

Batterieproduktion



Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030



Update 2023

Impressum

Herausgeber

VDMA Batterieproduktion
Lyoner Str. 18
60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1186
E-Mail jennifer.zienow@vdma.org
Internet <https://vdma.org/batterieproduktionsmittel>

Autoren

VDMA Batterieproduktion
PEM RWTH Aachen University

Fraunhofer ISI
BLB Braunschweig

Fraunhofer-Einrichtung Forschungs-
fertigung Batteriezelle FFB

Dr. Sarah Michaelis, Jörg Schütrumpf
Prof. Dr. Achim Kampker, Prof. Dr. Heiner Heimes, Benjamin Dorn, Sarah Wennemar, Artur Scheibe,
Sebastian Wolf, Matthias Smulka, Benedict Ingendoh
Dr. Axel Thielmann, Dr. Christoph Neef, Tim Wicke, Dr. Lukas Weymann, Dr. Tim Hettesheimer
Prof. Dr. Arno Kwade, Laura Gottschalk, Christina von Boeselager, Steffen Blömeke,
Alexander Diener, Max-Wolfram von Horstig, Jana Husmann, Maher Kouli, Malte Mund,
Gabriela Ventura Silva, Marcel Weber
Miha Podbreznik, Arno Schmetz

Für die Inhalte der Publikation sind ausschließlich die Autoren verantwortlich. Die Kapitelpaten und Industriefirmen, die fachlich unterstützt haben, tragen dafür keine Verantwortung. (Eine Übersicht ,wer bei welchem Kapitel unterstützt hat, ist am Ende eines jeden Kapitels zu finden.)

Mit freundlicher Unterstützung von den Kompetenzcluster ProZell und InZePro des BMBF, sowie der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB.

Redaktion

Dr. Sarah Michaelis, Jörg Schütrumpf, Jennifer Zienow, Alice Persichetti

Verlag und Produktion

VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main

Druck

Druck- und Verlagshaus Zarbock GmbH & Co. KG, Frankfurt am Main

Copyright 2023

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.

Bildnachweis

Titelbild

©shutterstock.com
"Kraft, Ausdauer und Risikobereitschaft"

Andere Bildquellen

siehe Bildunterschriften

Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 Update 2023

In Kooperation mit



Fraunhofer

ISI

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI



RWTHAACHEN
UNIVERSITY

Chair of Production Engineering of E-Mobility Components PEM



BATTERY
LABFACTORY
BRAUNSCHWEIG



Battery LabFactory Braunschweig BLB und TU Braunschweig



VDMA Batterieproduktion, eine Fachabteilung des VDMA Fachverbands Electronics, Micro and New Energy Production Technologies (EMINT), ist Ansprechpartner rund um den Batterie-Maschinen- und Anlagenbau. Die Mitgliedsunternehmen der Fachabteilung liefern Maschinen, Anlagen, Maschinenkomponenten, Werkzeuge und Dienstleistungen für die gesamte Prozesskette der Batterieherstellung: Von der Rohstoffaufbereitung, Elektrodenproduktion und Zellaufbau bis hin zur Modul- und Packfertigung. Der derzeitige Fokus der VDMA Batterieproduktion liegt auf der Li-Ionen-Technologie.

Wir recherchieren Technologie- und Marktinformationen, veranstalten Kundenevents und Roadshows, führen eigene Veranstaltungen durch, wie die Jahrestagung, die sich als wichtiger Branchentreff etabliert hat und sind im Dialog mit Forschung und Wissenschaft zu aktuellen Themen und über die industrielle Gemeinschaftsforschung.

<https://vdma.org/batterieproduktionsmittel>



Der Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen steht als Synonym für erfolgreiche und zukunftsweisende Forschung und Innovation auf dem Gebiet der Elektromobilproduktion. Die Gruppen rund um das Thema Batterieproduktion des Lehrstuhls von Professor Kampker beschäftigen sich mit den Fertigungsprozessen der Lithium-Ionen Batterie zelle sowie mit den Montageprozessen des Batteriemoduls und -packs. Im Fokus stehen Ansätze der integrierten Produkt- und Prozessentwicklung zur Optimierung von Kosten- und Qualitätstreibern im Fertigungs- und Montageprozess. Durch eine Vielzahl nationaler und internationaler Industrieprojekte sowie zentralen Positionen in bekannten Forschungsprojekten bietet das PEM der RWTH Aachen weitreichende Expertise in den Themenfeldern Batterie zelle sowie Batteriemodul und -pack.

<https://www.pem.rwth-aachen.de/>



Das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI forscht für die Praxis und versteht sich als unabhängiger Vordenker für Gesellschaft, Politik und Wirtschaft. Unsere Expertise liegt in der fundierten wissenschaftlichen Kompetenz sowie einem interdisziplinären und systemischen Ansatz. Unsere Beurteilungen der Potenziale und Grenzen technischer, organisatorischer oder institutioneller Innovationen helfen Entscheidern aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik bei strategischen Weichenstellungen und unterstützen sie so dabei, ein günstiges Umfeld für Innovationen zu schaffen.

<http://www.isi.fraunhofer.de>



Die Battery LabFactory Braunschweig (BLB) ist eine offene Forschungsinfrastruktur zur Erforschung und Entwicklung elektrochemischer Speichergeräte vom Labor- bis zum Pilotmaßstab. Das Forschungsspektrum umfasst die gesamte Wertschöpfungskette von der Material-, Elektroden- und Zellherstellung bis hin zum Recycling. Die vorhandene Infrastruktur ermöglicht es, grundlegende und anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsfragen zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf flexiblen Produktionsstrategien und Prozesstechnologien zur Erhöhung der Energiedichte, Qualität und Sicherheit von Antriebsbatterien unter Berücksichtigung elektrischer, elektrochemischer, konstruktiver, ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte. Zu diesem Zweck werden die ingenieur- und naturwissenschaftlichen Kompetenzen von neun Instituten der TU Braunschweig, der TU Clausthal, der Leibniz Universität Hannover, des Fraunhofer Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik IST sowie der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig (PTB) in der BLB gebündelt.

<https://www.tu-braunschweig.de/en/blb/>

Inhalt

Executive Summary	4
Einleitung	5
Roadmapping: Das gesamte Bild	5
Technologie-Roadmapping im Maschinen- und Anlagenbau	6
Methodik	7
Lithium-Ionen-Technologie als Referenzszenario	8
Workshops beim VDMA	9
Märkte	10
Märkte, Nachfrage, Angebot	10
Zellformate: Vor- und Nachteile der einzelnen Formate	32
Produktanforderungen und Spezifikationen	38
Performance-Parameter für Anwendungen der Elektromobilität	38
Performance-Parameter für stationäre Anwendungen	41
Anforderungen der Batteriehersteller	41
Kostenstruktur und Kostenentwicklung von LIB-Zellen	43
Lösungsangebote des Maschinen- und Anlagenbaus	49
Kostendegression	49
Nachhaltigkeit	51
Qualitätssteigerung	53
Frugale Innovation vs. Volldigitalisierung	58
Herausforderungen und notwendige Technologiedurchbrüche	59
<i>Red Brick Walls</i> im Überblick	59
Grand Challenges	60
<i>Red Brick Walls</i> 2023 im Detail	61
Technologiekapitel	62
Lithium-Ionen-Batterien von morgen – Wo geht die Reise hin?	161
Lithium-Ionen Technologien	161
Jenseits der Lithium-Ionen Technologie	163
Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	166
Schlussfolgerungen	166
Handlungsempfehlungen	168
Anhang	171

Executive Summary

Referenzen und Alleinstellungsmerkmale der Produktionslösungen schaffen die beste Voraussetzung, sich nachhaltig und langfristig in dem Zukunftsfeld Batteriefertigung zu positionieren und weltweit als Lösungspartner attraktiv zu werden. Dabei schafft Produktionsforschung im Maschinenbau die Basis für Wettbewerbsfähigkeit. Sie ist der Schlüssel für Prozessinnovationen sowie für die strategisch wichtige Entwicklung von Alleinstellungsmerkmalen. Der Roadmapping-Prozess leistet hierzu einen wertvollen Beitrag, indem Bedarfe in der Produktion bis 2030 konkretisiert und erste Lösungsvorschläge formuliert werden.

Die VDMA Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 adressiert die Weiterentwicklung der Produktionstechnik (nicht die Produktentwicklung). Die Roadmap fand seit ihrer Erstveröffentlichung 2014 weltweit Beachtung, viele Vorschläge wurden aufgegriffen und implementiert. Wir haben den zielorientierten Dialog zwischen Batterieproduzenten, Produktionsforschung und dem Maschinen- und Anlagenbau fortgeführt, auch unter Einbeziehung der Erfahrung mit ausländischen Kompetenzträgern. Aufgrund der hohen Dynamik in der Batteriebranche ist es wichtig, die so gesammelten Erkenntnisse und Informationen alle zwei Jahre in eine vollständige Überarbeitung der Roadmap einfließen zu lassen.

Als fester Bestand der Marktbetrachtungen in der Roadmap wird die 2016 eingeführte sorgfältige Bewertung von Fabrikkapazitäten und deren Angebotspotenzial weltweit im jeweiligen Update aktualisiert. In den letzten Jahren ist insbesondere Europa und der Standort Deutschland in den Fokus gerückt. Hier spielt die Nähe zur Automobilindustrie als Endkunde eine wesentliche Rolle. Neben Europa ist nach wie vor China als Marktführer in der Elektromobilität von wesentlicher Bedeutung. Der chinesische Maschinen- und Anlagenbau hat sich aus dem starken Heimatmarkt

heraus zur Weltspitze entwickelt. Damit Europäische Produktionsmittellieferanten hier erfolgreich partizipieren, müssen sie sich diesem Wettbewerb auch in Europa stellen. In den USA hat die Politik mit dem *Inflation Reduction Act* erfolgreich die Weichen für die Ansiedlung von E-Auto- und Batteriezellfabriken gestellt. Der US-Amerikanische Markt gewinnt damit zunehmend an Bedeutung und wird als dritter Hotspot der Batteriefertigung betrachtet.

Kerninhalt der Roadmap sind die 15 Technologiekapitel. In diesen werden die zukünftigen Anforderungen an den Batteriemaschinenbau aus heutiger Sicht diskutiert und mögliche Lösungsangebote des Maschinen- und Anlagenbaus formuliert. Ausgangsbasis für das Update waren die 2020 identifizierten, notwendigen Technologiedurchbrüche (*Red Brick Walls*) und Lösungsansätze. Diese wurden an den aktuellen Stand der Technik angepasst.

Alle *Red Brick Walls* lassen sich dabei auf Kernherausforderungen zurückführen. Die **Kostenersparnis** durch die Erhöhung des Durchsatzes (*Scale-up* oder *Speed-up*) sowie die Erhöhung der Produktivität (Ausschussminimierung), die **Qualitätssteigerung** und die **Nachhaltigkeit**.

Der in unserer Roadmap aufgezeigte Forschungsbedarf sollte gezielt durch Zusammenarbeit von Industriepartnern und Forschungsorganisationen angegangen werden. Das Thema Nachhaltigkeit gewinnt insbesondere für den europäischen Standort immer stärker an Bedeutung. Es gilt, die Reduzierung des CO₂-Fußabdruckes als übergeordnetes Ziel nicht aus den Augen zu verlieren. Darüber hinaus ist der Zugang zur Serienfertigung nach wie vor essenziell. Nur so können Entwicklungen direkt in der Großserie qualifiziert und Referenzen gewonnen werden. Um Erfolg in der Batteriefertigung zu haben, braucht es Kraft, Ausdauer und Risikobereitschaft.

Einleitung

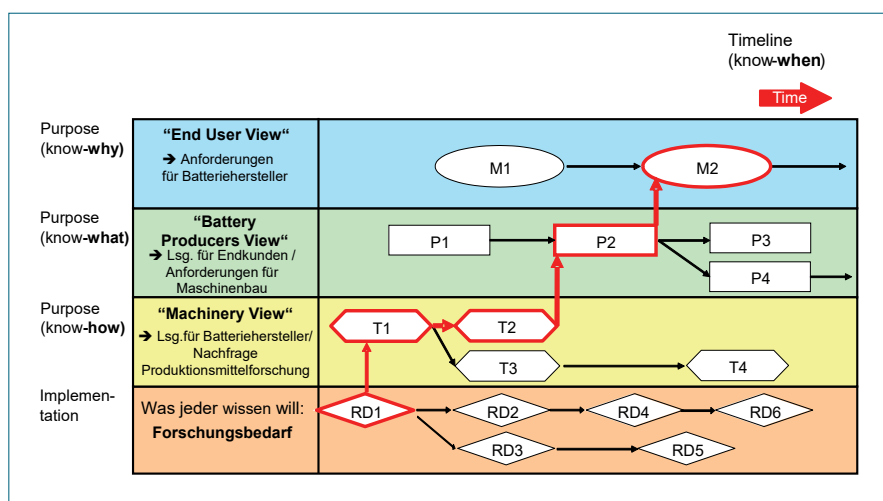
Roadmaps sind eine bewährte Methode, Klarheit zu schaffen: Sie liefern ein kohärentes Bild einer Zukunftsvision, repräsentieren im Idealfall Konsens über ein breites Industriefeld, dienen als Investment-Leitfaden. Sie fördern die vorwettbewerbliche Zusammenarbeit aller Akteure.

VDMA Batterieproduktion hat nach der Erstveröffentlichung der Roadmap 2014 den Dialog der Akteure stetig fortgesetzt und alle zwei Jahre ein Update publiziert. Für die vorliegende Veröffentlichung 2023 wurden die Inhalte der Roadmap aus 2020 reflektiert und vollständig überarbeitet sowie um neue Erkenntnisse ergänzt. Die grundlegende Methodik blieb dabei unverändert.

Roadmapping: Das gesamte Bild

Technologie-Roadmapping ist ein strategisches Werkzeug des Innovationsmanagements. Von prognostizierten, zukünftigen Mega-Trends und Märkten¹ („know-why“) kann derjenige profitieren, der es schafft, konkrete Anforderungen für Produkte („know-what“), einzusetzende Technologien („know-how“) und benötigte Programme für die Forschung und Entwicklung über einen definierten Zeitraum („know-when“) zu generieren [Phaal2003a].

Damit ergeben sich getrennte „Fahrspuren“, die mit jeweils eigenen, aber zusammenhängenden Roadmaps betrachtet werden können²: Von oben nach unten werden Anforderungen formuliert, von unten nach oben Lösungsangebote. Der gesamte Roadmapping-Prozess führt vom übergreifenden Szenario über Produkte und Machbarkeiten zu konkretem Forschungsbedarf, der in einem **Meilensteindiagramm** [Phaal 2003b] visualisiert werden kann.



Roadmapping: Vom übergreifenden Szenario über Produkte und Machbarkeit bis zu Forschungsbedarf. Entwicklungspfade im Meilensteindiagramm. [Phaal2003b]

¹ Populäre Beispiele sind: Digitalisierung, Urbanisierung, Klimawandel, Individualisierung, usw.

² Gekennzeichnet durch unterschiedliche Farbgebung im Meilensteindiagramm

Für unseren Fall ergibt sich folgendes Bild: Endkunden-Märkte wie die Automobilindustrie, Stromanbieter oder mobile Maschinen stellen die blaue Fahrspur „Markt“ dar. Die grüne Fahrspur „Produkt“ ist die Batterie. Die gelbe Fahrspur spezifiziert die Produktionstechnologie und die rote Fahrspur die Produktions-Forschung.

Technologie-Roadmapping im Maschinen- und Anlagenbau

Anwendermärkte und die Batterietechnologien wurden weltweit bereits in zahlreichen Roadmaps betrachtet [NPE2016, LiB2015, BEMA 2020]. Wenngleich auch dort die Wichtigkeit der Produktion für den Fortschritt der Branche hervorgehoben wird, sind diese keine Technologie-Roadmaps für die Produktionstechnik im eigentlichen Sinne.

VDMA Batterieproduktion veröffentlichte 2014 erstmals eine Technologie-Roadmap [Maiser 2014], die sich auf die Weiterentwicklung der Produktionstechnik und nicht auf die Produktentwicklung fokussierte. Der auf dieses Ziel orientierte Dialog zwischen Batterieproduzenten, Produktionsforschung und dem Maschinen- und Anlagenbau blieb Basis für die weitere Diskussion und wurde stetig fortgesetzt.

Ausgangspunkt, Ziele und Zielgruppen

Die Erwartungen an alle Player entlang der Batterie-Wertschöpfungskette sind hoch. Der Wettlauf um die beste Produktionstechnologie ist nach wie vor in vollem Gange. Zusammenarbeit entlang der Prozesskette ist dabei essenziell für den Fortschritt. Fortwährende Innovationen und konsequente Internationalisierungsstrategien haben maßgeblich zu ersten Erfolgen des europäischen Batteriemaschinenbaus in den wichtigen Absatzmärkten Asien und Nordamerika beigetragen.

Die Firmen profitieren von Erfahrungen aus verwandten Industrien³. Gerade dadurch können neue Wege beschritten und revolutionäre Ideen eingebracht werden.

In unserer 2014 veröffentlichten Roadmap wurden die Ziele des Roadmapping-Prozesses ausführlich beschrieben [Maiser2014]. Sie bestehen weiterhin:

- **Standortbestimmung** des Maschinen- und Anlagenbaus: aktueller Fortschritt und zukünftige Herausforderungen
- **Forschungsbedarf für die Produktionstechnik** wird umfassend konkretisiert.
- **Benchmarking, Erweiterung von Produktportfolios und Anregung von Konsortien** für neue und etablierte Player.
- **Handlungsempfehlungen** für alle Akteure. Grundsätzlich profitieren diejenigen am meisten, die sich aktiv in den Dialog einbringen. [Groenveld1997, Phaal2009].

³ Beispielsweise der Halbleiter-, Photovoltaik- und Automobilproduktion aber auch der Nahrungsmittel- und Verpackungsindustrie.

Methodik

Die Roadmapping-Erfahrungen des VDMA [adria2005, VDMA-PV2010] haben gezeigt, wie wichtig eine klar vorgegebene Methodik für den Roadmapping-Prozess ist. Für die Batterieproduktionsmittel haben wir den Roadmapping-Prozess der Halbleiterindustrie auf die Batterieproduktion adaptiert. Kernpunkt dieser Herangehensweise ist das Konzept, Roadmaps von Kunden und von Produktionsmittelherstellern getrennt voneinander zu formulieren. Damit wird vermieden, dass Kunden ihre Anforderungen von der Machbarkeit der Prozesstechnik abhängig machen und Technologieanbieter erst Aussagen zu Prozesslösungen treffen, wenn sich eine Volumenproduktion abzeichnet.⁴

Die Bedeutung von Red Brick Walls

Die Zusammenführung von Anforderungen der Batterie-Hersteller und der Machbarkeit aus Sicht der Prozessentwicklung im definierten Zeitraster deckt für jeden einzelnen Prozessschritt Folgendes auf:

- (1) Prozesslösungen sind bereits im Feld verfügbar,
- (2) Prozesslösungen sind nur im Pilotstadium verfügbar,
- (3) Prozesslösungen sind demonstriert oder Zwischenlösungen existieren, sowie
- (4) Prozesslösungen sind aus heutiger Sicht unbekannt.

Sind für eine Herstelleranforderung gleich in mehreren Entwicklungsschritten Lösungen unbekannt, türmt sich bildlich eine sog. „Red Brick Wall“ (RBW) auf. Technologiedurchbrüche sind erforderlich.

Forschungsanstrengungen müssen nun gezielt auf die Überwindung der *Red Brick Walls* ausgelegt werden, um die Anforderungen der Hersteller zu erfüllen. Die Identifizierung von *Red Brick Walls* ist damit das Herzstück des Roadmapping-Prozesses. Daraus lässt sich klar umrissener, konkreter Forschungsbedarf ableiten.

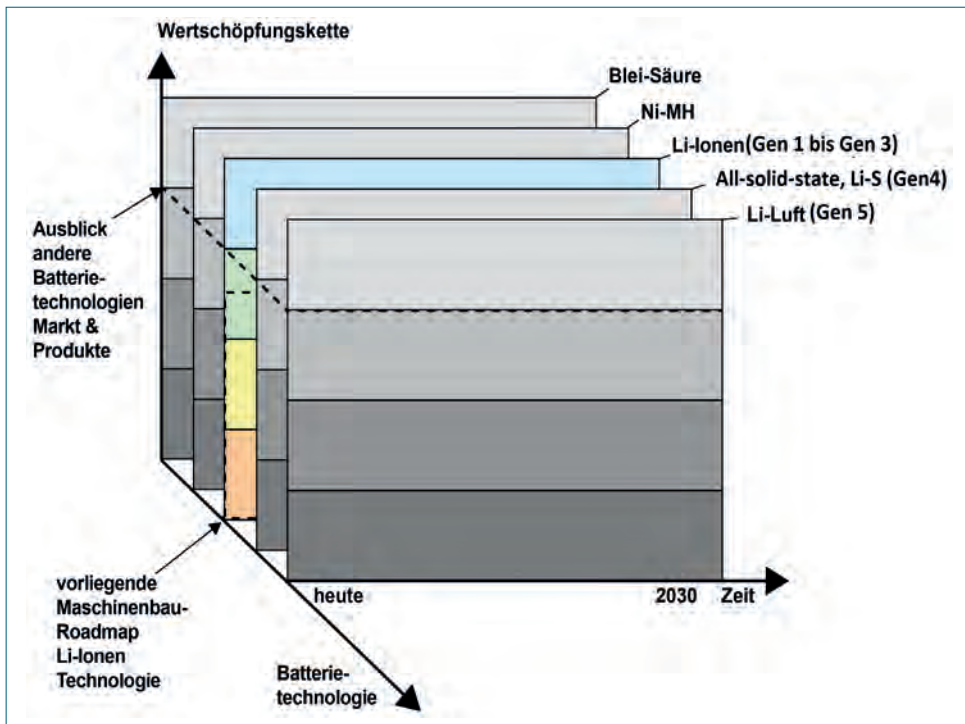
Multidimensionale Roadmaps – Fokus auf den Maschinen- und Anlagenbau

De facto ergibt sich im oben gezeigten Meilensteindiagramm für jede Batterietechnologie ein eigenes Diagramm. Damit wird die Roadmap „multidimensional“ (s. Abbildung) und es wäre zu komplex, die Produktionstechnik in der nötigen Tiefe zu diskutieren.

Zur intensiven Untersuchung der Prozesskette haben wir uns daher auf die bisher im industriellen Maßstab eingeführte Batterietechnologie, die **Lithium-Ionen-Technologie (LIB)**, fokussiert (in der Abbildung farbig).

Da Produktionsforschung serienreife Technologien braucht, adressiert unsere Roadmap die Lithium-Ionen-Generationen 1 bis 3 (s. Tabelle). Innerhalb dieser ist die Produktionstechnologie „aufwärtskompatibel“. Das bedeutet, dass Erkenntnisse direkt auf die nächste Generation übertragen werden können, da die Änderungen in erster Linie die chemische Zusammensetzung der Aktivkomponenten betreffen. Für bestimmte Prozessschritte ist eine Anpassung an Generation 4 ebenfalls machbar und Anlagenbauer erhalten bereits heute entsprechende Anfragen. In diesem Fall werden sie in Roadmap mit betrachtet.

⁴ Eine ausführlichere Beschreibung ist in der 2014 veröffentlichten Roadmap [Maiser2014] zu finden.



Betrachtet man das Meilensteindiagramm als Roadmapping zur Produktionstechnologie, ergeben sich für jede Batterietechnologie weitere Diagramme. Das vorliegende Werk betrachtet die Herausforderungen der Volumenproduktion der Lithium-Ionen-Technologien der Generation 1 bis 3. Die Definition der Generationen erfolgte nach der Roadmap der damaligen Nationalen Plattform Elektromobilität.

Quelle: VDMA

Als Generation 4 werden die All-solid-state und die Lithium-Schwefel-(Li-S) Technologien bezeichnet. Die All-Solid-State Batterie ist in der Umsetzung bereits deutlich weiter als die Li-S Technologie und wird voraussichtlich in den nächsten Jahren die Serienreife erlangen. Die Generation 5 umfasst Technologien, die sich ggf. heute noch im Bereich der Grundlagenforschung befinden, jedoch zukünftig in die Anwendung gelangen könnten.

In der Produktion sind ab Generationen 4 Änderungen erforderlich. Ausführliche Informationen dazu sind im Prozessflyer All-Solid-State [Heimes2023b] abgebildet.

Wegen des Wettbewerbsumfeldes für europäische Firmen beschränken wir uns darüber hinaus auf die Betrachtung von großformatigen Zellen für Hochleistungs- und Hochenergie-Anwendungen.

Lithium-Ionen-Technologie als Referenzszenario

Heute kommerziell verfügbare Lithium-Ionen Zellen basieren auf einer Kombination aus Übergangsmetallbasierten Kathodenmaterialien, einem organischen Flüssigelektrolyt sowie einer Kohlenstoff- oder Titanat-basierten Anode. In der Breite finden vor allem Zellen mit einer Kathode aus Lithium-Kobalt-Oxid (LCO, Elektronikanwendungen), Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (NMC, mobile Anwendungen), bzw. dem Aluminium-dotierten Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid (NCA) und einer Graphit- oder Graphit-Silizium-Komposit-Anode Anwendung. Mit diesen Zelltypen lassen sich mittlere Zellspannungen von 3,6 bis 4,2 V erzielen. In industriellen Anwendungen oder stationären Speichern werden darüber hinaus Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) Kathoden verwendet, welche eine niedrigere Zellspannungen von 3,1 V

besitzen und mit denen niedrigere Energiedichten als mit NMC erzielt werden. Für mobile Anwendungen wird, wo es möglich ist, wieder vermehrt auf LFP zurückgegriffen, da es sicherer und kostengünstiger ist.

Die Herstellungsverfahren der genannten Batterietechnologien haben eine hohe Ähnlichkeit. Großformatige Zellen für die mobile und die stationäre Anwendung werden auch zukünftig auf den beschriebenen LIB-Technologien beruhen. Das Gesamtbild der Batterieforschung zeigt, dass das Potenzial etablierter großformatiger Lithium-Ionen-Batterien noch lange nicht ausgereizt ist. Auch durch den potenziellen Übergang zu Feststoffbatterien mit metallischer Li-Anode dürften wesentliche Parameter wie die Zellspannung und große Teile des Herstellungsprozesses zur heutigen Technologie ähnlich bleiben.

Die beschriebene LIB-Referenztechnologie, auf der Basis ihrer Auslegungsbreite und damit verbundenen Einsatzvielfalt, wird also noch auf viele Jahre hinaus das Referenzsystem darstellen.

Workshops beim VDMA

Um die Aktualität der Roadmap zu gewährleisten, wird diese regelmäßig alle zwei bis drei Jahre überarbeitet.

Hierfür erfolgt eine erste Aktualisierung gemeinsam von Autoren und Kapiteln. Die Inhalte der Technologiekapitel und der darin adressierten erforderlichen Technologiedurchbrüche (RBW) werden nach heutigem Stand bewertet.

Im Fokus stehen dabei folgende zwei Fragen: Haben sich politische Rahmenbedingungen geändert? Gibt es neue technologische Trends mit Einfluss auf die Inhalte? Weitere Bewertungskriterien sind die Relevanz für die Batteriehersteller sowie die Aufwand-Nutzen Relation und der geschätzte Zeithorizont zur Erreichung des Durchbruchs. Im Oktober 2022 wurden in einem Präsenz Workshop mit Unterstützung von Vertretern der IPCEI Batterieprojekten, den Cluster Projekten ProZell und InZePro sowie den Kapiteln und fachlichen Unterstützern die Aktualisierungen vorgestellt sowie bestehende Herausforderungen und Lösungsansätze nach aktuellem Stand bewertet. Dabei floss auch Inhalt aus den Clusterprojekten mit ein. Die Umsetzung im Kapitel wurde anschließend in einzelnen Online Workshops gemeinsam mit den fachlichen Unterstützern durchgesprochen. Abschließend erfolgte die Prüfung des finalen Kapitels durch alle Autoren, Paten und Unterstützer.

Fazit: Die vorliegende Roadmap formuliert Herausforderungen und Lösungsangebote des Maschinen- und Anlagenbaus sowie Forschungsbedarf für die Großserienproduktion von Lithium-Ionen-Hochleistungs-Hoch-Energiespeichern bis 2030.

Märkte

Als Ausgangspunkt für das vorliegende Update der in den Jahren 2014, 2016, 2018 und 2020 veröffentlichten „Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030“ wurden erneut die Entwicklungen des Batteriemarktes sowie der Produktionskapazitäten betrachtet. Wie sehen die Prognosen sowohl insgesamt als auch in spezifischen Anwendungen wie Elektrofahrzeugen, industriellen Anwendungen und stationären Energiespeichern aus heutiger Sicht aus? Welche Batterietechnologie wird das Marktwachstum in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten maßgeblich tragen und erzeugt demnach den größten Bedarf für entsprechende Produktionslösungen? Wer produziert heute und zukünftig und welche Pläne für Fabriken bestehen weltweit? Was treibt die Anforderungen der Batteriehersteller an ihre Zulieferer an?

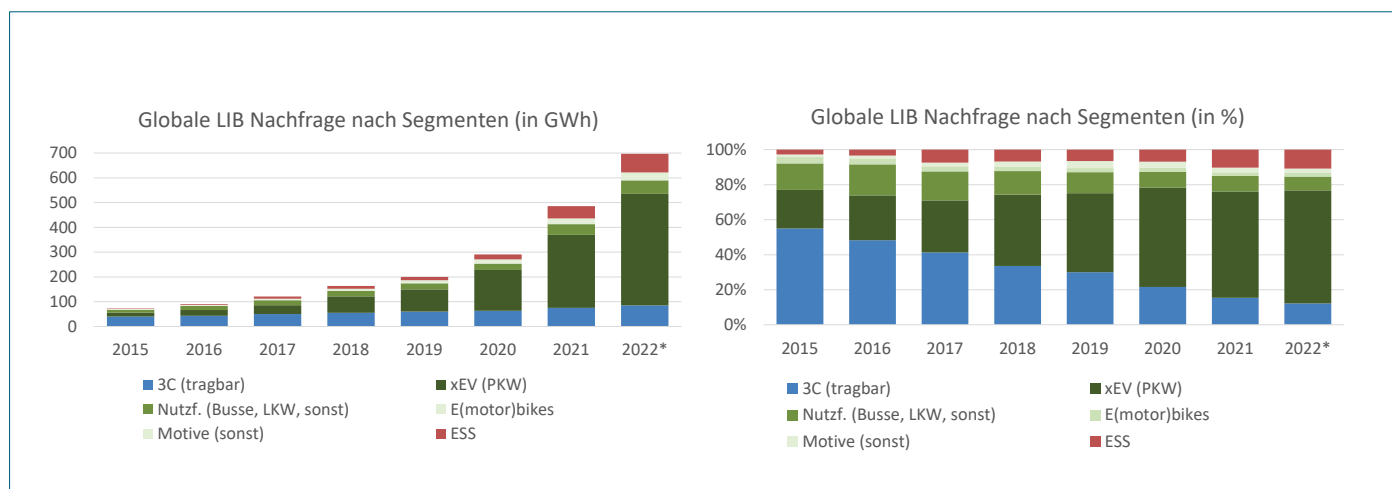
Diese Fragen lassen sich durch die Betrachtung von Märkten, Nachfrage und Angebot sowie durch die Produktspezifikationen der Batteriehersteller beantworten. Die Analyse der Märkte und der Nachfrage basiert auf aktuellen Recherchen und Auswertungen von Marktstudien und Datenbanken. Die im Folgenden dokumentierten Daten wurden gegenüber der 2020 veröffentlichten Roadmap [Michaelis2020] bis auf das Jahr 2022 aktualisiert und bestätigen weiterhin Trends sowie eine zunehmende Dynamik, welche sich bereits damals abgezeichnet hatten.

Märkte, Nachfrage, Angebot

Die Anwendungsmöglichkeiten für elektrische Energiespeichertechnologien im Allgemeinen und Lithium-Ionen-Batterien (LIB) im Besonderen sind vielfältig und erstrecken sich von der Konsumelektronik über die Elektromobilität und stationäre Energiespeicherung bis hin zu direkt in der Industrie eingesetzten Großbatterien [Thielmann2015 a, b, c]. Die Li-Ionen-Batterie hat seit ihrer Einführung Anfang der 1990er Jahre in der Konsumelektronik eine Entwicklung über mehr als 3 Jahrzehnte hinter sich. Diese wird unter intensiver Weiterentwicklung größerer zylindrischer Zellen (im Format 21700, sowie dem von Tesla bereits ebenfalls produzierten Format 4680⁵), großformatiger Pouch-Zellen und prismatischer Zellen auf verschiedene spezifische Anwendungen übertragen. Dabei haben alle diese Zellformate ihre Vorteile und werden in Elektrofahrzeugen ebenso wie industriellen und stationären Anwendungen eingesetzt [Hettesheimer2017]. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass die Lithium-Ionen Batterietechnologie in den kommenden 10 oder mehr Jahren zur vollständigen Reife entwickelt sein wird. Somit ergeben sich für das nächste Jahrzehnt weiterhin große Entwicklungspotenziale dieser Technologie, die über die nächsten Jahre Schritt für Schritt optimiert werden wird.

⁵ Mit dem neuen zylindrischen Zellformat sollen die Batteriekosten um 50 Prozent gesenkt werden, der Energieinhalt und die Leistung steigen in dem größeren Zellformat, welches einfacher und mit weniger Einzelteilen

produziert werden soll: <https://www.teslarati.com/tesla-4680-battery-cell/>



Globale LIB Nachfrage nach Segmenten (in GWh links und nach Marktanteilen rechts): Der 3C Markt umfasst kleinformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen bis zur Größe 18650. Die Nachfrage in diesem Segment ist in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt, sondern nur die LIB Nachfrage in elektromobilen und stationären Anwendungen. Dort werden großformatige Pouch und prismatische Zellen sowie zylindrische Zellen der Größen 18650, 21700 bis 4680 eingesetzt. Quelle: Fraunhofer ISI [auf Basis eigener Daten sowie verschiedener Marktstudien u.a. Avicenne, Takeshita, SNE].

LIB-Zellen: Globale Nachfrage

Die globale Nachfrage nach LIB Zellen lag im Jahr 2021 bei rund 460-500 GWh. Über 350 GWh davon sind dem Bereich Elektromobilität⁶ zuzuschreiben und etwa 50 GWh dem Bereich der stationären Anwendungen. Im Bereich der portablen/ mobilen Anwendungen⁷ lag der LIB-Markt in 2021 bei rund 90 GWh. Unsicherheiten ergeben sich je nach Quelle und Marktstudie sowie unterschiedlichen ermittelten produktspezifischen verkauften Stückzahlen und durchschnittlichen Batteriegrößen. Der LIB Markt hat sich in den letzten Jahren (bis vor 2020) mit durchschnittlich 25 Prozent jährlichem Wachstum entwickelt. Dieses Wachstum liegt seit 2020 bei über 40 Prozent (da nun zunehmend die Größe und Dynamik des xEV Segments ins Gewicht fallen). Die größte Nachfrage und Dynamik ergeben sich durch elektromobile Anwendungen. Die Wachstumsraten lagen hier in den letzten Jahren bei etwa 40 Prozent und dürften auch in den nächsten Jahren noch bei durchschnittlich 30-40 Prozent liegen. Dadurch ist die Nachfrage mittlerweile deutlich höher als bei den 3C Anwendungen (siehe Abbildung oben).

Für 2022 wird der globale LIB Markt auf bis zu 700 GWh oder gar mehr geschätzt (3C über 100 GWh, ESS bis 75 GWh, xEV über 500 GWh, darunter E-PKW bis 450 GWh). In 2023 könnte die globale Nachfrage bereits an die TWh-Grenze heranreichen und in 2024 diese sicherlich übersteigen.

LIB Märkte – Elektromobilität

In der Elektromobilität für **Personenkraftwagen** liegt ein besonderes Augenmerk auf der Entwicklung von Plug-In-Hybriden (PHEV) und batteriebetriebenen Elektromobilen (BEV). Im Bereich der Hybridautos (HEV) ist die Nachfrage nach Zellkapazität gegenüber PHEV und BEV gering.

Bis 2022 stiegen die Verkaufszahlen von Elektroautos (PHEV und BEV) auf 10,5 Million (rd. 450 GWh). Anfang 2023 befanden sich bereits weltweit 25-28 Mio. E-PKW auf den Straßen und bis Ende 2023 werden 40 Mio. erwartet⁸. Der Marktanteil an E-PKW steigt seit 2020 extrem

⁶ PKW, Nutzfahrzeuge, etc.

⁷ tragbar bzw. 3C-Konsum, Kommunikation, Computer

⁸ EV Volumes 2023: <https://www.ev-volumes.com/>

dynamisch mit 4,2 Prozent in 2020 auf 8,3 Prozent in 2021 und 13 Prozent in 2022. Der Anteil der BEV im Vergleich zu PHEV beträgt seit mehreren Jahren etwa 70-75 Prozent.

Der Markt für LIB durch BEV ist aus der Sicht der Zellenachfrageentwicklung der mit Abstand wichtigste. Die Terawattstunden (TWh)-Grenze der LIB-Zellenachfrage für Elektrofahrzeuge insgesamt könnte bei einer optimistischen Entwicklung der Elektromobilität bereits bis 2024 erreicht werden und bezogen auf Elektro-PKW bis 2025.

Bei **Nutzfahrzeugen** (z.B. Transporter, Busse) und **mobilen Arbeitsmaschinen** (z.B. Gabelstaplern) ist eine ähnliche Dynamik und damit die Erschließung eines ebenso attraktiven Wachstumsmarkts für LIB wie im Elektro-PKW-Bereich zu erwarten, welche der Entwicklung des Marktes für Elektro-PKW zeitlich folgt. Die Spannbreite, der in Nutzfahrzeugen verbauten Batterien kann zwischen 50 kWh bis deutlich über 500 kWh liegen. Obwohl die Stückzahlen nur ein Drittel des PKW-Marktes ausmachen, könnte das Marktvolumen durch die doppelte bis dreifache Kapazität der Batterien ähnlich wachsen.

Die meisten Batteriezellen für **Busse** und Nutzfahrzeuge werden immer noch im **chinesischen** Markt eingesetzt. Marktprognosen sehen eine dauerhafte jährliche Nachfrage in der Größenordnung von 100.000-300.000 Elektrobussen in China (10-30 GWh). Jedoch zeigen die durch die chinesische Regierung in der Vergangenheit gekürzten Subventionen für die Hersteller von Elektrofahrzeugen, dass weder die Dynamik noch Stabilität dieser Marktnachfrage in den nächsten Jahren als sicher gilt.

Außerhalb Chinas führt der Absatz von E-Nutzfahrzeugen wie Lieferwägen, Postwägen, Mülltransporter, LKW, etc. zu einer Nachfrage im Bereich weniger GWh. Die Dynamik dürfte sich in den kommenden Jahren aber deutlich erhöhen.

Die Nachfrage für elektrisch betriebene **Zweiräder (E-Bikes)** mit LIB Zellen betrug vor 2020 bereits über 10 Mio. (rd. 5 GWh). [Thielmann 2020b⁹]. Inzwischen kann von 10 GWh ausgegangen werden. Für **E-Scooter und E-Motorbikes** liegen die Verkaufszahlen im dagegen im geringen GWh Bereich und damit deutlich darunter. Durch Batteriekapazitäten von 2 bis über 15 kWh dürfte hier aber zukünftig ein interessanter Markt entstehen.

LIB Märkte – stationäre Anwendungen

Stationäre Speicher nehmen in der Energieversorgung und durch den Ausbau der erneuerbaren Energien eine immer wichtigere Rolle ein. In Regionen schlechter Netzanbindung sind autarke Systeme zudem oft der einzige Weg, Energie bereitzustellen.

Die Nachfrage und Dynamik nach LIB Zellen für stationäre Anwendungen wird je nach Marktstudie unterschiedlich eingeschätzt [Thielmann-2017, Thielmann 2020a]. Bis 2020 lag die globale Nachfrage noch auf dem Level von 10-20 GWh mit Wachstumsraten zwischen 15 und 30 Prozent. In 2021 und 2022 wird der ESS Markt teils auf 50-75 GWh geschätzt und damit Wachstumsraten jenseits von 50-100 Prozent erwartet. Während einige Marktstudien erst gegen 2030 eine globale Nachfrage von 100 GWh sehen, schätzen optimistische Prognosen einen Markt von 200-300 GWh bis 2030.

⁹ AABC 2020: Axel Thielmann, The Emerging Battery Markets Beyond xEV, Fraunhofer ISI.

Der Markt ist vielfältig bzgl. der Anwendungen von off-Grid bis on-Grid Anwendungen¹⁰ [Thielmann2015a, c]. Die Nachfrage einzelner Anwendungen wie der Netzstabilisierung könnte in wenigen Jahren bereits wieder gesättigt sein. Andere Anwendungen sichern eine langfristige Nachfrage.

Insgesamt liegt ein breites Portfolio von Energiespeicherlösungen für stationäre Anwendungen vor. Die LIB Nachfrage ergibt sich durch Substitution bestehender Technologien (insbesondere Pb-Batterien) ebenso wie durch die steigende Nachfrage nach dezentralen Speicherlösungen. Mittel- bis langfristig dürften existierende Speicherlösungen durch die Kostenentwicklung der LIB unter Druck gesetzt oder gar verdrängt werden [Thielmann2015a].

Die Entwicklung von Second-life Geschäftsmodellen kann zukünftig aber auch zu einer Abflachung der Nachfrage führen. Mit der Netzanbindung (V2G, G2V) von Elektrofahrzeugen wird zudem eine neue bzw. präzise Definition von stationären Speichern (ESS) erforderlich.

LIB stellen im stationären Speichermarkt einen Enabler für die Nutzung regenerativer Energien dar. Aus wirtschaftlicher Sicht lassen sich in diesem Markt deutlich bessere Margen erzielen als im E-Auto Markt mit hoher Volumenproduktion. Die Kosten für Heimspeichersysteme liegen beispielsweise immer noch bei rd. 1000 €/kWh.¹¹

LIB Angebot: Produktionskapazitäten

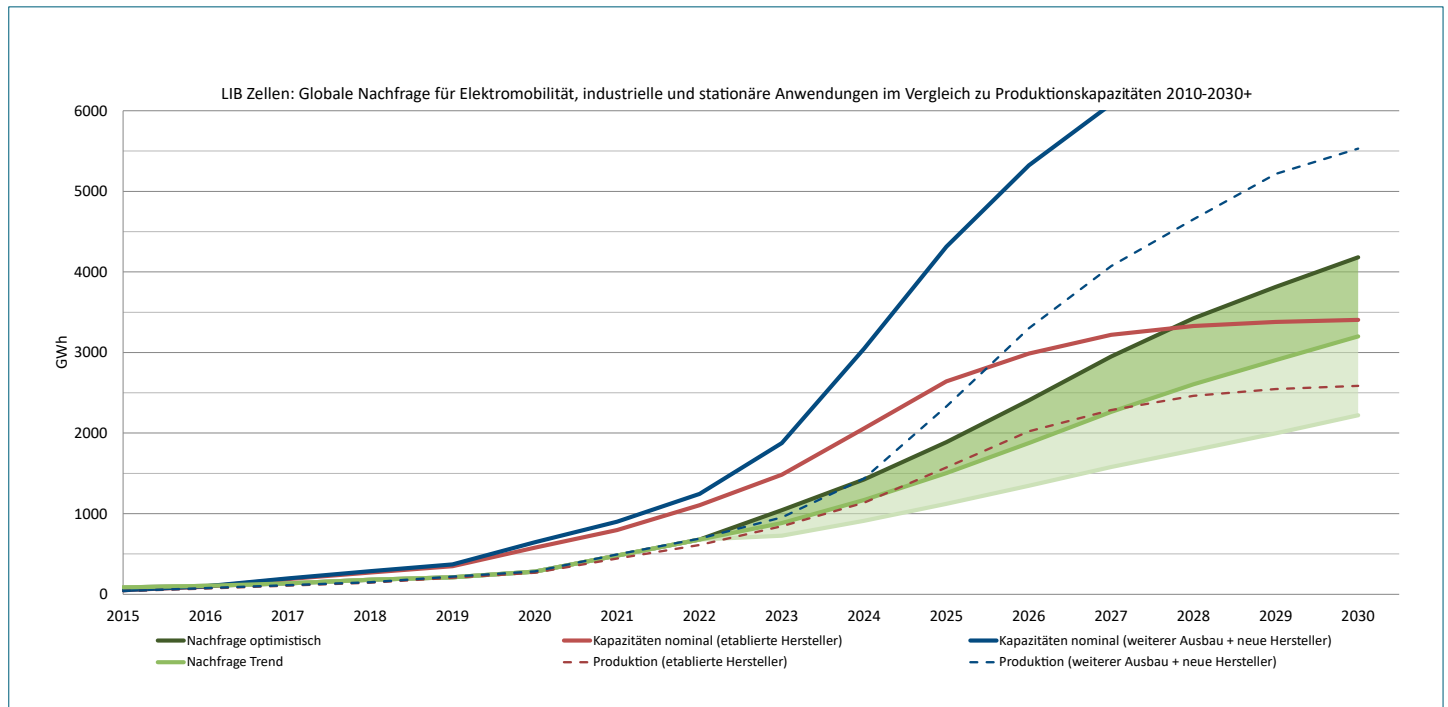
Um zuverlässig aussagen zu können, wie gut Produzenten die Nachfrage decken, ist eine realistische Abschätzung der globalen Produktionskapazitäten unabdingbar. Daraus kann abgeleitet werden, ob und wann neue Fabriken gebaut werden müssen, genauer gesagt, ob sich eine Investition in eine Fabrik lohnt.

Die installierten globalen LIB-Produktionskapazitäten für Elektromobilität, industrielle und stationäre Anwendungen wurden auf Basis diverser Studien, Pressemitteilungen und Angaben der Zellherstellern selbst ermittelt (siehe Abbildung S. 14): Bis Ende 2020 waren demnach rund 650 GWh aufgebaut, bis Ende 2021 900 GWh und bis Ende 2022 über 1,2 TWh.¹² Daraus ergibt sich rechnerisch eine Auslastung von etwa 40-50 Prozent, wenn wir mit der globalen Nachfrage vergleichen. Tatsächlich gehen wir davon aus, dass sich der Hochlauf bis zur realen Produktion der Zellen um 1-2 Jahre verschiebt und somit Produktion und Nachfrage in der Realität decken. Auslastungsgrade der Zellproduktion können daher konkret nur auf der Ebene einzelner Zellhersteller sinnvoll getroffen werden. In den nächsten Jahren wird ein Zubau von jährlich mehreren hundert GWh erwartet (siehe Tabelle Seite 17).

¹⁰ USV, Inselösungen, Netzstabilisierung, PV-Heimspeicher, PV- & Wind-Parks für die Direktvermarktung erneuerbarer Energien, Eigenbedarfsoptimierung, etc

¹¹ vgl. CARMEN e.V. 2022: <https://www.carmen-ev.de/service/marktueberblick/marktuebersicht-batteriespeicher/marktuebersicht-batteriespeicher-online-version/>

¹² Betrachtet werden Produktionskapazitäten für großformatige Pouch und prismatische Zellen sowie zylindrische Zellen (18650 bis 21700 und 4680). Die in den letzten Jahren von Panasonic durch Tesla verbauten 18650 Zellen sind also mitberücksichtigt. Nicht berücksichtigt sind kleinformige Pouch und prismatische sowie zylindrische Zellen für 3C Anwendungen.



LIB-Zellen: Vergleich globale Nachfrage für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (ab 2022 Prognose, unter der LIB Nachfrage nicht berücksichtigt sind kleinformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen kleiner 18650) mit den vorhandenen und bekannten geplanten Produktionskapazitäten (Basisszenario, s. auch Tabelle) sowie veröffentlichten optionalen Ausbauplänen unterschiedlicher Hersteller und neuer Marktteure. Eine realistische Einschätzung, inwieweit die Produktionskapazitäten die Nachfrage decken können, ergibt sich durch die Einbeziehung von Erfahrungswerten bezüglich Auslastungsgrad und Ausbeute von Fabriken (gestrichelte Kurven). Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISI auf Basis [Michaelis 2018].

Gegenüberstellung von LIB Nachfrage und Angebot: Die umfassende Betrachtung

In Fortführung der Gegenüberstellung von LIB-Produktionskapazitäten und LIB-Nachfrage [Michaelis2016, Thielmann2017, Michaelis2018 und 2020] stellen wir in der Abbildung auf S.14 die bis Stand Ende 2022 angekündigten Zellproduktionskapazitäten der globalen LIB Nachfrage gegenüber.

Bei der Nachfrage müssen im Idealfall nicht nur die tatsächlich verbauten Einheiten, sondern auch der **Lagerbestand** in Fabriken oder beim Kunden berücksichtigt werden. Bei einem Überangebot bleiben die Lager beim Kunden leer und es wird spät bestellt. Bei einem Unterangebot wird oft mehr bestellt als tatsächlich benötigt. Die Nachfrage wird unrealistisch „aufgeblasen“ und später möglicherweise storniert.

Die Preisentwicklung ist ein wesentlicher Faktor für die Dynamik der Nachfrage. In der Halbleiterindustrie werden **Durchschnittspreise** (Average Sales Price, ASP) seit jeher mit beobachtet. Sie sind eng gekoppelt mit den Kosten der Produktion. In der Batterieindustrie haben sich inzwischen ebenfalls Vorhersagemodelle dazu entwickelt [Maiser2015, Michaelis2016, Thielmann 2017].

Preise und Investitionsneigung werden überdies maßgeblich von der Entwicklung der Weltwirtschaft als Ganzes beeinflusst.

Produktionskapazitäten stehen nicht in kurzer Zeit voll zur Verfügung. Fabriken werden nach und nach „hochgefahren“ (Ramp-up). In dem Jahr, für das der Produktionsstart angekündigt ist,

können noch nicht die kompletten Kapazitäten gefertigt werden, zumal der Starttermin nicht zwingend am Jahresanfang liegt. Um dieser Start-Phase in unserer Grafik Rechnung zu tragen, haben wir auf den angekündigten Produktionsstart ein Jahr Versatz draufgerechnet.

Vom Bau einer Fabrik über die Qualifizierung der Produktion und der Produkte bis zum Vollbetrieb vergehen zwischen eineinhalb Jahren für eine sog. „Copy & Paste Fabrik“ und bis zu vier Jahren für eine Fabrik mit neuer Produktionstechnik. Zellhersteller können daher nur verzögert auf eine sich schnell ändernde Nachfrage reagieren. Sie sind auf zuverlässige Prognosen angewiesen. Viele Produzenten planen von vornherein mehrere Ausbaustufen einer Fabrik.

Mit dem Wechselspiel aus Angebot, Nachfrage und zeitverzögerter Reaktion liegen typische Muster eines sogenannten „**Schweinezyklus**“ vor, wie auch aus anderen Industrien bekannt.

Die **Kapazitätsauslastung** einer Fabrik ist nie 100 Prozent. Bei einem Auslastungsgrad von dauerhaft über 85 Prozent denken Hersteller in der Regel über eine Kapazitätserweiterung nach. Der Rest dient als Puffer. Für die real genutzte Produktionskapazität ist es also geboten, nur mit Werten um 85 Prozent zu rechnen. Im Fall des extrem dynamisch wachsenden Marktes für LIB Zellen zeigt sich tatsächlich, dass (besonders chinesische) Zellhersteller sogar bereits bei deutlich geringerer Auslastung weitere Ausbaustufen ankündigen.

Eine Fabrik produziert nie ausschließlich Gutteile. Gut eingefahrene Fabriken in der Halbleiterindustrie haben eine **Ausbeute** von über 90 Prozent. Die Ausbeuten in der Batterieproduktion liegen heute teilweise deutlich darunter. Es ist also auch hier sinnvoll, wenigstens 10 Prozent von der Vollkapazität abzuziehen.

Die **Qualität** der Zellen kommt als Unsicherheit hinzu: Anwendungsspezifisch können bei Kunden unterschiedliche Anforderungen und Akzeptanzen vorliegen. Je nach Qualität, Kosten, Auswahl der Zellchemie und des Formats kommen nicht alle produzierten Zellen für Kunden in Frage. Nicht jedes Produkt ist beliebig substituierbar.

Hinzu kommen **regionale Abhängigkeiten**, besonders wenn hohe Nachfragen zu steigenden logistischen Herausforderungen führen. Zellfabriken werden künftig näher am Absatzmarkt gebaut. Das Ganze wird noch überlagert durch Stimmungen in der Industrie, sowie staatlichen Maßnahmen zur Ansiedlung und Förderpolitik.

Wir haben in der obenstehenden Grafik sowohl die nominalen Fabrikkapazitäten (blaue, rote durchgehende Linien) als auch die durch die beschriebenen dämpfenden Effekte¹³ realistischen Werte abgebildet (unterbrochene Linien). Die Nachfrageentwicklung ist grün dargestellt, jeweils in einem konservativen, einem Trend- und einem optimistischen Szenario. Laufen die Linien oberhalb der grünen Flächen, ergeben sich rechnerisch Überkapazitäten, laufen sie darunter, fehlen Produktionskapazitäten.

¹³ Berücksichtigt wurden: Auslastungsgrad von 85 Prozent. Die durchschnittliche Ausbeute heutiger Fabriken wird mit 90 Prozent angenommen. Ankündigungen der Hersteller zum

stufenweisen Ausbau sind und das Hochfahren der Fabriken sind einbezogen. Die restlichen Effekte lassen sich nur schwer bzw. kaum quantifizieren und wurden nicht berücksichtigt.

Die roten Linien zeigen den Ausbau von Produktionskapazitäten im Basisszenario¹⁴. Die blauen Linien zeigen den Ausbau bei Berücksichtigung von optionalen Erweiterungen von Fertigungen durch etablierte und neue Zellhersteller (neue Marktteilnehmer).

Die zwischen 2022 und 2030 weiter massiv ansteigende Nachfrage dürfte in den kommenden Jahren bis 2030 auf unter 2,5 TWh (pessimistischen Szenario, untere grüne Linie) bis hin zu 3-4 TWh (Trend Szenario, mittlere grüne Linie) ansteigen oder im optimistischen Szenario sogar über 6 TWh erreichen (langfristig kann mit über 10 TWh gerechnet werden¹⁵). Wir setzen für 2030 das optimistische Szenario derzeit bei etwa 4TWh für weitere Berechnungen an.

Die Produktionskapazitäten etablierter Zellhersteller (rote Linien) decken die Nachfrage im derzeitigen Trend noch bis 2026 ab. Da sich jedoch in den vergangenen Jahren stets das optimistische Szenario der Nachfrage ergeben hat werden in diesem Fall bereits zwischen 2023 und 2026 weitere Produktionskapazitäten der etablierten sowie ggf. neuen Zellhersteller am Markt benötigt. Jedoch stehen Ankündigungen neuer Marktteilnehmer mit den Ausbauplänen der etablierten Zellhersteller in Konkurrenz (Differenz zwischen blauen und roten Linien).

In der Tabelle (S. 17) sind die für 2022, 2025 und 2030+ geplanten bzw. angekündigten Erweiterungen der Zellproduktionskapazitäten nach Zellherstellern, deren Sitz sowie geplantem Standort aufgelistet. Für die drei Zeiträume werden

aufgrund der hohen Unsicherheiten, inwieweit geplante Kapazitäten im entsprechenden Jahr tatsächlich aufgebaut und in Betrieb genommen werden ebenso wie die Ungewissheit welche neuen Zellhersteller sich am Markt etablieren können, minimale und maximale Werte angegeben.

Den künftigen Ausbauplänen der führenden Zellhersteller CATL, BYD, Panasonic, Samsung SDI, LG Chem, SK Innovation stehen zunehmend weitere Ankündigungen von Zellherstellern ebenso wie OEM gegenüber, welche nun ebenfalls in die Volumenproduktion einsteigen wollen. Solche etablierten Akteure aber auch neue Marktteilnehmer zielten in den letzten Jahren insbesondere auf den wachsenden Markt in Europa ab. Aktuell drohen auf Grund des *Inflation Reduction Acts* (IRA)¹⁶ der USA bereits angekündigte Produktionskapazitäten in Europa gestoppt zu werden und gar vorerst in die USA verlagert zu werden.

Somit könnten sich alleine wegen geopolitischer Gründe und Industriepolitiken anderer Länder, aber verschärft auch durch gestiegene Energiekosten (auch im Zusammenhang mit dem Ukraine-Russland Krieg), Standortentscheidungen sowie Produktionsankündigungen verlagert, verzögert oder gestoppt zu werden.

Die bislang auf dem „Papier“ identifizierten Überkapazitäten sind damit in naher Zukunft ggf. reale Produktions- und Lieferengpässe in einer größeren Dimension.

¹⁴ Basisszenario: In Planung befindliche Produktionskapazitäten etablierter Zellhersteller

¹⁵ Tesla bzw. Elon Musk geht bis 2040 gar von 20-25 TWh aus: <https://www.onvista.de/news/elon-musks-gigantischer-akku-plan-und-2-weitere-tesla-aktien-news-397436777>

¹⁶ Mit dem *Inflation Reduction Act* 2022 wollen die USA ihre Wirtschaft ankurbeln und ihre Widerstandsfähigkeit erhöhen. Dieses Programm soll eine starke Antwort auf die wirtschaftliche und technologische Führung oder Dominanz Chinas sein und bietet enorme Anreize und in einigen Fällen auch Verpflichtungen, die Produktion in die USA zu verlagern.

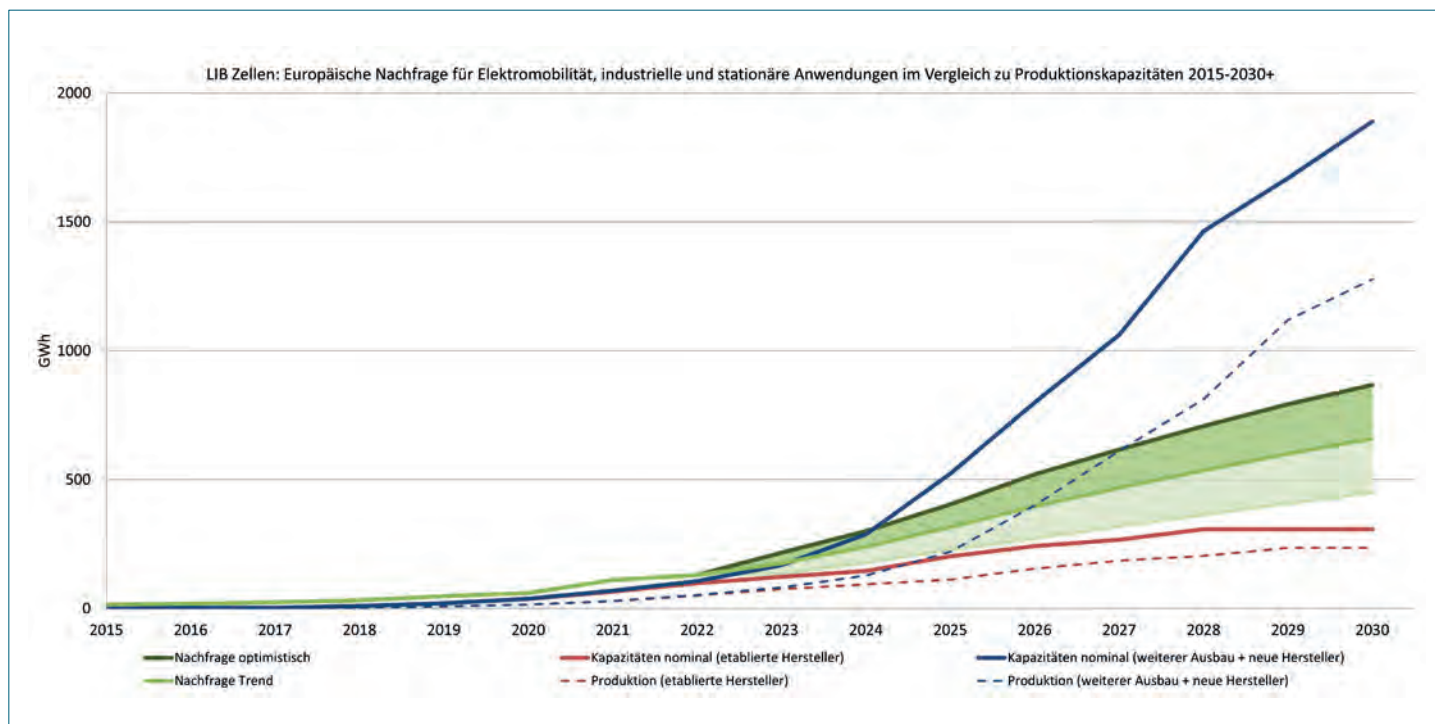
Zellhersteller	Partner	Region Firma	Land Firma	Region Produktion	Land Produktion	2022-Min	2022-Max	2025-Min	2025-Max	2030-Min	2030-Max
BAK		China	China	Asia	China	14	14	24	24	44	44
BYD		China	China	Asia	China	108	108	247	277	287	332
BYD	FAW	China	China	Asia	China	0	0	15	15	45	45
BYD		China	China	Europe	n.a.	0	0	0	15	0	15
CALB		China	China	Asia	China	150	150	400	400	400	400
CALB		China	China	Europe	Portugal	0	0	0	0	0	60
CATL		China	China	Europe	Hungary	0	0	25	25	100	100
CATL		China	China	Europe	Germany	0	0	14	24	14	100
CATL		China	China	Asia	China	146	146	398	568	538	708
CATL		China	China	Asia	Indonesia	0	0	0	60	0	60
CATL	SAIC	China	China	Asia	China	27	27	36	36	36	36
CNM		China	China	Asia	China	3	15	3	15	3	15
Coslight		China	China	Asia	China	5	13	5	13	5	13
Dynavolt		China	China	Asia	China	12	12	12	12	12	12
EVE		China	China	Asia	China	10	34	86	148	116	282
EVE	Linyang	China	China	Asia	China	0	0	10	10	10	10
EVE	BMW	China	China	Europe	Hungary	0	0	0	20	0	20
Evergrande		China	China	Asia	China	5	15	5	30	5	60
Farasis	Geely	China	China	Asia	China	0	0	32	38	32	72
Farasis		China	China	Asia	China	23	23	41	59	41	71
Farasis	Togg	China	China	Asia	Turkey	0	0	0	15	0	15
Farasis		China	China	USA	USA	0	0	0	12	0	12
GAC		China	China	Asia	China	0	0	0	21	0	36
Ganfeng		China	China	Asia	China	9	9	47	47	83	100
Gotion		China	China	Asia	China	33	33	103	128	103	158
Gotion		China	China	Europe	Germany	0	0	6	10	6	18
Gotion		China	China	USA	USA	0	0	0	10	0	30
Great Power		China	China	Asia	China	8	8	8	28	8	28
Henan Pingmei	National Batt	China	China	Asia	China	10	20	10	20	10	20
Linkdata		China	China	Asia	China	0	8	0	24	0	30
Lishen		China	China	Asia	China	20	20	27	40	27	40
Lvqing		China	China	Asia	China	0	0	0	13	0	27
MGL RiseSun		China	China	Asia	China	21	21	21	45	21	45
National Battery Tech		China	China	Asia	China	19	19	19	19	19	19
Optimum Nano		China	China	Asia	China	12	36	12	36	12	36
Phylion		China	China	Asia	China	28	28	28	28	28	28
Qing Tao		China	China	Asia	China	1	1	1	11	1	11
Ruipu Energy		China	China	Asia	China	10	10	14	20	14	20
SGMW		China	China	Asia	China	0	0	0	10	0	20
Sunwoda		China	China	Asia	China	1	1	79	101	109	131
Sunwoda	Dongfeng	China	China	Asia	China	0	0	20	20	30	30
SVOLT		China	China	Europe	Germany	0	0	0	8	0	40
SVOLT		China	China	Asia	China	21	30	38	225	38	291
Teamgiant		China	China	Asia	China	10	10	10	10	10	10
Wanxiang (A123)		China	China	Asia	China	8	8	8	80	8	80
WeLion		China	China	Asia	China	0	0	0	20	0	100
Rest China (<10 GWh)		China	China	div.	div.	42	46	55	63	55	63
ACC		Europe	France	Europe	Italy	0	0	0	0	0	40
ACC		Europe	France	Europe	France	0	0	0	12	0	40
ACC		Europe	France	Europe	Germany	0	0	0	0	0	40
Basquevolt		Europe	Spain	Europe	Spain	0	0	0	0	0	10
Beyonder		Europe	Norway	Europe	Norway	0	0	0	10	0	10
CustomCells		Europe	Germany	Europe	Germany	0	0	0	1	0	29
ElevenEs		Europe	Serbia	Europe	Serbia	0	0	0	0	0	16
Elinor		Europe	Norway	Europe	Norway	0	0	0	0	0	40
Freyr		Europe	Norway	Europe	Finland	0	0	0	0	0	40
Freyr		Europe	Norway	Europe	Norway	0	2	0	39	0	39
Freyr		Europe	Norway	USA	USA	0	0	0	0	0	50
inoBat	Gotion	Europe	Slovakia	Europe	n.a.	0	0	0	0	0	40
inoBat		Europe	Slovakia	Europe	Spain	0	0	0	4	0	32
inoBat		Europe	Slovakia	Europe	Serbia	0	0	0	4	0	32
inoBat		Europe	Slovakia	Europe	Slovakia	0	0	0	11	0	11
Italtvolt		Europe	Italy	Europe	Italy	0	0	0	3	0	70
MES / HE3DA		Europe	Czech Republic	Europe	Czech Republic	0	1	0	10	0	30
Mindcaps		Europe	Spain	Europe	Spain	0	0	0	4	0	12
Morrow		Europe	Norway	Europe	Norway	0	0	0	8	0	43
Northvolt		Europe	Sweden	Europe	Germany	0	0	0	0	0	60
Northvolt		Europe	Sweden	Europe	Sweden	14	14	14	55	14	70
Northvolt	Volvo	Europe	Sweden	Europe	Sweden	0	0	0	5	0	50
Verkor		Europe	France	Europe	France	0	0	0	16	0	50
Volvo		Europe	Sweden	Europe	Sweden	0	0	0	0	0	10
VW		Europe	Germany	RoW	Canada	0	0	0	0	0	40
VW		Europe	Germany	Europe	CZ/PL/SK	0	0	0	0	0	40
VW		Europe	Germany	Europe	n.a.	0	0	0	0	0	80
VW		Europe	Germany	Europe	Spain	0	0	0	0	0	40
VW		Europe	Germany	Europe	Germany	0	0	0	20	0	40
VW		Europe	Germany	USA	USA	0	0	0	0	0	40
West Midlands Gigafactory		Europe	UK	Europe	UK	0	0	0	10	0	60
Rest Europe (<10 GWh)		Europe	div.	div.	div.	10	14	12	32	12	37

LIB-Zellproduktionskapazitäten in GWh für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (großformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen der Größen 1865/2170/4680) in 2022 und Ausbau-Ankündigungen etablierter und neuer Hersteller bis 2025 und 2030 nach Zellherstellern, deren Sitz und Standorten der Zellproduktion; Basisszenario (min) der heute vorhandenen und geplanten bekannten Produktionskapazitäten etablierter Hersteller; Hersteller <10 GWh Zellproduktion bis 2030 sind unter „Rest“ aufsummiert und nach Ländern gelistet. Es sind insgesamt nur konkrete Ankündigungen etablierter und neuer Zellhersteller gelistet. Würden auch Ankündigungen ohne konkrete Standorte berücksichtigt werden, so lägen die globalen Ankündigungen bis 2030+ bei über 13 TWh und nicht wie aktuell bei 7,6 TWh. Quelle: Datenbank des Fraunhofer ISI.

18 MÄRKTE

Zellhersteller	Partner	Region Firma	Land Firma	Region Produktion	Land Produktion	2022-Min	2022-Max	2025-Min	2025-Max	2030-Min	2030-Max
AESC		Japan	Japan	Europe	Spain	0	0	0	13	0	50
AESC		Japan	Japan	USA	USA	3	3	33	33	33	43
AESC		Japan	Japan	Asia	China	4	4	16	16	20	20
AESC	Nissan	Japan	Japan	Asia	Japan	0	0	9	9	18	18
AESC	BMW	Japan	Japan	USA	USA	0	0	10	10	30	30
AESC	Nissan	Japan	Japan	Europe	UK	0	0	12	12	12	35
AESC	Renault	Japan	Japan	Europe	France	0	0	0	0	0	30
Panasonic	Tesla	Japan	Japan	USA	USA	39	39	43	43	43	43
Panasonic		Japan	Japan	USA	USA	0	0	20	20	30	90
Panasonic		Japan	Japan	Asia	Japan	22	22	26	53	26	66
Rest Japan (<10 GWh)		Japan	Japan	div.	div.	24	24	37	38	37	38
Hyundai	SK On	Korea	Korea	USA	USA	0	0	0	10	0	20
Hyundai	LG ES	Korea	Korea	USA	USA	0	0	0	0	0	70
Hyundai		Korea	Korea	Asia	India	0	0	0	20	0	20
LGES	Stellantis	Korea	France/ Korea	RoW	Canada	0	0	23	30	23	45
LGES		Korea	Korea	Europe	Poland	35	35	65	65	65	65
LGES	Honda	Korea	Korea	USA	USA	0	0	0	0	40	40
LGES	GM	Korea	Korea	USA	USA	5	5	70	80	90	115
LGES		Korea	Korea	Asia	China	44	44	52	52	52	52
LGES		Korea	Korea	Asia	Korea	22	22	35	55	35	65
LGES		Korea	Korea	USA	USA	10	10	36	36	36	36
LGES	Hyundai	Korea	Korea	Asia	Indonesia	0	0	10	15	10	30
LGES	IBC	Korea	Korea	Asia	Indonesia	0	0	0	10	0	10
Samsung SDI		Korea	Korea	Europe	Hungary	30	30	40	40	40	40
Samsung SDI		Korea	Korea	Asia	China	6	6	6	24	6	29
Samsung SDI	Stellantis	Korea	Korea	USA	USA	0	0	23	23	23	33
Samsung SDI		Korea	Korea	Asia	Korea	5	21	6	29	6	33
Samsung SDI		Korea	Korea	Asia	Malaysia	0	0	0	0	0	10
SK On	EVE	Korea	China/ Korea	Asia	China	0	0	0	15	0	25
SK On		Korea	Korea	Europe	Hungary	12	12	17	17	47	47
SK On		Korea	Korea	div. Standorte	div. Standorte	0	0	0	10	0	10
SK On		Korea	Korea	Asia	China	27	27	47	47	57	57
SK On		Korea	Korea	USA	USA	5	5	22	32	22	50
SK On	Ford	Korea	USA/Korea	USA	USA	0	0	43	43	129	129
Rest Korea (<10 GWh)		Korea	Korea	div.	div.	8	8	8	13	8	16
Energy Absolute		RoW	Thailand	Asia	Thailand	1	1	1	4	1	50
Exide		RoW	India	Asia	India	0	0	0	10	0	10
Ford	SK On	RoW	Turkey	Asia	Turkey	0	0	0	11	0	45
LIBCOIN	BHEL	RoW	India	Asia	India	0	1	0	15	0	30
Megamillion		RoW	South Africa	RoW	South Africa	0	1	0	1	0	32
Ola		RoW	India	Asia	India	0	0	0	1	0	35
Recharge		RoW	Australia	Europe	UK	0	0	0	4	0	30
Recharge		RoW	Australia	RoW	Australia	0	0	0	2	0	30
Reliance		RoW	India	Asia	India	0	0	0	20	0	20
StromVolt		RoW	Canada	RoW	Canada	0	0	0	0	0	10
Vingroup		RoW	Vietnam	USA	USA	0	0	0	0	0	25
Rest RoW (<10 GWh)		RoW	div.	div.	div.	0	2	1	26	1	33
Ford	CATL	USA	USA	USA	USA	0	0	0	0	0	40
ABF		USA	USA	USA	USA	0	0	0	5	0	13
Imperium3		USA	USA	RoW	Australia	0	0	0	12	0	18
Imperium3		USA	USA	USA	USA	2	2	8	16	15	30
Kore Power		USA	USA	USA	USA	0	0	0	8	0	12
Microvast		USA	USA	Asia	China	15	15	15	15	15	15
Nanotech		USA	USA	Europe	UK	0	0	0	0	0	10
ONE		USA	USA	USA	USA	0	0	0	1	0	36
QuantumScape		USA	USA	Europe	Germany	0	0	0	5	0	21
Rivian		USA	USA	USA	USA	0	0	0	30	0	50
Statevolt		USA	USA	USA	USA	0	0	0	12	0	54
Tesla		USA	USA	USA	USA	0	4	0	72	100	210
Tesla		USA	USA	Europe	Germany	0	0	0	20	0	100
Rest USA (<10 GWh)		USA	USA	div.	div.	5	6	10	16	10	16
Summe global						1105	1246	2630	4313	3377	7617
		China				756	865	1859	2851	2270	3891
		Europa				25	32	27	244	27	1241
		Japan				92	92	206	246	249	463
		Korea				209	225	503	666	689	1047
		RoW				1	5	2	94	2	350
		USA				22	27	33	212	140	625

LIB-Zellproduktionskapazitäten in GWh für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (großformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen der Größen 1865/2170/4680) in 2022 und Ausbau-Ankündigungen etablierter und neuer Hersteller bis 2025 und 2030 nach Zellherstellern, deren Sitz und Standorten der Zellproduktion; Basisszenario (min) der heute vorhandenen und geplanten bekannten Produktionskapazitäten etablierter Hersteller; Hersteller <10 GWh Zellproduktion bis 2030 sind unter „Rest“ aufsummiert und nach Ländern gelistet. Es sind insgesamt nur konkrete Ankündigungen etablierter und neuer Zellhersteller gelistet. Würden auch Ankündigungen ohne konkrete Standorte berücksichtigt werden, so lägen die globalen Ankündigungen bis 2030+ bei über 13 TWh und nicht wie aktuell bei 7,6 TWh. Quelle: Datenbank des Fraunhofer ISI.



LIB-Zellen: Vergleich der **europäischen** Nachfrage für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (ab 2022 Prognose, unter der LIB Nachfrage nicht berücksichtigt sind kleinformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen kleiner 18650) mit den vorhandenen und bekannten geplanten Produktionskapazitäten (Basisszenario, s. auch Tabelle) sowie veröffentlichten optionalen Ausbauplänen unterschiedlicher Hersteller und neuer Marktakteure. Eine realistische Einschätzung, inwieweit die Produktionskapazitäten die Nachfrage decken können, ergibt sich durch die Einbeziehung von Erfahrungswerten bezüglich Auslastungsgrad und Ausbeute von Fabriken (gestrichelte Kurven). Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISI

Hotspot Europa

Der Bedarf nach LIB Zellen in Europa könnte bis 2025 bei 200 bis 400 GWh liegen (konservatives bis optimistisches Szenario) und bis 2030 bei fast 500 bis unter 1000 GWh (etwas über 20 Prozent des globalen Bedarfs). Wir gehen im aktuellen Trend von einem Bedarf von 600 GWh bis 2030 aus. Die Ausbaupläne durch asiatische und europäische Zellhersteller reichen bis nach 2025 an 500 GWh und bis 2030 an 1800 GWh (1,8 TWh) heran. Mit der Produktion von zylindrischen Zellen (neben den vor allem großformatigen prismatischen und Pouch-Zellen) werden zudem Wachstumsmärkte jenseits des Automotive-Marktes adressiert (z.B. Power Tools, e-Bikes.).

Europa folgt dem bisherigen Hotspot China durch die schnell anwachsende Nachfrage nach Elektromobilität und damit LIB-Zellen. In den kommenden Jahren soll in Europa eine zu China vergleichbare Zellproduktionskapazität erst auf und dann ebenso ausgebaut werden. Die Anteile von bis zu 80 Prozent an der globalen Produktionskapazität wie sie heute noch am Standort China stehen, dürften somit in den kommenden Jahren wieder unter die 50 Prozent fallen.

Die Standorte USA, Europa und weitere Länder werden ab 2025 bis 2030 entsprechende Produktionskapazitäten aufbauen - allerdings auch stark aus der Hand chinesischer Unternehmen wie CATL, BYD genauso wie der etablierten koreanischen und japanischen Hersteller.

Die in der Abbildung für die Europäischen Ankündigungen gezeigten Kapazitäten (blaue und rote Linien) beinhalten wieder korrigierte Annahmen bzgl. der zeitlichen Verzögerung im Aufbau, der Ausbeute in der Produktion und der Auslastung im Betrieb und des Vertriebs (gestrichelte Linien).

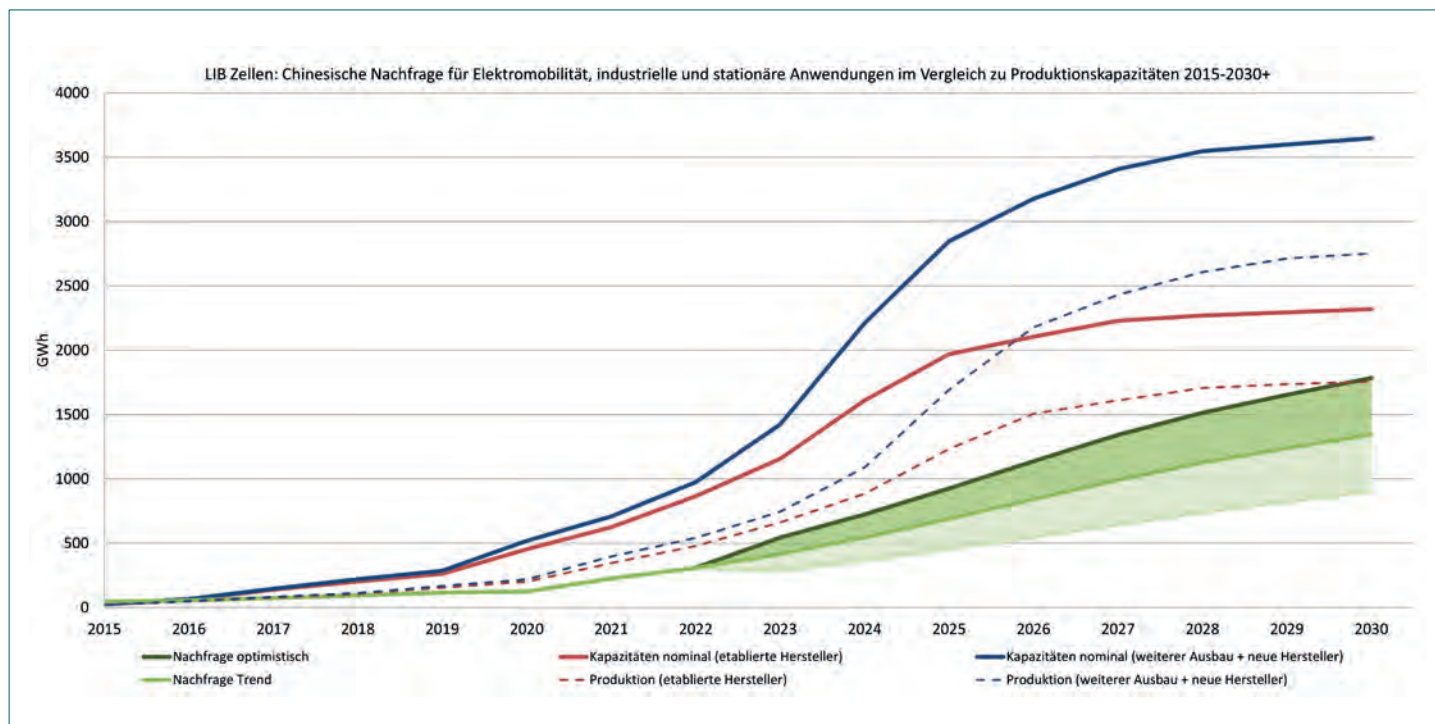
Heute werden demnach immer noch Zellen nach Europa importiert. Ab 2025 dürfte dann durch den weiteren Ausbau der Kapazitäten etablierter Hersteller sowie den Aufbau von Kapazitäten durch neue Hersteller der Europäische Markt durch eine lokale Produktion gedeckt werden. Allerdings wird sich zeigen, in wie weit sich hier auch Europäische Hersteller etablieren werden können. Die Ankündigungen nicht-Europäischer Hersteller bis 2030 betragen etwa 1 TWh, während europäische Hersteller knapp 0,8 TWh an Produktionskapazitäten angekündigt haben.

Die heute bestehenden Produktionskapazitäten von rd. 100 GWh in Europa stammen ausschließlich von asiatischen Zellherstellern (Samsung SDI, LGES, SK On) mit Ausnahme von Northvolt. Sollten die bereits global etablierten Zellhersteller (rote Linien) ihre Kapazitäten hin zu ihren

maximalen Ankündigungen erweitern, so würden diese bis 2030 die europäische Nachfrage im Bereich bis 600-800 GWh abdecken. Für europäische Zellhersteller (sofern nicht bereits klare Lieferbeziehungen bestehen) würde dies wenig Raum zur Markterschließung geben.

Mit dem *Inflation Reduction Act* der USA als enormem Investitionsprogramm zur Neuausrichtung der US Wirtschaft auf erneuerbare Energien zeigt sich bereits eine Auswirkung auf die Standortentscheidungen von Zellherstellern, welche, zudem wegen der in Europa gestiegenen Energiepreise, die angekündigten Produktionskapazitäten stoppen, in andere Regionen verlagern oder diese zumindest verzögern.

Der massive Akt staatlicher Subventionen der USA, die hohen Energiepreise in Europa, hohe bürokratische Hürden und lange Prozesse gelten aktuell als zentrale Wettbewerbsfaktoren, welche den Aufbau eines europäischen Batterie-Ökosystems bedrohen und die Abhängigkeiten von importierten Batteriezellen aus Asien verlängern könnten.



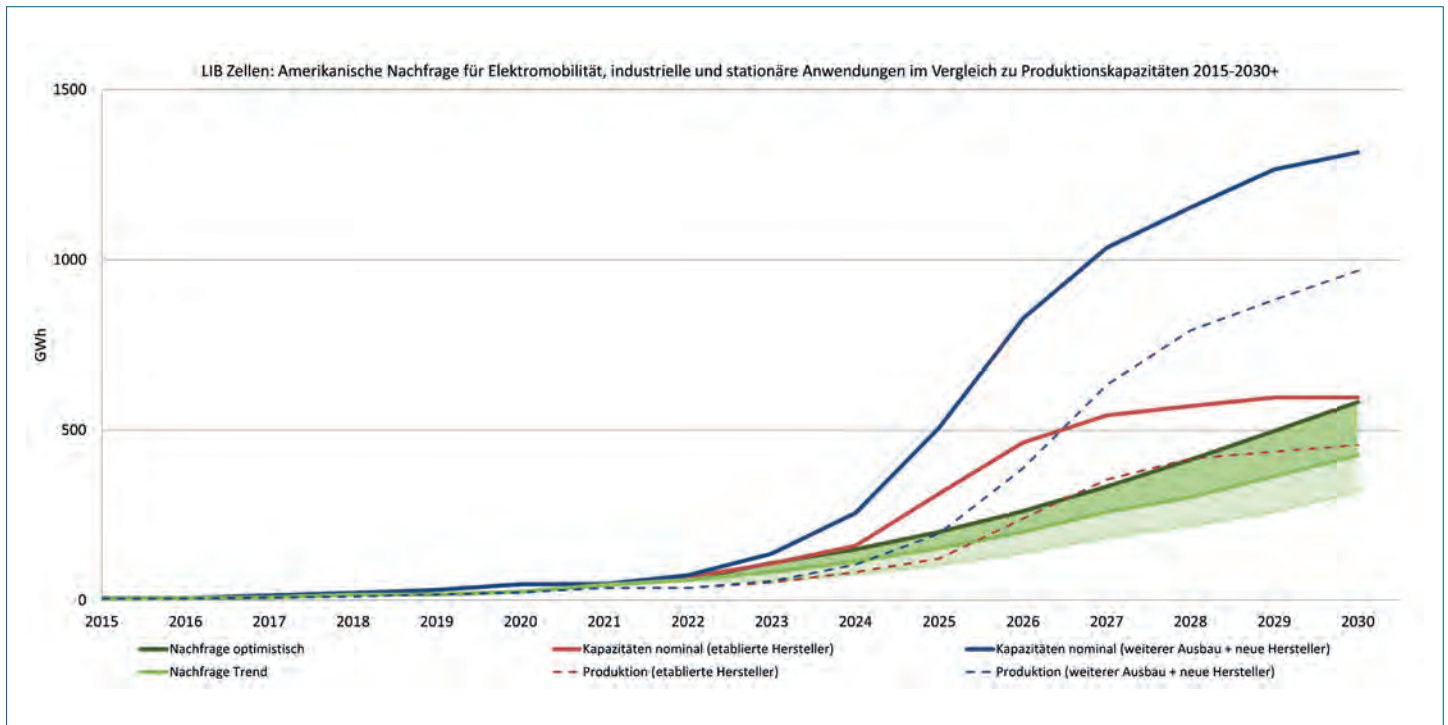
LIB-Zellen: Vergleich der **chinesischen** Nachfrage für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (ab 2022 Prognose, unter der LIB Nachfrage nicht berücksichtigt sind kleinformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen kleiner 18650) mit den vorhandenen und bekannten geplanten Produktionskapazitäten (Basisszenario, s. auch Tabelle) sowie veröffentlichten optionalen Ausbauplänen unterschiedlicher Hersteller und neuer Marktteure. Eine realistische Einschätzung, inwieweit die Produktionskapazitäten die Nachfrage decken können, ergibt sich durch die Einbeziehung von Erfahrungswerten bezüglich Auslastungsgrad und Ausbeute von Fabriken (gestrichelte Kurven). Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISI.

Hotspot China

Der Bedarf nach LIB Zellen in China liegt bei über 40 Prozent des globalen Bedarfs und dürfte in 2023/2024 bereits bei 500 GWh liegen und bis 2030 auf bis zu 1,8 TWh ansteigen.

Demgegenüber decken bereits die Ankündigungen der etablierten Zellhersteller auch bei Verzögerungen sowie reduzierter Auslastung und Ausbeute (gestrichelte Linien) den inländischen Bedarf ab. China kann also, wie auch in der Vergangenheit, Zellen in andere Regionen exportieren. Neben chinesischen Herstellern tragen nicht-chinesische Hersteller (wie Samsung SDI, LGES, SK ON) mit nur etwa 10 Prozent der Kapazitäten zur Produktion im Land bei.

Zudem zählen chinesische Unternehmen, wie insbesondere CATL, zu den nun weltweit expandierenden asiatischen Unternehmen und haben daher die besten Chancen, das in heimischen Märkten erlernte Produktions-Know-how in Exportmärkte umzusetzen. Die Qualität chinesischer Zellen wird heute gleichauf mit der von japanischen und koreanischen Zellen gesehen und geben auch preislich den Benchmark an.



LIB-Zellen: Vergleich der **US-amerikanischen** Nachfrage für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (ab 2022 Prognose, unter der LIB Nachfrage nicht berücksichtigt sind kleinformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen kleiner 18650) mit den vorhandenen und bekannten geplanten Produktionskapazitäten (Basisszenario, s. auch Tabelle) sowie veröffentlichten optionalen Ausbauplänen unterschiedlicher Hersteller und neuer Marktakteure. Eine realistische Einschätzung, inwieweit die Produktionskapazitäten die Nachfrage decken können, ergibt sich durch die Einbeziehung von Erfahrungswerten bezüglich Auslastungsgrad und Ausbeute von Fabriken (gestrichelte Kurven). Quelle: Berechnungen des Fraunhofer ISI.

Hotspot USA

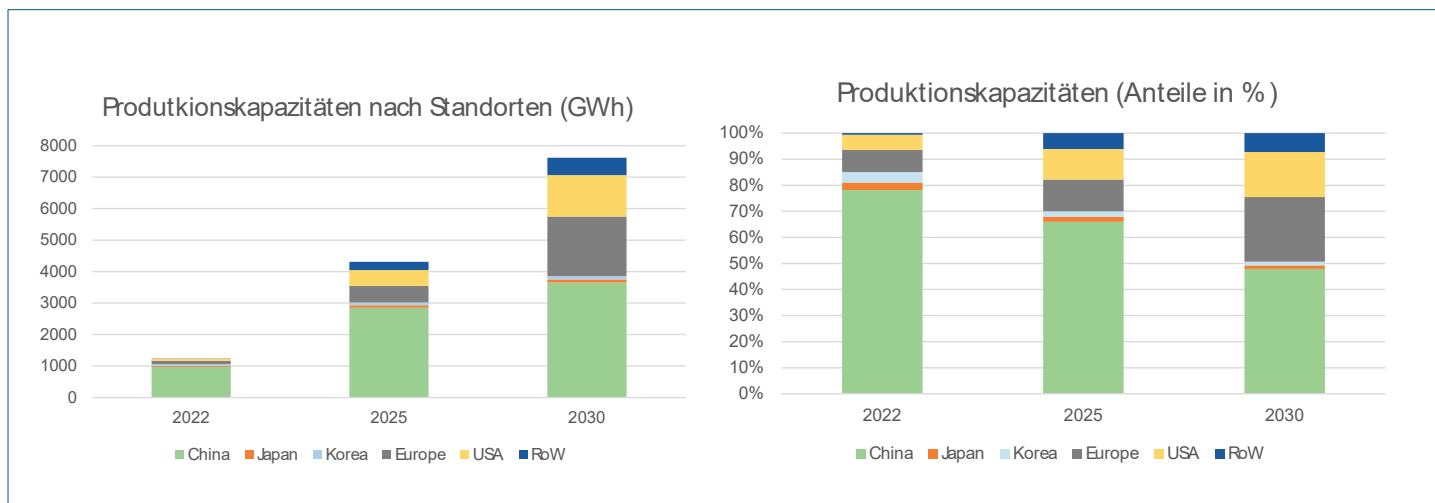
Der Bedarf nach LIB Zellen in den USA liegt bei rund 10 Prozent des globalen Bedarfs. Gemeinsam mit China und Europa generieren diese drei Hotspots alleine bereits einen Bedarf von 70-80 Prozent der globalen Nachfrage. Der Bedarf durch die USA liegt demnach in 2023/2024 bereits bei über 100 GWh und dürfte bis 2030 bei 300-500 GWh oder höher liegen.

Durch lokale Joint Ventures zwischen US OEM und asiatischen Zellherstellern (nicht zuletzt Tesla/ Panasonic) konnte der inländische Bedarf bislang weitestgehend auch lokal gedeckt werden.

In den kommenden Jahren können etablierte Zellhersteller die wachsende Nachfrage bedienen, so dass für die große Zahl an Ankündigungen für Kapazitätserweiterungen oder Produktion durch neue Akteure nur bedingt Platz ist.

Die rund 1,3 TWh bis 2030 angekündigten Produktionskapazitäten teilen sich mit 400 GWh auf US-amerikanische Hersteller, etwa 300 GWh auf lokale Joint Ventures und fast 600 GWh ausländische Unternehmen auf.

Zwischen 2025 und 2030 dürfte sich zeigen, in welchem Umfang der *Inflation Reduction Act* eine Ansiedlung sowie Verlagerung der Produktion in die USA bewirkt und ggf. von dort aus Exportmärkte entstehen werden.



Globale Produktionskapazitäten in GWh nach Standorten (links) und Prozent Anteile der Produktionskapazitäten (rechts). Quelle: Fraunhofer ISI

Was muss ein Standort liefern, um geeignet zu sein?

Entsprechend der globalen Ankündigungen für LIB Zellproduktionskapazitäten würden bereits um 2025 4 TWh stehen und damit die heutigen Kapazitäten vervierfachen. Bis 2030 sind 7,6 TWh angekündigt. Über 6,8 TWh alleine in Europa, China und den USA. Somit wird es eine Verlagerung der Anteile von China nach Europa und in die USA geben. In diesen drei Hotspots dürften dann über 90 Prozent der globalen Produktionskapazitäten konzentriert sein, während sie für 70-80 Prozent der Batterienachfrage verantwortlich sind.

Somit könnten nach aktuellem Stand 10-20 Prozent der dann produzierten Zellen aus diesen Hotspots in andere Weltregionen exportiert werden. Dies ist für China bereits heute der Fall, die USA könnten in den kommenden Jahren folgen. Für Europa wird es sich wohl zwischen 2025 und 2030 entscheiden.

Bis 2030 zeichnet sich eine globale Standortverlagerung der Zellproduktion an die Orte ab, wo die Zellen möglichst einfach zu ihren Anwendermärkten hin transportiert werden können: primär zu den OEM.

Die besondere Relevanz der Nähe der Zellproduktion zum Absatzmarkt wird deutlich, wenn man sich den Bedarf und die möglichen Potenziale der Kostensenkung für Batterie-Zellen und Packs vergegenwärtigt:

- Transportkosten (besonders in den künftigen GWh Maßstäben) und damit auch Logistikkosten können durch einen absatznahen Standort reduziert werden.
- Energie- und Personalkosten machen zwar nur wenige Prozent der Batteriekosten aus, dennoch dürften sie bei der Standortwahl von LG Chem, SDI, SKI in Polen und Ungarn eine Rolle gespielt haben. Mit den aktuell deutlich gestiegenen Energiekosten (besonders in Deutschland) reagieren Zellhersteller bereits mit Verlagerungen der zuvor angekündigten Produktion weg von Deutschland oder gar Europas. Somit stellen Energiekosten aktuell einen realen und zentralen Wettbewerbsfaktor dar.

- Kosten für **Infrastruktur** (Grundstücke, Gebäude, etc.) stellen einen wesentlichen Teil der Anfangsinvestitionen dar und müssen über die Abschreibung umgelegt werden. Ansiedlungspolitik von Ländern, Regionen, Kommunen und Städten spielen hier eine wichtige Verhandlungsmasse, um ihren Standort für Zellfertiger attraktiv zu machen.
- Neben der reinen „Economy of scale“ stellt die **Automatisierung** einen wichtigen Stellhebel dar, um Prozessschritte, -qualität, Ausbeute und Durchsatz weiter zu optimieren. Die Nähe der Zellhersteller zu Ausrüstern und der Zulieferkette, welche die Chance auf eine Alleinstellung in der **Material- und Prozessqualität** ermöglichen, können zu Standortentscheidungen beitragen. Der europäische Maschinenbau könnte gerade hier einen Mehrwert für asiatische und europäische Zellhersteller bieten und künftig Referenzen aufbauen.
- Nicht zuletzt spielt aber auch die „**grüne Batterieproduktion**“ und Senkung der CO₂-Emissionen eine längst zentrale Rolle für die Zellhersteller. Neben energieeffizienter Produktion ist auch der Energiemix selbst entscheidend für die Standortwahl. Mit der europäischen Batterieverordnung werden über Nachhaltigkeitskriterien, wie dem CO₂-Footprint, einem Batteriepass, Recyclingquoten, etc. auch indirekt Anreize für eine lokale Batterieproduktion geschaffen.

Der Standort Deutschland dürfte für einige der Zellhersteller in der Vergangenheit aufgrund der Kombination mehrerer Faktoren entscheidend gewesen sein: Energiemix, Nähe zu OEM sowie der Zugang zu Fachkräften. Da sich dies aktuell mit den geopolitischen Spannungen, der Subventionspolitik der USA, den Energiekosten etc. geändert hat, ist ein schnelles

politisches Handeln, wie insbesondere von der europäischen Batterieindustrie gefordert, wichtig. Ziel muss es sein, eine gleiche Ausgangslage sowie Wettbewerbsfähigkeit vor allem gegenüber China und den USA sicher zu stellen.

Märkte für Maschinen- und Anlagenbauer

Herzstück von jeder bestehenden, sich im Bau befindlichen oder angekündigten *Gigafactory* ist die eigentliche Produktionslinie für die Zellfertigung. Abhängig vom Produktionsschritt beim Herstellungsprozess müssen für die in den Fabriken jeweils angestrebten Fertigungskapazitäten eine unterschiedliche Anzahl an Produktionsanlagen bereitgestellt bzw. in Betrieb genommen werden. Der Durchsatz aber auch die Kosten der Anlagen können sich teilweise sehr stark zwischen unterschiedlichen Produktionslinien unterscheiden. Gründe sind beispielsweise die hergestellten Zellformate oder Zellchemien, aber auch der Einsatzzweck der Batterie hat Auswirkungen (beispielsweise Hochenergiezelle vs. Hochleistungszelle). Zudem unterscheiden sich die heute auf dem Markt befindlichen Anlagen in ihren technischen Spezifikationen.

Die Kenntnis der Fertigungskapazität zukünftiger *Gigafactories* [Fraunhofer ISI 2023a] erlaubt eine Abschätzung der Anzahl benötigter Maschinen und damit auch der Investitionssumme in Produktionsanlagen.

Mischen

Beim aktuellen Batchmischen sind die erreichbaren Durchsätze (bezogen auf die daraus produzierbaren Batteriekapazitäten) unter anderem abhängig von der Mischergroße, der Mischzeit und dem Feststoffgehalt der Slurry. Unter Annahme heute üblicher Materialien und durchschnittlicher Anlagengrößen liegt der

Durchsatz pro Mischereinheit (inkl. Binder-aufschluss etc.) bei etwas über 1,5 GWh pro Jahr. Gerade beim Mischprozess (am Anfang der Prozessverkettung) muss Material im Überschuss produziert werden, da es über den Produktionsprozess hinweg immer wieder zu Produktausschüssen kommt. Aufgrund höherer Maschinendurchsätze bei den nachgelagerten Prozessen bestehen Anlagen oftmals aus mehreren einzelnen Mischern.

Es ist in den nächsten Jahren möglich, weitere Verbesserungen bei der Anlagenkonzeptionierung für die reine Nassaufbereitung zu erreichen. Bei Halbnass- bzw. Trockenelektrodenherstellung sind aufgrund gänzlicher anderer Feststoffgehalte (80 – 100 Prozent) andere Mischtechnologien bzw. Anlagenkonzepte notwendig (vergl. auch Technologiekapitel 1, S. 62). Auf Grundlage erwarteter technologischer Fortschritte ist bis 2030 beim diskontinuierlichen Nassmischen eine Erhöhung der Anlagendurchsätze um theoretisch etwa 60 Prozent möglich (auch wegen Optimierungen der Zellchemie). Unterschiede zwischen Anoden und Kathodenherstellung sind vorhanden aber stark abhängig vom jeweils verwendeten Aktivmaterialien (z.B. Si-Anodenmaterial). Insgesamt ist davon auszugehen, dass die nächsten Jahre die größte Innovation nicht durch Optimierungen beim Nassmischen entsteht, sondern durch eine Umstellung hin zum Trockenprozessieren. Einzelne Hersteller sind dabei, dies in großem Maßstab in ihre Produktion zu integrieren.

Eine größere Durchsatzerhöhung kann durch die Umstellung des Batchvorgangs auf kontinuierliche Mischprozesse, z.B. Extrusionsmischen mittels Doppelschneckenextruder, erreicht werden. Die kontinuierlich arbeitenden Extruder verfügen über signifikant höhere Materialverarbeitungskapazitäten von mehr als 1000 l/h. Damit können in einer Mischanlage heute theoretisch Durchsätze von über 5 GWh/a erreicht werden. Die Prozessierung mit Anodenmaterial

kann dabei voraussichtlich schneller im Massenmarkt eingesetzt werden als die Kathodenherstellung. Beim Aufbau heutiger Industrieanlagen wird in der Regel noch bewusst auf Batchvorgänge gesetzt.

Ins Verhältnis gesetzt mit aktuellen Produktionsankündigungen werden für den Zubau an Zellproduktion im Jahr 2023 global ungefähr 700-750 Mischer benötigt. Aufgrund hoher Investitionen in die Peripherie (z.B. Dosiereinheiten etc.) sind in einer *Gigafactory* pro GWh Fertigungskapazität ungefähr 3-11 Mio. Euro Investitionssumme notwendig.

Beschichter und Trockner

Bei Beschichtungsanlagen gibt es im Vergleich zum Mischer mehrere konstruktive Maßnahmen, um die Produktionskapazitäten zu steigern. Immer wieder im Gespräch ist dabei eine höhere Bahngeschwindigkeit sowie Beschichtungsbreite. (vergl. auch Technologiekapitel 2, S. 70). So wird sich die aktuelle Produktionskapazität von ungefähr 5 GWh/a anlagentechnisch auf mehr als das Doppelte im Jahr 2030 steigern lassen können.

Die dem Beschichter nachgelagerte Trocknung ist anlagentechnisch stark verknüpft. Es handelt sich in der Regel um eine kombinierte Fertigungsanlage. Bei einer Entwicklung hin zur Trockenbeschichtung entfällt der Trocknungsschritt gänzlich. Vermehrt geforscht wird an alternativen Trocknungsverfahren, die neben Verbesserungen bei der immer wichtiger werdenden Energieeffizienz auch Einfluss auf die Durchsätze haben können.

Setzt man den Maschinendurchsatz eines großen SoA Tandembeschichters in Relation zum Ausbau der Produktionskapazitäten, werden im gesamten Jahr 2023 global ungefähr 200 Anlagen benötigt. Aufgrund der Anlagenkosten von 3-6 Mio. Euro pro GWh Jahresfertigungskapazität

zität ergeben sich damit Investitionssummen zwischen 1,8 und 3,6 Mrd. Euro. Es kann in der Praxis von einer nochmals höherer Nachfrage ausgegangen werden, da zum einen die Einfahrprozesse viel Produktionsausschuss erzeugen, zum anderen teilweise kleinere Anlagen zum Einsatz kommen. Bei der Beschichtung und Trocknung gibt es insgesamt noch klares Entwicklungs- und Innovationspotenzial. Aufgrund der Komplexität der unterschiedlichen Anlagenkomponenten kann Wettbewerbsfähigkeit aufgrund von technischem Knowhow erzielt werden.

Kalandrieren und Vereinzeln

In heutigen *Gigafactories* ist oftmals ein Kalandrieren einer Tandem Beschichter-Trockner-Einheit nachgelagert. Aufgrund der erreichbaren hohen Rollengeschwindigkeiten und weiteren großen Entwicklungsfortschritten stellt die Fertigungskapazität der Kalandrieren keinen Bottleneck bei der Verkettung der einzelnen Fertigungsschritte dar. Der *Slitter* bzw. die Vereinzelanlage ist oftmals direkt hinter dem Kalandrieren angeordnet. Aus diesem Grund können auch hier identische Stückzahlen angenommen werden.

Die benötigten Stückzahlen für 2023 entsprechen so der Anzahl an Beschichter-Trockner-Einheiten weltweit und belaufen sich, kalkuliert mit theoretischen Anlagendurchsätzen, auf jeweils 200 Anlagen. Pro GWh Fertigungskapazität pro Jahr müssen beim Kalandrieren ungefähr 1 Mio. Euro und beim *Slitter* 1-3 Mio. Euro (beispielsweise abhängig davon, ob mithilfe von Lasern oder Messern geschnitten wird) investiert werden. Entsprechend der Beschichter-Trockner-Einheit werden in der Praxis wohl mehr Anlagen installiert.

Es kann davon ausgegangen werden, dass durch Optimierungen die Durchsätze entsprechend dem vorgelagerten Schritten angepasst werden können. Zwar gibt es auch beim Kalandrieren Herausforderungen beim Folienhandling (vgl. Technologiekapitel 3, ab S. 78), diese können aber aller Voraussicht nach für die benötigten Durchsätze realisiert werden. Für Kalandrierenhersteller bieten sich Wettbewerbsvorteile, wenn Qualitätsvorteile gegenüber Mitbewerbern bestehen (z.B. durch präzise Druckeinstellung oder Sensor-/Kameraüberwachung).

Vakuumtrocknung

Um die Elektrodenfolien (Tochter-) Coils nach dem *Slitten* vollständig zu trocknen, kommen diese für ca. 24 Stunden in einen Trocknungsschrank. Mögliche Erhöhungen im Durchsatz des Prozessschritts könnten durch größeres geometrisches Abmaß oder auch durch eine Verringerung der Aufenthaltsdauer einzelner Coils erfolgen. In einer Vakuumschrank-Einheit können aktuell pro Jahr Elektrodenfolien mit einer Kapazität von ungefähr 1 GWh/a getrocknet werden. Bis 2030 könnte sich dieser Durchsatz verdoppeln. Zumeist werden mehrere Trocknungsschränke nach jeder Elektrodenfolienherstellungseinheit benötigt. Im Bereich der Trocknungsschrankentwicklung sind Wettbewerbsvorteile aufgrund von technischem Knowhow nicht eindeutig zu prognostizieren. Es gibt beispielsweise auch alternative Ansätze wie die kontinuierliche Vakuumtrocknung.

Bezogen auf die weltweite Produktionskapazität bedeuten die erreichbaren Anlagendurchsätze einen globalen Bedarf von 900-1000 Vakuum Trocknungseinheiten im Jahr 2023. Die Kosten liegen bei rund 0,5 Mio. Euro für einen Anlagendurchsatz von 1 GWh/a.

Separator Herstellung

Moderne Anlagen für die Separatorfolien Herstellung haben einen Durchsatz von ca. 110 Millionen m² pro Jahr. Ermöglicht wird dieser durch eine hergestellte Folienbreite von 5 bis 6 Meter und Bahngeschwindigkeiten zwischen 60 bis 80 m/min. Bezogen auf eine typische Elektrodenbeladung und damit die benötigte Menge an Separatorfolie pro Speicherkapazität bedeutet der Maschinendurchsatz eine jährlich produzierbare Batteriekapazität von 11 bis 12 GWh/a.

Die Folienherstellung und -handling von polymeren Werkstoffen aus einem direkten Extrusionsprozess ist mittels Extrusion langjährig erprobt und optimiert. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung ist trotzdem denkbar (vgl. Technologiekapitel 4, S.85).

Separatoren für die Zellherstellung der neu gebauten *Gigafactories* im Jahr 2023 können mithilfe 50 zugebauter Produktionsanlagen bedient werden. Durch Maschinenkosten von über 2 Mio. €/GWh/a und einer nochmal so teuren Peripherie beläuft sich die Marktgröße auf bis zu 2,5 Mrd. Euro.

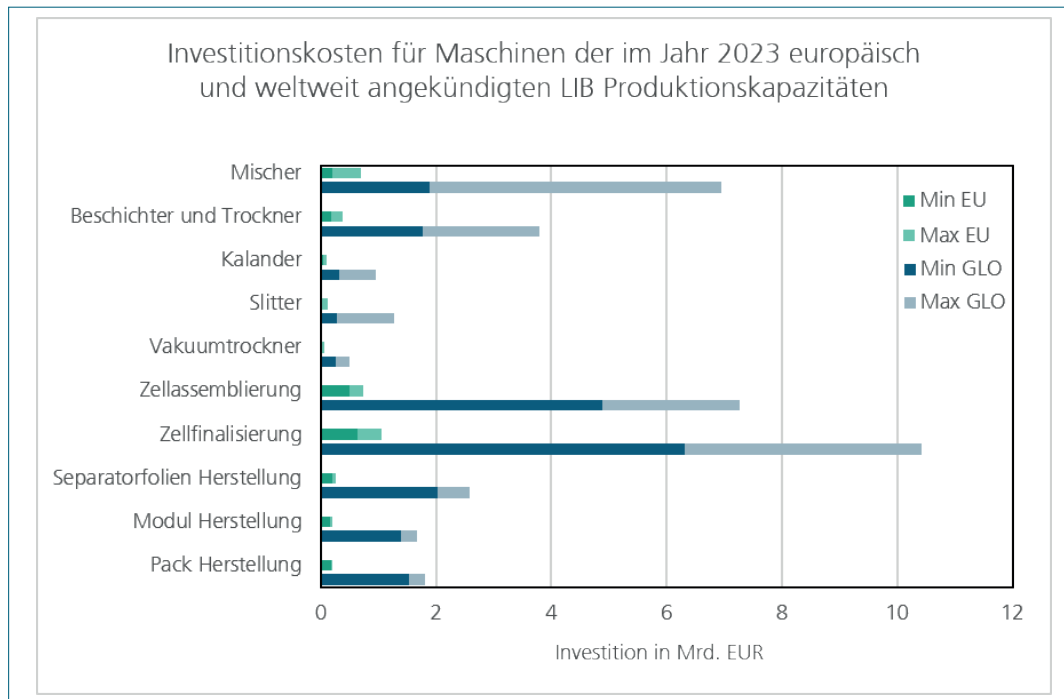
Zellassemblierung

Die Weiterverarbeitung der Elektrodenbänder findet in Trockenräumen statt. Die dort benötigten Maschinen unterscheiden sich je nach gefertigtem Zellformat. Eine präzise Vorhersage der zukünftig verwendeten Zellformate ist schwer. Zur Vereinfachung werden in diesem Kapitel Zylindrische/Pouch-/Prismatische Zellen zu gleichen Anteilen berücksichtigt.

Investitionskosten der gesamten Zellassemblierungsschritte belaufen sich auf ca. 8 bis 12 Mio. Euro pro GWh Jahresfertigungskapazität. Insgesamt sind alleine im Jahr 2023 weltweit für die verschiedenen Maschinen sowie die baulichen Maßnahmen zur Bereitstellung der benötigten Prozessatmosphäre (Trockenraum) Investitionssummen von ca. 5 bis 7,5 Mrd. Euro notwendig.

Wickeln sowie Vereinzeln und Stapeln

Der Stapelprozess der Pouchzelle hat aufgrund des aufwendigeren und bisher nicht vollständig kontinuierlich ablaufenden Materialhandlings etwas geringere Maschinendurchsätze. Bei den zylindrischen Zellformaten werden in Zukunft (aufgrund der steigenden Zellgrößen und höheren Taktraten) die höchsten Maschinendurchsätze erreicht. Die Beschleunigung der zukünftigen Taktrate kann bei größer werden den Zellformaten jedoch auch stagnieren, da mehr Wicklungen bzw. größere Zellstapel notwendig sind. Beim Stapeln wird davon ausgegangen, dass passend zum Durchsatz der Stapelanlage zwei Vereinzelanlagen (jeweils für Anode und Kathode) zum Herstellen der Sheets ausgelegt werden und dem Prozessschritt vorgelagert sind. Über unterschiedliche Zellformate gemittelt können die Anlagen Fertigungskapazitäten von heute 0,6 GWh/a erreichen. Durch Steigerungen von Wickel- und Stapelgeschwindigkeit in Kombination mit einer Erhöhung der Zellgröße könnten bis Ende des Jahrzehnts mit einer Anlage ungefähr 1,8 GWh/a hergestellt werden (2,2 GWh/a für Wickelanlagen und 1,3 GWh bei Stapelanlagen).



Übersicht der europäischen sowie globalen Anlageninvestitionen für angekündigte Produktionsanlagen im Jahr 2023, aufgeteilt in einzelne Fertigungsschritte. Quelle: Fraunhofer ISI

Die Maschinendurchsätze machen deutlich, dass die Notwendigkeit zur Parallelisierung der Anlagen besteht. Die für eine weitere Beschleunigung der Anlagen benötigte konstruktive Entwicklungsarbeit (vor allem Automatisierungsthematiken unter anderem in Kombination mit sensorischer Prozessüberwachung) stellt mögliche Potenziale für den Maschinen- und Anlagenbau dar (vgl. Technologiekapitel 6, S. 99).

Einbringung in Gehäuse/Verpackung und Kontaktierung

Im Vergleich zu den Wicklungs- bzw. Stacking-Anlagen haben die nachfolgenden Assemblierungsschritte (Einbringen in Zellgehäuse und die dortige Kontaktierung) schnellere Taktraten. Es gibt unterschiedliche Kopplungsmethoden von z.B. Kontaktierungs- und Verpackungsmaschinen, die aber zumeist aufeinander abgestimmte Durchsätze besitzen. Gemittelt über die verschiedenen Zellformate hat eine Anlage heutzutage ein Produktionsdurchsatz von etwas unter 2 GWh/a. Dieser kann durch technische Verbesserungen z.B. bei der Schweißtechnik

aber auch dem Zellhandling und der damit erreichten Steigerung der Assemblierungsgeschwindigkeit bzw. größer werdenden Zellen auf mehr als das Doppelte ansteigen. Noch deutlicher als beim vorgelagerten Prozessschritt hat hier das zylindrische Zellformat die mit Abstand höchsten Durchsätze. Entsprechend dem vorgelagerten Verfahrensschritt müssen mehrere Anlagen parallelisiert in Betrieb gehen.

Elektrolytbefüllung und Entgasung

Elektrolytbefüllungsanlagen werden, wie die anderen Prozessschritte der Zellaufbau, im Normalfall ebenfalls parallelisiert. Zylindrische Zellen sind aufgrund ihres Volumens schneller gefüllt, die anderen Zellformate verfügen wie erwähnt jedoch über mehr Energieinhalt. Aktuell sind Durchsätze von 0,5 bis 0,6 GWh/a pro Anlage möglich. Die Verbesserungen hinsichtlich Taktrate und Zellgröße (parallel zu den vorgelagerten Fertigungsschritten) sowie unterschiedliche innovativer Ansätze (siehe Technologiekapitel 7, S. 104).

Zellfinalisierung

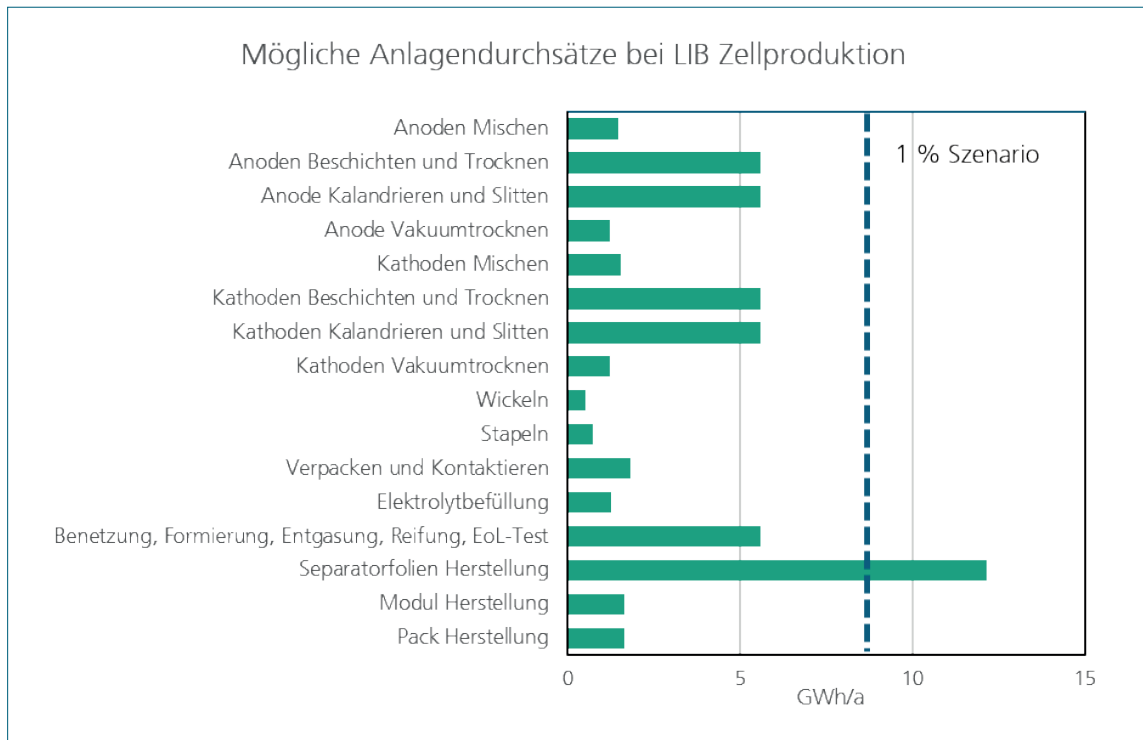
Aufgrund der teilweise langen Verweilzeiten in diesem Schritt der Zellherstellung werden die Batteriezellen während der Finalisierung nicht kontinuierlich behandelt, sondern ruhen überwiegend. Die Benetzungs-, Formierungs-, Entgasungs-, und Alterungsschritte sowie das finale Testen finden größtenteils in Warenräumen statt, in denen ca. 30 Pouch- oder prismatische Zellen bzw. über 250 zylindrische Zellen nebeneinander angeordnet sind. Diese werden in eine vollautomatisierte Anlage gegeben.

Aufgrund der Anlagenverkettung werden alle Schritte zusammengefasst und als eine Anlage angesehen. In dieser werden die Zellen zunächst zur Elektrolytbenetzung verwahrt (Annahme: 6 Stunden), anschließend formiert (Annahme: 24 Stunden), entgast und gealtert (Annahme: 2,5 Wochen). Zum Abschluss der Zellproduktion werden die Zellen getestet. Ausgelegt wird die Anlage in der Regel nach den addierten Durchsätzen der parallelisierten Zellassemblierung. Stellhebel für die größte Durchsatzsteigerung in den nächsten Jahren bei der Zellfinalisierung ist die Reduktion aller individueller Verweildauern, (vgl. Technologiekapitel 9 S. 117). Neue *Gigafactories* im Jahr 2023 benötigen ungefähr 100 Zellfinalisierungs-Anlagen. Diese wiederum verursachen Kosten von bis zu 9 Mrd. USD.

Modul- und Packherstellung

Die Modul- und Packherstellung selbst findet zumeist örtlich getrennt von der Zellherstellung statt. Im Automobilbereich werden Module (bzw. Packs) oftmals direkt im Umfeld der Fahrzeugproduktion hergestellt. Aufgrund der Kopplung hin zum Produktionsband der Fahrzeugherstellung ist die Produktionsgeschwindigkeit der Module an die Geschwindigkeit der Fahrzeugproduktion angepasst. Die mittlere Produktionskapazität einer Anlage liegt bei ungefähr 1,6 GWh/a.

Die für eine schnell arbeitende Produktionsstraße oder auch ein ganzes Werk benötigte Produktionskapazität kann durch parallelisierte Anlagen realisiert werden. Es ist davon auszugehen, dass die Anlagenkapazität aufgrund von innovativen Kontaktierungstechnologien, Zellformatoptimierungen und grundsätzlich neuen Modul- und Packdesigns weiter verbessert wird (potenziell auf den doppelten Durchsatz). Abhängig der Batterieanwendungen (z.B. im Consumer Bereich) werden teilweise keine Module bzw. Packs benötigt. Insgesamt ergibt sich ein Maschinenbedarf von ca. 300 bis 350 Modulherstellungsanlagen und ungefähr ähnlich viele Packherstellungsanlagen im Jahr 2023. Bei der Modulherstellung werden Investitionen von 2,5-3 Mio. €/GWh/a benötigt, für die Packherstellung etwas über 3 Mio. €/GWh/a.



Aktuell mögliche Anlagendurchsätze verschiedener Fertigungsprozesse (separate Anoden- und Kathodenherstellung) sowie eine Kennzeichnung der benötigten Durchsätze für das 1 Prozent Szenario. Quelle: Fraunhofer ISI

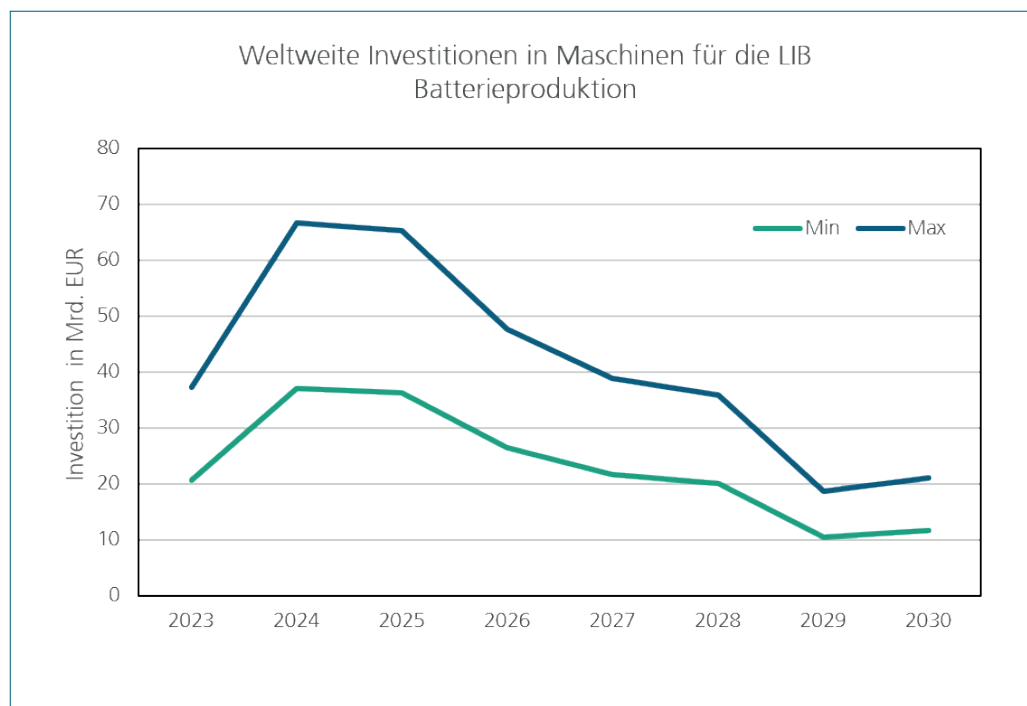
Maschinenauslegung gekoppelt an weltweite Produktionskapazität

Interessant bei der zukünftig benötigten Gesamtanzahl an Fertigungsanlagen ist, inwieweit die Produktionsdurchsätze parallel zu der größeren Marktnachfrage wachsen wird. Aus anderen Branchen gibt es grobe Richtwerte, dass Produktionsanlagen mit Fertigungskapazitäten von ungefähr 1 Prozent des weltweiten Bedarfs ökonomisch einen Sweet Spot treffen (betrifft beispielsweise die Rohstoffversorgung, Skalierungseffekte, Standortabhängigkeit, Transportwege, etc.).

Im Jahr 2023 beläuft sich die voraussichtliche Zellenachfrage ca. 880 GWh [Fraunhofer ISI 2023b]. Eine einprozentige globale Produktion würde somit einen Anlagendurchsatz von knapp 9 GWh pro Jahr bedeuten. Obige Abbildung zeigt, dass bei einigen Produktionsschritten diese Grenze erreichbar zu sein scheint. Die Separatorherstellung übertrifft diesen Wert sogar. Bei anderen Prozessschritten, insbesondere bei der Zellaassemblierung, ist wie zuvor beschrieben ersichtlich, dass Anlagen

parallelisiert betrieben werden müssen. Für das Jahr 2030 kann davon ausgegangen werden, dass der Bedarf auf über 3 TWh ansteigen wird [Fraunhofer ISI 2023b]. Zuvor erwähnte Durchsatzsteigerungen um teilweise 100 Prozent reichen nicht aus, um den dann benötigten Durchsatz für einen gleichbleibenden Marktanteil einer Fertigungslinie zu halten.

Dabei steht außer Frage, dass ein einprozentiger Marktanteil an einem Standort realisierbar ist (z.B. *Gigafactories* mit über 100 GWh Fertigungskapazität angekündigt von CATL in Debrecen, Ungarn oder CALB in Hefei, China). Bei den gebauten *Gigafactories* werden jedoch mehrere Fertigungslinien parallel betrieben (bzw. aufgebaut). Dies kann Vorteile bei der individuellen Zellherstellung (also der gleichzeitigen Herstellung verschiedener Formate oder Zellchemien) bieten. Gleichzeitig bestünde bei einer Skalierung der einzelnen Fertigungslinien (zumindest bei einigen Fertigungsschritten) die Möglichkeit einer erhöhten Kosteneffizienz der Produktion bzw. vor allem der Produktionsanlagen.



Minimale sowie maximale Investitionssumme in Prozessanlagen der angekündigten Zellproduktionskapazitäten bis 2030 bei gleichbleibenden Anlagenkosten. Quelle: Fraunhofer ISI

Marktentwicklung bis 2030

Auch die in Zukunft stattfindende Weiterentwicklung der unterschiedlichen Anlagen bzw. Anlagendurchsätze hat wie aufgezeigt teilweise sehr große Entwicklungsspannen. Anlagen können somit ihren Durchsatz steigern. Aufgrund der verhältnismäßig deutlich stärker steigenden Batterienachfrage wächst jedoch die Anzahl an benötigten Maschinen. Ein besonders starker Nachfrageanstieg ist in den kommenden Jahren zu erwarten. In diesem Zeitraum gibt es besonders viele Ankündigungen neuer *Giga-factories*. Die Abbildung aus S. 31 gibt eine Übersicht darüber, wie groß Investitionssummen für die angekündigten Produktionsstätten wären, wenn die Investitionskosten in Anlagen die nächsten Jahre konstant blieben.

Experteneinschätzung zur wirtschaftlichen Lage in der Branche des Maschinen- und Anlagenbaus

Eine während des VDMA Expertenworkshops "Battery Production of Tomorrow" im Oktober 2022 in Frankfurt durchgeführte Befragung von Expert:innen aus dem europäischen Maschinen- und Anlagenbau lässt davon ausgehen, dass der steigende Bedarf an Fertigungsanlagen weltweit auch das Branchenwachstum für den deutschen bzw. europäischen Maschinen- und Anlagenbau positiv beeinflusst. Dies hat unterschiedliche Ursachen. Laut Angaben der Teilnehmenden ist der hier ansässige Maschinen- und Anlagenbau beispielsweise führend im Thema der Prozessautomatisierung. Zudem können Anlagen hinsichtlich Nachhaltigkeit und Qualität oftmals mit der außereuropäischen Konkurrenz mithalten oder diese sogar übertreffen. Weiterer Vorteil ist der Austausch zwischen europäischen Unternehmen der Branche, welcher Katalysator für Innovationen sein kann.



Relevante Zellformate in der Automobilindustrie
Quelle: PEM der RWTH Aachen

Wichtiger Punkt ist, dass mithilfe verschiedener Innovationen Vorteile bezüglich OPEX, bzw. TCO durch z.B. neuartige Prozessführungen entstehen können. Insbesondere asiatische Wettbewerber haben aber einen zeitlichen und branchenspezifischen Knowhow-Vorsprung.

Die sich aktuell in Europa etablierende Zellherstellung führt laut einem Großteil der Befragten zu zusätzlichen positiven Trends beim allgemeinen Geschäftsklima. Unter anderem hilft die Nähe zu potenziellen Kunden. Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass die Summe aller globalen Anlagenhersteller die geplanten Zellfertigungskapazitäten mit den entsprechend notwendigen Anlagen bedienen kann. Für den Europäischen Markt stellt sich die Frage, wie viele der entstehenden Projekte für den europäischen Maschinen- und Anlagenbauer relevant sind. Asiatische Investoren werden in der Regel ihre eignen Lieferanten mitbringen. Die Frage, ob europäische Produktionskapazitäten dem Bedarf entsprechend aufgebaut werden können, hängt von vielen Aspekten ab und kann heute nicht eindeutig beantwortet werden.

Neue Akteure im Markt der Zellherstellung sind oftmals interessiert an Turn Key Lösungen, da noch zu wenig Prozessverständnis besteht, um eine individuelle Anlagenauswahl und -kopplung umzusetzen. Erfahrene Zellhersteller wiederum können eine Art "cherry picking" betreiben und die für ihre Unternehmen besten Anlagenkonzepte in eine Fertigungslinie inte-

grieren. Während hingegen im asiatischen Raum bereits Unternehmen etabliert sind, die gesamte Fertigungsanlagen herstellen können, kann im europäischen Raum das Bilden von Joint Ventures angestrebt werden. Dies kann eine strategisch sinnvolle Maßnahme sein, um inner-europäisch hergestellte Turn Key Fertigungs-linien für den europäischen Markt anzubieten.

Zellformate: Vor- und Nachteile der einzelnen Formate

Gegenüberstellung der Zellformate

Lithium-Ionen-Batteriezellen finden Anwendung in den verschiedensten Produkten. Von der Unterhaltungselektronik bis zur Automobilindustrie werden derartige Zellen als Energiespeicher eingesetzt. Bedingt durch die vielfältigen Anwendungen ist eine große Variation an Batteriefarmaten und -größen erhältlich. Allgemein wird zwischen drei verschiedenen Zellformaten unterschieden. Die überwiegende Anzahl der Batteriezellen lässt sich den Pouchzellen, den zylindrischen oder den prismatischen Zellen zuordnen.

Die Zuordnung zu den Formaten erfolgt anhand des Zellgehäuses. Die Pouchzellen verfügt üblicherweise über ein Gehäuse aus einer Kunststoff-Aluminium Verbundfolie. Dünne Blechstreifen dienen zur elektrischen Kontaktierung der Zelle. Im Gegensatz zu den Pouchzellen werden die zylindrischen und prismatischen

	 Pouchzellen	 Zylindrische Zellen	 Prismatische Zellen
Energiedichte auf Zellebene	 Hoch (geringes Gehäusegewicht, gute Bauraumausnutzung)	 Hoch (geringes Gehäusegewicht, sehr gute Bauraumausnutzung)	 Mittel (erhöhtes Gehäusegewicht, keine vollständige Bauraumausnutzung)
Packungsdichte auf Systemebene	 Hoch	 Mittel (zylindrischer Körper)	 Hoch
Bauteilanzahl	 Gering	 Gering	 Hoch
Mechanische Eigenschaften	 Geringe Steifigkeit (Kraftübertragung durch Gehäuse eingeschränkt)	 Sehr hohe Steifigkeit	 Hohe Steifigkeit
Thermische Eigenschaften	 Gutes Oberflächen-Volumen-Verhältnis, effiziente Temperaturkontrolle	 Schlechte Wärmeabfuhr	 Gutes Oberflächen-Volumen-Verhältnis, effiziente Temperaturkontrolle

Gegenüberstellung der verschiedenen Zellformate
Quelle: PEM der RWTH Aachen

Zellen in starren Blechbauteilen (häufig Edelstahl oder Aluminium) verpackt. Die elektrische Kontaktierung erfolgt über Kontaktflächen an den Gehäusebaugruppen.

Die Produktion der unterschiedlichen Zellformate ist weitgehend ähnlich. Bedingt durch die unterschiedlichen Gehäusearten liegen die größten Unterschiede in der Produktion der verschiedenen Zellformate in der Zellassemblierung.

Ein wesentlicher Unterschied in der Zellassemblierung ist die Integration von Elektroden und Separator. Für die Herstellung von Pouchzellen werden Stapelprozesse eingesetzt. Die Herstellung von zylindrischen Zellen erfolgt mit Wickelprozessen. Die Fertigung von prismatischen Zellen kann sowohl mit Stapelprozessen als auch mit Wickelprozessen erfolgen. Auch wenn ein Großteil der prismatischen Zellen bisher mit sogenannten Flachwickeln bestückt werden, werden zunehmend Zellen mit gestapelten Elektroden-Separator-Verbünden für die Anwendung in der Automobilindustrie hergestellt.

Es gibt sowohl für die Stapelprozesse als auch für die Wickelprozesse gute Argumente. Ein entscheidender Vorteil des Wickelns ist die höhere Prozessgeschwindigkeit. Jedoch kann durch das Stapeln der Bauraum innerhalb des Gehäuses besser ausgenutzt werden. Somit lässt sich die Energiedichte der Batteriezellen erhöhen. Aktuell wird durch verschiedene Entwicklungsansätze versucht, die Prozessgeschwindigkeit des Stapelns zu erhöhen. Ein Ansatz ist die Lamination von Separator und Elektrode, um diesen Verbund dann im Anschluss zu stapeln [Kwade2018b], siehe auch Technologiekapitel 6, S.99).

Die Umrüstung einer Produktionslinie von einem Zellformat auf ein anderes Zellformat ist mit großem Aufwand verbunden. Durch die Ähnlichkeit in Elektrodenfertigung und Zellfinalisierung (in einem gewissen Rahmen) können bestehende Anlagen größtenteils umgebaut werden. In der Zellassemblierung sind die Anlagen jedoch genau auf das Zellformat abgestimmt. Dementsprechend ist hier die Festlegung auf ein bestimmtes Format sinnvoll.

Jedes der genannten Zellformate ist in einer Vielzahl von Varianten mit verschiedenen Abmaßen erhältlich. Ziel ist die stets optimale Anpassung der Batteriezelle an den verfügbaren Bauraum und die Charakteristika des Batterie-systems. Die hohe Variantenvielfalt der Zellen muss in passenden Systemkonzepten adressiert werden.

Die **Energiedichte** ist einer der wichtigsten technischen Parameter der Batterie für Mobilitätsanwendungen. Es steht nur ein limitierter Bauraum zur Verfügung und das Gewicht des Fahrzeugs ist ausschlaggebend für den späteren Energieverbrauch. Allgemein wird zwischen volumetrischer und gravimetrischer Energiedichte unterschieden. Die volumetrische Energiedichte setzt die gespeicherte Energie in Relation zu dem benötigten Bauraum. Die gravimetrische Energiedichte hingegen setzt die gespeicherte Energie in Relation zu dem benötigten Gewicht.

Wesentlich für die mögliche Energiedichte auf Zellebene ist das gewählte Aktivmaterial, das inaktive Material sowie die Baumraumausnutzung. Aufgrund des geringen Gehäusegewichts haben die Rundzellen (zylindrische Zellen) und Pouchzellen theoretisch höhere Energiedichte als die prismatischen Zellen auf Zellebene. Mit dem Trend hin zu großformatigen prismatischen Zellen und Pouchzellen werden diese aber in naher Zukunft die gravimetrische Energiedichte von zylindrischen Zellen übertreffen können.

Den Pouchzellen kommt insbesondere das geringe Gewicht der Kunststoff-Aluminium Verbund-folie zugute. Die Gehäuse von prismatischen Zellen hingegen haben bei gleicher Größe ein höheres Gewicht. Da die Batteriezellen für Mobilitätsanwendungen in Batteriesysteme integriert werden, hat die Energiedichte auf Zellebene aber nur bedingt Aussagekraft [Löbberding2020].

Auf Systemebene wird die Energiedichte insbesondere durch die Packungsdichte der Batteriezellen sowie die Menge der übrigen Komponenten beeinflusst. Hier verlieren die zylindrischen Zellen durch die geringere Packungsdichte von zylindrischen Körpern einen Teil ihres Vorteiles gegenüber prismatischen Zellen und Pouchzellen [Löbberding2020].

Neben der Energiedichte spielen auch die mechanischen Eigenschaften der Zellformate eine Rolle. Die starren Blechgehäuse der zylindrischen und prismatischen Zellen sind aus mechanischer Perspektive vorteilhaft. Einerseits können die einzelnen Batteriezellen auf Systemebene auch mechanische Funktionen übernehmen, andererseits ist das Handling dieser Zellgehäuse auch einfacher. Bedingt durch deren Geometrie weisen die zylindrischen Zellen die höchste Steifigkeit auf.

Auch bei den zylindrischen Zellen ist ein Trend zu immer größeren Zellenabmessungen zu erkennen. In Relation zu den anderen Zellformaten sind zylindrische Zellen jedoch kleiner und haben einen geringeren Energiegehalt. Für ein vergleichbares Batteriesystem ist somit eine größere Anzahl an zylindrischen Zellen notwendig. Dies hat den Vorteil, dass eine zusätzliche Verspannung der Zellen in radialer Richtung nicht erforderlich ist. Die Volumenänderung im Betrieb von zylindrischen Zellen sind zu vernachlässigen [Warner2014]. Andererseits sind jedoch deutlich mehr Fügestellen auf Systemebene notwendig, wodurch die Montage erschwert wird.

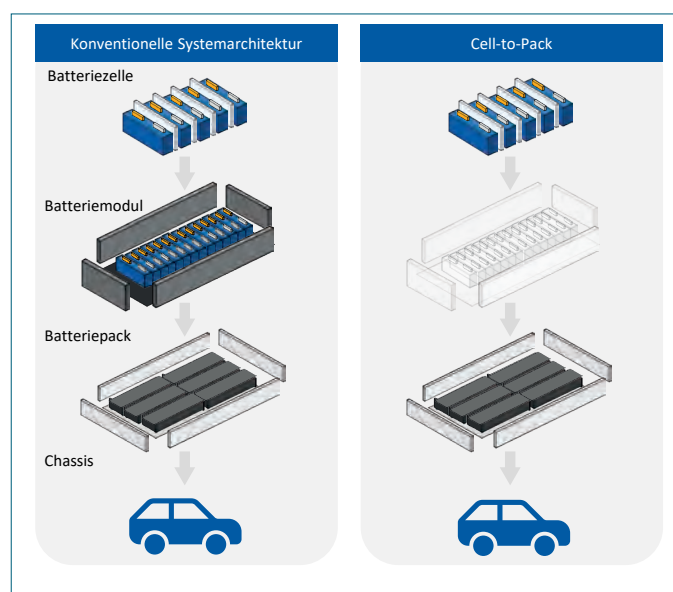
Bei den zylindrischen Zellen setzt sich in der Automobilindustrie zunehmend das 46xx-Format (46 mm Durchmesser, xx mm Höhe) durch. Tesla beispielsweise setzt zunehmend auf zylindrisch im Format 4680. Es ist zu erwarten, dass die kleineren 18650 (18 mm Durchmesser, 65 mm Höhe) und 21700 (21 mm Durchmesser, 70 mm Höhe) Formate von den größeren Zellen weitgehend verdrängt werden. Vorteile sind die höhere Energiedichte, der einfachere Montagevorgang und die geringeren Kosten. Mit einer weiteren Erhöhung des Durchmessers ist vorerst nicht zu rechnen, da die Packungsdichte und die Kühlung dies nicht zulassen.

Die prismatische Zelle eignet sich besonders gut aufgrund ihres Formats und ihrer Größe für die Fertigung von Modulen mit weniger Stützstruktur. Die Pouch-Zelle ist durch ihre Folienhülle weniger steif und muss deswegen mit Hilfe eines Kunststoffrahmens positioniert werden.

Alle Zellformate lassen sich prinzipiell durch geeignete Kühlsysteme temperieren. Die Unterschiede liegen vor allem im **notwendigen Kühlaufwand** und den Möglichkeiten, **Wärme ab und**

-zuzuleiten. In der Elektromobilität wird die größte thermische Belastung typischerweise durch das Schnellladen in die Zelle induziert. Ziel der Kühlung ist es, eine gleichmäßig niedrige Temperatur in der Zelle herzustellen. Die Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung hat einen großen Einfluss auf die Alterung der Zelle. Die Wärmeabfuhr erfolgt typischerweise durch eine Kühlflüssigkeit.

Bei der zylindrischen Zelle kann die Wärme, die bei Ladeprozessen insbesondere im Kern erzeugt wird, am besten über die Zylinderaußenfläche abgeleitet werden, wobei die Herstellung einer homogenen Temperaturverteilung durch die Geometrie eine Herausforderung ist. Durch die zylindrische Form und den Abstand der Zellen zueinander auf Systemebene wird vereinzelt eine Luftkühlung verwendet. Diese ist günstig, aber weniger performant.



Vergleich von Konventioneller Systemarchitektur und Cell-to-Pack Ansatz
Quelle: PEM der RWTH Aachen

Die Pouch-Zelle ermöglicht eine gute Wärmeableitung über die Stromableiter sowie die Seiten der Zelle und bietet damit die beste Kühlleistung, da die thermische Anbindung des Elektrodenmaterials an die Zellwände direkt erfolgt. Der Nachteil einer langen Kühlstrecke besteht beim prismatischen Zellformat, da diese in der Regel über den Boden gekühlt werden. Dies kann zu ungewünschten Temperaturgradienten im System führen, da die Zelloberseite recht weit von der Kühlfläche entfernt ist. Allerdings besitzen die Zellgehäuse eine gute Wärmeleitfähigkeit, die diesen Nachteil zum Teil ausgleichen können. Eine Kühlung zwischen den einzelnen prismatischen Zellen ist ebenfalls ein mögliches Kühlkonzept. Die immer weiter steigenden Ladeströme, welche zu einer höheren Wärmeentwicklung führen, bedingen performantere Kühlsysteme.

Die **Lebensdauer** kann über die Zellformate hinweg nur schwer verglichen werden. Diese hängt stark von der Zellchemie, den Einflüssen aus dem Fertigungsprozess und der Beanspruchung im Betrieb ab. Durch die sogenannte Alterung der Batteriezellen nimmt die Kapazität zur Speicherung von Energie ab. Allgemein wird zwischen der kalendarischen Alterung und der zyklischen Alterung der Zellen unterschieden. Eine Zelle hat das Ende der Lebensdauer erreicht, wenn die verbleibende Kapazität einen gewissen Prozentsatz der Anfangskapazität unterschreitet.

Neue Systemarchitekturen in der Automobilindustrie

Konventionell werden in der Automobilindustrie mehrere Batteriezellen zu einem Batteriemodul zusammengefasst. Neben den Zellen werden auch noch elektronische und mechanische Komponenten in das Batteriemodul integriert, welche für eine ordnungsgemäße Funktion notwendig sind. Mehrere Batteriemodule werden dann (mit weiterer Peripherie) in ein Batteriepack eingebaut, welches letztendlich in das Chassis integriert wird. (siehe Abb. auf Seite 35, linke Seite)

Diese modulare Systemarchitektur bietet einige Vorteile. Durch die Verwendung von standardisierten Modulen in verschiedenen Pack- und Fahrzeugvarianten können beispielsweise Komplexität, Entwicklungszeit und Kosten reduziert werden. Weiterhin können durch eine einheitliche Schnittstelle im Batteriepack Module mit unterschiedlichen Batteriezellen (z. B. Hersteller oder Zellformat) verbaut werden. Somit können Abhängigkeiten von einzelnen Zulieferern reduziert werden.

Ein Nachteil der modularen Bauweise ist die große Menge an Bauteilen, die damit verbundenen Fertigungskosten und die schlechte Bauraumausnutzung. Daher wird eine zunehmend integrale Systemarchitektur angestrebt. Insbesondere ist hier der *Cell-to-Pack* Ansatz zu nennen. (siehe Abb. auf S. 35, rechte Seite). Durch die direkte Integration der Batteriezellen in das Batteriepack lassen sich die gravimetrische und volumetrische Energiedichte auf Systemebene erhöhen. Zudem sind Kosteneinsparungen durch Bauteilreduktion möglich.

Bei aktuellen Batteriesystemen beanspruchen die Zellen etwa ein Drittel des Gesamtvolumens auf Systemebene. Der Gewichtsanteil der Zellen am Gesamtsystem beträgt bei Elektrofahrzeugen über 70 Prozent. Der Rest des Volumens und der Masse verteilt sich auf Totvolumen und weitere Komponenten wie das Batterie-Management-System, aber auch die Gehäusebauteile und das Kühlsystem.

Insgesamt zeigt sich in der Automobilindustrie ein Trend zur zunehmenden Verwendung von großformatigen Zellen, auch weil diese sich mit weniger Fertigungsaufwand zu einem Modul bzw. System produzieren lassen. Um die Ebene der Module überspringen zu können, müssen die Zellen so groß sein, dass sie sich in einer Verschaltung direkt zu einem Batteriesystem verknüpfen lassen und eine ausreichende Kapazität für die jeweilige Anwendung aufweisen. Eine sehr dicke Zelle wäre aufgrund der schlechten Wärmeabfuhr nachteilig, eine hohe Zelle kann die engen Bauraumanforderungen im Fahrzeug nicht erfüllen, weswegen es sinnvoll ist, eine von den Abmaßen längliche Zelle zu konstruieren.

Die Größe führt dazu, dass in einer einzelnen Zelle sehr viel Energie gespeichert ist, was das Gesamtrisiko im Falle eines Thermal Runaway der Zelle (thermisches Durchgehen in eine exotherme Reaktion) erhöht. Eine Möglichkeit dies zu umgehen, ist der Einsatz einer im Vergleich dazu sichereren Zellchemie wie zum Beispiel Lithium-Eisen-Phosphat, wobei eine niedrigere Energiedichte in Kauf genommen werden muss.

Aus einer Produktperspektive erscheint das Konzept größerer Zellformate schlüssig, aber es steigert die Anforderungen an die Fertigung der Zelle. Das Stapeln oder Wickeln von extrem langen Elektrodenverbünden und damit länglichen Zellen macht das Handling der Elektroden sheets sehr aufwändig, denn Positionierungsungenauigkeiten führen schneller zu sicherheits- oder qualitätskritischen Fehlern. Auch die gleichmäßige Verteilung des Elektrolyten in einer sehr großen Zelle steigert die Befülldauer und erfordert neue Befüllkonzepte. Letztlich ist es aus Qualitätssicherungsperspektive sehr viel teurer, einzelne großformatige Zellen, wie beim *Cell-to-Pack* Ansatz gefordert, beim End-of-Line-Test auszusortieren, da viel mehr Wertschöpfung als bei einer kleinen Zelle verloren geht. An der Tatsache, dass sich die Qualität einer Zelle erst ganz am Schluss des Fertigungsprozesses wirklich feststellen lässt, hat sich aktuell trotz fortschreitender Digitalisierung wenig geändert.

Es wird sich zeigen, ob die gesteigerten Anforderungen an den Zell-Produktionsprozess langfristig wirtschaftlich umzusetzen sind. Hier sind die Zellproduzenten auf innovative Lösungen des Maschinen- und Anlagenbaus angewiesen.

Produktanforderungen und Spezifikationen

Zentrale technische Performance-Parameter für elektrische Energiespeicher sind:

- Gravimetrische Energiedichte [Wh/kg] auch spezifische Energie genannt und volumetrische Energiedichte [Wh/l]
- Gravimetrische Leistungsdichte [W/kg] auch spezifische Leistung genannt und volumetrische Leistungsdichte [W/l] sowie die davon abgeleitete Schnellladefähigkeit
- Zyklische und kalendarische Lebensdauer
- Umgebungsbedingungen wie tolerierte Temperaturen in [°C] oder Vibrationen
- Sicherheit nach EUCAR-Level
- Kosten [€/kWh]
- Ökologischer Fußabdruck in Herstellung, Nutzung und Recycling [kg_CO2_eq/kWh]

Relevante Kriterien darüber hinaus sind die Spannungsstabilität während des Entladevorgangs oder der Integrationsaufwand in die Anwendung. Übergeordnet kommen zunehmend Spezifikationen wie die Umweltverträglichkeit der Produktion und die zu berücksichtigende kostengünstige, umweltfreundliche Entsorgung bzw. das wachsende Interesse an einem Re-Manufacturing an einem Recycling der Komponenten hinzu.

Zentrales Thema ist die Reduktion der Speicherkosten auf Systemebene. Diese kann u.a. durch eine Weiterentwicklung der Energiedichte auf Zellebene erreicht werden, was darüber hinaus die Reichweite von Elektrofahrzeugen erhöhen und die Wettbewerbsfähigkeit gegenüber den Verbrennungskraftmaschinen verbessern kann. Außerdem kann eine Veränderung der Zellchemie große Auswirkungen auf die Materialkosten und damit gleichzeitig auch Zellkosten haben.

Für Plug-in hybridelektrische Fahrzeuge (PHEV) und hybridelektrische Fahrzeuge (HEV) spielt im Besonderen die Leistungsdichte eine Rolle. Bei rein elektrischen Fahrzeugen (EV) haben sich in den letzten Jahren insbesondere die Anforderungen der Automobilhersteller (OEM) an die volumetrische Energiedichte stark erhöht, da die Maße für einen Einbau der Batterie im Fahrzeug in der Regel vorgegeben werden und die erreichbare Energiedichte auf Packebene entscheidend für die Reichweite ist. Heute verfügbare Elektrofahrzeuge besitzen Reichweiten von bis zu 700 km.

Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen deutlich, dass mit der Li-Ionen-Zelle eine geeignete Technologie für die Realisierung von Elektromobilität zur Verfügung steht, deren Potentiale noch nicht ausgeschöpft sind.

Performance-Parameter für Anwendungen der Elektromobilität

Die Entwicklung der Preise kleinformatiger Lithium-Ionen-Zellen, z.B. für Anwendungen der Konsumelektronik, zeigt, welches Optimierungspotential in den derzeitig verwendeten großformatigen Lithium-Ionen-Zellen für mobile Anwendungen steckt. Dies wird sowohl durch Materialinnovationen als auch durch Skaleneffekte in der Massenproduktion ermöglicht.

Lange Zeit wurden die höchsten Energiedichten in zylindrischen Zellen erreicht. Heute sind die in den drei Zellformaten pouch, prismatisch und zylindrisch erzielbaren gravimetrischen Energiedichten ähnlich und liegen für automotiv Zellen bei Maximalwerten von 240 (prismatisch) bis 300 Wh/kg (pouch). Zukünftig könnten Maximalwerte von deutlich über 300 Wh/kg erreicht werden.

Bei der **volumetrischen Energiedichte** dominiert nach wie vor die zylindrische Zelle. Der bereits vor mehr als 5 Jahren erreichte Wert von über 750 Wh/l stellt nach wie vor den Industriebenchmark dar. Zukünftig könnten mit der LIB Technologie noch bis über 900 Wh/l erreicht werden. Spitzenwerte für die prismatische und die Pouch-Zelle liegen aktuell bei über 650 Wh/l. Langfristig sind auch hier bis zu 800 Wh/l (prismatisch) und bis über 900 Wh/l (Pouch) denkbar.

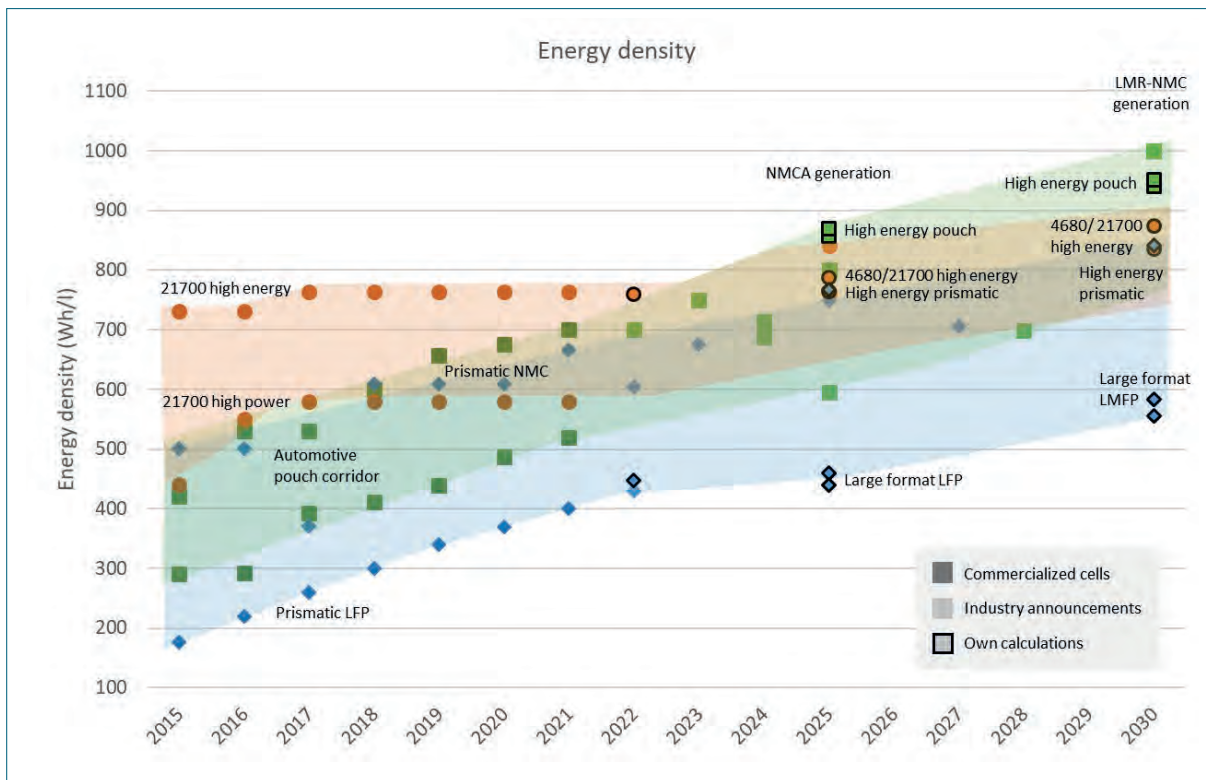
Im Vergleich zur Zellebene sinkt in modulbasierten Designs die volumetrische Energiedichte auf Modulebene um 20-22 Prozent bei der prismatischen Zelle, 30-50 Prozent bei der Pouch- und ca. 50 Prozent bei der zylindrischen Zelle. Viele der derzeitigen Entwicklungen im Automobilbereich zielen daher auf die effizientere Integration der Batteriezellen im Batteriepack ab. Dies kann durch den Verzicht auf die Modulebene oder die effizientere Anordnung von Kühlungs- und Sicherheitssystemen erreicht werden. In aktuellen cell to pack designs sinkt die gravimetrische Energiedichte auf Pack-Ebene gegenüber der Zelle um nur noch etwa 12 Prozent [FraunhoferISI2023c], die volumetrische Energiedichte um etwa 28 Prozent [FraunhoferISI2023d].

Die **Leistungsdichte** von Batterien ist für verschiedene Antriebsstränge unterschiedlich relevant. Im Gegensatz zu rein elektrischen Fahrzeugen, bei denen die volumetrische Energiedichte als auch eine hohe Leistung beim Laden die entscheidenden Kriterien darstellen, ist bei hybriden Antriebskonzepten eine hohe Leistungsabgabe der Lithium-Ionen-Zelle von besonderer Relevanz, um Beschleunigungsspitzen zu ermöglichen. Derzeit liegt die gravimetrische Leistungsdichte auf Packebene bei über 500 W/kg für EV und wenigen 1000 W/kg für HEV. Die gravimetrische Leistungsdichte der Lithium-Ionen-Zelle sollte bei einer Steigerung der restlichen Leistungsparameter mindestens auf dem

gleichen Niveau bleiben. Den **Umgebungsanforderungen** wird mit der Angabe der Leistungsdichte bei niedriger Temperatur von -20°C Rechnung getragen. Sie liegt etwa um den Faktor fünf unter der gravimetrischen Leistungsdichte bei Raumtemperatur des jeweiligen Elektrofahrzeug-Typs.

Die **kalendarische Lebensdauer** variiert bei allen Elektrofahrzeug-Typen, da sie von der Beanspruchung der Batterie abhängt. Herstellergarantien für EV besitzen heute einen typischen Umfang von über 10 Jahren und km-Leistungen von über 150.000 km. Um die Nutzungsdauer heutiger Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor zu erreichen, welche sich häufig über mehrere Phasen von Erstzulassung bis über Gebrauchtmärkte erstreckt, müssen Lebensdauern von 15 bis 20 Jahren realisiert werden. In diesem Zeitraum können km-Leistungen von mehreren 100.000 km anfallen, inwiefern diese mit einer Batterie erreichbar sind, ist heute noch unklar. Großen Einfluss auf die Lebensdauer hat die Ladeleistung. Schnellladung kann die Degradation beschleunigen. Einen weiteren großen Einflussfaktor stellt das Fahr- und Ladeprofil der Fahrzeugbatterien dar. So kann gemäß einer typischen Nutzung davon ausgegangen werden, dass insbesondere EV Batterien nur bei seltenen langen Fahrten vollständig entladen werden. Die Batterienutzung im Teilzyklusbetrieb führt zu geringer Degradation, sodass auch hohe km-Leistungen mit über 1000 Vollzyklusäquivalenten der Batterie über die Lebensdauer abgedeckt werden können.

Anders kann es sich bei Hybridfahrzeugen mit deutlich höheren Zyklen und ggf. höherer Entladetiefe verhalten. Entsprechende Batterien besitzen Lebensdauern von mehreren 1000 Zyklen. Auch in kommerziellen BEV Anwendungen wie z.B. LKW können mehrere 1000 Zyklen gefordert sein.



Entwicklung der volumetrischen Energiedichte von LIB-Zellen nach Zellformaten [Link2022]

Mit der zunehmender Schnellladefähigkeit steigen die Belastungen für die Zelle. Hierbei ergeben sich bei BEV bis 800 W/kg, bei PHEV und HEV teilweise noch mehr.

Für die Einschätzung der **Sicherheit** wird auf Batteriesystemebene und auf Zellebene das EUCAR-Level herangezogen. Für ein Sicherheitsniveau von „EUCAR≤4“ muss die Zelle bruch-sicher, brandsicher und explosions-sicher sein.

Akzeptabel ist auf diesem Level ein Gewichtsverlust bzw. das Auslaufen des Elektrolyten (bzw. Lösungsmittel und Salz) von mehr als 50 Prozent, sowie die sogenannte Entgasung (engl. „venting“). Dieser essenzielle Sicherheitsstandard kann durch die Zellchemie, beispielsweise durch die Verwendung sicherer Elektrolyte oder sogenannter „Shutdown“-Separatoren erreicht werden. Letztere verhindern bei Überhitzung der Zelle einen weiteren Ionentransport.

Neben der Zellchemie spielt das Design der Li-Ionen-Zelle sowie der Batteriemodule und -packs eine wichtige Rolle. Auf der Zellebene verhindern Sicherheitsventile einen überhöhten Zellinnendruck und so eine Explosion der Zelle. Auf Batteriemodulebene kann, um ein Überhitzen der Zelle zu vermeiden, der Stromkreislauf durch Thermosicherungen unterbrochen werden. Die mechanische Stabilität der Zelle wird konstruktiv durch die einzelnen Gehäuse hergestellt [Balakrishnan2006]. Relevante Sicherheitsnormen auf Zell- oder Packebene werden z.B. durch die UL1642, UN38.3 oder den neuen chinesischen Standard GB38031 abgedeckt.

Performance-Parameter für stationäre Anwendungen

Die stationären Energiespeicher können im Vergleich zu mobilen Energiespeichern durch eine größere Auswahl von Speichertechnologien abgedeckt werden. Stationäre Speicher werden sowohl dezentral, z.B. als Solar-Heimspeicher mit < 10 kWh, als auch zentral mit Speichergrößen im Gigawattstundenbereich eingesetzt [Thielmann2015c]. Es ist deshalb selbst innerhalb eines bestimmten Segmentes wichtig zu wissen, um welche spezifische Anwendung es sich handelt. Eine grobe Eingruppierung kann anhand des Anwendungsgebietes als Energie- oder Leistungsspeicher erfolgen [Kaschub2017].

Leistungsspeicher, die kurzfristig hohe Ströme abgeben und aufnehmen müssen, stellen besonders hohe Kriterien an die zyklische Lebensdauer, während Energiespeicher, die über große Speichermengen verfügen, eine hohe kalendarische Lebensdauer benötigen.

Üblicherweise wird für beide Speicherarten davon ausgegangen, dass die Anforderungen an die Kosten hoch sind, welche bei gesamtwirtschaftlichen Berechnungen über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu betrachten sind. Die Höhe von Investition und Betriebskosten wird wesentlich durch die Erfüllung der Anforderungen an die Lebensdauer beeinflusst. Auch der Wirkungsgrad eines Energiespeichersystems spielt eine große Rolle, da die zwischengespeicherte Energie möglichst verlustfrei in das Stromnetz zurückgespeist werden soll, um eine nachhaltige Energieversorgung zu realisieren.

Maßgebliche Anwendungsfälle der stationären Energiespeicherung sind die dezentralen PV-Batteriesysteme, das Peak Shaving, die Direktvermarktung erneuerbarer Energien, die

Bereitstellung von Regelleistung sowie das sogenannte „Multi purpose“-Design. Der Stand der Technik für die Referenztechnologie und deren Einsatzbereich ist hinsichtlich der eingesetzten Speicherlösung umfassend in der Roadmap von Thielmann et al. dokumentiert worden [Thielmann2015c].

Aufgrund der weiteren Kostenreduktion gewinnen die für mobile Anwendungen optimierten Lithium-Ionen-Zellen auch für den stationären Bereich an Attraktivität. Sofern die Leistungsparameter den jeweiligen Anforderungen der stationären Anwendungen grundsätzlich genügen, werden diese auch dort eingesetzt. Oft können diese jedoch nur durch eine gewisse Überdimensionierung erfüllt werden. Einen zweiten Anwendungsfall für BEV Zellen und Module stellen „Second-Use“-Konzepte dar [Fischhaber2016].

Anforderungen der Batteriehersteller

Produktanforderungen und daraus abgeleitet Performance-Parameter für Hochenergie- und Hochleistungsanwendungen sind in vorhandenen Quellen dokumentiert und in den Roadmapping Prozess eingeflossen. Detaillierte Spezifikationen der Batteriehersteller an die Produktionstechnik unterliegen häufig NDAs und sind nur bedingt zugänglich. Die Kundensicht und deren Anforderungen an den Maschinen- und Anlagenbau wurden durch Einbindung von Batterieherstellern sowie der Automobilindustrie sichergestellt. Ebenfalls wichtigen Input für die Roadmap liefert der inhaltliche Dialog auf internationalen Veranstaltungen.

Bereich Zellproduktion

Die Kosteneffizienz in der Zellproduktion ist eine der Hauptforderungen der Batteriehersteller und ihrer Kunden. Möglichkeiten der Maschinen- und Anlagenbauer, eine Kostendegression zu erzielen, werden im folgenden Kapitel beschrieben. Dabei müssen die hohen Qualitätsstandards für stationäre und mobile Anwendungen eingehalten werden. Voraussetzungen sind die Stabilisierung von Produktionsprozessen und das Vermeiden von Overengineering durch eine optimale Anpassung der Maschinen auf den entsprechenden Anwendungsfall.

Gerade für den europäischen Standort rückt die Entwicklung nachhaltiger, energieeffizienter und qualitativ hochwertiger Prozesse in den Fokus, welche beispielsweise durch die Reduktion von Lösungsmittelanteilen und die Weiterentwicklung des Trocknungsprozesses oder der Formierung sowie der Digitalisierung der Prozesssteuerung verbessert werden können. Die Entwicklung sogenannter „Micro-Environments“ soll Energieverbrauch und Betriebskosten der Rein- und Trockenräume senken. Ein weiterer Kundenwunsch ist eine hohe Fertigungspräzision. So können durch einen höheren Überwachungs- und Automatisierungsgrad Ausschüsse und Kosten reduziert werden. Zuletzt tragen höhere Energiedichten oder größere Zellformate dazu bei, die Herstellkosten pro Kilowattstunde weiter zu senken.

Einen ebenso wichtigen Aspekt stellt die Sicherheit der Batterien dar. In der Zellfertigung wird diese durch hohe Qualitätsstandards garantiert. Neben der End-of-Line Prüfung und zertifizierten, standardisierten Prüfkriterien kann die Optimierung der Produkt- und Anlagenhygiene dazu beitragen, die Sicherheit der Produktion zu erhöhen.

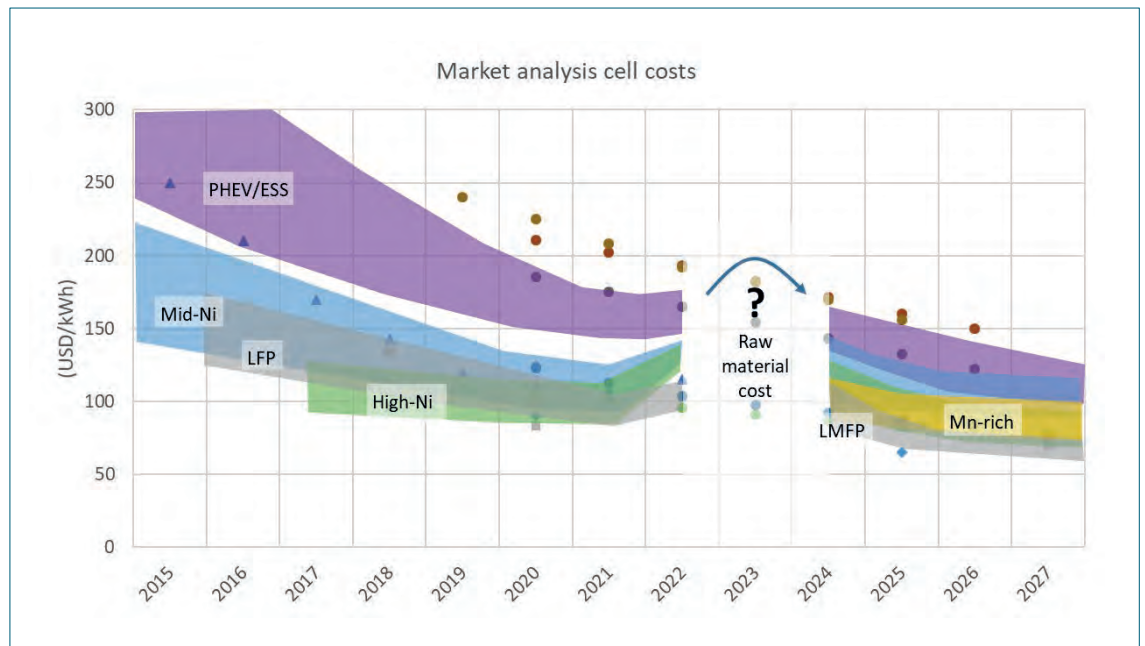
Die großen Optimierungspotenziale durch die Automatisierung und Digitalisierung von Fabriken sind bei den Herstellern bekannt und werden zunehmend nachgefragt (Industrie 4.0).

Bereich Modul- und Packproduktion

Im Bereich der Modul- und Packfertigung ist die Erhöhung der Produktionskapazität zentrales Thema. Zeitgleich steigen die Anforderungen an die Flexibilität der Fertigungslinie, z.B. durch die Kompatibilität zu mehreren Zellformaten. Insbesondere aus der Schnellladefähigkeit ergeben sich hohe Anforderungen an die Zellkontaktierung, da hohe Ströme beherrschbar sein müssen.

Die Recyclingfähigkeit der Batterie ist eine weitere Anforderung. Gesetzliche Vorgaben und das Fehlen von Primärquellen der entscheidenden Rohmaterialien in Deutschland und Europa verschärfen die Forderung nach einer möglichst vollständigen Rückgewinnung der Materialien. Es werden Demontagetechnologien verlangt und nach Möglichkeiten einer Instandsetzung oder der Initiierung von Batterieservice-Einrichtungen gesucht [CEID2020].

Zuletzt soll die Batterie durch Einführung des „Battery-Passports“ zu einem „Smart Product“ werden. Dies sind Produkte, die Daten über ihren eigenen Herstellprozess sammeln und diese anschließend in weiteren Verarbeitungsschritten weitergeben können. So sollen schließlich auch Geschäftsmodelle basierend auf einer Datenanalyse entwickelt werden können. Die Maschinen- und Anlagenbauer müssen dazu Möglichkeiten vorsehen, wie Daten über den Produktionsprozess mit dem Produkt kommuniziert werden können.



Historische Entwicklung und Prognose der Kostenentwicklung Batteriezelle in US-Dollar pro kWh
Quelle: Fraunhofer ISI

Kostenstruktur und Kostenentwicklung von LIB-Zellen

Die größten Kostenfaktoren für die Herstellung von LIB sind einerseits die Materialkosten, z.B. für Aktivmaterialien aber auch Stromableiter, Elektrolyte und andere und andererseits mit der Fertigung verbundene Kosten wie Energie, Personalkosten und Abschreibungen auf die Fertigungsinfrastruktur. Viele dieser Kostenkomponenten werden sowohl durch Standortfaktoren als auch durch die Fertigungsskala, d.h. das Volumen der Produktion pro Standort, beeinflusst.

Historische Kostenentwicklung

Eine Meta-Literaturanalyse aus Marktstudien unterschiedlicher Anbieter¹⁷ hilft die aktuellen sowie die sich künftig ändernden Kosten von LIB-Zellen besser zu erfassen und deren Reduktionspotenziale zu verstehen (siehe Abb. auf dieser Seite). Verschiedene Analysten veröffentlichen dazu Preisangaben, die sich z.B. auf typische oder führende Automotive Zellen und Packs beziehen.

Bis etwa zum Jahr 2021 konnte eine kontinuierliche Reduktion von Kosten beobachtet werden. Wesentlicher Treiber hierzu waren insbesondere die Erzeugung von Skaleneffekten und eine deutliche Steigerung der Kosteneffizienz in der Produktion. Dies konnte erreicht werden, da aufgrund der wachsenden Nachfrage nun ganze Linien oder Zellfabriken mit der Produktion einer einzigen Zelltechnologie ausgelastet werden konnten und somit Volumeneffekte beim Materialeinkauf, der Prozesstechnik und Prozessqualität gehoben wurden. Zudem konnte insbesondere durch den Übergang zu Co-armen Materialien eine Kostenreduktion beim Kathodenmaterial erreicht werden. Auch andere Komponenten wie die Separatorfolie oder Zellgehäuse haben sich durch den Masseneinsatz vergünstigt.

Seit 2021 sind die Kosten für LIB-Zellen wieder am Steigen, obwohl die globale Produktion nach wie vor wächst und somit weitere Skaleneffekte zu erwarten gewesen wären. Neben insgesamt steigenden Energiekosten, welche sich auch auf die LIB Fertigung auswirken, hat das starke

¹⁷ insbes. BNEF, B3 Corporation, Yole 2020-2022

Nachfragewachstum jedoch zu einer Verknappung und damit Verteuerung von Batterierohstoffen geführt. An den Spotmärkten hat sich der Preis, z.B. für Li-Carbonat, seit Anfang 2021 fast verachtfacht (Stand Anfang 2023). Zum Teil konnten diese Preiserhöhungen durch den

Übergang zu weniger Rohstoffkritischen Materialien wie LFP kompensiert werden. Insgesamt schlagen sich jedoch die hohen Spotmarktpreise auch immer stärker auf reale Lieferkonditionen für die Material- und Zellhersteller durch.

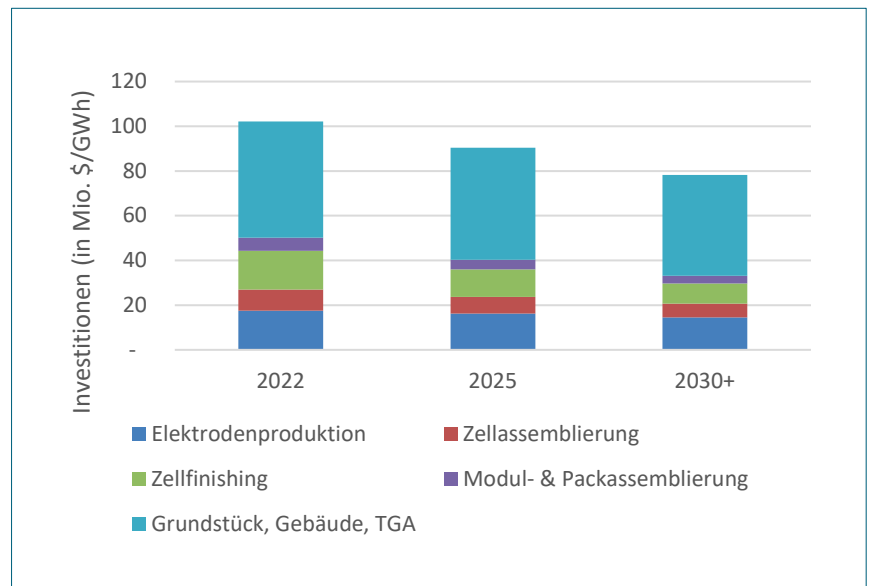
Im letzten Jahr wurde besonders deutlich, wie stark die langfristige Entwicklung von LIB Kosten an Rohstoffe und Energie gekoppelt ist. Grund dafür ist der hohe preisliche Anteil der Rohmaterialien (insbesondere kathodenseitig) an den Gesamtkosten einer Zelle. Es muss daher von einer weiterhin schwankenden Kostenstruktur bei LIB ausgegangen werden. Technologische Ansatzpunkte für eine weitere Reduktion der Kosten bestehen insbesondere in der Entwicklung noch rohstoffeffizienterer Materialien (z.B. g_{Li} pro kWh) und energieeffizienterer Fertigungsverfahren, wie sie im Rahmen dieser Studie diskutiert werden.

Die im Kontext der Zellfertigung anfallenden Kosten wie F&E, Vertriebsgemeinkosten (SG&A), Garantie, etc. lassen sich durch entsprechende Skaleneffekte in der Volumenproduktion reduzieren.

Bestimmten Faktoren, die mit jeweils etwa 3-5 Prozent zu den Zellkosten beitragen, zeigen noch höhere Kostenreduktionspotenziale. Diese können mit Prozessoptimierung und Automatisierung in Verbindung gebracht werden, wie

der Qualitätsprüfung und Kontrolle zur Reduktion des Ausschusses und der benötigten Fachkräfte (bei gegebener Fabrikgröße). Darüber hinaus können Prozessinnovationen mit Relevanz für den Anlageninvest zur Kostensenkung beitragen.

Derzeit liegen die notwendigen Investitionen zur Errichtung einer Batterieproduktion in etwa bei 100 Mio. USD/GWh (Abb. S. 45). Dabei entfallen in etwa die Hälfte auf die notwendigen Produktionsanlagen und die andere Hälfte auf den Erwerb des Grundstückes, den Bau des Gebäudes sowie die Errichtung der kompletten Produktionsinfrastruktur. Bei den Produktionsanlagen fallen insbesondere hohe Investitionen bei der Elektrodenproduktion und dem Zellfinishing an. Die Investitionen je GWh dürften auch zukünftig weiter zurückgehen und um das Jahr 2025 bei etwa 90 Mio. USD/GWh und 2030 bei unter 80 Mio. USD/GWh liegen. Dabei handelt es sich jedoch nur um Richtwerte, da die tatsächlichen Kosten stark von der jeweiligen Zelltechnologie und Produktionsmenge abhängen. Nichtsdestotrotz dürfte der Rückgang bei den Produktionsanlagen stärker ausfallen als bei dem Posten „Grundstück, Gebäude und TGA“. Dies ist insbesondere der im Vergleich zum Gebäude stärkeren Abhängigkeit der Produktionsanlagen von Skaleneffekten oder Änderungen bei der produzierten Zelltechnologie geschuldet. Weiterhin lässt sich erkennen, dass innerhalb der Produktionsanlagen der Rückgang auf Seiten des Zellfinishings (von 17 auf 9 Mio. USD/GWh) und der Zellassemblierung (von 9 auf 6 Mio. USD/GWh) stärker wirkt als etwa bei der Elektrodenproduktion (von 18 auf 15 Mio. USD/GWh). Der Grund hierfür liegt darin, dass es sich bei der Zellassemblierung und dem



Prognose der Kostenanteile für Erstinvestitionen in Zellproduktionsinfrastruktur, Investitionen in Produktionsanlagen in Mio. €/GWh, Quelle: Fraunhofer ISI

Zellfinishing überwiegend um Einzelprozesse und nicht um Fließprozesse handelt, die überproportional von einer Verbesserung auf Seiten der Zellchemie oder -technologie profitieren. In Summe dürften sich die benötigten Investitionen für Produktionsanlagen von derzeit ungefähr 50 Mio. USD/GWh um etwa ein weiteres Drittel reduzieren.¹⁸

Im Folgenden wird vertieft auf die wichtigsten Kostenkomponenten eingegangen: die Material- sowie die Produktionskosten. Neben der „Top-Down“ Analyse aus Meta-Marktdaten werden „Bottom-up“ die identifizierten Kostenfaktoren bewertet und plausibilisiert.

Materialkosten

In LIB-Zellen machen die Kathodenaktivmaterialien den größten Kostenfaktor unter den Materialkosten aus [B3 2019; Schmuck 2018]. Angefangen vom Abbau der Metallerze, über deren Aufreinigung und Abscheidung als Metallsalze, z.B. als Sulfate oder Carbonate, sind verschiedene stoff- und energieintensive Verfahrensschritte notwendig. Die Herstellung der

eigentlichen Aktivmaterialien in „Batteriequalität“ erfolgt in industriellem Maßstab über Hochtemperaturverfahren.

Durch diese Prozesskette liegen die Kosten für die fertigen Aktivmaterialien deutlich über den reinen Metallpreisen. Die Rohstoffpreise verhalten sich mitunter sehr volatil. Seit etwa 2021 haben die Preise für Lithium-hydroxid, -carbonat sowie Nickel- und Kobalt-sulfat deutlich zugelegt. Die Preissteigerungen bei den Lithium-Salzen von bis zu 800 Prozent sind beispiellos und haben insgesamt zu einer Verteuerung der Batteriematerialien geführt.

Durch den Trend hin zu Nickel-reichen Materialien konnte der Einfluss der Kobalt-Preisentwicklung auf die Materialkosten bereits deutlich reduziert werden. Diese hängen nun jedoch umso mehr vom Nickel-Preis ab. Perspektivisch ist durch den Übergang zu noch Nickel-reicheren Materialien jenseits NMC 811 keine weitere Kostenersparnis zu erwarten, da mit der Reduktion des teuren Kobalts auch weniger Mangan verwendet wird, welches einer der günstigeren Bestandteile ist.

¹⁸ Annahmen für die Berechnung auf Basis der Durchschnittsgrößen von Batteriefabriken: 8 GWh (2022), 15

GWh (2025) und 25 GWh (2030). Zudem wurde eine stetige Verbesserung der Zellchemie unterstellt.

Eine signifikante Reduktion der Kathodenkosten wird von vielen OEM durch die Nutzung von anderen Materialien wie LFP (Lithium-Eisen-phosphat) oder Mangan-basierten Verbindungen angestrebt. Auch in diesen Materialklassen

ist der Einfluss der Lithium-Kosten signifikant, jedoch können durch den Verzicht auf Kobalt und die Reduktion von Nickel im Vergleich zu NMC deutlich geringere Kosten auf Zellebene erzielt werden.

Das häufigste Material für den Einsatz als Anode ist nach wie vor Graphit. Für BEV Zellen werden oftmals synthetische Graphite eingesetzt. Natürliches Graphit ist günstig zu gewinnen, jedoch fallen durch die nachgelagerten Schritte zusätzliche Kosten an. Die synthetische Herstellung bietet von vornherein eine gute Kontrolle der Materialparameter. Heute sind geeignete Graphite aus beiden Verfahren etwa für 10 \$/kWh verfügbar.

Aus derzeitiger Sicht ist noch unklar, welchen Einfluss der Übergang auf Silizium-basierte Anoden auf die Materialkosten haben wird. Vergleichbare Kosten zu Graphit von einigen \$/kWh sind aber denkbar.

Die Stromableiterfolien in Li-Ionen-Zellen haben typische Dicken von wenigen μm und werden meist mittels galvanotechnischen Verfahren hergestellt. Der Metallpreis für 8 μm starke Kupfer-Folie (Anode) liegt bei etwa 0,5 \$/m², der Folienpreis kann mehr als das Doppelte betragen. Bei der kathodenseitig verwendeten Aluminium-Folie ist das Verhältnis aus Folien- zu Metallpreis sogar noch höher. Durch den Trend zu immer dünneren Stromableiterfolien sinken zwar die Metallkosten pro m², der Herstellungs- und Handhabungsaufwand steigt jedoch, sodass insgesamt keine großen Kostenreduktionspotenziale zu erwarten sind. Lediglich durch den Verzicht auf zusätzliche Leit-Tabs, welche die Kontaktierung der Elektroden nach außen rea-

lisieren, könnten in zukünftigen Zelldesigns Aufwände reduziert werden.

Bei der Herstellung organischer Elektrolyte bestehen sehr hohe Anforderungen an Material- und Umgebungsreinheit. Insgesamt übersteigen die Kosten für Elektrolyte die Preise des enthaltenen Li-Metalls deutlich und liegen je nach Zusammensetzung bei etwa 20 \$/kg.

Separatoren können heute sehr günstig hergestellt werden. Die Hauptkomponente ist eine grundsätzlich in der Herstellung günstige Polypropylen- oder Polyethylenfolie. Durch die zusätzliche Beschichtung mit keramischen Nanopartikeln, werden die Sicherheitseigenschaften verbessert.

Die Kosten für weitere Komponenten wie Gehäuse und Deckel sind im Wesentlichen abhängig vom gewählten Herstellungsprozess. Sie machen durch den Einsatz von industriellen Verfahren schon heute weniger als 5 Prozent der Materialkosten auf Zellebene aus.

Die Materialkosten und in letzter Konsequenz die Rohstoff- und Energiekosten bilden eine untere Grenze für die zukünftige Kostenentwicklung von LIB. Vor diesem Hintergrund sind insbesondere Preisprognosen, welche sich lediglich auf die Fortschreibung in der Vergangenheit erreichter Kostensenkungen stützen, mit Vorsicht zu genießen. Die kosteneffizientesten Hochenergiebatteriezellen (z.B. LFP Basis) können heute mit Materialkosten von etwa 80 \$/kWh hergestellt werden. Die Weiterentwicklung dieser Kosten hängen im Wesentlichen von der zukünftigen Entwicklung von Rohstoff- und Energiekosten ab. Bleiben diese auf hohem Niveau, so könnten (vergleichbar zur Photovoltaikbranche) zukünftig andere Batterietechnologien (z.B. Natrium-Ionen) in den Vordergrund treten [VDMA-PV2018].

Produktionskosten

Die Produktionskosten stellen derzeit nach den Materialkosten den zweitgrößten Kostenblock bei der LIB-Zellherstellung dar. In Form der Abschreibungen werden die zu tätigenden Investitionen für Maschinen und Anlagen auf deren Nutzungsdauer (üblicherweise zw. 4-8 Jahre) umgelegt. Bislang liegt der Anteil der Abschreibungen für Maschinen- und Anlagen in etwa zwischen 10 und 20 Prozent der Zellkosten. Der genaue Anteil ist jedoch u.a. stark abhängig von dem jeweilig betrachteten Zellformat, der Zellchemie und der Fabrikgröße, also Skaleneffekten. Die Kostendegression stellt daher einen Haupttreiber für die derzeitige Tendenz hin zur Errichtung möglichst großer Zellproduktionen im Sinne von *Gigafactories* dar.

Die „Economies of scale“, also die sogenannten Skaleneffekte sind auch formatübergreifend einer der wichtigsten Hebel zur Reduktion der Produktionskosten. Die Skaleneffekte beschränken sich dabei nicht allein auf die Investitionen in Produktionsanlagen, sondern betreffen ebenso Lohnkosten, F&E-Tätigkeiten oder allgemeine Verwaltungsaktivitäten (SG&A), machen sich dort jedoch mitunter am stärksten bemerkbar.

Weitere Treiber für die formatübergreifende signifikante Reduktion der Produktionskosten und der damit verbundenen notwendigen Investitionen in Produktionsanlagen sind neben den Skaleneffekten auch Prozessinnovationen und Materials substitutionen. Im Falle von Prozessinnovationen führen ein schnellerer Durchsatz, geringe Energiekosten oder eine Verringerung des Ausschusses zu einer Steigerung der Produktionskapazität.

Durch Materials substitutionen, die zu Zellen mit höheren Energiedichten führen, können mit gleichbleibender Anlagentechnik und -anzahl höhere Outputs an Batteriekapazität erzielt werden. Zudem erhöhen sich die durchschnittlichen Batteriekapazitäten (in kWh) der Fahrzeugbatterien stetig, ebenso wie die spezifische Energiedichte der Batterien (in kWh/kg oder Wh/l).

Wie sich unter diesen Rahmenbedingungen die Skaleneffekte auf die spez. Investitionen für Produktionsanlagen auswirken, ist in der Abb. S.45 (unter Berücksichtigung steigender Batteriekapazitäten und sich ändernder Zellchemien) dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die spezifischen Investitionen von ca. 50 Mio. €/GWh im Laufe der Zeit um ca. 30-35 Prozent verringern dürften. Die Betrachtung der spez. Investitionen in Anlagen zur Zellherstellung sowie zur Modul- & Packherstellung zeigt, dass die Investitionen in Maschinen- und Anlagen zur Zellherstellung mit mehr als 85 Prozent den größten Anteil ausmachen.

Die Zellfertigung lässt sich unterteilen in die Bereiche der Elektrodenfertigung, der Zellaassemblierung und des Zellfinishings. Während die Elektrodenfertigung noch stark geprägt ist von kontinuierlichen Produktionsprozessen, wie z.B. dem Beschichten oder Kalandrieren, finden bei der Zellaassemblierung und dem Zellfinishing überwiegend Einzelprozesse statt. Bei einer Betrachtung der Investitionen auf dieser Prozessebene zeigt sich für das Jahr 2020, dass insbesondere im Bereich des Zellfinishings (ca. 35-40 Prozent) und der Elektrodenfertigung (ca. 35-40 Prozent) die höchsten Investitionen pro GWh anfallen. Dieser Anteil wird über die kommenden Jahre jedoch nicht konstant bleiben.

Der Trend hin zu größeren Batteriekapazitäten, lässt sich prinzipiell über zwei Wege realisieren: Über eine Erhöhung der Zellanzahl im Batteriesystem oder über die Verwendung von Batteriezellen mit höheren Energiedichten bei gleichbleibender Zellanzahl. Da der Bauraum in Fahrzeugen limitiert ist, wird vermutlich überwiegend die zweite Option (zumindest im Fahrzeugbereich) die größte Anwendung finden.

Unterstellt man somit eine höhere Energiedichte¹⁹ bei gleichbleibender Zellanzahl, könnte sich der spezifische Anteil der Elektrodenfertigung zukünftig von 35 auf 45 Prozent erhöhen, während sich der für die Zellassemblierung und das Zellfinishing reduziert. Durch den Trend zu großformatigen Zellen könnte dieser Effekt jedoch ausgeglichen werden.

Zusammenfassend lässt sich für die Produktionskosten festhalten, dass diese sowohl stark von den Abschreibungen für Maschinen und Anlagen als auch von den Energiekosten abhängen. Haupttreiber für sinkende Investitionskosten sind Innovationen auf Produkt- und Prozessebene sowie insbesondere die Realisierung von Skaleneffekten. Dabei liegen die Investitionen für die Zellfertigung deutlich über denen für die Modul- und Packherstellung. Auf Prozessebene

zeigt sich, dass derzeit die höchsten spezifischen Investitionen im Bereich der Elektrodenfertigung und des Zellfinishings anfallen. Die hohe Nachfrage nach Fertigungsequipment und die allgemeine Steigerung von Energie- und Materialkosten insbesondere im Jahr 2022 haben trotz kontinuierlicher Prozessinnovationen zu steigenden Investitionen für Anlagen geführt. Eine zukünftige Reduktion, die wieder dem historischen Trend folgt, ist nur bei Angleichung von Angebot und Nachfrage und sich abschwächender Inflation wahrscheinlich.

Sowohl die Höhe wie auch der relative Anteil der spezifischen Investitionen eines kompletten PHEV- Batteriesystems sind stark von dem zu fertigenden Produkt abhängig. Bei der Produktion eines PHEV- Batteriesystems dürfte z.B. die spez. Investitionen je GWh im Bereich der Zellassemblierung und des Zellfinishings aufgrund der größeren Anzahl an Einzelprozessschritten höher liegen als für eine BEV-Batteriesystem mit einer hohen Energiedichte. Ebenso dürfte die prozentuale Verteilung bei zukünftigen Zelltechnologien mit einer etwas abweichenden Produktionsstruktur wie z.B. Feststoffbatterien nochmals abweichen. Somit sind die Ergebnisse solcher Betrachtungen immer vor dem Hintergrund des zu fertigenden Produktes zu interpretieren.

¹⁹ aufgrund der Verwendung von besseren Materialien bei einer gleichbleibenden Schichtdicke, so dass bei

gleichbleibender Beschichtungskapazität die Anzahl der Zellen je kWh reduziert werden kann

Lösungsangebote des Maschinen- und Anlagenbaus

Kostendegression

Aus zahlreichen anderen Industrien, wie die der Halbleiter oder Photovoltaik, ist bekannt, dass steigende Stückzahlen zu einer prozessseitigen Kostendegression durch entsprechende Lerneffekte führen. Stellschrauben können technische Innovationen, bessere Ausbeuten, der *Economy of Scale*, ein höherer Automatisierungsgrad und Kenntnisse bei den Prozess-Qualität-Zusammenhängen sein. Dies gilt sowohl für die Elektrodenproduktion, als auch für die Modul- und Packfertigung. Im Folgenden wird auf diese Punkte näher eingegangen. Die Energie- und Ressourceneffizienz, die ebenfalls signifikanten Einfluss auf die Kostenreduzierung hat, wird unter dem Punkt Nachhaltigkeit betrachtet.

Bessere Ausbeuten

Aufgrund des hohen Materialkostenanteils an der Zelle von heute bis zu 70 Prozent ist die Erhöhung der Ausbeute entscheidend, um die Wettbewerbsfähigkeit zu stärken [Heimes2019, Kwade 2018b]. Eine Geschwindigkeitssteigerung darf die Ausbeute nicht verringern. Der Vorteil der Durchsaterhöhung wäre sonst hinfällig.

Die Ausbeute in der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen kann in gut eingefahrenen Fabriken ca. 90 Prozent betragen. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Aubeute oft geringer ausfällt und während des Anfahrens einer Fabrik sogar 50 bis 70 Prozent betragen kann. Da sich der Ausschuss eines jeden einzelnen Prozessschrittes multipliziert, steht deren Anzahl in direktem Zusammenhang mit der Gesamtausbeute. Eine Kostenminderung kann durch die Reduzierung bzw. Integration in vor- oder nachgelagerte Produktionsschritten erzielt werden.

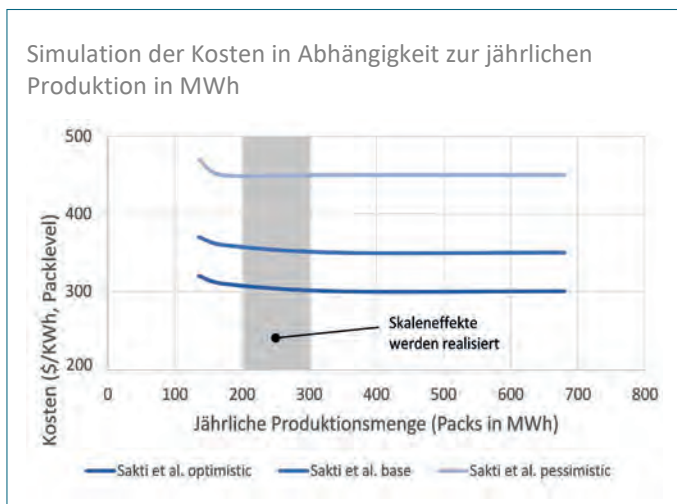
Ursachen für eine reduzierte Ausbeute können instabile, nicht robuste Produktionsprozesse und die daraus resultierenden Produktabweichungen

bzw. -fehler sein (z.B. Randüberhöhungen, Positionierungsfehler, Fremdpartikel). Eine Weiterentwicklung und Optimierung der Produktionsprozesse – wie sie in den *Red Brick Walls* beschrieben werden – kann maßgeblich dazu beitragen, die Ausbeute zu erhöhen.

Darüber hinaus ist die frühzeitige Erkennung von Qualitätsminderungen in den Zwischenprodukten der Elektrodenfertigung entscheidend. Dies ist der Fall, wenn eine defekte Elektrode oder ein defektes Modul Inline im Prozess – z.B. durch eine geeignete Kameratechnik – erkannt und aus dem Produktionsprozess ausgeschleust wird. Die Überwachung der Zwischenprodukteigenschaften und damit eine Bewertung der Prozessvarianzen und -sicherheit mithilfe von Inline-Messtechnik kann an ausgewählten Stellen durch sogenannte „Quality Gates“ erfolgen.

Der erzielbare Vorteil durch die Verwendung von Inline-Messtechnik muss für jedes System vor dem Hintergrund der Auflösung des Qualitätssignals, der damit einhergehenden Differenzierung von Ausschuss sowie den entstehenden Kosten individuell bewertet werden [Schmitt-2008]. Außerdem können durch die Auswertung von Messdaten prozessinterne sowie prozessexterne Wirkzusammenhänge identifiziert werden. So ist ein beschleunigender Effekt auf die Lernkurve zu erwarten. Einflüsse von Prozessparametern auf die Qualität des Zwischenproduktes können wissenschaftlich durchdrungen werden und das Potential zur Optimierung der Prozesse und Produkte erschlossen werden. Um eine beschleunigte Prozessoptimierung zu realisieren, müssen Regelkreise an das Qualitätssystem angeschlossen sein zur Prozesssteuerung und -kontrolle. Voraussetzung für die Prozessoptimierung ist die Verfolgbarkeit der Ergebnisse eingesetzter Produktionsparameter, beispielsweise anhand eines QR-Codes auf der Zelle oder des Moduls. Damit lassen sich z.B. die Positionierung, Anzahl und Inhalte von Quality Gates entsprechend anpassen, was ein

interaktives und selbstoptimierendes Steuerungssystem für das Qualitätsmanagement in der Zell-, Modul- und Packproduktion ermöglicht [Schnell2016].



Economy of Scale

Die wachsende Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien wird zu einem Ausbau der Produktionskapazitäten in den nächsten Jahren führen. Dieser Ausbau kann über eine Erhöhung der Anzahl der Maschinen („Numbering-up“) oder des Durchsatzes der Maschinen („Scale-up“) realisiert werden. Dabei trägt durch die hohen Anlagenkosten nur die Hochskalierung zu einer signifikanten Kostenreduktion bei.

„Skaleneffekte sind die Kostenersparnisse, die bei gegebener Produktionsfunktion infolge konstanter Fixkosten auftreten, wenn die Ausbringungsmenge wächst, da bei wachsender Betriebsgröße die durchschnittlichen totalen Kosten bis zur sog. mindestopimalen technischen Betriebs- bzw. Unternehmensgröße sinken“ [Voigt2018]. Das bedeutet, dass bei

einer Vervielfachung der Ausbringungsmenge keine einfache Vervielfältigung des Betriebsapparates vorliegt. Umsetzbar ist ein Scale-up in verschiedenen Produktionsschritten und wird daher in vielen RBW mit adressiert.

Durch das Anpassen der Produktionsschritte an die Produktionskapazität treten Skaleneffekte in der Batterieproduktion bereits ab einem jährlichen Produktionsvolumen von 200-300 MWh/a auf (siehe Abbildung oben). Weitere Steigerungen haben nur einen indirekten Einfluss auf die Kostendegression durch Materialkostenersparnis, Lerneffekte und Innovationen [Sakti2015].

Skaleneffekte können in der Lithium-Ionen-Batterieproduktion demzufolge nicht nur in großen Produktionsstandorten mit einer Ausbringungsmenge von 35 GWh/a, sondern auch in kleineren Produktionsstandorten mit einer jährlichen Ausbringungsmenge von 1 - 1,5 GWh/a erreicht werden [Panasonic2015]. Der Trend geht aufgrund der hohen Bedarfe der Automobil Industrie hin zu zweistelligen GWh/a Produktionskapazitäten.

Höherer Automatisierungsgrad

Zur kontinuierlichen Weiterentwicklung der Li-Ionen-Batterien werden im Bereich der Batterieproduktion gezielt hoch automatisierte Fertigungskonzepte zur Kostendegression und Qualitätssteigerung entwickelt. Solche Konzepte sind durch Prozessintensivierung (zeitliche Verkürzung), -integration, -optimierung und durch Prozesssubstitution geprägt.

Im Bereich der industriellen Zell-, Modul- und Packfertigung herrschen bereits heute vollautomatisierte Einzelprozesse vor. Diese sind meist starr miteinander verkettet, um möglichst geringe Taktzeiten und hohe Durchsätze zu realisieren.

In engem Zusammenhang zum Automatisierungsgrad steht die Digitalisierung. Ziel ist es, durch eine intelligente Fertigung Produktqualität zu steigern und Ausschuss in der Produktion zu minimieren. Hierfür wird auf Prinzipien der Industrie 4.0 zurückgegriffen, wie beispielsweise den Einsatz cyberphysischer Systeme, vernetzte Prozesse, Datenrückkopplung oder aktive, messdatengestützte Maschinensteuerung. Grundlage für die Vernetzung der Produktionslinie bildet die Integration einer Datenaustausch- und Kommunikationsplattform für alle Anlagen und Maschinen, wie z. B. eine Standard Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA) und Cloud-Lösungen [Panda2018, Schneider2019].

Ziel ist zudem die Sammlung, Verarbeitung und Nutzung von jeder produzierten Batteriezelle zur Aufzeichnung und Überprüfung aller physischen Zusammenhänge, inklusive Parameter sowie Einhaltung bestimmter Fehlertoleranzen und der Zellqualität [Schnell2019]. Ausführlicher wird dieses Thema in der RBW 13 betrachtet.

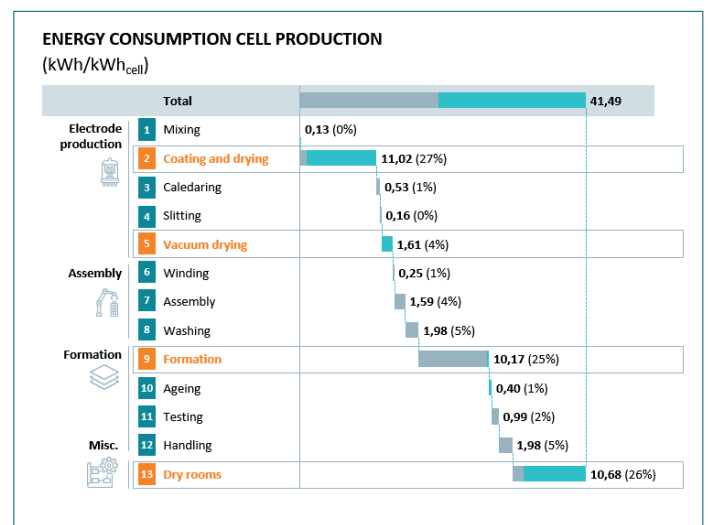
Nachhaltigkeit

Eine zentrale Motivation für den Einsatz von Batterien in Elektrofahrzeugen ist die Reduktion der CO₂-Emissionen und die Schonung von Energie und Ressourcen über den gesamten Fahrzeuglebenszyklus. Ebenso entscheidend ist die Verwendung von Batterien in elektrischen Energiespeichersystemen. Für eine nachhaltige Energieversorgung ist der Einsatz von erneuerbaren Energien und deren Speicherung unerlässlich. Auf politischer Ebene wird durch die europäische Batterieverordnung 2020 neue Nachhaltigkeitsanreize gesetzt.

Energieeffizienz

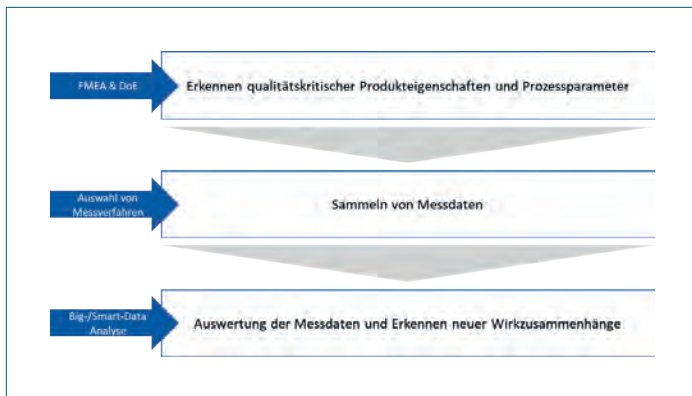
In der Produktion von Batterien – insbesondere in der Zellproduktion – sind energieintensive Verfahren notwendig. Das Beschichten und Trocknen, die Formierung sowie die Bereitstellung konditionierter Trockenraumumgebungen sind die energieintensivsten Prozessschritte [Degen2022]. Gemeinsam stellen sie den wesentlichen Anteil des Energieverbrauchs in der Zellproduktion dar [Pettinger2017]. Auf diese Thematiken wird ausführlicher in den Technologiekapiteln 2, 8 und 9 eingegangen.

Aus betriebswirtschaftlicher Sicht sind die Energiekosten der Produktion ein bedeutender Faktor, der bis zu 5 Prozent der Produktionskosten einer Li-Ionen-Zelle ausmacht [Schöne-mann2015]. Der Energieverbrauch in der Batterieproduktion ist zudem besonders aus ökologischer Perspektive relevant. In Zukunft wird der CO₂-Fußabdruck der bei der Herstellung der Batterie entstanden ist, transparent gemacht,



Energieverbrauch in der Zellproduktion

Quelle: Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB



Vorgehen bei der Qualitätssicherung komplexer Prozessketten
Quelle: BLB, TU Braunschweig

indem er in den Batteriepass aufgenommen wird. In ihrer Herstellung verursacht die Li-Ionen-Batterie etwa 80 kg Treibhausgasemissionen pro kWh Batteriekapazität, nach einer Studie der technischen Universität Eindhoven [Hoekstra 2020]. Dies entspricht etwa 40 Prozent der Treibhausgasemission der gesamten Fahrzeugherstellung eines BEV. Es wird weiterhin beschrieben, dass allein 75 Prozent der Treibhausgasbilanz der Batterieherstellung auf die Zellherstellung zurückgehen. Der größte Beitrag von über 50 Prozent kommt dabei durch den Strombedarf zustande. Relevante Beiträge darüber hinaus entstehen durch die Kathoden- und Anodenmaterialien sowie das Gehäuse und das Batteriemanagementsystem [Meyer2018].

Insgesamt ist die CO₂-Bilanz der Batteriefertigung stark abhängig vom Strommix des jeweiligen Produktionslandes. Eine Verwendung von grünem Strom aus erneuerbaren Energiequellen führt zu einer Verbesserung der CO₂-Bilanz.

Ressourceneffizienz

Das Material macht bis zu 70 Prozent der Kosten einer Lithium-Ionen-Zelle aus und motiviert somit rein betriebswirtschaftlich zur Realisierung einer hohen Ressourceneffizienz in der Produktion [Schünemann2015]. Es gilt den Produktionsabfall zu minimieren, der über die Prozesskette hinweg entsteht, z.B. durch Anfahrverluste beim Beschichten und Kalandrieren oder Verschnitte beim Konfektionieren. Zudem führt die Erhöhung der Ausbeute zur besseren Ressourceneffizienz.

Besonders die Materialien Kupfer, Kobalt und Nickel sowie die Lösungsmittel tragen darüber hinaus zu unterschiedlichen Umweltwirkungskategorien bei, darunter Eutrophierung, Human- und Biotoxizität [Ellingsen2014].

Ansätze zur Steigerung der Materialeffizienz sind wirtschaftlich und ökologisch interessant und notwendig. Für den Maschinen- und Anlagenbau bedeutet dies, dass ressourceneffiziente Anlagen bei steigenden Produktionskapazitäten in Zukunft an Attraktivität gewinnen werden.

Recycling

Einen weiteren wesentlichen Faktor, der sowohl zur Steigerung der Ressourceneffizienz wie auch der Energieeffizienz beitragen kann, stellt das Batterierecycling und Remanufacturing dar [Becker2019]. Diese besitzen das Potential, die CO₂-Bilanz der Batterie, deren Kosten und die Versorgung mit Rohstoffen positiv zu beeinflussen. Das Recycling bezeichnet das Verfahren zur Rückgewinnung von Materialkomponenten der Batterie. Das Recycling kann insbesondere die wichtigste Quelle für die Rohstoffe für Europa werden und somit Abhängigkeiten insbesondere aus China verringern, da natürliche Ressourcen hier sehr gering oder nicht vorhanden sind [Miedema2013]. Dementsprechend sind hohe Sammelquoten und Rezyklateinsatzquoten ein wichtiger Bestandteil der zukünftigen Batteriezellproduktion. Der Rezyklatanteil ist der Anteil an Sekundärrohstoffen, die in neue Produkte einfließen. Das Reuse von Batterien umfasst alle Methoden zur Weiterverwendung gealterter Traktionsbatterien in Second-Life Applikationen. Es wird durch den Hochlauf der Elektromobilität und stationärer Speicher ein

signifikanter Anstieg gebrauchter Lithium-Ionen-Batterien erwartet. Für den Recycler werden zukünftig relevante Informationen durch den Batteriepass bereitgestellt [Neef-2021]. In den letzten Jahren wurde viel in die Erforschung und Entwicklung effizienter Recyclingprozesse investiert. Ausführlichere Informationen sind in der RBW 14 aufgeführt.

Qualitätssteigerung

Die Qualität wirkt sich unmittelbar auf die Kosten aus. Eine Qualitätssteigerung kann im Produktionsprozess zu einer verbesserten Ausbeute und damit zu einer Kostensenkung beitragen. Qualitätssteigerung kann aber auch zu hochwertigeren Produkten führen. Diese können am Markt höhere Preise erzielen. Eine Kostensenkung zu Lasten der Qualität ist dagegen nicht zielführend.

In der Volumenproduktion sorgen Mess- und Prüftechnik für eine Qualitätssicherung und -kontrolle bei allen Produktionsschritten. Zusätzlich kann eine Erhöhung des Automatisierungsgrads mit Möglichkeit zur direkten Produktionsparameteranpassung und der Prozesssicherheit mit z. B. Predictive Engineerings bzw. Maintenance zur Qualitätssteigerung beitragen.

Mess- und Prüftechnik

Die Fertigungskette der Batterieproduktion ist ein komplexes Zusammenspiel vieler Disziplinen. Durch die drei Zellformate, sowie viele, teilweise noch in der Entwicklung befindlichen Zellchemien, ist eine große Gesamtvariation in den Herstellungsprozessen gegeben. Daraus resultieren viele unbekannte Wirkzusammenhänge zwischen Prozess- und Produktparametern. Zusammen mit der hohen Anzahl an Prozessschritten können diese zu hohen Aus-

schussraten führen. Eine durchgängige und intelligente Messtechnik ermöglicht ein frühzeitiges Reagieren und damit die Chance, sich vom Wettbewerb abzuheben [Trechow2018, Schnell2016].

Zielführend ist die Integration der Qualitätsmessungen in den Fertigungsprozess (Inline-Messung) und der damit verbundenen Online-Auswertung. Qualitätskritische Prozessschritte und sensible Produkteigenschaften geringer Toleranzbereiche sind zu identifizieren. Mittels Qualitätsprüfmittel und durch geeignete Produkt- und Prozessparameteranpassungen kann der Prozess optimiert werden. Generell gilt, dass Analysemethoden robust gegenüber den Umgebungsbedingungen sein müssen. Durch stabile Regelkreise können verschiedene Vorteile im Prozess realisiert werden:

- schnelle Reaktionsfähigkeit durch kleine Regelkreise
- Stabilisierung des Fertigungsprozesses
- Erhöhung der Qualität
- Kostenreduktion

Darüber hinaus sollte die eingesetzte Messtechnik zerstörungsfrei sein und zu einer früheren Fehlererkennung beitragen.

Die Qualitätssicherung komplexer Prozessketten wird in obiger Abbildung beschrieben. Zunächst gilt es, qualitätskritische Produkt- und Prozesseigenschaften zu erkennen und nach Relevanz zu bewerten. Die FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) oder ein DoE (Design of Experiments) sind hierfür gängige Methoden [Westermeier2013]. In der Tabelle auf S. 56-57 sind Qualitätsparameter der Batteriefertigung dargestellt und mögliche Messverfahren. Die Auswahl von Messverfahren und das Sammeln von Prozessdaten ist der zweite Schritt. Zuletzt müssen

die Messdaten ausgewertet werden. Im besten Fall können hieraus neue Wirkzusammenhänge zwischen einzelnen Produktionsschritten erkannt werden (Maschinen-/Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen). Zum Sammeln von Daten und zur Erkennung dieser Qualitäts-Struktur-Zusammenhänge werden digital vernetzte Produktionslinien und Big Data-Anwendungen verwendet. Basierend auf den Auswertungen der gesammelten Daten folgt eine zielgerichtete Anpassung der Prozessparameter, die Qualität der LIB wird erhöht, die Ausschussraten verringert und die Rentabilität der Produktion erhöht. Verfahren, die dem beschriebenen Vorgehen folgen, sind unter anderem von Schnell et al. für die gesamte Batterieproduktion und von Kölmel et al. für die Batteriemodul- und Batteriepackmontage erarbeitet worden [Kölmel2014, Schnell2016].

Automatisierungsgrad

Generell gilt, dass automatisierte Prozesse weniger fehleranfällig sind als manuelle Fertigungsschritte. Damit ist die Automatisierung ein wichtiges Instrument, um Qualität zu erhöhen und Ausschuss zu minimieren. Grundsätzlich ist beim Automatisierungsgrad die Erhöhung auf ein sinnvolles Niveau anzustreben und damit Overengineering zu vermeiden:

- Unverhältnismäßige Automatisierung vermeiden
- Feinfühlig, flexible Automatisierung etablieren, die sich problemlos anpassen lässt
- Informationsprozesse verknüpfen
- Intelligente Produktion durch den Einsatz lernender Systeme

Durch die Automatisierung kann eine Anpassung der Maschine auf mögliche Qualitätsschwankungen stattfinden und gemessene Prozessdaten über die Software ausgewertet werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, das Prozessergebnis mit der Zielqualität zu vergleichen. Daraus ergibt sich, welche Stellgrößen im Prozess geändert werden müssen [Linke 2017]. Dieser Auswertungsprozess kann weiter entwickelt alle Anlagen einer Fertigungsline potentiell miteinander vernetzen, da vor- oder nachgelagerte Prozesse direkt Einfluss auf den dazwischenliegenden Prozess nehmen.

Schnittstellen vor allem mit den Mess- und Prüftechnologien dienen dazu, die für die Weiterverarbeitung und Qualitätssicherung wichtigen Informationen entlang der Prozesskette oder für die Prozesssteuerung zur Verfügung zu stellen. Über Data-Mining und Big Data Analysen können neue Zusammenhänge zwischen Prozess- und Qualitätsparametern erkannt werden (siehe RBW 14). Basierend auf gemessenen Material- und Komponenten-kennwerten können bereits während des Produktionsvorgangs die Produktionsparameter automatisch angepasst werden. Dies führt zu deutlich geringeren Ausschussraten.

Prozesssicherheit

Im Produktionsprozess beeinflusst eine Vielzahl von Faktoren die Performance der Batteriezelle. Um die Energie- und die Leistungsdichte, die Kosten sowie die Zyklenstabilität und die Lebensdauer von Batteriezellen zu verbessern, ist ein detailliertes Wissen über produkt- und produktionsrelevante Parameter und ihre Wechselwirkungen erforderlich. Prozesssicherheit und -robustheit sollen eine konstante Produktqualität über Monate und Jahre garantieren. Wie bereits beschrieben, sind hierzu qualitätsrelevante Anlagen- und Produktparameter zu erfassen.

Zur Steigerung der Prozesssicherheit sollten die Ausfälle von Maschinen und Anlagen mithilfe eines Predictive Engineerings bzw. Maintenance möglichst geringgehalten werden. Bei der Etablierung der Produktion tritt üblicherweise eine hohe Anzahl an Ausfällen auf, die über eine Lernkurve des Maschinenbauers im Zusammenhang mit der Ermittlung von Maschinen-/Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen auf ein minimales Maß zu reduzieren ist. Die im konstanten Dauerbetrieb auftretenden zufälligen Ausfälle durch Verschleißeffekte sollten Art und Umfang der Qualitätskontrollen bestimmen. Bei zufälligen Ausfällen besteht die Schwierigkeit, prozesssicherheitsrelevante Parameter zu identifizieren und mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Um bei Verschleiß die Prozessrobustheit zu erhalten, sind Regelkreise zur Kompensation des Verschleißes notwendig.

Im Rahmen des Data Mining in der Produktion von LIB-Zellen werden sowohl geeignete Qualitätsparameter identifiziert, als auch tolerierbare Schwankungsbereiche – ohne Einfluss auf die Zellperformance – durch gezielte Parametervariation entlang der Prozesskette ermittelt [Heins2017].

Somit werden die Voraussetzungen für neue Produkt- und Produktionsstrategien und leistungsfähigere Batteriezellen geschaffen, die als Grundlage für aktive Regelung der Produktionsprozesse genutzt werden können. Zukünftig können intelligente Datenbanksysteme einen erheblichen Beitrag zur Prozesssicherheit leisten. Sie ermöglichen es, Batterien hinsichtlich verschiedener Kriterien zu optimieren, kausale Zusammenhänge zu erkennen und Toleranzen sinnvoll zu definieren.

		Wichtige Qualitätsparameter	Wichtige Messverfahren in der Produktion
Elektrodenfertigung	Mischen	- Reinheit - Suspensionsdichte - Feststoffgehalt - Homogenität - Viskosität - Agglomeratgröße - Partikelgrößenverteilung - Temperatur - pH Wert - Oberflächenspannung - Elektrische Leitfähigkeit	- Elementanalyse ICP - Pyknometer - Feststoffwaage, Feuchtebestimmung - Grindometer, Siebfiltration - Rheometer, Viskosimeter - Laserbeugungs- Partikelgrößenanalyse - REM Mikroskopie - PT100 Thermometer - pH-Messung - Tensiometrie - Impedanzmessung
	Beschichten	- Oberflächengüte - Beschichtungspositionen (Beide Seiten zueinander) - Nassschichtdicke und -genauigkeit - Kantengeometrie - Adhäsion	- Chrom. Weißlichtsensor, Kamera - Kamera - Lasertriangulation - Kamera, Lasertriangulation - Mechanisch (u.a. Stirnabzugstest, etc.)
	Trocknen	- Materialtemperatur - Oberflächengüte - Schichtdickenhomogenität - Brüche im Material - Gewichtsverteilung - Restfeuchte - Adhäsion - Binder- und Leitfähigkeitsadditivmigration	- Pyrometer - Kamera - Lasertriangulation - Kamera - Infrarot Kamera - Flächenmassenscanner - Mechanisch (u.a. Stirnabzugstest, etc.) - EDX
	Kalandrieren	- Schichtdicke, -dichte und -porosität - Oberflächenrauheit - Oberflächengüte - Gewichtsverteilung - Porengrößenverteilung - Adhäsion	- Lasertriangulation - Reflektometer, Messung des Brechungsindex - Kamera - Flächenmassenscanner - HG Porosimeter (off-line) - Zugprüfmaschine
	Slitten/Vereinzeln	- Gratqualität, Oberflächengüte - Geometrie der Schnittkanten - Metallische Fremdpartikel - Deformation der Mikrostruktur	- Chrom. Weißlichtsensor, Kamera - Lasertriangulation - Ultraschallsensor - Kamera
Zellassemblierung	Vakuumtrocknen	- Restfeuchtegehalt - Lösungsmittelreste - Oberflächenbeschaffenheit	- Feuchtemessgerät - Lasertriangulation
	Wickeln/Stapeln	- Positionierung - Fremdpartikelkonzentration - Elektrische Aufladung	- Lasertriangulation - Kamera, X-Ray
	Kontaktieren	- Kontaktwiderstand - Mechanische Stabilität - Schweißnahtqualität - Fremdpartikelkonzentration	- Widerstandsmessung - Kurzschlussstest - Schweißnahtmonitoring, Strommessung - X-Ray
	Einbringen & Verschließen	- Elektrische Isolation - Dichtheit - Siegelnahtqualität - Positionierung	- Wird nach Elektrolytbefüllung gemessen - X-Ray
	Elektrolytbefüllung	- Dichtheit - Elektrische Isolation - Elektrolyttemperatur - Dosiergenauigkeit - Deformationsprüfung	- Drucksensor, optische Kohärenztomographie - Isolationsmessung - Temperatursensor - Gravimetrische Messung - X-Ray
Formierung und Reifung	Versiegeln	Dichtheit	- Drucktest, optische Kohärenztomographie - Prüfgasverfahren
	Press Rolling	- Homogene Verteilung des Elektrolyten - Temperatur	- X-Ray - Pyrometer
	Formierung	- Zellinnenwiderstand - Kapazität - Zelltemperatur - Optimale Bildung der SEI	- Elektrochemische Impedanzspektroskopie - Messung der Spannungsprofile - Berechnung - Temperatursensor
	Entgasen	- Dichtheit - Restgas	- Drucktest, optische Kohärenztomographie - Massenspektrometer
	Alterung & EOL-Test	- Selbstentladung - Kapazität - Zellinnenwiderstand - Positionierung	- Messen der Leerlaufspannung - Berechnung - Elektrochemische Impedanzspektroskopie - X-Ray

		Wichtige Qualitätsparameter	Wichtige Messverfahren in der Produktion
Modulfertigung	Vormontage	- Kapazität - Zellinnenwiderstand - Positionierung	- Berechnung - Elektrochemische Impedanzspektroskopie - Lasertriangulation
	Isolierung und Verspannung	- Positionierung - Anpressdruck	- Lasertriangulation - Kamera - Drucksensor
	Elektrische Kontaktierung	- Schweißnahtqualität - Fügequalität	- Schweißnahtmonitoring - Widerstandsmessungen
	Slave-Platine Montage	- Positionierung - Schweißnahtqualität	- Lasertriangulation - Kamera - Röntgenmessung
	Montage der Schlussplatte	- Funktionalität der Sensorik - HV-Festigkeit - Dichtheit Kühlkreislauf	- Softwaretest - Widerstandsmessung - Leckageprüfung
	Einsatz der Zellmodule	Positionierung	Kamera
Packfertigung	Befestigung der Zellmodule	Beschädigungsfreie Montage	- Kamera - Drehmomentüberwachung
	Elektrische & thermische Integration	- Positionierung - Korrekte Verkabelung	- Kamera - Lasertriangulation
	Verschließen & Dichtheitstest	- Positionierung - Kleberaussenqualität - Dichtheit Batteriepack	- Kamera - Kleberaussenmonitoring - Leckageprüfung
	Laden & Flashen	Wärmeentwicklung bei Ladevorgang	Thermografischer Kamera
	End of Line Kontrolle	- Elektronikverbindungen - Optische Beschaffenheit	- Softwaretest - Kamera

Quelle: PEM der RWTH Aachen, BLB und TU Braunschweig

Frugale Innovation vs. Volldigitalisierung

Der Ansatz der frugalen Innovation zielt auf die essenzielle Kernfunktionalität eines Produktes ab. Der Begriff frugal steht für weniger ist mehr. Anders als derzeit in vielen Bereichen praktiziert, zeichnet sich ein frugales Produkt nicht durch neue zusätzliche Funktionalitäten, sondern vielmehr durch eine vereinfachte und somit weniger komplexe Folgeversion aus. Das Produkt soll relativ zum Preis einen bestmöglichen Nutzen aufweisen [Radjou2014]. Zielgruppenspezifische oder anwendungsorientierte Funktionen stehen im Fokus [Zeschky 2010]. Zugleich liegt einer frugalen Innovation eine neue Idee oder Erfindung zu Grunde, die in dem Produkt, der Dienstleistung oder dem Verfahren umgesetzt wird, erfolgreich Anwendung findet und den Markt durchdringt (Diffusion) [Dörr2011].

Frugale Innovation wird im Wesentlichen im Produktdesign angewendet und adressiert die Batterie als solche. Aus Sicht des Maschinenbaus betreffen frugale Innovationen das „Produktionssystem“ mit den darin enthaltenen Maschinen und Anlagen.

Die Batterieproduktion zeichnet sich durch eine komplexe Prozesskette aus, in der eine Vielzahl von Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen verstanden und prozesstechnisch beherrscht werden müssen. Dieser Herausforderung kann mit zwei Lösungsansätzen begegnet werden, die im Spannungsfeld frugaler Innovation und Volldigitalisierung stehen.

Im Sinne von Industrie 4.0 wird eine Optimierung durch vernetzte Fertigungslinien mit kontinuierlicher Datenaufnahme und künstlicher Intelligenz angestrebt. Ermöglicht wird die Volldigitalisierung durch aktuelle Hard- und

Softwarelösungen, die mehr Funktionalität und Intelligenz in das Produktionssystem bzw. die Maschinen und Anlagen einbringen. Dies hat in der Regel zur Folge, dass die Komplexität und damit auch die Fehleranfälligkeit im System steigt. Der Ansatz frugaler Innovation zielt auf die Senkung dieser Komplexität ab, was über unterschiedliche Wege erreicht werden kann. Einen gezielten, wirksamen Einsatz hochentwickelter Technologien in frugalen Produkten und Lösungen schließt dies keinesfalls aus [Hitech 2018]. Industrie 4.0 Lösungen können demnach auch gezielt für eine frugale Innovation genutzt werden.

In der Vergangenheit ist das Thema Overengineering stark in den Fokus gerückt. Oftmals resultieren überhöhte Prozessanforderungen aus Prozessunwissenheit. Diese wirken sich zwar negativ auf die Kosten aus, werden aber eher in Kauf genommen als ein vermeintlich unsicheres Produkt. Der Ansatz der frugalen Innovation steht dem entgegen. Er setzt aber ein ausreichendes Prozessverständnis voraus. Die kontinuierliche Datenaufnahme und Auswertung im Sinne von Industrie 4.0 kann hierzu einen wesentlichen Beitrag leisten. Je nach Fragestellung können auf Basis des hinzugewonnenen Prozessverständnisses zusätzliche, aber nützliche Funktionen in den Fertigungsprozess einfließen oder Prozesse vereinfacht werden.

Eine volldigitalisierte und -automatisierte Fertigungsline zielt darauf ab, Kosten durch Effizienzsteigerung zu senken. Im Gegensatz dazu bietet frugale Innovation die Chance auf Prozessvereinfachung und Durchsatzerhöhung und auf im Vergleich geringere Kosten. Um die Potenziale in der Batterieproduktionskette bestmöglich zu nutzen, sollten beide Ansätze verfolgt und kombiniert werden.

Herausforderungen und notwendige Technologiedurchbrüche (*Red Brick Walls*)

Red Brick Walls im Überblick

Da ein Großteil der Wertschöpfung von Batteriezellen, -modulen und -packs in der Produktion entsteht, müssen in dieser auch die größten Investitionen getätigt werden [Kampker 2015a]. Die Vielzahl existierender Technologiealternativen in der Zellfertigung führt zu einer Vielfalt in den Batterieproduktionslinien [Heimes2014]. Gleichzeitig werden verschiedene verkettete Technologien in den einzelnen Produktionsprozessen benötigt [Kwade2018b]. Im Roadmapping-Prozess manifestiert sich dies in der deutlich höheren Anzahl der Herausforderungen in der Zellfertigung gegenüber der Modul- und Packmontage. Gleichzeitig birgt die Zellfertigung die höheren Umsatzpotenziale.

Im Rahmen des Roadmappings werden Herausforderungen anhand bestehender und zukünftiger Anforderungen für die gesamte Prozesskette identifiziert. Daraus abgeleitet werden die notwendigen Technologie-Durchbrüche (*Red Brick Walls*) abgeleitet.

Bei der **Elektrodenfertigung** werden die Grundsteine für die Qualität der Zelle gelegt. Dies spiegelt sich auch in den Technologiekapiteln Mischen, Beschichten, Kalandrieren, Vereinzeln und der Separatorherstellung und den dort identifizierten *Red Brick Walls* wieder.

Die **Zellfertigung** unterteilt sich nochmals in die Zellassemblierung und das Zellfinishing. Vor allem der Stapelprozess, die Elektrolytbefüllung sowie die Formierung und Reifung sind die Bottlenecks im Produktionsprozess, die darüber hinaus erheblichen Einfluss auf die Qualität des Endproduktes haben. Die einzuhaltenden Umgebungsbedingungen in der Zellfertigung erfordern zudem das Arbeiten in Trocken- und Reinraumatmosphäre. Neben der Formierung ist das Betreiben des Trocken- und Reinraumes in der Zellfertigung am energieintensivsten.

Das Thema **Gehäuse** unterliegt sowohl im Zell- wie auch im Modulbereich einem starken Kostendruck. Die Herausforderungen liegen in der Einsparung von Material und der Vermeidung von Redundanzen sowie einer effizienten Produktion. Darüber hinaus kann es notwendig sein „Out-of-the-Box“ zu denken und neue Batteriemodul- und packkonzepte zu entwickeln, die produktionstechnisch kostengünstiger zu realisieren sind.

Für die gesamte Zellfertigung einschließlich der Elektrodenfertigung wird es darüber hinaus immer wichtiger, Wirkzusammenhänge zwischen Prozess- und Qualitätsparametern zu erkennen. Nur so kann Overengineering erfolgreich vermieden werden.

Im Bereich der **Batteriemodul- und Batteriepackmontage** sind geringere Investitionen als in der Zellproduktion notwendig, jedoch sind Prozessalternativen stark konzeptabhängig [Kampker 2015b]. Für Anwendungen außerhalb des Elektromobilitätsmarktes (z.B. Nutzfahrzeuge, stationäre Anwendungen, Power Tools) ist die varianten- und stückzahlflexible Produktion eine wesentliche Herausforderung. Auch die bereits 2018 und 2020 adressierte *Red Brick Wall* an die Kontaktierungstechnik hat nach wie vor Bestand. Schnellladefähigkeit und das damit verbundene Handling höherer Ströme erfordern nach wie vor massentaugliche Hochvoltverbinder, die zudem für den Recyclingprozess wieder lösbar sein sollen.

Insgesamt stellt die **Kreislaufwirtschaft** den Maschinen- und Anlagenbau auf verschiedenen Ebenen vor Herausforderungen, die im entsprechenden Technologiekapitel adressiert werden.

Wie bereits bei den beiden vorangegangenen Roadmaps wurden die *Red Brick Walls* (RBW) identifiziert und entsprechend des aktuellen Stands der Technik überarbeitet.



In den nachfolgenden Kapiteln werden die 15 *Red Brick Walls* für die zukünftige Batterieproduktion ausführlich diskutiert. Dabei werden Grundlagen und Herausforderungen dargestellt und mögliche Lösungsansätze zum Durchbrechen der *Red Brick Wall* aufgezeigt.

Obwohl der Erfolg einer Prozesstechnologie vor allem vom Zeitpunkt des Erreichens aller *Red Brick Walls* abhängt, stellt sich für den einzelnen Anbieter von Produktionsmitteln die Frage des Aufwands und Nutzens. Eine entsprechende Portfoliomatrix dient als Basis für die Bewertung der identifizierten *Red Brick Walls*.

Grand Challenges

Bereits 2014 wurde der Begriff „Grand Challenges“ eingeführt. Diese stehen für die Kernherausforderungen, auf die alle erarbeiteten *Red Brick Walls* zurückgeführt werden können.

Die **Kostensparnis** durch die Erhöhung des Durchsatzes (Scale-up oder Speed up) sowie durch die Erhöhung der Produktivität (Ausschussminimierung) stellt die erste Grand Challenge dar. Die Hochskalierung, die Geschwindigkeitssteigerung und die Ausschussminimierung zielen direkt auf die Kostenreduktion. Indirekt ist die Kostensparnis aber auch bei der Qualitätssteigerung und der Nachhaltigkeit die treibende Kraft.

Qualitätssteigerung steht für die zweite Grand Challenge. Dabei ist zum einen die Qualität im Prozess gemeint in Form von Prozessstabilität und hohen Ausbeuten. Zum anderen wird die Qualität des Produktes adressiert. Damit gemeint sind Einflüsse der Produktion auf die spätere Zellperformance (z.B. Energiedichte, Schnelladefähigkeit) und Sicherheit. Im Vergleich zu anderen Industrie-sektoren weisen Batterieproduktionen hohe Ausschussraten auf. Aufgrund der hohen Materialkosten einer Batteriezelle sowie der Fehlerfolgekosten stellen diese einen primären Kostentreiber dar. Eine Steigerung der Prozessgeschwindigkeit kann sich negativ auf die Prozessstabilität auswirken. Bedarfsoptimierte Anlagentechnik, qualitätsoptimiertes Handling, massentaugliche sowie standardisierte Schnittstellen im Produktionszyklus erlauben eine höhere Geschwindigkeit bei gleichzeitiger Prozessstabilität und niedrigen Ausschussraten.

Die dritte große Herausforderung stellt die **Nachhaltigkeit** in der Batterieproduktion dar. Die so genannte „green production“ bezeichnet die umweltfreundliche und sichere Verarbeitung von Rohstoffen während des gesamten Herstellungsprozesses, sowie die Verarbeitung und Verwendung von umweltfreundlichen und sicheren Materialien. Darunter wird auch eine energie- und ressourceneffiziente Produktion verstanden. Sinnvoll ergänzt wird diese durch die sogenannte Kreislaufwirtschaft. Dabei wird sichergestellt, dass möglichst viele Batterieroh-

stoffe wiederverwendet und nicht in andere Abbauprodukte umgewandelt werden. Insbesondere in Europa wird eine klimaneutrale bzw. CO₂-neutrale Produktion aufgrund der steigenden Umweltauflagen immer relevanter. Die Kombination aus effizienten Fertigungsprozessen, ressourcenschonender Produktion und nachhaltiger Wertschöpfungsketten ermöglicht die Chance auf eine Vorreiterrolle in der Batterieproduktion bei gleichzeitig signifikanten Kostenvorteilen.

Red Brick Walls 2023 im Detail

Aufbauend auf den zuvor dargestellten Einschätzungen der RBW aus dem Jahr 2020 wurden die nachfolgenden aktualisierten Technologiekapitel erarbeitet. Zu Beginn eines Kapitels sind die wesentlichen RBW zu dem Prozessschritt der Priorität nach tabellarisch aufgeführt, dabei ist eine Priorisierung von oben nach unten erfolgt.

Zur Visualisierung und Analyse von prognostizierten Technologieentwicklungspfaden wird das **Meilensteindiagramm** mit zeitlich parallel verlaufenden „Fahrspuren“ für die am höchsten priorisierte *Red Brick Wall* aufgezeigt.

In den folgenden Diagrammen erscheinen ausschließlich solche Anforderungen der Batteriehersteller, zu denen heute keine Produktionslösungen existieren – definitionsgemäß sind das die *Red Brick Walls*. Der heutige Stand der Produktionstechnik für die Volumenproduktion ist der Ausgangspunkt „2023“ im Meilensteindiagramm.

Es werden vier Symbole für die Darstellung von Meilensteinen im Entwicklungspfad verwendet. Der Kreis stellt die aktuell verwendete

Prozesstechnologie dar. Das Sechseck steht für Forschungsbedarf oder Forschungsprojekte. Rechtecke mit abgerundeten Ecken werden für Pilotanlagen oder demonstrierte Lösungssätze verwendet. Massentaugliche Technologien für eine Großserienproduktion werden durch ein Rechteck mit spitzen Ecken abgebildet.

Das Meilensteindiagramm wird ergänzt durch eine grafische Darstellung **der Aufwand Nutzen Bewertung** sowie durch eine qualitative **Ab-schätzung** des Beitrags, den die Überwindung der *Red Brick Wall* zu den Grand Challenges leistet. Das **Zielsystem** wird also für die Kostenersparnis, die Qualität und die Nachhaltigkeit betrachtet. „Kostenersparnis“ wird der Steigerung des Durchsatzes und der Steigerung der Produktivität zugeordnet. „Qualität“ bezeichnet die Reduktion der Ausschussrate durch stabilere Prozesse oder Verbesserungen der Produkteigenschaften, wie zum Beispiel der Leistungsparameter oder der Lebensdauer. Die Nachhaltigkeit steht für die Ressourcen- und Energieeffizienz sowie für die Recycelbarkeit. Da alle drei Ziele nicht scharf voneinander getrennt werden können, soll diese **Darstellung des Zielsystems** lediglich eine **Orientierung** bieten, die zeigt, wo der Fokus des jeweiligen Nutzens liegt (Was treibt dazu an, diese Herausforderung zu lösen?).

Der Begriff Batteriehersteller impliziert Elektroden-, Zellhersteller sowie die Produzenten von Batteriemodulen und -packs.

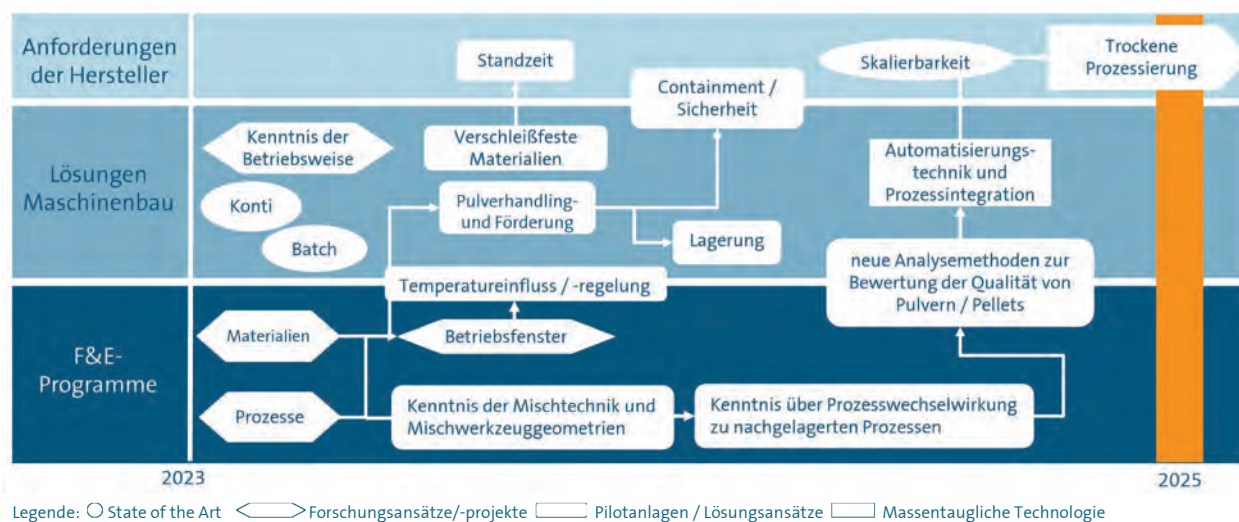
Im Rahmen der Produktionsforschung und der in dieser Roadmap dargestellten *Red Brick Walls* gibt es bereits eine Vielzahl an Forschungsprojekten, die sich mit offenen Fragestellungen in der Batterieproduktion befassen haben bzw. befassen. Ein Überblick dazu finden Sie am Ende dieses Kapitels.

1 Raw Material Handling und Mischen

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
1.1	Trockene Prozessierung	Fortschritt erzielt	Sehr Hoch	2025
1.2	Material Handling	Kein Fortschritt	Hoch	2025
1.3	Reduktion von Ausschuss / Produktmonitoring	Fortschritt erzielt	Hoch	2026
1.4	Durchsatz vs. Flexibilität	Fortschritt erzielt	Hoch	2024
1.5	Rohmaterial Logistik	Kein Fortschritt	Hoch	2025

RBW 1.1: Trockene Prozessierung

Ressourceneffiziente und damit kostenoptimierte Herstellung von Elektroden kann durch Reduktion des verwendeten Lösemittels (z.B. Granulate) oder vollständig trockene Prozessierung ermöglicht werden. Neue Materialien (v.a. Binder) werden benötigt, um hochqualitative Elektroden auch bei reduziertem Lösemittelanteil oder vollständig trockener Prozessierung zu gewährleisten. Definieren und Überwachen von Qualitätsparametern im Misch- und Dispergierprozess ist notwendig, um den Zusammenhang zwischen Betriebsparametern und Betriebsweisen und dem Rohstoff- sowie Zelleigenschaften herzustellen und so frühzeitig die Qualität sicherzustellen.



*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Raw Material Handling und Mischen

Grundlagen

Am Anfang der, aus einer Vielzahl an konsekutiven Prozessschritten bestehenden Prozesskette der Batteriezellproduktion, steht das Material-handling und der Mischprozess. Ziel des Mischprozesses ist es die pulverförmigen Ausgangsmaterialien zu homogenisieren und zu strukturieren. Dies kann entweder vollständig trocken oder in Kombination mit einem Lösemittel (nass) erfolgen. Den *State of the Art* stellt aktuell ein zweistufiger Mischprozess dar. Zunächst werden die unterschiedlichen Rohmaterialien in einem Trockenmischprozess vermischt. Bei geringer Mischintensität werden die Komponenten distributiv vermischt, sodass alle Ausgangskomponenten gleichmäßig verteilt in der Mischung vorliegen. Alternativ kann dieser

Prozessschritt auch mit einer hohen Mischintensität zur dispersiv Mischung durchgeführt werden. Bei dem dispersiven Mischen wird die Struktur der Ausgangsmaterialien z. B. durch Deagglomeration verändert. Die so erzeugte Pulvermischung wird anschließend im Nassmischprozess dispergiert. Das bedeutet, die Pulver werden mit Lösemittel benetzt und Agglomerate zerteilt. Mit der rapiden Entwicklung der Nachfrage und der Vielzahl an *Giga-factories* im Bau ist neben dem Betrieb auch die Versorgung der Anlage mit Rohstoffen für eine reibungslose Produktion entscheidend. Dazu gehören eine praktikable Pulverlogistik und Qualitätssicherung, aber auch definierte Abläufe für die Handhabung der Materialien aus dem Gebinde in der Produktionslinie und bei Produktwechsel auch wieder zurück in Zwischengebinde. Auch die Bewertung und Festlegung der



Vollautomatische 2 GWh Mischanlage für Beschichtungsmassen mit Eirich MixSolver® (links unten) und AZODOS® Dosieranlage (links oben) im UK Battery Industrialisation Centre (UKBIC)
Quelle: AZO GmbH + Co. KG, Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG

OEB-Level²⁰ für die unterschiedlichen Rohstoffe und der damit einhergehenden Schutzmaßnahmen für unterschiedliche Bereiche entlang der Produktionslinie ist sowohl für den Anlagenhersteller als auch den Betreiber äußerst relevant.

Der Mischprozess bildet die Basis für die Herstellung von reproduzierbaren Elektrodenschichten mit guter elektrischer Leitfähigkeit und geeigneter Porosität bzw. homogener Elektronen- und Ionenstromdichteverteilung sowie guten Leistungs- und Energieeigenschaften, insbesondere bei großformatigen Zellen mit einer Breite von bis zu 500 mm [Kwade2018b]. Ziel ist die homogene Vermischung der pulverförmigen Ausgangsmaterialien (Aktivmaterial, Leitadditiv und Binder) und die gezielte Einstellung der partikulären Struktur. Die konventionelle Produktion von Elektroden basiert auf der Nassverarbeitung. Typischerweise werden pastöse Beschichtungsmassen hergestellt. Das verwendete Lösemittel muss allerdings nach dem Beschichten in einem Trocknungsschritt wieder entfernt werden. Durch die notwendige Energie, um das Lösemittel zu verdunsten, ist die Trocknung (s. Kapitel 2) der kostenintensivste Prozessschritt in der Elektrodenfertigung.

Herausforderungen

Mit den steigenden Energiepreisen ist eine ressourceneffiziente Prozessierung wichtiger denn je. Um die Energiekosten soweit wie möglich zu reduzieren, gibt es aktuell große Anstrengungen, sowohl in der Forschung als auch der Industrie, lösemittelfrei oder lösemittelreduziert zu prozessieren (RBW 1.1).

Dadurch können die Kosten für die spätere Trocknung der Elektrode gesenkt bzw. der Trocknungsprozess aus der Prozesskette entfernt werden. Der Verzicht auf Lösemittel birgt neue Herausforderungen, die sich vor allem auf die

Auslegung und den Betrieb der Anlagen, aber auch den Transport und die Dosierfähigkeit der Materialien auswirken. Bei gänzlichem Verzicht auf eine Nassdispersion müssen im Trockenmischprozess die Leitfähigkeitsadditive und der Binder ihre finale Struktur erhalten. Die dicht gepackten Partikel im Mischraum ohne umgebendes Lösemittel führen zu einer erhöhten Reibung und damit Wärmeeintrag bei gleichzeitig reduzierten Wärmeübergang an den Behälterwänden. Dadurch steigt der Aufwand für die Temperaturregulierung des Mischprozesses. Im Gegensatz zur Nassprozessierung müssen bei der vollständig trockenen Prozessierung je nach Verfahren die Materialien nicht nur gekühlt, sondern teilweise auch gezielt erwärmt und dann in einem definierten Temperaturbereich gehalten werden, um den Binderaufschluss zu begünstigen. Somit ist ein gutes Temperaturmanagement der Anlage für die trockene Prozessierung vor allem im Hinblick auf die Skalierbarkeit von hoher Wichtigkeit. Der Verzicht auf Lösemittel führt auch zu einem erhöhten Verschleiß im Prozess. Daraus ergeben sich neue Herausforderungen im Hinblick auf die Verschleißfestigkeit der Anlage, insbesondere in Kombination mit den verwendeten, teils stark abrasiven, Materialien bspw. nickelhaltige Kathoden- und siliziumhaltige Anodenrohstoffen. Eine hohe Verschleißfestigkeit muss sichergestellt werden, um eine lange Laufzeit der Anlage bei gleichzeitig niedrigen Verschleißkosten zu gewährleisten und die Kontamination der hergestellten Mischung zu minimieren. Mit der Strukturierung der Pulvermischungen für die lösungsmittelreduzierte/-freie Verarbeitung ändern sich vor allem die zudem temperaturabhängigen Fließeigenschaften der Mischungen. Die strukturierten Mischungen sind i. d. R. äußerst kohäsiv und nicht frei fließend. Dadurch ergeben sich neue Herausforderungen in Bezug auf Lagerung sowie Dosierung der Materialien für die Weiterverarbeitung.

²⁰ „Occupational Exposure Limit“ gibt Auskunft über Gefährdungspotential der Materialien.

Neben einem kontinuierlichen und pulsationsarmen Transport längs zum Schichtauftrag, muss auch eine hohe Gleichverteilung quer zum Schichtauftrag gewährleistet werden.

Durch den Bau von *Gigafactories* ist eine wettbewerbsfähige, stabile, möglichst über Jahre robuste und prozessintegrierte Herstellung der Suspensionen/ Pellets/ Pulvermischungen mit dem Ziel einer kontinuierlichen Versorgung des nachgelagerten Verarbeitungsprozesses unerlässlich. Je nach Fahrzeugtyp ändern sich die Anforderungen an die Batteriezelle. Um diesen Anforderungen zu genügen, geht ein Trend hin zur prismatischen Einheitszelle mit definiertem immer gleichem Gehäusedesign, welches mit unterschiedlichen Zellchemien bestückt wird. Damit die kontinuierliche Versorgung der nachfolgenden Prozesse auch bei Materialwechseln gewährleistet werden kann, muss der Mischprozess einen hohen Durchsatz erbringen, aber auch flexibel auf Materialwechsel reagieren können (RBW 1.2). Diese Kombination bedingt wiederum ein umfangreiches Prozess-Know-How, einen hohen Automatisierungsgrad der Prozessabläufe und ein darauf ausgerichtetes Anlagendesign. Durch eine optimierte Prozessführung beim Mischen und/ oder Dispergieren kann sowohl beim kontinuierlichen als auch beim Batch-Betrieb die Flexibilität der Anlagen maximiert werden, sowie der Zeit- und Energieaufwand minimiert werden.

Aufgrund der hohen Materialkosten (etwa 70 - 75 Prozent Kostenanteil an der Gesamtzelle) ist Produktionsausschuss vor allem in der Großserienproduktion zwingend zu minimieren und idealerweise vollständig zu vermeiden. Nur eine idealerweise kontinuierliche Überwachung (RBW 1.3) definierter Qualitätsparameter ermöglicht es, ausschussrelevante Abweichungen aus dem Mischprozess wie bspw. Dosierfehler, Rohstoffänderung oder ungenügende Aufbereitung zu identifizieren und somit die Ressourceneffizienz zu steigern. Insbesondere für die

lösemittelreduzierte/ -freie Prozessierung werden neue Ansätze benötigt. Die gängigen Analysemethoden und Qualitätsparameter aus dem Nassmischprozess sind für die in der lösemittelreduzierten/ -freien Prozessierung eingesetzten Pellets/ Pulvermischungen nicht oder nur bedingt geeignet. Es ist daher wichtig, neue Methoden zu entwickeln und zu etablieren, um die Produktion qualitativ hochwertiger Elektroden sicherzustellen.

Vor dem Mischprozess ist ein dediziertes Pulverhandling (RBW 1.4) der Rohmaterialien hinsichtlich Lagerung und Zuführung von großer Bedeutung, um ein möglichst kontaminationsfreies und feuchtereduziertes Arbeiten zu gewährleisten. Auch der Handhabung der aufbereiteten Mischungen wird eine hohe Relevanz zugeschrieben. Nur so kann sichergestellt werden, dass die Mischung in ihren Eigenschaften unverändert den nachgelagerten Prozessen zugeführt und ein reproduzierbarer Prozess abgebildet werden kann. Hierzu ist es notwendig, eine geeignete Intralogistik zu etablieren, die eine schonende Förderung ohne mögliche Entmischungseffekte gewährleistet und die Kontamination der Rohmaterialien minimiert. Zusätzlich müssen die Anforderungen an das Containment erfüllt werden und das Handling in definierter Atmosphäre stattfinden, um Produktalterung zu verhindern. Die Anlagentechnik muss auf wechselnde Pulver-/ Aktivmaterialcharakteristiken (z. B. Schütt- und Stampfdichte) und Endprodukteigenschaften ausgelegt werden. Darüber hinaus sind effiziente Reinigungssysteme/-konzepte relevant, um die Anlage ohne hohen Produktverlust bei möglichst kurzen Reinigungszeiten flexibel nutzen zu können. Vor allem in der Großserienproduktion sollte neben dem Handling auch die Rohmaterial Logistik (RBW 1.5) näher betrachtet werden. Die konventionelle Anlieferung in Big Bags und Sackware ist für *Gigafactories* nicht oder nur bedingt geeignet, auf jedem Fall mit hohem personellen Aufwand verbunden. Durch die erforderlichen ma-

nuellen Nachfüllprozesse entsteht zusätzlicher Aufwand für das Containment an den Befüllstationen, Kosten für zusätzlich notwendige PSA, mit dem Umfüllen einhergehender Materialverlust durch Restmengen in den Gebinden, sowie erhebliche Abfallmengen an Verpackungen und Umverpackungen, die teilweise als Sondermüll entsorgt werden müssen.

Lösungsansätze

Durch eine trockene oder deutlich lösemittelreduzierte Prozessierung der Ausgangsmaterialien können signifikante Einsparungen in den Energie- und Investkosten erreicht werden. Dazu gehören Kosten für das Trocknen, das Lösemittel selbst, die Abluftbehandlung sowie die Lösemittelrückgewinnung. Das Ziel auf dem Weg hin zu einer ressourceneffizienten Produktion muss darin bestehen, diesen Ressourcenaufwand zu minimieren. Hierfür müssen der Misch- und Beschichtungsprozess integriert betrachtet und weiterentwickelt werden, entweder durch eine lösemittelreduzierte oder vollständig trockene Prozessierung. Zum Beispiel können hochviskose Beschichtungsmassen vordosiert über Düsen direkt auf den Stromsammler appliziert oder selbstdosierend aus einem Reservoir eingezogen werden. Etablierte Mischverfahren sind teilweise für die Herstellung extrusionsfähiger Mischungen oder für die trockene Prozessierung gänzlich ungeeignet. Nachgelagerte Prozessschritte, die ohne Beschichter auskommen, aber auch andere Elektrodenstärken, erfordern geänderte Mischguteigenschaften als Eingangsmaterial. Der Mischprozess kann sowohl im Batchbetrieb, an speziell für die Anwendung ausgelegten Mischaggregaten, oder kontinuierlich bspw. mittels Extrusion stattfinden. Eine Reduktion des Lösungsmittelanteils ist nur im Schulterschluss mit der Entwicklung und Identifizierung neuer Binder und Verarbeitungsmaschinen möglich. Dabei ist die richtige Wahl der Prozessparameter und Mischsequenzen entscheidend, um ideale Eigenschaften für die Weiterarbeitung der Mischungen aber auch der Zellperformance

sicherzustellen. Maschinen- und Anlagenseitig ist es vor allem für die trockene Prozessierung bedeutsam, verschleißfeste Materialien in den Aufbereitungsmaschinen zu verwenden und das Temperaturmanagement der Anlage zu verbessern. Nur so kann die Reproduzierbarkeit sichergestellt werden.

Ein weiterhin wichtiger Aspekt ist die Entwicklung einer Qualitätsmanagementstrategie für Elektrodenmassen. Durch Kombination von Prozessexpertise und Inline-Sensorik können automatisierte Regelungssysteme entwickelt und Qualitätsparameter gezielt überwacht werden. Dadurch wird die Qualität der Elektrode bei gleichzeitiger Senkung der Betriebskosten durch Minimieren von Ausschuss sichergestellt. Für die trockene Prozessierung ist es hier zunächst essenziell, geeignete Parameter zu definieren und neue Offline- und Inline-Analysemethoden zu etablieren, mit denen eine Bewertung der Eigenschaften garantiert werden kann.

Neben den Produktparametern sind zudem Maschinen-, Prozess- und Verfahrensparameter zur Steuerung/Regelung sowie die Inline-Erkennung von Produktionsanomalien und -fehlern aufzunehmen. Dieses lückenlose Inline-Prozess- und Produktmonitoring ermöglicht die Ermittlung von Maschinen- und Prozessfähigkeitskennzahlen. Das Ziel besteht darin, eine geringe Varianz der späteren Zellen in Bezug auf elektrochemische Kenngrößen sicherstellen und den Mischprozess 6-Sigma konform zu betreiben.

Um trotz hoher Durchsätze einen flexiblen Betrieb der Anlage zu gewährleisten, ist ein detailliertes Prozesswissen in Kombination mit einem hohen Automatisierungsgrad und wartungsarmem Anlagendesign entscheidend. Durch automatisierte Reinigungsabläufe sind die Stillstandszeit der Anlagen zu reduzieren und somit die Flexibilität zu erhöhen. Hierbei könnten z.B. auch Molchsysteme zum Einsatz kommen, um das Leitungssystem zu reinigen,

Slurryanhaftungen nutzbar zu machen und gleichzeitig den Lösemittelverbrauch zu reduzieren. Ferner kann durch ein optimiertes Anlagen- und Materialflusskonzept die produktberührende Fläche und der damit verbundene Reinigungsaufwand minimiert werden. Austragskonzepte für pulverförmige Reste in Aufgabestationen und Dosierern ermöglichen ein schnelles Ausschleusen sowie die Wiederverwendung der Rohstoffe in der nächsten Kampagne. Eine direkte Verkettung des Mischprozesses mit Informationen der nachfolgenden Prozessschritte kann zusätzlich dazu beitragen, die Flexibilität zu erhöhen und eine Just-in-Time Versorgung sicherzustellen.

Für den Transport der Rohmaterialien werden aktuell unterschiedliche Gebindetypen (z. B. Säcke oder BigBags) mit verschiedensten Abmaßen je nach Rohstofflieferant verwendet. Dies führt zu einem erhöhten Aufwand im Engineering für die Anlagenhersteller, da die Einfüllprozesse auf die individuellen Kundenanforderungen angepasst werden müssen und in diesem Zuge auch das Containment neu betrachtet oder entwickelt werden muss. Die Einführung genormter oder zumindest einheitlicher Gebinde und / oder Gebindegrößen für bestimmte Rohstoffklassen bietet Anlagenherstellern die Möglichkeit, kostengünstige standardisierte Schnittstellen für Befüllprozesse anzubieten, welche zudem idealerweise einheitliche Anforderungen an das Containment erfüllen. Eine weitere Alternative für die allgemeine Rohstofflogistik wäre z. B. der Betrieb von Rohstoffsilos oder Wechselcontainern in denen große Mengen der Materialien auf Abruf bereit gestellt werden können. Silosysteme bieten zusätzlich den Vorteil einer automatischen Befüllung über ein pneumatisches Befüllsystem, wodurch das Material ohne Exposition im Betrieb transportiert werden kann. Hierfür müssten aber auch die notwendigen Voraussetzungen auf Seiten der Rohstofflieferanten geschaffen werden.

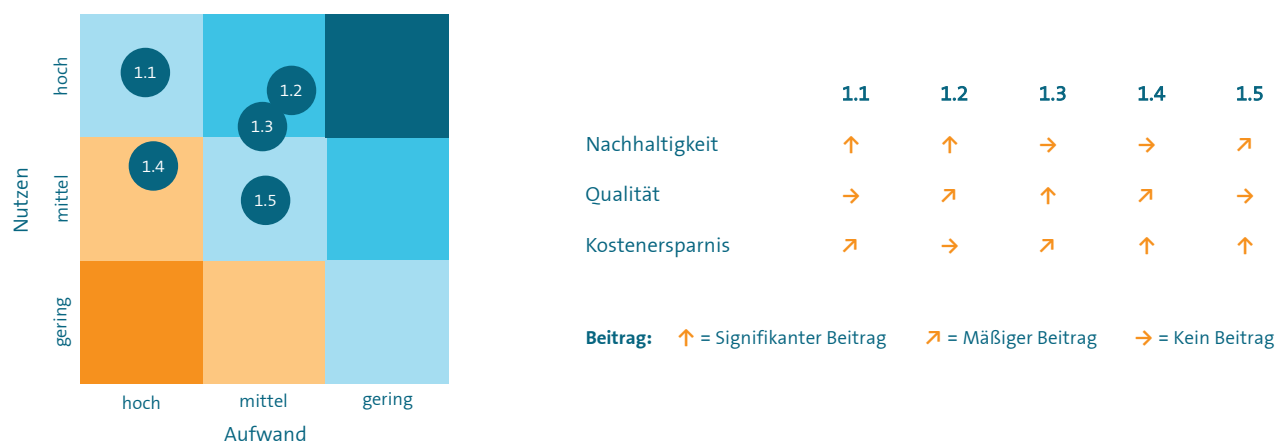
Aufwand- und Nutzenbewertung

Die Etablierung lösemittelreduzierter oder -freier Prozesstechnologien (RBW 1.1) ist mit einem großen Aufwand aber auch Nutzen verbunden. Der Einsatz lösemittelreduzierter Prozesse zeichnet sich durch ökologische und ökonomische Effizienz aus. Neben hohen Kosten-, Energie- und Platzeinsparungen durch den reduzierten bzw. vollständig entfallenden Trocknungsschritt sind stark lösemittelreduzierte Pellets oder strukturierte Mischungen sehr gut lagerfähig. Dies erlaubt eine örtliche und zeitliche Entkopplung des Mischprozesses von den anderen Prozessschritten und steigert damit die Flexibilität des Misch- und Produktionsprozesses deutlich. Die gute Lagerfähigkeit ermöglicht die Durchführung von Produktionskampagnen entkoppelt von den nachfolgenden Prozessschritten. Somit kann eine kontinuierliche Versorgung entlang der Prozesskette unabhängig vom Betrieb des Mischers (z.B. bei Produktwechsel oder Wartung / Störung) gewährleistet werden. Neben den bereits aufgeführten Vorteilen kann der Trocknungsprozess reduziert oder sogar vollständig aus der Prozesskette entfernt werden. Dies geht mit einer weiteren Kostenersparnis, sowohl in den Investitionsausgaben als auch den Betriebskosten, einher.

Bei der vollständig trockenen Prozessierung ist die materialbedingte Temperaturregulierung (Aufheizen und Gegenkühlen) mit einem erhöhten Aufwand und notwendigem fundierten material- und prozesstechnischem Wissen verbunden. Dieses kann durch Kooperationen und enger Zusammenarbeit zwischen Forschung-, Material-, Maschinen- und Anlagenherstellern jedoch erworben werden und ist mit einem hohen Nutzen verbunden.

Damit ein stabiler Betrieb der Produktionslinie gewährleistet werden kann, ist es notwendig, den Misch- und Dispergierprozess sowohl für einen hohen Durchsatz auszulegen, aber auch so flexibel wie möglich zu gestalten (RBW 1.2).

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



1.1 Trockene Prozessierung 1.2 Material Handling 1.3 Reduktion von Ausschuss / Produktmonitoring 1.4 Durchsatz vs. Flexibilität 1.5 Rohmaterial Logistik

Nur so kann eine kontinuierliche oder quasi-kontinuierliche Versorgung des nachgeschalteten Beschichtungsprozesses gewährleistet werden. Dafür sind fundierte Prozess- und Maschinenkenntnisse notwendig. Mit weitreichender Automatisierung und Anlagenverkettungen entsteht hier zwar ein höherer Aufwand, der aber einige Vorteile mit sich bringt. So können z.B. die Flexibilität gesteigert und die Rüstzeiten reduziert werden.

Ein vielversprechender Ansatz für die Reduktion von Ausschuss (RBW 1.3) ist die Implementierung von Inline-Sensorik zur automatisierten und kontinuierlichen Produktüberwachung. Dies ist mit einem hohen Aufwand verbunden, um geeignete Systeme zu entwickeln und zu etablieren. Gleichzeitig bildet die Produktüberwachung die Basis für Regelungskonzepte, mit denen Ausschuss minimiert und frühzeitig erkannt werden

kann. Damit ergibt sich ein hoher Nutzen vor allem im Hinblick auf die Reduktion der Kosten und Steigerung der Ressourceneffizienz.

Das Material Handling und die Rohmaterial Logistik (RBW 1.4; RBW 1.5) stellen aktuell Herausforderungen dar, die kurzfristig vor allem mit einem (finanziellen) Aufwand für Rohstofflieferanten und bestehenden Anlagen verbunden sind, langfristig aber helfen deutlich die Kosten zu reduzieren. Die Einführung von genormten Einheitsgebinden ist zunächst zwar mit erhöhten Kosten verbunden, bietet aber einen hohen Nutzen für die Anlagenhersteller und Betreiber. Mit geeigneten Maßnahmen zur Lagerung und Förderung von Schüttgütern unter definierte Bedingungen kann eine hohe Qualität des Materials sichergestellt werden. Gleichzeitig müssen die Anforderungen an das Containment produkt- und anwendungs-spezifisch definiert

werden, um optimalen Arbeiterschutz bei vertretbaren Kosten zu erreichen. Alternative Konzepte für die Pulverlogistik, wie bspw. der Transport über Tankfahrzeuge und Rohstoffsilos in den Anlagen oder RFID getaggte Wechselcontainern in Kombination mit automatischen Abfüllsystemen sind zwar mit höheren Kosten verbunden, könnten aber den ganz erheblichen personellen Aufwand für die Pulverlogistik an und in der Mischanlage deutlich reduzieren, eine fehlerreduzierte, durchgängigere Qualitätssicherungskette ermöglichen und auch die Materialverluste und Abfallmengen über / für Gebinde und Umverpackungen nachhaltig reduzieren.

Autor:

Marcel Weber, TU Braunschweig

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Dr. Stefan Gerl, Leitung Verfahrenstechnik, Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG; Karl-Heinz Bußbach, Global Business Director, AZO GmbH + Co. KG.

Mit weiterer Unterstützung von:

Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH
NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

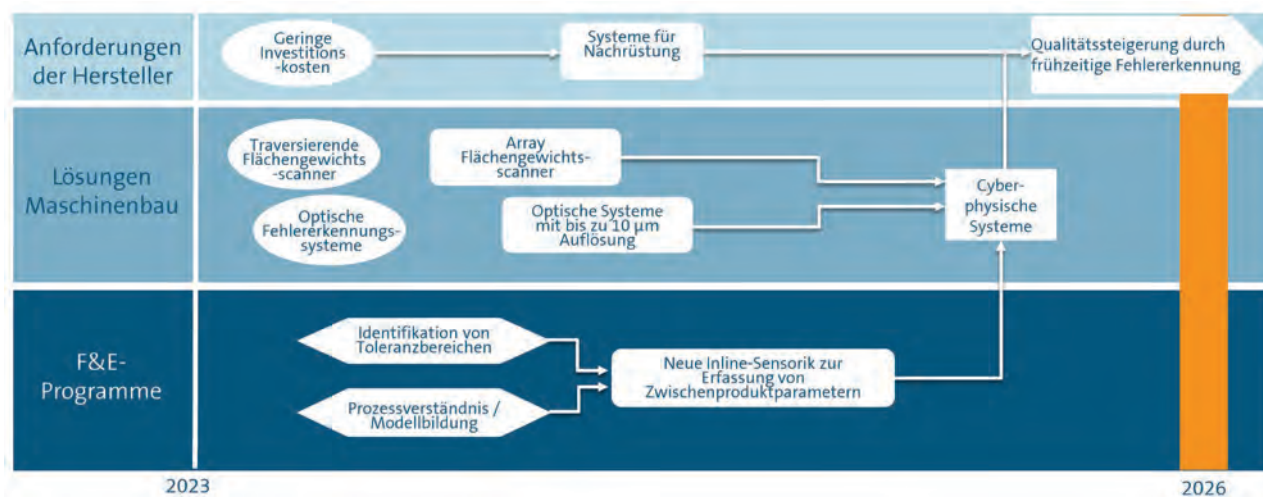


2 Beschichten und Trocknen

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
2.1	Qualitätssteigerung/-verbesserung	Fortschritt erzielt	Hoch	2024-2026
2.2	Steigerung der Energieeffizienz und Vermeidung kritischer Materialien	Wenig Fortschritt	Hoch	2027-2028
2.3	Durchsatz erhöhen	Fortschritt erzielt	Mittel	2024-2027

RBW 2.1: Qualitätssteigerung/-verbesserung

Durch den direkten Einfluss der Prozessschritte des Beschichtens und Trocknens auf die Elektrodenstruktur bedarf es Technologien, die z. B. die Homogenität der Schichten quantifizieren und inline überwachen sowie bei einer Über- bzw. Unterschreitung gesetzter Grenzwerte aktiv in den Prozess eingreifen. Zum einen kann zur Verminderung von Ausschuss die Identifizierung von Toleranzbereichen maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit des Beschichtungsprozesses sein. Zum anderen können durch das aktive Eingreifen in den Prozess Qualitätsschwankungen vorgebeugt werden und spätere gewünschte Zelleigenschaften erzielt werden. Hierzu ist eine Vor- und Zwischenproduktcharakterisierung notwendig, sodass möglichst frühzeitig eventuelle Produktschwankungen detektiert und Ausschuss vermieden werden kann.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ▢ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Beschichten und Trocknen

Grundlagen

Im Beschichtungsprozess wird die Suspension über ein Auftragswerk kontinuierlich oder intermittierend, also mit Unterbrechungen, auf eine Trägerfolie (Substrat) aufgebracht. Das intermittierende Beschichten bringt besondere Herausforderung hinsichtlich der Güte der Beschichtungskanten mit sich und wird in der Regel bei geringeren Bahngeschwindigkeit durchgeführt als das kontinuierlichen Beschichten. Aufgrund von Vorteilen bei der Elektrodenkonfektionierung und im Hinblick auf die Reduktion von Materialverlusten kann es dennoch Sinn machen, die genannten Herausforderungen beim intermittierenden Beschichten in Kauf zu nehmen. Insbesondere bei der Rundzelle ergeben sich bei der Elektrodenkonfektionierung Vorteile. Zudem ist für bestimmte Stapeltechnologien, wie beispielsweise dem Helixstapeln oder wenn Laminierprozesse eingesetzt werden, eine intermittierende Beschichtung Voraussetzung. Bei der gewickelten prismatischen Zelle kann es sinnvoll sein, die Beschichtung entsprechend dem Zelldesign anzupassen. Die Freiflächen zwischen den beschichteten Flächen werden dabei so geplant, dass die Stellen im Flachwickel, wo die Radien am kleinsten sind, unbeschichtet bleiben. So kann ein Abplatzen der Schicht in diesen Bereichen vermieden werden.

Industriell üblich ist heute die Beschichtung über Breitschlitzdüsen (Slot-die). Typische Werte für die Nassschichtdicke liegen bei Energieelektroden zwischen 200-250 μm . Die jeweiligen Elektroden suspensionen werden auf Kupfer- (Anode) oder Aluminiumfolien (Kathode) aufgetragen. Für die Anode ist inzwischen eine wässrige Beschichtung Standard, bei der Kathode wird NMP eingesetzt. Die Beschichtungsbreite kann bei Einsatz von mehreren oder von sog. Mehrkammer-Düsen bis zu 1400 mm betragen. Beschichtungsauftrag und Trocknung haben starken Einfluss auf die Qualität der Schicht.

Die Trocknung ist gegenüber dem Beschichtungsauftrag geschwindigkeitsbestimmend. Ein Richtwert für die Verweilzeit der Trocknung beträgt ca. 40-60 s, die insbesondere von der Nassschichtdicke, dem Feststoffanteil der Suspension und dem verwendeten Lösungsmittel abhängt. Dadurch ist die Durchlaufgeschwindigkeit im Wesentlichen von der Trocknerlänge begrenzt. Eine Beschleunigung der Trocknung ist der wesentliche Hebel zur Durchsatzsteigerung.

Heute werden in der Regel Umlufttrockner, teilweise in Kombination mit IR-Trocknern, eingesetzt [Kwade2018b]. Dabei stehen momentan alternative Trocknungsverfahren im Fokus von Wissenschaft und Industrie [von Horstig2022]. So bietet die Trocknung mittels Mikrowellen, Nah-Infrarot, Laser oder Induktion vielversprechende Potentiale zur Durchsatzsteigerung. Diese werden in anderen Industriezweigen bereits eingesetzt, müssen für die vergleichsweise dünnen Substrate und Beschichtungen der Batterieelektroden allerdings noch adaptiert und validiert werden.

Die Beschichtung von Folienober- und Folienunterseite erfolgt in Abhängigkeit der Anlage entweder simultan-beidseitig oder, wie heute insbesondere bei Anlagen der Massenproduktion mit großer Arbeitsbreite üblich, sequenziell (Tandem-Beschichtung). Für einseitige Beschichtungen können Trägerwalzen anstelle von Luftlagerschwebedüsen eingesetzt werden. Weitere Anforderungen an den Prozess stellt die Vermeidung von Rissbildungen im Beschichtungsmaterial und die Minimierung der Bindermigration zur Schichtoberfläche [Schoo2023]. Diese entstehen, wenn die Schichten bei zu hohen Trocknungsraten getrocknet werden. Es liegt somit eine Optimierungsfragestellung zwischen Kosten/Durchsatz und erzielbarer Qualität (z.B. Energie-, Leistungsdichte) für die Trocknungsprozesse vor, die maßgeblich durch die Maschinenteknik, spez. die Trocknungstechnologie, beeinflusst werden kann.



Beschichtungs- und Trocknungsanlage für Lithium-Ionen Batterien; Quelle: Jagenberg Converting Solution GmbH

Da die Anfälligkeit für die Entstehung von Elektrodendefekten über den Trocknungsverlauf variiert, kann eine entsprechend angepasste Variation der Trocknungsintensität über den Trocknungsprozess hinweg die Qualität der Elektrode verbessern. Diese kann durch Temperaturprofile, variierende Luftgeschwindigkeiten, Düsenprofile oder ergänzende Trocknungstechnologien beeinflusst werden.

Bei der simultan beidseitigen Beschichtung muss ein Kontakt der nassen/feuchten Beschichtung zu den Trägerrollen vermieden werden, wodurch eine Schwebbahn notwendig wird. Die simultane Beschichtung führt zu einer Halbierung der notwendigen Trocknerstrecke. Gerade bei großen Arbeitsbreiten ist ein besonderer Fokus auf einen stabilen Bahnverlauf zu legen, um somit einen Beschichtungsauftrag an der Düse mit hoher Qualität zu gewährleisten.

Herausforderungen

Für eine wettbewerbsfähige Elektrodenherstellung im Massenproduktionsmaßstab ist die Steigerung der Qualität eine der bedeutendsten Herausforderungen. Gerade im Hinblick auf hohe Material- und Energiekosten und eine gleichbleibende Qualität der Elektroden müssen hier aktiv Lösungen vorangetrieben werden. Zum einen kann zur Verminderung von Ausschuss die Identifizierung von Quality Gates maßgeblich für die Wirtschaftlichkeit des Beschichtungsprozesses sein. Durch den direkten Einfluss der Prozessschritte des Beschichtens

und Trocknens auf die Elektrodenstruktur bedarf es Technologien, die z. B. die Homogenität der Schichten quantifizieren und inline überwachen sowie bei einer Über- bzw. Unterschreitung gesetzter Grenzwerte aktiv in den Prozess eingreifen und ggf. die Elektrode als zweite Wahl oder auch als Ausschuss definieren/markieren. Zum anderen können neben der Reduzierung von Ausschuss durch das aktive Eingreifen in den Prozess Qualitätsschwankungen vermieden und spätere gewünschte Zelleigenschaften erzielt werden. Hierzu ist eine In- und Online Vor- und Zwischenproduktcharakterisierung notwendig, sodass möglichst frühzeitig eventuelle Produktschwankungen detektiert und Ausschuss vermieden werden kann. Eine besondere Herausforderung stellt hier der Trocknungsprozess dar, der die Elektrodenstruktur und damit die Eigenschaften maßgeblich beeinflusst. Es bedarf der Entwicklung eines mechanistischen Verständnisses der Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen, um Ursachen für Qualitätsmängel zu ermitteln und effektiv Gegenmaßnahmen einzuleiten (RBW 2.1).

Neben der Steigerung der Qualität ist ein verantwortungsvoller Materialeinsatz ein entscheidendes Thema in Bezug auf die Nachhaltigkeit. Hier sind Alternativen zu dem giftigen und teuren Lösungsmittel, NMP, für die Kathodenbeschichtung zu finden, anlagenseitige Optimierungen vorzunehmen und Ausschuss zu vermeiden. Parallel zur Etablierung von lösungsmittelfrei/-arm produzierten Elektroden bedarf es zwingend der parallelen Fokussierung auf die Optimierung der

Rückgewinnungs- und Abluftreinigungssysteme sowie wässrig-prozessierte Kathoden. Unter anderem wird die lösungsmittelfreie/-arme Produktion dünner Leistungselektroden auch langfristig nur sehr schwer realisierbar sein. In Verantwortung gegenüber der Umwelt sowie nachfolgenden Generationen spielt dies eine erhebliche Rolle, um die Gesamt-Ökobilanz der E-Mobilität nicht zu verschlechtern (RBW 2.2).

Die steigenden Preise für Gas und Strom geben der Effizienzsteigerung insbesondere in der Europäischen Union eine wirtschaftliche Dimension. Die Bedeutung dessen wird zusätzlich verstärkt, da Europa bereits vor den Preissteigerungen bei einem hohen Energiepreisniveau gelegen hat. Die hohen Energiekosten stärken die Bedeutung des Energiebedarfs der Anlagen bei ökonomischen Abwägungen im Rahmen der Anlagenbeschaffung. Da ein Großteil der aufgewendeten Energie der gesamten Elektroden- und Zellfertigung beim Trocknungsprozess anfallen, ist die Energieeffizienz bei diesem Prozessschritt entscheidend und der Hebel zur Reduktion des Gesamtenergiebedarfs der Batterieproduktion hier besonders groß [Drachenfels2022] (RBW 2.2).

Neben der Verbesserung der Qualität und der Steigerung der Energie- und Materialeffizienz ist die Erhöhung des Durchsatzes ein Thema, dem sich die Anlagenhersteller annehmen müssen. Geplante Großfabriken im Gigamaßstab müssen hohe Durchsätze erzielen, um der Nachfrage am Markt gerecht zu werden und ökonomisch wettbewerbsfähig zu sein. Normale Scale-up-Prozesse der konventionellen Trockner stehen hohen Anschaffungskosten und fertigungstechnischen Fragenstellungen gegenüber. So führt eine Vergrößerung der Trocknungsstrecke zu Herausforderungen in der Bahnführung, was zu Faltenbildung oder auch Bahnrissen in den Substraten (Ableiterfolien) führen kann. Dies bedeutet, dass aktuelle Trocknerlängen heutzutage vor allem durch die Substrateigenschaften begrenzt sind.

Insbesondere der Trend zu immer dünneren Ableiterfolien stellt die Bahnführung vor zusätzliche Herausforderungen. Der Einsatz neuer Materialien, wie der von metallisch bedampften Polymerfolien als Substrat, zielt darauf ab, gegenüber den Metallfolien die Zellsicherheit zu erhöhen, sowie Material einzusparen und die Energiedichte zu steigern. Die Anforderungen an die Prozesse, insbesondere an die Bahnzugkontrolle werden dadurch aber deutlich anspruchsvoller. Neben anlagentechnischen Entwicklungen zur Verarbeitung dieser Folien gilt es auch bei der Entwicklung der Substratfolien die Anlagentechnik frühzeitig mit einzubinden (RBW 2.3).

Lösungsansätze

Um die gewünschte Qualitätssteigerung (Erhöhung des Anteils an Gutmetern, frühzeitige Erkennung von Ausschuss) zu erzielen, können optische Fehlererkennungsanlagen zum Einsatz kommen, welche frühzeitig Oberflächendefekte detektieren und diese ihren Fehlerquellen zuordnen. So können beispielsweise Streifen auf der Beschichtung einem Agglomerat im Düsenspalt zugeordnet werden. Ferner bedarf es einer Fehlerbeurteilung, in welchem Maße die detektierten Fehler die Qualität mindern. Über die Einteilung in Kategorien können Aussagen getroffen werden, ob Fehler zu einem Versagen der Zelle oder zu einer Qualitätsminderung (zweite Wahl) führen.

Weiterhin gilt es Quality Gates zu bestimmen, die möglichst früh potenzielle qualitätsvermindernde Schwankungen detektieren und entsprechend in den Prozess eingreifen. Durch das Etablieren von cyber-physischen Systemen, also der direkten Auswertung und Nutzung von inline gemessenen Daten, können Handlungsempfehlungen ausgegeben oder diese Daten als Prädiktor für die Erstellung eines digitalen Zwillings genutzt werden. Um den Ausschuss zu reduzieren, kann zudem eine Vorbehandlung der Ableiterfolie durchgeführt werden, die die Haftkraft

der Beschichtung auf der Folie erhöht. Zu nennen sind hier Laser-Mikrostrukturierung sowie plasmabasierte und elektrochemische Verfahren.

Ein verantwortungsvoller Materialeinsatz ist ein entscheidendes Thema in Bezug auf die Nachhaltigkeit. Aufgrund der hohen Materialkosten und des hohen ökologischen Fußabdrucks ist die Vermeidung von Ausschuss unabdingbar. So können z. B. beim Einrichten der Beschichtungsanlagen kamerabasierende Regelungssysteme dafür sorgen, dass die Beschichtungspositionen zum Substrat als auch die Beschichtungspositionen zueinander (oben zu unten) automatisch positioniert und im fortlaufenden Produktionsprozess weiter ausgeregelt werden.

Zusätzlich kann mit der oben beschriebenen Oberflächeninspektion und der entsprechenden Zuordnung der Fehler rasch in den Prozess eingegriffen und Ausschuss vermieden werden. Mittels einer zusätzlichen automatischen Closed-Loop-Schichtdickenmessung ist ein nahezu vollautomatisiertes Einrichten einer Beschichtungsline möglich.

Der erzielbaren Durchsatzsteigerung stehen bei allen Ansätzen stets Qualitätsfragestellungen gegenüber. Stabile Prozesse sind zur Vermeidung von Ausschuss und Einhaltung der notwendigen Kostenstrukturen zu etablieren und weiter zu optimieren. Grundlegend sind hierzu detaillierte Kenntnisse der Interaktion von Prozessführung und der erzielbaren Produktqualität (z.B. zur Vermeidung von Entmischung/Rissen oder Ausbildung von schlechten Kanten) notwendig.

Diese Kenntnisse können einen Beitrag zur allgemeinen Beschleunigung der Trocknung leisten, indem das Prozess- und Anlagenparametersetup optimiert wird. Eine wesentliche Geschwindigkeitssteigerung des Trocknungs- und Beschichtungsprozesses kann durch die Verkürzung der Verweilzeit im Trocknungsprozess realisiert

werden. Darauf zielt das Bestreben ab, Suspensionen mit höheren Feststoffanteilen herzustellen sowie den Trocknungsprozess durch eine kombinierte Trocknung, z. B. konvektiv mit IR, zu erweitern. Für den Prozess bedeutet dies, dass die Auftragswerkzeuge der Beschichtungsanlagen an die Verarbeitung äußerst hochviskoser Suspensionen angepasst werden müssen.

Bei vollständigem Verzicht auf Lösungsmittel handelt es sich um eine Trockenbeschichtung, die zumindest im Technikumsmaßstab bereits erfolgreich umgesetzt werden konnte. Dabei wird Pulver anstatt einer Suspension verwendet. Dieses kann über Heißkalandern zu einem Film verpresst werden, der direkt oder über Laminierverfahren auf die Trägerfolie aufgebracht wird. Alternativen sind PVD-Verfahren oder elektrostatische Beschichtungsansätze.

Die Weiterentwicklung von Bindermaterialien ist für hochviskose wie für die Trockenbeschichtung essenziell und auf das Maschinenkonzept abzustimmen. Insgesamt sind sowohl für die Verringerung des Lösungsmittelanteils als auch die Trockenbeschichtung intensive Materialforschungen notwendig. Des Weiteren muss die Ausschussrate reduziert werden, unter anderem indem eine verlässliche und gleichmäßige Dosierung des Pulvers insbesondere für hohe Prozessgeschwindigkeiten entwickelt wird. Erwartet wird eine Massenmarkttauglichkeit der Trockenbeschichtung von den Umfragepartnern ab dem Jahr 2030. Die Reduzierung des Lösungsmittelanteils bis hin zur Trockenbeschichtung ist gleichzeitig der wichtigste Lösungsansatz zur Steigerung der Energieeffizienz.

Ein grundlegender Beitrag, bei Nassbeschichtungen eine Durchsatzsteigerung zu erreichen, eröffnen hohe Prozessgeschwindigkeiten von größer 80 m/min bei gleichbleibender Qualität. Insbesondere bei intermittierender Beschichtung und/oder doppelseitig simultaner Beschichtung kann der Schichtauftrag geschwindigkeitslimi-

tierend werden. Dies wird umso stärker zum Tragen kommen, desto mehr die Trocknungszeit durch Lösungsmittelreduktion und innovative Trocknungstechnologien reduziert wird.

Neue Ansätze könnten neben den etablierten Verfahren das Siebdruck- oder Tiefdruckverfahren sein. Zudem ist die Einbeziehung und Ausentwicklung neuer Trocknungsverfahren, wie eine Infrarot-, Laser- oder konduktive Trocknung grundlegend.

Forschungsergebnisse zeigen, dass durch Infrarot- und Lasertrocknung ein effizienterer Energieeintrag und somit ein geringerer Energieverbrauch im Vergleich zu den herkömmlichen Trockenöfen erreicht werden kann. Weiterhin ist eine vor dem Konvektionstrockner geschaltete Lasertrocknung beispielsweise durch VCSE-Laser denkbar. Zudem könnten die Elektrodenbeschichtungen konduktiv getrocknet werden, was anlagentechnisch über eine Erhitzung des Substrats mittels Induktion umgesetzt werden könnte. Die induktive Substraterhitzung bietet für simultan beidseitige Beschichtungen besondere Potentiale, da der Hitzeeintrag in die Elektrode so nicht ausschließlich über die außenseitigen Elektrodenoberflächen erfolgen muss.

Bisherige Trocknungsprozesse nutzen vor allem die konventionelle konvektive Trocknung. Herausfordernd ist eine effiziente Kombination verschiedener Trocknungsverfahren (z.B. Konvektion und Infrarot) zur Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit. Eine Verlängerung des Trockners ist ökonomisch nicht sinnvoll und auch nicht ohne weiteres möglich, da aufgrund der Trägerfolie die Trocknerlänge begrenzt ist. Durch Kombination der Trocknungsverfahren können Trocknungsgeschwindigkeiten erhöht und somit Verweilzeiten oder ggf. sogar der Trockner verkürzt werden.

Potential zur optimierten Nutzung der Trocknungsstrecke bietet bei der sequenziellen Beschichtung das „Antrocknen“ der ersten Seite, so dass Trägerwalzen zum Transport eingesetzt werden können. Nach der anschließenden Beschichtung der zweiten Seite kann die Gesamttrocknung beider Seiten simultan erfolgen. Eine Alternative hierzu ist die direkte simultane, doppelseitige Beschichtung zweier Nassschichten. Ein Vorteil ist, dass eine Deckungsgleichheit beider Beschichtungsseiten hierbei einfacher sicherzustellen ist. Zudem kann der Effekt des „Schüsseln“ (Elektrodenwellungen und Faltenbildungen) vermieden werden, da die bei der Trocknung entstehenden Spannungen in der Elektrode gegeneinander wirken. Allerdings ist die schwebende Führung der Folie ab der zweiten Beschichtungsdüse und die Haftung der Suspension auf der Unterseite herausfordernd.

Weitere Anforderungen an den Beschichtungsprozess ergeben sich, wenn zur Durchsatzerrhöhung die Beschichtungsbreite erhöht wird. Voraussetzung ist die Weiterentwicklung der Substrate, so dass mehrstreifige Beschichtungen auf Substraten von größer 1,4 m Breite in naher Zukunft möglich werden (bspw. 4 Streifen à ca. 500 mm). Die mehrstreifige Beschichtung in diesen Breiten kann in Zukunft möglichst simultanbeidseitig und für bestimmte Elektrodenformate zudem intermittierend umgesetzt werden.

Technologien zur exakten Dosierung des Suspensionsvolumenstroms und zur Düsenentlüftung sind zur Einstellung exakter Kanten bei intermittierender Beschichtung entscheidend (sowohl für die simultane als auch für die sequenzielle Beschichtung). Die Deckungsgleichheit der Kanten kann z.B. durch optische Verfahren zur automatischen Bahnsteuerung umgesetzt werden.

Um Elektroden im Hinblick auf die Vereinigung von sehr guten Ladeleistungs-, aber immer noch herausragenden Energieeigenschaften (Reichweite) zu optimieren, werden Mehrlagenbeschichtungen immer weitreichender angewendet. Elektroden-eigenschaften können so in Abhängigkeit der Distanz zum Substrat eingestellt werden, insbesondere die ionische Diffusivität und elektrische Leitfähigkeit. Hierfür können Mehrschlitzdüsen verwendet werden. Ein weiterer Ansatz zur Verbesserung der ionischen Diffusivität in der Anodenbeschichtung ist die vertikale Ausrichtung der länglichen Graphitpartikel unmittelbar nach dem Beschichten unter Nutzung der diamagnetischen Eigenschaften von Eisenoxid-Nanopartikeln, die zuvor auf das Graphit aufgebracht werden [Billaud et al. 2016].

Durch den Einsatz von NMP als Lösungsmittel für die Kathodenbeschichtung, welches neben der hohen Toxizität mit hohen Kosten verbunden ist, sind folgerichtig Lösemittelanteile zu reduzieren oder gar zu vermeiden. Dieser Ansatz trägt zudem zur Energieeffizienz und zur Minimierung des CO₂-Fußabdrucks bei. Da der Ersatz von NMP in lösemittelhaltigen Kathodensuspensionen mittelfristig aber weiterhin erforderlich ist, steht aktuell die energieeffiziente, nahezu vollständige Rückgewinnung des Lösungsmittels im Fokus laufender Entwicklungen von Rückgewinnungssystemen.

Die Forschung an wasserbasierten Kathodensuspensionen kann Fortschritte vorweisen. Dennoch ist die Anfälligkeit für die Entstehung von Oberflächenreaktionen und der damit einhergehende Kapazitätsverlust nickelreicher Aktivmaterialien bei Kontakt mit Feuchtigkeit noch nicht zufriedenstellend. Oberflächenbeschichtungen können hier Abhilfe schaffen.

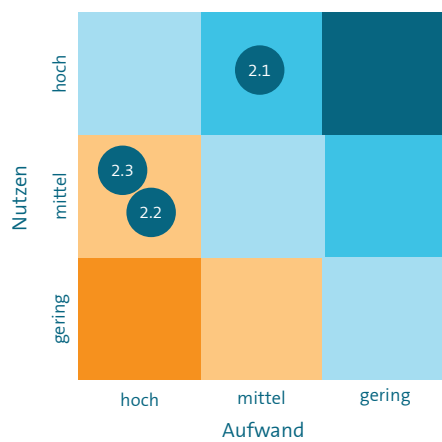
Aufwand- und Nutzenbewertung

Qualitätssichernde Maßnahmen gelten im Allgemeinen als sehr relevant und dienen der Kostensenkung sowie als Prädiktor der Toleranzbereiche für das gefertigte Produkt. Daher wird der Nutzen mit „Hoch“ und der Aufwand aufgrund des Vorhandenseins vieler Technologien aus anderen Branchen mit „Mittel“ eingeschätzt. Eine Reduzierung des Ausschusses hat unmittelbaren Einfluss auf die Kosten und die Nachhaltigkeit. Der Nutzen wird damit als „Hoch“ eingeschätzt.

Alternative Trocknungstechnologien stehen derzeit im Fokus vieler Forschungsprojekte, da durch sie neben der Durchsatzsteigerung auch eine erhebliche Steigerung der Energieeffizienz erreicht werden kann. Für den Standort Europa ist zudem die Vermeidung kritischer Materialien ein wichtiger Aspekt. Hier wurden die Trockenbeschichtung zur Lösemittelreduktion oder -vermeidung und der Ersatz von NMP durch Wasser auf Kathodenseite diskutiert. Der Aufwand wird mit „Hoch“ eingeschätzt, da eine ausführliche Material- und Anlagenentwicklung notwendig ist. Bei einer Steigerung der Energieeffizienz wird von einer erheblichen Kostenersparnis ausgegangen, da die hohen Energiekosten reduziert werden. Zudem werden die Investitionskosten und der der CO₂-Fußabdruck deutlich gesenkt. Bezüglich der Qualität kann auch bei dickeren Schichten eine Binder- und Leitadditivmischung vermieden werden. Der Nutzen wird daher mit „Mittel“ bewertet.

Die Durchsatzerhöhung spielt eine wichtige Rolle in der Batterieproduktion, da sie die Kosten dieser entscheidend verringern kann. Der Nutzen wurde mit „Mittel“ bewertet. Eine Chance zur Durchsatzsteigerung und damit verbunden zur Kostensenkung, aber auch ein gesteigerter

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	2.1	2.2	2.3
Nachhaltigkeit	↑	↑	↗
Qualität	↑	→	→
Kostensparnis	↗	↑	↑

Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag

2.1 Qualitätssteigerung/-verbesserung

2.2 Energieeffizienz und Vermeidung kritischer Materialien

2.3 Durchsatz erhöhen

hoher Entwicklungsaufwand, bietet der Einsatz innovativer Trocknungstechnologien (IR-, NIR-, Laser oder auch konduktiver Trocknung) und Weiterentwicklung simultaner Beschichtungsverfahren. Daher wurde der Aufwand mit „Hoch“ bewertet.

ISRA VISION GmbH
 Lenze SE
 Maschinenbau Kitz GmbH
 Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung
 Batteriezelle FFB

Autor:

Max-Wolfram von Horstig, TU Braunschweig

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Dr.-Ing. Stephan Witt, Geschäftsführer,
 Jagenberg Converting Solutions GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

BST GmbH
 Erhardt+ Leimer GmbH

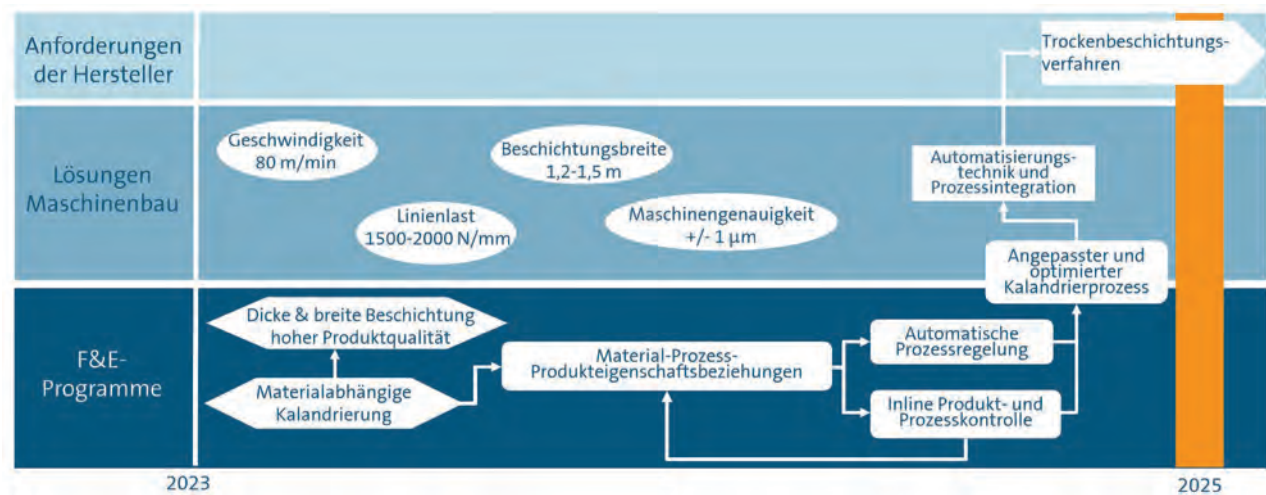


3 Kalandrieren

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
3.1	Überführung des Kalandrierprozesses in ein Trockenbeschichtungsverfahren	Fortschritt erzielt	Hoch	2024/25
3.2	Durchsatzsteigerung: höhere Geschwindigkeit bei gleichbleibender Qualität	Fortschritt erzielt	Hoch	2025
3.3	Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften und einheitliche Schichtstrukturen bei immer größeren Bahnbreiten	Fortschritt erzielt	Mittel	2025

RBW 3.1: Überführung des Kalandrierprozesses in ein Trockenbeschichtungsverfahren

Die konventionelle Elektrodenfertigung ist gekennzeichnet durch einen hohen Energie- und Ressourcenverbrauch. Hierbei steht vor allem der Trocknungsschritt als kostenintensivster im Fokus. Durch die Überführung in ein Trockenbeschichtungsverfahren lässt sich der Trocknungsschritt vollständig substituieren, wodurch auf Lösemittel verzichtet werden kann. Dies führt zu einer signifikanten Verbesserung der Energie- und Ökobilanz sowie Kostenreduktion.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ▢ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab
**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers
***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)
Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b



SAUERESSIG GKL 500 MS – Kalandersystem für intermittierend Beschichtete Elektroden
Quelle: Matthews International GmbH

Kalandrieren

Grundlagen

Die Kalandrierung (kontinuierliche Walzenverdichtung) ist der aktuell abschließende Prozessschritt der Elektrodenfertigung und ist damit als „Quality Gate“ zur Übergabe in die Zellfertigungsprozesse von besonderer Bedeutung. Während des Kalandriervorgangs wird unter Krafteinwirkung die Porosität der Beschichtung reduziert, wobei die Partikel durch Druck und Schubkräfte umgelagert werden. Hierbei kann es teilweise zur Verformung oder Bruch der Partikel kommen. Die zunächst nach der Beschichtungstrocknung etablierten elektrischen Perkolationspfade und mechanische Polymer-Binderverknüpfungen (Feststoffphasen der Elektrode) werden aufgebrochen und es findet eine Neu-etablierung der Partikel-Partikel- und Partikel-Binder-Kontakte statt. Die finale Elektrodenstruktur wird definiert. Aufgrund dessen existieren Wechselwirkungen mit den vorgelagerten Prozessen der Suspensions- und Schichtherstellung.

Grundlegend definiert der Verdichtungsprozess final alle zentralen Elektrodeneigenschaften, wie die Energie- und Leistungsdichte, die Zyklenstabilität, aber auch die korrelierenden physikalischen Beschichtungseigenschaften

(strukturelle und mechanische), welche die Elektronen- und Ionentransportprozesse bestimmen.

Zentrale Anforderung an klassische Flüssigelektrolyt-Batterien für Elektroautos ist die Realisierung möglichst hoher Energiedichten (Reichweite) bei gleichzeitiger Schnellademöglichkeit (Dichten: NMC-Kathode $> 3,5 \text{ g/cm}^3$; Graphit-Anode $\geq 1,5 \text{ g/cm}^3$). Bei Graphit- und insb. bei Graphit-Silizium-Anoden sind hohe Verdichtungen in Bezug auf die Energiedichte nicht in gleichem Maße entscheidend wie bei der Kathode, da materialseitig deutlich höhere spezifische Kapazitäten eingebracht werden. Oft wird moderater verdichtet, um Ionendiffusionslimitierungen zu vermeiden. Ein wesentliches Ziel der Verdichtung ist die Einstellung mechanisch vorteilhafter Schichteigenschaften zur Kompensation von Beanspruchungen, die während nachfolgender Fertigungsprozesse auftreten bzw. durch Schichtatmung (-ausdehnung) der Elektroden in Folge der elektrochemischen Zyklierung. Vor allem bei siliziumhaltigen Anoden ist der verbleibende Anteil der theoretisch möglichen elastischen Verformungsarbeit entscheidend. Den großen Volumenschwankungen des Siliziums zwischen Ladung und Entladung von ca. 280-300 vol. Prozent wird so entgegengewirkt. (Zum Vergleich: die Volumenausdehnung des klassischen Graphits liegt bei nur etwa 10 Prozent.)

Herausforderungen

Der sehr große Hebel bezüglich der Kostenreduktion, der mit einer lösemittelreduzierten/lösemittelfreien Elektrodenherstellung einhergeht, macht die entsprechenden Prozesse für Zell- und Anlagenhersteller aktuell zu einem der bedeutendsten Themen. Fast 40 Prozent des Energiebedarfs fallen bei der Trocknung von lösemittelhaltigen Pasten an. Im Vergleich zur klassischen Elektrodenherstellung werden bei der lösemittelreduzierten Elektrodenherstellung die Prozessschritte Beschichten und Verdichten in einem Schritt in der Kalandranlage vereint. Bei der lösemittelreduzierten Elektrodenherstellung verbleibt zudem ein Rest Lösemittel in den hochviskosen Pasten, welches als eine Art Schmiermittel fungiert und die selbstdosierende Zuführung der Paste in den Walzenspalt ermöglicht. Bei der lösemittelfreien Elektrodenherstellung entfällt diese Restfeuchte und die Dosierung der trockenen Pulvermischung stellt eine besondere Herausforderung dar. Eine für den Prozess geeignete Fließfähigkeit des Pulvers muss gegeben sein, um eine Entmischung zu verhindern.

Weiterhin ist die Verwendung von stark abrasiven Materialien (z.B. Metalloxide oder Silizium) herausfordernd durch die damit einhergehende starke Abnutzung durch Abrieb der Anlagen. Dies wirkt sich nicht nur wie in Kapitel 1 beschrieben auf Mischanlagen aus, sondern ist ebenso relevant für die Kalandrierwalzen. Hier ist eine hohe Verschleißfestigkeit der Anlagen sicherzustellen, um lange Ausfallzeiten bspw. bei einem Walzenwechsel zu vermeiden. Im Markt werden bereits Anlagen, über die eine lösemittelreduzierte oder trockene Beschichtung möglich ist, angeboten. Die Etablierung eines großskaligen Trockenbeschichtungsprozesses in die Zellfertigung steht allerdings noch aus. Dies kann durch eine enge Kooperation zwischen der Forschung, Material- und Anlagen-, sowie Zellherstellern erfolgen (RBW 3.1).

Eine weitere wesentliche Herausforderung ist die Erhöhung der Geschwindigkeit ohne Qualitätsauswirkungen (RBW 3.2). Zentrale Prozessparameter der Kalandrierung sind die Spaltweite oder die aufzubringende Linienlast, welche als Steuergrößen verwendet werden. Hinzu kommt der Einfluss der Bahngeschwindigkeit (bis zu 100 m/min), der zusammen mit dem Walzendurchmesser und der Elektrodengeometrie (Breite, Dicke) den Einzugsbereich der Verdichtungswalzen und damit die Intensität des Verdichtungsprozesses pro Zeiteinheit definiert. Mit großen Walzendurchmessern sind schonendere Verdichtungsvorgänge verbunden. Weiterhin vergrößern hohe Flächenbelastungen den Einzugsbereich und damit die Beanspruchungsfläche bei konstantem Walzendurchmesser und erhöhen die Verdichtungsintensität. Hohe Durchsatzgeschwindigkeiten erhöhen im Einzugsbereich zusätzlich die notwendige Verdichtungsleistung pro Zeiteinheit, wobei dies keine Auswirkungen auf die Qualität haben darf. In Bezug auf die Einhaltung der Qualität kann eine Erhöhung der Walzentemperatur die Verformung des Binderpolymers begünstigen und die erforderliche Linienlast bei Kathoden verringert werden. So



SAUERESSIG GKL 500 MS – Kalandersystem für intermittierend Beschichtete Elektroden (Detailaufnahme)
Quelle: Matthews International GmbH

können Elektrodenverformungen („Schüsseln“, „Wrinkles“, Elektrodenwellungen und Faltenbildungen) als Folgeprobleme aufgrund mechanisch induzierter Eigenspannungen an der Grenzfläche zum Substrat minimiert werden. Ein weiterer Ansatz zur Eingrenzung von Eigenspannungen und Sicherstellung hoher Qualität ist die Vordehnung der Substrate. Diese dient dazu eine ausgeprägte Dehnung beim Kalandrieren zu vermeiden.

Ein entscheidendes Qualitätsmerkmal einer Kalandieranlage ist die Konstanz der Soll-Spaltgröße bei hohen Durchsatzgeschwindigkeiten, dicken Elektroden und hohen Linienlasten. Diese führt durch hohe mechanische Verdichtungs- und einhergehende Verformung des Walzenstuhles zu einer Aufweitung des realen Spaltes (Ist-Spalt) und kann somit die Verdichtungsfähigkeit der Anlage einschränken.

Eine möglichst geringe Abweichung zwischen Ist- und Soll-Spalt ist neben der geeigneten Leitrußstruktur entscheidend zur Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften. Die Homogenität der Schichtstrukturen wird bereits auf Mikrolevel beeinflusst. Zielstellung ist eine homogene Verteilung der Elektronen- und Ionenstromdichten, auch bei großen Breiten der Elektroden (RBW 3.3). Speziell wird eine geringe Varianz der Ionenstromdichten (die mit Elektrolyt befüllte Hohlraumstruktur) und damit ein effektiver Diffusionskoeffizient des Elektrodenmaterials angestrebt. Herausfordernd ist die Maschinenteknik bei hohen Beschichtungsbreiten von bis zu 1,5 m (Anode) und bis zu 2,0 m (Kathode), da die Durchbiegung der Walzen möglichst gering zu halten ist und große Walzendurchmesser erforderlich sind. Hinzu kommen Abweichungen durch Verformung in Lagern oder des Walzenstuhls. Globale Zielstellung ist eine Maschinen-genauigkeit von mindestens $\pm 1 \mu\text{m}$. Die erzielbare Genauigkeit im Produkt sollte parallel Inline überwacht werden.

Sie kann als kontinuierliche Qualitätskontrolle, sowie in naher Zukunft zur intelligenten Prozesssteuerung – möglichst mittels Etablierung von Methoden zur Nutzung künstlicher Intelligenz (KI) – genutzt werden. Weitere Qualitätsmessgrößen auf Mikrolevel (z.B. Porenverteilung) sollten kombiniert mit der Schichtdicke in das Gesamtkonzept einbezogen werden, um eine möglichst genaue und exakte Qualitätserfassung und Prozesssteuerung am Quality Gate zu den Zellfertigungsprozessen zu ermöglichen.

Lösungsansätze

Hohe Produktqualitäten und eine produktorientierte Prozess- und Maschinenentwicklung sind nur mit systematischer Generierung von Know-how im Bereich der Material-/Prozess-Struktur-Eigenschaft-Beziehungen erschließbar. Hierzu ist das Verständnis der Wechselwirkung der Misch- und Trocknungsprozesse mit der Kalandrierung genauso wie die Wechselwirkung der Kalandrierung mit nachgelagerten Prozessen wie die Elektrolytbefüllung und Formierung entscheidend. Die Verdichtung, als finaler Schritt der Elektrodenherstellung, ermöglicht die gezielte Einstellung der Mikrostruktur und somit der finalen Porenstruktur innerhalb der Beschichtung. Das Porennetzwerk hat dabei direkten Einfluss auf die Elektrolytverteilung und die Benetzbarkeit der Elektrode. Dies zeigt, dass bei adäquatem Know-how des Verdichtungsprozesses eine schnelle und wissensbasierte Anpassung der Prozess- und Maschinenteknik an neue Material- und Zellgenerationstypen in der Industrie ökonomisch durchführbar ist. Zur Nutzung des vollen Materialpotentials einerseits und zur Einhaltung der hohen Produktqualitäten andererseits ist die Instrumentierung der Kalandrieranlagen mit weiterer und verbesserter in-line Messtechnik erforderlich. Dazu zählen vor allem die in-line-Schichtdickenmessung/Dichtenmessung, sowie die in-line-Detektion von Schichtdefekten und Fehlerbildern. Die damit einhergehende frühzeitigen Ausschusserken-

nung ermöglicht Ressourceneinsparung in den nachfolgenden Prozessschritten der Zellaufbau. Zusätzlich gewinnen in-line-Systeme für die Applizierung von Codes für das Tracking und Tracing von Materialien und Zellen an Bedeutung. Nicht nur das Erkennen von Schichtdefekten, sondern auch das Clustern verschiedener Fehlerbilder und das Aufstellen und Erkennen von Wirkzusammenhängen zwischen erkannten Defekten und der Prozessführung ist entscheidend. Verlässliche und präzise in-line-Messdaten bspw. über die erreichte Schichtdicke sind Voraussetzung für das Aufstellen bzw. Integrieren von autonomen und adaptiven Regelsystem (Closed-Loop-Regelung) in die Kalandieranlage. Derartige Regelsysteme ermöglichen es der Anlage, selbstständig schnell und präzise auf etwaige Probleme oder Abweichungen zwischen Ist- und Sollgröße zu reagieren. Die ist von hoher Bedeutung für die Steigerung der Produktivität der Kalandieranlage.

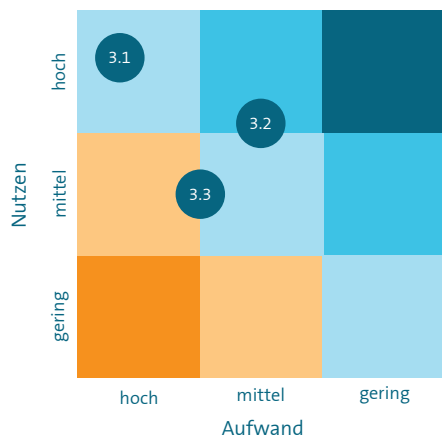
Für eine Durchsatzsteigerung ohne Qualitätsauswirkungen (homogene elektrochemische Eigenschaften müssen sicher gestellt sein) kann eine mechanische Vorspannung der Substrate, eine temperierte Kalandrierung mit Vorheizstrecke und/oder beheizbaren Walzen sinnvoll sein. Effekte wie das „Schüsseln“ – ein eigenspannungsbedingtes Verziehen und Hochwellen der Elektrode – bei hohen Linienlasten für Kathoden können so vermieden werden. Unter Temperatureinwirkung ist die Reduzierung der erforderlichen Linienlasten zur Einstellung identischer Elektrodendichten aufgrund der temperaturbedingten Verformungseigenschaften des verwendeten Binders möglich. Dabei sind die erhöhten Verformungen der Maschine und Veränderungen des Ist-Spaltes zu berücksichtigen.

Ein alternativer Ansatz zur grundlegenden Vermeidung des Schüsselns – insbesondere bei sehr dicken Elektroden – sind zweischrittige Verdichtungsprozesse, die vorteilhaft in einer Maschi-

neneinheit umzusetzen sind. Hierbei kann die Beschichtung und Verdichtung des Beschichtungsfilms auf einer Polymerfolie erfolgen. Danach erfolgt die Übertragung auf eine Metallfolie mittels Laminierprozess. Um die Produktionseffizienz im Zellbau weiter zu steigern, kann dieselbe Maschine für die Laminierung eines Separators auf die Elektrodenbeschichtung eingesetzt werden.

Eine geringe Verformung des Kalanders (Stuhl und Walzen) ist maschinenseitig zwingend erforderlich. Nur so kann ein geringer Unterschied von Soll- und Ist-Spaltmaß gewährleistet werden. Eine Maßnahme ist hier die kontinuierliche Erfassung des realen Ist-Spaltmaßes direkt zwischen den Kalandervalzen. Die Nutzung dieser Messgröße als Prozessqualitäts- und Prozessregelgröße ist empfehlenswert. Die Schichtdickengenauigkeit und Linienlast sollte grundlegend in-line überwacht und als kontinuierliche Qualitätskontrolle, sowie in naher Zukunft zur intelligenten Prozesssteuerung – möglichst mittels etablierten Methoden, echtzeitfähigen Modellen und unter Anwendung künstlicher Intelligenz (KI) – genutzt werden. Dadurch können sich „in-production research“ Konzepte eröffnen, um stetig den Produktionsprozess und das spezifische Produkt weiterentwickeln zu können. Die Einbeziehung weiterer Qualitätsmessgrößen in das Gesamtmesskonzept kombiniert mit der Schichtdicke und Linienlast ermöglicht eine genaue und exakte Qualitätserfassung und Prozesssteuerung am Quality Gate zu den Zellfertigungsprozessen. Eine Fehlerdetektion sollte nach dem Beschichten und nach dem Kalanderspalt erfolgen, sowie über ein Trackingsystem verknüpft werden. Beschichtungsfehler können so direkt oder nach der Detektion durch die Kalandrierung ausgeschleust werden. Durch Walzen, die auf Basis der Informationen der vorgeschalteten Analyseverfahren lokal und gezielt drucklos geschaltet werden können, könnte ein Wettbewerbsvorteil

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	3.1	3.2	3.3
Nachhaltigkeit	↑	↗	↗
Qualität	→	→	→
Kostenersparnis	↑	↑	↗

Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag

3.1 Trockenbeschichtungsverfahren

3.2 Durchsatzsteigerung bei gleichbleibender Qualität

3.3 Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften

generiert werden, da Beschädigungen an der Walze durch eventuelle Beschichtungsfehler vermieden werden könnten. Der unmittelbare Nutzen wären hohe Standzeiten der Walzen (Werkzeugschutz) sowie die Vermeidung von Ausfallzeiten.

Speziell die Erzielung homogener elektrochemischer Eigenschaften und einheitlicher Schichtstrukturen bei immer größeren Bahnbreiten und insgesamt eines robusten und stabilen Verdichtungsprozesses setzt eine gezielte Leitrußstrukturierung mit Aktivmaterial und Binder voraus. Maschinen- und anlagenseitig ist dafür eine intelligente Konstruktion notwendig, um Verformungen während der Verdichtung bei

hohen Linienlasten zu minimieren. Geeignete Ansätze können die Bombage²¹ der Kalandervalzen sowie Roll-Bending-Systeme sein, um Kräfte effektiv abzuleiten.

Ein weiteres zentrales Thema ist die Befähigung der Kalandrierung für aufkommende Elektrodenbreiten von 1,5 m und perspektivisch > 2 m. Die Walzen müssen in Durchmesser und Breite bei Erhaltung der Genauigkeit vergrößert werden. Walzendurchbiegung und Maschinenverformung sind durch konstruktive Maßnahmen zu minimieren, um insb. dicke Schichten hochkapazitiver Elektroden schonend verdichten zu können.

²¹ Bei der Bombage handelt es sich um eine Abweichung vom zylindrischen Walzenprofil, bei dem die Walzen in der Mitte

leicht verdickt sind. Auf diese Weise wird einer Walzendurchbiegung entgegengewirkt.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Aufwand zur Einführung eines Trockenbeschichtungsverfahrens wird als „Hoch“ bei einem gleichzeitig hohen Nutzen eingeschätzt. Trockenbeschichtungsverfahren bieten die Möglichkeit, die ökonomischen und ökologischen Aspekte in der Zellfertigung deutlich zu verbessern. Die Umstellung der Zellfertigung auf eine lösemittelfreie Elektrodenherstellung bedarf allerdings eines hohen Entwicklungsaufwands. Dies betrifft nicht nur die Kalandrierung, sondern auch vorgelagerte Prozessschritte wie den Mischprozess. Vom Pulverhandling bis zur Auftragung des Pulverbetts auf die Metallfolie gilt es viel Know-How aufzubauen.

Durchsatzserhöhung ohne Qualitätseinbußen gilt in der Fertigung allgemein als eines der Kernziele. Daher wird der Nutzen noch als „Hoch“ bei mittlerem Aufwand eingestuft. In der Vergangenheit wurden schon Fortschritte bei der Durchsatzsteigerung erreicht, in Zukunft sollte der Fokus vor allem auf der Automatisierung des Kalandrierprozesses liegen.

Voraussetzung hierfür ist eine stabile und hoch präzise in-line Messtechnik, die den Anforderungen eines schnellen und hoch dynamischen Kalandrierprozesses gerecht wird.

Die Sicherstellung homogener Produkteigenschaften ist essenziell für die Qualitätssicherung in einer Produktion, weshalb der Nutzen als „Hoch“ zu bewerten ist. Dem gegenüber wird der Aufwand als „Mittel“ bewertet. Die Sicherstellung einer homogenen Verteilung der Beschichtungsdichte über die gesamte Elektrodenbreite ist in Bezug auf die Maschinentechnik herausfordernd. Die Durchbiegung der Walze muss gering gehalten werden, während gleichzeitig immer dickere und breitere Walzen für die gewünschten höheren Durchsätze notwendig sind. Anlagenseitig kann dieser Herausforderung über Ansätze wie der Bombage der Kalandrierwalzen sowie Roll-Bending-Systeme begegnet werden.

Autor:

Alexander Diener, TU Braunschweig

Fachliche Unterstützung**Themenpate:**

Marcel Wissing, Technical Sales Manager,
Matthews International GmbH (Saueressig)

Mit weiterer Unterstützung von:

4JET microtech GmbH
BST GmbH
ISRA VISION GmbH
Lenze SE
Pepperl+Fuchs SE
SCHUNK GmbH & Co. KG

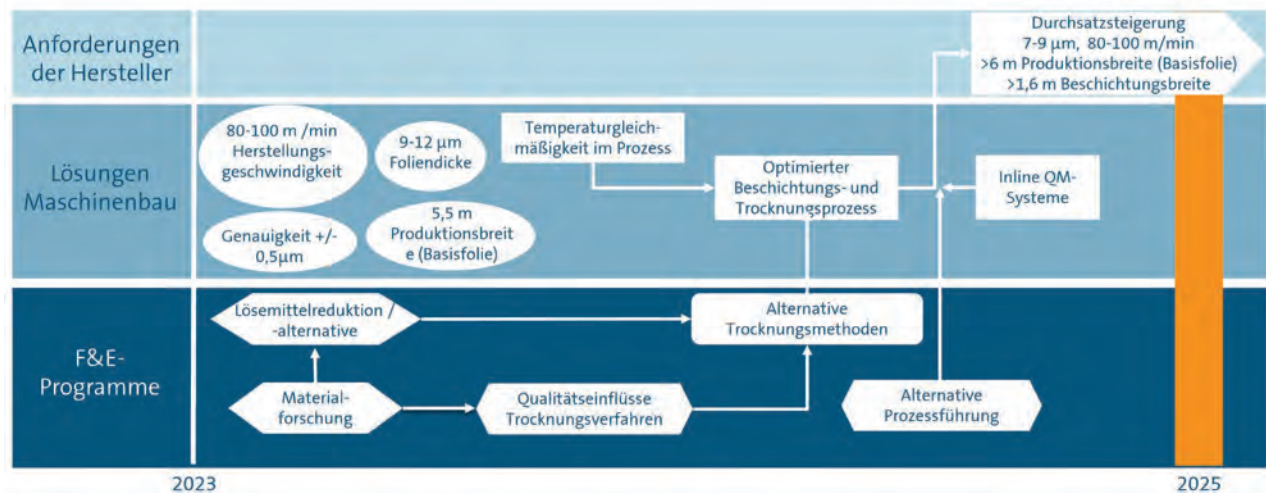


4 Separatorproduktion

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
4.1	Erhöhung des Durchsatzes	Fortschritt erzielt	Hoch	2024 - 2025
4.2	Reduktion der Separator(folien-)dicke/ Folienhandling i. V. m. hoher Yield-Rate	Fortschritt erzielt	Hoch	2024 - 2025
4.3	Nachhaltigkeit und Umweltschutz (Substitution der Lösungsmittel)	Fortschritt erzielt	Mittel	2023 - 2026
4.4	Beschichtungs- und Folienqualität für große Breiten	Fortschritt erzielt	Mittel	2023 - 2025

RBW 4.1: Erhöhung des Durchsatzes

Der zunehmende Aufbau einer europäischen Wertschöpfungskette für Batteriekomponenten erfordert auch eine europäische Separatorproduktion, die höhere Umweltschutzanforderungen im Vergleich zu asiatischen Produktionsstandorten zur Folge hat. Daraus ergeben sich diverse Herausforderungen (z. B. Alternative Lösungsmittel), die es zu begegnen gilt.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ▢ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b



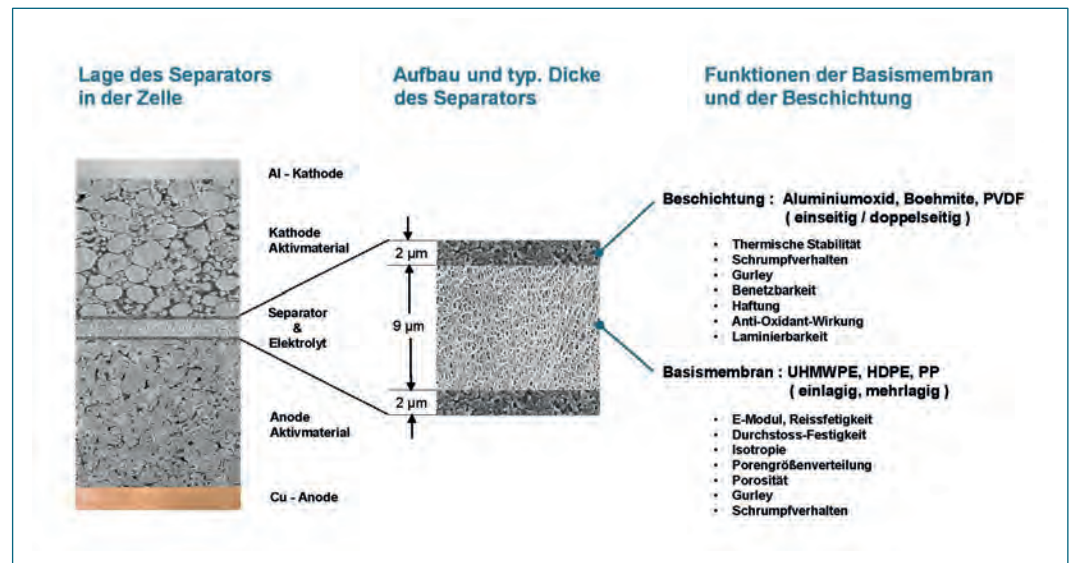
Prinzip Schaubild einer Produktionsanlage zur Herstellung von Separatoren auf Basis der Wet-Verfahrenstechnologie
Quelle: Brückner Maschinenbau GmbH & Co. KG.

Separatorproduktion

Grundlagen

Für die Produktion und den Betrieb von Lithium-Ionen-Batteriezellen ist der Separator eine entscheidende Komponente, welche die Sicherheit, die Performance und den Herstellungsprozess einer Zelle maßgeblich beeinflusst. Die Auswahl geeigneter Separatoren ist zudem vom Zell-typ (Zylindrisch, Prismatisch, Pouch) und dem Einsatzzweck abhängig. Da der Bedarf an Li-Ionen-Batterien für die Elektromobilität in der nächsten Dekade mit einem Anteil von ca. 90 Prozent des gesamten Li-Ionen-Batteriemarktes dominant ist, wird an dieser Stelle auf die speziellen Anforderungen für dieses Marktsegment eingegangen. Für EV-Anwendungen haben sich großtechnisch produzierte Membranen auf Polyolefinbasis etabliert, die aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) und häufig zusätzlichen keramischen Beschichtungen bestehen. Andere Separatortypen wie keramisch imprägnierte Polyester- (PET) oder Aramid- basierte Vliesmaterialien spielen für diese Anwendung eine untergeordnete Rolle. Bei den polyolefinbasierten Separatoren ist die Aufgabe der Basisfolie, eine hohe mechanische Festigkeit (E-Modul, Durchstoß-Festigkeit) bei einer geringen Dicke und einer Porosität von ca. 35-50 Prozent zu gewährleisten. Die gewünschte Porosität und Porenstruktur wird bei PP im „Dry“-Prozess durch die für Polypropylen typische semikristalline Struktur in Verbindung mit einem monoaxialen

Streckprozess in Längsrichtung erzielt. Bei PE wird der „Wet“-Prozess eingesetzt, bei dem vorzugsweise Ultrahochmolekulargewichtiges Polyethylen (UHMWPE) mit Hilfe eines Doppelschneckenextruders unter Verwendung von großen Anteilen Mineralöls (60-75 Prozent) aufgeschmolzen, mittels Breitschlitzdüse extrudiert und nachfolgend abgekühlt werden. Anschließend wird die Folie zur Erreichung der Porenstruktur und Festigkeit biaxial verstreckt. Das eingesetzte Mineralöl muss im Folgeschritt mit Hilfe eines Extraktions- und Trocknungsverfahrens unter Verwendung von Dichlormethan (DCM) vollständig entfernt werden. DCM wird dabei aufgrund der guten Löslichkeit für Mineralöle, sowie des niedrigeren Siedepunktes verwendet, hat jedoch auch eine klimaschädliche sowie toxische Wirkung. Durch die in einem separaten Prozess aufgebraute keramische Beschichtung kann die thermische Stabilität maßgeblich erhöht werden, was entscheidende Vorteile für die Sicherheit der Zellen bietet. Dafür werden hauptsächlich keramische Materialien (z. B. Aluminiumoxid, Boehmite) eingesetzt, die das thermische Schrumpfverhalten des Separators deutlich reduzieren und auch oberhalb kritischer Temperaturen von 150 °C eine elektrische Trennung von Anode und Kathode sicherstellen können und so interne Kurzschlüsse vermeiden. Die keramische Beschichtung kann einseitig oder beidseitig aufgebracht werden und hat eine typische Dicke von jeweils 2 µm. Außer dem Vorteil der thermischen Beständigkeit verbessern die Beschichtungen die



Schematische Darstellung eines für EV-Anwendungen typischen Separators
Quelle: Brückner Maschinenbau GmbH & Co. KG.

Benetzbarkeit für die Elektrolytflüssigkeiten, woraus sich Vorteile für den Produktionsprozess der Zellen ergeben. Auch die Langzeitstabilität der Zellen wird durch die Antioxidant-Wirkung der Beschichtung erhöht. Für flächige Zelltypen können die Elektroden mit dem Separator zusammenlaminiert werden, wenn zuvor als weitere Beschichtung PVDF, meist punktförmig, aufgebracht wird [Wu 2019].

Herausforderungen

Für eine wettbewerbsfähige Herstellung von Separatoren im Massenproduktionsmaßstab sind vollautomatisierte Produktionsabläufe, eine hohe Effizienz (geringe Fehlerraten), eine ausgeprägte Prozessintegration, sowie die Kenntnis von Wirkzusammenhängen essenziell. Für die angestrebte Kostenreduzierung ist eine weitere Erhöhung der erzielbaren Ausstoßleistungen, d.h. größere Breiten und Produktionsgeschwindigkeiten unumgänglich (RBW 4.1). Dies gilt sowohl für die Basismembran als auch für den Beschichtungsprozess. Zudem muss die gleichbleibend hohe Qualität der Basismembran sowie der Beschichtung gewährleistet sein, da dies direkte Auswirkungen auf die Produktionsprozesse, die Separator-Spezifikation und schlussendlich auf die Sicherheit der Batteriezellen hat (RBW 4.4). Insbesondere sind lokale Fehlerstellen in der Basismembran und der Beschichtung als kritisch einzustufen. Hierzu ist eine 100 Prozent

optische Kontrolle für die produzierte Fläche erforderlich jedoch stellte die Detektion Fehlerstellen im µm-Bereich eine große messtechnische Herausforderung dar. Die meisten Eigenschaften der Separatoren können nur stichprobenartig im Labor ermittelt werden. Eine verbesserte Prozesskontrolle unter Einbindung möglichst vieler Inline-Messwerte (u. a. Dicke, Beschichtungsdicke, Porosität) ist daher anzustreben. Zur Erhöhung der gravimetrischen sowie volumetrischen Energiedichte der Zellen müssen die Foliendicken der Separatoren weiter verringert werden ($< 13 \mu\text{m}$ ($9 \mu\text{m}$ Basisfolie + $4 \mu\text{m}$ Coating), perspektivisch $9 \mu\text{m}$ ($7 \mu\text{m}$ Basisfolie + $2 \mu\text{m}$ Coating)). Die größte Herausforderung bei den dünneren Folien ist die gleichbleibende hohe Qualität aller Folieneigenschaften, um die hohen Anforderungen der Zellsicherheit zu garantieren. Darüber hinaus wird das Handling der Folien mit abnehmender Separatordicke herausfordernder (RBW 4.2) und die Ausbeute an Gut-Produktion (Yield) nimmt dabei ab. Derzeit werden Separatorfolien überwiegend in Asien (Japan, Korea und China) produziert. Es besteht für die europäische Industrie ein großes Interesse an einer lokaler Produktion in Europa, auch um die derzeitigen Abhängigkeiten aufzulösen. Damit stellen die hohen Anforderungen der europäischen Union an die Nachhaltigkeit sowie Umweltfreundlichkeit von Prozessen eine Hürde und zugleich

Chance dar (RBW 4.3). Für die Basisfolie besteht eine Herausforderung darin, einen umweltfreundlichen Ersatz für die verwendeten Lösungsmittel zu finden und für den Beschichtungsprozess sollten zukünftig nur noch wasserbasierte Coating-Verfahren eingesetzt werden.

Lösungsansätze

Für die angestrebte Steigerung des Durchsatzes sollte sowohl die Produktionskapazität als auch der Anteil der Gutproduktion für die Basismembran und die Beschichtung betrachtet werden.

Basismembran

Die Produktionsgeschwindigkeit der Basisfolie muss zur Steigerung des Durchsatzes auf Geschwindigkeiten von > 80 m/min und Breiten von > 6 m angehoben werden. Durch Anhebung der Rollenlänge auf > 1000 m können zusätzlich weitere Steigerungen der Produktivität sowohl bei der Basisfolie als auch bei den Folgeprozessen realisiert werden. Dies ermöglicht die Produktion von „Mutterrollen“ mit größerer Produktkapazität und verringert die Frequenz der Rollenwechsel bei den nachfolgenden Schneid- und Beschichtungsprozessen. Um die höheren Geschwindigkeiten und Rollenlängen zu ermöglichen, müssen die Folieneigenschaften, insbesondere die Foliendicke und Porosität, in einem engen Fenster gehalten und die Zugspannungen im Wickelprozess genau kontrolliert werden, um ein Abreißen der Folie und Wickeldefekte zu verhindern. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass eine hohe Qualität der Basisfolie über die gesamte Arbeitsbreite erreicht wird, um die Ausbeute an Gutfolie zu erhöhen.

Beschichtung

Die Basismembran wird derzeit nach einem ersten Schneidprozess auf einer Breite von $1,0 - 1,6$ m beschichtet. Um eine wirtschaftlich interessante Breite von z.B. 2 m zu erreichen, muss eine sehr gute Planlage gewährleistet sein sowie die Beschichtungsdicke über die gesamte Breite sehr konstant aufgetragen werden. Bei den Geschwindigkeiten ist eine Steigerung von z. Zt.

300 m/min auf 500 m/min denkbar. Dabei werden Grenzen erreicht, die nur durch eine gute Abstimmung der Beschichtungs-Dispersion (Viskosität, Schaumbildung) und dem Auftragsverfahren, z. B. mit Gravurwalzen überwunden werden können. Zusätzlich kommen der Warenbahnführung und der Trocknungstechnik durch einen langen Ofen bei geringen Zugspannungen von ca. $10 - 20$ N eine besondere Bedeutung zu. Bei der Aufbereitung der Beschichtungs-Dispersionen sind Steigerungen der Ausbeute und Qualität z.B. durch kontinuierliche Misch- und Dispergiersysteme möglich, die mit hoher Dosiergenauigkeit die Beschichtungsanlagen speisen können.

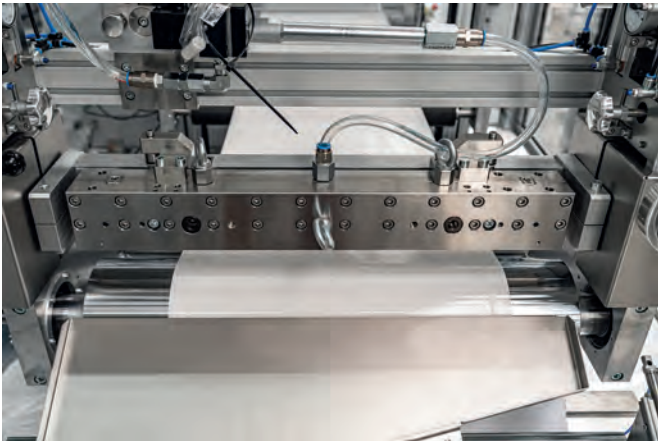
Die Forderung einer Dickenreduktion gilt sowohl für die Basismembran als auch für die Beschichtung, erfordert aber unterschiedliche Maßnahmen.

Basismembran

Geringere Foliendicken bis zu < 5 μm für die Basisfolie können bereits heute realisiert werden und werden hauptsächlich für den Consumer-Markt abgerufen. Die Herausforderung liegt darin, die Folie bei gleichbleibend hohen Geschwindigkeiten zu produzieren, da die Zugspannungen und Dickentoleranzen in einem engen Fenster kontrolliert werden müssen. Auf die mit der Foliendicke abnehmende Durchschlagsfestigkeit muss ein besonderes Augenmerk gelegt werden, da dieser Wert eine wichtige Rolle für die Sicherheit der Zelle spielt. Um die sinkende Festigkeit zu kompensieren, müssen Folien mit ultrahochmolekulargewichtigen Polyethylen (UHMWPE) und mit höheren Streckverhältnissen produziert werden.

Beschichtung

Um die erforderliche thermische Stabilität mit einer reduzierten Beschichtungsdicke zu erreichen, sind im Wesentlichen Rohstoff- und Rezepturentwicklungen erforderlich. Dabei gibt es Ansätze, mit nanoskaligen Keramikpartikeln in Verbindung mit geeigneten Bindersystemen



Breitschlitz-Beschichtungsanlage für Batterietechnologien, Quelle: Coatema Coating Machinery GmbH

einen deutlich reduzierten thermischen Schrumpf für das Gesamtsystem zu erzielen, woraus eine potenzielle Dickenreduzierung der Beschichtung abgeleitet werden kann. Die Sicherstellung einer möglichst schmalen Partikelgrößenverteilung unter Vermeidung von einzelnen größeren Partikeln und Verunreinigungen stellen hohe Anforderungen an die Maschinenhersteller und Produzenten der keramischen Beschichtungsmaterialien.

Die eingesetzten Herstellungsprozesse für die Basismembran und die Beschichtung müssen die in Europa geltenden Umweltstandards erfüllen und werden zukünftig stärker nach diesen Kriterien bewertet. Insbesondere der CO₂-Fußabdruck wird zunehmend für den Vergleich und die Auswahl verschiedener Produkte und Prozesse herangezogen. Das führt zu einer kritischen Bewertung der eingesetzten Rohmaterialien sowie dem spezifischen Energieverbrauch.

Basismembran

Neben der Absenkung des spezifischen CO₂-Fußabdrucks durch Steigerung des Durchsatzes muss ein Augenmerk auf den Einsatz und die Rückgewinnung der verwendeten Lösemittel und Mineralöle im Nass-Prozess gelegt werden. Das bislang viel verwendete Extraktionsmittel

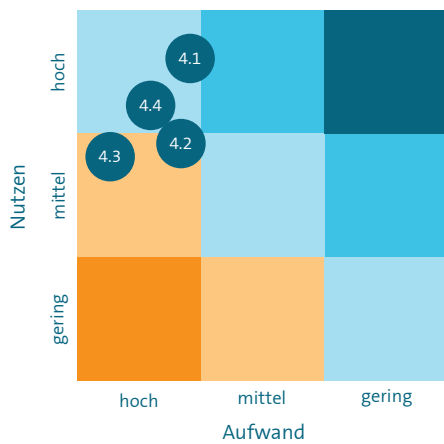
DCM muss durch geeignete, umweltfreundliche Alternativen ersetzt werden, welches Einfluss auf die Prozessführung und Lösemittelrückgewinnung hat. Durch den Einsatz von hochqualitativen Mineralölen kann die Recyclingfähigkeit verbessert werden, um den Rohressourcenbedarf zu minimieren.

Beschichtung

Für den Beschichtungsprozess werden sowohl lösungsmittelbasierte als auch wässrige Dispersionen eingesetzt. Unter Umweltsichtspunkten sind wässrige Systeme vorzuziehen, u. a. auch um auf die energieaufwendige Lösungsmittel-Rückgewinnung und kritische Lösungsmittel verzichten zu können. Mit geringeren Beschichtungsdicken und höherem Feststoffanteil sinkt der für die Verdunstung des Wasseranteils erforderliche Energieaufwand, welches umweltfreundlicher ist.

Um eine nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit bei der Separatorproduktion zu erreichen, ist ein umfangreiches Prozess- und Produktmonitoring notwendig. Unter diesen Punkt fallen die Echtzeit-Aufnahme von Maschinen-, Prozess-, Verfahrens- sowie Produktparameter zur Qualitätskontrolle und direkten Steuerung/Regelung der Prozessführung. Dabei werden bereits Methoden aus der KI eingesetzt. Es macht Sinn die Daten bereits frühzeitig bei Vorversuchen aufzuzeichnen, um die Inspektionssysteme entsprechend anzulernen. Ebenso wichtig ist die Vernetzung mit den weiteren Fertigungsschritten der Zelle und die Verknüpfung zur Qualität des Endproduktes herzustellen. Da der Separator Einfluss auf die Folgeprozesse und das Endprodukt hat, wäre es fahrlässig ihn als bloßes Zukaufteil zu betrachten. Zudem sollte eine kritische Endproduktkontrolle durchgeführt werden, um die größtmögliche Sicherheit und die Einhaltung der finalen Produkthanforderungen zu gewährleisten.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	4.1	4.2	4.3	4.4
Nachhaltigkeit	↗	↗	↑	↗
Qualität	→	↗	→	↑
Kostenersparnis	↑	↑	↗	↗

Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag

4.1 Erhöhung des Durchsatzes

4.2 Reduktion der Separator(folien-)dicke/
Folienhandling i. V. m. hoher Yield-Rate

4.3 Nachhaltigkeit und
Umweltschutz

4.4 Beschichtungs- und Folienqualität
für große Breiten

Basismembran

Die Homogenität der Folieneigenschaften über die Arbeitsbreite ist entscheidend für die Qualität und Ausbeute der finalen Folie. Die standardmäßig verwendete Messung der Foliendicke kann durch Inline-Messung von Porosität, Gurley-Wert sowie durch optische Inspektionssysteme erweitert werden, um Abweichungen frühzeitig zu erkennen und die Prozesse anzupassen.

Durch die Vernetzung der Messdaten aus der Basisfolienproduktion mit den Folgeprozessen können weitere Produktivitätssteigerungen erreicht werden.

Beschichtung

Die Inline-Messtechnik für den Beschichtungsprozess sollte mindestens die Erfassung der Nassschichtdicke und der Trockenschichtdicke beinhalten. Dazu sind die verwendeten Mess-

systeme weiterzuentwickeln um bei den geringen Dicken von 1 - 2 µm noch eine ausreichende Auflösung zu erzielen. Optische Inspektionssysteme für die Eingangs- und Endkontrolle sind als 100 Prozent-Kontrolle der produzierten Fläche zur Detektion von Fehlstellen erforderlich. Hierbei sind bei den zukünftig geforderten Breiten und Geschwindigkeiten Grenzen für die Messgenauigkeit bzw. Auflösung gesetzt, die es durch weiterentwickelte Messtechniken zu durchbrechen gilt.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Die Erhöhung des Durchsatzes (RBW 4.1) besitzt den höchsten Nutzen aufgrund möglicher signifikanter Kosteneinsparungen. Gleichzeitig ist dafür jedoch ein hoher Aufwand zur Entwicklung schneller Beschichtungs- und Bahnführungstechnologien notwendig. Einen Beitrag zur Nachhaltigkeit würde insbesondere durch die

„Durchbrechung“ der RBW 4.3 beispielsweise durch die Substitution toxischer Lösungsmittel geleistet werden. Der Aufwand hierfür wird allerdings als besonders hoch erachtet.

Autor:

Sebastian Wolf, RWTH Aachen University



Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Karl Zimmermann, Director Sales & Marketing,
Dr. Thomas Knoche, Research &
Development Brückner Maschinenbau GmbH &
Co. KG

Dr. Jürgen Breil, Berater für Batterieseparatoren,
BO-Film Consulting

Mit weiterer Unterstützung von:

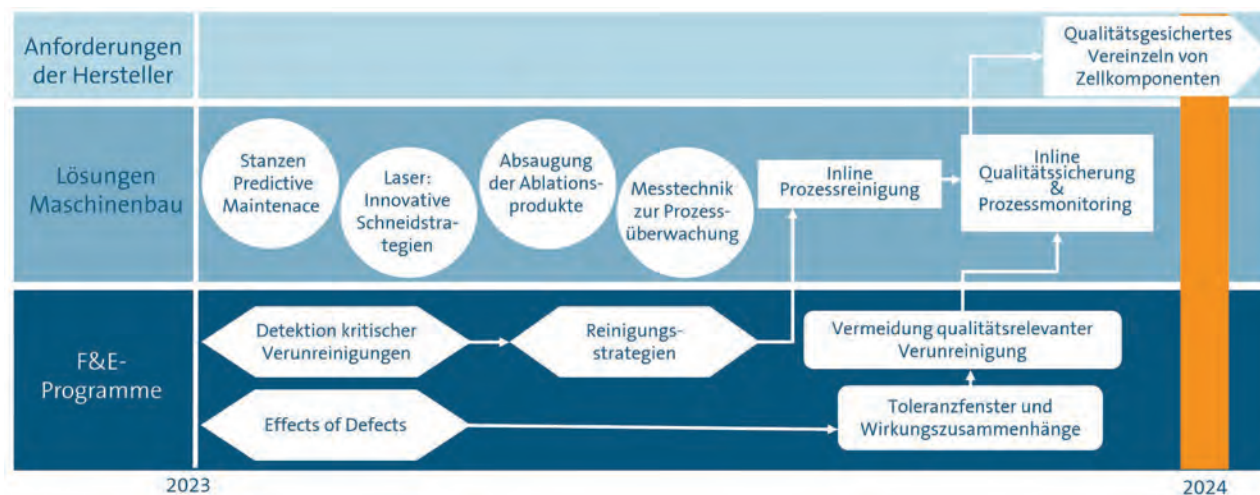
BST GmbH
ISRA VISION GmbH

5 Vereinzeln

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
5.1	Inline Qualitätssicherung und Prozessmonitoring	Fortschritt erzielt	Hoch	2024
5.2	Reduzierung/Vermeidung von Verunreinigungen	neu	Hoch	2024
5.3	Verbesserung der Taktzeit durch produktivere Handhabungssysteme	Fortschritt erzielt	Hoch	2025
5.4	Qualitätssicheres Vereinzeln von neuartigem/innovativem Elektodenmaterial	neu	Hoch	2026

RBW 5.1: Qualität und verlässliches Monitoring

Im Vereinzelnprozess entstehende Rückstände können aufgrund ihrer Größe Kurzschlüsse in der Zelle verursachen. Die Partikelgröße variiert mit der Vereinzelnungstechnologie. Aktuell können bereits durchs Filtertechniken und Predictive Maintenance der Werkzeuge Qualitätsoptimierungen erzielt werden. Diese Techniken müssen weiterentwickelt und durch ergänzende Verfahren sowie entsprechende Qualitätsmessungen ergänzt werden.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ▢ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

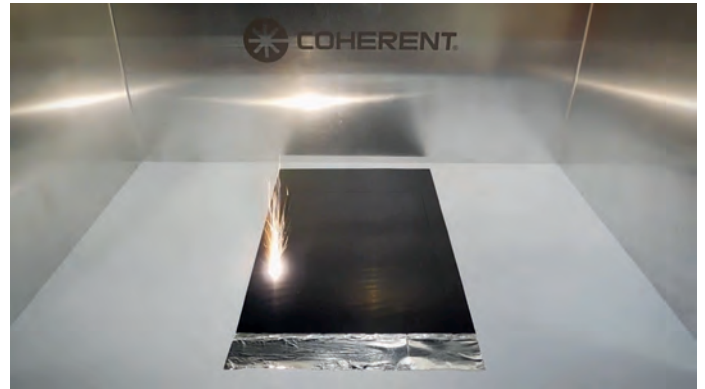
Vereinzeln

Grundlagen

Beim Vereinzeln werden aus den Elektroden-/Separatorencoils einzelne Anoden-, Kathoden und Separator sheets herausgetrennt. Hierfür haben sich zwei Prozesse, das Stanzen mittels eines Schermessers sowie das thermische Schneiden mittels Laserstrahlung, etabliert.

Der große Vorteil von Stanzprozessen liegt darin, dass sich sehr saubere Schnittkanten realisieren lassen. Dadurch ist es möglich, höchsten Qualitätsanforderungen zu genügen. Nachteilig ist, dass es zum direkten Kontakt des Schneidwerkzeugs mit den Elektroden kommt. Durch die dabei entstehende Abnutzung des Schermessers ist eine regelmäßige Wartung und Aufarbeitung der Schnittkanten notwendig. Zudem wird das Schneidergebnis negativ beeinflusst, da die Schnittkantenqualität mit der Nutzungsdauer des Schneidwerkzeugs abnimmt. Aufgrund der Abnutzung des Werkzeugs kann es zu einer mechanischen Umformung der Schnittkanten und im schlimmsten Fall zum Lösen der Beschichtung vom Stromsammelr kommen.

Das Laserschneiden ist ein berührungsloser Prozess und damit verschleißfrei, was zu einer konstanten und reproduzierbaren Schnittkantenqualität führt. Die hohe Flexibilität der Laserführung ermöglicht grundsätzlich eine Anpassung des Schneidprozesses an geänderte Produktionsbedingungen, wobei die anlagenspezifischen Randbedingungen zu beachten sind. Ein Nachteil bei der Vereinzelung mittels Laserschneiden ist, dass es sich um einen thermischen Trennprozess handelt und es zu einer Wärmeeinflusszone (WEZ) entlang der Schnittkante kommt. Zudem kann es durch die lokale Erhitzung und das unterschiedlich schnelle Verdampfen der Beschichtung und der Trägerfolie, insbesondere bei hohen Beschichtungsdicken, zur Gratbildungen an der Schnittkante kommen. Darüber hinaus erfordern



Laserschneiden von beschichtetem und unbeschichtetem Elektrodenmaterial
Quelle: Coherent

höhere Schichtdicken einen höheren Energieeintrag beim Schneiden. Die Verdampfung an der Schnittkante und damit auch die Kontaminationsbelastung nehmen zu [Schmitz 2014].

Die Schneidgeschwindigkeiten liegen beim Stanzen bei bis zu 0,1 s/sheet. Beim Laserschneiden werden, je nach Elektrodendicke, Schneidgeschwindigkeiten zwischen 1 und 4 m/s, umgesetzt. Dadurch können in Abhängigkeit der auszuschneidenden Geometrie bis zu 0,06 s/sheet realisiert werden. Unabhängig davon, welches Schneidverfahren eingesetzt wird, ist stets der Greif- und Handlingsprozess der Elektroden und Separatorblätter der zeitlich limitierende Faktor beim Vereinzeln, welcher höheren Taktzeiten entgegensteht [Luetke2011], [Korthauer2013].

Herausforderungen

Grundsätzlich ist es mit beiden Schneidverfahren möglich, qualitativ hochwertige Schnittkanten zu erzeugen. Allerdings ergeben sich in beiden Schneidprozessen Herausforderungen, denen begegnet werden muss.

Die Vereinzelungsprozesse stellen hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung und das Prozessmonitoring. (RBW 5.1) Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich, unabhängig vom gewählten Schneidverfahren, um hochdynamische Prozesse handelt. Dementsprechend werden Systeme benötigt, die in der Lage sind, die Qualität des Schneidergebnisses auf Basis

der erfassten Daten zu beurteilen. Daraus ergeben sich zum einen hohe Anforderungen an die Datenerfassung und zum anderen aber auch an die Datenverarbeitung und die Bewertung. Von besonderer Bedeutung ist die Bewertung der Schnittkanten. Durch unpassende Schneidparameter beim Laserschneiden oder eine Abnutzung der Schneide beim Stanzen kann es zu ungenügenden Schnittkanten kommen. Beispiele hierfür sind eine Ablösung der Beschichtung vom Stromsammel beim Stanzen oder die Bildung einer ausgeprägten Wärmeeinflusszone (WEZ) mit undefinierten Eigenschaften des Aktivmaterials sowie Schmelzrückstände am Stromsammel beim Laserschneiden.

Etablierte Verfahren zur Offline-Bewertung der Schnittkantenqualität wie die Bewertung von Schliffbildern oder die Durchführung von Messungen mittels Laser-Scanning-Mikroskop können nicht direkt in Schneidanlagen integriert werden, sodass die Entwicklung und Implementierung von geeigneten Verfahren zur Sicherung der Qualität im Schneidprozess notwendig ist.

Qualitätskritische Verunreinigungen können in beiden Schneidprozessen entstehen. So kann es durch das Resublimieren von abgetragenem Material beim Laserschneiden sowie durch eine Gratbildung und ein Abplatzen der Beschichtung beim Stanzen zu Verunreinigungen kommen. Dabei liegen lose Partikel auf der Beschichtung. In der Lithium-Ionen-Zelle können diese Verunreinigungen zur lokalen Verdichtung des Separators führen, was eine erhöhte mechanische und thermische Belastung zur Folge haben kann. Dies erhöht das Risiko für Lithium-Plating in der Zelle, was im kritischen Fall zu einer Beschädigung des Separators und zum Kurzschluss der

Zelle führt. Eine Herausforderung (RBW 5.2) liegt daher grundsätzlich in der Vermeidung von Verunreinigungen bei der Herstellung von konventionellen Elektroden.

Die schnelle Handhabung des Materials, bei immer größer werdenden Batterie-/Elektrodenformaten (bspw. Bladeformat mit bis zu 1,2 m langen Elektroden, Rundzelle 4680) (RBW 5.3) stellt eine weitere Herausforderung dar. Durch die hohen erzielbaren Schnittgeschwindigkeiten ist der geschwindigkeitslimitierende Schritt nicht der Schneidprozess, sondern die Handhabung bzw. die Zu- und Abführung des Elektrodenmaterials. Hierbei ist die Realisierung einer Hochgeschwindigkeitshandhabung aufgrund des veränderten Zwischenproduktzustandes von kontinuierlich zu diskontinuierlich sowie der Sensibilität des Produktes als besonders herausfordernd einzustufen.

Schneidprozesse müssen an neuartige und innovative Elektroden und Separatoren angepasst werden (RBW 5.4) Dies betrifft zum einen die Verarbeitung dicker Hochleistungselektroden, aber auch Schneidprozesse für neue Materialien. Exemplarisch hierfür sind die derzeitigen Forschungsarbeiten zu lithiumhaltigen Anoden²², welche für eine mechanische Vereinzelung nicht geeignet sind und zwingend mit kontaktlosen Technologien prozessiert werden müssen. Des Weiteren wird für leichtere und dünnere Stromkollektoren, eine mit Metall beschichtete Folie mit einem Kunststoffkern erprobt²³, welche aufgrund der stark unterschiedlichen Eigenschaften zwischen der Beschichtung, der Kupfer/Aluminiumschicht und dem Kunststoffkern eine Anpassung des

²² PräLi: „Präolithierung von Elektroden“ (Förderkennzeichen 03XP0238B, 2022); ProLiMA – „Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden – Konfektionierung, Handhabung und Kontaktierung“ (Förderkennzeichen 03XP0182F, 2023)

²³ PolySafe: „Forschungsprojekt zu Metall-Polymer-Stromkollektoren zur Steigerung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien“ (Förderkennzeichen 03XP0408)

Vereinzelungsprozesses erfordert [Gruhn2023]. Die Anpassungen betreffen dabei aber nicht ausschließlich den Schneidprozess an sich, sondern es sind auch Anpassungen der Anlagenperipherie notwendig. So erfordert die Vereinzelung dünner Folien angepasste Absaugungsstrategien.

Lösungsansätze

Um den Herausforderungen beim Vereinzeln zu begegnen, werden unterschiedlichste Maßnahmen verfolgt. So werden Monitoring-Systeme zur Bestimmung der Schnittkantenqualität und der Sheet-Oberflächen sowie zum Monitoring des Schneidresultats erforscht ([zum Beispiel thermografische Methoden](#))²⁴, um eine zuverlässigen Ausschusserkennung zu ermöglichen. Essenziell dafür sind berührungslos arbeitende oder optische Systeme mit hoher Auflösung, die beispielsweise kritische Ablationsprodukte auf der Oberfläche identifizieren oder die Ausprägung der Schnittkanten erfassen können. Herausfordernd sind hierbei die hohen Prozessgeschwindigkeiten, die einer industriellen Umsetzung entgegenstehen. Neuartige bildgebende Inline-Oberflächeninspektionsverfahren aus verwandten Industrien bieten hier die Chance zur Prozessoptimierung. Mit Hilfe von Technologietransfer werden diese auf die Batterieproduktion adaptiert und in Forschungsvorhaben weiterentwickelt.

Beim Stanzen wird Predictive Maintenance²⁵ eingesetzt, um die Abnutzung des Schneidwerkzeugs frühzeitig zu erkennen und Verunreinigung durch Fremdpartikel zu vermeiden. So können Gegenmaßnahmen zur Vermeidung

von qualitativ schlechter Schnittkanten frühzeitig veranlasst werden. Ein positiver Nebeneffekt ist die damit einhergehende längere Lebensdauer der Werkzeuge.

Im Vereinzelungsprozess stellt die Absaugung von Kontaminationen (entstehende Gase, Mikro- und Nanopartikel) eine Maßnahme dar, qualitätskritische Verunreinigungen zu minimieren. Die Optimierung der Absaugung ist in diesem Zusammenhang speziell beim Laserschneiden notwendig, um das Resublimieren von Partikeln an der Schnittkante und Schneidrückstände auf der Elektrode zu vermeiden. Zudem ist es erforderlich, die abgesaugte Luft zu filtern, da die abgesaugten Partikel gesundheitsgefährdend sein können. Dazu ist eine auf die Anwendung und den Schneidprozess exakt abgestimmte Absaugungs- und Filtertechnik erforderlich, da die Partikelgrößen wesentlich von der genutzten Laserquelle und den Schneidbedingungen abhängen [[Case Study ULT](#)].

Ein Ansatz um die Partikelentstehung zu reduzieren, bieten alternative Laserquellen mit hoher Brillanz und zunehmend größeren mittleren Laserleistungen, die eine hohe Rayleighlänge aufweisen, (single mode Faserlaser).

Sofern sich die Kontaminationen nicht vermeiden lassen und eine ausreichende Absaugung nicht gewährleistet werden kann, ist die Reinigung der Elektrodenblätter nach dem Vereinzeln essentiell. Hierbei besteht die Herausforderung darin, dass sich die Eigenschaften der Zellmaterialien nicht verändern und die Kosten für den Zellhersteller tragbar sind.

²⁴ <https://www.ndt.net/article/dgzfp-irt-2013/papers/vortragProzent2016.pdf> (März 2023)

²⁵ Prädiktive Instandhaltung auf Basis historischer Daten oder in Echtzeit verfügbarer Qualitätsmerkmale

Bei der CO₂-Schneestrahlsreinigung werden Verunreinigungen mittels Kohlenstoffdioxid rückstandslos und trocken entfernt. Vorteile sind die gute Automatisierbarkeit und die Möglichkeit der kontinuierlichen Prozessführung. Der Einsatz hängt jedoch von der Temperatur- und der Materialverträglichkeit des Kohlenstoffdioxids mit der beschichteten Trägerfolie ab [\[Case Study acp\]](#).

Generell ist es wichtig, Toleranzfenster und Wirkzusammenhänge zur Vermeidung von qualitätsrelevanten Verunreinigungen zu erforschen und zu validieren. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass es durch die Anpassung der Schneidparameter möglich ist, die Größe der Kontaminationen soweit abzusinken, dass keine Schäden am Separator entstehen [\[Jansen2022\]](#).

Zur Steigerung der Taktzeiten sind beim Laserstrahlschneiden neuartige Schneidstrategien notwendig. Im Hinblick auf die Erhöhung der Taktzeit bietet das kontinuierliche Laserschneiden (*cutting on the fly*) in einem kontinuierlichen Fertigungsprozesse das größte Potenzial. Eine kontinuierliche Bearbeitung ist insbesondere vorteilhaft, da hierdurch transiente Belastungen des Elektrodenmaterials vermieden werden und Folienrisse oder Beschädigungen aufgrund hoher An- und Abfahrtgeschwindigkeiten ausgeschlossen werden können. Ein alternativer Ansatz durch den Einsatz eines Hochleistungslasers und eine Strahlformung zur Realisierung einer Laserstanze wird im Forschungsprojekt HoLiB erforscht.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Da das Vereinzeln wesentliche Auswirkungen auf die spätere Zellperformance hat, wird der Nutzen optimierter Schneidprozesse insgesamt als hoch eingeschätzt. Geringere Kontaminationsgrade durch einen verbesserten Schneidprozess und eine verbesserte Schnittkanten

qualität durch prozessintegrierte Maßnahmen zur Qualitätssicherung, resultieren in einer höheren Lebensdauer der Lithium-Ionen-Zellen und führen somit zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit.

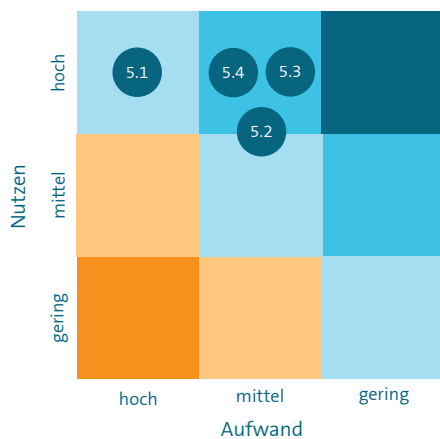
Die Einführung verlässlicher Methoden zur Inline-Qualitätssicherung und zum Prozessmonitoring bietet die Chance, durch die Überwachung des Vereinzlungsprozesses die Qualität des Schneidergebnisses, insbesondere die Schnittkantenqualität, signifikant zu steigern.

Dadurch wird der Ausschuss reduziert und die Nachhaltigkeit gesteigert. Hierbei ist zu beachten, dass der Aufwand zur Umsetzung dieser Prozessüberwachung und -sicherung einen hohen Aufwand zur Implementierung der Messtechnik und dem Aufbau des notwendigen Prozessverständnisses erfordert. Dadurch werden aus der gestiegenen Fertigungsqualität resultierende Kostenvorteile zum Teil aufgezehrt (RBW 5.1).

Auch die Vermeidung bzw. die Reduzierung von Kontaminationen bietet die Möglichkeit die Qualität der vereinzten Sheets zu steigern (RBW 5.2). Durch den Einsatz entsprechender Anlagen- und Filtertechniken wird es ermöglicht, die Lebensdauer von Batteriezellen zu verlängern und die Nachhaltigkeit zu erhöhen. Dies geht allerdings mit hohen Kosten für die Anlagentechnik einher, sodass der Beitrag zur Kostenersparnis begrenzt ist.

In Anbetracht des stetig steigenden Zelloutputs und der hohen Anzahl geplanter Produktionsanlagen bieten höhere Taktzeiten durch produktivere Handhabungssysteme und Schneidsysteme einen hohen Kostenvorteil in *Gigafactories*. Der Aufwand zur Umsetzung der notwendigen Entwicklungsarbeit ist im mittleren Bereich zu verorten, während der Nutzen als hoch eingeschätzt werden kann (RBW 5.3).

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	5.1	5.2	5.3	5.4
Nachhaltigkeit	↗	↗	→	↑
Qualität	→	→	↗	↑
Kostenersparnis	↑	↗	↑	→
Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag				

5.1 Inline Qualitätssicherung und Prozessmonitoring

5.2 Reduzierung/Vermeidung von Verunreinigungen

5.3 Verbesserung der Taktzeit durch produktivere Handhabungssysteme

5.4 Qualitätssicheres Vereinzeln von neuartigen/innovativen Elektrodenmaterialien

Ein qualitätssicheres Vereinzeln von innovativen Elektroden, die neuartige, mitunter dicke Beschichtungen aufweisen oder innovative Stromsammler auf Polymerbasis besitzen, ist herausfordernd. Diese Materialien haben in der Gesamtbetrachtung einen mittleren bis hohen Nutzen. Durch die innovativen Materialien und Zellaufbauten kann die Lebensdauer verlängert und somit die Nachhaltigkeit gesteigert werden.

Zudem können die polymerbasierten Stromsammler das thermische Durchgehen (engl. thermal runaway) verhindern und bieten dadurch eine wertvolle Zusatzfunktion. Kostenersparnisse aufgrund der Reduzierung möglicher Zellausfälle oder durch die neuartigen Stromsammler sind als gering einzustufen. Da bereits bestehende Vereinzlungsprozesse adaptiert werden können, ist der Aufwand zur Umsetzung als moderat einzuschätzen (RBW 5.4).

Autoren:

Maher Kouli, TU Braunschweig;
Malte Mund, TU Braunschweig

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Johannes Bührle, Industry Manager Automotive-
E-Mobility, TRUMPF Laser- und Systemtechnik
GmbH
Dr. Günter Ambrosy, Branchenmanagement E-
Mobility, TRUMPF Laser- und Systemtechnik
GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

Groz-Beckert KG
ISRA VISION GmbH
Maschinenbau Kitz GmbH
Piab Vakuum GmbH
Teledyne GmbH
ULT AG
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung
Batteriezzelle FFB

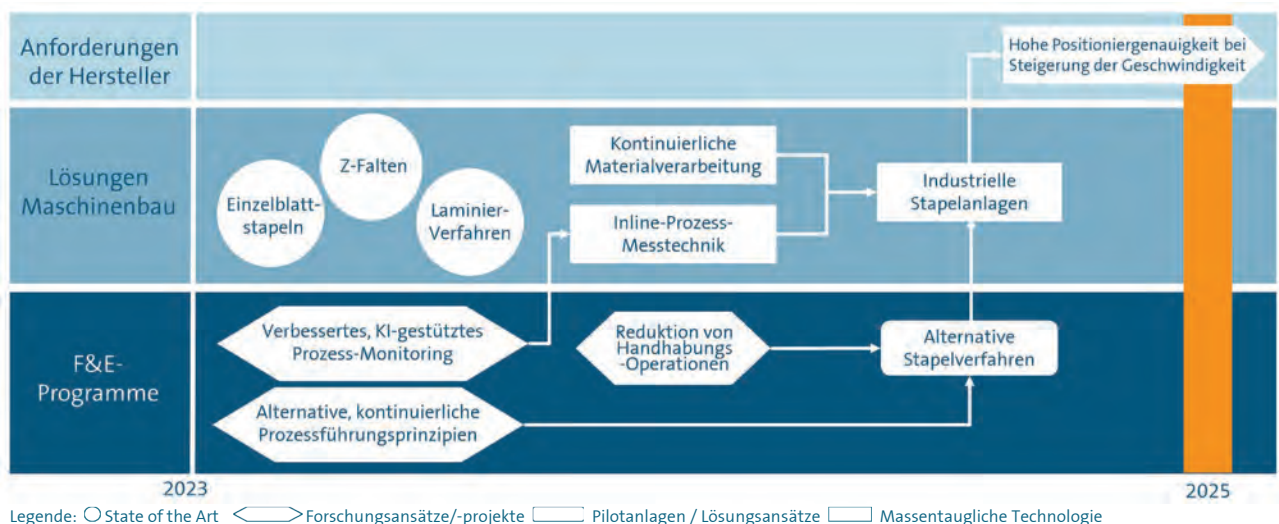


6 Stapeln und Wickeln

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
6.1	Hohe Positioniergenauigkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Geschwindigkeit	Fortschritt erzielt	Hoch	2024 - 2025
6.2	Handling von dünnen und empfindlichen Materialien	Fortschritt erzielt	Hoch	2024 - 2026
6.3	Vermeidung von Partikelkontamination und Umsetzung hoher Sauberkeitsanforderungen	neu	Mittel	2024 – 2026
6.4	Prozessierbarkeit neuer Materialien für Solid-State Batterien	neu	Gering	2026 – 2028
6.5	Platzbedarf der Anlage reduzieren	neu	Gering	2025 – 2026

RBW 6.1: Hohe Positionierungsgenauigkeit bei gleichzeitiger Steigerung der Geschwindigkeit auf unter 0,2 s/Elektrodenverbund

Der Stapelprozess ist im Vergleich zum Wickelprozess deutlich langsamer und einer der Flaschenhälse in der Zellausbaufertigung. Vorteile im Vergleich zum Wickeln sind die materialgerechte Fertigung von Elektrode-Separator-Verbünden und die bessere Raumausnutzung des Elektrodenstapels. Die Geschwindigkeit kann durch Kombination mehrerer Technologien oder der Reduktion von Pick-and-Place-Operationen gesteigert werden. Diese darf aber nicht zu Lasten von Positioniergenauigkeit, Sauberkeit oder schonendem Materialhandling geschehen.



*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Stapeln und Wickeln

Grundlagen

Zur Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie werden je nach Zellformat unterschiedliche Assemblierungsverfahren angewendet. Pouch-Zellen werden in der Regel im Stapelverfahren, zylindrische und prismatische Zellen im Wickelverfahren produziert. Zunehmend werden auch prismatische Zellen gestapelt, um die Raumaussnutzung im Zellgehäuse zu erhöhen und die Elektrolytbenetzung zu verbessern. Außerdem wird das Material der Elektroden beim Stapeln weniger beansprucht. Die engen Biegeradien, die im Kern eines Flachwickels auftreten, entfallen.

Das Stapeln wird industriell als Z-Falten oder seltener als Einzelblatt-Falten ausgeführt. Beim Z-Falten wird der Separator von einem Coil abgewickelt und die vereinzelter Elektroden werden alternierend zwischen den Separator z.B. mittels Vakuumgreifern eingeführt. Beim Einzelblattstapeln wird in abwechselnder Reihenfolge Separator, Anode und Kathode aufeinandergelegt. Das Z-Falten ist wesentlich schneller als das Einzelblattverfahren. Durch Auflaminieren oder Aufkleben der Einzelblattelektroden auf den Separator vor dem Stapeln kann der Prozess noch deutlich beschleunigt werden [Kwade2018b, Müller 2021].

Beim Wickeln werden Separator- und Elektrodenbänder (Anode und Kathode) auf einen Kern gewickelt und hieraus eine Jelly-Roll erzeugt. Für die Rundzelle ergibt sich ein Rund-, für die prismatische Zelle ein Flachwickel. Für zukünftige Zellgenerationen, wie die Lithium-Metall-Batterie oder *All Solid State* Batterie, wird erwartet, dass sich diese besser stapeln als wickeln lassen. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem Wickeln ist die bessere Wärmekontrolle bzw. -abfuhr beim Betrieb der Zelle, was mit einer höheren Sicherheit und Langlebigkeit einhergeht.

Die erreichbaren Taktzeiten beim Stapeln sind stark abhängig von der Elektrodengröße und der verwendeten Produktionstechnik. Beim Z-Falten können mittlerweile Taktzeiten von 0,4 bis 0,8 s/ Elektrodenverbund (Anode + Separator + Kathode) realisiert werden. Beim Wickeln sind durch die kontinuierliche Prozessführung Geschwindigkeiten von 0,1 s/Umdrehung möglich. Eine Zelle ist damit in wenigen Sekunden gewickelt, wohingegen das Stapelverfahren bei mehreren Dutzend Lagen mindestens um eine Größenordnung langsamer ist [Heimes2023a]. Das Stapelverfahren muss sich an dieser deutlich höheren Prozessgeschwindigkeit des Wickelns messen und diesen Nachteil durch eine bessere Ausnutzung des verfügbaren Volumens und einer höheren Zellqualität kompensieren.

Mittels Z-Folding kann die oben genannte Geschwindigkeit mit einer Stapelgenauigkeit von unter +/- 0,2 mm erreicht werden. Dies ist durch den Einsatz von Bilderkennungssystemen für die Positionierung der Elektroden- und Separatorblätter und einer evolutionären Verbesserung der Handlingtechnologien möglich.

Herausforderungen

Das Stapeln gehört nach wie vor zu den zeitkritischen Produktionsprozessen der Zellproduktionslinie und stellt somit einen Engpass dar. Trotz einer geforderten Durchsatzserhöhung müssen hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und Sauberkeit erfüllt werden. Die Qualität des Stapel- und Wickelprozesses beeinflusst die spätere Zellperformance maßgeblich [Thielmann2017]. Ein Versatz der Elektroden-sheets kann beispielsweise zu einem Kapazitätsverlust führen, da nicht die gesamte Aktivmaterialfläche nutzbar ist. Die hohe Positioniergenauigkeit und Sauberkeit bei gleichzeitiger Steigerung der Geschwindigkeit wird daher als wichtigste Herausforderung für diesen Fertigungsschritt angesehen (RBW 6.1 und 6.3).

Um zum einen Zellen mit höherer Energiedichte zu erhalten und zum anderen den Durchsatz zu erhöhen, existiert ein Trend zu größeren Zellformaten. Dieser Trend birgt Herausforderungen für das Folienhandling. Zudem erschweren sowohl die Größe wie auch der Einsatz von sehr dünnen und damit empfindlichen Ableiterfolien den Prozess durch das notwendige schonende Handling (RBW 6.2) [Kampker2014].

Für neue Materialien, die in der Solid-State-Batterie Anwendung finden sollen, werden derzeit innovative Assemblierungstechnologien erforscht (Bsp. Forschungsprojekt OptiKeraLyt). Dabei ist abzusehen, dass Stapelverfahren anstelle von Wickelverfahren aufgrund der festen Materialien Vorteile bieten, jedoch existieren Herausforderungen beispielsweise beim Greifen neuartiger Materialien (RBW 6.4).

Abschließend stellt auch der hohe Platzbedarf derzeitiger Stapel- oder Wickelanlagen eine Herausforderung dar (RBW 6.5). Neben dem Stapelprozess kann die Inline-Messtechnik (z. B. Röntgenanalyse) weiteren Platz benötigen. Ein hoher Anlagenfootprint führt zu einem größeren Trockenraum, der hohe Kosten aufgrund des Energieverbrauchs zur Folge hat. Lösungsansätze hierzu werden in Kapitel 8, S. 104 betrachtet.

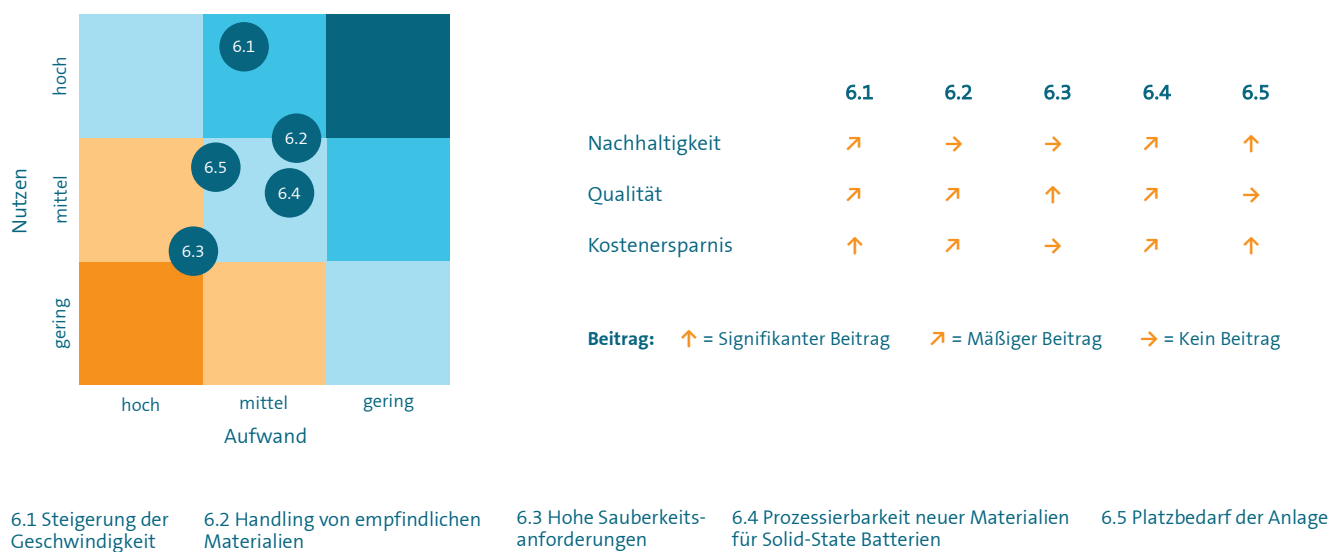
Lösungsansätze

Im Fokus der Optimierung des Stapelns liegt die Steigerung der Prozessgeschwindigkeit durch die Realisierung eines durchgehend kontinuierlichen Prozessablaufs, die Entwicklung neuer Greifertechnologien, sowie die Implementierung von schnellerer Bilderkennungstechnologie zur Lageregelung [Schröder 2016a, b]. Quasi-berührungsfreie Greifer mit Ultraschallführung oder auch luftgeführte Systeme gewinnen damit an Relevanz, sind aber noch nicht serienreif.

Einen weiteren Lösungsansatz zur Erhöhung der Prozesskontinuität stellt die Verwendung robuster Zwischenprodukte aus Elektrode-Separator-Verbünden dar. Die Elektrodensheets können zum Beispiel auf den Separator laminiert oder geklebt werden. Durch diesen Zwischenschritt wird die nötige Anzahl an Stapelvorgängen je Lithium-Ionen-Batteriezelle verringert und der Falten- und Knickbildung der Elektroden und Separatoren entgegengewirkt. Dieses Verfahren verspricht insbesondere für die immer größeren Zellformate eine Verbesserung des Handlings im Stapelprozess und eine noch exaktere Position. Auch empfindlichere Materialien können stabile Halbprodukte in der Fertigung erforderlich machen. Der Ansatz kann somit zur Lösung der RBW 6.2 beitragen.

In unterschiedlichen Forschungsanlagen werden deutschlandweit mehrere, neuartige Stapeltechnologien erprobt und anschließend für die industrielle Anwendung vorbereitet [Weinann 2020, Baumeister2014, Pelisson-Schecker2017, Fleischer2017], die auch teilweise schon patentiert sind. Gegenüber dem Z-Falten liegen die Unterschiede zum Beispiel in einer Materialführung in unterschiedlichen Ebenen, in einer zueinander gedrehten Materialführung („Helix-Verfahren, KIT – [Schutzrecht2015]), in der Kombination mit Förderbändern oder in effizienteren Faltmechanismen (Forschungsprojekt KontiBAT). Beispielhaft ist hier ein Stapelverfahren mithilfe eines rotierenden Stapelrads zu nennen, wodurch das klassische Pick-and-Place-Verfahren ersetzt werden soll (z. B. Forschungsprojekt HoLiB) [Müller 2021]. Gemeinsam mit bereits vorhandenen Technologien aus den Bereichen der Inline-Prozessmesstechnik und Kenntnissen über die kontinuierliche Materialverarbeitung können diese Verfahren dazu beitragen, unproduktive Stillstandzeiten zu verkürzen und den Stapelvorgang weiter zu beschleunigen.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



Darüber hinaus kann die Definition sinnvoller Toleranzen für den Stapel- und Wickelprozess auf Basis der Kenntnis von Prozessinterdependenzen durch ein KI-gestütztes Monitoring dazu beitragen, eine sinnvolle Abwägung zwischen Genauigkeit und Prozessgeschwindigkeit zu treffen. Dieses soll dazu beitragen, die Prozesszeit für das Stapeln zukünftig auf 0,2 s/ Elektrodenverbund zu reduzieren.

Aufwand- und Nutzenbewertung
Da das Stapeln bzw. Wickeln der Elektrode-Separator-Verbunde einer der Engpässe in der Zellproduktion ist, wird der Nutzen einer Verringerung der Prozessdauer und das Handling von größeren und empfindlicheren Materialien als hoch bewertet. In den letzten Jahren ist in diversen Forschungsprojekten an der Verbesserung

bestehender und der Entwicklung neuer Verfahren gearbeitet worden, sodass die Durchbrechung der RBW 6.1 und 6.2 in den nächsten zwei bis drei Jahren realistisch ist. Der damit verbundene Aufwand wird durch die Expertinnen und Experten als mittel bis hoch eingeschätzt.

Die Handlingmethoden stoßen derzeit an ihre Grenzen, sodass Alternativen entwickelt und für eine Massenproduktion tauglich gemacht werden müssen [Thielmann2017, Michaelis2018]. Die Verwendung stabiler Zwischenprodukte muss sich gegenüber den herkömmlichen Produktionsprozessen vor allem in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit behaupten. In Zukunft könnte diese insbesondere für empfindliche Materialien eine Alternative darstellen. Der Einsatz von empfindlicheren Materialien erfordert ein

anspruchsvolleres Folienhandling. Der Aufwand, auch dann die angestrebten Geschwindigkeiten und Positionsgenauigkeiten zu erzielen, wird mit mittlerem bis hohem Aufwand bewertet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Nutzen der Bewältigung der genannten Herausforderungen als sehr hoch anzusehen ist, da durch eine Steigerung der Geschwindigkeit der Anlageninvest und der Footprint reduziert und infolgedessen die Herstellkosten der Batterien gesenkt werden können.

Autor:

Sebastian Wolf, RWTH Aachen University

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Moritz Bertsch, Product Manager Stacking Machines, Manz AG

Mit weiterer Unterstützung von:

ASS Maschinenbau GmbH
B&R Industrial Automation GmbH
BST GmbH
DESTACO Europe GmbH
Erhardt+Leimer GmbH
Exacom GmbH
ISRA VISION GmbH
Lenze SE
Maschinenbau Kitz GmbH
Omron Electronics GmbH
Pepperl+Fuchs SE
Piab Vakuum GmbH
Schuler Group GmbH
Sick AG
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung
Batteriezelle FFB

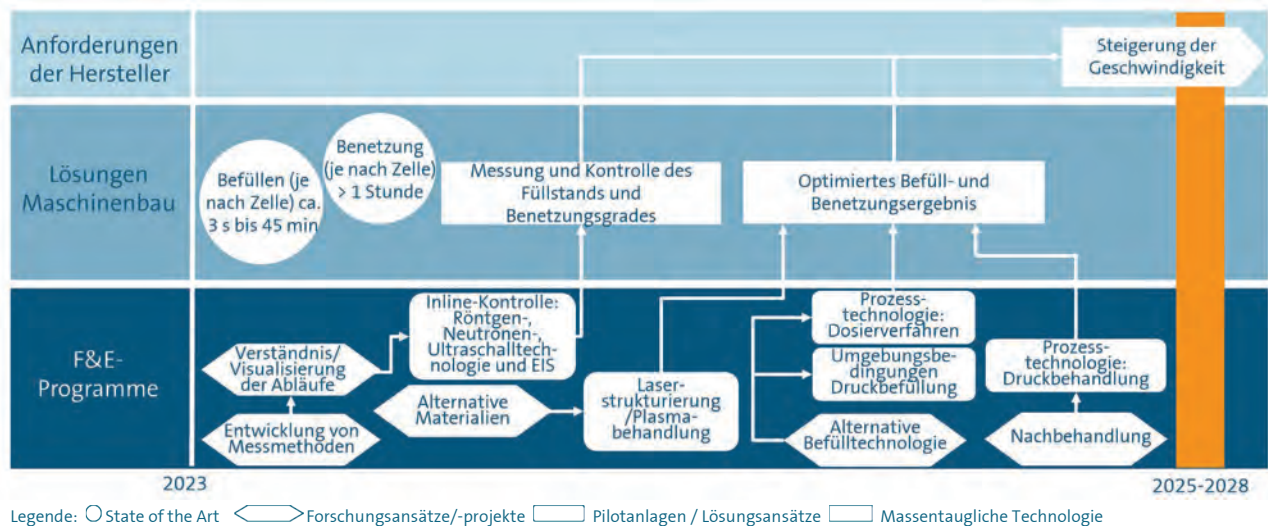


7 Elektrolytbefüllung und Benetzung

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
7.1	Prozesszeitverkürzung bei gleichzeitiger homogener Benetzung des Zellstapels	Fortschritt erzielt	Hoch	2025 - 2028
7.2	Hohe Genauigkeit bei der Befüllung (Volumen, Druck bzw. Vakuum)	Fortschritt erzielt	Hoch	2024 - 2025
7.3	Verlässliches Monitoring des Befüll- und Benetzungsprozesses in der Volumenproduktion (z. B. Temperatur, Druck, etc.)	Fortschritt erzielt	Hoch	2025
7.4	Formatabhängige Befüllstrategie bzw. Anlagenkonzepte (Elektrolyt, Prozessparameter & Vorhersage dessen, Totvolumen und Porositäten, etc.)	neu	Mittel	2025
7.5	Handling & Verarbeitung des Elektrolyten im Trocken- und Reinraum	neu	Mittel	2024 – 2025

RBW 7: Prozesszeitverkürzung bei gleichzeitiger homogener Benetzung des Zellstapels

Das übergeordnete Ziel im Prozess „Elektrolytbefüllung und Benetzung“ ist dabei die Verkürzung der Prozesszeit bei gleichzeitig ausreichender Benetzung unabhängig vom Zelldesign durch ein verlässliches Monitoring des Prozesses. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Maschinenbau und Materialentwicklung bzw. -forschung ist zur Verbesserung dieses qualitätskritischen Prozesses notwendig.



*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Elektrolytbefüllung und Benetzung

Grundlagen

Der Prozessschritt ist in zwei Teilprozesse gegliedert: die Befüllung und die Benetzung bzw. Wetting der Zelle. Die Befüllung bezeichnet dabei das Einfüllen des Elektrolyten in die Zelle. Das Benetzen beschreibt den Prozess des Eindringens des Elektrolyten in die Poren von Elektrode und Separator, um den ionischen Kontakt herzustellen. Je nach Format kann der reine Befüllprozess wenige Sekunden (Pouch) bis zu mehreren Minuten (große zylindrische und prismatische Zellen) dauern. Die Benetzung ist bei allen Formaten ein äußerst zeit- und qualitätskritischer Produktionsprozess in der Zellassemblierung, der bis zu 24 Stunden andauern kann. Die Elektroden haben aufgrund ihrer Porosität eine große Fläche, die vollständig von der Elektrolytflüssigkeit benetzt werden muss. Nicht benetzte Bereiche können keine Ladungen austauschen und sind somit inaktiv. Diese Bereiche haben nicht nur einen Einfluss auf die Performance der Zelle, sondern weisen auch ein Sicherheitsrisiko auf. Durch nicht benetzte Bereiche liegen in der Zelle lokale Stromdifferenzen vor, wodurch Dendritenwachstum entstehen kann. Bei ent-

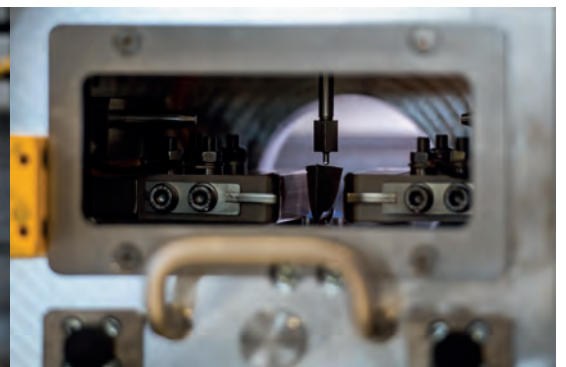
sprechender Größe können diese Dendriten den Separator durchstoßen und zu einem Kurzschluss sowie in der Folge zu einem Thermal Runaway führen.

Derzeit ist die Befüllung bei Unterdruck eine gängige Methode. Hierbei wird ein Unterdruck in der Lithium-Ionen-Zelle erzeugt, sodass der Elektrolyt schnell und effizient in die Zelle gefüllt werden kann. Durch das Evakuieren der Zelle sind nahezu keine Luftmoleküle im Zellinneren vorhanden. Der leicht entzündbare Standard-elektrolyt mit LiPF_6 bildet bei Kontakt mit Wasser Flusssäure, welche die Zellkomponenten angreift, sowie deren Lebensdauer entscheidend herabsetzt [Korthauer2013]. Aus diesem Grund ist es erforderlich, durch das Vakuumtrocknen und den Trockenraum sicherzustellen, dass nahezu keine Restfeuchte in der Zelle enthalten ist.

Forschungen haben ergeben, dass bei einer Zelle, die mit Unterdruck beaufschlagt ist, die Benetzungszeit halbiert werden kann und dass die Elektrolytmenge einen entscheidenden Einfluss auf die Performance besitzt [Günter 2021]. Beim initialen Befüllen wird meist ein Vakuum unterhalb des Elektrolytdampfdrucks



Electrolyte Jet: Semiautomatische Elektrolyt-Befüllmaschine für Pouchzellen mit Vakuumkammer
Quelle: Industrie-Partner IP PowerSystems GmbH



Electrolyte Jet: Präzise und schnelle Elektrolyt-Befüllanlage für Li-Ionen Pouchzellen
Quelle: Industrie-Partner IP PowerSystems GmbH

gewählt. Bei weiteren Befüllschritten wird dann ein höheres Vakuumdruckniveau gewählt, damit der eingefüllte Elektrolyt nicht verdampft. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Benetzungszeit ist die Temperatur. Bei einer Verdopplung der Temperatur von 20 auf 40 °C kann die Benetzungszeit um ein Drittel reduziert werden [Günter2021].

Mit zunehmender Befüllung erfolgt ein Druckausgleich, um der Schaumbildung entgegenzuwirken. Außerdem wird der Prozess immer wieder unterbrochen, sodass sich der Schaum zersetzen kann. Gleichzeitig beginnt die Benetzung. Dabei kommt es, ausgehend von den Kapillarkräften, zur mikroskopischen Benetzung der Poren in den Aktivmaterialien und Separatoren. Die Befüllung und der Druckausgleich können so lange wiederholt werden, bis die Lithium-Ionen-Zelle ausreichend benetzt ist. Es hat sich gezeigt, dass durch eine Nachbehandlung der befüllten und versiegelten Pouchzelle mit mechanischem Druck (Press Rolling) oder Druckwechselzyklen (andere Zellformate) die Benetzungszeit deutlich reduziert werden kann. Somit konnte in den letzten Jahren die Benetzungszeit einer Batteriezelle bereits um 50 Prozent verringert werden.

Herausforderungen

Die Bildung von Schaum während des Einfüllvorgangs und die lange Benetzungsdauer sind maßgeblich für die langen Prozesszeiten verantwortlich, die je nach Zelltyp, trotz deutlicher Verbesserungen in den letzten Jahren, über eine Stunde betragen können. Damit ist die Elektrolytbefüllung immer noch ein Bottleneck innerhalb der Zellassemblierung. Die Steigerung der Geschwindigkeit durch Prozess- und Materialanpassungen bleibt eine Kernherausforderung insbesondere bei großformatigen Batteriezellen (RBW 7.1).

Zusätzlich werden die Elektrolytbefüllung und Benetzung durch die verwendeten Elektrolyte, Separatoren und Aktivmaterialien, sowie den Kontaktwinkel beeinflusst. Eine geringe Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Prozessparameter und Qualität der Befüllung führt zu einer nicht optimalen Befüllung. Die Einflussfaktoren auf den Benetzungsprozess sind bisher nur wenig erforscht. Zu geringe Mengen führen zu nicht benetzten Stellen, zu hohe Mengen zu einer längeren Prozesszeit und höheren Innenwiderständen, sowie zu niedrigeren gravimetrischen Energiedichten durch ein erhöhtes Zellgewicht (RBW 7.2). Eine weitere Herausforderung besteht daher darin, die Prozessgenauigkeit durch die einzustellenden Parameter (Volumen, Über-/ Unterdruck) zu erhöhen, um den Prozess zielgerichtet auf die verschiedenen Zellformate und -größen steuern zu können (RBW 7.4).

Zur Kontrolle und Optimierung des Elektrolytbefüll- und Benetzungsvorganges bereits im Produktionsprozess fehlt es außerdem an verlässlichen Inline-Monitoringtechnologien (RBW 7.3). Das Handling und die Verarbeitung des Elektrolyten im Trocken- und Reinraum stellt ebenfalls eine Herausforderung dar (RBW 7.5). Die Raum- und Trockenbedingungen haben nicht nur Einfluss auf das Handling, sondern auch auf die Anlage. Hier müssen Komponenten verwendet werden, deren Dichtigkeit und Material unter den Umgebungsbedingungen beständig ist.

Lösungsansätze

Die Optimierung dieses Prozesses kann durch verschiedene Ansätze erfolgen. Dabei sind die Vermeidung der Schaumbildung, schnellere Benetzung und die Einstellung optimaler Befüllparameter die wichtigsten Faktoren zur Erhöhung der Geschwindigkeit. Das Verständnis des Einflusses der Elektrolyteigenschaften sowie auch das Zusammenspiel zwischen Aktivmaterial,

Separator und Elektrolyt auf den Befüll- und Benetzungsprozess ist für einen schnelleren Prozess elementar. Besonders der Penetrationskoeffizient (COP), die Festkörperpermeabilität (SPC) sowie die Elektrolytsalzkonzentration sind wichtige Einflussfaktoren. Vor allem der Befüll- und Umgebungsdruck sind im Prozess qualitätskritische Einflussgrößen. Bei der Benetzung beeinflussen insbesondere das Volumen und die Nachbehandlung mit Druck die Qualität der Zelle [Davoodabadi2019].

Denkbar ist, die Prozesszeit über alternative Prozessführungen zu reduzieren. Möglichkeiten wären zum einen die Einstellung von unterschiedlichen Druckgradienten und Befülldrücken und zum anderen die Umsetzung einer Befüllung in mehreren Schritten inkl. Unterbrechung zum Stimulieren der Benetzung. Einer Befüllung an mehreren Stellen in der Lithium-Ionen-Zelle, die auch am Füllstand orientiert ist, ist ebenfalls möglich und insbesondere für Pouchzellen realisierbar. Für Hardcase-Zellen ist die Umsetzung deutlich schwerer. Zur Beschleunigung der Benetzung können zudem höherer Temperaturen bis zu 50 °C beitragen.

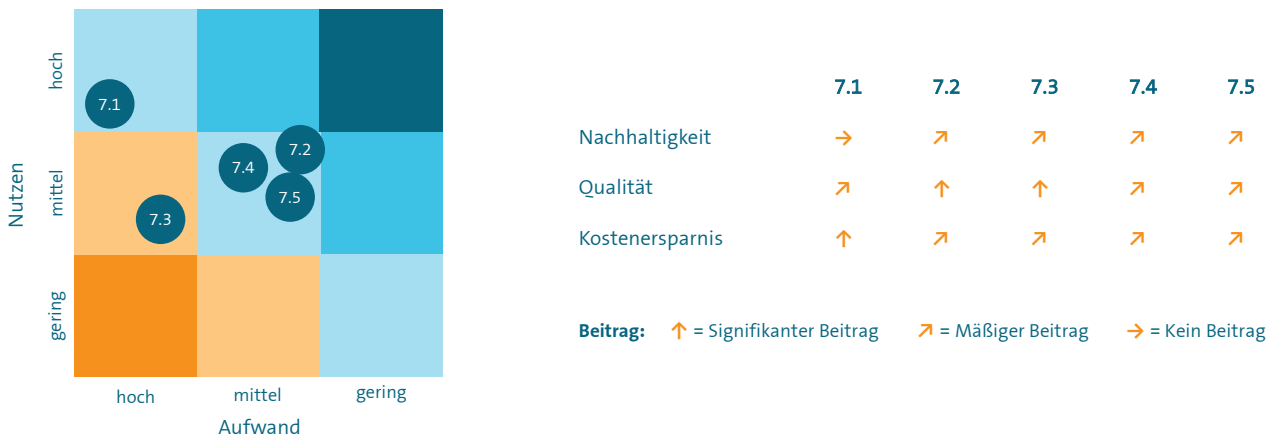
Ebenso vielversprechend ist die Entwicklung alternativer Separatormaterialien und Oberflächenstrukturen. Dabei wurde in den letzten Jahren vor allem der Einsatz von Laserstrukturierung bei der Elektrodenfertigung und deren Einfluss auf das Befüll- und Benetzungsergebnis untersucht. Beim Laserstrukturieren muss der Trade-Off zwischen höherem Porenvolumen für schnelleres Benetzen der Zelle und dem Performanceabfall durch zu hohes Abtragen von Aktivmaterial beachtet werden. Diese Änderungen haben einen großen Einfluss auf die Schaumbildung und Benetzungsdauer.

Neue Separatoren, Elektroden und Elektrolyte müssen vor allem die steigenden Anforderungen an die Sicherheit der Zelle oder die technischen Anforderungen zur Realisierung von Hochvoltzellen mit Spannungen von 5 Volt erfüllen. Ein vielversprechender Ansatz bei der Verbesserung der Separatormaterialien ist die Vorbehandlung mit einem Plasma. Durch die Modifizierung der Separatoroberfläche (Erhöhung der Hydrophilie) wird der Benetzungsgrad und die Adhäsion, das Aneinanderhaften zwischen Elektrode und Separator verbessert, wodurch die ionische Leitfähigkeit des Separators steigt.

Ebenfalls denkbar ist die Vorbehandlung der Elektroden mit Plasma. Auch hier könnte eine hydrophilere Oberfläche zu einem besseren und schnelleren Benetzungsgrad beitragen. Die Verwendung von Additiven im Elektrolyten kann Schaumbildung reduzieren und/ oder die Benetzung verbessern.

Neben der Prozess- und Materialanpassung ist die Entwicklung und Integration neuer Messverfahren notwendig, um eine industrialisierte, detaillierte Prozessüberwachung ermöglichen zu können. Die Analyse trägt zu einem besseren Prozessverständnis der Abläufe und Wirkzusammenhänge bei. Sie ist zur Optimierung des Durchsatzes der Zellfertigung und der Qualität der Lithium-Ionen-Zelle notwendig. Es wird dabei zwischen makroskopischer und mikroskopischer Benetzungskontrolle unterschieden. Bei der makroskopischen Benetzungskontrolle ist es wichtig, Methoden zu entwickeln, die den Füllstand und den makroskopischen Benetzungsgrad während des Prozesses messen. In der Forschung kommen dazu Ultraschallbildgebungsverfahren zur Visualisierung des Benetzungsvorgangs zum Einsatz [Deng2021]. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, die Zelle zerstörungsfrei

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



7.1 Steigerung der Geschwindigkeit bei gleichzeitiger homogener Benetzung 7.2 Hohe Genauigkeit bei der Befüllung 7.3 Verlässliches Monitoring 7.4 Formatabhängige Befüllstrategie 7.5 Handling & Verarbeitung des Elektrolyten im Trocken- und Reinraum

analysieren zu können. Bei den mikroskopischen Inline-Kontrollen ist das Überprüfen des Eindringens des Elektrolyten in die Poren des Aktivmaterials entscheidend. Veränderungen bei der elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS) zeigen großes Potenzial besonders bei großformatigen Zellen zur Überprüfung des mikroskopischen Benetzungsgrads [Günther2019]. Weitere wichtige Prozessparameter zur Überwachung sind die Zelltemperatur, Zellinnendruck, Druckverläufe, der Befülldruck, der Massenstrom, sowie das Gewicht und die Dichtheit der Lithium-Ionen-Zelle. Dieser Lösungsansatz wird zum Durchdringen der RBW 7.3 beitragen und durch die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf Parameter-Qualitätsbeziehungen ebenfalls zur

Durchdringung der RBW 7.2 führen [Knoch 2016, Weydanz2018]. Ein vermehrter Einsatz von intelligent vernetzter Produktion kann dazu beitragen, die erfassten Daten auszuwerten und entsprechend die Produktionsparameter anzupassen.

Aufwand- und Nutzenbewertung
Der Nutzen aller RBWs im Bereich Elektrolytbefüllung und Benetzung wird als mittel bis hoch eingestuft. Besonders durch eine Verringerung der Prozesszeiten, vor allem der Benetzung, können die Kosten stark gesenkt werden. Gleichzeitig führt eine homogenere Benetzung zur Steigerung der Qualität. Der Aufwand zur Erreichung wird dabei von den Experten als

mittel bis hoch eingeschätzt, da durch Materialanpassungen bereits Verbesserungen in diesem Bereich erreicht werden konnten. Die Nachhaltigkeit wird durch das Erreichen dieser RBW nur mäßig verbessert.

Die Verbesserung der Befüllgenauigkeit in der RBW 7.2 wirkt sich besonders auf die Performance und damit auf die Qualität der Batteriezelle aus. Durch die definierten Befüllmengen kann zudem die Prozesszeit verringert und Elektrolyt gezielter eingesetzt werden. Dies wirkt sich positiv auf die Kosten aus. Die RBW hat nur einen geringen Effekt auf die Nachhaltigkeit. Der Aufwand zum Erreichen der RBW wird als gering eingeschätzt, da sich die Erkenntnisse aus Forschungsprojekten relativ einfach in die Industrie überführen lassen z. B. in Bezug auf Anpassung der Befüllmenge, Befüllwinkel und Benetzungszeit.

Die Entwicklung einer Inline-Qualitätskontrolle für das Erreichen der RBW 7.3 weist ebenfalls einen hohen Nutzen auf. Herausforderungen bestehen bei der Integration und den hohen Investitionskosten. Durch das bessere Verständnis des Befüllvorganges, kann dieser besser kontrolliert und auf unterschiedliche Formate und Größen angepasst werden. Das hat einen großen Effekt auf die Qualität der Zelle.

Durch das bessere Verständnis des Befüllungs- und Benetzungsvorganges kann der Ausschuss an Elektrolyten verringert werden mit positivem Effekt auf Kosten und Nachhaltigkeit. Allerdings steht dem ein erhöhter Aufwand gegenüber, da die Integration von Inline-Messverfahren, wie Ultraschallbildgebungsverfahren oder EIS, zur Erkennung des Füllstands und Benetzungsgrads bei einer geschlossenen Zelle erschwert ist. Bisherige Ansätze lassen sich nicht ohne Weiteres in eine Produktionslinie integrieren.

Autor:

Sebastian Wolf, RWTH Aachen University

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Ulrike Polnick, Grundlagenforschung
Batterietechnologie, Industrie-Partner GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

Exacom GmbH
Leybold GmbH
Schuler Group GmbH
Sick AG
ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH

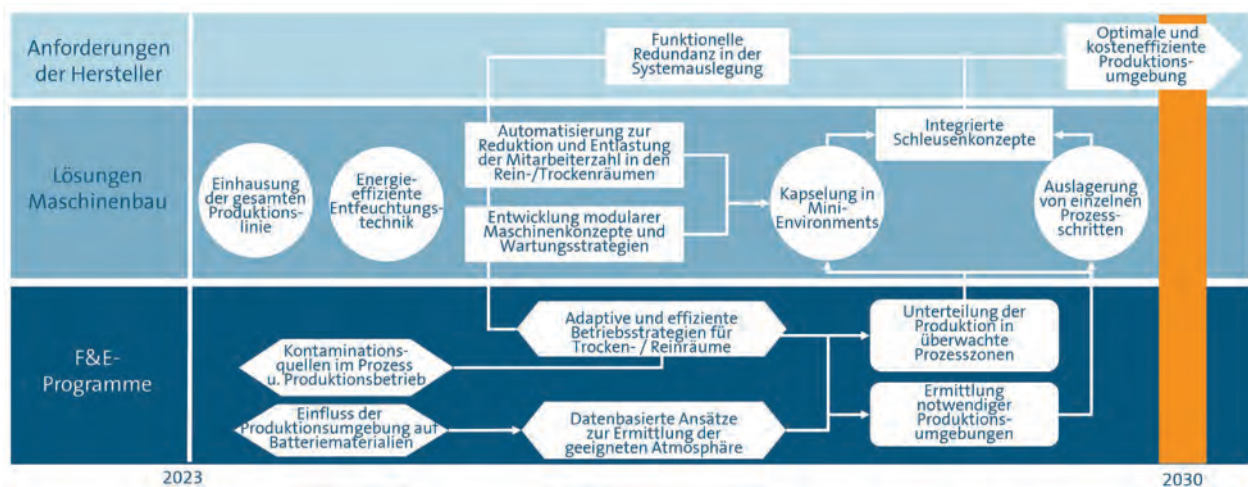


8 Rein- und Trockenräume

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
8.1	Bedarfsgerechte und gleichzeitig wirtschaftliche Auslegung des Rein- und Trockenraums	Fortschritt erzielt	Hoch	2028
8.2	Verbesserung der Energieeffizienz des Rein- und Trockenraums	Fortschritt erzielt	Hoch	2025

RBW 8.1: Bedarfsgerechte und gleichzeitig wirtschaftliche Auslegung des Rein- und Trockenraums

Vor dem Hintergrund der ständigen Weiterentwicklung der Batterietechnologie und verwendeter Materialien stellt die Bereitstellung einer geeigneten reinen und trockenen Umgebung in der Batterieproduktion fortlaufend eine technische und wirtschaftliche Herausforderung dar. Die Auslegung der Rein- und Trockenräume für heutige und zukünftige Batteriematerialien wird zu einem entscheidenden Faktor für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ▢ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

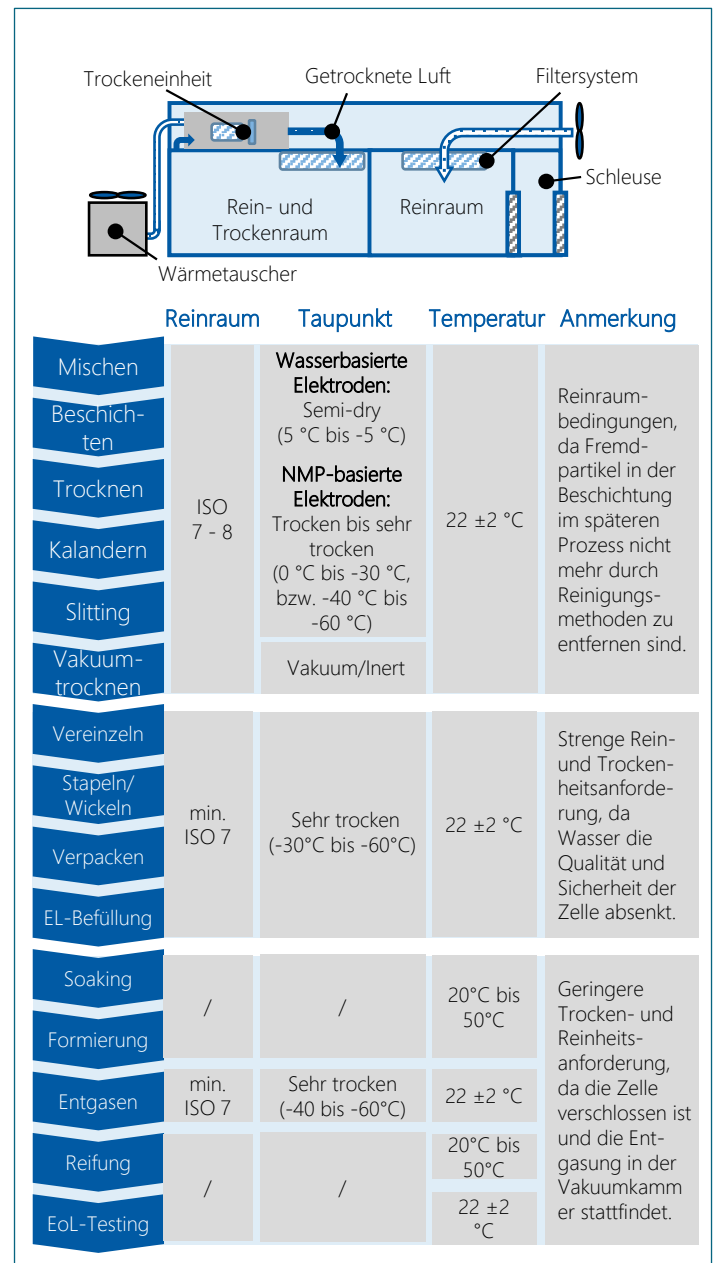
Rein- und Trockenräume

Grundlagen

In der Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien nimmt die Produktionsumgebung entlang der Prozesskette eine entscheidende Schlüsselrolle ein. Kontamination durch Fremdpartikel oder zu hohe Luftfeuchtigkeit während des Produktionsprozesses kann die Qualität sowie Sicherheit der Batteriezelle gravierend beeinträchtigen und muss vor diesem Hintergrund streng kontrolliert und weitestgehend vermieden werden. Erst nach dem Versiegeln der Batteriezelle am Ende der Assemblierung sind weniger strikte Anforderungen an die Produktionsumgebung zulässig.

Die Anforderungen an die Fertigungsumgebung unterscheiden sich abhängig vom betrachteten Prozessschritt (s. Abb.) und erfordern eine Berücksichtigung bereits in der frühen Planungsphase der Produktion. Derzeit wird zur Einhaltung der geforderten Umgebungsbedingungen ein Großteil der Prozessschritte in überwachten Rein- und Trockenräumen durchgeführt.

Planung, Aufbau und Betrieb der Rein- und Trockenräume rücken aus mehreren Gründen zunehmend in den Mittelpunkt der Batteriezellproduktion. Neben hohen Investitionskosten für die Räumlichkeiten (Raumhülle, Böden, Schleusen, etc.) und die Lüftungs- bzw. Entfeuchtungstechnik sind insbesondere die hohen laufenden Kosten und CO₂-Emissionen während des Betriebs der Infrastruktur als Gründe zu nennen. In der Untersuchung der produktionsbedingten Energieverbräuche nimmt der Betrieb der Rein- und Trockenräume neben den Trocknungsprozessen in der Elektrodenproduktion eine der größten Verbrauchspositionen ein. Wissenschaftliche Untersuchungen weisen dabei Verbräuche in dem Bereich von 20 – 80 Wh/Wh aus [Jinasena2021, Degen2022, Nelson2019, Yuan2021, Pettinger2017].



Trocken- und Reinheitsanforderungen entlang der Produktionskette, nach [Heimes2023a]

Herausforderungen

Innerhalb der Trockenluftatmosphäre wird der Umgebungsluft die Feuchtigkeit entzogen, um mögliche Reaktionen der feuchtigkeitsempfindlichen Zellmaterialien (Kathode, Elektrolyt) mit Wasser zu verhindern. Die hierzu in den Rein- und Trockenräumen sichergestellten Umgebungsbedingungen werden dabei häufig über den vorherrschenden Taupunkt charakterisiert²⁶. Während der Taupunkt im Bereich der Elektrodenproduktion grundsätzlich weniger streng angesetzt wird, werden in der anschließenden Assemblierung deutlich tiefere Taupunkte gefordert. Die eingestellten Taupunkte sind abhängig von der Zellchemie, speziell den verwendeten Aktivmaterialien. Die strengsten Anforderungen finden sich in der Elektrolyt-befüllung mit Taupunkten im Bereich von -60°C bis -70°C. Hintergrund ist der hochreaktive Flüssigelektrolyt, welcher bereits im Kontakt zu geringen Mengen Luftfeuchtigkeit zu toxischer Flusssäure (HF, Fluorwasserstoffsäure) reagiert. Erst nach der Versiegelung der Zelle im Anschluss an die Elektrolyt-befüllung ist mit der Trennung der Atmosphären eine weniger trockene Produktionsumgebung mit kontrollierter Temperatur und Sauberkeit zulässig und ausreichend.

Zusätzlich zu der Trockenraumumgebung wird bei der Produktion von Lithium-Ionen-Batterien eine Reinheitsanforderung gestellt, um die Gefahr einer Kontamination mit Fremdpartikeln zu minimieren und Querkontaminationen zwischen einzelnen Prozessschritten zu vermeiden. Gefordert werden üblicherweise Reinräume der ISO-Klassen 7-8.²⁷ Das Einhalten der strengen Anforderungen an Trockenheit und gleichzeitig

Reinheit stellt dabei eine besondere Herausforderung in der Batteriezellproduktion dar. Die Auslegung einer zuverlässig funktionierenden Infrastruktur erfordert vor diesem Hintergrund die Berücksichtigung einer Vielzahl potenzieller Kontaminationsquellen (Personal, Maschinen, Material, etc.) und prozessspezifischer Besonderheiten (Prozessemissionen, unterschiedliche Anforderungen an Taupunkte und Überdruck- bzw. Unterdruckatmosphären). Für die Anforderungen zur Auslegung von Maschinen im Rein- und Trockenraum für die Li-Ionen Batteriezellfertigung existieren bisher keine einheitlichen Richtlinien. Oft werden daher strenge Kriterien an die Auswahl der verwendeten Materialien für die eingesetzten Maschinenkomponenten angelegt.

Sowohl für die Trocken- als auch Reinraumumgebung können bereits geringe Abweichungen vom geforderten Sollwert einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer und damit die Qualität der Zelle bedeuten. [Heimes2023a]. Der Zusammenhang zwischen Materialeigenschaften und daraus resultierenden Anforderungen an die Rein- und Trockenräume ist insofern wesentlicher Bestandteil der aktuellen Forschung. Untersuchungen im Labormaßstab lassen darauf schließen, dass mit dem Schritt in Richtung besonders nickelhaltiger Kathodenmaterialien (bspw. NMC 9-5-5) oder neuer Batterietechnologien (bspw. Festkörperbatterie) mit nochmals strengeren Anforderungen an die Produktionsumgebung zu rechnen ist [Busà2021, Yersak 2022]. Die Auslegung und Nachrüstung bestehender Rein- und Trockenräume für zukünftige Zellgenerationen stellt aufgrund der nur teilweise bekannten bzw. noch unvollständig erforschten Materialeigenschaften eine Kernherausforderung dar. Die geschilderten Unsicherheiten spiegeln sich in einer besonders

²⁶ Der Taupunkt bezeichnet die Temperatur, ab dem die Kondensation der Luftfeuchte beginnt und die Luftfeuchtigkeit 100 Prozent beträgt (vollständig gesättigte Luft). Ein Taupunkt von -50°C entspricht bei einer Temperatur von 20°C einer relativen Luftfeuchte von < 1 Prozent.

²⁷ Für Reinraumklasse 7 sind maximal 83.200 Partikel $\geq 1 \mu\text{m}$ und 2.930 Partikel $> 5 \mu\text{m}$ pro m^3 Luft zulässig, bei Reinraumklasse 8 jeweils 10x so viele.

konservativen Auslegung und Überdimensionierung der Versorgungstechnik wider, was wiederum mit hohen Investitions- und Betriebskosten einhergeht. Die Komplexität der Anlagentechnik und die Betriebskosten entwickeln sich dabei nicht linear, sondern steigen mit strengeren Anforderungen sprunghaft an. Eine Reduzierung der Anforderungen auf ein Mindestmaß ist vor diesem Hintergrund auch von hohem wirtschaftlichem Interesse (RBW 8.1).

Durch die kontinuierliche Aufrechterhaltung und Konditionierung der Trocken- und Reinraumatmosfera während der Produktion entfällt ein Großteil des Energiebedarfs der Zellproduktion auf den Betrieb dieser Infrastruktur. Hier ansetzende Innovationen zur Energieeinsparung und Steigerung der Energieeffizienz können einen signifikanten Beitrag zur Senkung der Betriebskosten und Emissionen leisten. Entscheidend ist hierbei die Sicherstellung einer mindestens gleichbleibenden Produktqualität (RBW 8.2).

Um die Gesundheit der Produktionsmitarbeiter nicht zu gefährden und Störgrößen für den Betrieb der Rein- und Trockenräume zu minimieren, sind ferner gezielt die Themen der Personal- und Materiallogistik zu adressieren. Im Fokus stehen hierbei die Reduktion vermeidbarer Feuchtigkeitseinträge und die Einschränkung der maximalen Expositionsdauer des Personals gegenüber der Rein- und Trockenraumatmosfera. Letzterem ist in besonderem Maße Rechnung zu tragen, da durch die Austrocknung der Schleimhäute und der Atemwege anderenfalls eine gesundheitliche Belastung der Mitarbeiter erfolgt. Bei dauerhaft langer Aussetzung gegenüber der besonders trockenen Atmosphäre kann es zudem zu chronischen Erkrankungen, wie etwa dem „Dry-Eye-Syndrom“ kommen [Cho 2014]. Ebenso können auch Prozessemissionen, etwa aus der laserbasierten Bearbeitung und luftgetragene Partikel bzw. Stäube, ein Sicherheits- und Gesundheitsrisiko darstellen.

Lösungsansätze

Der Auf- und Ausbau des Verständnisses um die Zusammenhänge zwischen Materialanforderungen auf der einen Seite und der Betriebs- und Auslegungsparameter der Rein-/Trockenräume auf der anderen Seite stellt die Grundlage dar, um die zuvor genannten Herausforderungen gezielt zu adressieren. Die Evaluation der materialbedingten Rein- und Trockenheitsanforderungen stellt dabei eine kontinuierliche Herausforderung dar, die die dynamische Entwicklung neuer Batteriematerialien fortlaufend begleiten muss. Unterstützend kann hier ein Benchmarking bestehender Pilot- und Forschungsanlagen, sowie ein intensiver Austausch zwischen Zellherstellern und Maschinen-/Anlagenbauern wirken. Mit einer steigenden Anzahl an Erfahrungen aus der laufenden Produktion bieten schließlich auch datenbasierte Ansätze ein wesentliches Optimierungspotenzial. Neben der Ermittlung der minimal notwendigen Anforderungen stellen Material- und verfahrenstechnische Änderungen eine wichtige Möglichkeit dar, die Taupunktanforderungen im Prozess zu senken und weitere Einsparungen zu ermöglichen. Beispielhaft sind hier Ansätze zur Beschichtung oder Strukturierung der Aktivmaterialpartikel insbesondere für nickelreiche Materialsysteme zu nennen. Auch die Durchführung eines zusätzlichen Nachtrocknungsschritts vor dem Befüllen („Stackdrying“), kann die Taupunktanforderung während den vorgelagerten Schritten der Zellaassemblierung verringern.

Weiter bestehen Unsicherheiten für den Einsatz von Werkstoffen und Komponenten in Rein- und Trockenräumen. Die strengen Anforderungen an die Atmosphäre werden häufig mit strengen Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe, z.B. hinsichtlich Kontamination und elektrostatischer Aufladung, gleichgesetzt. Gleichzeitig beanspruchen die Atmosphärenanforderungen die eingesetzten Materialien, insbesondere Dichtungen und Kunststoffteile, und können aufgrund von Versprödung zu erhöhtem Verschleiß und

Wartungsaufwand führen. Hierzu müssen weitere Erfahrungswerte der Anwender und des Maschinen- und Anlagenbaus gewonnen und zusammengetragen werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse sollte anschließend eine entsprechende Normung zum Maschinendesign, Wartung und Verschleiß in Rein- und Trockenräumen vorangebracht werden.

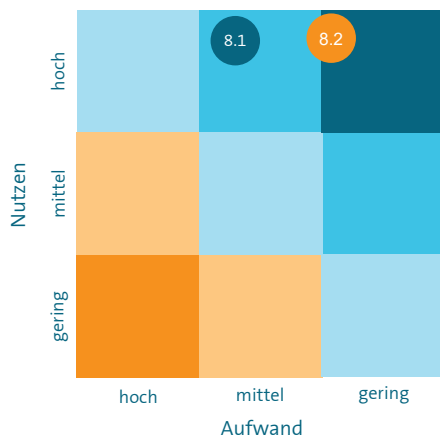
Rückschlüsse zu möglichen Kontaminationsrisiken innerhalb sowie zwischen einzelnen Prozessschritten sind ausschlaggebend für die Planung und den Betrieb einer bedarfsgerecht ausgelegten und entsprechend sparsamen Infrastruktur. Zusammen mit zusätzlichen, prozessspezifischen Maßnahmen, wie etwa lokale Filter- und Absaugsysteme, kann das Gefährdungsrisiko für Mensch und Produkt deutlich reduziert werden.

In Bezug auf die Verringerung des Energiebedarfs zeichnen sich verschiedene Ansätze ab. Allgemein gilt, dass der Energiebedarf der Trocken- und Reinräume abhängig von der aufbereiteten Luftmenge und dem einzuhaltenden Taupunkt ist. Einen deutlichen Mehrwert bieten in diesem Zusammenhang adaptive Betriebsstrategien, mithilfe derer die energieaufwändige Luftaufbereitung bedarfsspezifisch an die tatsächlichen vorherrschenden Bedingungen angepasst werden kann. Bestimmt durch die Anzahl der im Raum befindlichen Personen und daraus resultierender Feuchteemissionen, wird der Trocknungsgrad bzw. das Mischungsverhältnis aus der als Umluft geführten und neu konditionierter Luft flexibel angepasst. Weitere Energieeinsparungen lassen sich durch den Einsatz von energieeffizienteren Komponenten wie, z. B. Pumpen und Adsorptionseinheiten, durch mehrstufige Systeme zur Konditionierung und durch die Nutzung von anfallender Abwärme innerhalb des Gesamtprozesses realisieren. Die Nutzung von Elektrizität anstelle von Erdgas für die Regeneration der Adsorptionseinheiten bietet

in diesem Zusammenhang schließlich die Möglichkeit, auf fossile Energieträger zu verzichten und zusätzliche Verbrennungsemissionen einzusparen.

Da sich mit dem Betrieb kleinerer Rein- und Trockenräume die Vorteile eines geringeren Energiebedarfs und die Möglichkeit einer präzisen Regelung kombinieren lassen, sind geringe Footprints der Anlagen anzustreben. Ferner werden zunehmend neue Konzepte erprobt, welche das konditionierte Raumvolumen teilweise bis auf die Produktionsanlage selbst minimieren und dadurch den konditionierten Luftvolumenstrom deutlich reduzieren. Je nach Größe des zu konditionierten Volumens werden diese abgekapselten Umgebungen als Mikro- bzw. Mini-Environment bezeichnet. Abhängig von der technischen Ausführung des Systems wird durch das Mikro- oder Mini-Environment eine Prozessumgebung mit vorgefilterter oder getrockneter Luft oder eine hochreine Inertgasatmosphäre bereitgestellt. Der Zugang zum Prozessraum insbesondere zu Wartungszwecken wird dabei für das Personal über ausgewiesene Schnittstellen realisiert. Der Zugang kann beispielsweise über Glovebox-Handschuhe umgesetzt werden, sodass das Personal der Rein- /Trockenraumumgebung nicht ausgesetzt ist und gleichzeitig menschliche Kontaminationspfade nahezu vollständig ausgeschlossen werden können. Eine weitere Möglichkeit besteht in einem modularen Maschinendesign, bei dem einzelne Bereiche vor der Öffnung vom Rest der Maschine hermetisch abgetrennt werden können. Somit wird der Verlust der konditionierten Atmosphäre auf ein notwendiges Maß, z.B. den zu wartenden Bereich, beschränkt. In diesem Zusammenhang ist auch eine Kapselung oder Segmentierung von geschlossenen Luftvolumina mit unterschiedlichen Konditionierungen möglich. Dabei wird um die gekapselte Maschine, in deren Prozessraum strenge Taupunktanforderungen angelegt werden, ein Trockenraum mit geringerem

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	8.1	8.2
Nachhaltigkeit	↑	↗
Qualität	↗	→
Kostenersparnis	↑	↗

Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag

8.1 Bedarfsgerechte und gleichzeitig wirtschaftliche Auslegung des Rein- und Trockenraums

8.2 Verbesserung der Energieeffizienz

Taupunkt gebaut, sogenannte Meso-Environments. Folglich kann die Maschine bei Wartungsarbeiten geöffnet werden und fällt dabei lediglich auf den geringeren Taupunkt des sie umgebenden Trockenraums (statt auf unkonditionierte Atmosphäre) zurück. Die Dimensionierung des konditionierten Luftvolumens ist somit nicht nur abhängig von dem Prozess und den Materialanforderungen, sondern auch von der Bedienung und Instandhaltung der Anlage.

Um das Kontaminationsrisiko innerhalb wie auch außerhalb des Mini-Environments gering zu halten, ergeben sich hohe Anforderungen an die Dichtheit des Systems und zulässige Leckageraten. Eine Schwierigkeit in der skalierten Umsetzung der Mini-Environments ist vor allem die Definition der Schnittstellen. Die Schnittstellen

sind übergeordnet zwischen einzelnen Prozessschritten entlang der Prozesskette zu definieren, z.B. durch integrierte Schleusensysteme, die einen kontinuierlichen Materialfluss ermöglichen.

Durch die eingeschränkten Möglichkeiten zum Eingreifen des Personals erfordert der Einsatz von Mini-Environments zudem einen sehr hohen Automatisierungsgrad mit entsprechender Prozessstabilität. Die Skalierung und Übertragung des Konzepts auf die Großserienfertigung gestaltet sich vor diesem Hintergrund als herausfordernd. Bei erfolgreichem Einsatz der Mini-Environments sind laut Experteneinschätzung allerdings signifikante Energieeinsparungen (Faktor 5-8) gegenüber der Konditionierung von großen Räumen möglich.

Weitere Überlegungen zielen auf die Auslagerung ganzer Prozessschritte aus dem Trocken- und Reinraum ab. Dabei müssen die gesamte Prozesskette und mögliche Aufwände und Qualitätsverluste durch zusätzliches Ein- und Ausschleusen der Zellen, sowie der höhere zeitliche Aufwand betrachtet werden.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Nutzen optimal und bedarfsgerecht ausgelegter Trocken- und Reinräume (RBW 8.1) wird als hoch eingestuft. Die Dimensionierung der Versorgungstechnik wirkt dabei mit einem Hebeleffekt auf weitere Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz, sodass in Summe wesentliche Beiträge zur Kosten- und auch Energieersparnis geleistet werden können. Der mit dem Einsatz von Mini-Environments verbundene Aufwand durch die Abkapselung und Verknüpfung einzelner Prozessstationen wird unter Berücksichtigung der bereits erzielten Fortschritte für kleinere Linien als mittlerer Aufwand eingeschätzt. Für die Hochskalierung bedarf es hier komplett neuer Konzepte. Durch die neuen Schnittstellen und zusätzlichen Schleusensysteme ergeben sich mehrere Änderungen entlang

der Prozesskette und es entsteht stellenweise ein Mehraufwand in der Produktion. Der Nutzen der RBW 8.2 wird als mittel eingeschätzt. Durch die Änderungen können weitere Einsparung im Energiebedarf erzielt und CO₂-Emissionen reduziert werden, was sich positiv auf die Gesamtkosten der Nachhaltigkeitsziele der Batteriezellproduktion auswirkt. Die absoluten Einspar-effekte sind denen bei der Durchbrechung der RBW 8.1 jedoch unterlegen.

Autoren:

Christina von Boeselager, TU Braunschweig;
Artur Scheibe, RWTH Aachen University

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Dr. Stefan Jakschik, CEO, ULT AG

Mit weiterer Unterstützung von:

COLANDIS GmbH
DESTACO Europe GmbH
Maschinenbau Kitz GmbH
Omron Electronics GmbH

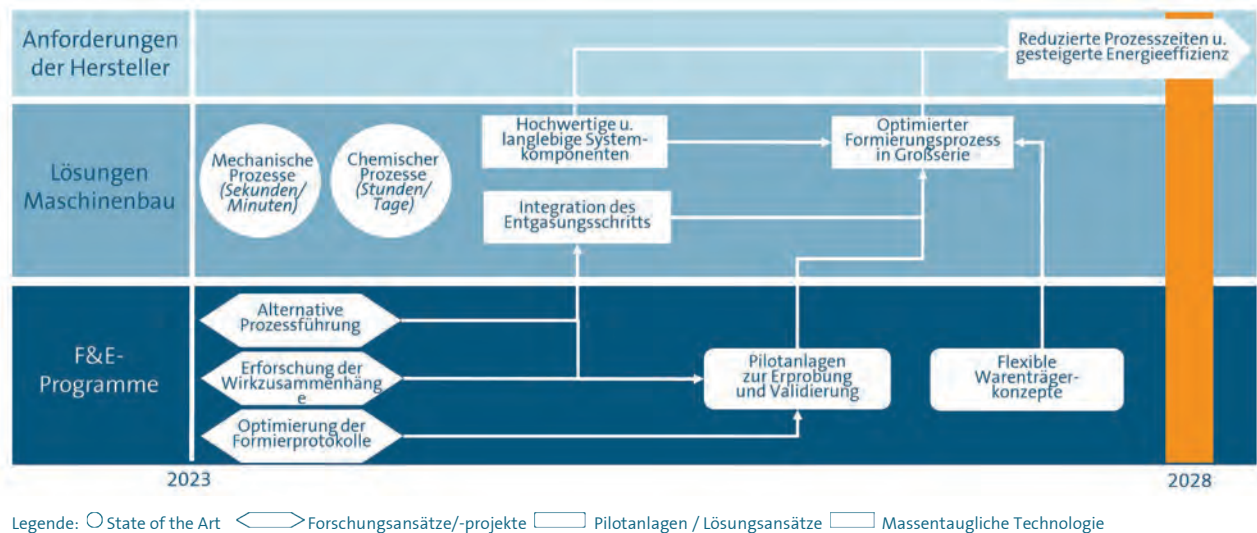


9 Formierung und Reifung

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
9.1	Reduktion der Prozesszeiten (Parameteroptimierung in der Zellfinalisierung)	Fortschritt erzielt	Hoch	2028
9.2	Reduktion des Energieverbrauchs (Steigerung der Energieeffizienz)	Fortschritt erzielt	Hoch	2025

RBW 9.1: Reduktion der Prozesszeiten (Parameteroptimierung in der Zellfinalisierung)

Durch eine optimierte Prozessführung und die Erforschung neuer Wirkzusammenhänge existieren mehrere Ansätze, um die langen Prozesszeit weiter zu verkürzen und die Energiekosten zu senken. Eine wesentliche Herausforderung besteht entsprechend darin, die Batteriezelle als Produkt und die Formierung als Prozess tiefgreifender zu verstehen, sodass unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen optimale (zeit- und energieoptimierte) Formierprotokolle abgeleitet werden können.



*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Formierung und Reifung

Grundlagen

Während der Formierung werden die Batteriezellen erstmals zyklisch mit einem definierten Stromprofil geladung und entladen. Dadurch bildet sich die sogenannte Solid Electrolyte Interface (SEI). Diese stellt einen für die Zellfunktion entscheidenden Qualitätsparameter dar und beeinflusst maßgeblich die Sicherheit sowie Lebensdauer der Batteriezelle [Li2017].

Im Rahmen der Formierung werden stets mehrere Lithium-Ionen-Zellen gleichzeitig innerhalb eines Warenträgers formiert. Grundsätzlich existieren zwei Konzepte, die von Maschinen- und Anlagenbauern umgesetzt werden. Im Falle des Regalkonzepts werden die Batteriezellen in Regalen kontaktiert und gelagert. Im Falle des Kammerkonzepts werden die Batteriezellen auf einem Modulwarenträger kontaktiert und gemeinsam in eine Kammer zur Formierung untergebracht. Der Einsatz von zellspezifischen Warenträgern kann dabei auch in der Umsetzung des Regalkonzepts erfolgen. Hauptunterschied beider Konzepte bleibt insofern die Einbringung der Batteriezellen in eine abgeschlossene und gekapselte Umgebung. Darüber hinaus resultieren weitere Unterschiede, vordergründig in der Integration der Sicherheits- bzw. Havariekonzepte.

Die für die Be- und Entladung der Batteriezelle erforderliche Kontaktierung wird über Kontaktstifte realisiert, welche eine sichere Verbindung und einen geringen Übergangswiderstand gewährleisten. Die einzelnen Kontaktieranschlüsse werden dabei Kanäle genannt. Abhängig von der Zellchemie nimmt die anschließende Formierung bis zu 24 Stunden in Anspruch. Die genauen Wirkzusammenhänge im Zuge der Formierung sind bislang noch nicht vollständig erforscht. Es zeigt sich jedoch, dass

insbesondere bei höheren C-Raten die initialen Kapazitätsverluste und Kontaktwiderstände höher ausfallen, sodass längere Formierprotokolle bei geringen C-Raten bevorzugt werden.

Der anschließende als „Reifung“ (engl. Aging) bezeichnet Selbstentladungstest dient ausschließlich der Qualitätssicherung und wird aus diesem Grund häufig dem „End-of-Line-Test“-Prozessschritt zugeordnet. Die formierten Lithium-Ionen-Zellen werden dabei über mehrere Wochen gelagert, wobei in regelmäßigen Abständen die Zellspannung (engl. Open Circuit Voltage) gemessen wird. Die in diesen Messungen ermittelten Selbstentladungsdaten werden für die Bestimmung der Zellqualität und die Prognose der Lebensdauern herangezogen. Aufgrund der langen Ruhezeiten von bis zu mehreren Wochen wird in diesem Prozess über den Bedarf an Lagerplätzen und Warenträgern viel Kapital und Fabrikfläche gebunden. Die während der Entladung einzelner Lithium-Ionen-Zellen freigesetzte Energie wird für die Ladung anderer und sich im Ladeprozess befindlicher Batteriezellen genutzt. Dies wirkt sich positiv auf die Gesamtbilanz des Energieverbrauchs während der Formierung aus.

In Summe machen die Prozesse der Formierung, Reifung und des EOL-Tests einer Lithium-Ionen-Zelle rund ein Drittel der gesamten Zellkosten aus und nehmen in der Regel anderthalb bis drei Wochen in Anspruch. Die Relevanz für Batteriehersteller ist somit unverändert hoch [An2016].

Herausforderungen

Eine zentrale Herausforderung findet sich in den hohen Prozesszeiten der Formierung und Reifung. Ziel ist es, die Batteriezelle als Produkt und die Zellfinalisierung als Prozess tiefgreifender zu verstehen, sodass unter Berücksichtigung der wirkenden Wechselwirkungen Zeit- und Kostenpotentiale gehoben werden können.

Eine weitere Herausforderung in der Formierung ergibt sich in der Reduktion des Energieverbrauchs. Die Formierung ist einer der energieintensivsten Prozessschritte im Rahmen der Batteriezellfertigung. Der Betrieb der Anlagen wird dabei zu einem der größten Kostenfaktoren und lässt sich auf die hohen Anschlussleistungen im Dauerbetrieb und die langen Formierzyklen bei niedrigen C-Raten zurückführen. Es gilt in diesem Fall die Energieverluste zu reduzieren, oder durch neue Ansätze die Formierzeit zusammen mit einem geringen Energieeinsatz zu optimieren. Die durch die Änderungen und Anpassungen des Formierungsprozesses eingesparten Kosten müssen dabei höher ausfallen als die mit den neuen Konzepten einhergehenden Investitionskosten.

Schließlich sind die potentiellen Gefahren im Zusammenhang mit der Formierung als Herausforderung hervorzuheben. Diese können aus einem möglichen Kanalausfall bzw. einer Fehlbestromung der kontaktierten Lithium-Ionen-Zellen resultieren und zu einem thermischen Durchgehen (engl. Thermal runaway) führen. Ursachen hierfür können Kontaktierungsprobleme, Zelldefekte oder fehlerhafte Formierprotokolle sein. Insbesondere an den Kontaktierungsstellen besteht bei starker Wärmeentwicklung die Gefahr eines Wärmestaus, der zu einer Überhitzung und dem thermischen Durchgehen der Zelle führen kann. Schäden an System und Technik sind in Fall eines solchen Versagens in der Regel irreparabel. Um der erhöhten Brandgefahr durch die Vielzahl gleichzeitig zyklisierter Zellen auf engem Raum Rechnung zu tragen, werden bei der Formierung vor diesem Hintergrund verlässliche Sicherheitskonzepte (bspw. Frühwarnsysteme mit Gassensorik, Inertgas-Löschanlagen, feuerfeste Brandcontainer) vorgesehen.

Lösungsansätze

Zur Steigerung der Produktqualität und Energieeffizienz im Rahmen der Formierung liegt der Forschungsfokus zurzeit vorrangig auf der Identifikation qualitätsrelevanter Wirkzusammenhänge. Ziel ist es, eine homogene, möglichst dünne und langzeitstabile SEI-Schicht unter minimalem Energieeinsatz (RBW 9.2) und verkürzter Formierzeit (RBW 9.1) auszubilden. In der Untersuchung dieser Zusammenhänge wird die Messung von Prozess- und Produktparametern sowie deren Sammlung, Analyse und Verwertung stets relevanter. Gewonnene Erkenntnisse sollen dabei helfen optimierte Formierungsstrategien (bspw. Reduktion der Ladeschlussspannung, Pulsformierung) herzuleiten. Entscheidend für die Untersuchung besagter Zusammenhänge ist dabei die Digitalisierung der Produktionslinie, um Daten zu sammeln und aussagekräftige Analysemodelle und intelligente KI-Modelle aufzusetzen. Über die Digitalisierung des Reifungsschritts wird es darüber hinaus möglich, das Verständnis über die finale Zellqualität und den Vorgang der Zellalterung weiter zu vertiefen sowie gewinnbringend für weitere Prozessoptimierungen zu nutzen. Realisiert werden kann diese digitale Anbindung bspw. mithilfe eines im Warenträger integrierten Batteriemanagementsystems (BMS). Projekte wie das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt „OptiPro“ setzen an dieser Stelle an und versuchen sämtliche Prozess- und Qualitätsparameter der Zellfinalisierung unter dem Einsatz innovativer Messtechniken auszuwerten [PEM2022]. Die gesammelten Daten und ausgewerteten Informationen werden dabei in einem virtuellen Produktionssystem hinterlegt und für die Analyse sowie Auswertung mit Hilfe künstlicher Intelligenz eingesetzt.

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Formierzeiten setzt direkt am Produktionsprozess an und untersucht den Einsatz von Elektrolytadditiven, modifizierten Elektrodenmaterialien, die Laminierung von einzelnen Elektroden zu sogenannten Elektroden-Separator-Verbunde sowie angepassten Bindern und Separatoren, mit dem Ziel die während der Formierung im Inneren der Zelle ablaufenden chemische Reaktionen zu beschleunigen. Damit wird nicht nur der initiale Kapazitätsverlust durch die Bildung der SEI-Schicht verringert, sondern auch die Schnellladefähigkeit verbessert und die Energieeffizienz durch weniger Verluste während der Formierung gesteigert [Frankenberger2019].

So ist für eine hochwertige Ausbildung der SEI-Struktur bspw. die Elektrolytzusammensetzung aufgrund des Zersetzungspotenzials möglichst genau auf die verwendete (Graphit-)Anode anzupassen [Buqa2006]. Ebenso werden Benetzbarkeit und Elektrolytaufnahme des Separators zu entscheidenden Kriterien, welche über einen niedrigen Innenwiderstand und eine hohe Ionenleitfähigkeit zu einem optimalen Ergebnis der Formierung beitragen [Davoodabadi2020]. Auch die Wirksamkeit zusätzlicher Prozessschritte, wie etwa das Pre-Charging wird in diesem Zusammenhang evaluiert. Hierbei wird mit sehr niedrigen Strömen auf geringe Spannungsniveaus vorgeladen und entgast [Xiaoyan2021].

Weitere vielversprechende Ansätze zeigen sich in der Einstellung definierter Temperaturprofile und mechanischer Drücke während der Formierungszyklen. Die Erhöhung der Temperatur bis auf ca. 50°C hat nachweislich einen positiven Einfluss auf die Leitfähigkeit des Elektrolyten durch den Separator, das Feststoffdiffusionsvermögen in den aktiven Materialteilen sowie den Ladungsübergangswiderstand an der Elektrode-Elektrolyt-Grenzfläche [Leng2017].

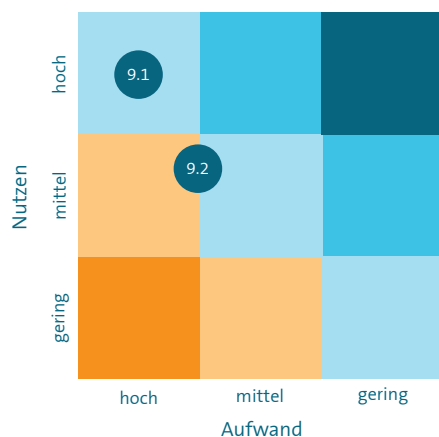
Diese Faktoren begünstigen eine erhöhte Reaktionsgeschwindigkeit und verringern den Gesamttinnenwiderstand der Batteriezelle. Eine temperierte Formierung verspricht somit eine schnellere, gleichmäßigere Ausbildung der SEI, welche wiederum die Kapazität bei anschließender Zyklierung erhöht [Bhattacharya2014]. Die Temperatur hat darüber hinaus auch einen wesentlichen Effekt auf die Reifung der Zelle. So werden durch die Ruhelagerung bei erhöhten Temperaturen die Reaktionsprozesse innerhalb der Zelle beschleunigt. Neben einer Stabilisierung der SEI-Schicht lassen sich darüber potentielle Qualitätsmängel schneller erkennen. Allerdings zeigt sich für die Batteriezellen zugleich eine hohe Temperatursensitivität. Temperaturfenster müssen daher präzise eingehalten werden. Bereits geringe Temperaturabweichungen oberhalb 50°C können zu unerwünschten Nebenreaktionen führen, die sich in einer Degradierung der Zelleperformance widerspiegeln.

Mit der Aufbringung eines zusätzlichen Drucks im Rahmen der Formierung kann zudem aufgrund der Elastizität des Separators der physikalische Abstand zwischen den einzelnen Elektroden verringert werden. Dies führt zu einer Reduktion des Innenwiderstands in der Zelle und erhöht die Diffusion des Elektrolyten [Weber2014]. Die Laminierung einzelner Elektroden-Separator-Verbunde in der Lithium-Ionen-Zelle verfolgt einen ähnlichen Ansatz.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Nutzen einer reduzierten Prozesszeit in der Formierung und Reifung der Lithium-Ionen-Zellen wird aufgrund der hierfür gebundenen Kosten und Fabrikflächen als sehr hoch bewertet. Dem gegenüber steht ein ebenfalls sehr hoher Aufwand, da die Wirkzusammenhänge der Zellfinalisierung ausführlicher erforscht und verstanden werden müssen.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	9.1	9.2
Nachhaltigkeit	↗	↗
Qualität	→	→
Kostenersparnis	↑	↗

Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag

9.1 Reduktion der Prozesszeiten

9.2 Reduktion des Energieverbrauchs

Der Nutzen einer höheren Energieeffizienz in der Formierung wird als mittelmäßig bewertet, da für die Hersteller initial höhere Investitionskosten entstehen, welche sich anschließend mit dem Betrieb der Anlagen erst noch amortisieren müssen. Die Durchbrechung der entsprechenden RBW 9.2 führt zu einer höheren Nachhaltigkeit und im Betrieb zu Kostenersparnis. Infolge der Umrüstung der Anlagen auf die neuen Konzepte wird der Aufwand jedoch als hoch eingeschätzt.

Autor:

Artur Scheibe, RWTH Aachen University

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Erik Weller, Key Account Manager,
thyssenkrupp AG

Mit weiterer Unterstützung von:

Industrie Partner GmbH

Schuler Group GmbH

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung

Batteriezzelle FFB

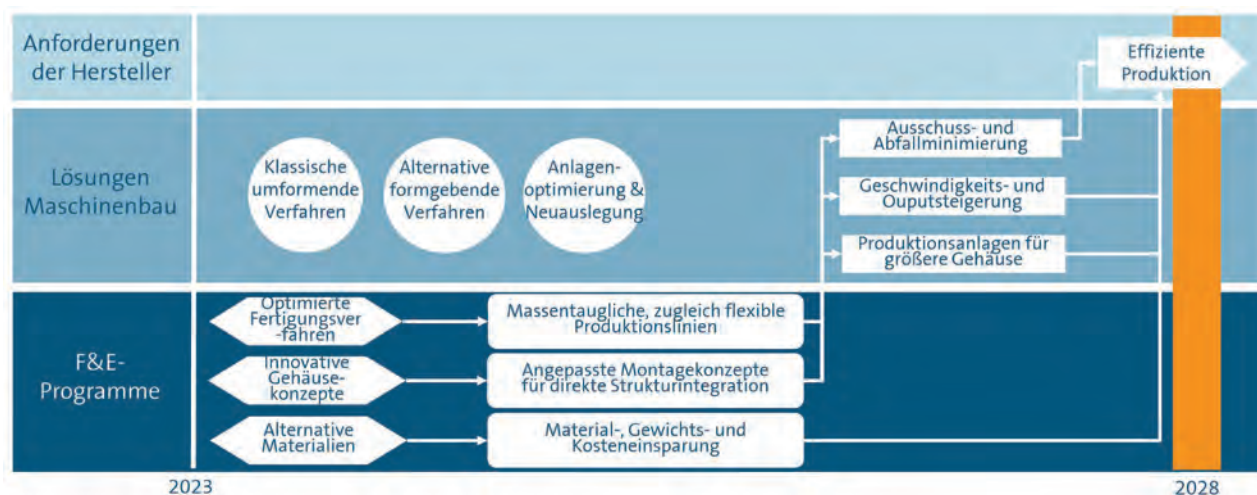


10 Gehäusefertigung (Zelle)

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
10.1	Minimierung des Ausschusses und der Stanzgitterabfälle	Fortschritt erzielt	Hoch	2028
10.2	Hochgeschwindigkeitsanlagen für gesteigerte Produktivität	neu	Hoch	2028
10.3	Verarbeitung alternativer Gehäusematerialien	Fortschritt erzielt	Mittel	2026

RBW 10.1: Minimierung des Ausschusses und der Stanzgitterabfälle

Die Vielfalt unterschiedlicher Batteriezellvarianten nimmt durch das wachsende Anwendungsspektrum der Lithium-Ionen-Batterie weiter zu. Für die einzelnen Zellformate zeigt sich dabei übergreifend der Trend hin zu größeren Dimensionen bzw. Abmaßen. Für die Zellgehäusefertigung ergeben sich daraus neue Herausforderungen, denen prozessseitig mit angepassten Fertigungsprozessen und -anlagen produktseitig mit innovativen Gehäusekonzepten begegnet werden muss. Zur Sicherstellung nachhaltiger Wirtschaftlichkeit steht dabei nach wie vor das Thema der effizienten Produktion, zusammen mit minimierten Ausschuss- und Abfallquoten im Mittelpunkt.



Legende: ○ State of the Art ◀ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ■ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Gehäusefertigung (Zelle)

Grundlagen

Mit dem rasanten wachsenden Bedarf an Batteriezellen gewinnt auch die Herstellung der Zellgehäuse zunehmend an Bedeutung. Je nach Zellformat bzw. Gehäusotyp finden dabei in der Fertigung unterschiedlichen Prozesstechnologien Anwendung. Die Ausformung rein metallischer Gehäuse für prismatische Zellen aus Aluminium bzw. Aluminiumlegierungen und für zylindrische Zellen aus vernickeltem Stahlblech basiert dabei auf den Verfahren des Tiefziehens und Fließpressens [Pettinger2013]. Mit einer deutlich kürzeren Prozesskette zur Gehäuseausformung und der nahezu vollständigen Verwertung des eingesetzten Materials bietet das Fließpressen einen klaren Vorteil. Die Herstellung eines prismatischen Aluminiumgehäuses lässt sich in einem einzigen Schritt realisieren, worauf lediglich das Abstreckziehen zur Erreichung der gewünschten Endgeometrie und ein Beischnitt folgen. Im Vergleich zu tiefgezogenen Gehäusen kann die Ausbringungslleistung mit diesem Verfahren auf etwa das Fünffache gesteigert werden. Allerdings ergeben sich beim Fließpressen im Bereich der verarbeitbaren Materialvarianten klare Einschränkungen, was den Einsatz auf ausgewählte Gehäusematerialien limitiert. So ist nickelbeschichteter Stahl, welcher als Standardmaterial für zylindrische Zellgehäuse eingesetzt wird, nicht mit diesem Verfahren kompatibel.

Während beim Fließpressen die Druckfließgrenze des Werkstoffs überschritten wird und dieser eingeschlossen zum Fließen gebracht wird, wird beim Tiefziehen der Werkstoff als Blechband über einen Stempel in eine definierte Matrize gepresst. Das zu verformende Ausgangsmaterial wird in diesem Fall durch einen Niederhalter fixiert. Mit den in Bezug auf die Gehäusemerkmale stets anspruchsvolleren Toleranz

grenzen der Batteriehersteller, bietet der mehrstufige Tiefziehprozess den Vorteil zielgerichteter Gestaltungsmöglichkeiten.

Auch das Gehäuse der Pouch-Zelle wird über einen Tiefziehprozess hergestellt, wobei anstelle eines rein metallischen Gehäuses eine Aluminium-Kunststoff-Verbundfolie verwendet wird. Diese wird in dem Prozess zu einer definierten Halbschalenform ausgeformt [Singer2020]. Die Zuführung der Aluminium-Kunststoff-Verbundfolie erfolgt in diesem Fall direkt von einer Rollenware mit automatischem Zuschnitt oder alternativ über die Bereitstellung bereits vorkonfektionierter Einzellagen. Beide zur Herstellung der Zellgehäuse genannten Prozesstechnologien sind in den letzten Jahren fortlaufend optimiert worden, wobei Fortschritte im Bereich der Produktionsgeschwindigkeiten und Prozessgenauigkeiten erzielt werden konnten.

Herausforderungen

Um der zunehmenden Variantenvielfalt, dem steigenden Kostendruck und den hohen Nachfragemengen begegnen zu können, ist es notwendig die in der Gehäuseherstellung etablierten Produktionsprozesse weiter zu optimieren. Konkreter Handlungsbedarf zeigt sich darin, die Fertigung neuer Gehäusevarianten zu ermöglichen und dabei die Effizienz der Produktionsprozesse durch eine hohe Materialausnutzung und Minimierung des Ausschusses weiter zu steigern (RBW 10.1). Unter Einsatz von präzisen Hochgeschwindigkeitsanlagen sollen so die geforderten Produktionsmengen zuverlässig hergestellt werden (RBW 10.2). Verschärft werden die aufgezeigten Herausforderungen durch den Trend strengerer Toleranzvorgaben bei gleichzeitig wachsenden Zellformaten. Notwendig wird dahingehend die Anpassung der in der Gehäuseproduktion eingesetzten Prozesse und Materialien, was wiederum eine umfassende Abstimmung der gesamten Prozesskette erfordert (RBW 10.3). Für wachsende

Zellformate zeigt sich dabei, dass Dichtflächen größer und Verbindungstechniken aufwendiger gestaltet werden müssen. So wird durch die Leckage des gesundheitsschädlichen Elektrolyten aus einem undichten Gehäuse die Batteriezelle umgehend unbrauchbar und muss nicht zuletzt aufgrund des Sicherheitsrisikos ausgeschlossen werden. Speziell für das Gehäuse der Pouch-Zelle gestaltet sich die defektfreie Verarbeitung der Aluminium-Verbundfolie im Tiefziehprozess mitsamt der anschließenden Versiegelung als wesentliche Kernherausforderung. Tiefgezogene Halbschalen weisen gegenwärtig Tiefen von bis zu 10 mm auf, bei noch höheren Umformgraden steigt jedoch die Gefahr der ungewollten Ausdünnung und Schädigung des Ausgangsmaterials. Eine geringe Materialausnutzung von ca. 65 Prozent macht in diesem Verfahren schließlich mehr als ein Drittel des ursprünglich eingesetzten Materials unbenutzbar.

Lösungsansätze

Als Antwort auf die beschriebenen Herausforderungen gilt es einerseits die notwendigen Maschinen und Anlagen zur Herstellung größerer und materialtechnisch modifizierter Zellgehäuse weiterzuentwickeln, andererseits eingesetzte Verfahren prozessseitig zu optimieren, um bestehende Nachteile wie etwa hohe Bearbeitungszeiten oder auch eine geringe Materialausnutzung zu reduzieren. Vielversprechend erscheint in diesem Kontext unter anderem auch ein Technologietransfer aus benachbarten Industrien, sofern die entsprechenden Verfahren in einer kostenoptimierten und skalierten Serienproduktion anwendbar sind. Vereinzelt zeigen sich Ansätze, welche die metallischen Zellgehäuse in einer Kombination aus Umformverfahren (Strangpressen, Biegen) und Fügeverfahren (hauptsächlich Schweißen) herstellen. Je nach Gehäusespezifikation und definierten Anforderung ergeben sich hierbei Vorteile gegenüber den genannten, etablierten Verfahren. Für die Herstellung von Aluminium-Halbschalen für unterschiedliche Pouchzellenformate können

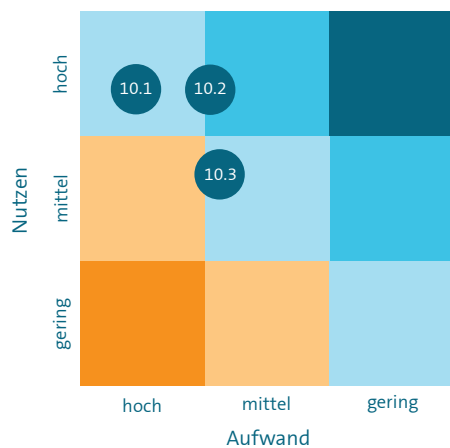
Parameterstudien einen wertvollen Beitrag leisten [Fleischer2017]. Die im Zuge der experimentellen Untersuchungen gesammelten Erkenntnisse können dabei in die Entwicklung optimierter Verbundfolien überführt werden, deren Aufbau nochmals höhere Umformgrade ermöglicht.

Erfolgsversprechend zeigt sich auch die Erforschung und Entwicklung innovativer Materialien und Gehäusekonzepte, welche leichtere Gehäuse mit dünneren Wandstärken bei mindestens gleichbleibender Festigkeit ermöglichen sollen. Ebenso lassen sich Ansätze ausmachen, die zusätzliche Sensorik direkt in die Zelle einbringen, um Sicherheit und freigesetzte Performance in der Endanwendung zu steigern [Thielmann 2017, Foreman2017, Hong2019, Zhang2019]. Speziell für Hardcase-Zellen eröffnen diese optimierten Zellgehäuse das Potential einer Strukturintegration, die die Energiedichte auf Batteriesystemebene deutlich zu steigern vermag. Eingesetzte Produktionsanlagen müssen für die Verarbeitung entsprechender Werkstoffe jedoch zunächst angepasst bzw. befähigt werden. Zwischenzeitlich lässt sich materialseitig ein vermehrter Einsatz des bereits verwendeten Aluminiums beobachten. Die aus Aluminium gefertigten Gehäuse bieten dabei eine Reihe von Vorteilen, wie höhere Umformbarkeit und Festigkeit, höhere thermische Leitfähigkeit und hohe Recyclingquoten. Kleinere Wandstärken zur Gewichtseinsparung lassen sich hierbei über feste Aluminiumlegierungen realisieren [Thielmann 2018].

Aufwand- und Nutzenbewertung

Angesichts einer steigenden Stückzahl und dem zunehmenden Konkurrenzdruck auf den Märkten wird der Nutzen der Ausschussreduktion innerhalb der Zellgehäusefertigung in den nächsten Jahren insgesamt ansteigen. Prozesse und eingesetzte Materialien sind hierfür weiter zu optimieren. Der Aufwand der darauf ausgerichteten Maßnahmen wird als hoch eingeschätzt.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	10.1	10.2	10.3
Nachhaltigkeit	↑	→	↗
Qualität	→	↑	→
Kostenersparnis	↑	↗	↑

Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag

10.1 Minimierung des Ausschusses und der Stanzgitterabfälle

10.2 Hochgeschwindigkeitsanlagen für gesteigerte Produktivität

10.3 Verarbeitung alternativer Gehäusematerialien

Durch gesteigerte Materialeffizienz und Produktivität können jedoch wesentliche Einsparpotentiale realisiert werden, sodass erfolgreich implementierte Lösungsansätze auch mit einem hohen Nutzen einhergehen.

Mittleres Potential mit aktuell niedriger bis mittlerer Reife bietet schließlich die Verwendung neuartiger Gehäusekonzepte und –Materialien, welche die Herstellung (gewichts-)optimierter, nachhaltiger und ggf. mit integrierten Sensoren ausgestatteter Zellgehäuse ermöglichen.

Autor:

Artur Scheibe, RWTH Aachen University

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Dr. Daniel Weingarth, Technology Director, H&T Rechargeable Solutions GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

Coherent
Piab Vakuum GmbH
Rockwell Automation GmbH
Schuler Pressen GmbH
SCHUNK GmbH & Co.KG
WEBER Schraubautomaten GmbH

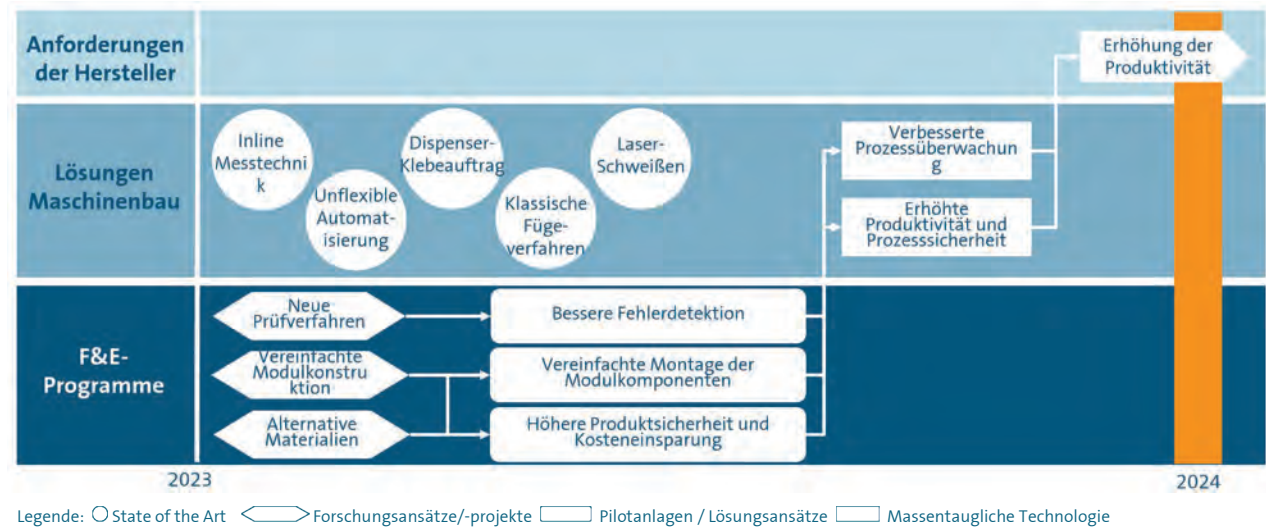


11 Modulproduktion

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
11.1	Trade-off zwischen Produktkomplexität und hoher Automatisierung	Fortschritt erzielt	Hoch	2024 - 2025
11.2	Umsetzung und Integration von Cell-to-X Konzepten	Fortschritt erzielt	Mittel	2023 - 2025
11.3	Optimale Verspannung der Zellen (inkl. Next-Gen Materialien)	Fortschritt erzielt	Mittel	2023 – 2024
11.4	Verkürzung der BoL-Testzeit und Optimierung der Zellclusterung sowie Erhöhung des Durchsatzes	Signifikante Fortschritte erzielt	Mittel	2023 – 2024
11.5	Integration eines inline-Qualitätsmesssystem	Fortschritt erzielt	Mittel	2023 – 2024

RBW 11.1: Trade-off zwischen Produktkomplexität und hoher Automatisierung

In der Modulfertigung spielt die effiziente Produktion aufgrund des hohen Kostendrucks eine immer entscheidendere Rolle. Um eine massentaugliche Produktion zu ermöglichen, müssen Kosten reduziert und Prozesse verbessert werden. Für die Modulfertigung sind viele verschiedene Fügeverfahren notwendig, die die Prozesskomplexität erhöhen und einen gesteigerten Qualitätssicherungsaufwand erfordern.



*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Modulproduktion

Grundlagen

In der Modulfertigung werden Batteriezellen zur weiteren Verarbeitung abhängig von ihrer Qualität sortiert und gereinigt. Bei Rund- und prismatischen Zellen ist das Aufbringen einer Isolierschicht erforderlich. Die Rundzelle wird in der Regel mit einer schützenden Folie überzogen. Insbesondere bei prismatischen Zellen stellt der Lackauftrag eine gute Alternative dar. Für die Festigkeit und Crashesicherheit sorgen anschließende Verklebungen.

Nach der Verpressung zum Stack findet die Kontaktierung und Verknüpfung der einzelnen Zellen auf Modullevel sowie das Einbringen in ein Gehäuse statt. Dazu sind viele präzise Handling- und Fügeprozesse erforderlich, die vor allem in kleineren Serien einen niedrigen Automatisierungsgrad aufweisen. Hierzu zählt das sichere Handling der Zellen wie auch Fügetechnologien im Gehäuse u. a. Kleben, Schrauben und Schweißen, alle in direkter Umgebung oder an der Zelle selbst mit entsprechenden Sicherheitskonzepten [Larsson2019, Kampker2014, Das2018, Schmidt 2015]. Funktionale Kleber können dabei auch fürs Wärmemanagement genutzt werden.

Herausforderungen

Um dem bestehenden Kostendruck der Massenproduktion in der Automobilindustrie weiter gerecht werden zu können, gilt es, die derzeit verwendeten Produktionsprozesse der Modulfertigung und deren Qualitätssicherung immer effizienter zu gestalten. Der Schwerpunkt liegt auf der Erhöhung der Produktivität und einer Steigerung des Automatisierungsgrades (RBW 11.1) bei einer zurzeit noch hohen Produktkomplexität. Durch Trends wie z. B. steigende Sicherheitsanforderungen und -standards sowie

Design- und Gewichtsreduktionen bei Nichtleistungskomponenten wird dabei die Produktkomplexität noch erhöht. Zudem besteht in Sonderanwendungen gleichzeitig die Herausforderung einer hohen Variantenvielfalt, der begegnet werden muss (siehe Technologiekapitel 13). Durch die Umsetzung neuartiger Konzepte, u. a. „Cell-to-Pack“ oder „Cell/Module-to-Chassis“ (RBW 11.2.) wird durch die größeren Zellen und die teilweise andere Produktstrukturierung und Komponentenplatzierung die Automatisierung vor neue Herausforderungen gestellt.



Fördersystem Versaflex für den ultra-schnellen Transport von Batterie-Rundzellen im Wareneingang eines Automobilherstellers – ohne Werkstückträger, mit maximalem Durchsatz und hoher Prozesssicherheit
Quelle: Maschinenbau Kitz GmbH



5 Module werden zum Pack montiert. Bild zeigt Aufsetzen des Gehäuseoberteils/Deckel und Verschraubung mit Batteriepackgehäuse.
Quelle: Liebherr-Verzahntechnik GmbH

In der Modulproduktion besteht zudem eine große Herausforderung bei der Erforschung von optimalen Prozessparametern, wie z. B. Verspannungsparametern der Zellen zur Verbesserung der Performance und der Lebensdauer der Batterie (RBW 11.3) sowie in der Kontaktierung der Zellen (siehe Technologiekapitel Kontaktieren) [Cannarella2014].

Hohe Anforderungen werden ebenfalls bei dem Beginning-of-Line (BoL) -Test in der Modulproduktion gefordert. Um die Produktqualität zu erhöhen, müssen die Zellen vor dem Einbau in das Modul nach bestimmten Eigenschaften (z. B. Kapazität, Widerstand) geclustert werden (RBW 11.4). Durch unterschiedliche Zellqualitäten altert das Modul schneller und führt so zu einer Lebensdauerverkürzung der Batterie. Diese teils zeitintensiven Tests führen zu einer Erhöhung der Taktzeit und aufgrund der nur sehr reduzierten Testanzahl zu teils mangelnder Zellclustering. Ebenfalls kann aufgrund der Vielfalt an unterschiedlichen Prozess- und Qualitätsparametern die Identifikation von Defekten erschwert werden. Durch ein fehlendes Inline-Qualitätsmesssystem wird so die Fehleranfälligkeit erhöht (RBW 11.5).

Grundsätzlich ist es eine Herausforderung, dass die Kenntnisse über Möglichkeiten der Prozesstechnologie häufig nicht mit den Konstruktionen der Systementwickler zusammenpassen.

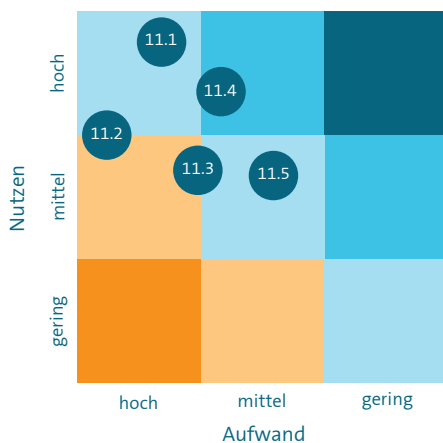
Lösungsansätze

Zur Realisierung einer hohen Automatisierung bei gleichzeitig hoher Produktkomplexität kann insb. durch Standardisierung von Komponenten und Prozessabläufen eine Verbesserung erreicht werden. Die Designflexibilität kann über eine modulare Produktgestaltung, wie zum Beispiel anpassbare Verspannelemente realisiert werden. Beim Aufbringen eines Lackes zur Isolierung der Zellen sind vollautomatische Anlagenlösungen möglich. Dabei können prismatischen Zellmodule in verschiedenen Formaten berührungslos im Durchlauf beschichtet werden. Außerdem kann durch Zusammenfassen von Komponenten in vorgelagerten Prozessen außerhalb der Modulproduktionslinie oder durch eine Funktionsintegration die Produktkomplexität reduziert werden.

Für die Entwicklung innovativer „Cell-to-X“-Konzepte sollte grundsätzlich ein intensiver Austausch zwischen Experten und Expertinnen aus dem Anlagenbau, der Fertigungstechnologie und der Batteriemodulentwicklung für bessere Synergien intensiviert werden. Insbesondere durch den Einsatz der Batteriekomponente als Strukturbauteil des Fahrzeugs muss der Aufbau und die Qualität des fertigen Produktes mit in den Entwicklungsprozess des Fahrzeuges integriert werden. Dabei müssen schlecht greifbare und schwere Komponenten auf Batteriefertigungsebene vermieden werden, um die Produzierbarkeit nicht zu gefährden. Auf der anderen Seite kann durch das Weglassen von verschiedenen Ebenen (u. a. Modulebene oder Systemebene) und die direkte Integration ins Fahrzeug die Produktkomplexität und somit der Produktionsaufwand deutlich reduziert werden.

Die Verspannung der Zellen erfolgt entweder durch das Gehäuse selber oder durch eine separate Spannvorrichtung. Zur optimalen Verspannung ist neben der Druckeinstellung ebenfalls eine homogene Druckverteilung relevant.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	11.1	11.2	11.3	11.4	11.5
Nachhaltigkeit	↑	↗	↗	↗	↗
Qualität	↗	→	↗	↗	↑
Kostenersparnis	↗	↗	↗	↗	↑

Beitrag: ↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag

11.1 Trade-off zwischen Produktkomplexität und hoher Automatisierung

11.2 Umsetzung und Integration von Cell-to-X Konzepten

11.3 Optimale Verspannung der Zellen (inkl. Next-Gen Materialien)

11.4 Verkürzung der BoL-Testzeit und Optimierung der Zellclusterung

11.5 Integration eines Inline-Qualitätsmesssystems

Der Zusammenhang zwischen Zellgröße, Material und optimale Druckeinstellung ist bisher unzu-reichend untersucht worden, daher sollte hier in Zusammenarbeit mit Entwicklung und der Forschung weitere Wirkzusammenhänge aufgedeckt werden.

Zur Optimierung der Qualitätssicherung in der Modulproduktion können innovative Messtechnologien und neuartige Prüfverfahren wie zum Beispiel *Optical Coherence* Technologie zur Überprüfung von erfolgreicher Applikation von Kleberauren verstärkt zum Einsatz kommen, um die Qualität in der Modulfertigung zu steigern. Automatisiert geführte Handlingsysteme mit InSitu Messtechnik sind eine mögliche Lösung, um die Modulfertigung noch effizienter zu machen. Durch den Einsatz von Greif- und Roboterarmen mit integrierter Messtechnik kann ebenfalls eine Verkürzung des BoL-Tests realisieren durch die

Parallelisierung von Transportprozess und Messzeitraum. Neben diesen Konzepten muss darüber hinaus ebenfalls die Messtechnologie weiterentwickelt werden. Vielversprechende Ansätze sind dabei der Einsatz von EIS-Messung und die Kombination von Realdaten und Simulationen, die in kürzerer Zeit einzelne wenige Messpunkte zur Bestimmung der Qualität nutzen können.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Im Vergleich mit anderen *Red Brick Walls* der Batterieproduktion ist die Modulproduktion schon stark industrialisiert, weil übliche Fertigungsverfahren verwendet werden. Es ist erkennbar, dass alle Fortschritte in diesem Bereich gleichermaßen auf eine Optimierung der Kosten, Qualität und Nachhaltigkeit zielen. Für die Effizienzsteigerung der Modulproduktion wird der Aufwand als groß angesehen, der Nutzen für

die Modulfertigung jedoch als hoch (RBW 11.1). Insgesamt tragen diese Maßnahmen sowohl zur Kostenreduktion, aber auch zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit und Qualität bei. Die Umsetzung von neuen Konzepten zur Fertigung von Cell-to-X wird so bewertet, dass dies nur mit einem hohen Aufwand umsetzbar sein wird. Der Nutzen wird als mittelhoch eingestuft (RBW 11.2). Der Aufwand für die Gestaltung der optimalen Zellverspannung in der Modulproduktion wird vom Aufwand und vom Nutzen her als mittelhoch eingeschätzt. (RBW 11.3). Die Umsetzung einer Verkürzung inkl. Optimierung des BoL-Tests wird von den Experten und Expertinnen als mittelhoch eingeschätzt, kann aber einen erheblichen Nutzen durch die Reduktion des Ausschusses und der Prozesszeit generieren (RBW 11.4). Bei der Implementierung eines Qualitätssicherungssystems wird der Aufwand sowie der Nutzen eher im mittleren Bereich gesehen, da bereits einige Technologien im Einsatz sind und in einem automatisierten Prozess, wie der Modulproduktion, bereits viele Ansätze integriert wurden (RBW 11.5).

Autoren:

Sarah Wennemar, Sebastian Wolf,
RWTH Aachen University

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Sebastian Gries, Produktmanager Gluing and
Battery Assembly, Dürr Systems AG

Mit weiterer Unterstützung von:

B&R Industrial Automation GmbH Coherent
DESTACO Europe GmbH
F&S BONDTEC Semiconductor GmbH
MACEAS GmbH
Maschinenbau Kitz GmbH
Omron Electronics GmbH
Pepperl+Fuchs SE
Piab Vakuum GmbH
Plasmatreat GmbH
Rockwell Automation GmbH
SCHUNK GmbH & Co.KG
Sick AG
Venjakob Maschinenbau GmbH & Co. KG

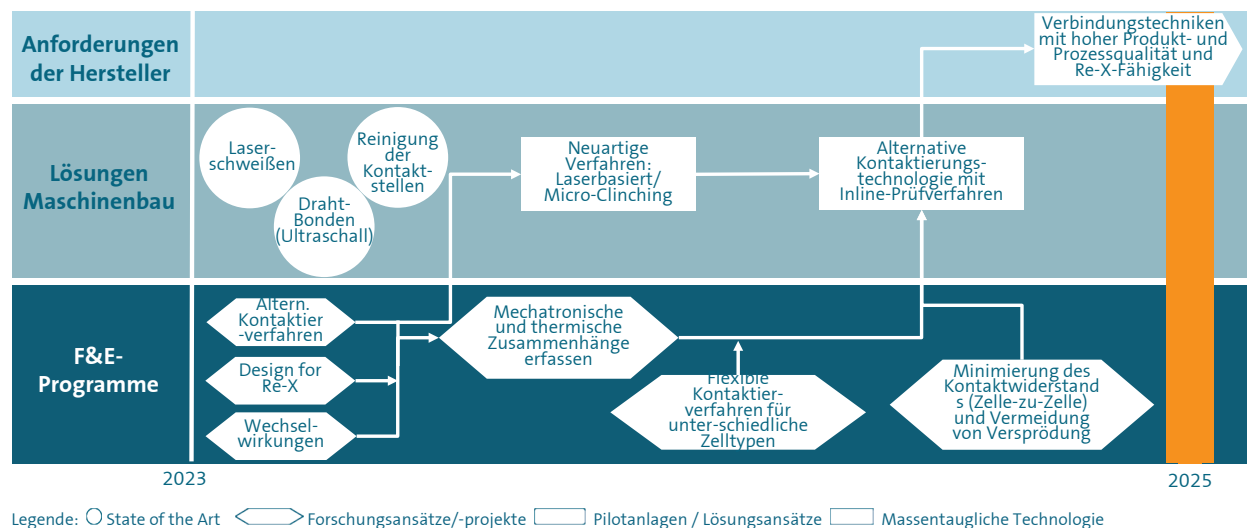


12 Kontaktieren

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
12.1	Verbesserung der Produktqualität für langfristig stabile Kontaktierungen (Minimierung von Verschleiß durch mechanische Beanspruchung)	neu	Hoch	2026-2028
12.2	Minimierung der Ausschussquoten bei der Kontaktierung durch verbesserte Prozessqualität (insb. auf Zellebene)	neu	Mittel/Hoch	2023-2025
12.3	Kontaktierungstechnik für Remanufacturing/ Recycling und schnelle Kontaktunterbrechung	Fortschritt erzielt	Mittel	2023-2024
12.4	Kontaktflächen für größere Ströme und größere Zellen	Fortschritt erzielt	Gering	2023-2024

RBW 12.1/12.2: Verbesserung der Produkt- und Prozessqualität

Als Kernherausforderung im Bereich der Kontaktierung auf der Modul- und Zellebene wird die Verhinderung der Versprödung respektive Korrosion der Kontakte sowie die Minimierung des Verschleißes durch die hohe mechanische Beanspruchung im mobilen Einsatz gesehen. Neben der Produktqualität ist die Verbesserung der Prozessqualität insbesondere auf Zellebene von hoher Relevanz.



*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

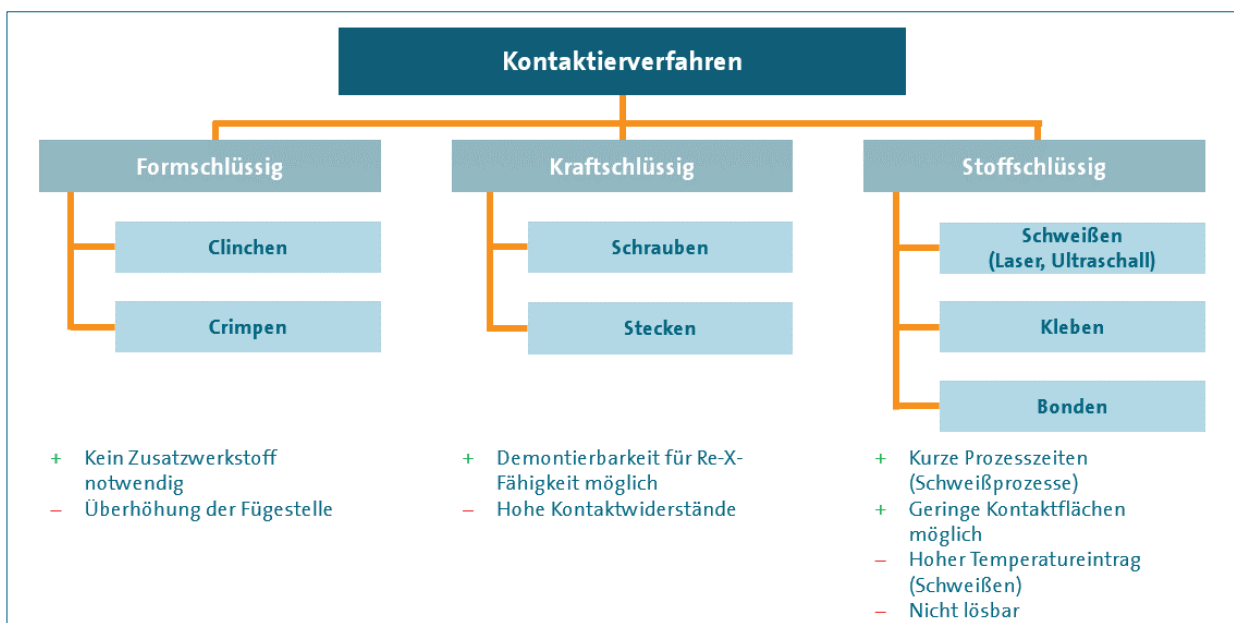
Kontaktierung

Grundlagen

Bei der Kontaktierung muss zwischen der Zellebene und der Modulebene unterschieden werden. Auf der Modulebene werden die einzelnen Zellen je nach gewünschter Modulspannung wahlweise parallel oder seriell verschaltet. Dazu werden die einzelnen Zellen über zentrale Kontaktierungssysteme, sogenannte Busbars, kontaktiert. Die Forderung nach einer Steigerung der Systemspannungen im Batteriesystem ist durch die Ziele der Erhöhung der Energie- und Leistungsdichte, sowie schnellerer Ladezyklen bedingt. Es wird in der Verbindungs- und Kontaktierungstechnik zwischen drei Arten von Kontaktierungen unterschieden: form-, kraft- und stoffschlüssige Verbindungen. In der Regel werden Module in Abhängigkeit vom verwendeten Zellformat und Busbarmaterialien mittels Laserschweißen, Laserbonden oder Ultraschall-

Laserschweißen, Laserbonden oder Ultraschallbonden/ Drahtbonden kontaktiert. Alternativ können die Verbindungen mittels einer kraftschlüssigen Verbindung z. B. durch Verschraubungen hergestellt werden. Eine Übersicht über die verschiedenen Kontaktierungsverfahren und deren Vor- und Nachteile zeigen die nachfolgenden Abbildungen. Die Auswahl des Kontaktierungsverfahrens ist von vielen Faktoren wie beispielsweise dem verwendeten Material der Busbars, des Zellformats und geforderter Produktionsgeschwindigkeiten abhängig. So werden zum Beispiel bei Rundzellen häufig Drahtbondverfahren verwendet, wohingegen prismatische Zellen häufig durch Laserschweißverfahren kontaktiert werden [Das2018], [Heimes2023a].

Auf der Zellebene werden Kontaktierverfahren für das Schweißen der Zellelektroden, das sogenannte Tab-Schweißen, oder dem Schweißen der Tab-Terminal-Verbindung eingesetzt.



Quelle: Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB, PEM der RWTH Aachen

	Laserschweißen	Laserbonden	Ultraschallschweißen	Ultraschallbonden
Fügequalität	++ Hohe Präzision und Kontrolle + Hohe Festigkeit + Schweißen von beschichteten Materialien + Kontinuierliche Qualität (keine Verschleißteile) + Keine Vibration	+ Hohe Flexibilität, auch bei Höhenvariationen + Einfache Sicherstellung des Nullspalts	+ Hohe Festigkeit + Qualitätsprüfung durch Prozessparameter möglich	+ Hohe Flexibilität, auch bei Höhenvariationen
Wärmeeintrag	+ Geringer Wärmeeintrag + Kleine Wärmeeinflusszone	+ Geringer Wärmeeintrag		+ Geringer Wärmeeintrag in die Zelle
Kosten (Wirtschaftlichkeit)	+ Keine Verschleißteile + Flexibilität	+ Kosteneffiziente Alternative	+++ Geringere Investitionskosten	+ Niedrige Investitions- und Betriebskosten
Partikelkontamination	+ Möglichkeit zur Kontrolle und Reduktion von Kontamination im Prozess	+ Geringe Partikelkontamination	+ Keine Spritzer	+ Sehr geringe Partikelkontamination
Geschwindigkeit	++ Hohe Geschwindigkeit + Hohe Automatisierung möglich	+ Hohe Geschwindigkeit + Möglichkeit zur Automatisierung		+ Hohe Geschwindigkeit + Möglichkeit zur Automatisierung

Quelle: Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB, PEM der RWTH Aachen

Dabei werden für das Tab-Schweißen üblicherweise Ultraschallschweiß- oder seltener Laserschweißverfahren verwendet, um die einzelnen Elektroden sheets miteinander zu kontaktieren. Das Ultraschallschweißen bietet Vorteile in der Kontaktierung von mehreren Schichten und ist mit geringeren Kosten aufgrund eines geringen Energieverbrauchs verbunden. Das Tab-Terminal-Schweißen wird hingegen meistens mit Laserschweißverfahren aufgrund der hohen Prozessgeschwindigkeit und der kontaktlosen Prozessierbarkeit durchgeführt.

Herausforderungen

Die Kernherausforderung in der Kontaktierung besteht in der Verbesserung der Produkt- und Prozessqualität (RBW 12.1 und RBW 12.2). Die Performance und Lebensdauer der Batterie können durch fehlerhafte oder beschädigte Kontaktierungen beeinträchtigt werden. Beispielsweise kann die Versprödung respektive Korrosion auf den Kontakten der Modul- und Zellebene zu erhöhten elektrischen Kontaktwiderständen und infolgedessen zu einer erhöhten Wärmeentwicklung führen. Darüber hinaus stellt die dynamische Beanspruchung in mobilen Anwendungen eine Herausforderung dar (RBW 12.1). Infolge des hohen Verschleißes an den Kontakten können Beschädigungen entstehen, die wiederum

hohe Sachmängelkosten zur Folge haben können. Die Haltbarkeit der Kontaktierungen muss somit in aufwändigen Lebensdauertests überprüft werden.

Auf der Zellebene können bedingt durch einen fehlerhaften Prozess Kurzschlüsse oder unzureichende Kontaktierungen entstehen, die in zu hohen Ausschussquoten resultieren (RBW 12.2). Typische Fehlerbilder sind zum Beispiel eine zu kleine Kontaktfläche oder eine nicht vollständige Kontaktierung aller Zellelemente. Dieses kann erhöhte Kontaktwiderstände zur Folge haben, die den Wirkungsgrad und die Sicherheit der Zellen durch eine hohe Wärmeentwicklung beeinflussen können. Darüber hinaus besteht das Risiko einer sicherheitskritischen Partikelkontamination im Kontaktierprozess insbesondere auf der Zellebene. Beispielhafte Ursachen dafür können der Sonotrodenverschleiß beim Ultraschallschweißen oder Schweißspritzer beim Laserschweißen sein.

Stoffschlüssige Verfahren bieten den Vorteil, einen hohen Stoffschluss mit in der Regel geringen Übergangswiderständen zwischen den unterschiedlichen Materialien zu ermöglichen. Allerdings ist das zerstörungsfreie Lösen der Verbindungen nicht ohne größeren Aufwand



Ein aus zylindrischen Zellen und Busbar bestehender Batterieblock zur Untersuchung der Spanntechnik und Prozessparameter im Laserschweißen
Quelle: PIA Automation Holding GmbH

möglich. Auf der Modulebene ist der Austausch von Zellen infolgedessen derzeit nicht wirtschaftlich (RBW 12.3). Kraftschlüssige Verbindungen, wie z. B. Schrauben, lassen sich in der Regel wieder gut lösen. Diese werden im Automobilbereich allerdings selten eingesetzt, da sie einen sehr hohen Übergangswiderstand besitzen. Beispielsweise besitzen Schrauben als kraftschlüssiges Verfahren zur Kontaktierung auf der Modulebene einen doppelt bis dreifach so hohen Kontaktwiderstand im Vergleich zu Kontaktierverfahren mittels Laser [Schmidt2015]. Die Herausforderung besteht somit darin, ein Verfahren zu entwickeln, das einerseits eine gute Kontaktierung der Komponenten gewährleistet und andererseits eine schnelle und möglichst materialschonende Lösung der Kontaktierung zulässt, um die Fähigkeit zum Re-X von Batterien zu ermöglichen (RBW 12.3). Unter dem Begriff Re-X werden alle Prozesse zur Lebensdaueroptimierung einer Batterie und den Batteriekomponenten zusammengefasst. Darunter fallen die Prozesse Reuse, Remanufacturing und Recycling [Heimes 2021]. Eine weitere Herausforderung stellt die Kontaktierung der einzelnen Komponenten des Moduls bei höheren Strömen und großformatigen Zellen dar (RBW 12.4). Für höhere Ströme im Batteriemodul müssen die Ableiter vergrößert werden, um den Übergangswiderstand zu verringern. In den vergangenen Jahren konnte diese Herausforderung weitestgehend gelöst werden, lediglich bei Pouch-Zellen ist die Herausforderung noch existent, da die Kontaktierung eine Limitierung der Dicke darstellt.

Lösungsansätze

Zur Verbesserung der Produktqualität über eine lange Lebensdauer ist insbesondere eine Optimierung des Kontaktier-Designs sowie der Materialauswahl notwendig. Dazu soll in den nächsten Jahren das Verständnis bezüglich des Materialverhaltens über die Produktlebensdauer durch Untersuchungen von Feldausfällen gestärkt werden, um sowohl Anforderungen an den Leichtbau sowie einer hohen Lebensdauer erfüllen zu können. Daneben kann die Anwendung neuer Kontaktier-Technologien zur Verbesserung der Produktlebensdauer beitragen. Ein vielversprechender Ansatz stellt zum Beispiel die elektromagnetische Pulstechnik (EMPT) dar. Die EMPT kann eine stoffschlüssige Verbindung zwischen unterschiedlichen Materialien, beispielsweise Aluminium und Kupfer, ermöglichen, und Verbindungen mit einer hohen mechanischen Festigkeit bei gleichzeitig hoher elektrischer Leitfähigkeit realisieren.

Die Verbesserung der Prozessqualität auf der Zellebene soll zunächst durch die Identifikation aller relevanter Kontaktierfehler erfolgen. Dazu ist es erforderlich, das Prozessverständnis durch die Analyse von Ursache-Wirkzusammenhängen in den Ultraschall- respektive Laserschweißprozessen zu stärken. Die Optimierung von Inline-Qualitätsmessungen (z. B. kamerabasierter Prozesskontrolle, thermografische Analyse) soll die frühe Identifikation fehlerhafter Kontaktierungen in der Zellproduktion ermöglichen. Darüber hinaus kann durch Ansätze, wie dem Predictive Maintenance, der Verschleiß von Kontaktierwerkzeugen, wie der Sonotrode, prognostiziert und Wartungsintervalle optimiert werden.

Im Hinblick auf einen 2nd-Life Einsatz von Automobilzellen als stationäre Speicher oder als erneute mobile Anwendungen steht die Kontaktierungstechnik auf der Modulebene vor großen Herausforderungen. Diese entstehen im Besonderen dann, wenn die Kontakte geschweißt sind und eine nicht-lösbare Verbindung vorliegt (Form- oder stoffschlüssige Verbindungen). Laserbonden und mechanische Verbindungen auf Modulebene adressieren diese Herausforderung. Die dünnen Drahtverbindungen beim Laserbonden, sogenannte Bändchen mit einer Breite von 1-3 mm und einer Dicke von 200-300 µm, können mit begrenztem Aufwand entfernt werden und begünstigen eine Wiederverwendung oder einen Austausch defekter Zellen. Die Verbesserung bestehender Verfahren oder die Entwicklung neuer Verfahren, die zu einer besseren Kontaktierung beitragen, sind notwendig, um eine massentaugliche Kontaktierung von Hochvoltverbindern im System zu realisieren. Laserbonden oder Micro-Clinching sind dabei weitere vielversprechende Ansätze.

Die Entwicklung von flexiblen Kontaktierungsverfahren für die Anforderungen der unterschiedlichen Zellformate ist bei einer variantenflexiblen Produktion von Batteriemodulen und -packs sehr relevant. Umrüstzeiten und ein Stillstand der Produktion können so vermieden werden. [Ebert2014, Just2018] Auch in einer Produktion, in der lediglich ein Zellformat verwendet wird, kann eine Anpassung des Kontaktierungswerkzeuges sinnvoll sein, wenn dies zu einer Verkürzung der Prozesszeiten oder einer Qualitätserhöhung führt.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Die Verbesserung der Produktqualität (RBW 12.1) ist die dringendste *Red Brick Wall* in der Kontaktierung, um Versprödung und Korrosion im Betrieb zu reduzieren. Bei gleichzeitig hohem Aufwand zum Lösen dieser Herausforderung

wäre der Beitrag zur Qualität und Kostensparnis besonders hoch. Jedoch existieren derzeit noch keine wirtschaftlichen Lösungsansätze, die diese Herausforderung adressieren.

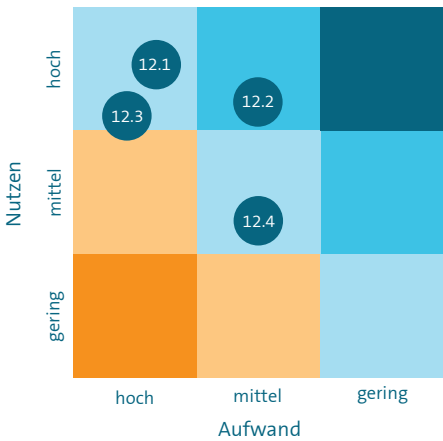
Die Minimierung der Ausschussquoten stellt eine weitere *Red Brick Wall* (RBW 12.2) dar, die ebenso einen signifikanten Beitrag zur Wirtschaftlichkeit und Qualität in der Kontaktierung leisten würde. Durch die Implementierung neuer Inline-Messtechnik, sowie einem verbesserten Prozessverständnis, können Ausschussquoten mit mittlerem Aufwand reduziert werden.

Die Nachhaltigkeit und Qualität der Batteriesysteme kann darüber hinaus durch die Remanufacturingfähigkeit deutlich gesteigert werden. Zum einen kann durch lösbare Verbindungen die Nutzungsdauer der Batterie verlängert werden. Zum anderen wird die Qualität durch die Weiterentwicklung der Verfahren verbessert.



Plasmareinigung der Kontaktstelle einer Pouchzelle
Quelle: Plasmatreat GmbH

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	12.1	12.2	12.3	12.4
Nachhaltigkeit	↗	↗	↑	↗
Qualität	↑	↑	→	↗
Kostenersparnis	↗	↑	→	↗
Beitrag:	↑ = Signifikanter Beitrag ↗ = Mäßiger Beitrag → = Kein Beitrag			

12.1 Verbesserung der Produktqualität 12.2 Minimierung der Ausschussquoten 12.3 Kontaktierungstechnik für Remanufacturing/Recycling 12.4 Kontaktflächen für größere Ströme und größere Zellen

Der Aufwand der Weiterentwicklung vorhandener Kontaktierverfahren und die Erforschung neuer Alternativen für die Re-X-Fähigkeit ist dabei als besonders hoch einzuschätzen. Die RBW 12.4 ist dagegen nur von mittlerer Relevanz, da die Kontaktierung für höhere Ströme und größere Zellformate teilweise gelöst werden konnte bzw. für Pouch-Zellen unmittelbar vor dem Durchbruch steht.

Autoren:
Sebastian Wolf, RWTH Aachen University;
Miha Podbreznik, Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

Fachliche Unterstützung

Themenpate:
Quanji Cai, Group Manager Strategic Business
Development, PIA Automation Holding GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

Coherent
F&S Bondtec Semiconductor GmbH
ISRA VISION GmbH
Liebherr-Verzahntechnik GmbH
Pepperl+Fuchs SE
Plasmatreat GmbH
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung
Batteriezelle FFB

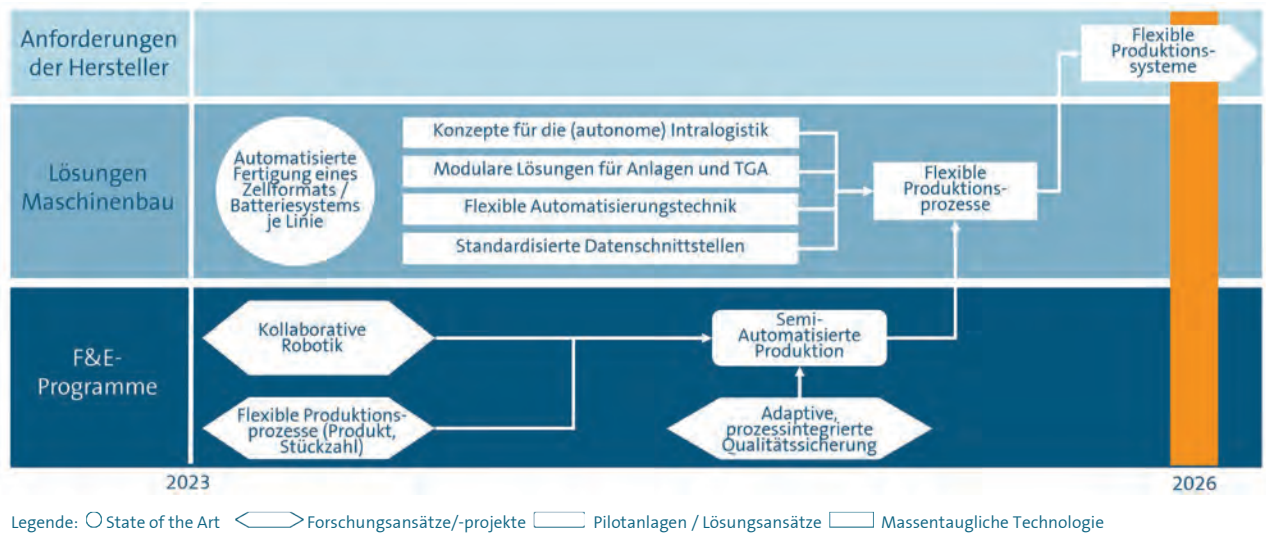


13 Flexible Produktion in der Modul- und Systemmontage

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
13.1	Gestaltung flexibler Produktionsprozesse (Skalierbarkeit, Produktionsflexibilität)	Fortschritt erzielt	Hoch	2026
13.2	Adaptive und prozessintegrierte Qualitätssicherungskonzepte	neu	Hoch	2026
13.3	Fertigung unterschiedlicher Produktvarianten auf einer Fertigungslinie	Geringer Fortschritt erzielt	Mittel	2028

RBW 13.1: Gestaltung flexibler Produktionsprozesse (Stückzahl-, Produktflexibilität)

Die Anzahl unterschiedlicher Zellformate und Batteriesysteme wächst weiter an. Für die Produktion ergeben sich hieraus zahlreiche neue Herausforderungen in Bezug auf sich ändernde Formate und Designvorgaben. Diese verlangen zunehmend nach dem Einsatz modularer und flexibler Konzepte. Mithilfe dieser lassen sich die notwendigen Rahmenbedingungen schaffen, um im Produktionssystem die geforderte Skalierbarkeit der Produktion sowie eine Anpassung von Produktionsequipment mit minimalem Änderungsaufwand umzusetzen.

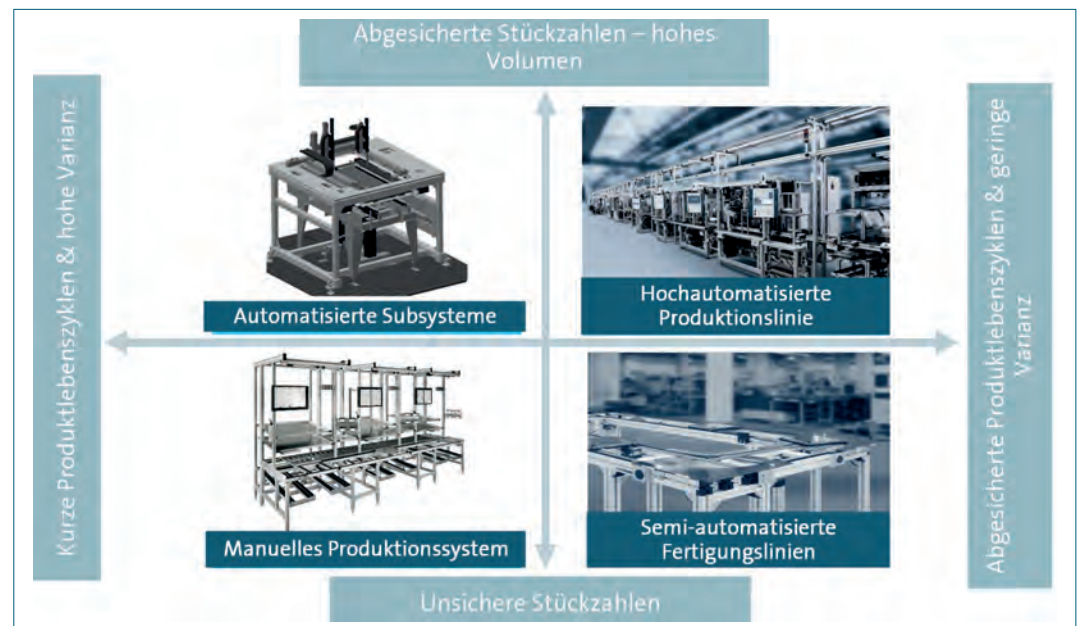


*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b



Gestaltungsmöglichkeiten von Produktionssystemen in Abhängigkeit von Stückzahl und Lebenszyklus
Quelle: Bosch Rexroth

Flexible Produktion

Grundlagen

Der Blick auf den heutigen Batteriemarkt zeigt eine breit gefächerte Vielfalt unterschiedlichster Batteriesysteme. Mit der Erschließung neuer Marktfelder wird diese Zunahme in der Variantenvielfalt in unterschiedlich hohen Stückzahlen weiter vorangetrieben. Bei der Produktion werden auf Modulebene die Zellen gestapelt, kontaktiert und in ein Gehäuse eingebracht (siehe Technologiekapitel 11, S. 127). Diese Module werden anschließend in einem Batteriepack mit weiteren Komponenten (u. a. Thermomanagementsystem, Batteriemanagementsystem) untergebracht und mittels Kabel bzw. entsprechend geeigneter Verbindungselemente untereinander als auch mit weiteren Systemschnittstellen verbunden. In einem finalen Schritt wird das Batteriepack wasserdicht verschlossen, um das technische Innenleben vor äußeren Einflüssen zu schützen. Durch diesen Aufbau ergeben sich mehrere Freiheitsgrade in der Produktstruktur bzw. -architektur. Der Aufbau und Funktionsumfang des finalen Batterie

systems wird dabei von dem Anforderungskollektiv der Endanwendung bestimmt. Speziell im Automotive-Bereich lässt sich dabei eine hohe Vielfalt hinsichtlich verwendeter Zellformate und aus diesen wiederum aufgebaute Batteriemodule und -packs feststellen. Zusätzlich wird eine schnelle Skalierbarkeit der neuen Varianten gefordert. Vor diesem Hintergrund gewinnt die kosten- und energieoptimierte Herstellung der Batteriezellen zusammen mit deren flexiblen Integration in das Batteriesystem deutlich an Bedeutung. Angesichts der hohen Produktionsvolumen im Automobilsektor ergibt sich dabei das Spannungsfeld hoher und auf maximale Effizienz ausgerichteter Automatisierungsgrade auf der einen Seite und hoher Flexibilität zur schnellen Anpassung bereits bestehender Produktionssysteme auf der anderen Seite.

Insbesondere im Bereich der Modul- und Systemmontage wird eine möglichst varianten- und stückzahlflexible Produktion bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit von entscheidender Bedeutung.

Nicht zuletzt führt auch die dynamische Entwicklung der Batterietechnologie dazu, dass zwischen einzelnen Fahrzeuggenerationen wesentliche Unterschiede vorliegen. Bedingt dadurch können sich die Änderungen über alle Systemebenen bis hin zur den einzelnen Batteriezelle und der darin eingesetzten Materialien erstrecken. Der Aufbau flexibler Produktionssystemen auf Grundlage modularer und frei konfigurierbarer Anlagenkonzepte bietet hier die Möglichkeit effektiv und zielgerichtet auf solche kurzzyklischen Produktänderungen zu reagieren.

Herausforderungen

Die Herausforderungen in der Umsetzung einer flexiblen Produktion sind vielfältig. Erforderlich ist zunächst ein tiefergehendes Produkt- und Prozessverständnis, welches es erst ermöglicht die zukünftigen Flexibilitätsanforderungen richtig zu antizipieren und Skalierungsanforderungen zu berücksichtigen. So sind in der Umsetzung eines flexiblen Produktionskonzepts neben der reinen Anlagen- und Automatisierungsplanung zusätzlich Aspekte der Logistik, der technischen Gebäudeausstattung sowie der IT-gestützten Überwachung und Organisation der Produktion zu berücksichtigen. Zielvorstellung bildet ein aufeinander abgestimmtes Gesamtsystem aus flexiblen Anlagen, welches mit universell einsetzbaren Betriebsmitteln, modularen Fertigungsstationen und geschultem Personal, die wirtschaftliche Produktion, eine schnelle Anpassung bestehender Produktionssysteme an ein sich veränderndes Produktdesign bzw. eine Skalierung des Produktionsvolumens ermöglicht. Mit dem Fokus auf die Produktionsprozesse stellt sich dabei die Frage nach den notwendigen Kapazitäten und vorhandenen Flexibilitätskorridoren, die im Zuge von produktseitigen Anpassungen ausgereizt werden können. Speziell in der Batteriemodul- und Systemmontage ist dabei ein ausführliches Prozessverständnis bezüglich der eingesetzten Füge-, Schraub-, Greiftechnik und Dosiertechnik erforderlich (RBW 13.1).

Neben der Anpassung der Produktionstechnologien und -prozesse auf eine Produktveränderung oder -skalierung muss ebenfalls eine fertigungsbegleitende Qualitätssicherung und Nachverfolgbarkeit der hergestellten (Zwischen-) Produkte sichergestellt werden (RBW 13.2). Insbesondere im Bereich der Zellinspektion und -Clustering, der Komponenteneinbringung und der Kontaktierung werden intelligente Systeme benötigt, welche flexibel an Veränderungen oder auch Erweiterungen anpasst werden können.

Neben den hohen Absatzmengen für den Massenmarkt gibt es gleichzeitig einen steigenden Bedarf an Nischenproduktion für Kleinserien und Spezialanwendungen. Diese werden oftmals in Kampagnen von wenigen Monaten gefertigt. Um einen solchen Bedarf wirtschaftlich abdecken zu können, muss das Produktionssystem so ausgelegt sein, dass in Bezug auf Größe, Format und weitere Designmerkmale (z. B. Kontaktierung, Kühlsystem, etc.) unterschiedliche Produkte im bestehenden Produktionssystem gefertigt werden können (RBW 13.3).

Lösungsansätze

Vorherrschende Lösungsansätze zielen auf die Gestaltung flexibler Prozesse, Anlagen und Produktionssysteme ab. Diese ermöglichen es aufwandsarm auf Veränderungen hinsichtlich der Produktvariante bzw. -menge zu reagieren (RBW 13.1). In kleineren Produktionsbetrieben lassen sich hierzu beispielsweise semi-automatisierte Prozesse und Mensch-Roboter-Kollaboration einsetzen, sodass komplexe Montagearbeiten flexibel in einer Station abgebildet werden können. Besonders die Batteriesystemmontage bietet sich dabei für den Einsatz solcher Mensch-Roboter-Kollaboration an. Die menschliche Koordinationsfähigkeit und Feinmotorik eignet sich dabei besonders für die filigrane Kabelmontage, während für wiederkehrende Pick-and-Place Operationen und Prozesse mit hohen Genauigkeits- und Sicherheitsanforderungen auf die

Vorteile der Robotik (Präzision, Wiederholungsgenauigkeit, Geschwindigkeit, etc.) zurückgegriffen werden kann. Mithilfe von *Augmented-Reality*-gestützten Bedienerführungen und sonstigen Assistenzsystemen (bspw. Pick-to-Light, Put-to-Light, etc.) lassen sich die Montageabläufe schließlich weiter optimieren.

Für größere Produktionsmengen kann durch eine Standardisierung von Schnittstellen die Erweiterung und Anpassung der Produktionslinie erleichtert werden. Außerdem kann durch die Auswahl bestimmter Fertigungstechnologie (z. B. Laserschweißen als Option für alle drei Formate) und flexibler Greif- und Handlingsysteme auf unterschiedliche Größen und Formate eingegangen werden. Für „ähnliche“ Produktvarianten kann dabei im Optimalfall allein über eine Anpassung der Prozessparameter, sonst über einfache und schnell umsetzbare Umrüstaktionen, die generelle Produzierbarkeit sichergestellt werden.

Eine matrixbasierte Produktion mit spezifischen Fertigungstechnologien je Produktionsbaustein kann einer hohen Produktflexibilität gerecht werden und erlaubt es verschiedene Modultypen auf einer Produktionslinie zu fertigen. In den nächsten Jahren geht es insbesondere darum, die einzelnen Bausteine weiter zu optimieren in Bezug auf Kosten und Effizienz. Hinzu kommt, dass die Batterie als Produkt permanent weiterentwickelt und optimiert wird. Bei diesen Änderungen müssen Maschinen- und Anlagenbauer frühzeitig mit involviert sein, um Änderungen und Anpassungen zügig umsetzen zu können (RBW 13.3).

Die Herausforderung einer Nachverfolgbarkeit der hergestellten (Zwischen-)Produkte lässt sich über Track & Trace-Systeme und standardisierte Datenstrukturen und Schnittstellen adressieren. Als Grundlage für jedes Qualitätssystem dient dabei eine eindeutige Identifikation und

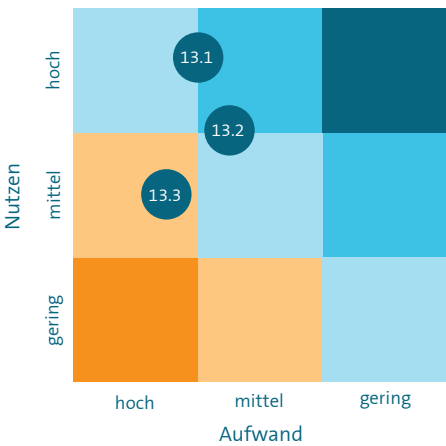
Zuordnung. Diese kann über RFID-Tags oder auch durch das Scannen geeigneter QR-Codes auf jeglicher Art von Komponente realisiert werden. Ergänzt werden diese Maßnahmen durch eine fortlaufende Überwachung und Protokollierung relevanter Produktionsdaten (Drehmomente, Drehwinkel, Dosiermengen, etc.). In Summe bietet der Auf- und Ausbau der digitalen Infrastruktur eine Vielzahl neuer Möglichkeiten, welche sich von einem vollständig digitalen Abbild der Produktion und des Produkts (digitale Zwillinge) bis hin zur echtzeitfähigen Produktionssteuerung erstrecken. Standardisierte Schnittstellen vereinfachen dabei in beiden Fällen den erforderlichen Datenaustausch für das Qualitätssystem, sodass individuell Prüf- und Messtechnologie entlang der gesamten Prozesskette abhängig von den jeweiligen Produktanforderungen und -charakteristiken integriert werden kann (RBW 13.2).

Aufwand- und Nutzenbewertung

Durch eine schnelle und gezielte Reaktion auf Veränderungen in der Produktion, bieten flexible Produktionssysteme eine hohe Anpassungsfähigkeit. Diesem hohen Nutzen steht zugleich ein wesentlicher Aufwand gegenüber, der sich in der komplexen Planung und Vernetzung der zugrundeliegenden Produktionssysteme widerspiegelt (RBW 13.1). Sämtliche (Teil-)Systeme sind hierbei aufeinander abzustimmen, wobei sicherzustellen ist, dass die Flexibilitätsansprüche nicht zu einer reduzierten Systemzuverlässigkeit und erhöhten Ausfallwahrscheinlichkeit führen. Ebenso wichtig ist es, die wirtschaftlichen Aspekte der Gesamtproduktion mit einzubeziehen.

Einen hohen Mehrwert für die flexible Produktion bieten in der heutigen Zeit die modernen Digitalisierungstechnologien, welche unter anderem adaptive und prozessintegrierte Qualitätssicherungskonzepte ermöglichen (RBW 13.2). Die direkte Umsetzung und Anwendung in

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



	13.1	13.2	13.3
Nachhaltigkeit	↗	↗	↗
Qualität	→	↑	→
Kostenersparnis	↗	↗	↑
Beitrag:	↑ = Signifikanter Beitrag	↗ = Mäßiger Beitrag	→ = Kein Beitrag

13.1 Gestaltung flexibler Produktionsprozesse

13.2 Adaptive und prozessintegrierte Qualitätssicherungskonzepte

13.3 Fertigung unterschiedlicher Produktvarianten auf einer Fertigungslineie

der Batterieproduktion ist aufgrund der komplexen Prozesskette jedoch mit eigenen Herausforderungen verbunden. Der über diese Maßnahmen erzielbare Nutzen in Form qualitativ hochwertigerer Produkte, gesteigerter Variantenflexibilität und reduziertem Ausschuss ist jedoch als hoch einzustufen.

Die Fertigung gänzlich unterschiedlicher Produktvarianten auf einer Linie wird insgesamt mit hohem Aufwand und nur mittlerem Nutzen bewertet (RBW 13.3). Es zeigt sich hierbei zwar die größtmögliche Flexibilität, jedoch auch die maximale Komplexität im Produktionssystem. Häufig wird an dieser Stelle eine Kompromisslösung bevorzugt, welche Systeme höherer Stückzahl auf vollautomatisierte und sonstige Sondervarianten auf separate, semi-automatisierte Linien verlegt.

Fachliche Unterstützung

Autor:
Artur Scheibe, RWTH Aachen University

Themenpate:
Viktor Bayrhof, Produktmanagement Automationssysteme, Liebherr-Verzahntechnik GmbH

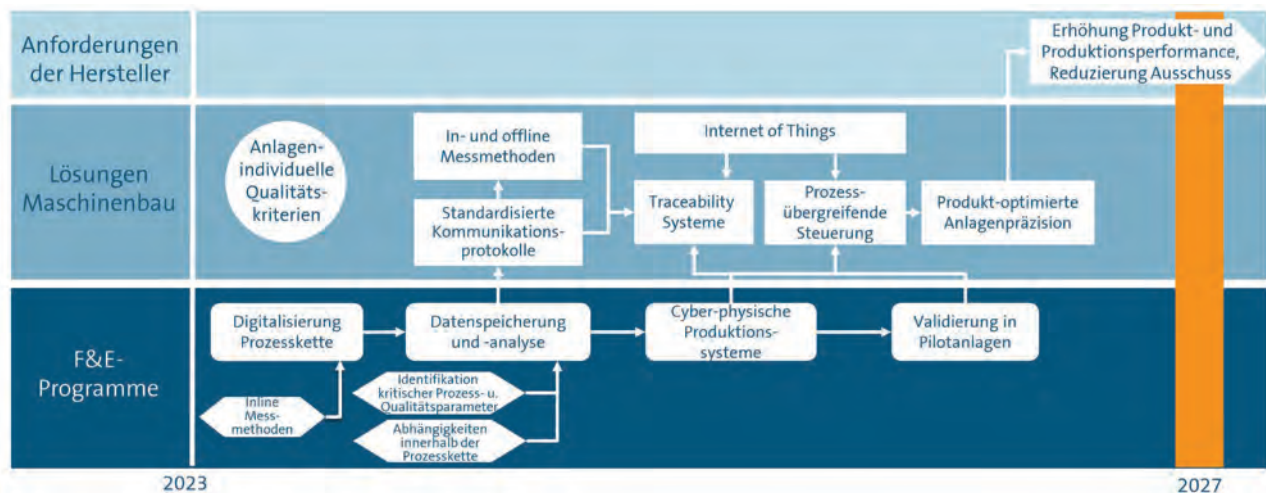
Mit weiterer Unterstützung von:
B&R Industrial Automation GmbH
F&S Bondtec Semiconductor GmbH
Maschinenbau Kitz GmbH
Omron Electronics GmbH
Pepperl+Fuchs SE
Piab Vakuum GmbH
Rockwell Automation GmbH
Sick AG
SCHUNK GmbH & Co.KG
thyssenkrupp AG

14 Wirkzusammenhänge – Einsatz von Digitalisierung, Industrie 4.0, effiziente Produktion

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
14.1	Identifizierung der wesentlichen Wirkzusammenhänge entlang der Prozesskette sowie deren Auswirkung auf die Batteriezellperformance	Fortschritt erzielt	Hoch	2027
14.2	Kommunikation zwischen heterogenen Produktionsanlagen + prozessübergreifende Steuerung/Regelung	Fortschritt erzielt	Hoch	2027
14.3	Nachverfolgbarkeit der Batteriezeile und deren Produktmerkmale über den gesamten Lebenszyklus	Fortschritt erzielt	Hoch	2026

RBW 14.1: Identifizierung der wesentlichen Wirkzusammenhänge entlang der Prozesskette

Die Erfassung der kritischen Prozessparameter der Anlagen, der Qualitätsparameter der Zwischenprodukte sowie der elektrochemischen Eigenschaften der finalen Batteriezellen bilden die Grundlage für die Identifizierung der komplexen Wirkzusammenhänge innerhalb der Batteriezellproduktion. Dieses Wissen kann mithilfe modellbasierter Steuerungs- und Regelungssysteme genutzt werden, um bspw. den Einfluss der Umgebung oder schwankender Materialparameter auf die Produktion zu reduzieren. Hierbei ermöglicht eine Kommunikation der heterogenen Produktionsanlagen über einheitliche Standards eine prozessübergreifende Einflussnahme hin zu einer vollautomatisierten flexiblen Produktion, sodass die Produktqualität sowie Produktionsperformance erhöht und der Ausschuss reduziert wird.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ▭ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Wirkzusammenhänge – Einsatz von Digitalisierung, Industrie 4.0, effiziente Produktion

Grundlagen

Batteriezellen und deren Herstellung zeichnen sich durch komplexe Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessen, Anlagen, Umgebung, der Struktur der einzelnen Zwischenprodukte sowie den Eigenschaften der finalen Zelle aus. Aufgrund der stark verketteten Prozesskette beeinflussen die Wirkzusammenhänge auch wirtschaftliche und ökologische Aspekte der Produktion, wie Durchsatz und Energiebedarf. Die Untersuchung dieser Wirkzusammenhänge erfordert ein hohes Verständnis in den Bereichen Elektrochemie, Elektronik, Mechanik, Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik und weiteren. Das vor allem in der Batteriezellproduktion bislang noch nicht vollumfängliche Wissen über die Wirkzusammenhänge entlang der Prozesskette spiegelt sich gegenwärtig in den hohen Ausschussquoten wider (niedriger zweistelliger Prozentbereich) und äußert sich darüber hinaus in sehr langen Anlaufphasen bis hin zur Serienfertigung.

Daraus resultieren derzeit noch ungenutzte Potentiale sowohl in Bezug auf die Prozess- als auch die Produktionseffizienz. Diese gilt es mit Ansätzen der Industrie 4.0 zu erschließen, womit i. W. eine Digitalisierung, Vernetzung und intelligente Steuerung der Prozesse und Produktion gemeint ist.

So können bspw. auf Basis einer breiten Datenbasis mittels geeigneter Analysen Rückschlüsse auf mögliche Fehlerursachen in der Produktion transparent gemacht und anschließend automatisiert behoben werden. Des Weiteren tragen digitale Abbildungen von Prozessen, Prozessketten und Batteriezellen bspw. mittels Simulation dazu bei, die komplexen Wirkzusammenhänge abzubilden und zu quantifizieren. Durch die Kopplung von Produktionssystemen, der

Produktionsumgebung (Fabrik) und Zwischenprodukten an digitale Modelle und Informationen (digitale Zwillinge), bieten cyber-physische Systeme Entscheidungsunterstützung sowie intelligente Regelung der Produktion. Somit führen genannte und weitere Industrie 4.0 Lösungen zu einer wesentlichen Reduktion der bisherigen Ausschussquoten sowie Erhöhung der Flexibilität und Energieeffizienz.

Herausforderungen

Zur Erschließung der Prozess- und Prozesskettenpotentiale ist ein tiefes Verständnis der Wirkzusammenhänge erforderlich (RBW 14.1). Jeder Prozessschritt weist individuelle Prozessparameter auf, welche direkten Einfluss auf die Qualität der Zwischenprodukte sowie die finalen Batteriezellen haben. Bereits geringe Ausschussraten pro Prozessschritt können sich entlang der Prozesskette schnell zu signifikanten Ausschussraten und hohen Kosten potenzieren. Bspw. verursacht eine Prozesseffizienz von 99,5 Prozent eine Gesamteffizienz von rund 88 Prozent für eine Prozesskette mit 25 Prozessschritten ($0,995^{25}$) (siehe Tabelle 1). Material- und Energieeffizienz sind ebenfalls stark davon betroffen. Somit stellt die Identifikation von qualitätskritischen Stellgrößen sowie deren Auswirkungen entlang der Prozesskette eine der wesentlichen Herausforderungen einer effizienten Prozessauslegung und einer nachhaltigen Batteriezellproduktion dar.

Zusätzlich bewirkt die Heterogenität der Produktionsanlagen von meist unterschiedlichen Herstellern ein breites Spektrum unterschiedlicher Parameter sowie Kommunikationschnittstellen (RBW 14.2). Besonders vor dem Hintergrund einer zukünftig vermehrt aufkommenden intelligenten Steuerung und Regelung auf Basis künstlicher Intelligenz (KI) bedarf es neben den dafür benötigten Algorithmen auch die Umsetzung geeigneter

Standards für die Kommunikation zwischen den Anlagen. Gleichmaßen müssen Standards zur Erfassung und Strukturierung der übergebenen Daten (bspw. Anlagenparameter, Key Performance Indicators (KPIs)) festgelegt werden, um überlagerten Komponenten die Möglichkeit zu geben die Produktionsdaten in Relation zu den produzierten Zellen zu stellen.

Effizienz der einzelnen Prozessschritte	Prozessketteneffizienz (bei 25 Prozessen)
99,5	88,2
99	77,8
97	46,7
95	27,7

Tabelle 1: Auswirkung von unterschiedlichen Prozesseffizienzen auf die gesamte Prozessketteneffizienz mit 25 Prozessschritten.

Für die Einhaltung der Vorschriften der europäischen Union hinsichtlich Battery Passport sowie Unterstützung einer Kreislaufwirtschaft für die Batterieproduktion müssen Daten aus der Produktions- und Nutzungsphase in einer lebenszyklusorientierenden Bewertung und Analyse der Batteriezellen berücksichtigt werden (RBW 14.3). Hierbei ergeben sich vielfältige Herausforderungen hinsichtlich geeigneter KPIs für das Monitoring sowie zur Speicherung und Schutz der generierten Daten.

Auch die Heterogenität der über den Lebenszyklus der Batteriezellen generierten Daten durch die Vielzahl an Batteriezelltypen, -herstellern, OEMs und Anwendungsmöglichkeiten erfordern

eine wettbewerbsübergreifende Standardisierung zur Integration verschiedener Systeme über Domänen- und Hierarchiegrenzen hinweg.

Lösungsansätze

Um die vielfältigen Wirkzusammenhänge entlang der gesamten Prozesskette und die dadurch entstehende Komplexität gezielt zu kontrollieren, kann die Digitalisierung der Produktion und der Einsatz von Industrie 4.0 Ansätzen wie cyber-physische Produktionssysteme einen wertvollen Beitrag leisten (RBW 14.1), indem bspw. Transparenz hinsichtlich verschiedener Wirkzusammenhänge entlang der Prozesskette oder aber sensitive Einstellparameter identifiziert werden können.

Dabei ermöglicht die Digitalisierung u.a. eine kontinuierliche Erfassung relevanter Prozess- und Qualitätsparameter, welche zusätzlich die Grundlage für eine spätere Entscheidungsunterstützung, Steuerung oder Regelung der Anlagen mithilfe von Industrie 4.0 Methoden darstellt. Vor einer Umsetzung in einer Serienproduktion empfiehlt es sich zunächst die wesentlichen Prozess- und Qualitätsparameter in einer Pilotlinie zu identifizieren. Für diese Pilotlinie wird ein Monitoring sämtlicher Messgrößen angestrebt, um diese während einer späteren Skalierung auf eine Serienproduktion zu selektieren und auf ein notwendiges Minimum zu reduzieren. Hintergrund dazu sind die enormen Datenmengen, welche bei einer stetigen Prozessparametermessung entstehen. Deshalb ist es wichtig die relevanten Daten vorzuselektieren und gegebenenfalls bereits in der Automatisierungsebene zu puffern. Darüber hinaus sollten für die Charakterisierung der Zwischenprodukte vermehrt Inline-Messverfahren eingesetzt werden, um die Entwicklung zu einer effizienten Produktion zu unterstützen. Inline-Messtechnik ist hierbei die Basis für eine adaptive Steuerung und kann durch virtuelle Messsysteme (z. B. Virtual Quality Gates) vervollständigt werden.

Die Gesamtheit der Daten kann entweder intern auf Servern, in einer Cloud-Plattform oder hybrid gespeichert werden.

Der eigentliche Wert dieser Betrachtungen liegt dabei nicht in der Erhebung der Daten selbst und deren kontinuierlicher Überwachung während einer Serienproduktion, sondern in deren Auswertung und dem damit verbundenen Erkenntnisgewinn. Dieser Ansatz der systematischen Analyse großer Datenmengen ist auch als Data Mining bekannt. Typische Ansätze umfassen dabei stets die Einzelbereiche der Datenklassifikation, Segmentierung, Prognose, Abhängigkeits- und Abweichungsanalyse. Die Verarbeitung und Auswertung umfangreicher Datensätze bietet die Möglichkeit, unter Nutzung speziell entwickelter Methoden, die zugrundeliegende Prozessvernetzung und deren Wirkzusammenhänge zu identifizieren. Auch die wissensbasierte Bestimmung von Produktionstoleranzen auf Basis gemessener Daten oder durch Modelle ermöglicht eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Produktionskosten bzw. Erhöhung der Produktqualität, da so Kosten für unnötig genaue Toleranzen umgangen werden können. In der Elektrodenfertigung können bspw. durch den Einsatz von *Supervised Learning* Modellen Beschichtungsdefekte automatisch detektiert und Prozessparameter optimiert werden.

Für die Kopplung sequenzieller Produktionsanlagen werden herstellerübergreifende Standards für die Schnittstellen und Datenstrukturen der Anlagen benötigt, bspw. OPC UA CS²⁸ (RBW 14.2). Durch eine zusätzliche Verknüpfung der verschiedenen Anlagen kann eine automatisierte Regelung aufeinanderfolgender Prozessschritte erreicht werden, ohne dass dabei ein

Mensch regelnd eingreifen muss. Die Regelung wird in Zukunft auf Basis von Ansätzen der KI (i. W. Maschinelles Lernen) entwickelt, sodass der Einfluss von Umgebungseinflüssen und stochastisch schwankenden Produkteigenschaften weitestgehend reduziert werden kann. Gleichmaßen können und sollen die Erfahrungen der Anlagenbetreibenden in die Entwicklungen der Regelungs- und Steuerungsalgorithmen einfließen.

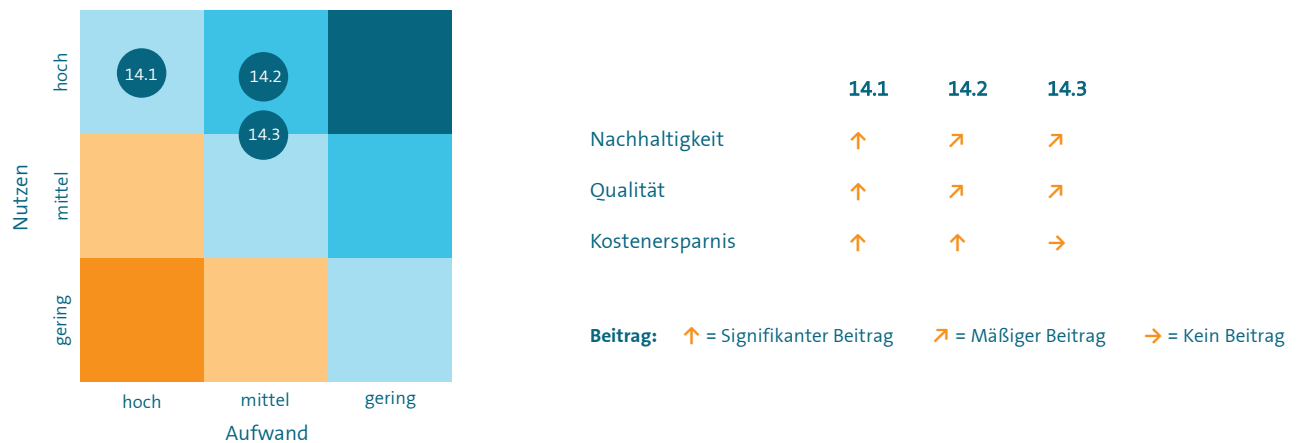
Zusätzlich kann durch den Einsatz eines cyberphysischen Produktionssystems eine digitale Abbildung der realen Produktion/des Produkts entstehen, welches kontinuierlich die wesentlichen Parameter in der Produktion erfasst und mithilfe von geeigneten Modellen und Simulationen (bspw. künstliche neuronale Netze, Prozesskettensimulationen), eine Entscheidungsunterstützung für die Produktion ermöglicht. Diese können auch die Planung neuer Fabriken oder die Skalierung bestehender Produktionslinien unterstützen.

Die finale Qualitätskontrolle der Batteriezellen erfolgt über das Monitoring der Zellperformance in der Nutzungsphase. Durch eine Verknüpfung der Daten aus der Produktion und der Nutzungsphase können wesentliche Rückschlüsse auf qualitätsfördernde Parameter innerhalb der Produktion gezogen werden (RBW 14.3). Wie in der Produktion sollten auch in der Nutzungsphase nur diejenigen Parameter gemessen werden, die eine hohe Aussage zur Qualität der Batteriezelle erlauben. Dabei bedarf es jedoch eines verbindlichen gesetzlichen Rahmens über u.a. den Zugang, den Besitz und die Nutzung der Daten. Die Gesamtheit der Daten, die über den gesamten Lebenszyklus erhoben wird, kann im Rahmen eines Batteriepasses gebündelt werden.

²⁸ OPC UA - Open Platform Communications Unified Architecture ist ein Standard für den Datenaustausch als

plattformunabhängige, service-orientierte Architektur (SOA) und wird in sog. Companion Specifications beschrieben.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



14.1 Identifizierung der Wirkzusammenhänge

14.2 Kommunikation und Steuerung/Regelung heterogener Produktionsanlagen

14.3 Nachverfolgbarkeit über Lebenszyklus

Aufwand- und Nutzenbewertung

Die Eruiierung der Wirkzusammenhänge innerhalb der Produktion (RBW 14.1) schafft die Grundlage für Potentialabschätzungen, die bezüglich einer Prozessintegration in zukünftige Produktionslinien sowie den dafür notwendigen Prozessadaptionen und Monitoring-Methoden von Interesse sind. Dabei bietet die Berücksichtigung der identifizierten, kritischen Prozessstell- und -störgrößen sowie die daraus resultierenden Qualitätseinflüsse auf Zwischen- und Endprodukte die Möglichkeit, das Prozess-Monitoring auf essenzielle Messgrößen zu beschränken, sodass die Investitionen für die Digitalisierung (bspw. Messinfrastruktur inkl. Wartung und Betrieb, sowie deren Speicherung) weitestgehend reduziert werden. Eine solche bedarfsorientierte Anlagenauslegung kann zur weiteren Steigerung der Rentabilität einer Anlageninvestition beitragen.

Gleichermaßen kann ein tiefgreifendes Wissen über Wirkzusammenhänge entlang der Prozesskette einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der zurzeit noch hohen Ausschussquoten, Energiebedarf und CO₂ Emissionen liefern. Folglich steht dem hohen Mehraufwand durch Datenerfassung, digitale Abbildungen sowie Analyse der großen Datenmengen für die Erlangung eines tiefen Prozessverständnisses der Nutzen in Form von hohen Beiträgen zur Nachhaltigkeit, Qualität und Kostenersparnis im Vergleich gegenüber.

Auch die Etablierung einer vollautomatisierten Produktion auf Basis von kommunizierenden Anlagen (RBW 14.2) bietet einen hohen Nutzen bei gleichzeitig mittlerem Aufwand für den Batteriehersteller. Dies trägt zu einer starken Reduktion des Aufwands und der damit verbundenen Kosten während Anlaufphasen bei.

Des Weiteren ist durch die Unterstützung mit KI-basierten Steuerungs- oder Regelungssystemen eine Erhöhung der Prozessstabilität zu erwarten, wodurch die Batteriezellqualität positiv beeinflusst und der Ausschuss der Produktion reduziert wird. Dies wirkt sich positiv auf die Nachhaltigkeit der Batterieproduktion aus.

Zusätzlich können mithilfe der intelligenten Steuerungs- und Regelungssysteme im Hinblick auf die finale Batteriezellperformance sinnvolle Toleranzen für die Zwischenproduktmerkmale der einzelnen Prozesse identifiziert werden. Dabei sollen gezielt unnötig hohe Prozessgenauigkeiten vermieden werden, welche die Batterieperformance nicht ausschlaggebend positiv beeinflussen, jedoch die Investitions- und betriebsbedingten Kosten (bspw. für präzisere Anlagen) erhöhen.

Gleichmaßen verursacht die Umsetzung einer vollautomatisierten Prozesssteuerung und -regelung einen mittleren Aufwand für die Entwicklung der Standards für die Maschine-zu-Maschine-Kommunikation, die Bereitstellung der Daten für das KI-System sowie vor allem der KI-basierten Regelungsalgorithmen.

Die Verknüpfung der Daten aus der Produktion mit den Daten aus der Nutzungsphase bietet einen hohen Mehrwert (RBW 14.3). So können durch den Rückschluss der gesammelten Daten gezielt geeignete Produktmerkmale von Batteriezellen oder einzelne Batteriezelltypen identifiziert werden, welche sich besonders für unterschiedliche Anwendungen eignen. Diese Daten können Entscheidungen nach der ersten Nutzungsphase sowie Recycling unterstützen.

Des Weiteren können Erkenntnisse in das Produktdesign sowie in den Produktionsprozess integriert werden, um die Qualität der Batteriezelle in der Nutzungsphase zu erhöhen. Die Anpassung der Batterien an das spätere Nutzungsprofil ermöglicht dabei bspw. eine geeignete Dimensionierung oder Wahl einer hinreichend performanten Batteriezelle an die jeweiligen Qualitätsanforderungen, wodurch auch die Nachhaltigkeit positiv beeinflusst wird.

Der sich bei der Umsetzung einstellende mittlere Aufwand bezieht sich dabei einerseits auf die Entwicklung einheitlicher Standards für eine Etablierung des Monitorings und andererseits auf die Schaffung einer übergreifenden Gesetzgebung, die den Besitz sowie den Umgang mit den in der Nutzungsphase generierten Daten regelt.

Autoren:

Gabriela Ventura Silva, TU Braunschweig;
Arno Schmetz, Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Fabio Weiß, Lead Consultant Battery,
Siemens AG;
Philipp Mutz, Strategic Industry Manager,
Sick AG

Mit weiterer Unterstützung von:

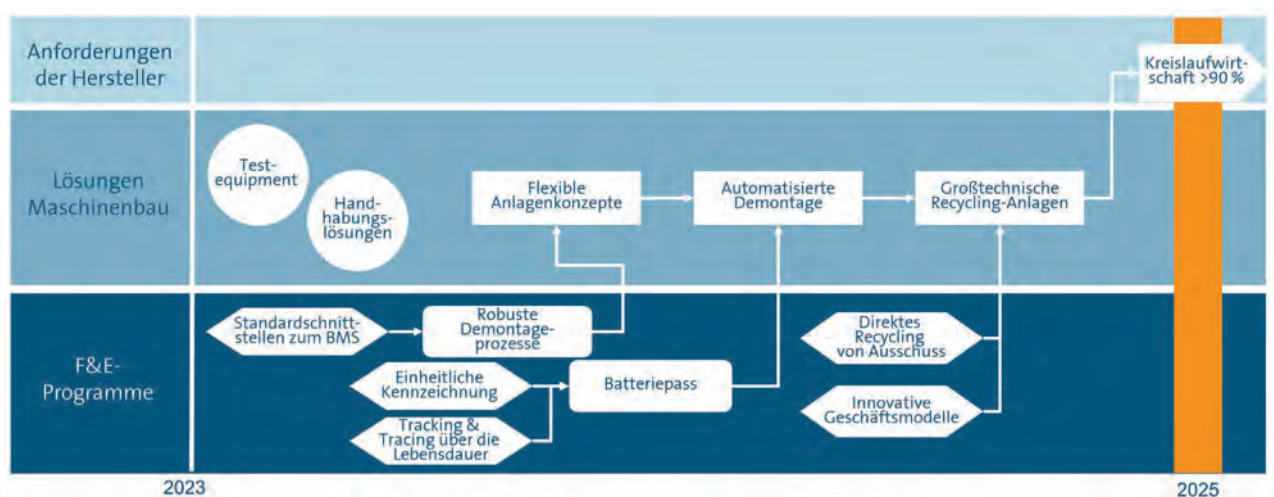
Balluff GmbH
ISRA VISION GmbH
Lenze SE
Maschinenbau Kitz GmbH
Omron Electronics GmbH

15 Kreislaufwirtschaft

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2020	Relevanz**	Timeline***
15.1	Automatisierung der Demontage bei großer Packvielfalt	Fortschritt erzielt	Hoch	2025
15.2	Recycling von Ausschüssen direkt in der Produktion	neu	Hoch	2025
15.3	Innovative Geschäftsmodelle zur Stützung von 2nd Life und Wiederverwendung	Fortschritt erzielt	Mittel	2025
15.4	Berücksichtigung von Design for Re-X in der Produktentwicklung und Gestaltung der Produktionsprozesse	neu	Mittel	2025

RBW 15.1: Automatisierung der Demontage bei großer Packvielfalt:

Großformatige Anlagen für das Materialrecycling auf Zellebene befinden sich derzeit im Aufbau. Technische Verfahren für die Materialrückgewinnung müssen eine Ausbeute bis nahezu 100 Prozent ermöglichen, damit eine echte Kreislaufführung möglich ist. Durch die steigenden Rückläufermengen von Batteriesystemen und deren Variantenvielfalt gewinnt die Flexibilität und Automatisierung der Anlagen und insbesondere der Batteriesystemdemontage an Bedeutung. Die Automatisierung der Demontage hat generell einen großen Einfluss auf die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit des Recyclings insbesondere bezogen auf die Sortenreinheit der Eingangsmaterialien in den Recyclingprozess und damit auf die Qualität des Rezyklats. Zusätzlich können durch eine zerstörungsfreie Entnahme und Demontage einzelner Batteriekomponenten Second-Life-Applikationen unterstützt und somit die Nutzungsdauer von Batterien verlängert werden



Legende: ○ State of the Art ◀▶ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen / Lösungsansätze ▢ Massentaugliche Technologie

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Relevanz aus Sicht eines Batterieherstellers

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2030)

Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

Kreislaufwirtschaft

Grundlagen

Die Kreislaufführung von Batteriematerialien hat für die Nachhaltigkeit des Gesamtsystems Batterie eine entscheidende Bedeutung. Durch die Wiederverwendung von Zellmaterialien können deren Umweltauswirkungen, die vor allem beim Rohstoffabbau und der Primäraufbereitung entstehen, stark reduziert werden. Ebenso kann mit diesem Ansatz die Versorgungssicherheit Deutschlands gesteigert und die mit der Batteriematerialgewinnung und -verarbeitung einhergehenden sozialen, ethischen und politischen Konflikte reduziert werden. Eine zentrale Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft stellt die hohe Qualität und Wiederverwendbarkeit der sekundären Batteriematerialien dar.

Zur Sicherung der wichtigen Rohstoffe einer Batteriezelle ist es das Ziel, bis 2025 eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zu etablieren, in der über 90 Prozent der kritischen Rohstoffe im Kreislauf erhalten bleiben im Gegensatz zu aktuellen Materialrückgewinnungsquoten zwischen 50 und 80 Prozent [RolandBerger2019]. Besonderer Fokus liegt auf dem Recycling ökonomisch wertvoller, ressourcenkritischer und umweltbelastender Stoffe. Die technischen Grundvoraussetzungen für Materialrückgewinnungsquoten über 90 Prozent sind in großen Teilen bereits vorhanden. In der Vergangenheit wurden überwiegend pyrometallurgische Recyclingverfahren eingesetzt, da diese sehr robust gegenüber der Vermischung verschiedener Inputmaterialien sind. Aufgrund ihrer höheren Materialrückgewinnungsraten und der niedrigeren Energieverbräuche etablieren sich

aktuell zunehmend mechanisch-hydrimetallurgische Verfahren. Darüber hinaus werden verschiedene Spezialverfahren auch in Kombinationen mit etablierten Recyclingverfahren weiterentwickelt [Ciez2019], [CEID2020], [Harper2019], [Sommerville2021], [Neidhardt2022].

Die europäische Industrie und Forschung hat der Entwicklung neuer Recyclingkonzepte für die Kreislaufwirtschaft eine hohe Priorität eingeräumt. Auf politischer Ebene wird die Kreislaufführung von Batterien u. a. durch den Europäischen Green Deal forciert. In diesem Kontext wurde die EU-Batteriedirektive 2006/66/EC geprüft und ein Aktualisierungsvorschlag erarbeitet, der voraussichtlich 2023 in Kraft tritt²⁹. Nach aktuellem Stand der Diskussionen wird die Industrie für den europäischen Markt mit einer Reihe von Anforderungen hinsichtlich der Kreislauffähigkeit der Batterien konfrontiert werden. Dies bezieht sich zum Beispiel auf Mindest-Rezyklatmengen bei der Neuproduktion von Batteriesystemen, Materialrückgewinnungsquoten im Recycling und der Bereitstellung von batteriespezifischen Informationen und Daten in Form eines Batteriepasses. Die für 2031 geplanten materialspezifischen Rezyklatquoten für Kobalt (16 Prozent), Nickel (6 Prozent) und Lithium (6 Prozent) werden sowohl seitens der Industrie als auch von Nichtregierungsorganisationen (NGOs) auf Grund des prognostizierten Marktwachstums als ambitioniert beschrieben [Recharge2021], [DUH2022]. Zusätzlich werden für 2027 neben einer Gesamtrecyclingeffizienz von 70 Prozent, materialspezifische Recyclingeffizienzen für Kobalt (90 Prozent), Nickel (90 Prozent), Lithium (50 Prozent) und Kupfer (90 Prozent) gefordert.

²⁹ [Gesetzestext zur Batterieverordnung vom Rat der EU, ST_5469-2023-INIT_en.pdf](#) (Jan. 2023)

Herausforderungen

Zur Ermöglichung einer erfolgreichen Batterie-Kreislaufwirtschaft müssen zahlreiche Herausforderungen parallel bewältigt werden. Diese beginnen bei der Identifizierung und Rückführung der Altbatterien zum Demontage- bzw. Recyclingunternehmen. Durch die Einstufung als Gefahrgut sind die Anforderungen an den Transport von Altbatterien hoch und kostenintensiv³⁰.

Über die Vorgaben der Batteriedirektive hinaus spielt die Wirtschaftlichkeit des Recyclingverfahrens, welche von den Kosten der Altbatterien und des Recyclingprozesses sowie den Erlösen der Sekundärmaterialien abhängig ist, eine zentrale Rolle für eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft. Sekundärmaterialien sind eine Chance des europäischen Marktes sich von internationalen Primärmaterialien unabhängiger zu machen. Primärmaterialien weisen häufig volatile Preise auf, welche durch politische und wirtschaftliche Entscheidungen bestimmt werden. Je höher die Materialpreise sind, desto höher sind die Anreize für hohe Materialrückgewinnungsquoten. Ein Beispiel hierfür ist Kobalt, das in pyrometallurgischen Prozessen bereits eine Rückgewinnungsquote von ca. 95 Prozent aufweist [Chen2019]. Materialien geringerer ökonomischer Wertigkeit, wie zum Beispiel Lithium, stehen jedoch nicht im Fokus der aktuellen Rückgewinnung. Die aktualisierte Batterierichtlinie gibt vor allem Anreize für die Entwicklung ganzheitlicher Recyclingverfahren, in denen ein größeres Spektrum an Materialien zurückgewonnen wird.

Bedingt durch die große Variantenvielfalt an eingesetzten Batteriezellen, -modulen und -systemen wird der Demontageprozess derzeit eingeschränkt und in zeitaufwändiger und kostenintensiver Handarbeit ausgeführt. In Anbetracht steigender Rückläufermengen von

über 500.000 Altbatterien in 2030 und über 1,2 Millionen prognostizierten Rückläufern in 2040 allein in Deutschland, sind künftig zunehmend intelligente Automatisierungslösungen für die Batteriedemontage gefordert [CEID2020]. Übergreifend gilt es sich bereits heute dieser Herausforderung anzunehmen, um ein verlässliches und nachhaltiges Recyclingnetzwerk innerhalb Deutschlands und Europas zu etablieren.

Welcher *End-of-Life* (EoL) Route die Batterien am Ende ihrer Nutzung zugeführt werden, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Erst nach einer Analyse der Rückläufer mithilfe speziell festgelegter Prüfkriterien, wie z. B. hinsichtlich der Restkapazität, *State-of-Health* (SoH), kann über die anzuwendende EoL-Strategie entschieden werden. Eine hohe Demontagetiefe ermöglicht in diesem Kontext die sortenreine(re) Trennung von Materialien, welche besonders bei hoch spezialisierten Prozessführungen unterstützend wirkt. Die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Entnahme einzelner Batteriekomponenten unterstützt zudem die Anwendung der Batterien in sog. *Second-Life*-Applikationen (bspw. als stationäre Energiespeicher), was zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Batterien beiträgt. Mit der Optimierung aktueller Batteriesysteme im Hinblick auf maximale Energiedichten, minimale Produktionskosten und höchste Sicherheit gestaltet sich eine zerstörungsfreie Demontage derzeit vergleichsweise herausfordernd. Durch die hohe Variantenvielfalt aktueller Batteriesysteme, vor allem hinsichtlich der verwendeten Zellchemien, müssen zurzeit gemischte Fraktionen unterschiedlicher Aktiv- und Inaktivmaterialien in den Recyclingprozessen verarbeitet werden [Diekmann2017]. Daher ist entweder eine flexible Prozesstechnik oder eine effiziente Vorsortierung notwendig, damit die Recyclingprozesse auf verschiedene Materialfraktionen reagieren können [CEID-

³⁰ [MB_36_Versand-von-Lithium-Ionen-Batterien_2022.pdf](#) (zvei.org) (Jan. 2023)

2020]. Im Idealfall können künftig die jeweiligen Vorteile thermischer, chemischer und mechanischer Verfahrenskategorien verknüpft und in im industriellen Maßstab umsetzbare und wirtschaftliche Verfahren überführt werden.

Neben der Ausgestaltung und Optimierung der Materialrückgewinnung ist die Vermeidung nicht weiterverwendeter und zu entsorgender Produktionsausschüsse eine weitere Herausforderung. In der Produktion werden hierzu Strategien des direkten und werksinternen Recyclings untersucht.

Lösungsansätze

Bei der Demontage werden die Batteriemodule und -systeme zunächst entladen, sodass die Peripheriekomponenten anschließend demontriert und aufbereitet werden können. Der Maschinenbau bietet bereits sehr gute Lösungen für das Testen und Entladen an. Für eine Automatisierung dieser Prozessschritte befinden sich zudem flexible und KI-basierte Handhabungs- und Anlagentechnik in der Entwicklung. Eine einheitliche, standardisierte und den entscheidenden Akteuren zugängliche BMS-Schnittstelle kann an dieser Stelle eine robuste Prozessführung unterstützen. Wichtige Informationen über das Nutzungsprofil und mögliche Fehler der Batterie, insbesondere über den State of Health (SoH) könnten über diese Schnittstelle ermittelt und als Information für den weiteren Prozess genutzt werden, sodass der Entladeprozess präzise gesteuert und auf potentielle Sicherheitsrisiken im Prozess reagiert werden kann. Hierfür müssen sichere, zerstörungsfreie und kostengünstige Analyse-Verfahren sowie Demontage- und Recyclingprozesse etabliert werden [CEID2020], [Thompson2020]. Zukünftige Batteriegenerationen sollten zudem derart entwickelt und konstruiert werden, dass die Rezyklierbarkeit der Materialien oder auch einzelner Komponenten unterstützt wird. Ein solches Produktdesign im Sinne des „*Design for Recycling*“ kann eine erhebliche Erleichterung

des Demontage- und Recyclingprozesses mit sich bringen und ist daher ein zentrales Forschungsthema. Designansätze sind u. a. die Modularisierung der Batterie, die Substitution von Klebstoffen oder anderen stoffschlüssigen Verbindungen und die Reduktion der Batteriemodulspannung. Kooperationen zwischen OEMs und Maschinen und Anlagenbauern, wie sich derzeit vermehrt auf dem Markt zeigen, können dabei die Entwicklung von Recyclingkonzepten und innovativen Second-Life Geschäftsmodellen vorantreiben.

Zusätzlich kann durch eine einheitliche Kennzeichnung der Batteriesysteme der Automatisierungsprozess unterstützt werden. Besonders wirksam ist dieser Lösungsansatz in Kombination mit einer transparenten Datenbasis im Sinne eines Batteriepasses, der die verbauten Materialien und Verbindungen sowie die Zustände im Lebenszyklus des Batteriesystems „*tracken*“ und „*tracen*“ kann und die Kennzeichnung und BMS-Schnittstelle ergänzt. Ein solcher Batteriepass wird in der neuen EU-Batterieverordnung gefordert. Die bereitzustellenden Informationen statischer. (Hersteller, Batterietyp, -zusammensetzung, Demontage-Anleitungen) und variabler Art, (SoH, voraussichtliche Lebensdauer) sind dabei eindeutig definiert. Durch die umfassende Implementierung dieses Konzepts werden Anlagenkonzepte möglich, die im Zuge der Demontage flexibel auf das jeweils vorliegende Batteriesystem reagieren können. Darüber hinaus ermöglicht dies die genutzte Batterie einer ihrer Eigenschaften optimalen EoL-Anwendung zuzuführen. Für die Umsetzung beschriebener Systeme sind begleitend Lösungen zu entwickeln, mithilfe welcher relevante Informationen möglichst automatisiert erfasst und ausgewertet werden.

Zusätzlich zur Rückgewinnung der einzelnen Stoffe mit der notwendigen Reinheit werden Ansätze verfolgt, die Aktivmaterialien zu rekonditionieren und erneut in Zellen einzusetzen.

Das 2020 gestartete BMBF-Kompetenzcluster „Recycling/Grüne Batterie“ erforscht in diesem Zusammenhang innovative Recyclingprozesse, um die erzielbare Wiederverwertung auf mehr als 80 Prozent der Batterie zu steigern [greenBatt-2022].

Schließlich lassen sich bereits im Rahmen der Batteriezellproduktion Ansätze zur Umsetzung bzw. dem Ausbau einer Kreislaufwirtschaft ausmachen. Anknüpfungspunkt stellt hier die Minimierung des Produktionsausschusses dar, sodass Materialabfälle ebenso wie Materialverbräuche effektiv reduziert werden können. Geeignet sind hierfür in erster Linie in die Produktionslinie integrierte Inspektionssysteme, welche Anomalien bzw. Defekte sicher erkennen und vor der Weiterverarbeitung ausschleusen.

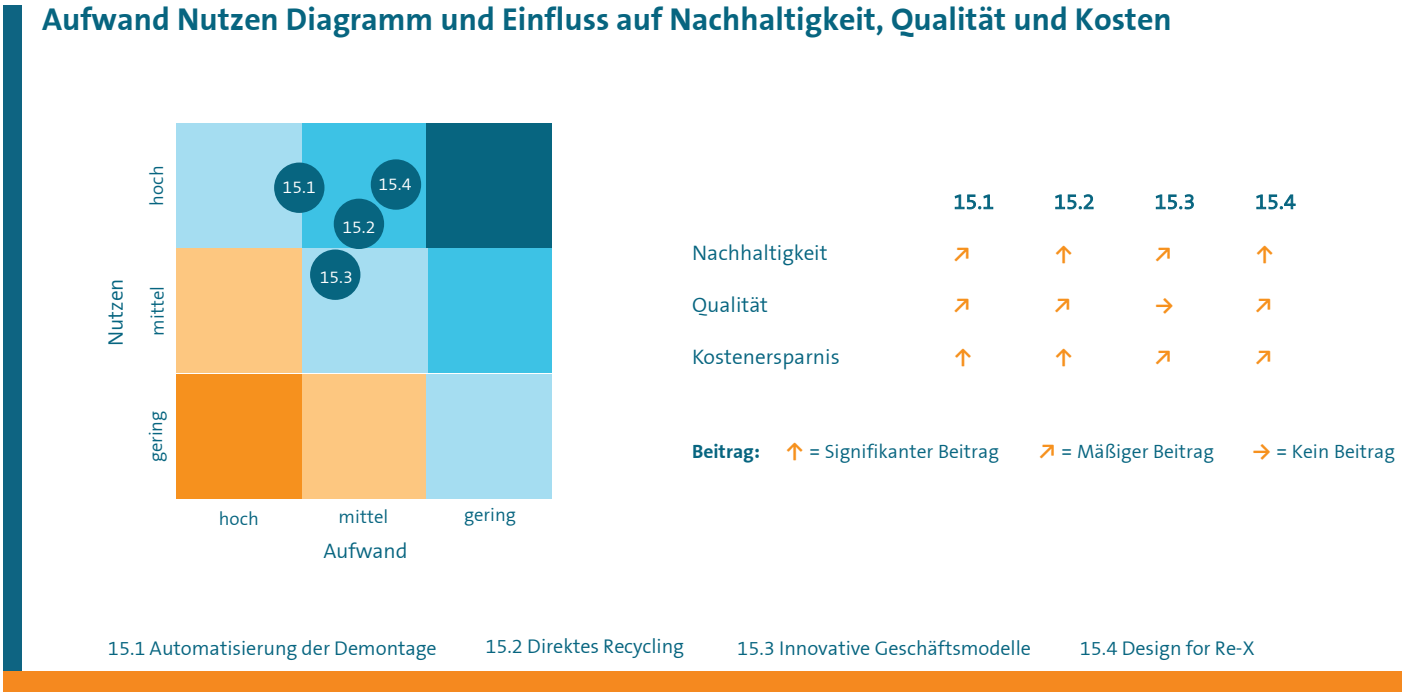
Zusätzlich zur Ausschussreduktion werden Lösungen entwickelt, welche für die direkte Aufbereitung der als Ausschuss klassifizierten Zwischenprodukte eingesetzt werden können, wie z. B. das direct recycling. Übergeordnetes Ziel ist hierbei der überwiegende Erhalt der Materialstruktur sowie einer hohen Materialqualität, sodass eine Rückführung in den ursprünglichen Produktionsprozess möglich wird. Prozesse dafür sind im Portfolio der europäischen Industrie vorhanden. Beispiel hierfür stellt etwa die elektrohydraulische Zerkleinerung dar, bei der mittels Schallwellen eine materialelektive Zerkleinerung erfolgt.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der sich aus den RBWs ergebende Nutzen hängt stark von den Geschäftsmodellen ab, die von den jeweiligen Wirtschaftsakteuren am Markt angewendet werden. Der im mittleren bis hohen Bereich eingestufte Nutzen für alle RBWs unterliegt daher einer gewissen Unsicherheit.

Mit steigenden Produktionszahlen und zunehmender Produktion in Gigafabriken sinkt die Vielfalt von Batteriepacks auf dem Markt und die Stückzahlen werden ausreichend groß für eine Automatisierung der Demontage. Der Aufwand ist damit als mittel einzustufen, während der Nutzen für den Automobilbereich hoch ist (RBW 15.1). Darüber hinaus steigen mit den Produktionszahlen auch die absoluten Ausschussmengen. Das Recycling von Produktionsausschuss ist mit mittlerem Aufwand bei hohem Nutzen zu bewerten (RBW 15.2).

Für aktuelle Batterietechnologien nimmt die Kreislaufwirtschaft aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Betrachtung eine zentrale Rolle ein, da sie die materialbezogenen Emissionen bzw. Auswirkungen verringern kann. Geschlossene Materialkreisläufe tragen zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit und verbesserten Ökobilanz bei. Entscheidend wird in diesem Zuge die Gestaltung neuer Konzepte und Geschäftsmodelle der Batteriehersteller und Recyclingunternehmen sein, die nicht zuletzt aus wirtschaftlicher Sicht wettbewerbsfähig sein müssen (RBW 15.3).



Eindeutige Gesetzgebung wie die neue Batterie-direktive streben die Entwicklung der Kreislauf-wirtschaft auf dem europäischen Markt. Darin definierte Vorgaben zu Recyclingquoten und Sekundärmaterialmengen machen die Berück-sichtigung von Design for Re-X in der Produkt-entwicklung und Gestaltung der Produktions-prozesse wichtig. Hier lässt sich mit mittlerem Aufwand ein hoher Nutzen erzielen (RBW 15.4).

Autoren:
Jana Husmann, Steffen Blömeke, Sönke Hansen
TU Braunschweig;
Artur Scheibe, RWTH Aachen University

Fachliche Unterstützung

Themenpate:
Rainer Forster, Head of Technology
Competence Centre, Maschinenbau Kitz GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:
AZO GmbH + Co. KG
Liebherr-Verzahntechnik GmbH
Sick AG
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung
Batteriezelle FFB

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
Action (greenBat)	Ausschussverwertung Elektrodenproduktion	TU Braunschweig iPAT, Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	2021-2024	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13
ARTEMYS	Skalierbare, kostengünstige Fertigungstechnologien für Kompositkathoden und Elektrolytseparatoren in Festkörperbatterien	TU Braunschweig iPAT	2018-2021	1, 2, 4
AutoSpEM	Automatische Handhabung zur prozesssicheren und wirtschaftlichen Herstellung von Speicherbatterien für die E-Mobilität	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	2012-2015	10
BaSyMo	BatterieSystem für Modularität: Entwicklung und Auslegung von Handhabung und Ergonomie für ein modular aufgebautes Batteriesystem in unterschiedlichen Einsatzszenarien und Konzeption eines herstellerunabhängigen, spezifizierbaren Designs	Universität Stuttgart, Fakultät 7 Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik - Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design	2016-2019	10.B
BatCon	Funktionsintegrierte Hochstrom-Verbinder für Batteriemodule mittels Kostenoptimierter Fertigungstechnologien	Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS)	2013-2015	11
BatMan	Erforschung, Entwicklung und Integration eines neuartigen, skalierbaren und modularen Batterie-Management-System	Leibniz Universität Hannover	2010-2013	10
BatteReMan	Steigerung der Ressourceneffizienz im Lebenszyklus der LIB durch Remanufacturing	PEM der RWTH Aachen	2016-2019	14
Batter4.0	Leitfaden zur Digitalisierung der Batteriezellproduktion	IWB der TU München, IWF der TU Braunschweig, WBK des KIT, PEM der RWTH Aachen	2020-2023	13
Cell-Fi	Beschleunigung der Elektrolytaufnahme durch optimierte Befüllungs- und Wettingprozesse	IWF der TU Braunschweig, IWB der TU München, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2016-2019	7
Cell-Fill	Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehung für Befüllungs- und Wettingprozesse von großformatigen Lithium-Ionen-Batterien	IWF der TU Braunschweig, IWB der TU München, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster, Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik (ITWM), Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung (ISC), PEM der RWTH Aachen	2019-2022	6, 7, 13
cyberKMU²	Entwicklung einer Online-Plattform, die produzierende KMU unterstützt, Cyber Physical Systems zu identifizieren und damit die Schwachstellen der Produktion zu beheben	FIR e. V. an der RWTH Aachen, WZL der RWTH Aachen	2016-2019	13
DAFODIL	Datenbasierte Fertigungsoptimierung von Batteriezellen auf Basis von End-of-Line-Daten durch massiven Einsatz von Machine-Learning-Algorithmen und inline-Analytik	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) (RWTH Aachen), MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster, PEM der RWTH Aachen	2021-2024	13
DaLion	Data-Mining in der Produktion von LIB-Zellen	Battery LabFactory (BLB) und TU Braunschweig	2015-2018	13
DaLion 4.0	Data-Mining als Basis cyber-physischer Systeme in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion	TU Braunschweig IWF, TU Braunschweig iPAT, TU Braunschweig ifs, TU Braunschweig InES, TU Braunschweig elenia, TU Braunschweig IÖNC	2019-2021	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13
DataBatt	Integration horizontaler Datenstrukturen in der Batterieproduktion	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT), HIU des KIT, wbk des KIT, IMA der RWTH Aachen, PEM der RWTH Aachen	2020-2023	12
DigiBatMat (ProZell 2; Material Digital)	Digitale Plattform für Batteriematerialdaten, -wissen und deren Verknüpfung	INM (Leibnitz Institut für Neue Materialien), Hochschule Aalen, AWS-Institut für digitale Produkte und Prozesse gGmbH, KIT (Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren), TUBS: iPAT und IWF	2021-2024	12,13
DemoSens	Demontage und sensorgestützte mechanische Aufbereitung von Lithium-Ionen-Batterien für ein hochwertiges Recycling	Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling (IME) RWTH Aachen, Institut für Unternehmenskybernetik e.V. (IfU) RWTH Aachen, Institut für Infrastruktur, Wasser, Ressourcen, Umwelt (IWARU) FH Münster, PEM der RWTH Aachen	2020-2023	14
EcoBatRec	Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Lithion-Ionen-Batterien der Elektromobilität	IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen	2012-2016	14

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
ecoLiga (greenBat)	Recycling und Resynthese von Kohlenstoffmaterialien aus Lithium-Batterien	TU Braunschweig IWF, IME (RWTH), HZDR, Fraunhofer IWS	2020-2023	13, 14
Effi.Com	Entwicklung eines kamera- u. ultraschallbasierten Sensor- u. Diagnosesystems	PEM der RWTH Aachen, ISEA RWTH Aachen	2016-2017	2
EffiForm	Effiziente Formierungsstrategien zur Erhöhung der Lebensdauer, Zuverlässigkeit und Sicherheit sowie der Kostensenkung	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster, TU München	2016-2018	9
EMKoZell	Ergebnisdatenbank, Modell- und Kommunikationsmanagement für das Kompetenzcluster Batteriezellproduktion	Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Battery LabFactory Braunschweig	2016-2019	13
eKoZell	Ergebnisdatenbank, Modell- und Kommunikationsmanagement für das Kompetenzcluster Batteriezellproduktion (Nachfolge EMKoZell)	Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Battery LabFactory Braunschweig	2019-2023	13
Epic (ProZell 2)	Erhöhung der Durchsatzgeschwindigkeit in der Elektrodenproduktion durch ein innovatives Trocknungsmanagement	TU Braunschweig iPAT, TU Braunschweig Ifs, KIT (TFT - TVT), KIT (wbk), ZSW (ECP)	2020-2023	2
EVanBatter (greenBat)	Entwicklung einer gegenüber Verunreinigungen robusten Resyntheseroute von Aktivmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien	TU Braunschweig iPAT, Fraunhofer Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST), TU Clausthal, Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)	2018-2022	13,14
EVOLi2S	Evaluierung der technisch wirtschaftlichen Vorteile des Open-Cell-Moduls bei Lithium-Ionen und Lithium-Schwefel Batterien im Hinblick auf stationäre und mobile Anwendungen	TU Braunschweig iPAT, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2018-2021	1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 11
ExLaLiB	Steigerung der Energie- und Materialeffizienz durch den Einsatz der Extrusions- und Lasertrocknungstechnologie (Elektrodenfertigung LiB)	PEM RWTH Aachen, WWU Münster, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2016-2019	1, 2
E-Qual	Datenbasierte Prozess- und Methodenentwicklung zur Effizienz- und Qualitätssteigerung in der Lithium-Ionen-Zellproduktion	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg – Standort Ulm	2020-2023	13
Fab4LiB	Erforschung von Maßnahmen zur Steigerung der Material- und Prozesseffizienz in der LiB-Produktion über die gesamte Wertschöpfungskette	PEM RWTH Aachen, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2018-2019	5, 6
FastChargeLongLife	Entwicklung von optimierte Schnellladeverfahren	Battery LabFactory und TU Braunschweig (iPAT, elenia, InEs)	2020-2023	5, 6
FesKaBat	Feststoffkathoden für zukünftige Hochenergie-Batterien	Universität Münster, Institut für Anorganische und Analytische Chemie, Battery LabFactory (BLB) und TU Braunschweig	2016-2019	1, 2, 3
FlexBatt	Flexible Montagekonzepte für Baukasten-basierte Batteriesysteme	Battery LabFactory und TU Braunschweig (BLB, IWF)	2014-2016	12
FlexJoin	Prozesssichere System- und Fügetechnik zur flexiblen Produktion von Batteriemodulen	Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT	2016-2018	11, 12
Fluxlicon	Intelligentes und flexibles System zum Einsatz von jeglichen 2nd-Life-Batterien in der kommunalen Ladeinfrastruktur	PEM der RWTH Aachen	2021-2024	14
FoFeBat2	Entwicklung, Assemblierung und Finalisierung der prismatischen Hardcase- und Pouch-Zelle	MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster, Technische Universität Braunschweig, Fraunhofer-Gesellschaft, PEM der RWTH Aachen	2021-2024	6, 7, 8
FoFeBat3	Untersuchung innovativer Mini-Environment-Konzepte und optimierter Formierbedingungen	Fraunhofer-Gesellschaft, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster, PEM der RWTH Aachen	2022-2026	8
FormEL (ProZell2)	Ermittlung von Prozess-Qualitäts-Beziehungen der Formierung und des End-of-Line Tests zur funktionsintegrierten Gesamtprozessoptimierung	elenia der TU Braunschweig, InEs der TU Braunschweig, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster, EES der TU München, PEM der RWTH Aachen	2020-2023	9
GranuProd	Granulatbasierte Einschnitt-Elektrodenproduktionsanlage mit intelligenter Produktionsregelung	TU Braunschweig iPAT, KIT (TFT), TUM (iwb)	2021-2023	5,6
HEBEL	Hochenergiebatterie mit verbessertem Elektrolyt-Separator-Verbund (HEBEL)" keramischer Separator/Elektrolyt	FAU Erlangen, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	2009-2012	4

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
HEMkoop	HochEnergieMaterialien kosteneffizient und ökologisch prozessiert	BatteryLabFactory (BLB) und TU Braunschweig, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2018-2021	1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 11
HighEnergy	Fertigung hochkapazitiver, strukturierter Elektroden	KIT, Institut für Produktionstechnik, TU Braunschweig, Universität Ulm, Institut für Stochastik, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) Baden-Württemberg	2016-2019	2, 3
HiStructures (ProZell 2)	Hierarchische Strukturierung hochkapazitiver Elektroden	TU Braunschweig iPAT, TU Braunschweig Ifs, TU Braunschweig InES, ZSW (ECM), KIT (TFT), UU, DLR-HIU, KIT (IAM-WET)	2019-2022	1, 2, 3
HoLiB	Hochdurchsatzverfahren in der Fertigung von Lithium-Ionen-Batterien	TU Braunschweig IWF, TU Braunschweig ifs, TU Berlin IWF, Fraunhofer ILT	2019-2022	5, 6, 11, 12
HVBatCycle	HV Battery Recycling and Resynthesis Processes for Sustainable and Functionally Preserved Material Cycles	TU Braunschweig iPAT, Volkswagen AG, TANIOBIS, Schmalz, Viscom, RWTH Aachen, Fraunhofer Institute for Surface Engineering and Thin Films IST	2022-2024	13,14
IDEEL	Implementierung von Lasertrocknungsprozessen für eine ökonomische und ökologische Lithium-Ionen-Batterieproduktion	Münster Electrochemical Energy Technology (MEET) WWU Münster, Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, PEM der RWTH Aachen	2021-2024	2
IKEBA	Integrierte Komponenten und integrierter Entwurf energieeffizienter Batteriesysteme	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, KIT - Institut für Angewandte Materialien - Angewandte Werkstoffphysik	2013-2016	10
InForm	Funktionsintegration der Formierung und Qualitätsbeurteilung von Lithium-Ionen-Batterien mittels modellbasierter Methoden und künstlicher Intelligenz	Helmholtz-Institut Ulm (HIU) für Elektrochemische Energiespeicherung Karlsruher Institut für Technologie, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme (elenia) TU Braunschweig, PEM der RWTH Aachen	2021-2024	9
InnoCase	Erforschung und Entwicklung innovativer Gehäusekonzepte für großformatige Lithium-Ionen-Batterien	ElringKlinger AG, Futavis GmbH, Manz AG, TRUMPF Gruppe, PEM der RWTH Aachen, IWB der TU München, EES der TU München	2019-2022	10
InnoDeLiBatt	Innovative Produktionstechnologien für die Herstellung demontagegerechter Lithium-Ionen-Batteriespeicher	KIT, Institut für Produktionstechnik (wbk)	2016-2018	11, 12, 14
InnoRec (ProZell 2)	Innovative Recyclingprozesse für neue Lithium-Zellgenerationen	TU Braunschweig iPAT, TU Clausthal (IFAD), RWTH Aachen (IME), TUBAF (MVTAT), MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2019-2022	14
InTenz	Intensive Nachtrocknung von Komponenten für Lithium-Ionen-Zellen in diskontinuierlichen Trockenöfen	TU Braunschweig, Hochschule Landshut	2018-2020	2
InteKal (InZePro)	Intelligentes Kalandrieren	TU Braunschweig iPAT, wbk Institut für Produktionstechnik (KIT), iwB Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (TUM); assoziierte Partner: Siemens AG, BREYER GmbH Maschinenfabrik	2021-2024	2,3
IntelliPast (InZePro)	Entwicklung eines intelligenten und autonomen Pastenherstellungsprozesses	TU Braunschweig iPAT, Institute of Mechanical Process Engineering and Mechanics (MVM), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Institute of Production Science (wbk), Karlsruhe Institute of Technology (KIT)	2020-2023	1
IQ-EL	Inline-Zwischenproduktanalyse und Ableitung eines Quality Gate-Konzepts für die Elektrodenfertigung	TU Braunschweig iPAT, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): IAM-WK, IAM-ESS, MVM, TFT, Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW)	2021-2024	1-6
InQuZell	Intelligente Qualitätssicherung und -dokumentation für die laserbasierte zellinterne Kontaktierung	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwB) TU München, wbk Institut für Produktionstechnik Karlsruher Institut für Technologie, PEM der RWTH Aachen	2021-2023	12
InTeAn	Intelligente Anlaufsteuerung zur kostenreduzierten und flexiblen Fertigung zukünftiger Batteriezellen	wbk Institut für Produktionstechnik Karlsruher Institut für Technologie, Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, PEM der RWTH Aachen	2021-2024	12
InTreS	Innovative Trägermaterialien zur Optimierung der Stromableiter von elektrischen Speichern	PEM der RWTH Aachen, ISF der RWTH Aachen	2017-2019	11
KritBatt	Inline-Klassifizierung von Beschichtungsfehlern zur Ermittlung der Kritikalität in der Elektrodenherstellung	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Institut für Werkstoffwissenschaft (IFWW) TU Dresden, PEM der RWTH Aachen	2021-2024	13
KonSuhl	Kontinuierliche Suspensionsherstellung	Battery LabFactory (BLB) und TU Braunschweig	2016 - 2019	1

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
LaserScale	Skalierte Laserstrukturierung und -trocknung von Lithium-Ionen-Akkumulatoren zur Steigerung der Leistungsfähigkeit	IMA & IfU Cybernetics Lab – Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau & Institut für Unternehmenskybernetik e.V. RWTH Aachen, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) TU München, PEM der RWTH Aachen	2021-2023	2
LCA-Li-Bat-Recycling	Ökobilanzen zu den Recyclingverfahren LithoRec II und EcoBatRec für Lithium-Ionen-Batterien	Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e. V.	2012-2016	14
LeiKonBin	Entwicklung von Batteriematerialien und Kontaktierungstechnologien für die Fertigung von Batteriezellen auf der Basis elektrischer leitfähiger Klebstoffe	TU Braunschweig Ifs, IÖNC	2018-2020	1, 2, 11
LiBforSecUse	Qualitätsbewertung von Li-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge für Anwendungen zum zweiten Gebrauch	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Projektpartner: CMI, LNE, METAS, NPL, RISE, Aalto Univ, ACE, NIC, BRS, HIOKI, JRC, Li.plus)	2018-2021	13, 14
LiBEST2	Entwicklung von hochkapazitiven Silizium Anoden	HI MS (Helmholtz Institute Münster), TU Braunschweig iPAT, MEET Münster, Fraunhofer IWS (Institut für Werkstoff- und Strahltechnik), NTU (National Taiwan University), NTUST (National Taiwan University of Science and Technology)	2020-2023	1,2,3
LiOptiForm	Leistungselektronische Optimierung von Formiereinrichtungen für LIB	WHS Zwickau, Fakultät Elektrotechnik, Fraunhofer IKTS	2016-2018	9
LithoRec II	Recycling von Lithion-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen	TU Braunschweig, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2012-2015	14
LiBforSecUse	Qualitätsbewertung von Li-Ionen-Batterien für Elektrofahrzeuge für Anwendungen zum zweiten Gebrauch	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (Projektpartner: CMI, LNE, METAS, NPL, RISE, Aalto Univ, ACE, NIC, BRS, HIOKI, JRC, Li.plus)	2018-2021	13, 14
IKEBA	Integrierte Komponenten und integrierter Entwurf energieeffizienter Batteriesysteme	Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen, KIT - Institut für Angewandte Materialien - Angewandte Werkstoffphysik	2013-2016	10
InnoCase	Erforschung und Entwicklung innovativer Gehäusekonzepte für großformatige Lithium-Ionen-Batterien	ElringKlinger AG, Futavis GmbH, Manz AG, TRUMPF Gruppe, PEM der RWTH Aachen, IWB der TU München, EES der TU München	2019-2022	10
InnoDeLiBatt	Innovative Produktionstechnologien für die Herstellung demontagegerechter Lithium-Ionen-Batteriespeicher	KIT, Institut für Produktionstechnik (wbk)	2016-2018	11, 12, 14
LiMeS	Leichtes Lithium-Metall-Schwefel Batteriesystem auf Basis strukturierter Hybrid-Elektroden-Konzepte für Anwendungen in der Luftfahrt	TU Braunschweig iPAT, Fraunhofer IPA, LUH (IfES), Airbus S&D, GKD, GS GLOVEBOX, Stercom, Lödige, FutureCarbon	2019-2022	1,2,3
LiVe	Herstellung und gezielten Nanostrukturierung von Elektrodenstrukturen für Lithium-Hochleistungsbatterien	IME der RWTH Aachen, iPAT der TU Braunschweig, Universität Duisburg-Essen, Universität Erlangen-Nürnberg, Justus-Liebig-Universität Gießen, Leibniz-Universität Hannover, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2009-2013	2
LoCoTroP	Low-cost Trockenbeschichtung von Batterieelektroden für energieeffiziente und umweltgerechte Produktionsprozesse	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, Hochschule für angew. Wissenschaften Landshut, TU Braunschweig	2016 - 2019	1,2
LOWVOLMON (greenBat)	Monitoring schwerflüchtiger Elektrolyte in der mechanischen Recyclingprozesskette	TU Bergakademie Freiberg (MVTAT), TU Braunschweig (iPAT), Karlsruher Institut für Technologie (TVT), Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik, TU Clausthal	2021-2024	
MiBZ	Entwicklung einer multifunktionalen intelligenten Batteriezelle	Technische Universität München, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie	2015-2018	10
MiKaI (ProZell 2)	Optimale Elektrodenstruktur und -dichte durch integrierte Auslegung von Misch- und Kalandrierprozessen	TU Braunschweig iPAT, TUM (Iwb), MEET, ZSW (ECP), KIT (IAM-WET)	2019-2022	2, 3
Model2Life	Modellbasierte Systemauslegung für 2nd-Life-Nutzungsszenarien von mobilen Batterietestsystemen	Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (iSEA) RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung (iMSE) RWTH Aachen, PEM der RWTH Aachen	2021-2023	14
MultiDis	Multiskalenansatz zur Beschreibung des Rußaufschlusses im Dispergierprozess für eine prozess- und leistungsoptimierte Prozessführung	Battery LabFactory (BLB) und TU Braunschweig, Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik (MVM) Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffe der Elektrotechnik (IAM-WET)	2016-2019	1
MultiEx (ProZell 2)	Entwicklung einer Methodik zur Auslegung und Skalierung kontinuierlicher Dispergierprozesse in der Lithium-Ionen-Batterieproduktion mittels simulativer und experimenteller Untersuchungen"	TU Braunschweig iPAT, KIT (MVM)	2019-2022	1, 2

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
NeW-Bat	Neue energieeffiziente Wiederverwertung von Batteriematerialien	Fraunhofer-Institut für Silicatforschung	2016-2019	14
Newbie	Entwicklung von nachhaltigen, sicheren und schnell aufladbaren Lithium-Ionen-Batterien (LIB) der nächsten Generation mit langer Lebensdauer in der Elektromobilitätsanwendung	TU Braunschweig (iPAT, ifs, iwf, elenia), Mercedes-Benz AG, MAHLE International GmbH, TRUMPF GmbH & Co. KG	2021-2024	1,2,3
NextGenBat	Erweiterung bestehender Anlagen, um auch neuartige Materialien und Zellkonzepte und Erforschung auf potenzielle Industrialisierung	RWTH Aachen, Forschungszentrum Jülich GmbH, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT)	2018-2020	12
NP-LIB	Nachhaltige Kernprozessstechnologien für die Massenproduktion von Li-Ionen Batterien	Manz AG, SW Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg	2013-2015	5, 6, 9
Oekobatt 2020	Ökologisch und ökonomisch hergestellte LIB für „Batterie 2020“	Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg Ulm	2016-2018	14
OekoTroP (ProZell 2)	Ökologisch schonende Trockenbeschichtung von Batterie-Elektroden mit optimierter Elektrodenstruktur	TU Braunschweig iPAT, HAW-Landshut, Fraunhofer IPA, Fraunhofer-ISIT	2019-2022	1, 2, 12
ÖkoMatBatt	Ökologisch und ökonomisch nachhaltige Materialien für die Kathoden- und Anodenbeschichtung in der Lithium-Ionen-Batterie	VARTA Microbattery GmbH, ARLANXEO Deutschland GmbH, Hobum Oleochemicals GmbH, Fraunhofer Institut (IST), TU Braunschweig (iPAT, ifs)	2021-2024	1,2,12
OptiFeLio	Optimierte Design- und Produktionskonzepte für die Fertigung von Lithium-Ionen-Batteriegehäusen	Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, KIT - Fakultät für Maschinenbau - wbk, ZSW	2014-2017	10
OptiKeralyt	Material- und Produktionsprozessoptimierung für Lithium-Ionen-Batterien mit keramischen Festkörperelektrolyten	PEM der RWTH Aachen, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Energie- und Klimaforschung, Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren (IEK-1), Fraunhofer-Institut für Lasertechnik (ILT), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Helmholtz-Institut Ulm (HIU), Universität Duisburg-Essen	2019-2021	6, 7
Optilyt	Entwicklung von maßgeschneiderten Separator/ Elektroden-Systemen für eine optimierte Elektrolytbefüllung von LIB	Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS	2014-2017	4, 7
OptiPro	Optimierte Zellfinalisierung durch innovative Anlagentechnik und Auswertung der Prozess- und Qualitätsparameter im virtuellen Produktionssystem	FTM der TU München, iwb der TU München, IMA & IfU Cybernetics Lab der RWTH Aachen, iSEA der RWTH Aachen, PEM der RWTH Aachen	2021-2024	9
OptiZellForm	Beschleunigung und energetische Optimierung der Zellformierung	PEM der RWTH Aachen, elenia - Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, MEET Batterieforschungszentrum	2016-2019	9
PEAk-Bat	Innovation in Prüfverfahren und Entwicklung zur Aufwandsreduzierung für zukünftige strukturelle Batteriesysteme	PEM der RWTH Aachen	2022-2025	13
PERfektZell	Prozessqualitätssteigerung durch eine neuartige Erweiterung am Kalandrierer für die Bearbeitung von Batterieelektroden zur Zellherstellung	Karlsruher Institut für Technologie - Fakultät für Maschinenbau - wbk Institut für Produktionstechnik	2019-2021	3
PräLi (ProZell 2)	Beschichtung und Prälithierung von Anoden	TU Braunschweig iPAT, TU Braunschweig Ifs FzJ-HIMS, MEET	2019-2022	1, 2, 7, 9
ProfiStruk (ProZell 2)	Prozess- und Anlagenentwicklung zur prozessintegrierten In-line-Strukturierung von Lithium-Ionen-Elektroden	TU Braunschweig iPAT, TU Braunschweig Ifs, TUM (iwb)	2019-2022	1, 2
ProBat	Projektierung qualitätsorientierter, serienflexibler Batterieproduktionssysteme	WBK KIT	2012-2015	6, 12
ProKal	Prozessmodellierung der Kalandrierung energiereicher Elektroden	Battery LabFactory (BLB) und TU Braunschweig, TU München, iw, Westf. Wilhelms-Universität (WWU Münster), Institut für Physikalische Chemie (MEET)	2016 - 2019	3
ProLiMA	Prozessierung von Lithium-Metall-Anoden	TU Braunschweig ifs, TU Berlin IWF	2019-2021	5, 6, 11
ProTrak	Durchsatzoptimierte Formiervorgänge: Produktionstechnik für die Herstellung von Lithium-Ionen-Zellen	TU Berlin, Fakultät V - Verkehrs- und Maschinensysteme - Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE)	2012-2015	9
PolySafe	Steigerung der Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien durch Metall-Polymer-Komposit-Stromkollektoren	TU Braunschweig (iPAT, IWF, ifs, elenia) Fraunhofer IST, von Ardenne, Maschinenbau Brückner, Fraunhofer FEP, VARTA Microbattery	2021-2024	1,2,3,8,9

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
ProLiT	Trockenbeschichtung von LFP & NCM Kathoden für LIB	TU Braunschweig iPAT, Custom Cells, Daikin, Ibu-tec, Saueressig, Coperion K-Tron, Eirich, Umicore, BMW	2021-2024	2
QS-Zell	Entwicklung, Integration und Validierung innovativer Prozesse und QS-Methoden in der Produktion großformatiger Lithium-Ionen-Zellen	ZSW – Produktions- und Prozessforschung	2016-2019	13
Recycling 4.0	Digitalisierung als Schlüssel für die Advanced Circular Economy am Beispiel innovativer Fahrzeugsysteme	TU Braunschweig IWF, TU Clausthal, Ostfalia	2018-2021	13, 14
ReDesign	Entwicklung von Gestaltungsrichtlinien für die recyclinggerechte Konstruktion von Batteriesystemen im Kontext der Kreislaufwirtschaft	TU Braunschweig IK, TU Braunschweig IWF, Fraunhofer IKTS, LUP der Universität Bayreuth	2020-2023	14, (10, 11)
revoLect	Hocheffiziente Elektroden mit ultraleichten Stromsammelern auf Gewebebasis für Lithium-Ionen-Batterien	PEM der RWTH Aachen, Institut für Experimentelle Physik der TU Bergakademie Freiberg, Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstoffe der TU Dresden, Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik (FEP)	2022-2025	1, 2
RollBatt (ProZell 2)	Weiterentwicklung von Wickelprozessen und zylindrischer Zellen	TU Braunschweig IK, ZSW (ECM)	2019-2022	10, 11, 12
Roll-It	Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Zelleigenschaften und Feuchte und Abbildung durch ein Berechnungsmodell	Technische Universität Braunschweig, Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Thermische Verfahrenstechnik	2016-2019	2
SiGgl	'Silicium Graphite goes Industry' – Materialveredelungsansätze zur Herstellung von kontinuierlichen Silizium-basierten Anoden	EL-Cell GmbH (Hamburg), Technologiezentrum Elektromobilität der Volkswagen AG, Custom Cells Itzehoe GmbH, Sili Technologies GmbH, M. Braun Inertgas-Systeme GmbH, Battery LabFactory Braunschweig (iPAT, iwF, ifs)	2016-2022	1,2,3,8,9
SiKo	Materialentwicklung und Herstellung von Silizium-Kompositen	TU Braunschweig iPAT, Varta Microbattery, Glatt, SGL	2020-2023	1,2,3
Sim2Pro	Multi-Level-Simulation von Produkt-Prozess-Wechselwirkungen	Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig - Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik	2016-2019	13
Sim4Pro (ProZell 2)	Sim4Pro Digitalisierungsplattform - Simulation für die Batteriezellproduktion	TU Braunschweig IWF, TU Braunschweig iPAT, TU Braunschweig INES, KIT (MVM), KIT (TFT), KIT (wbk), TUM (iwb)	2019-2022	13
SimBAS	Simulation von Batteriezellen und Anwendungen in Speichersystemen	EES der TU München, PEM der RWTH Aachen, iSEA der RWTH Aachen, Fraunhofer-Institut für Siliziumtechnologie (ISIT), Fraunhofer-Institut für integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)	2021-2023	13, 14
S-PROTRAK	Separatorbeschichtung im Rahmen des Projekts Produktionstechnik für die Herstellung von LIB	Fraunhofer ISIT, Battery LabFactory (BLB) der TU Braunschweig	2013-2014	4
SUSTRAB	Nachhaltige und transparente Wertschöpfungsketten für Batteriematerialien für eine zirkuläre Batteriewirtschaft	BASF SE, TU Braunschweig (iPAT), Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik (IST), Karlsruher Institut für Technologie, Battery and Electrochemistry Laboratory (BELL)	2021-2024	1,2,3,13,14
SulForFlight	Entwicklung optimierter Lithium-Schwefel-Batterien für die Luft- und Raumfahrt	TU Braunschweig (iPAT), Fraunhofer IWS, DLR	2022-2025	1,2,3
STACK	Schnelles Stapeln für die Massenfertigung von kostengünstigen und sicheren Lithium-Ionen-Zellen und Weiterentwicklung von Elektroden- und Separatormaterialien	ZSW, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie Bayerisches Zentrum für angewandte Energieforschung e. V.	2018-2020	6
TempOLadung	Optimierung von Ladeverfahren einer Lithium-Ionen-Batterie unter besonderer Berücksichtigung des Temperaturverhaltens	Hochschule Offenburg	2018	9
TopBat	Entwicklung temperaturoptimierter Batteriemodule mit instrumentierten Zellen	Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik	2013-2016	10
TrackBatt (InZePro)	Tracking und Tracing in der Batterieproduktion	TU Braunschweig IWF, TU Braunschweig iPAT, TU Braunschweig ifs, TUM (iwb), ZSW	2020-2023	12, 13
ViPro	Entwicklung virtueller Produktionssysteme in der Batteriezellfertigung zur prozessübergreifenden Produktionssteuerung	Fraunhofer IPA, TU Braunschweig IWF, KIT wbk, ZSW	2020-2023	12, 13

Lithium-Ionen-Batterien von morgen – Wo geht die Reise hin?

Zentrale Entwicklungen von Energiespeichertechnologien jenseits der Li-Ionen-Batterien sind seit der ersten Roadmap Batterieproduktionsmittel [Maiser 2014] im Anschluss an die Technologiekapitel betrachtet. Da der Fokus auch dieser aktualisierten Roadmap auf optimierten Li-Ionen-Batterien liegt, wird ausgehend von den in dieser Roadmap zentral betrachteten Hochenergie-Lithium-Ionen Batterien im Weiteren kurz auf sich abzeichnende bzw. mögliche Batterietechnologien der Zukunft eingegangen (siehe auch [Thielmann 2017]).

Lithium-Ionen Technologien

Hochenergie-Lithium-Ionen Batterien

Für die weitere Technologieentwicklung der Hochenergie-LIB wird ein sukzessiver Wechsel der Zellkomponenten stattfinden. Ausgehend von am Markt etablierten Lithium-Ionen-Batterien zeichnet sich der zukünftige Einsatz von Hochenergieaktivmaterialien (z.B. Si/C-Komposite) und schließlich von Li-Metall-Anoden, welche durch Feststoffelektrolyte ermöglicht werden könnten, ab. Es wird dabei eine evolutionäre Weiterentwicklung und Koexistenz lithiumbasierter Batterietechnologien erwartet.

Stand der Technik für Kathodenmaterialien ist aktuell NMC811, welches in vielen Elektrofahrzeugen eingesetzt wird, bzw. NCA mit hohem Ni-Anteil. Die hohen Ni-Anteile beider Materialien erhöhen die Anforderungen an den Herstellungsprozess und an Sicherheitsmechanismen auf Zell- und Packebene. Weiterhin wird in großem Umfang LFP eingesetzt. Diesen und verwandten Materialien gegenüber stehen einerseits Hochvoltkathoden, welche mittlere Zellspannungen über 4 V erlauben könnten.

Entsprechende Zellen erfordern jedoch angepasste und heute nicht großindustriell verfügbare Elektrolyte. Zudem wäre aufgrund der höheren Zellspannung ein Re-Design des BMS nötig. Andererseits sind Li-reiche Hochkapazitätsmaterialien in der Entwicklung. Herausforderungen bestehen insbesondere bei der noch schlechten Zyklenfestigkeit der Materialien. Aufgrund ihrer günstigen chemischen Zusammensetzung werden sie dennoch als mögliche Kandidaten für kosteneffiziente LIB gehandelt.

Als Anodenmaterial wird heute meist Graphit verwendet, welches auch in absehbarer Zukunft eine Rolle spielen wird. Schichtdicke und Struktur werden dabei immer an das maximal mögliche Optimum angepasst werden. Bereits heute werden zur Erhöhung der Kapazität Si/Graphit-Komposite mit einem Anteil von 2 bis maximal 5 Prozent Siliziumoxid eingesetzt. Kurzfristig könnten nano-Si/C Materialien mit einem Anteil von 5 bis 20 Prozent Silizium auf den Markt kommen. Ebenfalls sind Zellen mit reinen Si-Anoden in der Erprobung. Abhängig von der weiteren Entwicklung der Energiedichte der Kathode steigt die Attraktivität höherer Siliziumanteile. Für deren Nutzbarmachung besteht insbesondere ein Bedarf für die Entwicklung geeigneter Elektrolyte und Techniken, welche irreversible Nebenreaktionen eindämmen können.

Der **Wirkungsgrad** von Lithium-Ionen-Zellen liegt bei deutlich über 90 Prozent und wird neben dem Zelldesign maßgeblich von der Zellchemie bestimmt. Ein hoher Wirkungsgrad von Batterien trägt zur Energieeffizienz mobiler Anwendungen bei und kann damit deren energetischen Fußabdruck verbessern.

Feststoffbatterien

Viele der Sicherheitsrisiken in Li-Ionen-Batterien gehen von der Verwendung flüssiger, leicht entzündlicher oder explosiver Elektrolyte aus. Feststoffbatterien verzichten auf den Einsatz flüssiger organischer Komponenten, was die Sicherheitsrisiken womöglich verringert. Die Hoffnungen an Feststoffelektrolyte bestehen darüber hinaus in der Ermöglichung von Li-Metall-Anoden, die hohe Energiedichten auf Zellebene zulassen würden. Die Ankündigungen verschiedener Akteure lauten auf Energiedichten jenseits von 350 Wh/kg und 1000 Wh/l.

Auch materialspezifische Beschränkungen, wie die Löslichkeit verschiedener Kationen oder die Begrenzung des für elektrochemische Reaktionen zugänglichen Spannungsfensters, sind mit den Eigenschaften der derzeit verwendeten organischen Lösungsmittel und Li-Salze verknüpft. Zudem findet in heutigen LIB Zellen die teilweise Materialersetzung bei fortschreitender Nutzungsdauer statt, insbesondere beim Flüssig-elektrolyt. Die Nutzung von Feststoffelektrolyten und damit die Realisierung von Feststoffbatterien kann die genannten Limitierungen durchbrechen.

Aktuell wird an mehreren Gruppen von Feststoffelektrolyten geforscht. Polymer-Salz-Komplexe (z.B. Polyethylenoxid und LiTFSI) lassen sich zu dünnen Schichten verarbeiten und besitzen somit eine hohe Kompatibilität zu etablierten Herstellungsverfahren für LIB. Die erzielten Leistungsdichten entsprechender Batterien, erlauben heute jedoch ohne zusätzliche Beheizung noch keinen Einsatz in Elektrofahrzeugen. Demgegenüber stehen keramische Elektrolytsysteme, z.B. auf Basis oxidischer, phosphatischer oder sulfidischer Materialien.

Teilweise werden mit diesen Materialien bereits hohe Energie- und Leistungsdichten erzielt. Die Prozessierung dieser Materialien ist jedoch komplexer als die der Polymersysteme. Außerdem besitzen oftmals gerade die Materialien mit den besten kinetischen Eigenschaften die schlechtesten chemischen Kompatibilitäten zu den gewünschten Aktivmaterialien. In möglichen Zellrezepturen müssen daher Schutzbeschichtungen vorgesehen werden, welche die nötige chemische Stabilität herstellen, jedoch einen zusätzlichen Aufwand in der Produktion bedeuten.

Gegenüber konventionellen LIB ist mit Anpassungen in allen Bereichen der Zellproduktion zu rechnen. Durch den Übergang zu metallischen Li-Anoden könnte der klassische Partikelbeschichtungsprozess der Anode wegfallen. An dessen Stelle könnte entweder die Herstellung funktionalisierter Metallfolien (initial Li-freie Anode) oder die dünne Li-Beschichtung von Trägerfolien in elektrochemischen oder Sputterverfahren treten (initial Li-beschichtete Anode). Gerade bei der Verwendung von keramischen Elektrolyten könnten auch kathodenseitig Anpassungen erforderlich sein. Die Herstellung, Verdichtung und ggf. Wärmebehandlung von Mischungen aus Aktivmaterial- und Elektrolytpartikeln kann sich als sehr komplex erweisen. Auch im Bereich der Zellassemblierung könnte das Bruchverhalten der Keramiksichten einen Übergang vom Wickeln zum Stapeln von Elektroden erfordern. Die klassische Elektrolytbefüllung entfällt.

Kostenseitig zeigt sich heute noch kein eindeutiges Bild im Vergleich zu konventionellen LIB. Auf Materialebene werden sowohl Verbindungen beforscht, deren hohe Metallpreise einen kommerziellen Einsatz unwahrscheinlich machen. Genauso sind jedoch Feststoffelektrolyte in Erprobung, welche abgesehen von

Lithium aus hochverfügbaren und damit potenziell sehr günstigen Elementen bestehen. Ein klares Reduktionspotential ergibt sich aus dem Verzicht der auf einer Cu-Folie aufgetragenen Graphit-Anode. Gerade Feststoff-batterien mit initial Li-freien Anoden könnten diese Kostenkomponente in günstige Zellpreise übersetzen.

Welche Materialien am Ende zum Durchbruch führen und wie genau die ersten industriellen Herstellungsverfahren aussehen werden, ist heute noch ungewiss. Weltweit arbeiten verschiedene Start-Ups sowie etablierte Konzerne und OEM an der Entwicklung von Feststoff-batterien. Neben der Technologieentwicklung besteht die Herausforderung im Aufbau von Lieferstrukturen vom Material bis zur Fertigungsanlage. Trotz des hohen Interesses der Industrie dürften sich Feststoffsysteme in xEV-Anwendungen erst ab 2030 etablieren und dann im Markt diffundieren. Zuvor sind Anwendungen in Nischenapplikationen denkbar.

Jenseits der Lithium-Ionen Technologie

Alternative Batterietechnologien mit höherer Energiedichte?

Anhand der Leistungsparameter (i.d.R. gravimetrische und volumetrische Energiedichte und Zyklenfestigkeit) alternativer Batterien zeigt sich, dass sich selbst bei Technologien mit theoretisch hohen erzielbaren Energiedichten der

Energiedurchsatz (das Produkt aus Energiedichte und erreichbarer Zyklenzahl) nicht gegenüber LIB bzw. den zukünftig optimierten Hochenergie-Li-basierten bzw. Li-Feststoffbatterien verbessert. Gemessen an den aktuellen Anforderungen elektromobiler Anwendungen müssen die meisten alternativen Batterietechnologien in ihrem derzeitigen Entwicklungsstand als nicht geeignet eingestuft werden. Dies könnte sich mit fortschreitender Entwicklung jedoch auch ändern.

Viele dieser Technologien besitzen jedoch einen Mehrwert bzgl. ihrer Kosten und Ressourcenverfügbarkeit und werden aus heutiger Sicht als potenzielle Optionen für stationäre (ESS) oder Spezialanwendungen gesehen. Li-S-Batterien z.B. könnten in Flugganwendungen eingesetzt werden.

Batterien mit Konversionsmaterialien

Konversionsmaterialien (z.B. Metalloxid Anoden oder Fluoridkathoden) stellen einen Überbegriff für viele unterschiedliche Materialien mit sehr hohen spezifischen Kapazitäten dar, häufig mit einem ungeeigneten Potenzial für die Verwendung als Anode/Kathode in Li-basierten Batterien. Theoretisch sind Materialkombinationen mit hoher Energiedichte denkbar. Aktuelle Forschungsthemen betreffen das Materialdesign und die Nanoskalierung der Materialien. Herausforderungen stellen die Volumenänderungen der Partikel dar, welche zu einer niedrigen Lebensdauer und Zyklenfestigkeit führen. Produktionstechnisch sind noch keine Verfahren etabliert und weitere Komponenten erfordern eine Anpassung (Elektrolyt, Zelldesign).

Natrium-Ionen-Batterien

Natrium liegt mit 2,6 Prozent in der Erdkruste vor und Na_2CO_3 kostet deutlich weniger als Li_2CO_3 (Li-Carbonat). Natrium-Ionen-Batterien (Na-IB) würden eine kostengünstige Alternative zu LIB darstellen. Die Patentlandschaft ist weniger dicht besetzt. Dies könnte einen Einstieg in die Material- und Batterieproduktion erleichtern. Das Portfolio möglicher Kathodenmaterialien für Na-IBs ist sehr groß (Schichtoxide, Phosphate, Preussisch-Blau-Analoga). Auf Anodenseite ist die Anzahl möglicher Materialien aufgrund der Ionengröße von Natrium deutlich eingeschränkt. Graphit beispielsweise lässt die direkte Interkalation von Na-Ionen nicht zu. Es muss z. B. auf Hard Carbons zurückgegriffen werden. Diese besitzen mit 250–300 mAh/g aber eine gegenüber Graphit geringere gravimetrische Kapazität. Die Materialwahl für die Anode stellt daher eine Herausforderung dar. Im Vergleich zu LIB wird eine parallele Entwicklung gesehen, welche zeitlich verzögert erfolgt und jeweils mit Abschlüssen bei den Leistungsparametern von 20 bis 30 Prozent verbunden ist. Auch der F & E-Aufwand ist durch die Übertragbarkeit der Fertigungslösungen von LIB (drop-in) vergleichsweise gering.

Metall-Schwefel (Me-S)-Batterien

Elementarer Schwefel zeigt eine gute elektrochemische Aktivität mit verschiedenen Metallen (Me) und ist in der Lage, auch zwei Elektronen pro Schwefelatom aufzunehmen. Aufgrund seiner guten Ressourcenverfügbarkeit und der niedrigen Gewinnungskosten gilt das Element als hochinteressant für zukünftige Speicheranwendungen. Theoretisch besitzen entsprechende Materialien als Kathode eine Kapazität von 1672 mAh/g bei vollständiger Umwandlung.

Schwefel und Me-Polysulfide besitzen jedoch eine schlechte elektronische Leitfähigkeit, so dass für praktische Anwendungen die Funktionalisierung von Schwefel in Kohlenstoff- oder anderen leitfähigen Strukturen nötig ist. Das Reduktionspotenzial ermöglicht materialseitig theoretisch gravimetrische Energiedichten von über 2000 Wh/kg für Li-S und über 1000 Wh/kg für Na-S und Mg-S. Die Schwäche der Systeme besteht in der guten Löslichkeit von Metall-Polysulfiden in vielen organischen Lösungsmitteln, welche als Basis für Elektrolyte dienen. Dadurch kommt es im Verlauf der Zyklierung zu einer Zersetzung der Kathode. Der Transport der gelösten Ionen zur Anode führt zur Selbstentladung der Zellen (Shuttle Effekt). Der Einsatz von Festkörperelektrolyten könnte zur Lösung dieses Problems führen.

Na-S Hochtemperaturbatterien werden bereits heute in stationären Speichersystemen eingesetzt. Sie werden bei hohen Temperaturen und mit geschmolzenem Schwefel und Natrium betrieben, was einen grundsätzlich zu LIB verschiedenen Zellaufbau erfordert und eher keinen mobilen Einsatz erlaubt.

Me-Luft/ O_2 -Batterien

Metall-Luft/Sauerstoff-Batterien sind Gegenstand der Grundlagenforschung. Eine schnelle Kommerzialisierung wird nach vorherrschender Meinung nicht möglich sein. Verschiedene Schritte der Redoxreaktion sind noch zu schlecht verstanden, um auftretende Degradationerscheinungen zu verhindern. Bislang ist unklar, ob Me-Luft-Systeme zu konkurrenzfähigen Preisen hergestellt werden können, da die zu verwendenden Materialien noch nicht feststehen und der Einsatz vielfältiger Additive nötig sein dürfte. Herausforderungen liegen auf allen Ebenen, vom Material- bis zum Systemdesign, vor.

Redox-Flow-Batterien

Pilotanlagen und Kleinserien für Redox-Flow-Batterien (RFB) sind schon seit einiger Zeit vorhanden. Die vergleichsweise geringen Energiedichten lassen nur Anwendungen im stationären Bereich zu (z. B. Spitzenlastpuffer). Maßgeblich für die weitere Entwicklung und die Verbreitung von RFB ist die Wirtschaftlichkeit, welche sich durch die Kosten für die ausgespeicherte Energie über die Lebens- bzw. Anwendungsdauer (LCOE) ergibt. Mittel- bis langfristig müssten 5–10 ct/kWh erreicht werden. Herausforderungen bestehen hinsichtlich der Steigerung der Lebensdauer und Senkung der Herstellungskosten.

Blei-Carbon-Batterien (PbC)

PbC-Batterien stellen eine Weiterentwicklung der bestens etablierten Blei-Säure-Batterien dar. Daher sind keine disruptiven Veränderungen hinsichtlich des Preises und der Energiedichte zu erwarten. Der Vorteil von PbC-Batterien besteht einerseits in der Erhöhung der Leistungsdichte gegenüber Blei-Säure-Batterien. Andererseits wird durch die Elektrodenstruktur eine Nutzung und Lagerung im teilgeladenen Zustand ermög-

licht. Insbesondere für Pufferanwendungen (z. B. Solar- oder Hausspeicher) ist dies unerlässlich. Gegenüber LIBs ist auch langfristig ein Preisvorteil zu erwarten. Es liegt eine sehr gute Kompatibilität zu bisherigen auf Blei-Säurebasierenden Anwendungen vor (drop-in). Herausforderungen bestehen beim Design der negativen Elektrode und bei der Fertigungstechnik.

Organische Batterien

Ein Beispiel für eine weitere Speichertechnologie stellen organische Batterien, bzw. organische Kathodenmaterialien dar. Für ihre Realisierung sind keine Übergangsmetalle nötig und es werden ganz andere Syntheseverfahren benötigt. Potenziell wären solchen Batterien extrem günstig. Herausfordernd ist jedoch, dass keine geeigneten Elektrolyte zur Verfügung stehen und die Zyklenfestigkeit nicht gegeben ist. Insgesamt ist festzustellen, dass das Fehlen geeigneter Elektrolyte sehr häufig eine Barriere für die Nutzbarmachung alternativer Batterietechnologien und Materialien darstellt. Die Herausforderungen sind vielfältig und betreffen z. B. die chemische/elektrochemische Stabilität, Korrosivität und Lösungseigenschaften.

Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Schlussfolgerungen

Die Marktdurchdringung der Elektromobilität schreitet nicht zuletzt durch die in den letzten Jahren weiter vorangetriebenen und umgesetzten politischen Rahmenbedingungen stetig voran. Damit einhergehend wächst die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB) weiter rasant. Für das Jahr 2021 wurden global 460-500 GWh an LIB-Zellen nachgefragt.

Der global wachsende Aufbau von Zellproduktionskapazitäten, unterstreicht dabei eindrucksvoll die weltweite Dynamik. Die Terawattstunden (TWh)-Grenze der LIB-Zellnachfrage für Elektrofahrzeuge ist rechnerisch auf Basis der Fabrikankündigungen mit 1,2 TWh bereits 2022 erreicht worden. Durch Hochlaufkurven und Projektverschiebungen ist mit einer realistischen Überschreitung der TWh-Grenze aber erst in 2024 zu rechnen. In diesem Zeitfenster kann auch von einer entsprechenden Nachfrage ausgegangen werden. Die global relevanten Zellhersteller stammen dabei nach wie vor fast ausschließlich aus dem asiatischen Raum. Die Standorte der Produktionsstätten verlagern sich zunehmend dorthin, wo die Nachfrage entsteht. Europa profitiert als Standort von den Sitzen der größten Fahrzeug-OEM. Zudem hat Europa mit der Batterieverordnung und dem *Net Zero Industry Act* politische Rahmenbedingungen geschaffen, die eine europäische Zellfertigung für den Europäischen Markt vor Ort begünstigen. Mit der Firma Northvolt und VW als Vorreiter haben auch europäische Zellhersteller die Herausforderung angenommen, sich als Zulieferer im Automobilmarkt zu behaupten. In den nächsten Jahren ist zudem mit einem starken Anstieg von Produktionsstätten in den USA zu rechnen.

Daraus ableitend ergeben sich für den global agierenden europäischen Maschinen- und Anlagebau in den dynamischen Märkten der Elektromobilität und LIB-Produktion große Geschäftspotentiale, sowohl in der Zellfertigung als auch in der Modul-, Pack- und Systemfertigung. Die hohe Innovationskraft des Maschinen- und Anlagebaus kann dazu beitragen, den Wandel zu den Innovations-Technologien für den Klimawandel, wie der Elektromobilität, zu befähigen. In verwandten Branchen wurde dies bereits eindrucksvoll bewiesen.

Ausgangsbasis für den europäischen Maschinen- und Anlagenbau

Die nachhaltige, intelligente Produktionstechnologie ist die Voraussetzung dafür, dass Elektromobilität und stationäre Speicherung zum Klimaschutz beitragen können. Der europäische Maschinen- und Anlagebau punktet hier durch seine starke Spezialisierung und bringt Erfahrungen aus anderen Industrien mit. Er kann dabei auf vorhandene Kompetenzen in der Digitalisierung (Industrie 4.0) und im Bereich Umwelt- und Nachhaltigkeit zurückgreifen. In der Modul- und Packfertigung profitiert er zudem von den seit Beginn der Elektromobilität gewonnenen Erfahrungen und dem Austausch mit der Kundenindustrie vor Ort. Asiatische Player profitieren dafür nach wie vor in der Zellfertigung. Durch die langjährige Ausrüstung von Fabriken konnte hier früh Wissen aufgebaut werden. Die Anforderungen für die Produktion von großformatigen Batterien für den Einsatz in der Elektromobilität oder auch im stationären Bereich sind jedoch auch für sie hoch. Die in der Roadmap formulierten Hürden gelten für alle Marktteilnehmer.

Fokus Großserie

Im Rahmen der Roadmap wird auf die Produktionstechnik, ausgehend von einer gründlichen Aufarbeitung des Stands der Technik und der Betrachtung der kompletten Prozesskette von der Materialaufbereitung bis zur Packmontage, fokussiert. Wichtig ist dabei, alle Produktionslösungen in puncto Relevanz für die Großserienfertigung zu bewerten. Durch den derzeitigen Markthochlauf und die Realisierung erster *Gigafactories* zielen viele der Herausforderungen darauf ab, Durchsätze zu steigern sowie Qualität und Prozessstabilität in Großserie zu beherrschen. Die Vermeidung jedes Prozentes Ausschuss' bringt bei einer 10-GWh-Fabrik in der Zellfertigung aufgrund des hohen Materialwerts und des Strombedarfs eine Ersparnis von ca. 5 Mio. € und 10,5kt CO₂ Äquivalenten.

Betrachtungszeitraum

Durch die hohe Marktdynamik werden Prozesslösungen vor allem in den nächsten Jahren relevant. Für viele der formulierten RBW ist daher bereits eine Durchbrechung in 2024 anzustreben, für fast alle bis 2027. Die wenigsten adressieren die Lösung der Herausforderung für die Jahre danach. Eine über 2030 hinausgehende Betrachtung wäre spekulativ oder könnte bestenfalls in Szenarien erfolgen.

Einbezug wichtiger Akteure

Die Ergebnisse der vorliegenden Roadmap basieren auf offenen und zielgerichteten Diskussionen in den Workshops. Wie auch bei den letzten Updates der Roadmap haben Mitgliedsfirmen des VDMA Batterieproduktion bei der Ausarbeitung der Technologiekapitel mitgewirkt. Durch Patenschaften und fachliche Unterstützung haben sich die Mitgliedsunternehmen in den Prozess mit eingebracht. Die Roadmap ist öffentlich zugänglich und findet weltweit Beachtung. Viele Vorschläge und Anregungen können so aufgegriffen und implementiert werden. Der zielorientierten Dialog zwischen Batterieproduzenten, Produktionsforschung und dem Maschinen- und Anlagenbau wird stetig fortgeführt.

Handlungsempfehlungen

Forschungsbedarf gezielt angehen und in die industrielle Umsetzung bringen

Die breite Sensibilisierung aller Akteure entlang der Wertschöpfungskette der Batterieproduktion sowie möglichen privaten und öffentlichen Investoren ist notwendig, um den identifizierten Forschungsbedarf gezielt und nachhaltig anzugehen. Die enge Zusammenarbeit von Industriepartnern und Forschungseinrichtungen ist hierbei essenziell. Fördermaßnahmen des BMBF, die unter dem Dachkonzept Batterieforschung zusammengefasst sind, adressieren bereits wichtige Themen. Vorhaben, die über Pilotanlagen hinausgehen, können die Industrie dabei unterstützen, neue Ansätze in der Volumenproduktion zu realisieren und das Investitionsrisiko zu minimieren. Sie sollten auch weiter förderpolitisch unterstützt werden. Deutliche Akzente werden auch von der EU gesetzt: Neben den IPCEI-Verbünden, mit dem Ziel Gigafabriken in Europa zu errichten, gibt es innerhalb der ETIP Batteries Europe und der European Battery Partnership weitere Aktivitäten. Neu ins Spiel gekommen ist, als Antwort auf den amerikanischen *Inflation Reduction Act*, der *Net Zero Industry Act*.

Darüber hinaus ermöglicht industrielle Gemeinschaftsforschung gerade kleineren Unternehmen aus dem Maschinenbau, im vorwettbewerblichen Bereich Basiswissen aufzubauen, und schafft so Voraussetzungen für neue Ideen. Das erfolgreiche Netzwerk X-MOTIVE im VDMA bildet hierfür eine ideale Plattform.

Produktionsforschung schafft die Grundlage für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Zellfertigung und ist der Schlüssel für Prozessinnovation und für die Entwicklung von Alleinstellungsmerkmalen. Referenzen und Alleinstellungs-

merkmale schaffen die beste Voraussetzung für den europäischen Batterie-Maschinenbau, sich nachhaltig und langfristig in diesem Zukunftsfeld zu positionieren und auch weltweit als Lösungspartner attraktiver zu werden.

Neben den richtigen Inhalten der Forschung spielt der Faktor Zeit eine entscheidende Rolle. Wenn Europa sich hier international weiter behaupten möchte, müssen Forschungsideen schneller in die Umsetzung gebracht werden. Von der ersten Idee bis zum Start eines Projektes vergehen oft 1,5 bis 2 Jahre. Insbesondere die Regelungen zu schnelleren Genehmigungsverfahren im *Net Zero Industry Act* sind ein wichtiger Ansatz. Hier muss sich aber noch beweisen, ob der Beschluss eine entsprechend starke Durchschlagskraft hat.

Konkreter Forschungsbedarf für den Maschinen- und Anlagenbau zur Verbesserung der Produktionstechnik ergibt sich insbesondere aus folgenden Kontexten:

Lerneffekte erzielen: Die Planung zukünftiger Fabrikkapazitäten erfordert eine sorgfältige Betrachtung vieler Aspekte unter Einbeziehung der Anforderungen an die zu produzierenden Zellen. Für eine wirtschaftliche und nachhaltige Umsetzung müssen Anlagen und Produktionstechnik stetig weiter optimiert werden. Dies hilft, die Phase des *Ramp-up* zu beschleunigen, den Durchsatz und die Qualität zu erhöhen und zugleich planerisch den Umgang mit dem Wechselspiel zwischen Angebot, Nachfrage, Auslastungsgrad, Kosten- und Preisentwicklung, etc. zu meistern. Daher sollten mit optimierten Produktionstechniken schnell Lerneffekte erzielt werden.

Scale-up der Prozesse: Mit zunehmender Größe der Zellfabriken ist dies ein wichtiger Hebel, um die Kosten zu senken. Es stellt eine Alternative zum *Numbering-up*, dem simplen Vervielfachen von Linien, dar. Hierzu gilt es, die Prozesstechnik

entsprechend zu optimieren. Prozessstabilität und Qualität müssen auch bei hohem Durchfluss gewährleistet sein. Das Prozessverständnis muss dabei immer weiter ausgebaut werden.

Alternative Systemtopologien: Ziel alternativer Systemtopologien auf Modul-Packebene ist in erster Linie die Maximierung des Batteriepack-Füllgrades und damit, eine Steigerung des Energieinhalts zu erreichen. Dies ist vor allem durch Senkung des Anteils der verwendeten Gehäusebauteile, Funktionsintegration und mit standardisierten Baukastensystemen möglich.

Overengineering vermeiden: Durch den gezielten Aufbau von Prozesswissen können Wirkzusammenhänge erschlossen werden. Dies erfordert ein umfassendes Prozess-Monitoring und die Erhebung eines umfangreichen Datensatzes sowie dessen Auswertung. Der Ansatz der systematischen Verarbeitung großer Datenmengen ist auch als *Data Mining* bekannt. Jeder Produktionsschritt weist individuelle Prozessparameter auf.

Sinnvolle Toleranzen lassen sich nur definieren, wenn ausreichend verstanden ist, inwieweit die Qualität der Zwischenprodukte sowie die der finalen Batteriezellen durch die einzelnen Prozessschritte beeinflusst werden. Hierbei ist es wichtig, sowohl technisch als auch ökonomisch die sinnvollste Lösung zu erreichen. Erworbenes Prozessverständnis sollte in sinnvolle Anforderungen an Maschinen- und Anlagen fließen. Zu hohe Vorgaben in den Lastenheften treiben die Preise unnötig nach oben.

Frühzeitige Einbindung des Maschinenbaus

Bei neuen Materialien und Prozessen sind Herstellbarkeit und Serienreife entscheidend für den Erfolg: Der Maschinen- und Anlagenbau muss frühzeitig in die Entwicklung neuer Produkte, vor allem aber bei neuen Technologien

und Zelldesignentscheidungen einbezogen werden. Das betrifft nicht nur den Bereich der Zellfertigung. Auch im Bereich der Modul- und Packfertigung muss heute sehr flexible auf Designanpassungen in der Zelle oder der Fahrzeugkonzepte reagiert werden.

Optimierte LIB werden nach heutigem Stand die zentrale Technologie für mindestens die nächsten 10 Jahre darstellen. Trotz dessen ist es für den Maschinen- und Anlagenbau bereits heute wichtig, sich mit den prozesstechnischen Besonderheiten und Herausforderungen in der Produktion weiterentwickelter LIB zu befassen sowie mit generell weiterentwickelten Batterietechnologien.

Internationale Wettbewerbsfähigkeit stärken

Für Referenzen und Alleinstellungsmerkmale braucht es Produktionsforschung sowie Zusammenarbeit und Austausch entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Europäische Maschinen- und Anlagen überzeugen als verlässliche Partner und stehen für Innovationskraft und Effizienz in *Total Cost of Ownership*-Betrachtungen sowie für Nachhaltigkeit. Um kosteneffektiv anbieten zu können, muss das Kostenverständnis für einzelne Prozessschritte und im Gesamt-Lebenszyklus gestärkt werden.

Im internationalen Wettbewerb wird es in der Zellfertigung immer wichtiger, Komplettanlagen und ganze Produktionslinien mit entsprechenden Gewährleistungen anzubieten. Eine enge Zusammenarbeit der Maschinen- und Anlagenbauer entlang der Produktionskette ist dafür gefordert.

Die Corona Situation und der Ukraine-Krieg haben zudem gezeigt, wie wichtig lokale Lieferanten sind und wirkt als Beschleuniger für europäische Zellproduktionen und die Zuliefererketten.

Zugang zur Großserie schaffen

Erfahrung in der Volumenproduktion können die Hersteller von Produktionsmitteln nur durch direkte Beteiligung an Großprojekten erzielen. Wichtig dabei ist die unmittelbare Kooperation mit dem Hersteller. Nur so können technologische Bedarfe schnell erkannt und Lösungsangebote entwickelt werden. Eine vertrauensvolle Zusammenarbeit zwischen Zellherstellern und dem Maschinen- und Anlagenbau wird an Bedeutung gewinnen und über Erfolg oder Misserfolg entscheiden.

Innovation und neue Ansätze

In der Situation der rasant wachsenden Märkte liegt der Fokus darauf die Bedarfe zu decken. Damit besteht die Gefahr, dass Zeit für Innovationen und neue Ansätze fehlt. Gerade jetzt ist es wichtig, Chancen zu erkennen und entsprechende Strategien zu entwickeln. Dabei geht es nicht nur darum, bestehende Prozesse zu optimieren, sondern darum "Out of the box" zu denken!

Nachhaltige Batterieproduktion

Im Rahmen alternativer Mobilitätstechnologien und der Energiewende nehmen Batterien eine Schlüsselrolle bei der Reduzierung negativer Umweltauswirkungen ein. Li-Ionen-Batterien stellen die Kerntechnologien zur **Decarbonisierung** dar. Nur über entsprechende Speichermöglichkeiten können erneuerbare Energien wie Solar- und Windkraft genutzt werden, wenn der Bedarf da ist.

In der Elektromobilität geht es insbesondere darum, den **CO₂-Footprint** zu verkleinern. Die Produktion von Batteriezellen, einschließlich der dafür notwendigen Rohstoffe und Materialien,

ist für den Großteil dieser Umweltauswirkungen verantwortlich. Die Steigerung der Material- und Energieeffizienz der Produktion ist daher essenziell. Zudem gilt es, **Recyclingverfahren- und technologien** zu entwickeln. Dabei bietet das Recycling Möglichkeiten, Alleinstellungsmerkmale zu erzeugen. Produktionslösungen, die einen Beitrag zur Re-X Fähigkeit leisten, werden als Wettbewerbsvorteil an Bedeutung gewinnen, ebenso wie die in Zellfabriken mit integrierter Resynthese bzw. Rekonditionierung von Batteriematerialien.

Kraft, Ausdauer und Mut zur Risikobereitschaft

Produktionsforschung ist der Schlüssel für Innovationen, die es zwingend braucht, um im Batteriemaschinenbau Erfolg zu haben. Der Marktzugang ist oft nicht einfach. Neben guten Produktionslösungen ist Ausdauer und Durchhaltevermögen gefragt, wenn es darum geht, den Kunden zu überzeugen. Gleichzeitig erfordert es eine gewisse Risikobereitschaft, neue Ansätze in der Serienfertigung umzusetzen oder sich als Anbieter von Turn Key Solutions bzw. als Generalunternehmen am Markt zu etablieren. Kundenseitig wird dies immer mehr gefordert.

Dafür sind Instrumente wie z.B. die steuerliche Forschungsförderung und eine allgemeine degressive Abschreibung wichtig, die Investitionsrisiken minimieren.

Roadmapping-Prozess verstetigen

Roadmapping ist ein dynamischer, iterativer Prozess. VDMA Batterieproduktion hat den Dialog mit dieser Neuauflage verstetigt und wird die seit 2014 mit der ersten Roadmap begonnene Implementierung des Roadmapping-Prozesses weiterhin aktiv vorantreiben.

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
3C	Consumer, Computer, Communication bzw. tragbare Geräte
ASP	Average Sales Price
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMS	Batteriemanagement-System
BoL	Beginning-of-Line
CAPEX	Investitionsausgaben, für Englisch capital expenditure
COP	Penetrationskoeffizient
C-Rate	Lade- (oder Entladestrom) eines Akkus bezogen auf seine Kapazität
Cu-Folie	Kupfer-Folie
DCM	Dichlormethan
DoE	Design of Experiments
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie
EoL	End of Life
EOL Test	End of Line Test
EMPT	Elektromagnetische Pulstechnik
ESS	stationäre Speicher
EUCAR Level	Gefahrenklassifizierung des European council for automotive and R&D
EV	Electric Vehicle
F & E	Forschung und Entwicklung
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis
HEV	Hybridelektrisches Fahrzeug
HF	Fluorwasserstoffsäure
IPCEI	Important Project of Common European Interest
IR-Trockner	Infrarot-Trockner
IRA	Inflation Reduction Act
KI	Künstliche Intelligenz
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KPI	Key Performance Indicators
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LCOE	Levelized Cost Of Electricity
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
Li	Lithium
LiB	Lithium-Ionen-Batterie
LiTFSI	Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide
Me	Metall
Na	Natrium
Na-IB	Natrium-Ionen-Batterien
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NDA	Englisch: Non-disclosure agreement, Verschwiegenheitsvereinbarung
NIR	Nahes Infrarot
Ni	Nickel
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid

NMP	N-Methyl-2-pyrrolidon Lösungsmittel
OEM	Original Equipment Manufacturer z. dt. Originalausrüstungshersteller
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OPEX	Betriebskosten, für Englisch operational expenditure
Pb Batterien	Blei-Säure Batterien
PbC	Blei-Carbon
PE	Polyethylen
PET	Polyethylenterephthalat
PHEV	Plug-In-Hybriden
PP	Polypropylen
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
PV	Photovoltaik
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PVD-Verfahren	Physical Vapour Deposition- Beschichtungsverfahren
RBW	Red Brick Wall
Re-X	Mögliche Recyclingverfahren werden unter Re-X zusammengefasst
RFB	Redox-Flow-Batterien
RFID	Radio-Frequency Identification
S	Schwefel
SEI	Solid Electrolyte Interface
SG&A	Selling, General and Administrative Expenses
Si/C-Komposite	Silizium/Kohlenstoff-Komposite
SoA	State of Art
SoH	engl. State of Health, Qualität der Batterie
SPC	Festkörperpermeabilität
TCO	Total Cost of Ownership
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
UHMWPE	Ultrahochmolekulargewichtiges Polyethylen
V2G, G2V	Vehicle to Grid, Grid to Vehicle
VCSEL-Laser	Vertical-cavity surface-emitting laser
WEZ	Wärmeeinflusszone
xEV	BEV, PHEV und HEV

Literaturverzeichnis

- [adria2005] ADRIA Network (2005-2006). Advanced Displays Research Integration Action: Series of six roadmapping workshops involving research organisations, machine makers, producers, integrators, and associations. <http://www.adria-network.org/>
- [An2016] An, S. J.; Li, J.; Daniel, C.; Mohanty, D.; Nagpure, S.; Wood, D. L. (2016) The state of understanding of the lithium-ion-battery graphite solid electrolyte interphase (SEI) and its relationship to formation cycling. In: Carbon, Jg. 105, 2016, S. 52–76
- [B3 2019] B3 Corporation Report 18-19/Chapter 11 LIB Materials Market Bulletin (19Q1), 2019
- [Balakrishnan2006] Balakrishnan, P. G.; Ramesh, R.; Prem Kumar, T. (2006). Safety mechanisms in lithium-ion batteries. In: Journal of Power Sources, Jg. 155, 2006, Nr. 2, S. 401–414
- [Baumeister2014] Baumeister, M.; Fleischer, J. (Integrated cut and place module): Integrated cut and place module for high productive manufacturing of lithium-ion cells. In: CIRP Annals, Jg. 63, 2014, Nr. 1, S. 5-8
- [Becker2019] Becker et. al. Umwidmung und Weiterverwendung von Traktionsbatterien 978-3-658-21021-2
- [BEMA2020] Begleitmaßnahme zu Batteriematerialien für zukünftige elektromobile und stationäre Anwendungen (Batterie 2020)
- [Bhattacharya2014] Bhattacharya, S.; Riahi, A. R.; Alpas, A. T. (2014). Thermal cycling induced capacity enhancement of graphite anodes in lithium-ion cells. In: Carbon, Jg. 67, 2014, S. 592–606
- [Billaud et al. 2016] Billaud, J.; Bouville, F.; Magrini, T.; Villevieille, C.; Studart, A. R. (2016) Magnetically aligned graphite electrodes for high-rate performance Li-ion batteries. In: Nature Energy, 16097.
- [Busà2021] Busà et. al., The effects of ambient storage conditions on the structural and electrochemical properties of NMC-811 cathodes for Li-ion batteries.
- [Buqa2006] Buqa, H.; Würsig, A.; Vetter, J.; Spahr, M. E.; Krumeich, F.; Novák, P. (2006). SEI film formation on highly crystalline graphitic materials in lithium-ion batteries. In: Journal of Power Sources, Jg. 153, 2006, Nr. 2, S. 385–390
- [Cannarella2014] Cannarella, J.; Craig, A. (Stress evolution and capacity fade in constrained lithium-ion pouch cells): Stress evolution and capacity fade in constrained lithium-ion pouch cells in Journal of Power Sources. Jg. 245, 2014, S.745-751
- [Case Study ULT] https://media.ult.de/fachartikel-ult-lufttechnik-li-ionen-batteriezellfertigung.pdf?mp_dir=61740&mp_id=1649862857(Stand März 2023)
- [Case Study acp] <https://www.acp-systems.com/wp-content/uploads/2021/11/CS-Cleaning-in-Battery-Pro-D.pdf> (Stand März 2023)
- [CEID2020] acatech/Circular Economy Initiative Deutschland (6. Oktober 2020) “Ressourcenschonende Batteriekreisläufe. Mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben <https://www.acatech.de/publikation/ressourcenschonende-batteriekreislaeufe/>
- [Chen2019] Chen, M.; Ma, X.; Chen, B.; et al. (2019) Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries. Joule, 3, pp. 2622-2646.
- [Cho2014] Cho, H. A., Cheon, J. J., Lee, J. S., Kim, S. Y., & Chang, S. S. (2014). Prevalence of Dry Eye Syndrome after a Three-Year Exposure to a Clean Room. In Annals of Occupational and Environmental Medicine (Vol. 26, Issue 1). Korean Society of Occupational and Environmental Medicine.
- [Ciez 2019] Ciez, R.E., Whitacre, J.F., 2019. Examining different recycling processes for lithium-ion batteries. Nat. Sustain. 2, 148–156.
- [Das2018] Das, A.; Li, D.; Williams, D.; Greenwood, D. (Joining Technologies for Battery Systems Manufacturing): Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing. In: WEVI, Jg. 9, 2018, Nr. 2, S. 22
- [Davoodabadi2019] Davoodabadi, A.; Li, J.; Liang, Y.; Wood, D.; Singler, T.; Jin, C.; Analysis of electrolyte imbibition through lithium-ion battery electrodes, In: Journal of Power Sources Volume 424, 1 June 2019, Pages 193-203
- [Davoodabadi2020] Davoodabadi, A., Jin, C., Wood III, D. L., Singler, T. J., & Li, J. (2020). On electrolyte wetting through lithium-ion battery separators. In Extreme Mechanics Letters (Vol. 40, p. 100960). Elsevier BV.
- [Degen2022] Degen et. al. Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production, Journal of Cleaner Production, Volume 330, 2022, 129798, ISSN 0959-6526.

- [Deng 2021] Deng, Z.; Huang, Z.; Meng, J.; Zhong, Y.; Ma, G.; Zhou, Y.; Shen, Y.; Ding, H.; Huang, Y. (Recent Progress on Advanced Imaging Techniques for Lithium-Ion Batteries)
- [Diekmann2017] Diekmann, J.; C. Hanisch, C.; Frobose, L.; Schalicke, G.; Loellhoeffel, T.; Folster, A.-S.; Kwade, A. (2017). Ecological recycling of lithium-ion batteries from electric vehicles with focus on mechanical processes. *Journal of the Electrochemical Society* 164(1), pp. A6184-A6191.
- [Dongkyu2021] Dongkyu, P., The effect of thickness of electrodes on edge quality in laser cutting of electrodes, *J. Korean Society for Prec. Engineering*, Vol. 38 Issue 2 (97 – 101), 2021
- [Dörr2011] Tobias Müller-Prothmann, Nora Dörr: Innovationsmanagement. Strategien, Methoden und Werkzeuge für systematische Innovationsprozesse. Hanser, München
- [Drachenfels2022] Von Drachenfels, N; Husmann, J.; Khalid, U.; Cerdas, F.; Herrmann, C. (2022) Life Cycle Assessment of the Battery Cell Production: Using a Modular Material and Energy Flow Model to Assess Product and Process Innovations. In: *Energy Technol.* 2200673.
- [DUH2022] Deutsche Umwelthilfe (DUH); European Environmental Bureau (EEB); Environmental Coalition on Standards (ecos); Transport and Environment (2022). EU-Batteries Regulation: Four-Position-Paper. https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/Projektinformation/Kreislaufwirtschaft/ElektrogerP rozentC3ProzentA4te/EU-Batteries_Regulation__Four-Position-Paper
- [Ebert2014] Ebert, L; Roscher, M. A; Wolter, M. (Schnellere Serienproduktion von Lithium-Ionen-Batterien): Schnellere Serienproduktion von Lithium-Ionen-Batterien. In: *ATZ Automobiltech Z*, Jg. 116, 2014, Nr. 4, S. 60-63
- [Ellingsen2014] Ellingsen, L. A.-W; Majeau-Bettez, G; Singh, B; Srivastava, A. K; Valøen, L. O; Strømman, A. H. (2014). Life Cycle Assessment of a Lithium-Ion Battery Vehicle Pack.. In: *Journal of Industrial Ecology*, Jg. 18, 2014, Nr. 1, S. 113–124
- [Fischhaber2016] Fischhaber, S., Regett, A., Schuster, S., Hesse, H., „Studie: Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen“ (2016); Hrsg. Begleit und Wirkungsforschung Schaufenster Elektromobilität (BuW); Ergebnispaper 18, Frankfurt
- [Fleischer2017] Fleischer, J. (Challenges of high quality and high performance cell stacking): Challenges of high quality and high performance cell stacking. Mainz, 2017
- [Foreman2017] Foreman, E; Zakri, W; Hossein Sanatimoghaddam, M; Modjtahedi, A; Pathak, S; Kash-kooli, A. G; Garafolo, N. G; Farhad, S. (A Review of Inactive Materials and Components of Flexible LIB): A Review of Inactive Materials and Components of Flexible Lithium-Ion Batteries. In: *Adv. Sustainable Syst.*, Jg. 1, 2017, Nr. 11, S. 1700061
- [FraunhoferISI2023a] Fraunhofer ISI CellDB, Fraunhofer ISI 2023, Die Datenbank umfasst die weltweit bestehenden und angekündigten Zellproduktionskapazitäten (GWh/a), unterschieden nach Unternehmen, Zellformat und Standort. Die Datenbank ist mit einem Prognosemodell verknüpft, das potenzielle zukünftige Produktionskapazitäten auf der Grundlage des Unternehmens, welche die Ankündigung gemacht hat, und des in der Ankündigung vorgeschlagenen Zeitrahmens klassifiziert.
- [FraunhoferISI2023b] MetaMarktMonitoring LIB, Fraunhofer ISI 2023, Das MetaMarktMonitoring ist eine Integration und Meta-Analyse von Marktanalysten, Datenquellen, sowie Fraunhofer ISI Batteriemarkt Modellen. Die genutzten Daten stammen beispielsweise von Avicenne, BNEF, Takeshita B3, Benchmark Minerals, Yole, F&S, SNE, Yano, P3, UBS, FEV, Syrah, Roland Berger, Wood Mackenzie, IEA sowie aus vielen weiteren Quellen.
- [FraunhoferISI2023c] <https://www.batterydesign.net/byd-blade/> und <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/building-better-batteries-insights-on-chemistry-and-design-from-china> (Stand März 2023)
- [FraunhoferISI2023d] <https://www.catl.com/en/news/958.html> (Stand März 2023)
- [Frankenberger2019] Frankenberger, M; Singh, M; Dinter, A; Jankowsky, S; Schmidt, A; Pettinger, K.-H. (2019). Laminated LIB with improved fast charging: Laminated Lithium Ion Batteries with improved fast charging capability. In: *Journal of Electroanalytical Chemistry*, Jg. 837, S. 151-158
- [greenBatt2022] Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme IKTS (2022). <https://www.greenbatt-cluster.de/de/>
- [Groenvelde1997] Groenvelde, P. (1997). Roadmapping Integrates Business and Technology. *Research-Technology Management*, Vol 40:5.
- [Gruhn2023] H. Gruhn; TU Clausthal - Symposium Materialtechnik, 2023 (befindet sich in Bearbeitung)
- [Günter2018] F. J. Günter, J. B. Habedank, D. Schreiner, T. Neuwirth, R. Gilles, G. Reinhart, 2019 „Introduction to Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Measurement Method for the Wetting Degree of Lithium-Ion Cells.“ *Journal of The Electrochemical Society*, 165 S. 3249-3256

- [Günther2019] F. J. Günter, S. Rössler, M. Schulz, W. Braunwarth, R. Gilles, G. Reinhart, 2020, "Influence of the Cell Format on the Electrolyte Filling Process of Lithium-Ion Cells." *Energy Technology* 8 (2), S. 1709-1714
- [Günther2021] Günter, F.; Keilhofer, J.; Rauch, C.; Rössler, S.; Schulz, M.; Braunwarth, W.; Gilles, R.; Daub, R.; Reinhart, G. (Influence of pressure and temperature on the electrolyte filling of lithium-ion cells: Experiment, model and method) 2021
- [Harper2019] Harper, G; Sommerville, R.; Kendrick, E; et al. (2019) Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature* 575, 7781.
- [Heimes2014] Heimes, Heiner (2014): Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen in der Batterieproduktion. 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verlag (Edition Wissenschaft - Apprimus, Bd. 2014,41).
- [Heimes2019] Heimes et. al. Komponentenherstellung einer Lithium-Ionen Batteriezele, ISBN: 978-3-947920-06-8.
- [Heimes2021] Heimes, H; Kampker, A; Offermanns, C.; Kreisköther, K.; Kwade, A.; Doose, S.; Ahuis, M.; Michalowski, P.; Michaelis, S.; Rahimzei, E.; Brückner, S.; Rottnick, K. (Recycling von Lithium-Ionen-Batterien) 2021
- [Heimes2023a] Heimes, H; Kampker, A; Lienemann, C; Wennemar, S; Plocher, L.; Bockey, G.; Michaelis, S; Schütrumpf, J. (Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezele): Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezele. 4. Auflage, revidierte Ausgabe Aufl. Aachen: PEM der RWTH Aachen University, 2023
- [Heimes2023b] Heimes, H (2023) Produktion einer All-Solid-State-Batteriezele. 2. Auflage, PEM der RWTH Aachen und VDMA Eigendruck
- [Heins2017] Heins, T.-P. et al. Electrode resolved monitoring of the aging of large-scale lithium-ion cells by using electrochemical impedance spectroscopy, *ChemElectroChem*, Wiley-VCH Verlag Weinheim, 2017.
- [Hettesheimer2017] Hettesheimer, T; Thielmann, A; Neef, C; Möller, K.-C; Wolter, M; Lorentz, V; Gepp, M; Wenger, M; Prill, T; Zausch, J; Kitzler, P; Montnacher, J; Miller, M; Hagen, M; Franz, P; Tübke, J. Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität
- [Hitech2018] <https://hitech-campus.de/frugale-innovation/> Abruf 02.September 2018
- [Hoekstra2020] Hoekstra et. al. Vergleich der lebenslangen Treibhausgasemissionen von Elektroautos mit den Emissionen von Fahrzeugen mit Benzin- oder Dieselmotoren (Studie der grünen Bundestagsfraktion, keine ISBN vorhanden)
- [Hong2019] Hong, Y; Cheng, X.-L; Liu, G.-J; Hong, D.-S; He, S.-S; Wang, B.-J; Sun, X.-M; Peng, H.-S. (Production of Continuous Supercapacitor Fibers): One-step Production of Continuous Supercapacitor Fibers for a Flexible Power Textile. In: *Chin J Polym Sci*, Jg. 37, 2019, Nr.8, S. 737-743
- [Jansen2019] Jansen, T. Kandula, W., Blass, D.; Hartwig, S., Haselrieder, W., Dilger, K., Evaluation of the Separation Process for the Production of Electrode Sheets, *Energy Technology*, Vol. 8, 2020
- [Jansen2022] Jansen, T., Qualitätssicheres Laserschneiden in der Lithium-Ionen-Batterieproduktion, Dissertation, 978-3-8440-8482-5 (ISBN), 2022
- [Jinasena2021] Jinasena et. al., A Flexible Model for Benchmarking the Energy Usage of Automotive Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing. In *Batteries* (Vol. 7, Issue 1, p. 14). MDPI AG.
- [Just2018] Just, P. (Zerstörungsfreie Prüfung metallischer Überlappschweißverbindungen): Zerstörungsfreie Prüfung metallischer Überlappschweißverbindungen in Lithium-Ionen-Batterien mit Fokus auf die optisch angeregte Infrarotthermografie. Dissertation. Dresden, 2018
- [Kampker2014] Kampker, A., (Elektromobilproduktion): Elektromobilproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [Kampker2015a] Kampker, A., Deutskens, C., Heimes, H., Ordnung, M., Mäiser, E., & Michaelis, S. (2015). Der Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batteriezele. RWTH-WZL / VDMA, Aachen / Frankfurt.
- [Kampker2015b] Kampker, A., Deutskens, C., Heimes, H., Ordnung, M., Mäiser, E., & Michaelis, S. (2015). Der Montageprozess eines Batteriepacks. RWTH-WZL, Aachen / Frankfurt.
- [Kaschub2017] Kaschub, T. (2017). Batteriespeicher in Haushalten. unter Berücksichtigung von Photovoltaik, Elektrofahrzeugen und Nachfragesteuerung Karlsruhe, 2017
- [Knoche2016] Knoche, T; Sureka, F.; Reinhart, G.; A process model for the electrolyte filling of lithium-ion batteries, In: *Procedia CIRP* 41 (2016) 405-410
- [KontiBAT] TU Berlin (KontiBAT - Hochdurchsatz-Batteriestapelbildung): KontiBAT - Hochdurchsatz-Batteriestapelbildung. <https://www.tu.berlin/hamster/forschung/projekte/kontibat-hochdurchsatz-batteriestapelbildung-abgeschlossen>. Abruf 11.03.2023

- [Korthauer2013] Korthauer, R. (Hrsg.). (2014). Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer Berlin Heidelberg, 2013
- [Kölmel2014] Kölmel, A; Sauer, A; Lanza, G.(2014). Quality-oriented Production Planning of Battery Assembly Systems for Electric Mobility. In: Procedia CIRP, Jg. 23, 2014, S. 149–154
- [Kurfer2012] Kurfer, J; Westermeier, M; Tammer, C; Reinhart, G. (Production of large-area lithium-ion cells): Production of large-area lithium-ion cells – Preconditioning, cell stacking and quality assurance. In: CIRP Annals, Jg.61, 2012, Nr. 1, S. 1-4
- [Kwade2018a] Kwade, A; Diekmann, J. (Hrsg.) (2018). Recycling of Lithium-Ion Batteries. The LithoRec Way. Sustainable Production, Life Cycle Engineering and Management, Cham: Springer International Publishing, 2018
- [Kwade2018b] Kwade, A; Haselrieder, W; Leithoff, R; Modlinger, A; Dietrich, F; Droeder, K.(2018). Current status and challenges for automotive battery production technologies. In: Nat. Energy, Jg. 3, 2018, Nr. 4, S. 290–300
- [Larsson2019] Larsson, H; Chamberlain, A; Walin, S; Schouri, S; Nilsson, L; Myrsell, E; Vasquez, D. (Welding methods for electrical connections): Welding methods for electrical connections in battery systems. Uppsala, 2019
- [Leng2017] Leng, Y et al. Electrochemical Cycle-Life Characterization of High Energy Lithium-Ion Cells with Thick $\text{Li}(\text{Ni}_{0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2})\text{O}_2$ and Graphite Electrodes, J. Electrochem. Soc. 2017, 164, A1037-A1049
- [Li2017] Li, J., Du, Z., Ruther, R. E., AN, S. J., David, L. A., Hays, K., Wood, M., Phillip, N. D., Sheng, Y., Mao, C., Kalnaus, S., Daniel, C., & Wood, D. L., III. (2017). Toward Low-Cost, High-Energy Density, and High-Power Density Lithium-Ion Batteries. In JOM (Vol. 69, Issue 9, pp. 1484–1496). Springer Science and Business Media LLC.
- [LiB2015] Projekt: Roadmapping ‚Lithium Ionen Batterie LIB 2015‘, Webseite des Fraunhofer ISI, zuletzt abgerufen am 10.09.2016. Link: <http://isi.fraunhofer.de/isi-de/t/projekte/at-lib-2015-roadmapping.php>
- [Link2022] Steffen Link, Christoph Neef, Tim Wicke, Tim Hettesheimer, Marcel Diehl, Oliver Krätzig, Florian Degen, Franziska Klein, Patrik Fanz, Matthias Burgard, Ricardo Kleinert, Development perspectives for lithium-ion battery cell formats, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2022
- [Linke2017] Linke, P. (2017). Grundlagen zur Automatisierung. In: Heinrich, B; Linke, P; Glöckler, M. (Hrsg.): Grundlagen Automatisierung Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, S. 1–28
- [Löbberding2020] Löbberding, H. et al.; 2020; From Cell to Battery System in BEVs: Analysis of System Packing Efficiency and Cell Types; <https://doi.org/10.3390/wevj11040077>
- [Luetke2011] Luetke, M.; Franke, V.; Techel, A.; Himmer, T.; Klotzbach, U.; Wetzig, A.; Beyer, E. A Comparative Study on Cutting Electrodes for Batteries with Lasers. Phys. Procedia 2011, 12, 286–291.
- [Maiser2014] Maiser, E, Kampker, A, Thielmann, A.. et al. (2014), Roadmap Batterieproduktionsmittel 2030. Hg. V. VDMA Batterieproduktion
- [Maiser2015] Maiser, E. Kampker, A., et al. (2015), Batteriezellproduktion in Deutschland-Chancen für den Maschinen- und Anlagenbau. RWTH-WZL / VDMA, Aachen / Frankfurt.
- [Meyer2018] Meyer, K. (2018) Klimabilanz von Elektroautos, https://static.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf
- [Michaelis2016] Michaelis, S; Maiser, E; Kampker, A; Heimes, H; Lienemann, C; Wessel, S; Thielmann, A; Sauer, A; Hettesheimer, T. (2016). VDMA Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 Update. <https://battprod.vdma.org/documents/7411591/15357859/VDMA+Roadmap+Batterie-Produktionsmittel+2030+Update/b8c52edd-5c65-4d92-8290-09876153f30b>. Abruf 03.08.2018
- [Michaelis2018] Michaelis, S; Rahimzei, E; Kampker, A; Heimes, H; Lienemann, C; Offermanns, C; Kehrer, M; Thielmann, A; Hettesheimer, T; Neef, C; Kwade, A; Haselrieder, W; Rahlfs, S; Uerlich Roland; Bogner, N. (Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2018. 3 Aufl. Frankfurt am Main, 2018
- [Michaelis2020] Michaelis, S; Rahimzei, E; Kampker, A; Heimes, Offermanns, C; Locke, M; Löbberding, H; Wennemar, S; Thielmann, A; Hettesheimer, T; Neef, C; Kwade, A; Haselreder, W; Blömeke, S; Doose, S; von Drachenfels, N; Drees, R; Fröhlich, A; Gottschalk, L; Hoffmann, L; Kouli, M; Leithoff, R; Rahlfs, S; Rockert, J; Schmidt, L; Schoo, A; Thomitzek, M; Turetsky, A; Vysoudil, V (Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2020. 4 Aufl. Frankfurt am Main, 2018
- [Miedema2013] Miedema, J. H; Moll, H. C.. (2013). Lithium availability in the EU27 for battery-driven vehicles: The impact of recycling and substitution on the confrontation between supply and demand until 2050. In: Resources Policy, Jg. 38, 2013, Nr. 2, S. 204–211
- [Müller 2021] Müller, A; Aydemir, M; Boeselager, C; Ohlen, N.; Rahlfs, S; Leithoff, R.; Dröder, K.; Dietrich, F. (Simulation Based Approach for High-Throughput Stacking Processes in Battery Production): Processes 2021, 9, 1993, 2021

- [Neef2021] Neef, C. et. al. Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau; keine ISBN vorhanden
- [Neidhardt2022] Neidhardt, M.; Mas-Perio, J.; Schulz-Mönnighoff, M.; et al. (2022). Forecasting the Global Battery Material Flow: Analyzing the Break-Even Points at Which Secondary Battery Raw Materials Can Substitute Primary Materials in the Battery Production. *Applied Sciences*, 12, pp. 4790.
- [Nelson2019] Nelson, P. A.; Ahmed, S.; Gallagher, K. G.; Dees, D. W. (2019). Modeling the Performance and Cost of LIB: Modeling the Performance and Cost of Lithium-Ion Batteries for Electric-Drive Vehicles, Third Edition. Argonne National Laboratory
- [NPE2016] Nationale Plattform Elektromobilität. (2016), Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland, Berlin: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO).
- [Panasonic2015] Panasonic (2015). Panasonic and Tesla Sign Agreement for the Gigafactory. <https://web.archive.org/web/20150601001801/http://www2.panasonic.com:80/webapp/wcs/stores/servlet/prModelDetail?storeId=11301&catalogId=13251&itemId=709014&modelNo=Content07312014095955770&surfModel=Content07312014095955770>. Abruf 01.06.2018
- [Panda2018] Panda, S.K.; et al. (2018) Plug&Produce Integration of Components into OPC-UA based data-space, 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ET-FA)
- [Pelisson-Schecker2017] Pelisson-Schecker, A. (Zigzagging to the cell stack): Zigzagging to the cell stack. A novel, automated procedure for stacking optimises manu-facturing for lithium-ion battery cells. <https://www.kit-technology.de/en/technology-pro-posals/details/634/>. Abruf 01.04.2020
- [PEM2022] OptiPro – PEM forscht zur Digitalisierung der gesamten Prozesskette in der Zellfinalisierung <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Forschung/Projekte/~oggha/OptiPro/> Abruf 09.12.2022
- [Pettinger2013] Pettinger, K.-H. (Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen): Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 221-235
- [Pettinger2017] Pettinger, K.-H.; Dong, W. (2017). When Does the Operation of a Battery Become Environmentally Positive? In: *J. Electrochem. Soc.*, Jg. 164, 2017, Nr. 1, A6274-A6277
- [Phaal2003a] Phaal, R., Farrukh, C.J.P. and Probert, D.R. (2003). "Technology Roadmapping: linking technology resources to business objectives". Centre for Technology Management, University of Cambridge.
- [Phaal2003b] Phaal, R. (2003, Oktober 9). Vortragsfolien. UNIDO - Technology Foresight for Practitioners, Fast-start technology roadmapping. Centre for Technology Management, University of Cambridge.
- [Phaal2009] Phaal, R. P., & Probert, D.R. (2009). Technology Roadmapping: facilitating collaborative research strategy. Centre For Technology Management, University of Cambridge. Retrieved October 1, 2011, from <http://www.ifm.eng.cam.ac.uk/roadmapping/research/>
- [Pham2016] Pham, H et al., Understanding the interfacial phenomena of a 4.7 V and 55 °C Li-ion battery with Li-rich layered oxide cathode and graphite anode and its correlation to high-energy cycling performance; *Journal of Power Sources* 223, 2016, S.220-230
- [Radjou2014] Navi Radjou, Jaideep Prabhu: 4 CEOs Who Are Making Frugal Innovation Work. In: Harvard Business Review. 28. November 2014, abgerufen am 8. Oktober 2016
- [Recharge2021] Recharge aisbl (2021). Proposal for Batteries Regulation 2020/353 (COD), repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, RECHARGE statement to public consultation - 1 March 2021. https://rechargebatteries.org/wp-content/uploads/2021/03/Public-Consultation-Batteries-Regulation-2020-253-COD-repealing-Directive-2006-66-EC-RECHARGE_Advanced-Rechargeable-and-Lithium-Batteries-Value-Chain-Assessment.pdf
- [RolandBerger2019] Bernhardt, W. (2019). Battery recycling is a key market of the future: is it also an opportunity for Europe?. Roland Berger GmbH. <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/Battery-recycling-is-a-key-market-of-the-future-Is-it-also-an-opportunity-for.html>
- [Sakti2015] Sakti, A.; Michalek, J. J.; Fuchs, E. R.H.; Whitacre, J. F. (2015). A techno-economic analysis and optimization of Li-ion batteries for light-duty passenger vehicle electrification. In: *Journal of Power Sources*, Jg. 273, 2015, S. 966–980
- [Schmidt2015] Schmidt, P. (Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von LIB): Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium- Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen. Dissertation. München, 2015

- [Schmitt2008] Schmitt, R; Damm, E. (2008). Prüfen-und-Messen-im-Takt. In: QZ Qualität und Zuverlässigkeit, Jg. 53, 2008, Nr. 9, S. 57–59
- [Schmitz2014] Schmitz, P. (n.d.). Laserstrahlschneiden in der Batterieproduktion - Flexibler Beschnitt von Elektrodenfolien. Retrieved September 18, 2014, from bayern-Photonics: http://www.bayern-photonics.de/inhalte/news/14_q2/laserstrahlschneiden
- [Schmuck2018] Schmuck, R; Wagner, R; Hörpel, G; Placke, T; Winter, M. (2018) Performance and cost of materials for lithium-based rechargeable automotive batteries <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0107-2>.
- [Schneider2019] Schneider, S.; et al. (2019) Producing Cloud-Native: Smart Manufacturing Use Cases on Kubernetes, 2019 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN).
- [Schnell2016] Schnell, J; Reinhart, G. (2016). Quality Management for Battery Production: A Quality Gate Concept. In: Procedia CIRP, Jg. 57, 2016, S. 568–573
- [Schnell2019] Schnell, J. et. al. . Data mining in lithium-ion battery cell production, Journal of Power Sources, Volume 413, 2019, Pages 360-366, ISSN 0378-7753.
- [Schoo2023] Schoo, A.; Moschner, R.; Hülsmann, J.; Kwade, A. (2023) Coating Defects of Lithium-Ion Battery Electrodes and Their Inline Detection and Tracking. In: Batteries 2023, 9(2),
- [Schröder2016a] Schröder, R; Glodde, A; Aydemir, M; Seliger, G. (Increasing Productivity in Grasping Electrodes): Increasing Productivity in Grasping Electrodes in Lithium-ion Battery Manufacturing. In: Procedia CIRP, Jg. 57, 2016, S. 775-780
- [Schröder2016b] Schröder, R; Aydemir, M; Glodde, A; Seliger, G. (Design and Verification - Innovative Handling System): Design and Verification of an Innovative Handling System for Electrodes in Manufacturing Lithium-ion Battery Cells. In: Procedia CIRP, Jg. 50, 2016, S. 641–646
- [Schutzrecht2015] Schutzrecht (DE20131019071): DE20131019071 (15.11.2013). Baumeister, M; Haag, S; Fleischer, J.: Elektrodenanordnung, Verfahren zu ihrer Herstellung und elektrochemische Zelle
- [Schünemann2015] Schünemann, J.-H. (2015). Modell zur Bewertung der Herstellkosten von Lithiumionenbatteriezellen (IPAT-Schriftenreihe, 16), 1. Aufl. Aufl. Göttingen: Sierke, 2015. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015
- [Scientific Climate Systems 2020] Scientific Climate Systems (2020). Dry Room Performance for Lithium Batteries: Dry Room Performance for Lithium Batteries | Scientific Climate Systems. <https://www.scs-usa.com/dry-room-performance.html>.
- [Singer2020] Singer, R. (Gehäusetechnik für Lithium-Ionen Pouchzellen): Gehäusetechnik für Lithium-Ionen Pouchzellen: Tiefziehen von Aluminiumverbundfolie – Produktionstechnisches Labor. http://www.wbk.kit.edu/wbkintern/Forschung/Projekte/pro-duktionstechnischeslabor_de/?p=156. Abruf 05.05.2020
- [Sommerville2021] Sommerville, R.; Zhu, P.; Rajaeifar, M.; et al. (2021). A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes. Recycling, Conservation and Recycling, 165.
- [Stühm2014] Stühm, K; Tornow, A; Schmitt, J; Grunau, L; Dietrich, F; Dröder, K. (Gripper for Battery Electrodes - Bernoulli-principle): A Novel Gripper for Battery Electrodes based on the Bernoulli-principle with Integrated Ex-haust Air Compensation. In: Procedia CIRP, Jg. 23, 2014, S. 161-164
- [Thielmann2015a] Thielmann, A., Sauer, A. & Wietschel, M. (2015). Gesamt-Roadmap Lithium-Ionen-Batterien 2030. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- [Thielmann2015b] Thielmann, A., Sauer, A. & Wietschel, M. (2015). Gesamt-Roadmap Energiespeicher für die Elektromobilität 2030. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
- [Thielmann2015c] Thielmann, A., Sauer, A. & Wietschel, M. (2015). Gesamt-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.
- [Thielmann2017] Thielmann, A; Neef, C; Hettesheimer, T; Döscher, H; Wietschel, M; Tübke, J. (2017). Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien Karlsruhe, 2017
- [Thielmann2020a] Thielmann et al. 2020: Batterien für Elektroautos: Faktencheck und Handlungsbedarf (<https://www.isi.fraunhofer.de/de/presse/2020/presseinfo-02-Faktencheck-E-Autos.html>), Fraunhofer ISI 2020.
- [Thielmann2020b] Vortrag auf Dresdener AABC 2018/2019/2020: Axel Thielmann, The Emerging Battery Markets Beyond xEV, Fraunhofer ISI.

- [Thompson202] Thompson, D; Hartley, J.; Lambert, S.; et al. (2020). The importance of design in lithium ion battery recycling - a critical review. *Green Chemistry* 22, pp. 7585-7603, Royal Society of Chemistry.
- [Trechow2018] Trechow, P. (2018). Echtzeitüberwachung der Batterieproduktion erhöht Qualität - ingenieur.de. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/produktion/echtzeitueberwachung-batterieproduktion-erhoeht-qualitaet/>. Abruf 26.04.2018
- [VDMA-PV2010] VDMA Photovoltaic Equipment. (2010-2011). Series of four roadmapping workshops with five task forces involving research organisations, machine makers, producers, and integrators. <http://pv.vdma.org/>
- [VDMA-PV2018] VDMA Photovoltaic Equipment. (2018). International Technology Roadmap for Photovoltaik (ITRPV). www.itrpv.org
- [Voigt2018] Voigt, K.-I; Weber, J. Definition: Economies of Scale. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/economies-scale-36167>. Abruf 26.06.2018
- [von Horstig2022] von Horstig, M.-W.; Schoo, A.; Loellhoeffel, T.; Mayer, J. K., Kwade, A. (2022) A Perspective on Innovative Drying Methods for Energy-Efficient Solvent-Based Production of Lithium-Ion Battery Electrodes. In *Energy Technol.* 2200689.
- [Warner2014] Warner, J. (2014). Lithium-Ion Battery Packs for EVs. In: Pistoia, G. (Hrsg.): *Lithium-ion batteries: Advances and applications*, First edition Aufl. Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2014, S. 127–150
- [Weber2014] C. J. Weber, S. Geiger, S. Falusi, M. Roth in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, 2014, pp. 66-81
- [Weinmann2020] Weinmann, H. W; Fleischer, J. (Batterieforschung: Coil2Stack): Batterieforschung: Coil2Stack. *Formatflexible Zellstapelbildung ermöglicht individuelle Zellformate*, Karlsruhe, 2020 applications, First edition Aufl. Amsterdam, Boston, Heidelberg: Elsevier, 2014, S. 127–150
- [Westermeier2013] Westermeier, M; Reinhart, G; Zeilinger, T. (2013). Method for quality parameter identification and classification in battery cell production quality planning of complex production chains for battery cells: 2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC). 2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), 10/29/2013 - 10/30/2013: IEEE 2013 - 2013, S. 1–10
- [Weydanz2018] Reisenweber H, Gottschalk A, Schulz M, Knoche T, Reinhart G, Masuch M, Franke J, Gilles R, Visualization of electrolyte filling process and influence of vacuum during filling for hard case prismatic lithium ion cells by neutron imaging to optimize the production process, In: *Journal of Power Sources* 2018, S. 126 – 134
- [Wu 2019] Wu, T.; Wang, K.; Xiang, M.; Fu, Q.: *Progresses in Manufacturing Techniques of Lithium-Ion Battery Separators in China* *Journal of Chemistry* 2019
- [Xiaoyan2021] Xiaoyan, S., Leilei, M., & Jiantao, W. (2021). Effects of pre-charge temperatures on gas production and electrochemical performances of lithium-ion batteries. In L. Wang & V. Yepes (Eds.), *E3S Web of Conferences* (Vol. 248, p. 01040). EDP Sciences.
- [Yersak2022] Yersak et. al., Moisture Stability of Sulfide Solid-State Electrolytes. In *Frontiers in Energy Research* (Vol. 10). Frontiers Media SA
- [Yuan2021] Yuan, C., Cao, H., Shen, K., Deng, Y., Zeng, D., Dong, Y., and Hauschild, M. 2021. Water-based manufacturing of lithium ion battery for life cycle impact mitigation. *CIRP Annals* 70, 1, 25–28.
- [Zeschky2010] Marco Zeschky, Bastian Widenmayer, Oliver Gassmann (2011): *FRUGAL INNOVATION IN EMERGING MARKETS*. In: *Research-Technology Management*. Band 54, Nr. 4, S. 38–45
- [Zhang2019] Zhang, Z; Zhang, D; Lin, H; Chen, Y. (fiber-shaped supercapacitors with high energy density): Flexible fiber-shaped supercapacitors with high energy density based on self-twisted gra-phene fibers. In: *Journal of Power Sources*, Jg. 443, 2019, S.226

**Sind Sie auf der Suche nach starken Lösungen für die Batterieproduktion?
Möchten Sie eine Produktionslinie aufbauen oder halten Sie nach Prozess-
entwicklungspartnern Ausschau?**

**Die Übersicht der VDMA-Fachabteilung Batterieproduktion informiert dar-
über, welche Unternehmen welche Technologien entlang der Prozesskette
anbieten, und hilft Ihnen, die richtigen Partner zu finden.**

Batterieproduktion

Online Industry Guide

<https://vdma-branchenfuehrer.de/batterieproduktion>



**Nehmen Sie direkten Kontakt zu den Batterie-Expert*innen der Unterneh-
men auf. Durchsuchen Sie die Sparten innerhalb der Produktionskette nach
Ihren Bedürfnissen und finden Sie die passenden Betriebe.**

**Über eine Kontaktlistenfunktion können Sie anschließend die Kontaktan-
frage absenden.**

VDMA

Batterieproduktion

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1186

Fax +49 69 6603-2186

E-Mail jennifer.zienow@vdma.org

Internet <http://battprod.vdma.org>

<https://vdma.org/batterieproduktionsmittel>