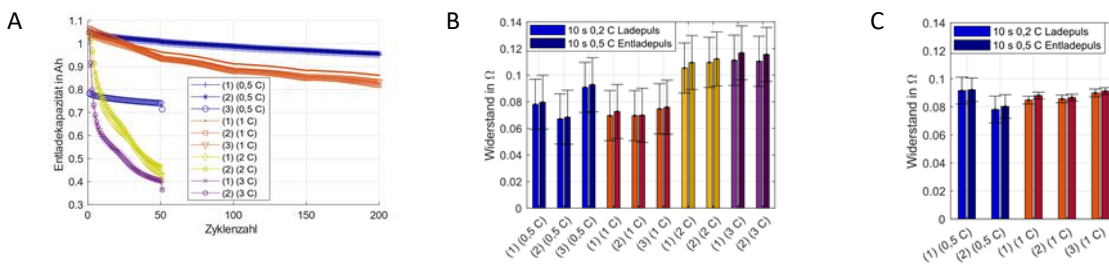


Abbildung 25. Zyklierung der Referenz-Pouch-Zellen bei 0,5 C, 1 C, 2 C und 3 C Laderate mit CV bis 0,05 C in den Spannungsgrenzen 2,9 V bis 4,2 V bei einer jeweiligen Entladerate von 1 C mit CV bis 0,05 C, CCCV Entladekapazität über Zyklenzahl (A), Lade-Entlade-Widerstände nach 50 Zyklen (B) und nach 200 Zyklen (C) bei einem Ladezustand von 50 %

Es zeigt sich bei den Laderaten 3 C und 2 C nach 50 Zyklen ein Kapazitätsverlust um etwa 40 % bis 60 % und einem Widerstandsanstieg um ca. 70 % im Vergleich zu den Werten nach der Formierung. Die Zellen mit 0,5 C bzw. 1 C Laderrate weisen nach 200 Zyklen einen Kapazitätsverlust von ca. 15 % bzw. 25 % und einen Widerstandsanstieg um ca. 40 % auf.

Aufgrund der Ergebnisse der Experimental- und Referenzzellen wurde die obere Spannungsgrenze bei der Zyklierung auf 3,8 V herabgesetzt. In Abbildung 26 sind Ergebnisse von mehrlagigen großformatigen Pouch-Zellen dargestellt. Es sind die Entladekapazitäten über 600 Zyklen (A) sowie die Lade-Entladewiderstände nach der Formierung (C) und nach 600 Zyklen (D) dargestellt. Die gelb eingefärbten Werte stellen dabei die Ergebnisse der Zellen dar, dessen Elektrodenmaterial konvektiv getrocknet wurden und die blau eingefärbten Werte Zellen mit induktiv getrocknetem Material.

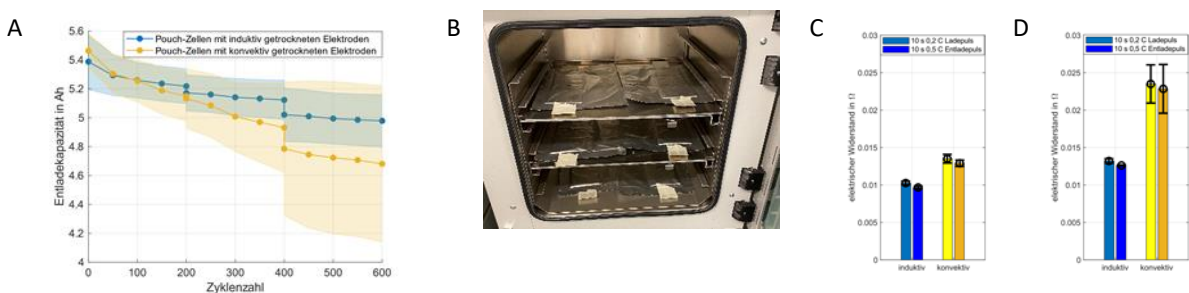


Abbildung 26. Zyklierung mit 2 C Laderate und 1 C Entladerate jeweils mit CV bis 0,05 C in den Spannungsgrenzen 2,9 V bis 3,8 V vom großformatigen Pouch-Zellen mit induktiv (blau) und konvektiv (gelb) getrocknetem Elektrodenmaterial über 600 Zyklen: Entladekapazität des Kapazitätstests Ladung 0,2 C, Entladung 0,333 C jeweils mit CV bis 0,05 C in den Spannungsgrenzen 2,9 V bis 4,2 V (A), Foto der Pouch-Zellen mit Gastasche (B), Lade-Entlade-Widerstände nach Formierung (C) und nach 600 Zyklen

Es lässt sich feststellen, dass die Zellen mit induktiv getrocknetem Material im Durchschnitt 6 % weniger Kapazitätsverlust aufweisen und die Lade- und Entladepuls Widerstände halb stark ansteigen als die Zellen mit

konduktiv getrocknetem Material. Es zeigt sich, dass das induktive Trocknen keinen negativen Einfluss auf die Zellperformance zu haben scheint.

Tabelle 7: Verwendung Teilvorhaben (Mahle, D)

Geplantes Ergebnis	Erzieltes Ergebnis
Ladezeit von 5 – 95% SOC <15 min, idealerweise <10min	Aus Arbeitspaket 1 „Definition der KPIs“: <ul style="list-style-type: none"> - Nachschärfung des relevanten Bereichs für Automobilanwendungen bezüglich Usercase „Nachtanken“: Ladezeit von 10 – 80% SOC <15min, idealerweise <10min Aus Performancetest Batteriemodul GEN1: <ul style="list-style-type: none"> - Schnellladen in 10,7 min (10 - 80% SOC) Aus Performancetest Batteriemodul GEN2: <ul style="list-style-type: none"> - Schnellladen in 13,4 min (10 – 80% SOC)
Definition Anforderungen für die Entwicklung der Batteriemodule	Mit Mercedes abgestimmtes Lastenheft für Batteriemodul GEN1 und GEN2
Konzept, Auslegung und Design der Immersionskühlung mit fortschrittlichen Kühlmedien für eine effizientere Kühlung im Batteriemodul	Batteriemodul GEN1: <ul style="list-style-type: none"> - Auswahl eines Öls als dielektrisches Kühlmedium - Erste Konzeptauslegung der Immersionskühlung zur Verbesserung der Temperaturhomogenität und Verringerung der Maximaltemperatur im Batteriemodul Batteriemodul GEN2: <ul style="list-style-type: none"> - Finale Auslegung und Design der Immersionskühlung mit Überarbeitung des Thermomanagementkonzepts (z.B. Fluidverteilung und Anzahl der Wärmeableiter) aufgrund signifikanter Änderungen des Gehäusedesigns
Konzept, Auslegung und Design der elektrischen Architektur im Batteriemodul	Batteriemodul GEN1: <ul style="list-style-type: none"> - Erste Konzeptauslegung der elektrischen Architektur mit Zellkontaktierung, Überwachung der Zelltemperaturen und -spannungen sowie passivem Zellbalancing Batteriemodul GEN2: <ul style="list-style-type: none"> - Finale Auslegung und Design der elektrischen Architektur mit Überarbeitung der Zellkontaktierung und des LV-Netzwerks (z.B. bezüglich Routing und Pinning der flexiblen Leiterplatten (FPC) sowie Position der Temperatursensoren (NTC)) und Neuentwicklung der Überwachungselektronik (CSC) aufgrund signifikanter Änderungen des Gehäusedesigns
Konzept, Auslegung und Design des verstärkten Kunststoffgehäuses	Batteriemodul GEN1: <ul style="list-style-type: none"> - Erste Konzeptauslegung des verstärkten Kunststoffgehäuses - Erfüllung der mechanischen Anforderungen (insbesondere Innendruckbelastung) nur mit

	<p>hohem Bauraumbedarf möglich (nicht konkurrenzfähig mit aktuellem Stand der Technik)</p> <ul style="list-style-type: none"> - aufgrund hoher Bedeutung des Bauraumbedarfs für Automobilanwendungen - insbesondere im Bereich der Elektromobilität - Weiterverfolgung eines faserverstärkten Kunststoffgehäuses nicht zielführend <p>Batterieminidul GEN2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erarbeitung eines neuen Gehäusedesignkonzepts und finale Auslegung und Design des Aluminium-Kunststoffgehäuses - Erfüllung der mechanischen Anforderungen mit Verbesserungen der Sicherheit (mechanisch und thermisch) sowie Reduzierung des Bauraumbedarfs (ca. -25% des Fluid- bzw. Batteriemodulvolumens) im Vergleich zu GEN1
Bestätigung des Batteriemodulkonzepts anhand von Simulationen	<p>Batterieminidul GEN1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Erste thermische, strömungsmechanische, elektrische und mechanische Simulationen durchgeführt <p>Batterieminidul GEN2:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Bestätigung des Batteriemoduldesigns anhand thermischer, strömungs-mechanischer, elektrischer und mechanischer Simulationen - Simulationen aufgrund Designoptimierungen (basierend auf Rückmeldungen von Teilleferanten und aus Aufbautests der Prototypen) sowie zur Bewertung von Zellabweichungen (basierend auf Rückmeldungen aus der Zellproduktion GEN2) aktualisiert
Produktionsprozess Batteriemodule incl. CO ₂ - und Recyclingevaluierung	<ul style="list-style-type: none"> - Serientaugliches Batteriemodulkonzept bezüglich Design und Prozess - keine CO₂-Einsparung (bezogen auf das Material) des Aluminium-Kunststoffgehäuses gegenüber derzeitigen Metallgehäusen - bis auf die Zellebene demontierbares Batteriemoduldesign, das die Zuführung der einzelnen Komponenten in separate Recyclingprozesse ermöglicht
Aufbau und Bereitstellung von Batteriemodulen für Batteriemodultests	Insgesamt drei GEN1- und sieben GEN2-Batteriemodule gefertigt
Batteriemodultests GEN1 und GEN2	<p>Batterieminidul GEN1:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Performancetest: Schnellladen in 10,7 min (10 bis 80% SOC) <p>Batterieminidul GEN2</p> <ul style="list-style-type: none"> - Performancetest: Schnellladen in 13,4 min (10 bis 80% SOC)

	<ul style="list-style-type: none"> - Mechanische Tests: Crash-Shock (x/y), Crush, Temperaturwechsel und Vibration bestanden - Abusetest: Verzögerung der Propagation der zweiten Zelle um 7 min
Auswertung und Dokumentation der durchgeführten Simulationen und Validierungstests	Durchgeführte Simulationen und Validierungstests ausgewertet und dokumentiert

Im **Arbeitspaket 5** ist das Batteriemodul mit Unterstützung von thermischen, strömungsmechanischen, elektrischen und mechanischen Simulationen entwickelt worden. Hierfür ist zu Beginn ein Lastenheft für die Batteriemodule GEN1 und GEN2 in Zusammenarbeit mit Mercedes erstellt worden. Dieses umfasst die Randbedingungen des Fahrzeugs, der Sicherheit, der Umgebung, des Materials und des Service sowie die relevanten elektrischen, thermischen und mechanischen Anforderungen. Basierend auf den Maßen der Pouchzellen und dem üblichen verfügbaren Bauraum in einem Fahrzeug wurde eine potenzielle Packarchitektur definiert. Hierbei beinhaltet ein Pack sechs Batteriemodule und weist eine max. Spannung von ca. 800 V auf. Ein Batteriemodul enthält jeweils 32 in Reihe verschaltete Pouchzellen (32s1p) und hat eine max. Spannung von ca. 130V. Eine Übersicht bezüglich der Batteriemoduldaten ist in Abbildung 27 zu sehen.

Batteriemodul	GEN1	GEN2
Zellkapazität [Ah]	~83	~108
Zellverschaltung im Modul	32s1p	
Energie pro Modul [kWh]	~9,8	~12,2
max. Spannung pro Modul [V]	~130	
Module pro Pack	6	

Abbildung 27. Übersicht Batteriemoduldaten GEN1 und GEN2

Für die Konzeptauslegung (GEN1) des Batteriemoduldesigns sind die Schwerpunkte auf der Ausarbeitung des Grundkonzepts inklusive Thermomanagement mit Immersionskühlung sowie der elektrischen Architektur gelegt worden. Die im Projekt angestrebten Schnellladezeiten erfordern ein leistungsfähiges Thermomanagement, welches mittels der sogenannten Immersionskühlung umgesetzt worden ist. Es wird angestrebt, möglichst viel Oberfläche der Zellen direkt mittels des Kühlfluids zu benetzen und so die Wärme unmittelbar an der Zelloberfläche an das Fluid zu übertragen.

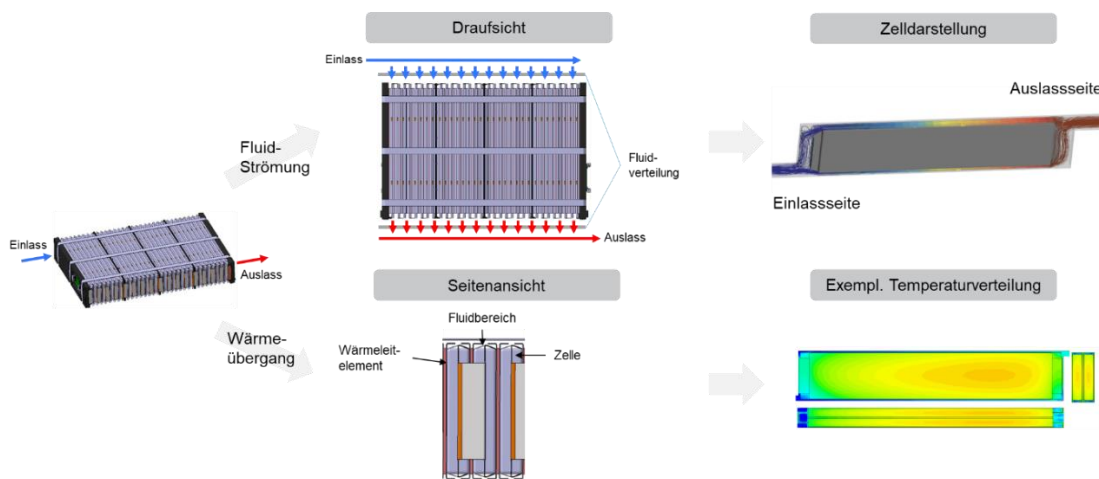


Abbildung 28. Schematische Darstellung der Durchströmung des Batteriemodulkonzepts GEN1

Abbildung 28 zeigt schematisch in Drauf- und Seitenansicht die Durchströmung des Batteriemodulkonzepts GEN1. Das Kühlfluid wird mittels eines Sammlers und eines Verteilers gleichmäßig auf das Zellpaket aufgeteilt. Es umströmt die Zellen parallel, wobei die Umströmung der einzelnen Zellen in zwei Hauptpfade aufgeteilt wird. Ein Pfad führt dabei an der Oberseite der Zellen und einer an der Unterseite der Zellen entlang. Durch die Umströmung der Zellen sowie der Wärmeleitelemente, aber auch durch die Umströmung der Zelltabs und Verbinder wird die Wärme aus den Zellen abgeführt. Hieraus folgt bspw. eine Temperaturverteilung wie unten rechts in Abbildung 28 dargestellt. Im Wesentlichen ist die Auslegung des Thermomanagementkonzepts anhand von 3D CFD- und CHT-Simulationen unterstützt worden. Des Weiteren sind verschiedene Kühlmedien bezüglich thermischer Eigenschaften, Sicherheitsaspekte, Umwelt und Verträglichkeit sowie kommerziellen Aspekten betrachtet und anschließend ein Öl als dielektrisches Kühlmedium für die Immersionskühlung des Batteriemoduls ausgewählt worden. Das ausgearbeitete Konzept für die elektrische Architektur unterteilt sich in die HC-Zellkontaktierung (High Current) sowie das LV-Netzwerk (Low Voltage), welches aus der FPC (Flexible Printed Circuit) und der CSC (Cell Supervision Circuit) besteht. Die FPC dient hierbei zum Abgriff aller Messdaten der Zellen insbesondere der Zellspannung und der Zelltemperaturen. Die Aufgabe der CSC ist die Überwachung der Zellparameter sowie die Kommunikation mit der BMU (Battery Management Unit). Für die Auslegung der elektrischen Architektur ist insbesondere die Montierbarkeit und eine möglichst geringe Beeinflussung der Fluidströmung berücksichtigt worden.

Die Bewertung des Batteriemoduldesigns GEN1 zeigt, dass die Erfüllung der mechanischen Anforderungen, insbesondere bezüglich der Innendruckbelastung, mit einem faserverstärkten Kunststoffgehäuse im finalen Batteriemoduldesign GEN2 nur mit einem sehr hohen Bauraumbedarf umsetzbar ist, welcher nicht konkurrenzfähig mit dem aktuellen Stand der Technik ist. Aufgrund der hohen Bedeutung des Bauraumbedarfs für Automobilanwendungen, insbesondere im Bereich der Elektromobilität, ist eine Weiterverfolgung eines faserverstärkten Kunststoffgehäuses für das Batteriemoduldesign GEN2 als nicht zielführend eingestuft worden.

Das finale Batteriemoduldesign GEN2 stellt eine Weiterentwicklung des GEN1-Konzepts mit zusätzlicher Berücksichtigung der mechanischen Struktur sowie Sicherheit dar. Die mechanische Struktur des Batteriemoduldesigns GEN2 ist in Bezug auf die Sicherstellung einer ausreichenden Belastbarkeit während des Betriebes und bei besonderen Ereignissen wie beispielsweise einem Unfall des Fahrzeugs ausgelegt. Hierfür sind bei der Konstruktion und Auslegung des Batteriemoduldesigns GEN2 neben den bereits für GEN1 beschriebenen Simulationen auch strukturmechanische FEA-Simulationen eingesetzt worden. Bezüglich der Sicherheit ist das Batteriemoduldesign GEN2 des Weiteren hinsichtlich der Eindämmung der thermischen Propagation optimiert worden. Hierfür sind CHT-Simulationen zur Untersuchung der Wärme- und Gasausbreitung im Falle eines thermischen Durchgehens entwickelt worden.

Aufgrund des hohen Bauraumbedarfs des Gehäusedesigns GEN1 mit einem faserverstärktem Kunststoffgehäuse ist für das Batteriemoduldesign GEN2 auf ein Aluminium-Kunststoffgehäuse gewechselt worden, wodurch zusätzliche Überarbeitungen der Immersionskühlung und der elektrischen Architektur notwendig geworden sind. Im Vergleich zu GEN1 zeichnet das Batteriemoduldesign GEN2 eine Reduzierung des benötigten Bauraums (ca. -25% Fluid- und Modulvolumen), eine Erhöhung der Innendruckfestigkeit und eine Verbesserung des mechanischen sowie thermischen Sicherheitskonzepts aus.

Für die Prototypenbatteriemodule sind sowohl das Batteriemoduldesign GEN1 als auch GEN2 auf die jeweils geplanten Validierungstests mit z.B. zusätzlicher Messsensorik angepasst worden.

Im **Arbeitspaket 4** sind Prototypen der in Arbeitspaket 5 entwickelten Batteriemodule aufgebaut und getestet worden. Die Fertigung der Prototypenbatteriemodule ist im Test- und Entwicklungszentrum für Batterietechnologien von MAHLE Powertrain in Stuttgart erfolgt. Die von Mercedes gelieferten Zellen sind bei MAHLE anhand einer definierten Wareneingangsprüfung mit dem Ziel, eine ausreichende Qualität der Zellen sicherzustellen und für die jeweiligen Tests geeignete Zellen auszuwählen, überprüft worden. Während des Projekts sind die Wareneingangsprüfung basierend auf den neuesten Erkenntnissen aus der Zell- und Batteriemodulfertigung sowie aus den Zell- und Batteriemodultests stetig weiter optimiert worden. Zur

Sicherstellung der Arbeitssicherheit sowie der Prototypenqualität während der Fertigung der Prototypenbatteriemodule ist die Konstruktion und Fertigung verschiedener Vorrichtungen erfolgt. Die gelieferten Teile, definierten Fertigungsabläufe, in Vorversuchen ausgearbeiteten Fertigungsparameter und angefertigten Vorrichtungen sind anhand eines Aufbautests durch die Fertigung eines Batteriemoduls mit Dummyzellen überprüft und anschließend optimiert worden. Im Rahmen des Projektes sind insgesamt drei GEN1- und sieben GEN2-Batteriemodule gefertigt worden.

Für das Testen der Batteriemodule ist in Zusammenarbeit mit Mercedes ein Validierungsplan erstellt worden. Dieser beinhaltet die Überprüfung von elektrischen, thermischen und mechanischen Anforderungen sowohl für den Betrieb als auch für den Fall eines Unfalls. Die im Projekt angestrebten Schnellladezeiten sind anhand von elektrisch-thermischen Performancetests mit jeweils einem Batteriemodul von GEN1 und GEN2 überprüft worden. Deren Ergebnisse sind auf Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt.

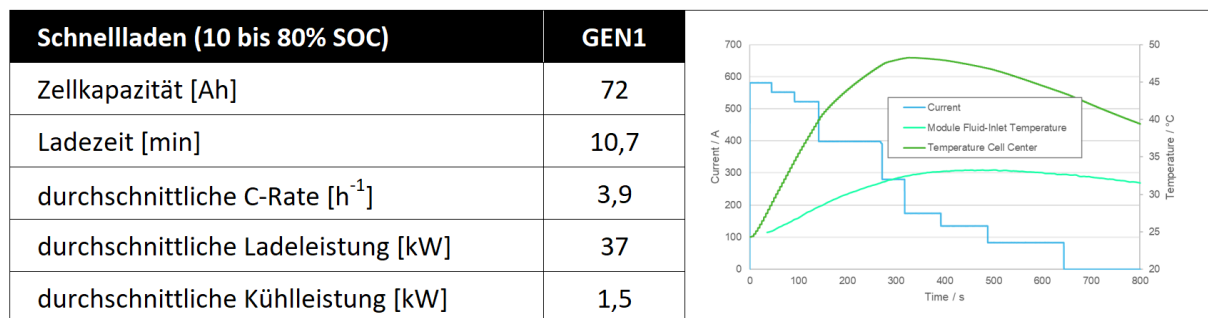


Abbildung 29. Ergebnis des Performancetests mit Batteriemodul GEN1 bezüglich Schnellladen

Mit einer Ladezeit von 10,7 min (GEN1) bzw. 13,4 min (GEN2) ist das Projektziel bezüglich einer Ladezeit unter 15 min von 10 bis 80% SOC erreicht worden.

Neben den angewendeten Stromprofilen sind in beiden Diagrammen die Fluideinlasstemperatur in das jeweilige Modul sowie die Zelloberflächentemperatur in der Mitte der großen Zellseitenfläche dargestellt. In der zweiten Abbildung ist die Temperatur an den Zellelektroden zum Vergleich zusätzlich abgebildet. In beiden Tests bleiben die Temperaturen der Zellen unter 50 °C und damit deutlich unterhalb der maximal zulässigen Temperatur.

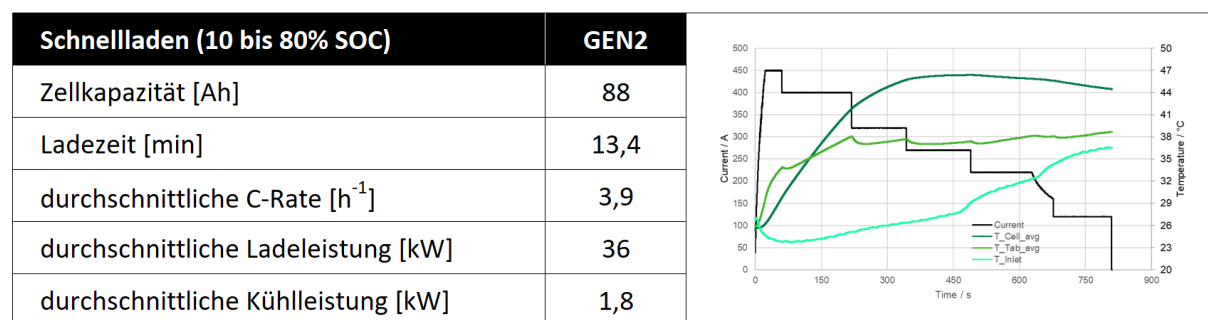


Abbildung 30: Ergebnis des Performancetests mit Batteriemodul GEN2 bezüglich Schnellladen

Aus der durchschnittlichen Kühlleistung von 1,5 kW (GEN1) bzw. 1,8 kW (GEN2) während des Schnellladens eines Batteriemoduls ergibt sich auf Fahrzeugebene - ohne Berücksichtigung der Verluste außerhalb der Module - mit sechs Modulen pro Fahrzeug eine durchschnittlich benötigte Kühlleistung von 9,0 kW (GEN1) bzw. 10,8 kW (GEN2). Diese befinden sich in einem für Thermomanagementsysteme von batterieelektrischen Fahrzeugen umsetzbaren Bereich. Die erreichten geringen Ladezeiten in Kombination mit einer auf Fahrzeugebene umsetzbaren Kühlleistung unterstreichen die hohe Kühlungseffizienz der Immersionskühlung, welche sich aus

einer verbesserten Temperaturhomogenität und verringerten Maximaltemperatur innerhalb des Batteriemoduls ergibt.

Die Überprüfung der ausreichenden Belastbarkeit des Batteriemoduls während des Betriebes und bei besonderen Ereignissen wie beispielsweise einem Unfall ist anhand verschiedener mechanischer Tests durchgeführt worden. Die Tests bezüglich Crash-Shock (x/y), Crush sowie Temperaturwechsel und Vibration sind mit dem Batteriemodul GEN2 erfolgreich bestanden worden.

Bezüglich der Sicherheit ist das Batteriemodul GEN2 des Weiteren hinsichtlich der Eindämmung der thermischen Propagation anhand eines Abuse-Tests getestet worden. Hierfür ist in einem befüllten Batteriemodul eine der Pouchzellen durch einen in die Zellseite eindringenden Nagel in die thermische Propagation versetzt worden. Das Testergebnis, dass die zweite Zelle erst 7 min nach dem Triggern der ersten Zelle selbst thermisch durchgegangen ist, zeigt eine signifikante Verzögerung der thermischen Propagation.

2.2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Mercedes-Benz (Konsortialführer):

0813 Material:

Das vorgesehene Material wurde fast vollständig benötigt und im Rahmen des Förderprojekt verbraucht. Es gab lediglich aufgrund der Corona Pandemie Lieferverzögerungen, so dass durch die bestätigte kostenneutrale Projektverlängerung, alle Materialeien rechtzeitig für das Projekt verarbeitet werden konnten

0831 Personalkosten:

Vorgesehen war im Projekt ein geplantes Leistungsvolumen von 49 tsd. Stunden und tatsächlich wurde das Projekt mit 48 tsd. Stunden intern abgewickelt. Im Prinzip sind wir mit dem Arbeiten im Plan gewesen.

0847 AfA

Die beiden vorgesehenen Geräte (Sensorzellenmessgerät und Messensortechnik zur Bestimmung der Elektrodenstärke) wurden angeschafft und anteilig im Projekt abgeschrieben, so dass die kostenneutralen Projektverlängerung die Position überschritten hat.

0850 Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten

Lediglich die Position für die Batteriezellentest wurde unterschritten, da wir im Rahmen des AZK mit mehr Test ausgegangen waren als tatsächlich benötigt wurden. Ebenfalls haben wir im Rahmen des Projektes einen günstigeren Lieferanten für die Zelltest akquirieren können, so dass hier zusätzlich weniger Mittel für diese Position benötigt wurde.

Trumpf (Teilvorhaben B):

0813 Material:

Es wurden weniger als die Hälfte der Vorgesehenen Materialkosten verbraucht, da das zwischenzeitlich geplante zusätzliche Modul nach Absprache im Projekt entfiel und das Modul für die Prototypenanlage kleiner ausgelegt wurde, als ursprünglich geplant.

0837 Personalkosten:

Vorgesehen war im Projekt ein geplantes Leistungsvolumen von 11,4 tsd. Stunden und tatsächlich wurde das Projekt mit 11,9 tsd. Stunden intern abgewickelt. Im Prinzip sind wir mit dem Arbeiten im Plan gewesen.

0838 Reisekosten und 0850 Sonstige unmittelbare Vorhabenkosten

Wie geplant wurden nur geringe Kosten geltend gemacht.

BLB (Teilvorhaben C):

0824 Personalkosten:

Aufgrund der Verlängerung der Projektzeitlauf wurden die Personalkosten leicht überschritten.

0843 Verbrauchsmaterialien:

Die für Verbrauchsmaterialien vorgesehenen Mittel wurden gänzlich abgerufen.

0846 Dienstreisen

Aufgrund der pandemischen Situation zu Beginn des Projektes wurden hier nicht alle Mittel abgerufen.

0850 Investitionen

Bei den Investitionen kam es zu Einsparungen, da die Entwicklung der Lasermodule auf zwei Generationen gekürzt wurde, und somit Integrationskosten eingespart werden konnten. Zudem ist das Batterietestsystem anteilig aus anderen Projekten bezahlt worden. Andere Einsparungen konnten durch Reduktion der technischen Anforderungen einzelner Gerätschaften ohne negativen Einfluss auf die Projektziele erreicht werden (bspw. Messeinrichtungen, Düsenadaption).

0835 Vergabe von Aufträgen

Es gab leichte Mehrausgaben bei der Vergabe von Aufträgen, da die Kosten über die Projektlaufzeit angestiegen sind.

Mahle (Teilvorhaben D):

0823 FE-Fremdleistungen

Die Ausgaben dieser Position wurden gegenüber der ursprünglichen Planung überschritten, da aufgrund von Umstrukturierungen innerhalb der MAHLE-Gruppe im Projekt involvierte Entwicklungsbereiche während der Projektlaufzeit in eine Schwestergesellschaft gewechselt sind. Diese haben im Anschluss an die Umstrukturierung ihre Mitarbeit im Projekt basierend auf Selbstkostenerstattungspreise fortgeführt, um für die Erreichung der Projektziele das konzerninterne Know-How weiter nutzen und die gemeinsame Projektarbeit nahtlos fortführen zu können.

Des Weiteren sind aufgrund des Wechsels von einem Batteriemoduldesign mit Kunststoffgehäuse (GEN1) auf ein Batteriemoduldesign mit Aluminium-Kunststoffgehäuse (GEN2) zusätzliche Entwicklungsaufwände innerhalb der MAHLE-Gruppe entstanden: Das ausgearbeitete Thermomanagementkonzept mit Immersionskühlung sowie die

elektrische Architektur des Batteriemoduldesigns GEN1 konnten nicht wie ursprünglich geplant mit geringen Änderungen für das Batteriemoduldesign GEN2 übernommen werden, sondern mussten - bevor mit den ursprünglich geplanten Entwicklungsaktivitäten für das Batteriemoduldesign GEN2 fortgefahren werden konnte - signifikant überarbeitet werden.

0837 Personalkosten

Das ursprünglich geplante Leistungsvolumen wurde im Projekt unterschritten, da aufgrund von Umstrukturierungen innerhalb der MAHLE-Gruppe im Projekt involvierte Entwicklungsbereiche während der Projektlaufzeit in eine Schwestergesellschaft gewechselt sind, sodass deren weitere Aufwände über die Position 0823 FE-Fremdleistungen (s.o.) abgerechnet worden sind.

0850 Sonstige unmittelbare Vorhabenskosten

Die Ausgaben dieser Position wurde gegenüber der ursprünglichen Planung deutlich unterschritten, da durch den Wechsel von einem Batteriemoduldesign mit Kunststoffgehäuse (GEN1) auf ein Batteriemoduldesign mit Aluminium-Kunststoffgehäuse (GEN2) die Fertigung eines Werkzeugs für die Herstellung des Kunststoffgehäuses entfallen und der Validierungsumfang für die Batteriemodule reduziert worden ist.

2.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Mercedes-Benz (Konsortialführer):

Das Projekt Newbie war ein Teil der umfangreichen Investitionen der MERC zum Thema Zelltechnologie. Im Rahmen des Projekts wurden weltweit mit den Lieferanten Kontakte geknüpft und Informationen für weitere Entwicklungen ausgetauscht. Im Rahmen des Projektes konnten mehrere Zellrezepturen entwickelt, erprobt und in Zellen in automobilen Format aufgebaut werden. Dazu wurden die Anlagen von Mercedes Benz in Untertürkheim nach der Inbetriebnahme für die Fertigung der GEN1 und GEN2 Zellen verwendet. Die große Anzahl an Zellen, die für den Modulbau durch den Projektpartner MAHLE und umfangreiches Testing benötigt wurden, ermöglichte Mercedes Benz zu verstehen, welche Herausforderungen und Verbesserungsmöglichkeiten zum Thema Zelltechnologie bestehen. Dadurch gewonnenes Verständnis und Wissen in Material- und Zellebene ist für Mercedes Benz essenziell und entscheidend für die Zukunftstechnologien im Bereich Batterie-Elektrofahrzeuge (BEVs). Die Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Projekt spielen eine wichtige Rolle in der Auslegung von Zellen und allgemeinen Entscheidungen im Bereich Zelltechnologie für zukünftige Projekte.

Trumpf (Teilvorhaben B):

Die Verbesserung der elektro-optischen Effizienz der Laser stellt einen grundlegenden Fortschritt in Bezug auf eine energieeffiziente Trocknung dar und erhöht die Akzeptanz der Lasertrocknung. Der Bau von Modulen mit diesen neuartigen Lasern ermöglicht die praktischen Versuche, deren ermutigende Ergebnisse ebenfalls den kommerziellen Einsatz der Lasertrocknung fördern. Im Rahmen des Projekts wurden funktionstüchtige Demonstratoren erstellt und damit ein guter Ausgangspunkt für zukünftige Produktentwicklungen geschaffen.

BLB (Teilvorhaben C):

Die in den APs durchgeführten experimentellen Arbeiten erzeugten ein ausreichendes Maß an notwendigen Daten zur Ableitung eines wettbewerbsüberlegenen Elektrodenproduktionsprozesses, der Lösemittel und

Energie einspart und in der Folge Kosten und CO₂-Emissionen reduziert. Die Vielzahl an analysierten Prozesspunkten bei der Produktion von lösemittelarmen Elektrodenpasten mittels Extrusion und der Trocknung von Batterieelektroden mit innovativen Trocknungstechnologien trug zudem zu einem verbesserten Verständnis des Zusammenhangs zwischen Material, Prozess, Elektrodenstruktur und letztlich der resultierenden Elektrodeneigenschaft bei. Entsprechend sind die durchgeführten experimentellen Untersuchungen dringend notwendig für die Erreichung der direkten Projektziele gewesen.

In den experimentellen Untersuchungen konnte ein Verständnis über die zeitliche Korrelation zwischen der Befeuchtungsdauer und der Trockenraumkonditionierung aufgenommen werden. Weiterhin konnte mit Hilfe der Untersuchungen zur Zellqualität der befeuchteten Zellen (in Kapazitäts- und Pulstests) eine material-angepasste, qualitätserhaltende Senkung des Taupunkts der Prozessatmosphäre auf - 30 °C ermittelt werden. Die abgeschätzten Kostenpotentiale durch den reduzierten Trocknungsaufwand (Energiereduktion um ca. 60 % und eine Gesamtkosten-reduktion von ca. 13 % für die Trockenraumtechnik) zahlen direkt auf das Ziel der Einsparung von Energie- und Kosten bei der Zellherstellung ein, was die Notwendigkeit zur Erreichung der Projektziele verdeutlicht.

Mahle (Teilvorhaben):

Im Rahmen des Projekts wurde eine Immersionskühlung in Kombination mit einem Batteriegehäuse entwickelt und anhand aufgebauter Demonstratoren erfolgreich validiert. Durch die gemeinsame Erstellung des Lastenhefts für die Entwicklung der Batteriemodule sowie des Validierungsplans für die Demonstratoren mit dem Projektpartner Mercedes als Fahrzeughersteller wurde die Übertragbarkeit der Validierungsergebnisse auf die Anwendung im Fahrzeug sichergestellt und somit eine hohe Aussagekraft der Validierungsergebnisse bezüglich einer möglichen Anwendung in einem Elektrofahrzeug erreicht. Die erzielten Validierungsergebnisse – insbesondere bezüglich Schnellladen des Batteriemoduls von 10 – 80% SOC (GEN1: 10,7 min; GEN2: 13,4 min) unterstreichen hierbei das Potential der Immersionskühlung aufgrund einer effizienteren Kühlung. Alles in allem bieten die Ergebnisse einen guten Ausgangspunkt für die Weiterentwicklung der Immersionskühlung bis hin zur Überführung in eine Serienanwendung und somit Markteinführung dieser Technologie.

2.4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Tabelle 8: Verwertung Teilvorhaben Konsortialführer (Mercedes-Benz)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Etablierung der Sensorzelle auf Zellebene	Auslegung der Betriebsfenster für Schnelladeprofile zur Verhinderung von Li-Plating.
Technologieexpertise im Bereich schnellladefähiger Batterien mit hoher Energiedichte, schnellere Erreichung der CO ₂ Reduktionsziele	Stärkung der weltweiten Lieferkette; Stärkung des Absatzes durch Einführung von Elektrofahrzeugen mit einer kundenakzeptierten Schnelladefähigkeit von <15 min (10 - 80 % SoC). Damit schneller Transformation der Antriebstechnologie durch höhere Kundenakzeptanz. Positive Kundenwahrnehmung der Marke Mercedes-Benz.
Weiterentwicklung der Beschichtungs- und Trocknungsprozesse, resultierend daraus CO ₂ -Reduktion, Reduzierung der	Kommunikation der Arbeitsergebnisse und Anwendung der Technologien bei der zukünftigen Darstellung von Zellen/Batterien für die Elektromobilität.

Prozesskosten und des Lösungsmittelverbrauches	
Herstellung von eigenen Zellen inkl. Entwicklung von Rezepten. Erfahrungen in den Prozessen der Li-Ionen-Zellfertigung (Mischen, Beschichten, Kalandrieren, Trocknen, Montieren, Formieren und Auslegung der Betriebsfenster fürs Schnellladen).	Auslegung und Entwicklung der Mercedes Benz internen Zellen gemäß spezifischen Anwendungsbereichen. Etablierung der gesamten Prozesskette von Rohstoff bis zum fertigen Produkt. Erfahrung und Informationsaustausch mit der europäischen Maschinenindustrie zur Weiterentwicklung im Bereich neue Antriebstechnologien.

Tabelle 9: Verwertung Teilvorhaben (Trumpf, B)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Steigerung der elektrooptischen Effizienz auf 55%	Systeme mit geringerem Energieverbrauch und höherem Nutzen für den Anwender
Vollständiges VCSEL System zur Anwendungsdemo und Evaluierung	Kombination aller Vorteile. Einbau in realistische Anlage. Demonstration der Funktionalität bis hin zur Batterie.

Tabelle 10: Verwertung Teilvorhaben (BLB, C)

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Entwicklung eines Extrusionsprozesses zur Produktion und Beschichtung von lösemittelreduzierten Elektrodenpasten	Verwendung des gewonnenen Prozesswissens in weiteren Forschungsprojekten sowie Auftragsforschung innerhalb der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) sowie zur Ausbildung von Studierenden zu Fachkräften für die Elektrodenfertigung
Entwicklung eines effizienten Elektrodentrocknungsprozesses mittels innovativer Trocknungstechnologien	Verwendung des gewonnenen Prozesswissens in weiteren Forschungsprojekten sowie Auftragsforschung innerhalb der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) sowie zur Ausbildung von Studierenden zu Fachkräften für die Elektrodenfertigung
Untersuchungen zur Konditionierung der Prozessatmosphäre zur Reduzierung des Energie- und Kosteneinsatzes	Verwendung des gewonnenen Prozesswissens in weiteren Forschungsprojekten sowie Auftragsforschung innerhalb der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) sowie zur Ausbildung von Studierenden zu Fachkräften für die Elektrodenfertigung
Charakterisierung prozessrelevanter Materialeigenschaften zur materialangepassten Prozessgestaltung	Verwendung des gewonnenen Prozesswissens in weiteren Forschungsprojekten sowie Auftragsforschung innerhalb der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) sowie zur Ausbildung von Studierenden zu Fachkräften für die Elektrodenfertigung
Entwicklung eines Bewertungsrahmens zur ökologischen und ökonomischen Analyse von Prozessinnovationen am Beispiel der neuen Trocknungsverfahren	Verwendung des gewonnenen Wissens in weiteren Forschungsprojekten Richtung „Nachhaltige Batterieproduktion“ sowie Auftragsforschung innerhalb der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) sowie zur Ausbildung von Studierenden zu Fachkräften für die Batterieproduktion

Tabelle 11: Verwertung Teilvorhaben MAHLE

Projektergebnis/ Inhalt	Nutzen/ Verwertung
Entwicklung Batteriemodul insbesondere Kühlungs- und Kunststofftechnologie	Verwendung des gewonnenen Wissens für die weitere Entwicklung zukünftiger Batteriekühlungskonzepte für Elektrofahrzeuge
Bestätigung Technologie	Überführung in die Industrialisierung

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

Elektrodentrocknung mittels innovativer Technologien:

- Altwater et al. (2022) (Near-) Infrared Drying of Lithium-Ion Battery Electrodes: Influence of Energy Input on Process Speed and Electrode Adhesion; DOI: 10.1002/ente.202200785
- Neb at al. (2023) Investigation Of Laser-Based Drying Of Electrodes For Lithium-Ion-Battery Production Using Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers (VCSEL); DOI: 10.15488/15239
- Schütte et al. (2024) Reducing Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Industrial Drying Processes in Lithium-Ion Battery Cell Production: A Qualitative Technology Benchmark; DOI: 10.3390/batteries10020064

Lösemittelreduzierte Elektrodenprozessierung:

- Wiegmann et al. (2022): Solvent Reduced Extrusion-Based Anode Production Process Integrating Granulate Coating, Drying, and Calendering. DOI:10.1002/ente.202200020
- Wiegmann et al. (2023): Semi-Dry Extrusion-Based Processing for Graphite Anodes: Morphological Insights and Electrochemical Performance. DOI: 10.1002/ente.202300341

2.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 11 der Nebenbestimmungen

Tabelle 12: Veröffentlichungen Teilvorhaben Konsortialführer (Mercedes-Benz)

Titel
Comparison of Electronic Resistance Measurement Methods and Influencing Parameters for LMFP and High-Nickel NCM Cathodes Autoren: Christoph Seidl, Sören Thieme, Martin Frey, Kristian Nikolowski, Alexander Michaelis Publikation: "Batteries 10 (2024) 105; https://doi.org/10.3390/batteries10030105 "
An Experimental Method to Determine the Measurement Error of Reference Electrodes within Lithium-Ion Batteries Autoren: Daniel Rutz, Felix Brauchle, Philipp Stehle, Dr. Ingolf Bauer, Prof. Dr. Timo Jacob Publikation: "ChemElectroChem 17 (2023) e202300216, doi.org/10.1002/celc.202300216 "
Utilizing electronic resistance measurement for tailoring LIB cathode formulations Autoren: Christoph Seidl, Sören Thieme, Martin Frey, Kristian Nikolowski, Alexander Michaelis Publikation: <i>Batteries</i> . 2024; 10(7):227. https://doi.org/10.3390/batteries10070227
Designing a reference electrode – An approach to fabricate laser perforated reference electrodes for lithium-ion batteries

Autoren: Daniel Rutz, Ingolf Bauer, Felix Brauchle, Timo Jacob
 Publikation: Electrochimica Acta, <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.141768>.

Tabelle 13: Veröffentlichungen Teilvorhaben TRUMPF

Titel
VCSEL Laser Drying in Battery Production - A solution for cost-effective electrode manufacturing Autoren: A. Kampker, H. Heimes, B. Dorn, S. Wolf, B. Ingendoh, G. Ambrosy, R. Apetz, R. Verstraeten and C. Deutskens, White paper PEM, RWTH Aachen, TRUMPF, pp. 1-19, 2024
Novel high-power laser modules for drying applications based on VCSEL arrays Autoren: R. Koerner, R. Apetz, R. Conrads, C. Deppe, S. Gronenborn, J. S. Kolb, H. Moench, S. Weidenfeld, M. Herper and D. Groben, SPIE proceeding, High-Power Diode Laser Technology XXII, vol. 12867, p. 1286711, 2024; https://doi.org/10.1117/12.3003017
Advanced VCSELS and new applications in heating and drying Autor: H. Moench, AKL'24 International Laser Technology Congress, www.lasercongress.org
Recent advancements of VCSEL array modules for battery drying applications Autoren: Daniela Ingenhorst, Rolf Apetz, Marcus Banham, Ralf Conrads, Carsten Deppe, Dennis Groben, Stephan Gronenborn, Xi Gu, Markus Herper, Benedict Ingendoh, Achim Kampker, Roman Körner, Johanna Sophie Kolb, Michael Miller, Holger Mönch, Jens Pollmann-Retsch, Wolfgang Schwarz, and Sebastian Wolf , Proc. SPIE 13345, High-Power Diode Laser Technology XXIII, 133450T (21 March 2025); https://doi.org/10.1117/12.3041785

Tabelle 14: Veröffentlichungen Teilvorhaben (BLB, C)

Titel
2022
A Perspective on Innovative Drying Methods for Energy-Efficient Solvent-Based Production of Lithium-Ion Battery Electrodes Autoren: Max-Wolfram von Horstig, Alexander Schoo, Thomas Loellhoeffel, Julian K. Mayer, Arno Kwade Publikation: "Energy Technol (2022) 2200689, doi.org/10.1002/ente.202200689 "
Energy efficient anode drying utilizing induction heating of copper current collector foil Autoren: Max von Horstig, Thomas Loellhoeffel, Arno Kwade Publikation: International Battery Production Conference 2022, Braunschweig, 07-09.11.2022
2023
Energy-efficient drying of anodes through additional application of an induction heating module Autoren: Max von Horstig, Thomas Loellhoeffel, Arno Kwade Publikation: Poster und Flashvortrag, Batterieforum 2023, 19.01.2023, Berlin
Application Fields of Extrusion Coating for Battery Manufacturing: A Mini Review Autoren: Niklas Penningh, Laura Helmers, Eike Wiegmann, Arno Kwade Publikation: "Research & Reviews: Journal of Material Sciences: RRJ Mater Sci. 2023;11:004, DOI: 10.4172/2321-6212.11.1.004"
Development of a virtual quality gate concept based on high-potential tests for lithium-ion battery cell manufacturing Autoren: Chao Zhang, Gabriela Ventura Silva, Tim Abraham, Christoph Herrmann Publikation: Procedia CIRP CMS 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.09.135
Kapitel 2 Beschichten und Trocknen - VDMA Roadmap Batterieproduktionsmittel 2030 - Update 2023 Autoren: Max von Horstig, Arno Kwade Verlag: VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main Online-link: https://vdma.org/documents/34570/35405938/VDMA+Batterieproduktion_Roadmap_2023.pdf

Zuletzt abgerufen: 30.04.2025
Effect of induction supported drying on the particulate structure of an anode for lithium ion batteries Autoren: Max von Horstig, Mark Lippke, Arno Kwade Publikation: Poster, International Congress on Particle Technology 2023, Nürnberg, 26.-28.09.2023
2024
Inductive heat input for accelerated and energy efficient drying of battery electrodes on a pilot plant Autoren: Max von Horstig, Arno Kwade Publikation: Plenar-Vortrag, DECHEMA Fachgruppentreffen Trocknungstechnik, Magdeburg, 12.03.2024
Deep reinforcement learning-based dynamic scheduling for resilient and sustainable manufacturing: A systematic review Autoren: Chao Zhang, Max Juraschek, Christoph Herrmann Publikation: Journal of Manufacturing Systems. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.10.026
Solvent-Reduced Continuous Processing of Lithium-Ion Battery Cathodes Autoren: Niklas Penningh, Robin Moschner, Arno Kwade Publikation: Poster, Advanced Battery Power Conference, Münster, 10.-11.04.2024
Induction heating for accelerated drying of aqueous and solvent based electrode wet films Autoren: Max von Horstig, Arno Kwade Publikation: International Battery Production Conference 2024, Braunschweig, 28.11.2024
Development of an Induction Supported Roll to Roll Process for the Accelerated Drying of Water-Based Anodes and N-Methyl-2-Pyrrolidone-Based Cathodes for Lithium-Ion Batteries Autoren: Max-Wolfram von Horstig, Robin Moschner, Oliver Landrath, Peter Michalowski, Arno Kwade Publikation: "Energy Technology (2025) https://doi.org/10.1002/ente.202402182 "
2025
Induction vs. Laser Heating: A comparative Study on Innovative Electrode Drying Technologies on Pilot-Scale Autoren: Max-Wolfram von Horstig, Chao Zhang, Garbiela Ventura Silva, Christoph Herrmann, Arno Kwade Publikation: vrs. 07/2025 Power Sources, tbd.
Framework for Environmental and Economic Assessment of Process - Innovations in Battery Cell Production: A Case Study on Induction Drying Autoren: Chao Zhang, Gabriela Ventura Silva, Max von Horstig, Nicolas von Drachenfels, Jan Felix Niemeyer, Marius Hermsen, Christoph Herrmann Publikation: Procedia CIRP CMS 2025, akzeptiert und online verfügbar vrs. 10/2025

Tabelle 15: Veröffentlichungen Teilvorhaben MAHLE

Titel
Immersion Cooled Battery Systems for High Power Charging and Long Battery Lifetime Autoren: A. Loges, T. Kalmbach, E. Reimer, J. Treier, A. Wiebelt Publikation: Vortrag, 13. Internationale Konferenz für Elektromobilität E-MOTIVE by FVA, 21.09.2021, Online-Event
Electro-Thermal-Fluidic Battery Module Simulation for Accurate Cooling Performance Assessment Autoren: T. Nyhues, T. Kalmbach, J. Kansy, A. Loges, T. Wetzel, A. Wiebelt Publikation: Poster, Advanced Automotive Battery Conference Europe (AABC Europe), 13.-15.06.2022, Mainz
Numerical and experimental investigation of immersion cooled battery cells and modules Autoren: T. Nyhues, T. Kalmbach, J. Kansy, A. Loges, T. Wetzel, A. Wiebelt Publikation: Poster, Fachtagung Kraftwerk Batterie/ Advanced Battery Power Conference, 27.-28.04.2023, Aachen
Numerical and Experimental Investigation of Immersion Cooled Batteries

Autoren: T. Nyhues, T. Kalmbach, J. Kansy, A. Loges, T. Wetzels, A. Wiebelt
 Publikation: Konferenzbeitrag und Vortrag, 15. Internationale Konferenz für Elektromobilität E-MOTIVE by FVA, 27.-28.09.2023, Schweinfurt

Immersion Cooling – An Experimental Study on the Influence of the Cooling Concept on the Battery Behavior

Autoren: T. Nyhues, T. Kalmbach, J. Kansy, A. Loges, T. Wetzels, A. Wiebelt
 Publikation: Poster, Fachtagung Kraftwerk Batterie/ Advanced Battery Power Conference, 10. – 11.04.2024, Münster

ⁱ Lu, Bertei, & Finegan, 2020

ⁱⁱ Ebner, Chung, Garcia, & Wood, 2013

ⁱⁱⁱ Mayer, J. K. et al.: Influence of the Carbon Black Dispersing Process on the Microstructure and Performance of Li-ion Battery Cathodes, *Energy Technol.* (2019) doi:10.1002/ente.201900161ente.201900161

^{iv} Haselrieder, W. et al.: Influence of formulation method and related processes on structural electrical and electrochemical properties of LMS/NCA-blend electrodes, *Prog. Solid State Chem.* 42, (2014) 157–174

^v Yuan, C., Deng, Y., Li, T., Yang, F., 2017. Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 8–11

^{vi} S. Ahmed, P. A. Nelson, K. G. Gallagher, N. Susarla, and D. W. Dees, “Cost and energy demand of producing nickel manganese cobalt cathode material for lithium ion batteries,” *J. Power Sources*, vol. 342, pp. 733–740, 2017.

^{vii} P. Swart, J. Dewulf, and A. Biernaux, “Resource demand for the production of different cathode materials for lithium ion batteries,” *J. Clean. Prod.*, vol. 84, pp. 391–399, Dec. 2014.

^{viii} F. Cerdas et al., “Exploring the effect of increased energy density on the environmental impacts of traction batteries: A comparison of energy optimized lithium-ion and lithium-sulfur batteries for mobility applications,” *Energies*, vol. 11, no. 1, 2018.