

Batterieproduktion



Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030



Update 2020

**Sie suchen nach starken Lösungen für die Batterieproduktion?
Sie wollen eine Fertigungslinie aufbauen oder suchen Partner für die
Prozessentwicklung?**

**Unser Branchenführer gibt eine Übersicht, welche Firmen, welche
Technologien entlang der Prozesskette anbieten und hilft Ihnen, die
richtigen Partner zu finden.**



„Bild Branchenführer“



[VDMA Batterieproduktion: Branchenführer Schlüssel zur Batterieproduktion](#)

Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 Update 2020

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

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	20
Produktanforderungen und Spezifikationen	25
Performance-Parameter für Anwendungen der Elektromobilität	25
Performance-Parameter für stationäre Anwendungen	28
Anforderungen der Batteriehersteller	28
Kostenstruktur und Kostenentwicklung von LIB-Zellen	30
Kostendegression	35
Lösungsangebote des Maschinen- und Anlagenbaus	35
Kostendegression	37
Nachhaltigkeit	37
Qualitätssteigerung	38
Frugale Innovation vs. Volldigitalisierung	42
Herausforderungen und notwendige Technologiedurchbrüche	43
Red Brick Walls im Überblick	43
Grand Challenges	44
Red Brick Walls 2020 im Detail	45
Übersicht Technologiekapitel und mitwirkende Firmen	44
Technologiekapitel	54
Lithium-Ionen-Batterien von morgen – Wo geht die Reise hin?	135
Lithium-Ionen Technologien	135
Jenseits der Lithium-Ionen Technologie	137
Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	140
Schlussfolgerungen	140
Handlungsempfehlungen	142
Anhang	143

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 eine wettbewerbsfähige Zellfertigung. 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 Batterieproduktionsmittel 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 wichtigster Absatzmarkt. Der chinesische Maschinen- und Anlagenbau hat sich aus dem starken Heimatmarkt heraus zur Weltspitze entwickelt. Damit Europäische Produktions-

mittellieferanten hier erfolgreich partizipieren, müssen sie sich diesem Wettbewerb stellen. Dafür sollten in Europa Turnkey-Solutions stärker projektiert und die Industrie durch Maßnahmen und Projekte befähigt werden.

Die 2014 eingeführte Roadmapping-Methodik wurde beibehalten. Ausgangsbasis für das Update war die Bewertung der 2018 identifizierten, notwendigen Technologiedurchbrüche („Red Brick Walls“). Anschließend wurden die zukünftigen Anforderungen an den Batteriemaschinenbau aus heutiger Sicht diskutiert und Lösungsansätze des Maschinen- und Anlagenbaus formuliert. In insgesamt 14 Technologiekapiteln wurden Red Brick Walls identifiziert und entsprechend des aktuellen Stands der Technik diskutiert.

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) stellt eine der Grand Challenges dar. Weitere sind die **Qualitätssteigerung** und die **Nachhaltigkeit**. Qualität steht dabei sowohl für die Prozessstabilität wie auch für die Produktperformance.

Der in unserer Roadmap aufgezeigte Forschungsbedarf sollte gezielt durch Zusammenarbeit von Industriepartnern und Forschungsorganisationen angegangen werden. Das Thema Nachhaltigkeit gewinnt immer stärker an Bedeutung. Es gilt, die Reduzierung des CO₂-Fußabdruckes als übergeordnetes Ziel nicht aus den Augen zu verlieren. Zugang zur Serienfertigung ist nach wie vor essentiell, um Entwicklungen direkt in der Großserie qualifizieren und Referenzen gewinnen zu können. Es gilt eine positive Öffentlichkeit zu schaffen und Investitionen in die Batterieproduktion anzuregen. Um Erfolg in der Batteriefertigung zu haben, braucht es Mut und Risikobereitschaft.

Einleitung

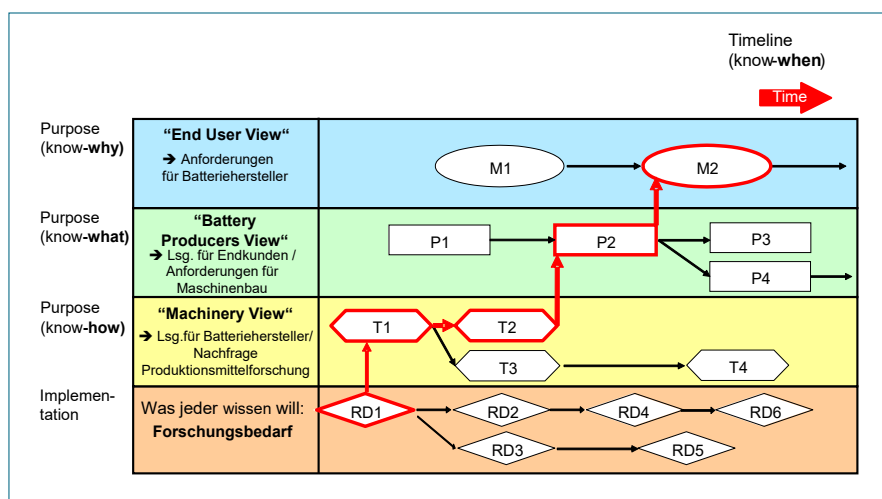
Roadmaps sind eine bewährte Methode, Klarheit zu schaffen: Sie liefern ein kohärentes Bild einer Zukunftsvision, repräsentieren im Idealfall Konsens über ein breites Industriefeld, dienen als Investment-Leitfaden. Sie fördern die vorwettbewerbliche Zusammenarbeit aller Akteure.

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 2020 wurden die Inhalte der Roadmap aus 2018 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 kann³.



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

³ Genau genommen beschreibt unser Roadmapping den im Meilensteindiagramm gezeigten Entwicklungspfad rückwärts

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 Industrien⁴. 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].

⁴ 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 abzeichnet⁵.

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

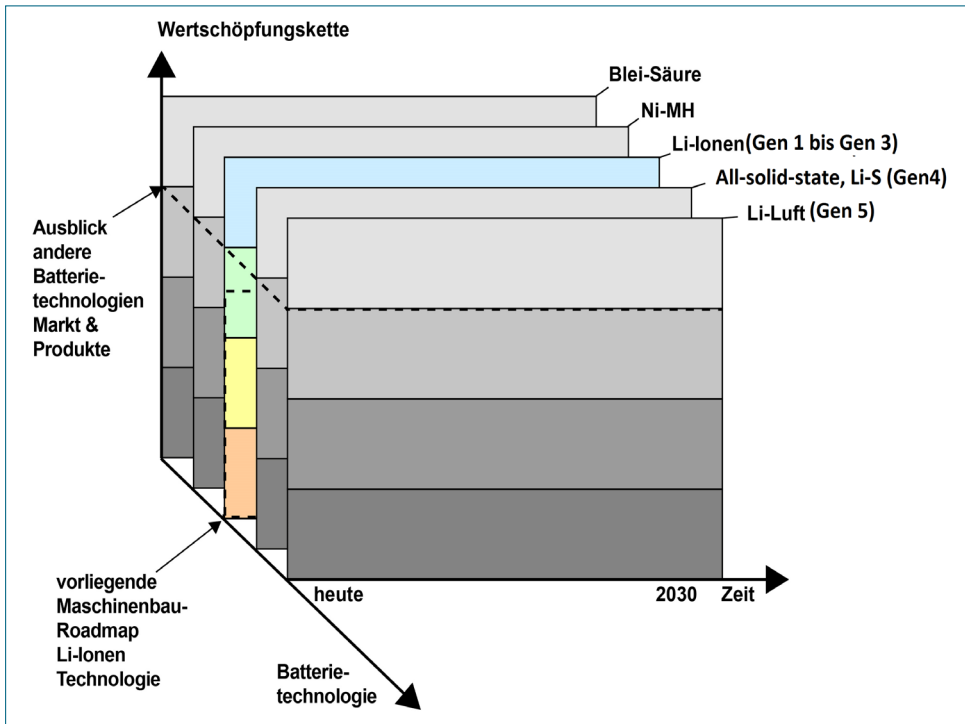
De facto ergibt sich im oben gezeigten Meilensteindiagramm für jede Batterietechnologie ein eigenes Diagramm. Damit wird die Roadmap „multidimensional“ (s. Abbildung) und es wäre zu komplex, die Produktionstechnik in der nötigen Tiefe zu diskutieren.

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.

Als Generation 4 werden die All-solid-state und die Lithium-Schwefel-(Li-S) Technologien bezeichnet. Die Generation 5 umfasst Technologien, die sich ggf. heute noch im Bereich der Grundlagenforschung befinden, jedoch zukünftig in die Anwendung gelangen könnten.

⁵ 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-Technologie der Generation 1 bis 3. Die Definition der Generationen erfolgte nach der Roadmap der damaligen Nationalen Plattform Elektromobilität. Quelle: VDMA

Diese Technologien der Generation 4 bis 5 befinden sich noch in der Entwicklung. In der Produktion wären für diese Generationen Änderungen erforderlich. Ausführliche Informationen sind im Prozessflyer All-Solid-State [Heimes 2018a] 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 Graphitanode Anwendung. Mit diesen Zelltypen lassen sich mittlere Zellspannungen von 3,6 bis 3,8 V erzielen. In industriellen Anwendungen oder stationären Speichern wer-

den darüber hinaus Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) Kathoden verwendet, welche jedoch eine niedrigere Zellspannungen von 3,1 V besitzen. 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: Verbesserungen können z.B. durch den Einsatz von Hochvolt-Kathoden oder Graphit-Silizium-Komposit-Anoden erzielt werden. Auch durch den potentiellen 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 alle zwei Jahre überarbeitet. Hierfür erfolgt im Rahmen eines Fragebogens und in anschließenden Workshops (die sowohl physisch wie auch virtuell stattfinden können) zunächst die Bewertung der bestehenden RBW. Folgende Kriterien werden dabei betrachtet: Stand heute, Relevanz für die Batteriehersteller, Aufwand-Nutzen Relation sowie der Zeithorizont zur Erreichung des jeweiligen Ziels. Zusätzlich können Kommentare und Anregungen ergänzt werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse im Plenum oder Webworkshops diskutiert.

2020 haben wir die zu den jeweiligen Technologien formulierten RBW weiter heruntergebrochen auf mehrere Herausforderungen. Dies ermöglichte eine tiefere Diskussion und Bewertung.

Um die Expertise unserer VDMA-Mitgliedsfirmen stärker zu nutzen, wurden in dem vorliegenden Update Themenpaten und weitere fachliche Unterstützer bereits in die Ausarbeitung jeweiligen Technologiekapiteln mit einbezogen.

Fazit: Die vorliegende Roadmap formuliert Lösungsangebote des europäischen 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 und 2018 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 [Thielmann2020a]. Die im Folgenden dokumentierten Daten wurden gegenüber der 2018 veröffentlichten Roadmap [Michaelis 2018] bis auf das Jahr 2020 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 nunmehr 30-jährige Entwicklung hinter sich. Diese wird unter intensiver Weiterentwicklung größerer zylindrischer Zellen (im Format 21700, sowie kürzlich von Tesla angekündigt 4680⁶), 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 [Hettesheimer 2017]. Es ist weiterhin davon auszugehen, dass die Lithium-Ionen Batterietechnologie in den kommenden 10 bis 20 Jahren zur vollständigen Reife entwickelt sein wird. Somit ergeben sich für die nächsten zwei Jahrzehnte noch große Entwicklungspotenziale dieser Technologie, die über die nächsten Jahre Schritt für Schritt optimiert werden wird.

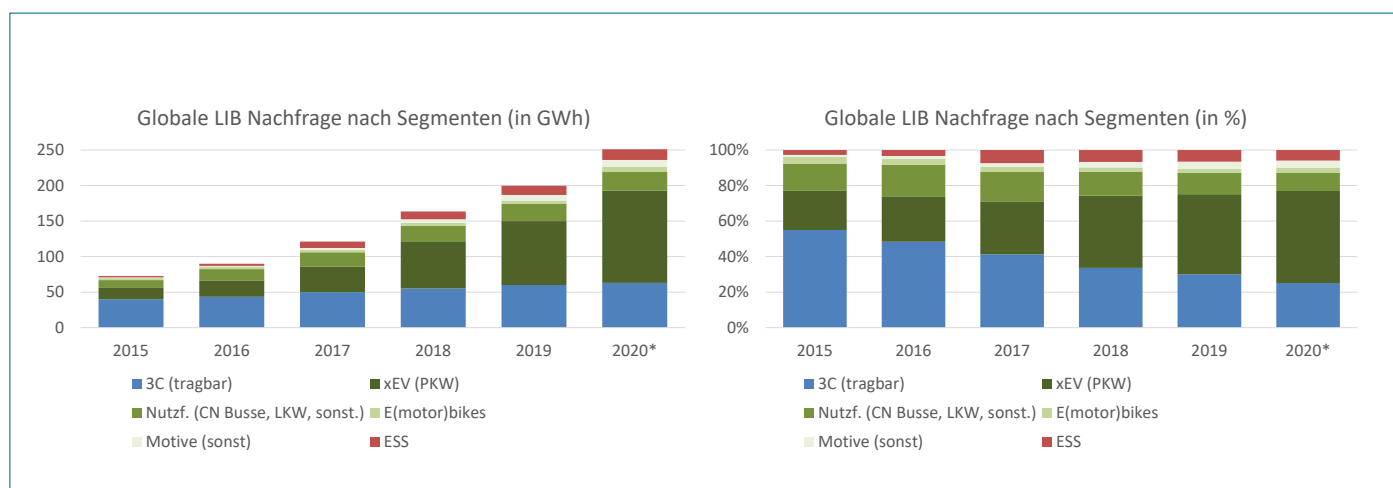
LIB-Zellen: Globale Nachfrage

Die globale Nachfrage nach LIB Zellen lag im Jahr 2019 bei rund 200 GWh. Etwa 126 GWh davon sind dem Bereich Elektromobilität⁷ zuzuschreiben und etwa 13 GWh dem Bereich der stationären Anwendungen. Im Bereich der portablen/ mobilen Anwendungen⁸ lag der LIB-Markt in 2019 bei rund 60 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 Anfang

⁶ Mit dem neuen zylindrischen Zellformat sollen die Batteriekosten um 50% 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/>

⁷ PKW, Nutzfahrzeuge, etc.

⁸ tragbar bzw. 3C-Konsum, Kommunikation, Computer



Globale LIB Nachfrage nach Segmenten (in GWh links und nach Marktanteilen rechts): Der 3C Markt umfasst kleinformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen (noch) bis zur Größe 18650. Die Nachfrage in diesem Segment ist in den weiteren Analysen nicht berücksichtigt, sondern nur die LIB Nachfrage in elektrifizierten und stationären Anwendungen. Dort werden großformatige Pouch und prismatische Zellen sowie zylindrische Zellen der Größe 21700 eingesetzt. Quelle: Fraunhofer ISI [auf Basis eigener Daten sowie verschiedener Marktstudien u.a. Avicenne2020, Takeshita2020].

2020) mit durchschnittlich 25% jährlichem Wachstum entwickelt. Die größte Nachfrage und Dynamik ergeben sich dabei 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)

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 2019 stiegen die Verkaufszahlen von Elektroautos (PHEV und BEV) auf 2,2 Million (rd. 90 GWh). Anfang 2020 befanden sich bereits weltweit über 7,5 Mio. E-PKW auf den Straßen. Im ersten Halbjahr 2020 brach die Produktion der E-PKW auf Grund der Corona-Pandemie gegenüber 2019 um rd. 15 Prozent ein. Seit Juli 2020 erholt sich diese jedoch und es werden deutlich mehr E-PKW als im Vorjahreszeitraum

produziert. In 2020 könnten die Verkaufszahlen auf 2,8-3 Millionen BEV/PHEV ansteigen und damit zu einer Nachfrage von über 130-150 GWh führen (insgesamt 220-250 globale LIB Nachfrage).

Der Markt für LIB durch BEV ist aus der Sicht der Zellnachfrageentwicklung der mit Abstand wichtigste. Die Terawattstunden (TWh)-Grenze der LIB-Zellnachfrage für Elektrofahrzeuge insgesamt könnte bei einer optimistischen Entwicklung der Elektromobilität bereits bis 2025 erreicht werden [Thielmann 2017, Thielmann 2020b⁹].

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. Die Spannbreite, der in Nutzfahrzeugen verbauten Batterien kann zwischen 50 kWh bis über 400 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 derzeit im **chinesischen** Markt eingesetzt. 2019 lag die Nachfrage bei etwa 24-

⁹ AABC 2018/2019/2020: Axel Thielmann, The Emerging Battery Markets Beyond xEV, Fraunhofer ISI.

29 GWh.¹⁰ Bei diesem Trend dürfte der chinesische Markt innerhalb der kommenden Jahre völlig auf Elektrobusse umgestellt sein. Marktprognosen sehen eine dauerhafte jährliche Nachfrage in der Größenordnung von 100.000-300.000 Elektrobusen in China (10-30 GWh). Jedoch zeigen die durch die chinesische Regierung gekürzten Subventionen für die Hersteller von Elektrofahrzeugen, dass weder die Dynamik noch Stabilität dieser Marktnachfrage in den nächsten Jahren als sicher gilt.

Außerhalb Chinas liegt der Absatz von E-Nutzfahrzeugen wie Lieferwägen, Postwägen, Mülltransporter, LKW, etc. bei rd. 100.000 und führt zu einer Nachfrage von wenigen GWh. Die Dynamik dürfte sich in den kommenden Jahren deutlich erhöhen.

Mittlerweile steigt auch in anderen Ländern die Nachfrage und damit die Aussicht auf eine Verbreitung der Elektromobilität mit leichten und schwereren Nutzfahrzeugen. Eine Chance insbesondere für chinesische Zellhersteller wie BYD, CATL, etc. auf Märkten außerhalb Chinas zu expandieren.

Die Nachfrage für elektrisch betriebene **Zweiräder (E-Bikes)** mit LIB Zellen betrug 2019 über 10 Mio. (rd. 5 GWh). [Thielmann2020b¹¹]. Für **E-Scooter und E-Motorbikes** liegen die Verkaufszahlen mit rd. 50.000 (1-1,5 GWh) derzeit noch weit 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 [Thielmann2017, Thielmann 2020a]. 2019 lag die globale Nachfrage auf dem Level von 10 GWh mit Wachstumsraten zwischen 15 und 30 Prozent.

Der Markt ist vielfältig bzgl. der Anwendungen von off-Grid bis on-Grid Anwendungen¹² [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 Kostentwicklung der LIB unter Druck gesetzt oder gar verdrängt werden [Thielmann2015a].

¹⁰ Die untere Zahl gilt jeweils nur für CN E-Busse, die obere für CN E-Busse und Nutzfahrzeuge.

¹¹ AABC 2020: Axel Thielmann, The Emerging Battery Markets Beyond xEV, Fraunhofer ISI.

¹² USV, Insellösungen, Netzstabilisierung, PV-Heimspeicher, PV- & Wind-Parks für die Direktvermarktung erneuerbarer Energien, Eigenbedarfsoptimierung, etc

Die Entwicklung von Second-life Geschäftsmodellen kann zukünftig aber auch zu einer Abflachung der Nachfrage führen. Mit der Netz-anbindung (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 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 1200-1500 €/kWh.¹³

LIB Angebot: Produktionskapazitäten

Um zuverlässig aussagen zu können, wie gut Produzenten diese 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 könnten demnach 360 bis 730 GWh aufgebaut werden.¹⁴ In den nächsten Jahren wird ein Zubau von jährlich durchschnittlich 100-300 GWh erwartet (siehe Tabelle Seite 17). Ab 2025 voraussichtlich noch höher.

Gegenüberstellung von LIB Nachfrage und Angebot: Die umfassende Betrachtung

In Fortführung der Gegenüberstellung von LIB-Produktionskapazitäten und LIB-Nachfrage [Michaelis2016, Thielmann2017, Michaelis 2018] stellen wir in der Abbildung auf S.14 die bis Stand Oktober 2020 angekündigten Zellproduktionskapazitäten der globalen LIB Nachfrage gegenüber.

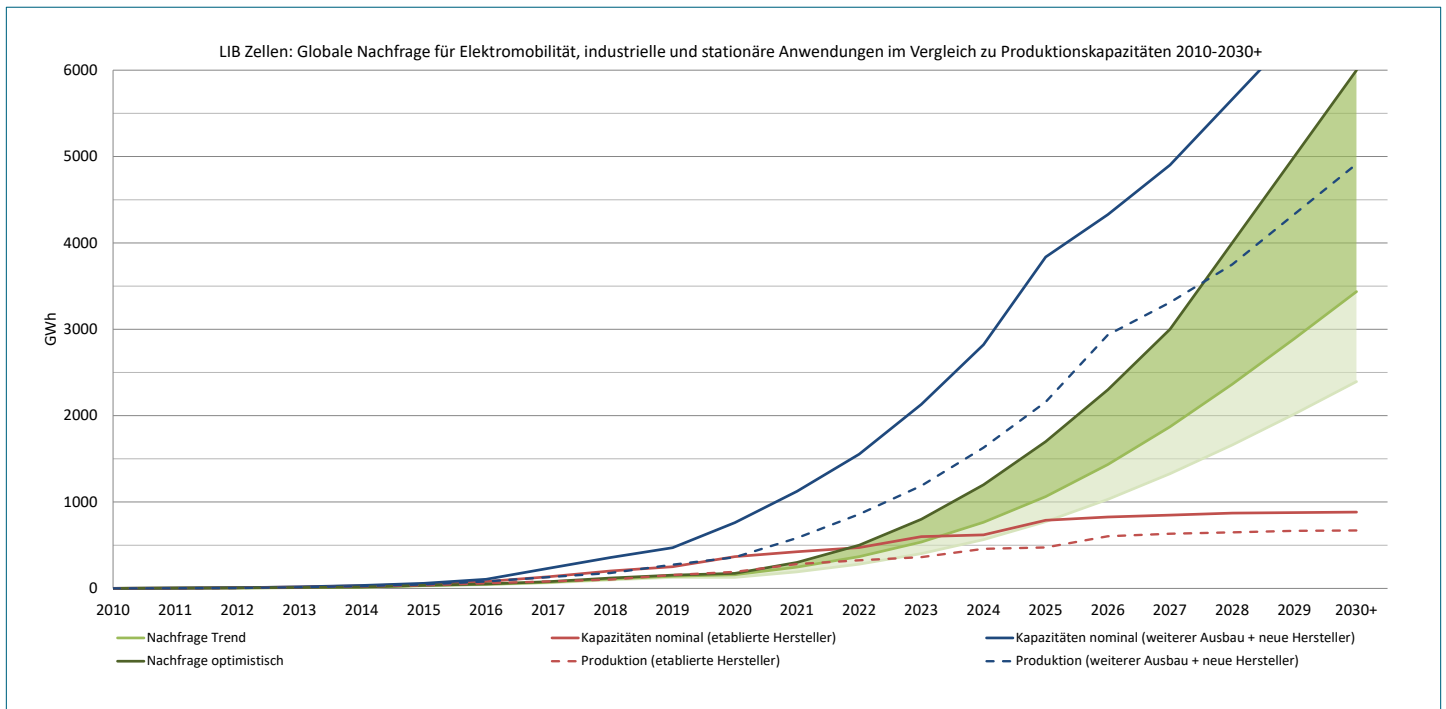
Bei der Nachfrage müssen im Idealfall nicht nur die tatsächlich verbauten Einheiten, sondern auch der **Lagerbestand** in Fabriken oder beim Kunden berücksichtigt werden. Bei einem Überangebot bleiben die Lager beim Kunden leer und es wird spät bestellt. Bei einem Unterangebot wird oft mehr bestellt 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].

Zellen (18650 bis 21700). Die in den letzten Jahren von Panasonic durch Tesla verbauten 18650 Zellen sind also mitberücksichtigt. Nicht berücksichtigt sind kleinformatige Pouch und prismatische sowie zylindrische Zellen für 3C Anwendungen.

¹³ vgl. CARMEN e.V. 2020: <https://www.carmen-ev.de/sonne-wind-co/stromspeicher/batterien/813-marktuebersicht-fuer-batteriespeichersysteme>

¹⁴ Betrachtet werden Produktionskapazitäten für großformatige Pouch und prismatische Zellen sowie zylindrische



LIB-Zellen: Vergleich globale Nachfrage für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (ab 2020 Prognose, unter der LIB Nachfrage nicht berücksichtigt sind kleinformatische 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 auf Basis [Michaelis 2018].

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 Effekte¹⁵ realistischeren 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.

Die roten Linien zeigen den Ausbau von Produktionskapazitäten im Basisszenario¹⁶. Die blauen Linien zeigen den Ausbau bei Berücksichtigung von optionalen Erweiterungen von Fertigungen durch etablierte und neue Zellhersteller (neue Marktteilnehmer).

Die LIB Nachfrage (3C Anwendungen exklusive) wird von 2019 (rd. 140 GWh) auf 2020 (rd. 160-190 GWh) zunehmen. Die zwischen 2020 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 über 3 TWh (Trend Szenario, mittlere grüne Linie) ansteigen oder im optimistischen Szenario sogar über 6 TWh erreichen (langfristig kann mit über 10 TWh gerechnet werden¹⁷).

Die Produktionskapazitäten etablierter Zellhersteller (rote Linien) decken diese Nachfrage bestenfalls noch zwei Jahre und bei zunehmender Auslastung ggf. 4 Jahre. Zwischen 2020 und 2025 werden daher durch etablierte Zellhersteller weiter ausgebaut Produktionskapazitäten benötigt. Neue Zellhersteller befinden sich in den Jahren um 2025 im Hochlauf und im Wettbewerb mit etablierten Zellherstellern.

In der Tabelle S. 17 sind die für 2020 bis 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, minimale und maximale Werte angegeben.

¹⁵ 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.

¹⁶ Basisszenario: In Planung befindliche Produktionskapazitäten etablierter Zellhersteller

¹⁷ 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>

Den künftigen Ausbauplänen der führenden Zellhersteller CATL, BYD, Panasonic, Samsung SDI, LG Chem, SK Innovation stehen in 2020 zunehmend weitere Ankündigungen von Zellherstellern ebenso wie OEM gegenüber, welche nun ebenfalls in die Volumenproduktion einsteigen wollen. Solche etablierten Akteure aber auch neue Marktakteure zielen in den kommenden Jahren insbesondere auf den wachsenden Markt in Europa ab.

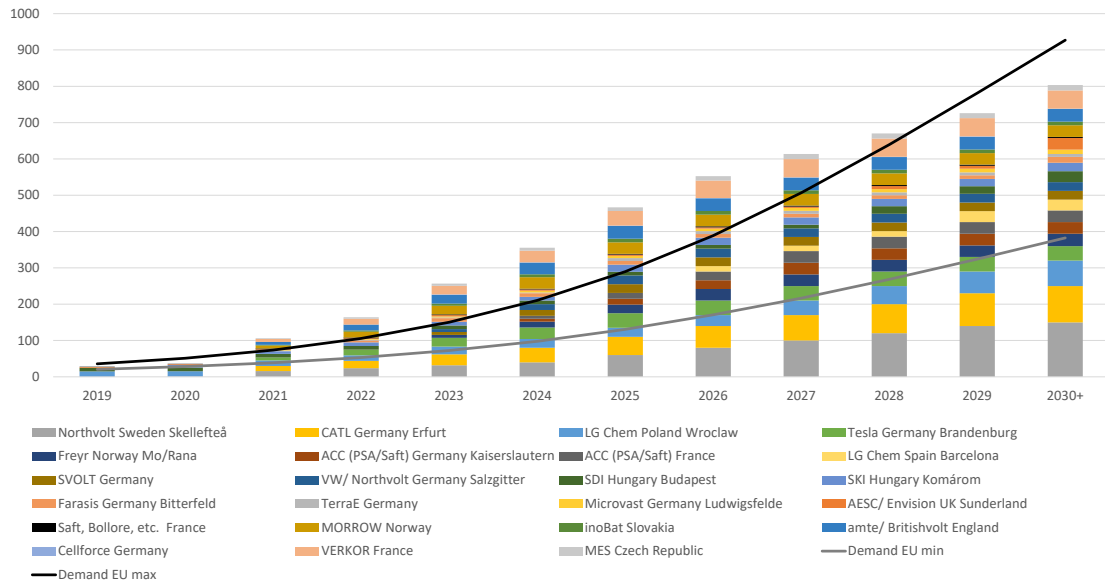
Die angekündigten Zellfabriken sollen in der Regel Größen zwischen 10-30 GWh erreichen. Einige Zellhersteller visieren bis 50 GWh Zellfabriken an. Die Pläne von Tesla mit dem neuen zylindrischen 4680 Format in die eigene Zellproduktion einzusteigen reichen bis zu 3 TWh bis 2030 und sollen mit kleineren flexibleren Zellproduktionen erreicht werden.

Somit rechnet Elon Musk offensichtlich mit einem Batteriemarkt, welcher jenseits 2030 den 10 TWh Bereich erreichen dürfte. Bereits in den letzten Jahren (2017-2019) hatte Tesla mit dem Verkauf der E-PKW eine rd. 30% Nachfrage bei den in E-Autos eingesetzten Batteriezellen erreicht. Unter der Annahme, dass Tesla diese Nachfrage auch in den kommenden 10 Jahren hält, wären die geplanten 3 TWh als realistische Extrapolation einzustufen. Den heute weiteren angekündigten Produktionskapazitäten von 3 TWh jenseits Tesla dürften dann bis 2030+ (also für die Jahre ab 2030) weitere Ankündigungen bis zu 4 TWh folgen. Tatsächlich hat CATL hat im Jahr 2020 einen Ausbau der Kapazitäten auf 1,2 TWh bis 2025 angekündigt, welche bis 2030 im Fall einer Realisierung noch weiter steigen dürften. Bis Ende 2020 summieren sich die globalen Ankündigungen damit auf rund 7,3 TWh bis 2030+ (siehe Abbildung S. 14 und Tabelle S. 17).

Zellhersteller	Firmensitz	Produktionsstandort	2020 (min)	2020 (max)	2025 (min)	2025 (max)	2030+ (max)	2030+ (max)
BAK Battery	China	China	8	15	15	20	15	20,5
Beijing Linkdata Technologies	China	China	0,2	0,2	0,2	18	0,2	24,1
BPP (Beijing Pride Power) to BAIC	China	China	0,31	7	0,31	7	0,31	7
BYD	China	China	24	60	30	70	30	110
BYD	China	Europe						
BYD & Changan (JV)	China	China	5	6	10	15,7	10	20,5
CALB (China Aviation Lithium Battery)	China	China	6	13,5	6	200	6	200
CATL	China	China	40	110	50	380	50	380
CATL	China	Germany			50	450	60	450
CATL	China	Indonesia, Japan, USA				370		370
CENAT	China	China	1	5	1	5	1	5
CNM Power	China	China	3	15	3	15	3	15
Coslight	China	China	5,25	12,5	5,25	12,5	5,25	12,5
DFD	China	China	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9	1,9
Dongfeng Amperex (JV CATL & Dongfeng)	China	China	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6	9,6
Dynavolt	China	China		25		25		25
etrust	China	China	0	4	0	7	0	7
EVE	China	China	9	13	9	13	9	15
Evergrande	China	China			30	100	60	500
Funeng Technology	China	China		10	0	24	0	36
Great Power	China	China	0,4	10	0,4	10	0,4	13,5
Guoneng	China	China	4	20	4	20	4	20
Guoxuan High-Tech	China	China	17	28	23	100	23	100
Lishen	China	China	17	20	25	70	25	70
Lithium Werks	China	China		0,1		3		9
Narada	China	China	2	2,5	2	2,5	2	2,5
National Battery Tech, Beijing	China	China	11,2	25,2	11,2	25,2	11,2	25,2
OPTIMUM	China	China	18	36	22	36	22	36
Phyllion	China	China	3	3	3	3	3	3
SK & EVE	China/ Korea	China			20	25	20	25
SVOLT	China	Germany			24	24	24	24
SVOLT/ Great Wall	China	China		4		18		24,2
Tianneng	China	China	1,5	11	1,5	11	1,5	11
Vision	China	China				20		30
Wanxiang (A123)	China	China	5	10	80	80	80	80
Wina Battery	China	China	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2	2,2
Zhihang Jiangsu New Energy	China	China	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
時代上汽動力電池 (JV of CATL and SAIC)	China	China	18	18	18	50	18	50
China (andere)	China	China	6,9	37,4	6,9	37,4	6,9	37,4
LG Chem 1	Korea	Korea	18	18	18	20	18	21,3
LG Chem 2	Korea	China	8	20	8	45	8	62,9
LG Chem 3	Korea	USA	3	5	3	18	3	26
LG Chem 4	Korea	Poland	5	15	15	25	15	70
LG Chem 5	Korea	China	0	8	0	32	0	32
LG Chem 6	Korea	Spain	0		0	0	0	30
Samsung SDI 1	Korea	Korea	5	5	5	20,8	5	24,1
Samsung SDI 2	Korea	China	4	5,6	4	24,1	4	28,8
Samsung SDI 3	Korea	Hungary	2,5	2,5	2,5	10	2,5	30
SK Innovation 1	Korea	Korea	3,9	10	10	15	10	15
SK Innovation 2	Korea	Hungary	7,5	7,5	10	20	10	23,5
SK Innovation 3	Korea	China	7,5	7,5	10	20	10	20
SK Innovation 4	Korea	USA			25	45	45	45
Korea (andere)	Korea	Korea	1	1	1	1	1	1
AESC	Japan	China		20	7,5	20	18	20
AESC	Japan	Japan	2,2	3,3	2,2	3,3	2,2	3,3
AESC / Envision	Japan / China	USA	4	4	4	4,5	4	9,62
AESC / Envision	Japan / China	UK	2	2	2	3,44	2	32
GS Yuasa	Japan	Europe						
Lithium Energy Japan/ GS Yuasa	Japan	Japan	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	4,7
Panasonic	Japan	China	2,3	6	2,3	8,9	2,3	22,6
Panasonic - Tesla 1	Japan	USA	35	35	39	105	39	150
Panasonic - Tesla 3	Japan	China				35		35
Panasonic (18650)	Japan	Japan	7	10,1	7	19,6	7	19,6
Panasonic (large format)	Japan	Japan	1	4,2	1	16,3	1	37,8
Panasonic /Toyota JV: Prime Planet	Japan	Japan			1	10	1	10
Toshiba	Japan	India		1		1		1
Japan (andere)	Japan	India	1	1	1	1	1	1
Boston Energy	USA	Australia		3		15		15
Boston Energy	USA	USA		3		15		15
Boston Power	USA	China		11		11		11
JCI	USA	USA	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
Tesla 4	USA	Germany				40		40
Microvast	USA	China	2	15	2	15	2	15
Farasis	USA	China	5	8	5	32	5	32
Farasis	USA	USA			10	10	10	10
Farasis	USA	Germany			10	10	10	16
Microvast	USA	Germany			6	6	6	12
Tesla X	USA	World				500		3000
USA (andere)	USA		1	1	1	1	1	1
Energy Absolute	Thailand	Thailand		1		25		50
Energy Renaissance	Australia	Australia		1		1		1
Exide & LeClanche (JV)	India	India		1	1	5	1	5
Foxconn	Taiwan	China				15		15
LIBCOIN/ Magnis	India	India		1		30		30
Reliance	India	India				25		25
ACC (PSA/Saft)	France	Germany			16	16	32	32
ACC (PSA/Saft)	France	France			16	16	32	32
amte/Britishvolt	UK	UK				35		35
Cellforce	Germany	Germany				1		1
Freyr	Norway	Norway			32	24	32	34
inoBat	Slovakia	Slovakia				10		10
MES	Czech Republic	Czech Republic				10		15
MORROW	Norway	Norway				32		32
Northvolt	Sweden	Sweden		0,5	32	60	33,6	150
TerraE	Germany	Germany				8		8
VERKOR	France	France				40		50
VW/ Northvolt	Germany	Germany			16	24	24	24
EU andere: Saft, Bolloré, LeClanche, etc.	Europe	Europe	2	2	2	3	2	4
Welt gesamt			357	782	799	3847	912	7273

LIB-Zellproduktionskapazitäten in GWh für elektromobile, industrielle und stationäre Anwendungen (großformatige Pouch, prismatische und zylindrische Zellen der Größe 18650/21700) in 2020 und Ausbau-Ankündigungen etablierter und neuer Hersteller bis 2025 und 2030+ nach Zellherstellern, deren Sitz und Standorten der Zellproduktion; Basiszenario (min) der heute vorhandenen und geplanten bekannten Produktionskapazitäten; Hersteller <1 GWh Zellproduktion sind unter „andere“ aufsummiert und nach Ländern gelistet. Es wurden teilweise Annahmen bei der Verteilung der Kapazitäten auf Länder getroffen wie z.B. für CATL. Quelle: Datenbank des Fraunhofer ISI.

Angekündigte LIB Zellproduktion in Europa nach Herstellern
(in GWh, max Ankündigungen Stand: 10/2020)



Mit den jüngsten Erweiterungsplänen von CATL (in der Abbildung nicht dargestellt) könnten die Produktionskapazitäten bis über 2030+ deutlich über 1 TWh liegen.
Quelle: Fraunhofer ISI.

Hotspot Europa

Der Bedarf nach LIB Zellen in Europa könnte bis 2025 bei 150 bis 300 GWh liegen (konservatives bis optimistisches Szenario) und bis 2030 bei 400-1000 GWh. Die Ausbaupläne durch asiatische und europäische Zellhersteller reichen bis nach 2025 an 500 GWh und bis 2030 an 800 GWh heran. Mit der Produktion von zylindrischen Zellen (z.B. Northvolt) werden zudem Wachstumsmärkte jenseits des Automotive-Marktes adressiert (z.B. Power Tools, e-Bikes.).

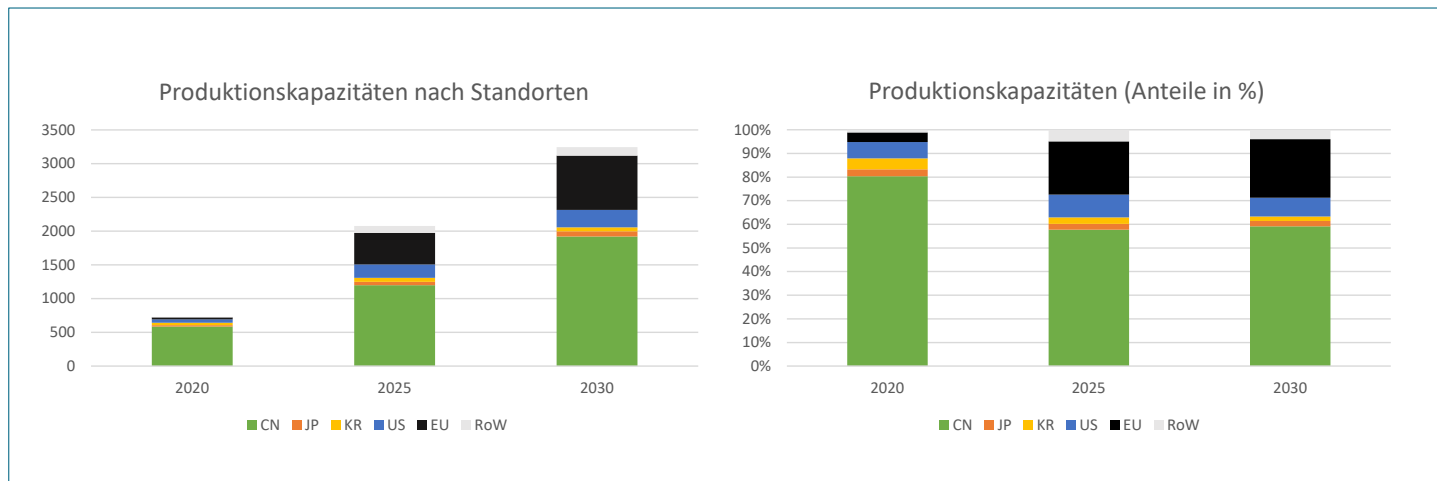
Europa folgt aktuell dem bisherigen Hotspot China durch die schnell anwachsende Nachfrage nach Elektromobilität und damit LIB-Zellen. In den kommenden Jahren soll in Europa eine vergleichbare Zellproduktionskapazität aufgebaut werden, wie sie in China in den letzten Jahren entstanden ist und weiter ausgebaut wird.

Die Anteile von rd. 80 Prozent an der globalen Produktionskapazität wie sie heute am Standort China stehen, dürften somit in den kommenden Jahren wieder unter die 50-60 Prozent fallen.

Die Standorte USA, Europa und weitere Länder werden ab 2025 bis 2030 entsprechende Produktionskapazitäten aufbauen - allerdings

auch aus der Hand chinesischer Unternehmen wie CATL, BYD genauso wie der etablierten koreanischen und japanischen Hersteller.

Das in der Abbildung S.16 für die Europäischen Ankündigungen gezeigte Szenario (Balken) geht davon aus, dass alle angekündigten Kapazitäten realisiert werden. Im chinesischen Markt ist davon auszugehen, dass sich die Anzahl der auf über 100 geschätzten Zellhersteller in den nächsten Jahren wieder konsolidieren wird bzw. nicht alle es schaffen werden in die Volumenproduktion einzusteigen. Auch in Europa dürften es nicht alle Hersteller schaffen in dem hochkompetitiven Markt Fuß zu fassen und sich in der Volumenproduktion zu etablieren. Die nun weltweit expandierenden asiatischen Unternehmen haben daher die besten Chancen, dass in heimischen Märkten erlernte Produktions-Know-how in Exportmärkte umzusetzen. Die Qualität chinesischer Zellen wird heute bereits gleichauf mit der von japanischen und koreanischen Zellen gesehen. Europäische Unternehmen müssen also preislich mithalten können oder ein Alleinstellungsmerkmal aufweisen.



Globale Nachfrage in GWh nach Standorten (links) und % Anteile Produktionskapazitäten nach Land der Hersteller (rechts). Hier exklusive der 3TWh Ankündigung durch Tesla bis 2030 und 1,2 TWh Ankündigung durch CATL bis 2025, da die Standortaufteilung heute noch spekulativ wäre, Quelle: Fraunhofer ISI

Was muss ein Standort liefern, um geeignet zu sein?

Die obige Abbildung zeigt, dass neben CATL als chinesischem Hersteller, besonders koreanische Zellhersteller zunehmend Standorte in Europa (sowie den USA) aufbauen. Panasonic als japanischer Hersteller expandiert derzeit noch mit Tesla sowie im chinesischen Markt und folgt damit dem Ort der Nachfrage (d.h. den Standorten der OEM).

Chinesische Hersteller bedienen in erster Linie dem enormen und wachsenden Binnenmarkt, versuchen aber in zweiter Linie, auch in Europa Fuß zu fassen. Nach CATL dürften schließlich auch BYD und weitere Hersteller aus China folgen (z.B. SVOLT).

Zwischen 2020 und 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.
- 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 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.

Der Standort Deutschland dürfte für einige der Zellhersteller aufgrund der Kombination mehrerer Faktoren entscheiden gewesen sein: Energiemix, Nähe zu OEM sowie der Zugang zu Fachkräften. Aber auch Standorte in mehreren Europäischen Ländern gewinnen mit der wachsenden Nachfrage durch die OEM an Bedeutung (z.B. Frankreich, Spanien).

Zellformate: Vor- und Nachteile der einzelnen Formate

Gegenüberstellung der Zellformate

Die Applikationen der Lithium-Ionen-Zellen erstrecken sich in der Praxis von der Unterhaltungselektronik bis hin zu Anwendungen in Nutzfahrzeugen und der Automobilindustrie. Die große Vielfalt in der Anwendung erzeugt auch eine hohe Varianz sowohl in der reinen Zellgröße als auch in den Zellformaten.

Generell lassen sich aktuell drei wesentliche Zellformate – die Pouch-Zelle, die zylindrische Zelle und die prismatische Zelle – unterscheiden, wie in Abbildung S.20 dargestellt. Für die Produktion der verschiedenen Zellformate sind grundsätzlich ähnliche Prozessschritte erforderlich. Es braucht jedoch eine genaue Abstimmung und Optimierung bestimmter Anlagen für entsprechende Zellformate. Ein wesentlicher Unterschied in der Herstellung ist, dass bei der zylindrischen Zelle die Elektroden und Separatoren gewickelt werden. Im Vergleich dazu werden die Komponenten bei der Pouch-Zelle in einem Stapelprozess zusammengebracht. Die Komponenten einer prismatischen Zelle können mittlerweile sowohl zu einem Flachwickel gewickelt als auch gestapelt werden.

Vorteil des Wickelns ist die hohe Prozessgeschwindigkeit. Ein Vorteil des Stapelns ist die im Vergleich bessere Raumausnutzung innerhalb der Zelle bei gleichzeitiger Materialschonung. Ein zentraler Nachteil des Stapelns ist eine wesentlich niedrigere Prozessgeschwindigkeit. Eine Prozessbeschleunigung kann durch einen zusätzlichen Prozessschritt, der direkten Lamination von Separator mit Elektrodenmaterial erfolgen, um diesen Verbund dann im Anschluss zu stapeln. So müssen weniger und steifere Objekte gestapelt werden, dass die mögliche Stapelgeschwindigkeit erhöht.

Aufgrund der Unterschiede der Zellformate lässt sich für eine Serienfertigung nahezu keine Flexi-

bilität in der Zellproduktion umsetzen. Zellhersteller müssen sich auf einer Linie in der Zellassemblierung auf ein bestimmtes Format festlegen.

Die **Energiedichte** ist einer der wichtigsten technischen Parameter des Energiespeichers in Mobilitätsanwendungen, da nur ein limitierter Bauraum im Fahrzeug zur Verfügung steht und das Gewicht ausschlaggebend für den späteren Energieverbrauch ist. Umso mehr Energie in der Traktionsbatterie gespeichert werden kann, desto größer ist die Reichweite des Fahrzeugs. Wesentlich ist hierbei unter anderem das Verhältnis zwischen den Aktiv- und Inaktivmaterialien der verschiedenen Zellformate auf Zell- und Modulebene. Aufgrund der Geometrie ist die volumetrische Energiedichte zylindrischer Zellen am höchsten, jedoch hat sich die Energiedichte großformatige Pouch-Zellen in den letzten Jahren der Energiedichte kleinformatiger Lithium-Ionen-Zellen angenähert bzw. eine ähnliche Energiedichte erreicht. Auf Modulebene verliert die zylindrische Zelle je nach Moduldesign aufgrund der Packungsdichte von Zylindern einen Teil ihres Vorteiles gegenüber der prismatischen und Pouch-Zelle. Die Energiedichte von prismatischen Zellen ist aufgrund des schwereren Gehäuses auf Zelllevel generell etwas niedriger.

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 Einsatzcharakteristika des Batteriesystems.

Die hohe Variantenvielfalt der Zellen muss auch in passenden Modulkonzepten adressiert werden. Hierbei ist es wichtig, zum Beispiel auch die Steifigkeit der Zellen zu nutzen. Die hohe **Steifigkeit** ist neben der Funktionsintegration sowohl für eine sichere Installation als auch für ein gutes Handling notwendig und demnach eine der Kernanforderungen der Automobilhersteller an die Zellen.

Die zylindrische Zelle ist hier aufgrund der höchsten Steifigkeit im Vorteil gegenüber den anderen Zellformaten, hat aber viel mehr Fügestellen und ist somit in der Modulmontage aufwendiger. Eine Verspannung in radialer Richtung ist aber nicht erforderlich, da kaum eine Volumenänderung auftritt [Warner2014]. Bei den Rundzellen hat sich das sogenannte 21700-Format im Gegensatz zu kleineren Formaten wie der 18650er Zelle im Automobilbereich durchgesetzt. Die Kapazität sowie die volumetrische Energiedichte der 21700er Zelle ist höher und die Integration der Zellen in das Batteriesystem ist einfacher. Daraus resultierte eine deutliche Kostenreduktion. Die prismatische Zelle eignet sich besonders gut aufgrund ihres Formats und ihrer Größe für die Fertigung von Modulen mit weniger Stützstruktur. Eine Verspannung ist zum Beispiel mittels eines Zugankers möglich. Die Pouch-Zelle ist durch ihre Folienhülle weniger steif und muss deswegen mit Hilfe eines Kunststoffrahmens positioniert werden.

Bei allen Zellformaten geht der Trend zu immer größeren Zellen, um mehr Energieinhalt und eine verbesserte Hochstromfähigkeit zu erreichen als neuestes Beispiel steht das neu vorgestellte Rundzellenformat 4680 von Tesla.¹⁸

¹⁸ <https://www.electrive.com/2020/09/23/tesla-battery-day-tabless-4680-cell-and-in-house-production/>

Dies mündet teilweise darin, so große Zellen zu fertigen, dass die Modulebene komplett wegfällt und von der Zell- direkt auf die Batteriepack-Ebene gegangen wird (siehe nachfolgender Abschnitt „Cell to Pack“).

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, weil sonst die Prozesse in der Zelle nicht überall gleich ablaufen können. Die Kühlung erfolgt typischerweise durch eine Flüssigkeitskühlung.

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 bei der Montage zum Modul wird hier auch vereinzelt eine günstige aber wenig performante Luftkühlung verwendet.

Die Pouch-Zelle ermöglicht eine gute Wärmeab- leitung über die Stromableiter sowie die Seiten der Zelle und bietet damit die beste Kühl- leistung, 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 Wärmeleit- fähigkeit, die diesen Nachteil zum Teil aus- gleichen kann. Eine Kühlung zwischen den einzelnen prismatischen Zellen ist ebenfalls ein mögliches Kühlkonzept. Die immer weiter steigenden Ladeströme, welche zu einer höheren Wärmeentwicklung führen, machen performantere Kühlsysteme immer notwendiger.

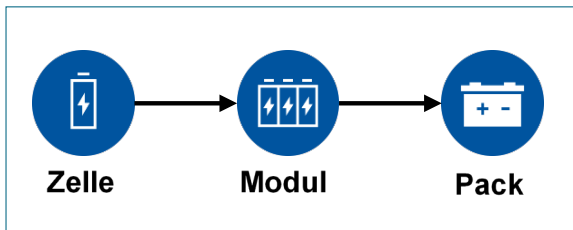
Die **Lebensdauer** kann über die Zellformate hin- weg nur schwer verglichen werden. Sie hängt stark von zusätzlichen Faktoren wie der Zellche- mie oder der Beanspruchung der Lithium-Ionen- Zelle ab. Die Lebensdauer der Zelle wird im Wesentlichen durch die kalendarische Lebens- dauer und die Zyklenstabilität bestimmt. Je nach Auslegung der Zellchemie und Betriebsstrategie kann eine höhere Zyklen-Lebensdauer erreicht werden. Bei der Alterung durch zyklische Belastung beansprucht das Anschwellen der Zelle die Aktivmaterialien

Insgesamt zeigt sich in der Automobilindustrie ein Trend zur zunehmenden Verwendung von großformatigen Pouch- und prismatischen Zellen, auch weil diese sich mit weniger Fertigungsaufwand zu einem Modul bzw. System produzieren lassen.

Kategorie	Pouchzelle	Rundzelle	Prismatische Zelle
Volumetrische Energiedichte auf Zellebene	Mittlere Energiedichte auf Zellebene	Aktuell höchste Energiedichte auf Zellebene	Aktuell geringste Energiedichte der drei Zellformate
Volumetrische Energiedichte auf Modulebene	Hohe Energiedichte ähnlich Rundzelle	Hohe Energiedichte ähnlich Pouchzelle	Aktuell geringste Energiedichte der drei Zellformate
Lebensdauer	Formatunabhängig	Formatunabhängig	Formatunabhängig
Einhausung	Aluminium-Kunststoff-Verbundfolie	Überwiegend vernickelter Stahl	Überwiegend Aluminium
Abmessungen	<ul style="list-style-type: none"> • Viele Größen • Effiziente Platzausnutzung durch Rechteckform • Gegenüber oder nebeneinander liegende Zellkontakte 	<ul style="list-style-type: none"> • Typische Größe 21 x 70 (D x L, mm) aber auch andere Formate • Niedrige Packungsdichte aufgrund der Raumausnutzung 	<ul style="list-style-type: none"> • Weniger Vielfalt als bei der Pouchzelle • Effiziente Packung des Zellverbunds • Tendenz zu länglicheren Gehäusen
Festigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Instabiles Gehäuse • Bläht sich bei Druckaufbau auf 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Dichtigkeit • Hohe Steifigkeit • Mechanisch robust • Robust bei Innendruck durch Entgasung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Dichtigkeit • Hohe Steifigkeit • Geringere mechanische Stabilität als die Rundzelle
Thermische Regulierung	<ul style="list-style-type: none"> • Gutes Oberflächen- zu Volumenverhältnis • Effiziente Temperaturkontrolle 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Wärmeabfuhr 	<ul style="list-style-type: none"> • Viel Volumen im Vergleich zur Oberfläche • Wärmeleitende Oberfläche
Typischer Energieinhalt	65 - 300 Wh	10 - 18 Wh	80 - 450 Wh

Vergleich der Zellformate, Quelle: PEM der RWTH Aachen

„Cell to Pack“ – ein neues Systemkonzept

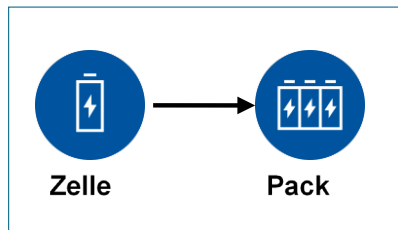


Quelle: PEM der RWTH Aachen

Der Aufbau von Batteriesystemen für Elektrofahrzeuge erfolgt schon immer nach der gleichen Struktur, der Zell-, Modul- und Packebene.

Die Entwicklung und Produktion der Batteriezelle war bisher weitgehend losgelöst von der des Batteriemoduls und des Akkupacks. Ziel der Systementwicklung ist es, aus geeigneten Batteriezellen Module und fertige Systeme zu konstruieren. Neuere Ankündigungen zum Beispiel der asiatischen Hersteller CATL und BYD zeigen, dass diese bisher voneinander

getrennten Ebenen der Zelle und des Packs direkt miteinander kombiniert werden könnten. Die Zwischenebene des Moduls soll dabei übersprungen werden. Das Ergebnis wäre ein strukturell einfacheres Batteriesystem mit höherer volumetrischer und gravimetrischer Energiedichte, da die Peripherie für das Modul wegfallen würde.



Quelle: PEM der RWTH Aachen

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 ließen 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 sicheren Zellchemie wie zum Beispiel Lithium-Eisen-Phosphat, die allerdings den Nachteil einer niedrigeren Energiedichte hat.

Bei aktuellen Batteriesystemen nehmen die Zellen ungefähr ein Drittel des Volumens des gesamten Batteriepacks ein. 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.

Durch den Verzicht der Modulebene können viele Strukturbauteile eingespart und zudem Montageaufwände reduziert werden. Die Energiedichte, sowohl pro Volumen als auch pro Masse, kann ebenfalls erhöht werden. Wenn die Zelle selbst als sehr lange prismatische Zelle, die quer im Fahrzeug liegt, ausgeführt wird, kann diese bei entsprechender Steifigkeit sogar selbst eine tragende Funktion in der Fahrzeugstruktur übernehmen

Die ersten Ankündigungen von Batterieherstellern versprechen, dass trotz Verwendung von Zellchemien mit niedrigerer Energiedichte, die Systemenergiedichte um 15 bis 20 Prozent

gesteigert werden kann. Auch die Kosten sollen stark sinken, weil die verwendeten Eisenphosphat-Zellchemien günstiger sind und in der Systemproduktion weniger Teile und Fertigungsschritte erforderlich sind.¹⁹

Aus einer Produktperspektive erscheint dieses Konzept also sehr schlüssig, aber es steigert die Anforderungen, die an die Fertigung der Zelle gestellt werden. Das Stapeln oder Wickeln von extrem langen Elektrodenverbänden und damit länglichen Zellen macht das Handling der Elektrodensheets sehr aufwändig, denn Positionierungsungenauigkeiten führen schneller zu sicherheits- oder qualitäts-kritischen 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 großformatigen Zellen, wie beim „Cell to Pack“-Ansatz gefordert, beim End-of-Line-Test auszusortieren, weil dann 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 diese gesteigerten Anforderungen an den Zell-Produktionsprozess langfristig wirtschaftlich umzusetzen sind. Auch hier sind die Zellproduzenten auf innovative Lösungen des Maschinen- und Anlagenbaus angewiesen.

¹⁹ <https://www.electrive.net/2020/03/30/byd-kuendigt-neue-blade-batterie-mit-lfp-technologie-an/>

Produktanforderungen und Spezifikationen

Zentrale technische Performance-Parameter für elektrische Energiespeicher sind:

- Gravimetrische Energiedicht [Wh/kg] auch spezifische Energie genannt und volumetrische Energiedichte [Wh/l]
- Gravimetrische Energiedichte [W/kg] auch spezifische Leistung genannt und volumetrische Leistungsdichte [W/l] sowie die davon abgeleitete Schnellladefähigkeit im Größenbereich über 1 C
- Zyklische und kalendarische Lebensdauer
- Umgebungsbedingungen wie tolerierte Temperaturen in [°C] oder Vibrationen
- Sicherheit nach EUCAR-Level
- Kosten [€/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. 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 maximal bis über 500 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 lange nicht ausgeschöpft sind.

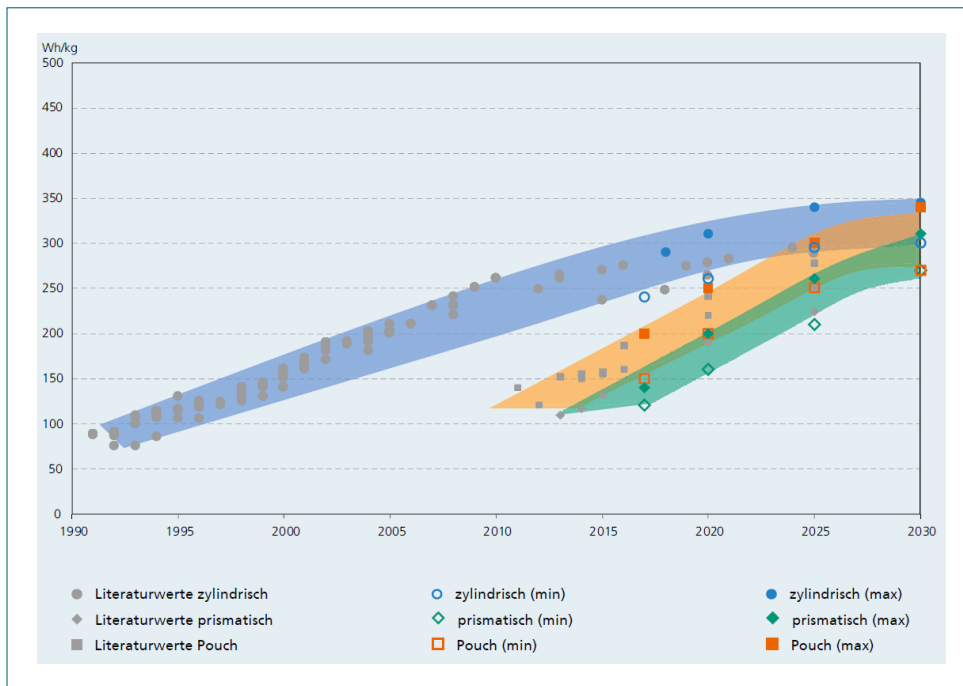
Die Entwicklungen der letzten Jahre zeigen deutlich, dass mit der Li-Ionen-Zelle eine geeignete Technologie für die Realisierung von Elektromobilität zur Verfügung steht, deren Potentiale noch lange nicht ausgeschöpft sind.

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 derzeit verwendeten großformatigen Lithium-Ionen-Zellen für mobile Anwendungen steckt. Dies wird sowohl durch Materialinnovationen als auch durch Skaleneffekte in der Massenproduktion ermöglicht.

Die **gravimetrische Energiedichte** der besten zylindrischen Zellen liegt derzeit bei ca. 270 Wh/kg und soll zukünftig auf über 300 Wh/kg ansteigen. Die großformatigen Pouch-Zellen haben sich in den letzten Jahren der Energiedichte der kleinformatigen Li-Ionen-Zellen angenähert und erreichen ähnliche Werte. Bei der prismatischen Hardcase-Zelle werden aktuell noch niedrigere Energiedichten von circa 200-230 Wh/kg erreicht.

In der Zukunft wird eine Angleichung der gravimetrischen Energiedichten der verschiedenen Zellformate erwartet, weshalb für die großformatigen prismatischen und Pouch-Zellen ebenfalls ein Potenzial von zukünftig über 300 Wh/kg angenommen wird.



Entwicklung der gravimetrischen Energiedichte von LIB-Zellen nach Zellformaten [Thielmann 2017]

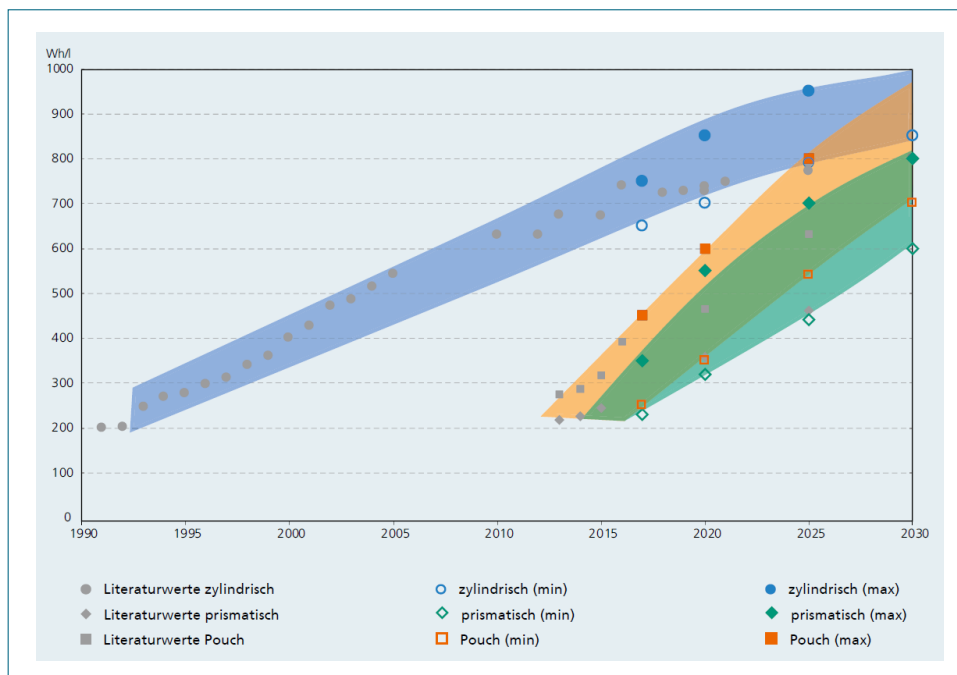
Auch in der **volumetrischen Energiedichte** liegen derzeit große Unterschiede zwischen klein- und großformatigen Lithium-Ionen-Zellen (siehe Abbildung Seite 27). Zylindrische Zellen erreichen derzeit über 750 Wh/l und werden zukünftig bis zu 1000 Wh/l erreichen, während für die prismatische und die Pouch-Zelle eine Steigerung von aktuell über 500 Wh/l auf langfristig bis zu 800 Wh/l (prismatisch) und bis zu 1000Wh/l (Pouch) erwartet wird.

Im Vergleich zur Zellebene sinkt in bisherigen 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.

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



Entwicklung der volumetrischen Energiedichte von LIB-Zellen nach Zellformaten [Thielmann2017]

100.000 km anfallen, welche sich in Anforderungen zur Zyklen-Lebensdauer der Batterien übersetzen. Einen 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.

Mit der zunehmender Schnellladefähigkeit steigen die Belastungen für die Zelle. Hierbei ergeben sich bei BEV 60-120 W/kg, bei PHEV 100-300 W/kg und bei HEV 200-400 W/kg.

Für die Einschätzung der **Sicherheit** wird auf Batteriesystemebene und auf Zellebene das EUCAR-Level herangezogen. Für ein Sicherheitsniveau von „EUCAR \leq 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 essentielle 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, dürften diese auch dort zunehmend eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang werden auch „Second-Use“-Konzepte diskutiert [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 sowie die Vorstellung der Roadmap auf den VDMA Roadshows in Südkorea, China und den USA.

Bereich Zellproduktion

Nach wie vor fordern die Batteriehersteller in der Zellproduktion eine möglichst kosteneffiziente Produktion. 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 und energieeffizienter Prozesse in den Fokus, welche beispielsweise durch die Reduktion von Lösungsmittelanteilen und die Weiterentwicklung des Trocknungsprozesses sowie der Formierung 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 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.

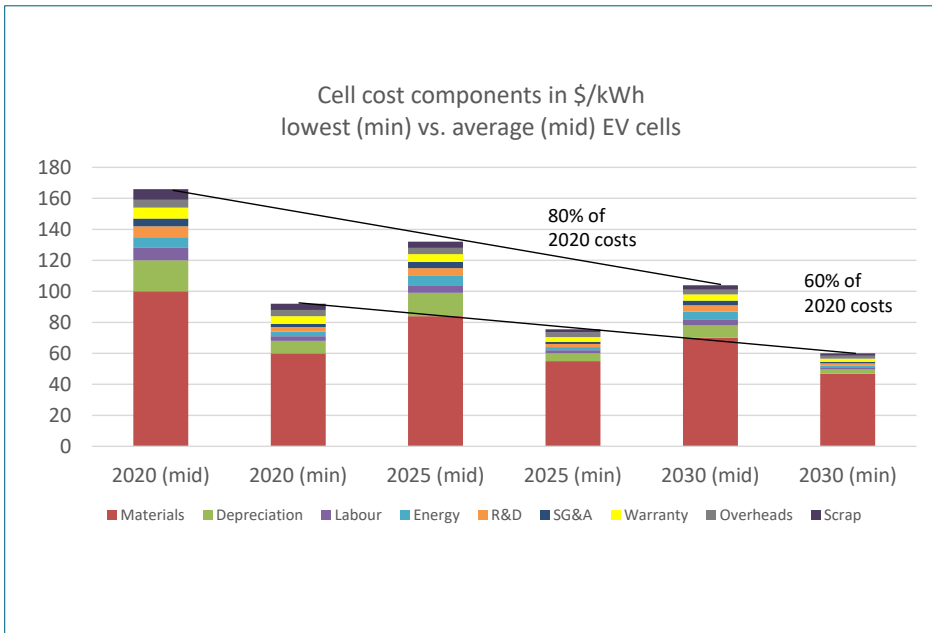
Die großen Optimierungspotenziale durch die Automatisierung und Digitalisierung von Fabriken sind bei den Herstellern bekannt und werden zunehmend nachgefragt (Industrie 4.0).

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 verschärfen den Wunsch 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 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. Die Maschinen- und Anlagenbauer müssen dazu Möglichkeiten vorsehen, wie Daten über den Produktionsprozess mit dem Produkt kommuniziert werden können.



5

Kostenstruktur und Kostenentwicklung von LIB-Zellen

Mit der Volumenproduktion und somit einer hochskalierten Zellfertigung in Verbindung mit Standortfaktoren²⁰ liegen zentrale und wettbewerbsrelevante Stellhebel für die Kosten von LIB-Zellen vor.

Meta-Analyse zur Kostenentwicklung

Eine Meta-Literaturanalyse aus Marktstudien unterschiedlicher Anbieter²¹ hilft die aktuellen sowie die sich künftig ändernden Kostenkomponenten von LIB-Zellen besser zu erfassen und deren Reduktionspotenziale zu verstehen. Hierbei wurden etwa 30-50 konkret benannte Zellen (Pouch, Prismatisch, Zylindrisch) von Zellherstellern (u. a. CATL, Panasonic, LG Chem, SDI) mit Angaben der für 2020, 2025 und 2030 erwarteten Kostenstrukturen analysiert. Neben den wettbewerbsfähigsten Zellen (in Abb. S.30 als min. angegeben) wurden zudem typische, durchschnittliche Zellkosten (über die Zellformate gemittelt) identifiziert (als mid. angegeben).

²⁰ indirekt: Transportkosten, Infrastrukturkosten, Energiekosten, Beschäftigung, etc.

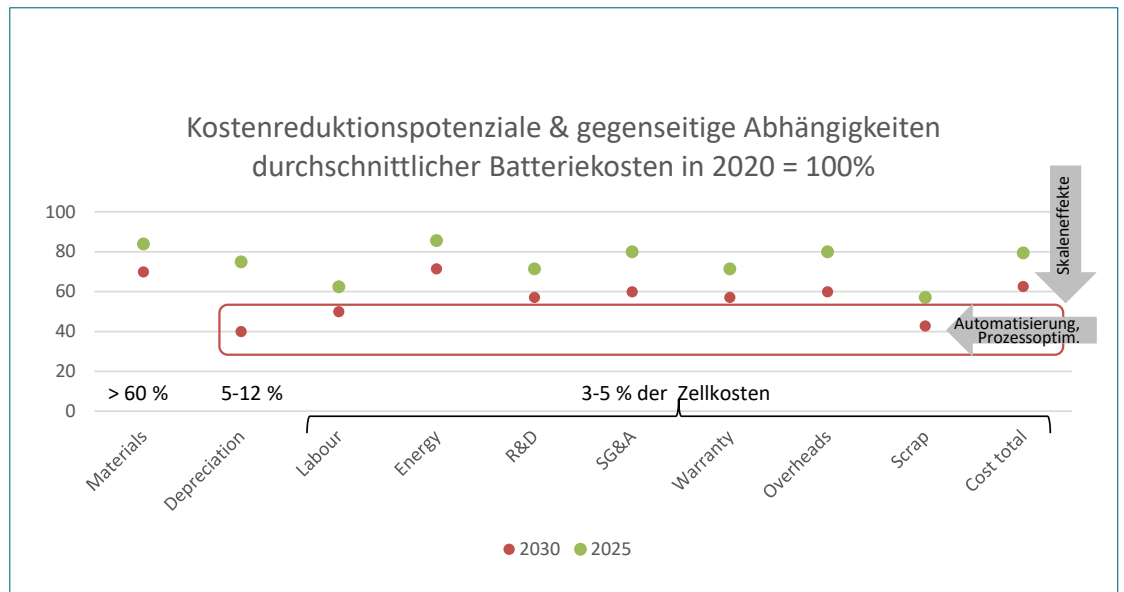
²¹ insbes. Avicenne, Anderman, Takeshita 2015-2020

Es zeigen sich gegenüber 2020 Kostenreduktionspotenziale bis 2025 auf etwa 80 Prozent und bis 2030 auf etwa 60 Prozent der aktuellen Kosten von unter 100²² bis über 150 \$/kWh.

Die Materialkosten haben einen Kostenanteil von über 60 Prozent, welcher in den nächsten zehn Jahren auf bis zu 70 Prozent oder mehr ansteigen dürfte. Gemäß den Ergebnissen der Marktanalyse ergibt sich langfristig das maximale Potenzial einer Kostenreduktion von LIB-Zellen bis auf etwa 60 \$/kWh. Damit würden aktuell mit den heute bekannten Technologien bzw. absehbaren Technologieentwicklungen maximal die Kosten für das Material abgedeckt.

Die Meta-Analyse gibt interessante Aufschlüsse über die sich entwickelnde Kostenstruktur. Während sich die Materialkosten pro kWh gegenüber 2020 absolut gesehen insbesondere durch höhere Kapazitäten der Aktivmaterialien noch um 25 Prozent reduzieren lassen, werden bei den für die Zellproduktion relevanten Kostenfaktoren insgesamt noch 50 Prozent Reduktionspotenziale erwartet.

²² Einige Studien verorten die Tesla Zelle, die für die untere Grenze 2020 den Preis vorgibt, auch bei über 100 \$/kWh



Kostenreduktionspotenziale & gegenseitige Abhängigkeiten durchschnittlicher Batteriekosten, Quelle: Fraunhofer ISI

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

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.

Die Entwicklung des Kostenanteils der Produktionsanlagen lässt sich über die Abschreibung identifizieren: Während diese heute 10 bis 20 Mio. \$/GWh pro Jahr ausmachen und bei einer Nutzungsdauer von 4 bis 8 Jahren somit 40 bis 160 Mio. \$/GWh betragen (je nach Skalierung der Produktion), so dürfte sich der Anlageninvest in den nächsten 10 Jahren auf 20 bis 80 Mio \$/GWh halbieren (durch Skaleneffekte ebenso wie durch Prozessinnovationen).

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 zwischen 40 Prozent (bei einem teuren Material wie LCO) und 200 Prozent (bei einem günstigen Material wie LFP) über den reinen Metallpreisen. Entsprechend kann sich insbesondere bei der Gruppe der NMC-Materialien eine starke Abhängigkeit von den Rohstoffpreisen ergeben. Diese verhalten sich mitunter sehr volatil. So betrug der Preis für

Kobalt Mitte 2018 noch fast das Dreifache des heutigen Marktpreises (Ende 2020). 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 622 oder 811 keine weitere Kostenersparnis zu erwarten, da mit der Reduktion des teuren Kobalts auch weniger Mangan verwendet wird, welches einer der günstigeren Bestandteile ist. Zudem erhöhen sich für Nickel-reiche Materialien die Kosten der Li-Precursor.

Eine signifikante Reduktion der Kathodenkosten würde somit einen Übergang zu anderen Materialien wie LFP (Lithium-Eisen-phosphat) oder Mangan-basierten Verbindungen erfordern. Mit einem Kathodenmaterial wie dem Lithium-reichen Hochkapazitäts-NMC, welches sich heute noch in der Erforschung befindet, könnten sich die Kosten der Kathode von heute über 40 \$/kWh (NMC-Materialien) auf unter 30 \$/kWh reduzieren lassen.

Das häufigste Material für den Einsatz als Anode ist nach wie vor natürliches, aus der Minenproduktion gewonnenes, sowie zunehmend auch synthetisch hergestelltes Graphit. 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.

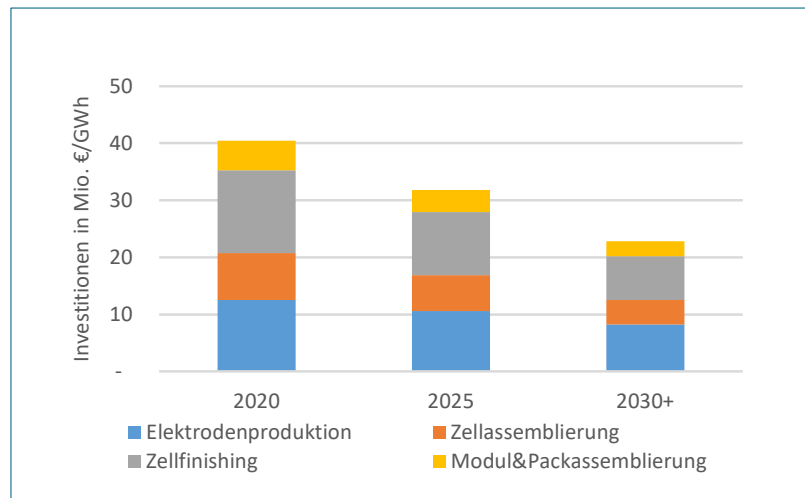
Die Stromableiterfolien in Li-Ionen-Zellen haben typische Dicken von wenigen μm und werden meist mittels galvanotechnischen Verfahren hergestellt. Der Metallpreis für 8 μm starke Kupfer-Folie (Anode) liegt bei etwa 0,5 \$/m², der Folienpreis kann mehr als das Doppelte betragen. Bei der kathodenseitig 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 realisieren, 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.

Ähnlich verhält es sich bei den Separatoren, deren Hauptkomponente eine grundsätzlich in der Herstellung günstige Polypropylen- oder Polyethylenfolie ist. Durch die zusätzliche Beschichtung mit keramischen Nanopartikeln, werden die Sicherheitseigenschaften verbessert, die Kosten jedoch deutlich gesteigert.

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 -



Investitionen in Produktionsanlagen in Mio. €/GWh, Quelle: Fraunhofer ISI

insbesondere Preisprognosen, welche sich lediglich auf die Fortschreibung in der Vergangenheit erreichter Kostensenkungen stützen, mit Vorsicht zu genießen. Die kosteneffizientesten Hochenergiebatteriezellen können heute mit Materialkosten von etwa 80 \$/kWh hergestellt werden. Mit den beschriebenen technologischen Weiterentwicklungen sind Kosten von 70 \$/kWh denkbar. Eine Unterschreitung der Marke von 60 \$/kWh auf Zellebene ist mit den heute bekannten Technologien sehr unwahrscheinlich [Thielmann2019]. Dominieren aber Materialpreise den Gesamtpreis, zeigen Erfahrungen aus verwandten Industrien wie der Photovoltaik, dass Materialeinsparungen oder alternative Materialien zum Einsatz kommen und sich die Preise in der Regel nicht auf einem Niveau einpendeln [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 tätigen 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 15 und 20 Prozent der Zellkosten. Der genaue Anteil ist jedoch u.a. stark abhängig von dem jeweilig betrachteten Zellformat und der Fabrikgröße, also Skaleneffekten. Die Kostendegression stellt daher einen Haupttreiber

für die derzeitige Tendenz hin zur Errichtung möglichst großer Zellproduktionen im Sinne von „Giga-“ und „Terafactories“ 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 Materialsubstitutionen. Im Falle von Prozessinnovationen führen ein schnellerer Durchsatz oder eine Verringerung des Ausschusses zu einer Steigerung der Produktionskapazität.

Durch Materialsubstitutionen, 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.33 (unter Berücksichtigung steigender Batteriekapazitäten und sich ändernder Zellchemien) dargestellt. Die Abbildung verdeutlicht, dass sich die spezifischen Investitionen von ca. 40 Mio. €/GWh im Laufe der Zeit um ca. 40 Prozent verringern dürften. Die Betrachtung der spez. Investitionen in Anlagen zur Zellherstellung sowie zur Modul- & Packherstellung, so zeigt sich, 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 Prozent) und der Elektrodenfertigung (ca. 30 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 Energiedichte²³ bei gleichbleibender Zellanzahl, könnte sich der spezifische Anteil der Elektrodenfertigung zukünftig von 30 auf 35 Prozent erhöhen, während sich der für die Zellaassemblierung und das Zellfinishing minimal reduziert.

Zusammenfassend lässt sich für die Produktionskosten festhalten, dass diese sehr stark von den Abschreibungen für Maschinen und Anlagen dominiert werden. Die spezifischen Investitionen (in Mio. \$/GWh) werden auch zukünftig weiter sinken. Haupttreiber 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.

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 Zellaassemblierung 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. Eine transparente Darstellung der hier getroffenen Annahmen findet sich in Hettesheimer et. al [Hettesheimer2018].

²³ 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 Kostendegression durch entsprechende Lerneffekte führen. Stellschrauben dafür können technische Innovationen, aber auch bessere Ausbeuten, der Economy of Scale, ein höherer Automatisierungsgrad und Kenntnisse bei den Prozess-Qualität-Zusammenhängen sein. Im Folgenden wird auf diese Punkte näher eingegangen. Die Energie- und Ressourceneffizienz, die ebenfalls signifikanten Einfluss auf die Kostenreduzierung haben können, wird unter dem Punkt Nachhaltigkeit betrachtet.

Bessere Ausbeuten

Aufgrund des hohen Materialkostenanteils an der Zelle von heute bis zu 60-70 Prozent ist die Erhöhung der Ausbeute entscheidend, um die Wettbewerbsfähigkeit zu stärken [Chung2018, Kwade2018b]. Auch bei einer reinen Geschwindigkeitssteigerung muss die Ausbeute mindestens gleichwertig bleiben. Der Vorteil der Durchsatzserhöhung durch Prozessintegration und -intensivierung würde sonst hinfällig.

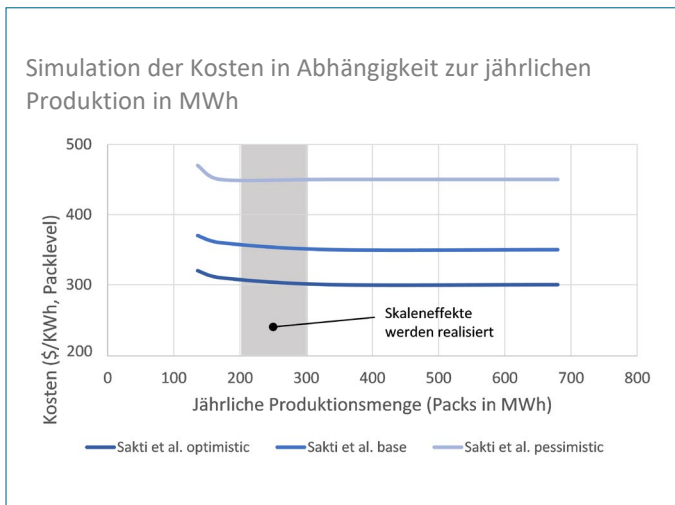
Die Ausbeute in der Produktion von Li-Ionen-Zellen beträgt in eingefahrenen Fabriken ca. 90 Prozent [Brodd2013]. Da sich der Ausschuss eines jeden einzelnen Prozessschrittes in der Produktion multipliziert, steht die Anzahl der Prozessschritte in direktem Zusammenhang mit der Gesamtausbeute. Eine Kostenminderung kann daher durch die Reduzierung von unnötigen Produktionsschritten induziert werden.

Ursachen für eine reduzierte Ausbeute können instabile, nicht robuste Produktionsprozesse und die daraus resultierenden Produktabweichungen bzw. -fehler sein (z.B. Flächenmassenabweichungen, 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.

Die frühzeitige Erkennung von Qualitätsminderungen in den Zwischenprodukten der Elektrodenfertigung ist entscheidend. Dies ist der Fall, wenn eine defekte Elektrode inline im Prozess – z.B. durch eine geeignete Kamertechnik – 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 [Schmitt2008]. Außerdem können durch die Auswertung von Messdaten prozessinterne sowie prozesseexterne Wirkzusammenhänge identifiziert werden. So ist ein beschleunigender Effekt auf die Lernkurve zu erwarten. Einflüsse von Prozessparametern auf die Qualität des Zwischenproduktes können wissensbasiert durchdrungen werden und das Potential zur Optimierung der Prozesse und Produkte erschlossen werden. 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 Zellproduktion ermöglicht [Schnell2016].



Quelle: BLB auf Basis [Sakti2015]

Economy of Scale

Die wachsende Nachfrage nach LIB wird zu einem Ausbau der Produktionskapazitäten führen. Dieser Ausbau kann über eine Erhöhung der Anzahl der Maschinen („Numbering-up“) oder des Durchsatzes der Maschinen („Scale-up“) realisiert werden. Die Hochskalierung trägt 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. mindestoptimalen 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 Li-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].

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 Zellfertigung (Konfektionieren bis finaler Zellverschluss) 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 Erstellung eines digitalen Zwillings bzw. Schattens für jede produzierte Batteriezelle zur Aufzeichnung und Überprüfung aller physischen Zusammenhänge und Parameter und Einhaltung bestimmter Fehlertoleranzen und der Zellqualität [Schuh2020]. 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.

Energieeffizienz

In der Produktion von Batterien – insbesondere in der Zellproduktion – sind energieintensive Verfahren notwendig. Das Beschichten und Trocknen, die Formierung sowie die Bereitstellung konditionierter Trockenraum-Atmosphären sind die energieintensivsten Prozessschritte. Gemeinsam stellen sie den wesentlichen Anteil des Energieverbrauchs in der Zellproduktion dar [Pettinger2017]. Auf diese Thematiken wird ausführlicher in den RBW 2, 3 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 [Schünemann2015]. Der Energieverbrauch in der Batterieproduktion ist zudem besonders aus ökologischer Perspektive relevant. In ihrer Herstellung verursacht die Li-Ionen-Batterie

etwa 145 kg Treibhausgasemissionen pro kWh Batteriekapazität, nach einer Modellierung der Agora Verkehrswende. 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].

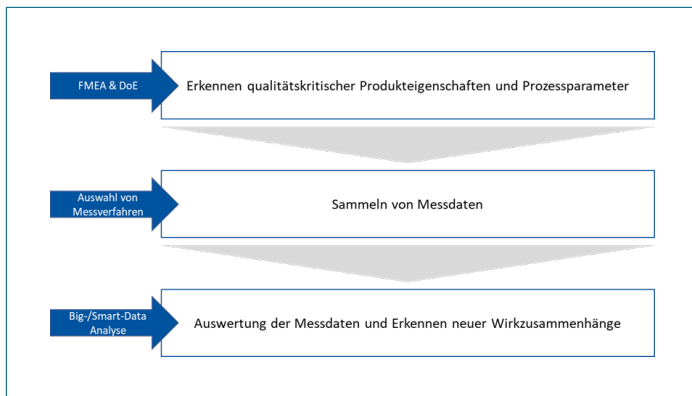
Insgesamt ist die CO₂-Bilanz der Batterieherstellung stark abhängig vom Strommix des jeweiligen Produktionslandes.

Ressourceneffizienz

Das Material macht bis zu 70 Prozent der Kosten einer Li-Ionen-Zelle aus und motiviert somit ebenfalls bereits rein betriebswirtschaftlich zur Realisierung einer hohen Ressourceneffizienz in der Produktion [Schünemann 2015]. 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.



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

Recycling

Einen weiteren wesentlichen Faktor, der sowohl zur Steigerung der Ressourceneffizienz wie auch der Energieeffizienz beitragen kann, stellt das Batterierecycling und Remanufacturing dar [Kwade2018b]. 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, da natürliche Ressourcen hier sehr gering oder nicht vorhanden sind [Miedema2013]. Das Remanufacturing von Batterien umfassen alle Methoden zur Verwendung in Second Life Applikationen. Es wird durch den Hochlauf der Elektromobilität und stationärer Speicher ein signifikanter Anstieg gebrauchter Li-Ionen-Batterien erwartet [Hoyer2015]. 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 Ausschussraten führen. Eine durchgängige und intelligente Messtechnik ermöglicht ein frühzeitiges Reagieren und damit die Chance, sich vom Wettbewerb abzuheben [Treichow2018, 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.41 sind Qualitätsparameter der Zellfertigung 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 weiterentwickelt 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 13). Basierend auf gemessenen Material- und Komponentenkennwerten 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 Zyklusstabilität 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	<ul style="list-style-type: none"> Reinheit Suspensionsdichte Feststoffgehalt Homogenität Viskosität Rußagglomeratgröße Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> Magnetabscheider, Mikroskopie, ICP Feststoffwaage, TGA Rheometer Laserbeugungsspektrometer Rheometer, Viskosimeter Mikroskopie Thermometer
	Beschichten	<ul style="list-style-type: none"> Oberflächengüte Nassschichtdicke und -genauigkeit Kantengeometrie Adhäsion 	<ul style="list-style-type: none"> Chrom. Weißlichtsensor, Kamera Lasertriangulation Kamera Mechanisch (u.a. Stirnabzugstest, etc.)
	Trocknen	<ul style="list-style-type: none"> Materialtemperatur Oberflächengüte Schichtdickenhomogenität Brüche im Material Gewichtsverteilung Restfeuchte Adhäsion Binder- und Leitfähigkeitsadditivmigration 	<ul style="list-style-type: none"> Pyrometer Kamera Lasertriangulation Kamera Infrarot Kamera Flächenmassenscanner Mechanisch (u.a. Stirnabzugstest, etc.) EDX
	Kalandrieren	<ul style="list-style-type: none"> Schichtdicke, -dichte und -porosität Oberflächenrauheit Brüche im Material Gewichtsverteilung Porengrößenverteilung 	<ul style="list-style-type: none"> Lasertriangulation Reflektometer Messung des Brechungsindex Kamera Flächenmassenscanner, HG Porosimeter (off-line)
	Slitten/Vereinzeln	<ul style="list-style-type: none"> Gratqualität Geometrie der Schnittkanten Metallische Fremdpartikel Deformation der Mikrostruktur 	<ul style="list-style-type: none"> Chrom. Weißlichtsensor, Kamera Lasertriangulation Ultraschallsensor Kamera
Zellassemblierung	Wickeln/Stapeln	<ul style="list-style-type: none"> Positionierung Fremdpartikelkonzentration Elektrische Aufladung 	<ul style="list-style-type: none"> Lasertriangulation Kamera
	Kontaktieren	<ul style="list-style-type: none"> Kontaktwiderstand Mechanische Stabilität Schweißnahtqualität 	<ul style="list-style-type: none"> Widerstandsmessung Kurzschlussstest Schweißnahtmonitoring, Strommessung
	Einbringen & Verschließen	<ul style="list-style-type: none"> Elektrische Isolation Dichtheit 	<ul style="list-style-type: none"> Wird nach Elektrolytbefüllung gemessen
	Elektrolytbefüllung	<ul style="list-style-type: none"> Dichtheit Elektrische Isolation Elektrolyttemperatur Dosiergenauigkeit Keine Rückstände in der Siegelnaht 	<ul style="list-style-type: none"> Drucktest, optische Kohärenztomographie Isolationsmessung Temperatursensor Messen
	Versiegeln	<ul style="list-style-type: none"> Dichtheit 	<ul style="list-style-type: none"> Drucktest, optische Kohärenztomographie
Formierung und Reifung	Press Rolling	<ul style="list-style-type: none"> Homogene Verteilung des Elektrolyten Optimale Bildung der SEI-Schicht Kapazität der Zelle nach der Formierung 	<ul style="list-style-type: none"> Röntgen Erst nach der Formierung messbar
	Formierung	<ul style="list-style-type: none"> Zellinnenwiderstand Kapazität Zelltemperatur 	<ul style="list-style-type: none"> Berechnung Temperatursensor
	Entgasen	<ul style="list-style-type: none"> Dichtheit 	<ul style="list-style-type: none"> Drucktest, optische Kohärenztomographie
	Alterung & EOL-Test	<ul style="list-style-type: none"> Selbstentladung Kapazität Zellinnenwiderstand 	<ul style="list-style-type: none"> Messen der Leerlaufspannung Berechnung Elektrochemische Impedanzspektroskopie

Quelle: PEM der RWTH Aachen, BLB und TU Braunschweig

Frugale Innovation vs. Volldigitalisierung

Der Ansatz der frugalen Innovation zielt auf die essentielle 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 Ma-

schinen 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.

Im Roadmapping-Prozess 2018 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 Fertigungslinie 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 Reinraumumgebung. Neben der Formierung ist das Betreiben des Trocken- und Reinraumes in der Zellfertigung am energieintensivsten.

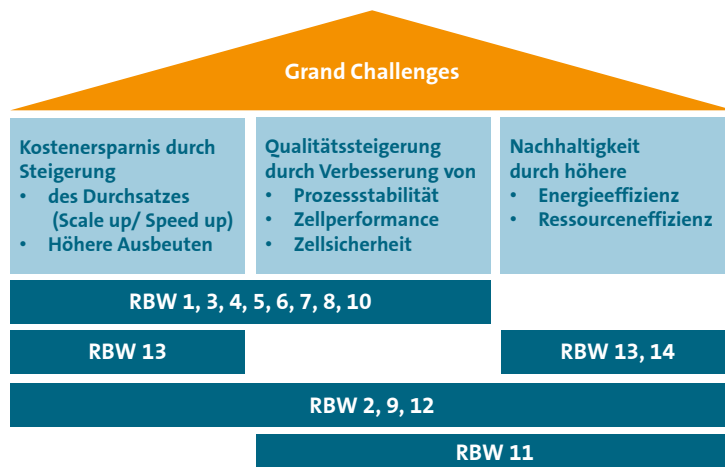
Das Thema Gehäuse unterliegt sowohl im Zell- wie auch im Modulbereich einem starken Kostendruck. Die Herausforderungen liegen in der Einsparung von Material und der Vermeidung von Redundanzen sowie einer effizienten Produktion. Darüber hinaus kann es notwendig sein Out-of-the-Box“ zu denken und neue 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 2016 und 2018 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.



Die größten Herausforderungen der Batterieproduktion und ihr Bezug zu den ermittelten Red Brick Walls

In den nachfolgenden Kapiteln werden die 14 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 Industriesektoren 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 2020 im Detail

Aufbauend auf den zuvor dargestellten Einschätzungen der RBW aus dem Jahr 2018 wurden die nachfolgenden aktualisierten Technologiekapitel erarbeitet. Um die Herausforderungen eines Prozessschrittes detaillierter zu betrachten, wurden die RBW aus 2016 weiter heruntergebrochen. Zu Beginn eines Kapitels sind die wesentlichen RBW zu dem Prozessschritt der Priorität nach tabellarisch aufgeführt.

Zur Visualisierung und Analyse von prognostizierten Technologieentwicklungspfaden wird **das Meilensteindiagramm** mit zeitlich parallel verlaufenden „Fahrspuren“ verwendet.

In den folgenden Diagrammen erscheinen ausschließlich solche Anforderungen der Batteriehersteller, zu denen heute keine Produktionslösungen existieren – definitionsgemäß sind das die Red Brick Walls. Um die Übersichtlichkeit zu wahren, wurde in jedem Technologiekapitel für die am höchsten priorisierte Red Brick Wall ein Meilensteindiagramm angefertigt. Der heutige Stand der Produktionstechnik für die Volumenproduktion ist der Ausgangspunkt „2020“ im Meilensteindiagramm.

Es werden vier Symbole für die Darstellung von Meilensteinen im Entwicklungspfad verwendet, die in Abbildung 1 zu sehen sind. Der Kreis stellt

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

Das Meilensteindiagramm wird ergänzt durch eine grafische Darstellung **der Nutzen Aufwand Bewertung** sowie durch eine prozentuale **Abschätzung** 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 Recyclbarkeit. 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.

Fachliche Unterstützung im Bereich Elektroden- und Separatorfertigung

Industrielle Unterstützung durch:	Mischen	Beschichten	Kalandrieren	Separatorherstellung	Vereinzeln
ACHENBACH BUSCHHÜTTEN GmbH & Co.KG Thomas Dornseifer, Thomas Timmer		x	x		
AZO GmbH + Co. KG Jochen Weimer	x				
Brückner Maschinenbau Karl Zimmermann, Dr. Thomas Knoche				x	
BST GmbH Klaus Hamacher, Florian Kortekamp		x	x	x	x
Dr.Ullmann Consulting Dr. Bernd Ullmann					x
Dürr Systems AG Andreas Keil		x			
Erhardt + Leimer GmbH Herbert Bobinger, Dirk Schröder		x	x	x	
Festo SE & Co.KG Marthinus Venter					x
Freudenberg Performance Materials SE & Co KG Dr. Christoph Weber				x	
Gebr. Becker GmbH Marc Franzbäcker	x	x	x		
GEBR. LÖDIGE Maschinenbau GmbH Dr. Dirk Jakobs	x	x	x	x	
GROB-WERKE GmbH & Co.KG Joachim Szaunig					x
Industrie-Partner IP PowerSystems GmbH Ulrike Polnick					x
KROENERT GmbH & Co KG Christian Werner		x		x	

Fachliche Unterstützung im Bereich Elektroden- und Separatorfertigung

Industrielle Unterstützung durch:	Mischen	Beschichten	Kalandrieren	Separatorherstellung	Vereinzeln
MainTech Systems GmbH Dr. Jens Michael Hager		x			
Manz AG Maximilian Wegener					x
MARPOSS GmbH Michael Klenk					x
Maschinenbau Kitz GmbH Rainer Forster	x	x			x
Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG Dr. Stefan Gerl	x			x	
Mathews International GmbH Frank Bogenstahl			x		
NETZSCH-FEINMAHLTECHNIK GMBH Dr. Florian Schott	x			x	
OMRON ELECTRONICS GmbH Henry Claussnitzer, Marc Woerner					x
PIA Automation Bad Neustadt GmbH Dr. Hubert Reinisch					x
Robert Bosch GmbH Bernd Feirabend					x
SCHUNK GmbH & Co.KG Michael Bartl					x
SICK AG Philipp Mutz					x
SIEMENS AG Alina Rost		x	x	x	
Smit Thermal Solutions B.V. Michael van der Gugten		x			

Fachliche Unterstützung im Bereich Elektroden- und Separatorfertigung

Industrielle Unterstützung durch:	Mischen	Beschichten	Kalandrieren	Separatorherstellung	Vereinzeln
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH Marc Kirchhoff, Johannes Bührlé		x	x	x	x
VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH Oliver Meister, Richard Moreth	x	x	x	x	x
Zeppelin Systems GmbH Peter Schmäling	x				

Fachliche Unterstützung im Bereich Zellfertigung

Industrielle Unterstützung durch:	Stapeln	Elektrolyt- befüllung	Trocken- und Reinraum	Formierung	Gehäuse Zelle
ACHENBACH BUSCHHÜTTEN GmbH & Co.KG Rainer Neukant					x
bielomatik GmbH Dr. Tobias Beiß					x
Bosch Rexroth AG Andreas Gryglewski	x				
BST GmbH Klaus Hamacher, Florian Kortekamp	x		x		
COLANDIS GmbH Michael Habe nicht, Joachim Ludwig			x		
Dr.Ullmann Consulting Dr. Bernd Ullmann	x				x
Erhardt + Leimer GmbH Thomas Grimm	x				
Festo SE & Co.KG Marthinus Venter	x	x	x	x	
Gebr. Becker GmbH Marc Franzbäcker		x	x		
GROB-WERKE GmbH & Co.KG Moritz Glück, Joachim Szaunig	x	x	x		
HESSE GmbH Dirk Siepe					x
HIGHYAG Lasertechnologie GmbH Marc Hübner					x
H&T Battery Components Volker Seefeldt					x
Industrie-Partner IP PowerSystems GmbH Ulrike Polnick	x	x	x	x	x
KUKA Systems GmbH Dr. Joachim Döhner	x				
Leybold GmbH Dr. Sina Forster, Dr. Tom Kammermeier		x	x		

Fachliche Unterstützung im Bereich Zellfertigung

Industrielle Unterstützung durch:	Stapeln	Elektrolyt- befüllung	Trocken- und Reinraum	Formierung	Gehäuse (Zelle)
Liebherr-Verzahntechnik GmbH Thomas Mattern	x				
Manz AG Randy Bedsaul, Andreas Schaal, Maximilian Wegener, Matthias Werner	x	x			
Maschinenbau Kitz GmbH Rainer Forster	x			x	
mkf GmbH Christian Voigt, Dirk Möder			x		
OMRON ELECTRONICS GmbH Henry Claussnitzer, Marc Woerner	x				
PIA Automation Bad Neustadt GmbH Dr. Hubert Reinisch	x				
SCHUNK GmbH & Co.KG Michael Bartl	x				
SICK AG Philipp Mutz	x	x			
ThyssenKrupp System Engineering GmbH Tobias Grobe, Toni Wolfgang, Andreas Kulisch von Ahlfen				x	
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH Marc Kirchhoff, Johannes Bührle					x
VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH Oliver Meister, Richard Moreth	x	x			x
WEISS GmbH Yifan Lu	x				
ZELTWANGER Dichtheits- und Funktionsprüfsysteme GmbH Andreas Baur, Patrick Reich					x
ZELTWANGER Automation GmbH Anthony Nobel					x

Fachliche Unterstützung im Bereich Modul-/Packfertigung und weitere Themen

Industrielle Unterstützung durch:	Gehäuse (Modul)	Kontaktieren	Flexible Produktion	Wirkzusammenhänge	Kreislaufwirtschaft
ACHENBACH BUSCHHÜTTEN GmbH & Co.KG Rainer Neukant	x				
Balluff GmbH Tobias Hörsch			x	x	
bielomatik GmbH Dr. Tobias Beiß	x	x	x	x	
Bosch Rexroth AG Andreas Gryglewski			x		
COLANDIS GmbH Michael Habenicht Joachim Ludwig			x		
Dr. Ullmann Consulting Dr. Bernd Ullmann	x	x	x		
Festo SE & Co.KG Oliver Klein, Martin Schaupp Marthinus Venter		x	x		x
F&S BONDTEC Semiconductor GmbH Stefan Berger, Dr. Josef Sedlmair		x	x	x	
Gebr. Becker GmbH Marc Franzbäcker					x
GEBR. LÖDIGE Maschinenbau GmbH Dr. Dirk Jakobs					x
HESE GmbH Dirk Siepe	x	x	x	x	
HIGHYAG Lasertechnologie GmbH Marc Hübner	x	x			
H&T Battery Components Volker Seefeldt	x	x			
Industrie-Partner IP PowerSystems GmbH Ulrike Polnick	x		x	x	x

Fachliche Unterstützung im Bereich Modul-/Packfertigung und weitere Themen

Industrielle Unterstützung durch:	Gehäusefertigung	Kontaktieren	Flexible Produktion	Wirkzusammenhänge	Kreislaufwirtschaft
KROENERT GmbH & Co KG Christian Werner			X		
KUKA Systems GmbH Dr. Joachim Döhner		X	X	X	X
Liebherr-Verzahntechnik GmbH Viktor Bayrhof			X	X	X
Manz AG Maximilian Wegener	X	X	X	X	
MARPOSS GmbH Michael Klenk	X		X		
Maschinenbau Kitz GmbH Rainer Forster	X	X	X	X	X
OMRON ELECTRONICS GmbH Henry Claussnitzer			X	X	
Pfeiffer Vacuum GmbH Dr. Stefan Zabeschek	X				
PIA Automation Bad Neustadt GmbH Dr. Hubert Reinisch		X	X	X	X
pro-beam GmbH & Co.KGaA Marcus Will	X	X			
Robert Bosch GmbH Bernd Feirabend			X	X	X
Schuler Pressen GmbH Markus Roever	X				
SCHUNK GmbH & Co.KG Michael Bartl			X		
SICK AG Philipp Mutz	X		X	X	
SIEMENS AG Mathias Altmannshofer, Alina Rost			X	X	X

Fachliche Unterstützung im Bereich Modul-/Packfertigung und weitere Themen

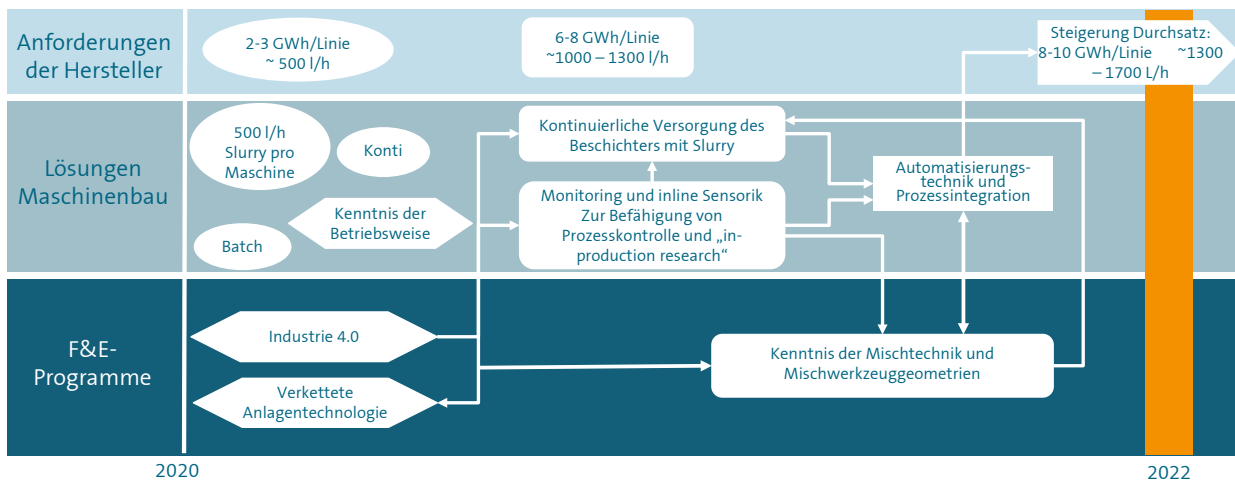
Industrielle Unterstützung durch:	Gehäusefertigung	Kontaktieren	Flexible Produktion	Wirkzusammenhänge	Kreislaufwirtschaft
ThyssenKrupp System Engineering GmbH Tobias Grobe			x	x	
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH Marc Kirchhoff, Johannes Bührle	x	x	x		
ULT AG Dr. Stefan Jakschik					x
VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH Oliver Meister, Richard Moreth	x	x		x	
WEISS GmbH Yifan Lu			x		
ZELTWANGER Dichtheits- und Funktionsprüfsysteme GmbH Andreas Baur, Patrick Reich	x				
ZELTWANGER Automation GmbH Anthony Nobel	x	x	x		

Mischen

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
1.1	Durchsatz erhöhen/ Reduzierung der Mischdauer	Fortschritt erzielt	Hoch	2022
1.2	Qualitätssteigerung/ Verbesserung Zellperformance	Fortschritt erzielt	Hoch	2030 (alle 2 Jahre Update)
1.3	Strukturierung/ Funktionalisierung von Aktivmaterial	Fortschritt erzielt	Hoch	2023
1.4	Flexible Anpassung an „Next-Generation-Materialien“: Erhöhung des Nickel Anteils	Fortschritt erzielt	Hoch	2025
1.5	Flexible Anpassung an neue Materialien: wässrige Prozessierung von Kathodenmaterial	Fortschritt erzielt	Hoch	2025

RBW 1.1: Mischen – Steigerung des Durchsatzes / Reduzierung der Mischdauer

Leistungsstärkere und prozessintegrierte Herstellung der Suspension (z.B. Einsatz alternativer Maschinenteknik, Verkettung mit Dosieranlage und Beschichter) mit dem Ziel einer kontinuierlichen just-in Time Versorgung des Beschichtungsprozesses. Höhere Ausbeute im Hinblick auf Minimierung von Restmengen und Ausschuss bei gleichzeitiger Reduktion der Inaktivmaterialien (Binder, Leitadditive, Lösungsmittel) und Erhöhung der Qualität (Suspension, Zelleigenschaften). Monitoring der Qualitätsparameter im Misch- und Dispergierprozess, um den Zusammenhang zwischen Betriebsparametern und Betriebsweisen und dem Rohstoff- sowie Zelleigenschaften herzustellen und so bei möglichst geringer Prozesszeit die Qualität zu gewährleisten und zu überwachen.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

Mischen

Grundlagen

Am Anfang der Batteriezellproduktion stehen Trocken- und Nassmischprozesse der pulverförmigen Ausgangsmaterialien, um eine Suspension mit geeigneter Viskosität, sowie Struktur der Leitfähigkeitsadditive für das Beschichtungsverfahren zu erhalten. Diese besteht aus Aktivmaterialien sowie inaktiven Komponenten (Leitruße, Leitadditive, Binder) und einem Lösungsmittel. Ziel des Mischens ist es, die pulverförmigen Bestandteile homogen zu vermischen bzw. Komposite aus Leitruß/-Aktivmaterial und Leitruß/Binderpolymer zu strukturieren. Dies ist die Basis zur Herstellung von Elektrodenbeschichtungen guter elektrischer Leitfähigkeit bzw. homogener Strom- und Ionendichtenverteilung und guten Leistungs- und Energieeigenschaften, insbesondere bei zukünftig großformatigen Zellen mit einer Breite von ca. 500 mm [Kwade 2018b].

Herausforderungen

Durch den Bau von sogenannten „Gigafactories“ (8-10 GWh/Linie, geplante Gesamtkapazität in der Endausbaustufe ca. 30 GWh) wird zukünftig eine wettbewerbsfähige, stabile, möglichst über Jahre robuste und prozessintegrierte Herstellung der Batteriesuspension mit dem Ziel einer kontinuierlichen just-in-Time Versorgung des Beschichtungsprozesses essentiell sein. Die Erhöhung des Durchsatzes / Reduzierung der Mischdauer hat für diesen Prozessschritt daher höchste Priorität. Hierfür wurden bereits kontinuierliche oder quasi-kontinuierliche Mischer und Mischprozesse entwickelt und für Leistungen im Bereich einiger hundert Liter Suspensionsausstoß pro Stunde in die Produktion eingeführt.

Für einen effizienten Prozess können Trocken- und Nassmischer, auch in Kombination, z.B. in einem „Ein-Topf-Prozess“, eingesetzt werden. Möglich ist es auch, einen trockenen und batch-

weisen Mischprozess für hohe Durchsätze mit einem kontinuierlichen Mischer zur nassen Dispergierung zu kombinieren. Idealerweise ist über ein fundiertes Prozess- und kombiniertes Maschinen-Know-how mit geringem Aufwand schnell eine gezielte Struktur der Leitfähigkeitsadditive und der Viskosität einstellbar, sodass eine schnelle und flexible Anpassung an neue (Aktiv-) Materialien erfolgen oder ein Scale-Up zur Durchsatz- und Effizienzsteigerung durchgeführt werden kann.

Des Weiteren kann durch eine Steigerung der Qualität, insbesondere bei den am Anfang der Batteriezellproduktion stehenden Trocken- und Nassmischprozessen, die Homogenität der Elektrode verbessert und somit auch die spätere Zellperformance maßgeblich beeinflusst werden und hat daher eine hohe Relevanz, sowohl für die Hersteller von Mischanlagen, als auch für Batteriehersteller.

Durch eine optimierte Prozessführung beim Mischen und Dispergieren kann sowohl beim kontinuierlichen Betrieb als auch beim Batch-Betrieb die produzierte Suspensionsmenge pro Zeiteinheit maximiert, sowie der Zeit- und Energieaufwand minimiert werden. Für eine leistungsstärkere und prozessintegrierte Herstellung der Suspension gewinnt eine vollautomatische Zudosierung von Pulver und Flüssigkeiten, sowie der Einsatz alternativer Maschinenteknik und Mischwerkzeuggeometrien weiter an Bedeutung.

Eine homogene und effiziente Materialverteilung bzw. die Erzeugung von gezielt strukturierten Kompositen aus Aktivmaterialien und Binderpolymer mit Leitrußen ist die strukturelle Zielstellung der Mischaufgabe (RBW 1.3). Dieser Aspekt stellt eine eigene Herausforderung dar, die aber insbesondere zur Erlangung einer verbesserten Zellperformance beiträgt (RBW 1.2).

Weiter müssen die Mischverfahren für die Elektrodenherstellung von Next-Generation Batterien mit reduziertem/keinem Lösungsmiteleinatz aktiv vorangetrieben werden (RBW 1.5). Zudem stellt die vergleichsweise hohe Empfindlichkeit von nickelreichen Aktivmaterialien gegenüber Feuchtigkeit und CO₂ neue Anforderungen an den Prozess. Aufgrund der hohen Materialkosten (60-70 Prozent Kostenanteil an der Gesamtzelle) ist Produktionsausschuss zwingend zu reduzieren und idealerweise vollständig zu vermeiden.

Lösungsansätze

Ein wichtiger Aspekt ist die Entwicklung von geeigneten Qualitätsmanagementstrategien für die Elektrodensuspension. Hierfür ist die Kombination verschiedener inline Sensorik und daraus abgeleitete Quality Gates entscheidend. 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.

Für eine zusätzliche Qualitätssteigerung und Verbesserung der späteren Zellperformance bietet sich die stärkere Verkettung und Kombination von vorhandenen Anlagentechnologien an, da so die geforderte just-in Time Versorgung des Beschichtungsprozesses gesichert werden kann. Kontinuierliche oder quasi-kontinuierliche Mischer und Mischprozesse bieten die Möglichkeit zur Realisierung hoher Durchsätze bei gleichzeitig reduziertem Platzbedarf.

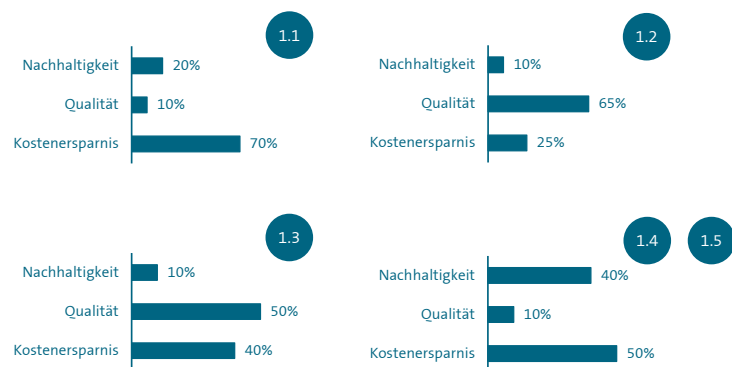
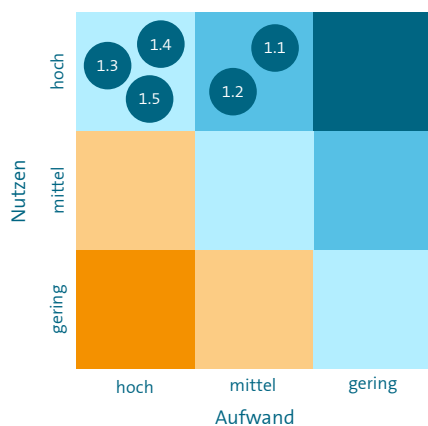
Trockene Mischprozesse können bevorzugt angewendet werden, um in kurzer Prozesszeit gute Mischhomogenitäten zu erreichen, vorteilhafte Leitruß-Agglomeratgrößen einzustellen und gezielt Leitrußanteile auf den Aktivmaterialoberflächen (effiziente Elektronenverteilung auf den

Aktivmaterialien wird erzielt) und im Binderpolymer einzuarbeiten. Sie bilden eine optimale Ausgangslage für die weitere Verarbeitung in Herstellverfahren für Trockenelektroden oder zur nachgeschalteten Aufbereitung zu Extrusions- oder Beschichtungsmassen.

Inline Messverfahren in den unterschiedlichen Prozessschritten ermöglichen die Rückkopplung von Messgrößen zur automatisierten Prozesssteuerung und somit zur Fehlerkompensation auch auf Basis von künstlicher Intelligenz und somit eine stetige Weiterentwicklung der Elektrodenqualität durch „in-production research“ Konzepte. Weiterhin ist eine Wareneingangs-, Zwischen- und Endproduktkontrolle durchzuführen. Diese soll die Einhaltung der finalen Produkthanforderungen und eine geringe Varianz der späteren Zellen in Bezug auf elektrochemische Kenngrößen sicherstellen. Erforderlich sind 6-Sigma Prozesse.

Zukünftig wird eine Reduktion des Lösungsmittelanteils für den Nassmischprozess relevant sein. Effizient sind geringste Lösungsmittelanteile nur im Schulterschluss mit der Entwicklung und Identifizierung neuer Binder und Verarbeitungsmaschinen (Folien-Extruder oder Kalandern an Stelle von Beschichtern) möglich, auf deren Verarbeitung maschinenseitig zu reagieren ist. Kontinuierliche Extrusionsprozesse ermöglichen neben niedrigeren Lösungsmittelanteilen (ca. 50 Prozent) hohe und für die Massenproduktion geeignete Durchsätze. Zudem ist eine hohe Reproduzierbarkeit des Prozesses, ohne zeitaufwändige Zwischenreinigung von Maschinen- und Anlagenteilen, ein maßgeblicher Vorteil. Die Integration von inline-Qualitätskontrollen wird vereinfacht ebenso wie eine direkte Verschaltung mit einer Laminieranlage. Bei trockenen, lösungsmittelfreien Herstellverfahren für Elektroden ist auch eine direkte Verpressung der Elektrodenmasse bspw. in einem Kalandern denkbar. In allen Fällen ist hierfür ein sehr stabiler vorgelagerter Trockenmischprozess erforderlich.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



1.1 Durchsatz erhöhen 1.2 Qualität steigern 1.3 Strukturierung/Funktionalisierung 1.4 Reduktion Inaktivmaterialien 1.5 Wässrige Prozessierung

Bei der Verarbeitung kathodischer Aktivmaterialien mit hohen Nickelanteilen (NCM811 und höher) ist deren strukturelle Schädigung durch die ausgeprägte Feuchtigkeitsaufnahme und deren Reaktion mit CO₂ zu berücksichtigen. Es ist daher erforderlich feuchtigkeits- und CO₂-kontrollierte Mischprozesse durchzuführen. Auf eine Nassdispersion kann vollständig verzichtet werden, wenn trockene Pulverbeschichtungs- oder -pressverfahren entwickelt werden. Hier ist eine Pulvervorbehandlung und Homogenisierung (Trockenmischung) und ggfs. Strukturierung (z.B. Fibrillierung) notwendig, um Leitrußpartikel aufzuschließen und diese zusammen mit den Aktivmaterialien und Bindern zu strukturieren. Ein weiterer Lösungsansatz ist zudem die wässrige Aufbereitung von Kathodenmaterial, welche bereits für NCM111 nachgewiesen und für NCM622 in Entwicklung ist.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Zukünftige Anforderungen an den Mischprozess (8-10 GWh/Linie) erfordern eine deutliche Erhöhung des Durchsatzes (1.1). Diese leistungsstärkere und prozessintegrierte Herstellung der Suspension bedingt zwar durch das benötigte fundierte Prozess- und Maschinen-Know-how einen hohen Aufwand, ist aber gleichzeitig mit einem hohen Nutzen verbunden.

Kontinuierliche oder quasi-kontinuierliche Misch- und Dispergierprozesse gelten für die Zukunft als sehr relevant, da sie bei mittlerem Aufwand einen hohen Nutzen haben. Dabei bieten sich aus Effizienzgründen auch Verschaltungen unterschiedlicher Mischverfahren (z.B. Kombination von Trockenmischer mit Extruder) als mögliche Lösung an. Mit weitreichender Prozessintegrationen und Anlagenverkettungen entsteht hier zwar ein höherer Aufwand, der Nutzen kann jedoch deutlich höher sein.

her sein, da so bei einem gleichzeitigem erhöhten Durchsatz eine Reduzierung der Mischdauer oder eine Verbesserung der Elektrodenqualität erreicht werden kann, was mit einer wesentlichen Kostenersparnis einhergeht (1.1).

Ein vielversprechender Ansatz für die Qualitätssteigerung (1.2.) ist die Implementierung von Inline Sensorik, die mit einem mittleren bis hohen Aufwand, dabei jedoch mit einem sehr hohen Nutzen verbunden ist.

Ein kontinuierliches oder intermittierendes Inline Prozess-Monitoring ist essentiell für die erfolgreiche Entwicklung von geeigneten Qualitätsmanagementstrategien und einer Steigerung der Qualität, sowie Reduzierung der Kosten durch Ausschussminimierung.

Die Anpassung und Entwicklung bestehender Prozesse an neuartige strukturierte (Aktiv-) Materialien stellt anlagentechnisch einen mittleren Aufwand dar, da die Formulierungsstrategien an die neuen Materialien angepasst werden müssen (1.3). Der Nutzen solcher Materialien kann je nach gewünschter Eigenschaft der Zelle sehr hoch sein, da es eine Reduzierung von Inaktivmaterialien (1.4) ermöglicht und durch die erhöhte volumetrische Zellkapazität eine Verbesserung der Zellperformance (1.2) zur Folge hat. Zudem wird die Weiterentwicklung der Suspensionsqualität durch „in-production research“ Konzepte vorangetrieben.

Die Reduzierung des Lösemittelanteils, sowie die wässrige Prozessierung von Kathodenmaterial (1.4; 1.5) stellt eine Herausforderung dar, die jedoch mit einem hohen Nutzen verbunden ist. Der Einsatz der lösemittelreduzierten/ lösemittelfreien Produktion hat neben ökonomischen insbesondere auch ökologischen Vorteile. Es können sowohl Kosten bei der Trocknung als auch bei der späteren Kondensataufbereitung eingespart werden. So kann zudem ein wesentlicher Beitrag für eine nachhaltigere Batterieproduktion geleistet werden.

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Dr. Stefan Gerl, Leitung Verfahrenstechnik, Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co KG

Mit weiterer Unterstützung von:

AZO GmbH + Co. KG

Bosch Rexroth AG

Gebr. Becker GmbH

Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH

Hesse Mechatronics GmbH

Maschinenbau Kitz GmbH

NETZSCH-Feinmahltechnik GmbH

VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH

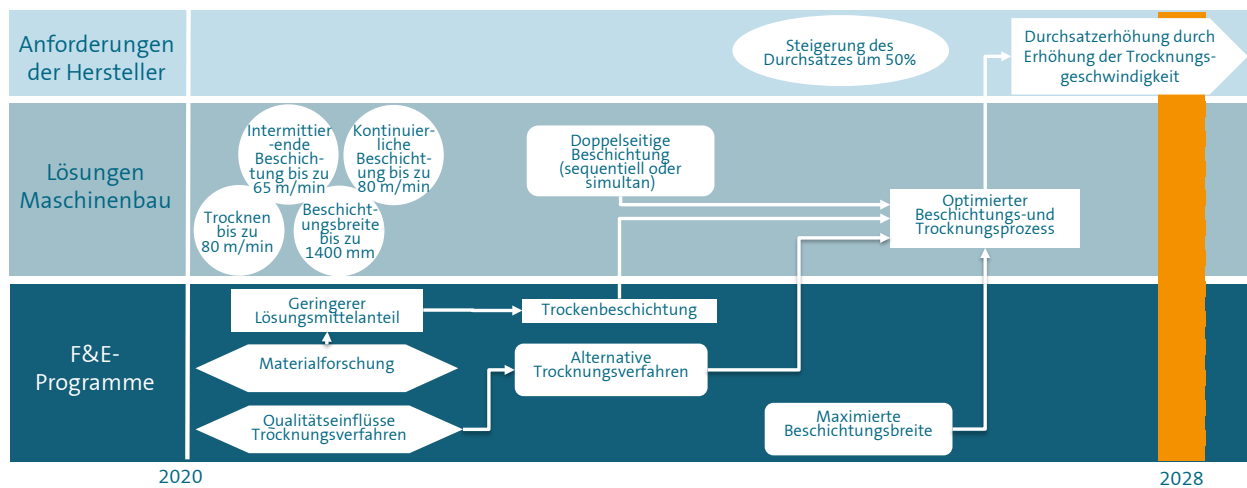
Zeppelin Systems GmbH

Beschichten und Trocknen

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
2.1	Durchsatz erhöhen	Fortschritt erzielt	Hoch	2028
2.2	Qualitätssteigerung/ Verbesserung	Fortschritt erzielt	Hoch	2020-2024
2.3	Steigerung der Energieeffizienz und Vermeidung kritischer Materialien	Kein Fortschritt	Hoch	2022

RBW 2.1: Beschichten, Trocknen – Durchsatzsteigerung

Durch geringeren Lösungsmittelanteil in der Beschichtung gelingt ein höherer Durchsatz und lange Trocknungsstrecken können vermieden bzw. die Produktionsleistung kann gesteigert werden. Die Trocknung ist maßgeblich geschwindigkeits- und qualitätsbestimmend, jedoch muss bei schneller Bahngeschwindigkeit ein hochwertiger Beschichtungsauftrag, idealerweise auf Bahnbreiten bis zu 1,4 m und simultan-beidseitig, gewährleistet sein. Alternative Trocknungstechnologien oder eine Kombination dieser rücken auch im Sinne einer energieeffizienteren und schnelleren Trocknung immer mehr in den Fokus.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 2: Beschichten, Trocknen

Grundlagen

Im Beschichtungsprozess wird die Suspension über ein Auftragswerkzeug kontinuierlich oder intermittierend, also einer Beschichtung mit Unterbrechungen, auf eine Trägerfolie aufgebracht. Industriell üblich ist heute die Beschichtung über Schlitzdüsen (Slot-die).

Typische Werte für die Nassschichtdicke liegen bei Energieelektroden zwischen 200-250 µm. Die Beschichtungsbreite kann mit mehreren oder mit sog. Mehrkammer-Düsen bis zu 1400 mm (Anode, Cu) und 1400 mm (Kathode, Al) betragen, da Substratfertigungsverfahren in den letzten Jahren deutlich weiterentwickelt wurden. Beschichtungsauftrag und Trocknung können beiderseits die Qualität der Beschichtung beeinflussen.

Die Trocknung ist jedoch gegenüber dem Beschichtungsauftrag geschwindigkeitsbestimmend. Ein Richtwert für die Verweilzeit der Trocknung beträgt ca. 40-80s, die insbesondere von der Nassschichtdicke, dem Feststoffanteil der Suspension und dem verwendeten Lösungsmittel abhängt. Dadurch wird die Durchlaufgeschwindigkeit im Wesentlichen von der Trocknerlänge begrenzt und kann maßgeblich in zukünftigen Produktionsprozessen durch die Trocknungstechnologie in Bezug auf den Durchsatz beeinflusst werden.

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.

Die Beschichtung von Folienober- und Folienunterseite erfolgt in Abhängigkeit der Anlage entweder simultan-beidseitig oder, wie heute noch die Regel, sequentiell (Tandem-Beschichtung). Für einseitige Beschichtungen

können zu Beginn der Trocknung Trägerwalzen anstelle von Luftlagerschwebedüsen eingesetzt werden. Diese ermöglichen eine schonendere Durchwärmung der Beschichtung. Weitere Anforderungen an den Prozess stellt die Vermeidung von Rissbildungen im Beschichtungsmaterial und die Minimierung der Bindermigration zur Schichtoberfläche [Kwade2018b]. Diese entstehen, wenn die Schichten zu schnell, bei 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.

Über Temperaturprofile/Luftgeschwindigkeiten mit verschiedenen Zonen wird eine entsprechend schonende Trocknung realisiert und Entmischungseffekte und Oberflächendefekte verhindert.

Bei der simultan beidseitigen Beschichtung muss ein Kontakt der nassen/feuchten Beschichtung zu den Trägerrollen vermieden werden, wodurch eine Schwebbahn notwendig wird. Vorteil der simultanen Beschichtung gegenüber der sequentiellen Beschichtung ist, dass ein Schüsseln der Elektrode umgangen wird. Mit Schüsseln ist das Hochklappen der Folienränder gemeint. Ursache ist, dass das durch die Trocknung induzierte Schrumpfen der Schicht zu Spannungen zwischen Substrat und Beschichtung führt.

Herausforderungen

Für eine wettbewerbsfähige Elektrodenherstellung im Massenproduktionsmaßstab ist eine Steigerung des Durchsatzes (Kosteneffizienz) derzeit eine der wichtigsten Herausforderungen. Geplante Großfabriken im Gigamaßstab müssen hohe Durchsätze erzielen, um der Nachfrage am Markt gerecht zu werden. Normale Scale-up

Prozesse der konventionellen Trockner stehen hohen Anschaffungskosten und fertigungstechnischen Fragenstellungen gegenüber. So führt eine Verlängerung der Trocknungsstrecke zu Herausforderungen in der Bahnführung, was zu Faltenbildung in den Substraten führen kann. Dies bedeutet, dass aktuelle Trocknerlängen heutzutage vor allem durch die Substrateigenschaften begrenzt sind.

Weitere Herausforderung neben der Erhöhung des Durchsatzes ist die Steigerung der Qualität. Gerade im Hinblick auf hohe Materialkosten 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 In-Line 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 gewünschte Zelleigenschaften erzielt werden. Hierzu ist eine Vor- und Zwischenproduktcharakterisierung notwendig, sodass möglichst frühzeitig eventuelle Produktschwankungen detektiert und Ausschuss vermieden werden kann.

Neben der Erhöhung des Durchsatzes und der Verbesserung der Qualität ist ein verantwortungsvoller Materialeinsatz ein entscheidendes Thema in Bezug auf die Nachhaltigkeit. Hier gilt es Alternativen zu dem giftigen und teuren

Lösungsmittel NMP für die Kathodenbeschichtung zu finden, anlagenseitige Optimierungen vorzunehmen und Ausschuss zu vermeiden. Bis zur Marktreife der lösungsmittelfrei produzierten Elektroden bedarf es zwingend der parallelen Fokussierung auf die Optimierung der Rückgewinnungs- und Abluftreinigungssysteme. In Verantwortung gegenüber der Umwelt sowie nachfolgenden Generationen spielt dies eine erhebliche Rolle.

Lösungsansätze

Die erzielbare Durchsatzsteigerung steht bei allen Ansätzen stets Qualitätsfragestellungen gegenüber. Stabile Prozesse sind zur Einhaltung geringen Ausschusses und der notwendigen Kostenstrukturen zu etablieren und weiter zu optimieren. Grundlegend sind hierzu und andererseits zur allgemeinen Beschleunigung der Trocknung ein optimiertes Prozess- und Anlagenparameter Set-up und detaillierte Kenntnisse der Interaktion von Prozessführung und der erzielbaren Produktqualität (z.B. zur Vermeidung Entmischung/Rissen oder Ausbildung von schlechten Kanten) notwendig.

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 einen kombinierten Energieeintrag, z.B. konvektiv mit IR, zu erweitern. Für den Prozess bedeutet dies, dass die Auftragswerkzeuge der Beschichtungsanlagen an die Verarbeitung extrem 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.

Weitere Alternativen sind PVD-Verfahren oder elektrostatische Beschichtungsansätze. Die Weiterentwicklung von Bindermaterialien ist für hochviskose wie für die Trockenbeschichtung essentiell und auf das Maschinenkonzept abzustimmen. Insgesamt sind sowohl für die Verringerung des Lösungsmittelanteils als auch die Trockenbeschichtung intensive Materialforschungen notwendig [DryLIZ2016]. Erwartet wird eine Massenmarktauglichkeit der Trockenbeschichtung von den Umfragepartnern ab dem Jahr 2025-2030.

Ein grundlegender Beitrag, bei Nassfilmbeschichtungen eine Durchsatzsteigerung zu erreichen, eröffnet die Beherrschung hoher Prozessgeschwindigkeiten von größer 80 m/min bei gleichbleibender Qualität. Dabei stehen die erreichbaren Prozessgeschwindigkeiten im direkten Zusammenhang mit den Beschichtungsverfahren: doppelseitig sequentiell oder simultan, entweder intermittierend oder kontinuierlich. Aus Sicht der Anlagenbauer ist mit einer Steigerung von 50 Prozent der Prozessgeschwindigkeit bis 2025 auszugehen.

Neue Ansätze könnten neben den etablierten Verfahren das Siebdruck- oder Tiefdruckverfahren sein. Zudem ist die Einbeziehung und Ausentwicklung neuer Trocknungsverfahren, wie beispielsweise eine Infrarot- oder Lasertrocknung grundlegend. Durch Kombination der Trocknungsverfahren können Trocknungsgeschwindigkeiten erhöht und somit Verweilzeiten verkürzt werden. Wie Forschungsergebnisse zeigen, kann durch die Lasertrocknung ein effizienterer Energieeintrag und somit ein geringerer Energieverbrauch im Vergleich zu den herkömm-

lichen Trockenöfen erreicht werden. Weiterhin ist eine vor dem Konvektionstrockner geschaltete Lasertrocknung beispielsweise durch VCSEL-Laser denkbar.

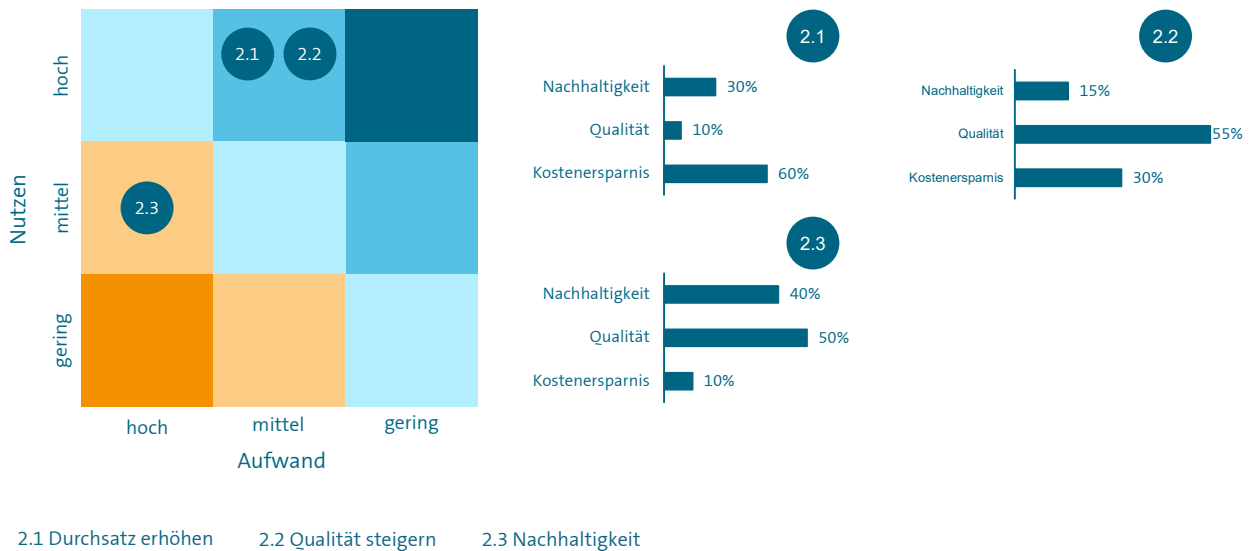
Weitere Potentiale bietet die sequentielle Beschichtung. Damit gemeint ist das „Anrocknen“ der ersten Seite, so dass Trägerwalzen zum Transport eingesetzt werden können. Nach der anschließenden Beschichtung der zweiten Seite kann die Gesamttrocknung beider Seiten simultan erfolgen. Eine Alternative hierzu ist die direkte simultane, doppelseitige Beschichtung zweier Nassschichten. Vorteil ist die hierdurch erreichbare Deckungsgleichheit beider Beschichtungsseiten und die Vermeidung des oben beschriebenen Effektes des „Schlüssels“.

Weitere Anforderungen an den Beschichtungsprozess ergeben sich, wenn zur Durchsatzsteigerung 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 a ca. 500 mm). Die mehrstreifige Beschichtung in diesen Breiten kann in Zukunft möglichst simultan-beidseitig und für bestimmte Elektrodenformate zudem intermittierend umgesetzt werden.

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

Um in Zukunft Elektroden weiter im Hinblick auf die Vereinigung von sehr guter Ladeleistungs-, aber immer noch herausragenden Energieeigen-

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



schaften (Reichweite) zu entwickeln, werden Mehrlagenbeschichtungen immer weitreichender angewendet. Hierzu können Mehrschlitzdüsen verwendet werden. Bisherige Trocknungsprozesse nutzen vor allem die konventionelle konvektive Trocknung.

Herausfordernd ist eine sinnige Kombination verschiedener Trocknungsverfahren (z.B. Konvektion und IR) zur Steigerung der Trocknungsgeschwindigkeit. Eine einfachere Verlängerung des Trockners ist an dieser Stelle kaum möglich, da aufgrund der Trägerfolie die Trocknerlänge begrenzt ist..

Weiterhin 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 Düsenpalt 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 potentielle Qualitätsvermindernde Schwankungen detektieren und dem entsprechend in den Prozess eingreifen. Durch das Etablieren von Cyber-physischen Systemen, also der direkten Auswertung von inline gemessenen Daten, können Handlungsempfehlungen ausgegeben oder diese Daten als Prädiktor für die Erstellung eines digitalen Zwillings genutzt werden.

Ein verantwortungsvoller Materialeinsatz ist ein entscheidendes Thema in Bezug auf die Nachhaltigkeit. Aufgrund der hohen Materialkosten und des schlechten ökologischen Fußabdrucks ist die Vermeidung von Ausschuss unabdingbar. So können z.B. beim Einrichten der Beschichtungslinien kamerabasierende Regelungssys-

teme 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 können mit der oben beschriebenen Oberflächeninspektion und der darauf basierenden Zuordnung der Fehler rasch in den Prozess eingegriffen werden und Ausschuss vermieden werden. Eine zusätzliche automatische Close-Loop-Schichtdickenmessung würde ein nahezu vollautomatisiertes Einrichten einer Beschichtungslinie ermöglichen.

Durch den Einsatz von NMP als Lösungsmittel für die Kathodenbeschichtung, welches neben hoher Toxizität mit hohen Kosten verbunden ist, ist die sinnige Konsequenz, Lösemittelanteile zu reduzieren oder gar zu vermeiden, welches wiederum die Energiekosten reduziert und zur Minimierung des CO2 Footprints beiträgt. Wenn NMP eingesetzt wird, sollte die energieeffiziente, nahezu vollständige Rückgewinnung des Lösungsmittels als Ziel verfolgt werden.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Aufwand zur Optimierung des Durchsatzes wird „mittel“ eingeschätzt bei einem gleichzeitig hohen Nutzen. Die Durchsatzerhöhung spielt eine immer wichtigere Rolle in der

Batterieproduktion und kann die Kosten dieser entscheidend verringern. Eine Chance zur Durchsatzsteigerung und Kostensenkung, aber auch ein gesteigerter hoher Entwicklungsaufwand, bietet der Einsatz innovativer Trocknungstechnologien (IR-, Laser oder auch Kontakt Trocknung) sowie die Trockenbeschichtung und Weiterentwicklung simultaner Beschichtungsverfahren.

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.

Zur Steigerung der Nachhaltigkeit wurden Ideen zu alternativen Trocknungsverfahren, Trockenbeschichtung zur Lösemittelreduktion oder -vermeidung diskutiert. Zur Umsetzung dieser wird der Aufwand mit hoch eingeschätzt, bei gleichzeitigem mittlerem Nutzen. Bei einer Steigerung der Nachhaltigkeit wird von einer hohen Kostenersparnis ausgegangen. Grund ist vor allem eine Reduzierung des Ausschusses sowie die der Energiekosten.

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Christian Werner, Regionaler Vertriebsdirektor, KROENERT GmbH & Co KG;
Andreas Keil, Director Business Development, Dürr MEGTEC Systems SAS

Mit weiterer Unterstützung von:

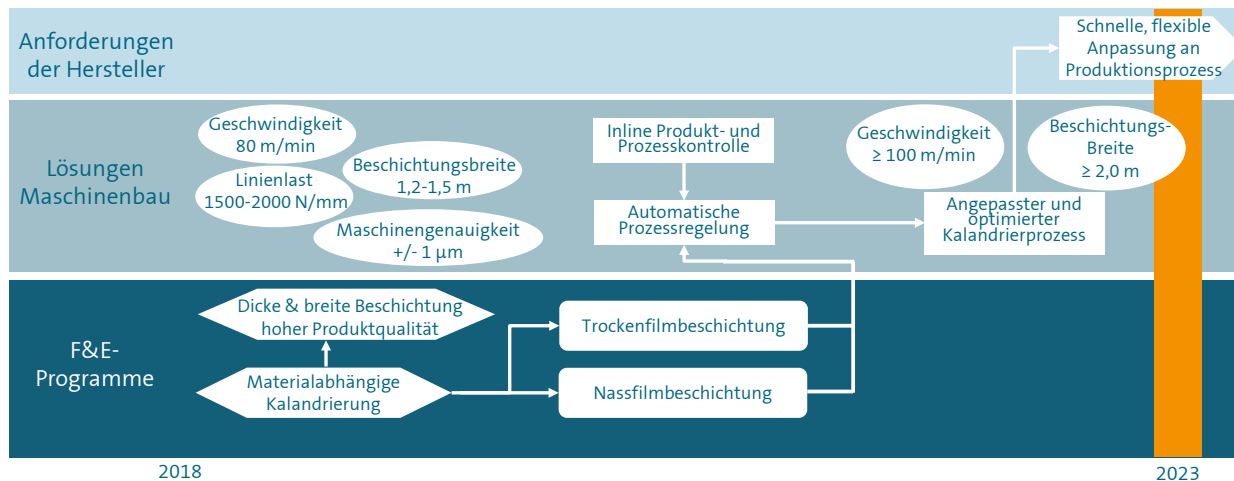
Achenbach Buschhütten GmbH & Co. KG
BST eltromat International GmbH
Coatema Machinery GmbH
Erhardt+ Leimer GmbH
Gebrüder Becker GmbH
Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH
MainTech Systems GmbH
Maschinenbau Kitz GmbH
Siemens AG
Smit Thermal Solutions B.V.
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
VITRONIC Dr.-Ing. Stein
Bildverarbeitungssysteme GmbH

Kalandrieren

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
3.1	Schnelle flexible Anpassung an neue Materialien	Fortschritt erzielt	Hoch	2023
3.2	Durchsatzsteigerung: Erhöhung der Geschwindigkeit ohne Qualitätsauswirkungen	Fortschritt erzielt	Hoch	2025
3.3	Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften und einheitliche Schichtstrukturen bei immer größeren Bahnbreiten	Fortschritt erzielt	Hoch	2025

RBW 3.1: Kalandrieren – Schnelle, flexible Anpassung an neue Materialien

Erlangung von Prozessverständnis insb. zu Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zur optimalen Anlagenauslegung (z.B. Kalandrierung v. dicken Elektroden). Steigerung der Dichte bei gleichzeitiger Erhöhung der Energiedichte (el. vs. ionische Leitfähigkeit). Wechselwirkung mit anderen Prozessschritten beachten, um optimale Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Überwachung der Prozessparameter (bspw. Kraft- statt spaltgesteuerte Kalandrierung). Direkte kontinuierliche Kalandrierung nach bspw. Trockenbeschichtung.



Legende: ○ State of the Art ◁ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 3: Kalandrieren

Grundlagen

Die Kalandrierung (kontinuierliche Walzenverdichtung) ist der abschließende Prozessschritt der Elektrodenfertigung und ist damit als „Quality Gate“ zur Übergabe in die Zellfertigungsprozesse von besonderer Bedeutung. Während des Kalandriervorgangs werden die Partikel der porösen Beschichtung durch Druck- und Schubkräfte umgelagert. Die zunächst nach der Beschichtungstrocknung etablierten elektrischen Perkolationspfade und mechanische Polymer-Binderverknüpfungen (Feststoffphasen der Elektrode) werden aufgebrochen und es findet eine Neueta-blierung der Partikel-Partikel- und Partikel-Binderkontakte statt, wodurch die finale Porenstrukturverteilung definiert wird. Aufgrund dessen existieren Wechselwirkungen mit den vorgelagerten Prozessen der Suspensionserstellung und Schichtdarstellung.

Grundlegend definiert der Verdichtungsprozess final alle zentralen Elektrodeneigenschaften wie die Energie- und Leistungsdichte, die Zyklenstabilität sowie die korrelierenden physikalischen Beschichtungseigenschaften wie strukturelle und elektrische Eigenschaften, welche die Elektronen- und Ionentransportprozesse bestimmen. Zentrale Anforderung bezüglich klassischer Flüssigelektrolyt-Batterien für Elektroautos ist die Realisierung möglichst hoher Energiedichten (Reichweite) bei gleichzeitiger Schnelllademöglichkeit (Dichten: Kathode $> 3,2 \text{ g/cm}^3$; Anode $\geq 1,3 \text{ g/cm}^3$). Bei Graphit- und insb. bei Graphit-Silizium Anoden sind hohe Verdichtungen in Bezug auf die Energiedichte nicht so entscheidend wie bei der Kathode, weil materialeitig deutlich höhere Kapazitäten eingebracht werden. Oft wird moderater verdichtet, um Ionen-diffusionslimitierungen zu vermeiden. Ein wesentliches Ziel der Verdichtung ist die Einstellung mechanisch vorteilhafter Beschich-

tungseigenschaften zur Kompensation der Belastung in den Fertigungsprozessen bzw. der Schichtatmung der Elektroden bei elektrochemischer Zyklisierung.

Herausforderungen

Um eine schnelle, flexible Anpassung an neue Materialien und eine Prädikation der Elektrodenperformance nach der Kalandrierung zu ermöglichen, ist das Verständnis der Material-Prozess-Wechselwirkungen entscheidend. Von diesen Materialabhängigkeiten sind wiederum die Prozess-Wechselwirkungen der Kalandrierung mit von den vorgelagerten Prozessen abhängig. Beim Trocken- und Nassmischen werden die Leitruß-Strukturen, deren Dispersitätsgrad sowie die Strukturierung der Leitruße mit Aktivmaterial und dem Binderpolymer definiert (vgl. Abbildung unterhalb). Diese hat direkten Einfluss auf die erzielbare Beschichtungsstruktur, den Ladungstransport und die Linienlastaufnahme der Elektrode im Kalandrierprozess. Mit Relevanz für die Lebensdauer der Zelle und die Verarbeitungseigenschaften im Zellbau werden zudem mechanische Eigenschaften der Elektroden (Haftung zum Substrat, Schichthomogenität, Verformbarkeit, Elastizität, Eigenspannungen) maßgeblich verändert. Derartige Zusammenhänge sind in allgemeingültige Material/ Prozess-Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zu überführen, um für neue Materialien in Zukunft schneller optimale Funktionsstrukturen für eine spezifische Anwendung einstellen zu können (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, 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 daher schonendere Verdichtungs Vorgänge verbunden. Weiterhin vergrößern hohe Flächenbelastungen den Einzugsbereich und damit die Beanspruchungsfläche, bei konstantem Walzendurchmesser und erhöhen die Verdichtungsintensität. Hohe Durchsatzgeschwindigkeiten erhöhen im Einzugsbereich 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 Walztemperatur die Verformung des Binderpolymers begünstigen und die erforderliche Linienlast bei Kathoden verringert werden. So können Elektrodenverformungen („Schüsseln“) als Folgeprobleme aufgrund mechanischer 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, um eine ausgeprägte Dehnung beim Kalandrieren zu vermeiden. Besonders entscheidendes Qualitätsmerkmal einer Kalandranlage ist die Konstanz der Soll-Spaltgröße bei hohen Durchsatzgeschwindigkeiten, dicken Elektroden und hohen Linienlasten bei Kathoden, die durch hohe mechanische Verdichtungsspannungen und einhergehende Verformung des Walzenstuhls eine Aufweitung des realen Spaltes bedingt (Ist-Spalt) und somit die Verdichtungsfähigkeit eines Kalenders einschränken kann.

Eine möglichst geringe Abweichung zwischen Ist- und Soll-Spalt ist, neben der oben diskutierten geeigneten Leitrußstruktur, entscheidend zur Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften (RBW 3.3), da beiderseits die Homogenität der Schichtstrukturen auf Mikrolevel beeinflusst wird. Zielstellung ist eine homogene Verteilung der Elektronen- und Ionenstromdichten, auch bei großen Breiten der Elektroden. Speziell wird eine geringe Varianz

der Ionentransporthosts (die mit Elektrolyt befüllte Hohlraumstruktur) und damit ein effektiver Diffusionskoeffizient des Elektrodenmaterials angestrebt. Herausfordernd ist dies in Bezug auf die Maschinentechnik bei hohen Beschichtungsbreiten von bis 1,5 m (Anode) und bei bis zu 2,2 m (Kathode), da die Durchbiegung der Walzen möglichst gering zu halten ist und große Walzendurchmesser erforderlich sind. Hinzukommen Abweichungen durch Verformung in Lagern oder die des Walzenstuhls. Globale Zielstellung ist eine Maschinengenauigkeit von mindestens $\pm 1 \mu\text{m}$. Die erzielbare Genauigkeit im Produkt sollte parallel in-Line überwacht und 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 hierbei kombiniert mit der Schichtdicke in die Gesamtkonzepte 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 Mischprozesse mit der Kalandrierung entscheidend. Bei adäquatem Know-how ist eine Anpassung der Prozess- und Maschinentechnik wissensbasiert an neue Material- und Zellgenerationstypen in der Industrie schneller und ökonomischer durchführbar. Zur Erwirtschaftung des Material-Know-hows einerseits und zur Einhaltung der hohen Produktqualitäten andererseits ist die Instrumentierung der Kalandrieranlagen mit weiterer und verbesserter in-Line Messtechnik erforderlich.

Für eine Durchsatzsteigerung ohne Qualitätsauswirkungen und ebenfalls Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften ist die mechanische Vorspannung der Substrate, eine temperierte Kalandrierung mit Vorheizstrecke oder/und beheizbare Walzen vorzusehen, um Effekte wie das „Schüsseln“ – ein eigenspannungsbedingtes Verziehen und Hochwellen der Elektrode – bei hohen Linienlasten für Kathoden zu vermeiden. Unter Temperatureinwirkung können die erforderlichen Linienlasten zur Einstellung identischer Elektrodendichten reduziert werden, jedoch sind die erhöhten Verformungen der Maschine und Veränderungen des Ist-Spaltmaßes zu berücksichtigen.

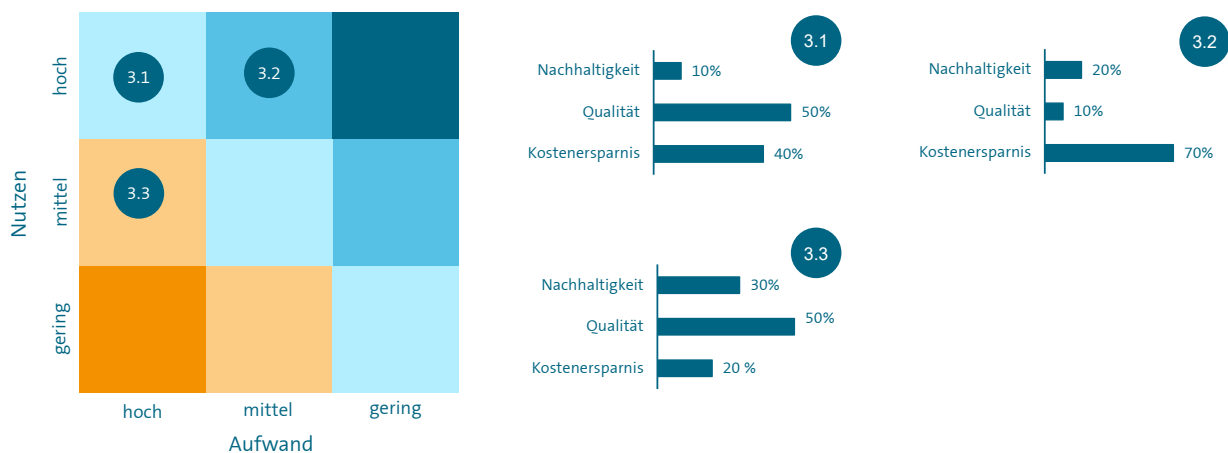
Ein alternativer Ansatz zur grundlegenden Vermeidung des Schüsselns – insbesondere bei sehr dicken Elektroden – sind 2-schrittige Verdichtungsprozesse, die vorteilhaft in einer Maschineneinheit umzusetzen sind. Hierbei kann die Verdichtung des Beschichtungsfilms auf einer Polymerfolie erfolgen, wobei danach über ein Laminierprozess die Übertragung auf eine Metallfolie erfolgt. Um die Produktionseffizienz im Zellbau im Sinne der Handhabung weniger Einzelteile, weiter zu steigern, kann in derselben Maschine zudem die Laminierung eines Separators auf die Elektrodenbeschichtung erfolgen.

Eine geringe Verformung des Kalenders (Stuhl und Walzen) ist maschinenseitig zwingend erforderlich, um einen möglichst geringen Unterschied von Soll- und Ist-Spaltmaß zu gewährleisten. Als wichtige Maßnahme ist in erster Linie die kontinuierliche Erfassung des realen Ist-Spaltmaßes direkt zwischen den Kalenderwalzen zu realisieren. Die Nutzung dieser Messgröße als Prozessqualitäts- und Prozessregelgröße ist daher 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. Sofern dies gegeben ist, eröffnen sich „in-production research“ Konzepte, um stetig den Produktionsprozess und das spezifische Produkt weiterentwickeln zu können. Um eine möglichst genaue und exakte Qualitätserfassung und Prozesssteuerung am Quality Gate zu den Zellfertigungsprozessen zu ermöglichen, sollten weitere Qualitätsmessgrößen kombiniert mit der Schichtdicke und Linienlast in das Gesamtmesskonzept einbezogen werden. Eine Fehlerdetektion sollte nach dem Beschichten und nach dem Kalenderspalt erfolgen sowie über ein Trackingsystem verknüpft werden. So können Beschichtungsfehler direkt oder nach Sichtbarwerdung 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 generiert werden. Der unmittelbare Nutzen wären hohe Standzeiten der Walzen (Werkzeugschutz) und 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 einerseits eine gezielte Leitrußstrukturierung mit Aktivmaterial und Binder voraus. Zum anderen ist maschinen- und analagenseitig eine intelligente Konstruktion notwendig, um Verformungen während der Verdichtung bei hohen Linienlasten zu minimieren. Ein geeigneter Ansatz können Roll-Bending-Systeme sein, um Kräfte effektiv abzuleiten.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



3.1 Schnelle, flexible Anpassung 3.2 Durchsatzsteigerung 3.3 Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften

Ein weiteres zentrales Thema ist die Befähigung der Kalender 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.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Aufwand für eine geeignete Anlagenauslegung und Maschinenkonstruktion ist als hoher Entwicklungsaufwand einzustufen. Erschwerend ist die Auslegung der Anlagentechnik die von material-, rezeptur- und der prozess-induzierten Elektrodenstruktur (Leitrußstruktur, Mischprozessen) abhängig ist. Know-how zu Material-/Prozess-Struktur-

Eigenschaftsbeziehungen und eine eingehende In-Line Prozesskontrolle kann daher als sehr relevant zur Maschinenentwicklung angesehen werden. Da dies die Voraussetzung für eine schnelle und flexible Anpassung an neue Materialien ist, wird der Aufwand für RBW 3.1 als hoch eingestuft.

Eine Durchsatzsteigerung ohne Qualitätsauswirkungen (RBW 3.2) sowie die Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften und einheitlicher Schichtstrukturen bei immer größeren Bahnbreiten (RBW3.3) sind durch eine geeignete Konstruktion und Kraftaufnahme maschinenseitig erzielbar, da die Verformung der Maschine (Walzen, Walzenstuhl, Lager etc.) vermieden und der Soll-Walzenspalt besser eingehalten werden kann. Basierend auf bestehende Studien kann eine Geschwindigkeitserhöhung und damit eine Durchsatzstei-

gerung relativ leicht ohne Einfluss auf die Qualität erzielt werden, weshalb die RBW mit einem mittleren Aufwand bei hohem Nutzen bewertet wird.

Die RBW 3.3 zur Sicherstellung homogener elektrochemischer Eigenschaften und einheitlicher Schichtstrukturen bei immer größeren Bahnbreiten bedingt einen höheren Messaufwand und ist schwierig kontinuierlich in der Produktion zu erfassen. Eine direkte Spaltmaßerfassung sowie dessen Nutzung als Prozessqualitäts- und -steuerungsparameter sowie in-production research Konzepte können daher diesbezüglich als zielführend eingestuft werden. In Bezug auf die breiteren Kalandrierwalzen ist zudem der konstruktive Aufwand deutlich höher und es ergibt sich nach Bewertung der beiden Kriterien ein hoher Aufwand bei mittlerem Nutzen. Durch eine geeignete Konstruktion und Kraftaufnahme ist daher als Fazit eine insgesamt wettbewerbsüberlegene Kalandrier-Anlagentechnologie erzielbar.

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Frank Bogenstahl, R&D Engineering, Matthews International GmbH (Saueressig)

Mit weiterer Unterstützung von:

Achenbach Buschhütten GmbH & Co. KG

BST eltromat International GmbH

Erhardt+Leimer GmbH

Gebr. Becker GmbH

Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH

Siemens AG

TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH

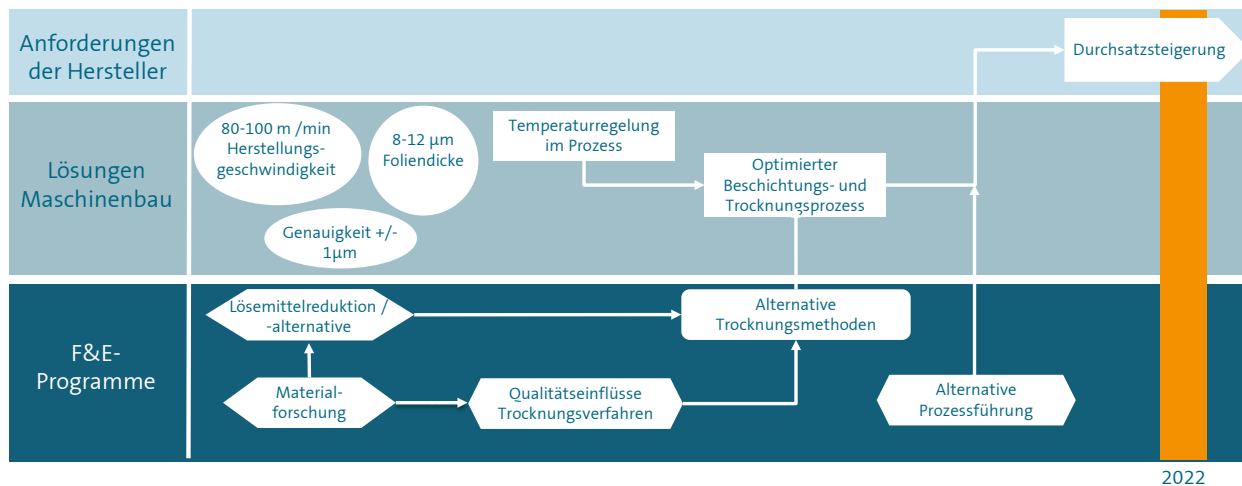
VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH

Separatorproduktion

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz für Separatorhersteller	Timeline***
4.1	Durchsatz erhöhen: High Volume Production	**	Hoch	2022
4.2	Qualitätskontrolle / Beschichtungsgüte	**	Hoch	2025
4.3	Verringerung der Separatorfoliendicke / Verbesserung Folienhandling	**	Hoch	2025
4.4	Nachhaltigkeit und Umweltschutz	**	Hoch	2022

RBW 4.1: Separatorproduktion – High Volume Production

Eine schnellere, qualitativ hochwertige Herstellung des Separators sowie eine optimierte Prozessführung ermöglichen eine Durchsatzsteigerung zur Bedienung des Marktbedarfs. Optimierte Prozessbedingungen und Minimierung des Energieaufwands bei der Trocknung beschleunigen die Produktion und verringern den notwendigen Energiebedarf. Das Prozessmonitoring zur Überwachung der Produktionsqualität erfordert eine Integration in die Prozesse, um eine direkte Steuerung sowie qualitativ hochwertige Produkte zu garantieren.



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

*Priorität der RBW nimmt von oben nach unten ab

**Thema wurde in der Roadmap 2018 nicht adressiert

***Timeline gibt an, wann der Durchbruch erfolgen sollte (Betrachtet wird die Zeitschiene bis 2035)

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

RBW 4: Separatorproduktion

Grundlagen

Für die Produktion und den Betrieb von Lithium-Ionen Batteriezellen (LIB) ist der Separator ein entscheidendes Bauteil, welches Performanceeigenschaften und die Sicherheit einer Zelle maßgeblich beeinflusst.

Heutige großtechnisch etablierte Separatorvarianten basieren zumeist auf Membranen auf Polyolefinbasis, die aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) sowie mehrlagigen Verbänden aus den genannten Polymeren bestehen und im sogenannten „Wet-Prozess“ hergestellt werden. Zur Verbesserung der Sicherheits- und Benetzungseigenschaften können zusätzlich keramische Schichten aufgebracht werden. Anlagen mit Produktionsvolumen im Millionen m² p.a. stehen zur Verfügung (Marktanteil von ca. 90 Prozent auf dem Lithium-Ionen Batteriemarkt).

Technisch deutlich differenziert sind vollkeramische Separatoren am Markt erhältlich, die ein für die Herstellung relevantes und strukturgebendes Netz aus Polyethylenterephthalat (PET-Vliesstoff) besitzen und mit Keramik aus Al₂O₃ oder mit hybriden Mischungen aus Al₂O₃ und SiO₂ versehen sind. Die Produktionsvolumen beschränken sich hierbei auf sehr viel kleinere Mengen, da diese Separatoren bisher vornehmlich für spezielle Anwendungen verwendet werden.

Die Funktionen und Herausforderungen, die ein Separator erfüllen muss, sind dabei vielseitig. Als Hauptaufgabe im Sinne der Zellfunktion erfüllt der Separator die elektrische Trennung von positiver (Kathode) und negativer (Anode) Elektrode und zugleich die ionische Verbindung beider über dessen elektrolytgefüllte Hohlraumstruktur. Darüber hinaus muss der Separator mechanisch und strukturell stabil sein, um einerseits die Fertigungsprozesse ohne Ausprägung von Fehlstellen und zum anderen mechanischen

Einwirkungen zu widerstehen. Dies können beispielsweise mechanische Spannungen durch Fremdpartikel als auch mechanische Belastungen, induziert durch Temperaturen, sein. Zudem muss der Materialschrumpf des Separators im Temperatur-Betriebsfenster der Anwendung minimal sein und die Temperaturstabilität beim Durchgehen der Zelle und den dabei deutlich erhöhten Temperaturen (> 150°C, besser > 200°C) sicherheitstechnisch gegeben sein.

Die Produktion von Separatoren findet meist in einem zweistufigen Prozess statt. In einem ersten Schritt werden die Basismembranen bzw. das PET-Vlies hergestellt. Im weiteren Prozess können diese mit Funktionalisierungen, bspw. einer zweiten Polymermembran oder keramischen Beschichtungen versehen werden.

Die Herstellung der Basismembran findet größtenteils im „Wet-Prozess“ statt. Dabei werden zuerst die eingesetzten Polymere mit Hilfe eines Doppelschneckenextruders unter Verwendung von großen Anteilen Mineralöl (70-80 Prozent) aufgeschmolzen, mittels Breitschlitzdüse extrudiert und nachfolgend abgekühlt. Hierbei ist eine möglichst flächige und gleichmäßige Abkühlung wichtig. Im Folgenden wird die Folie biaxial zur Erreichung der Zielfolienbreite verstreckt. Die Verwendung von Mineralöl ist nötig, um das hochmolekulare PE in einem extrudierbaren Viskositätsbereich verarbeiten zu können. Um ein möglichst reines Produkt zu erhalten, wird mit Hilfe von einem Extraktions- und Trocknungsschritt das eingesetzte Mineralöl unter Verwendung von Dichlormethan (DCM) entfernt. DCM wird dabei aufgrund der guten Löslichkeit der Mineralöle sowie des niedrigeren Siedepunktes (39,8 °C) verwendet. Zudem ist DCM nicht entzündlich. DCM besitzt jedoch auch eine stark klimaschädliche sowie toxische Wirkung. Polyestervliese hingegen werden aus geeigneten Kunstfasern mit Hilfe eines Papierlegeprozesses hergestellt. Die unter Umständen noch folgende Beschichtung von Basisfolie oder

PET-Vliesen mit keramischen Schichten wird über eine Gravurwalze aufgetragen. Das verwendete Lösemittel wird im Nachgang über einen thermischen Trocknungsschritt entfernt.

Herausforderungen

Für eine wettbewerbsfähige Herstellung von Separatoren im Massenproduktionsmaßstab (Millionen m² p.a. Maßstab) sind vollautomatisierte Produktionsabläufe, eine hohe Effizienz (geringe Fehlerraten), eine ausgeprägte Prozessintegration, sowie die Kenntnis von Wirkzusammenhängen essentiell.

Zudem muss die gleichbleibend hohe Qualität der Basismembran sowie alternativ der Beschichtung gewährleistet sein, da dies direkte Auswirkungen auf die Produktionsprozesse, die Separatorspezifikation und schlussendlich auf die Sicherheit der Batteriezellen hat (RBW4.2). Um als etablierte Lieferquelle im Massenmarkt der elektromobilen Kleinfahrzeuge auf dem Weltmarkt beachtet zu werden, sind Produktionsvolumen von mehreren Millionen m² notwendig.

Für die angestrebte Position Deutschlands bzw. Europas als Leitmarkt in der Batterieproduktion ist die Erhöhung des Durchsatzes sowie die Ansiedlung von produzierenden Unternehmen unerlässlich. Zudem stellen die hohen Anforderungen der europäischen Union sowie Deutschlands an die Nachhaltigkeit sowie Umweltfreundlichkeit von Prozessen eine Hürde und zugleich Chance dar (RBW 4.3).

Der Durchsatz der Anlagentechnologie muss aus diesem Grund zukünftig gesteigert werden, um den geforderten Produktionsvolumen der Batteriehersteller gerecht zu werden (RBW 4.1). Aktuelle Technologien in der Herstellung der Basisfolien (z.B. Polyethylen) erlauben Ge-

schwindigkeiten von 50 – 60 m/min bei Produktionsbreiten von ca. 4,5 m. Zukünftig müssen beide Produktionsparameter weiter gesteigert werden, um den Bedarf zu decken.

Die Herstellung von funktionalisierenden Beschichtungen der Basisfolie bzw. vliesbasierten Separatoren (vollkeramisch) wird in signifikant kleinerem Umfang durchgeführt. Auch bei diesen Technologien, insbesondere für spezielle Anwendungen, muss eine Steigerung der Produktionsvolumina erreicht werden, um den Marktbedarf nachhaltig zu decken.

Mit Steigerung der Volumina darf die erhöhte Produktionsgeschwindigkeit jedoch keinen negativen Einfluss auf den Energiebedarf und die hohen Anforderungen der Produktqualität haben, die an den Separator gestellt werden.

Zur Erreichung dieses Ziels sind die Etablierung von Echtzeit-Inline-Messtechniken zur Kontrolle des Produkts sowie zur direkten Prozessregelung, neben einer strengen Rohstoff- und Zwischenprodukt-Eingangskontrolle, notwendig.

Bisherige Prozesse zur Produktion der Separator-Basisfolie nutzen Lösemittel mit geringer Umweltverträglichkeit, wobei die Rückgewinnungsquote weiter vergrößert werden muss. Generell steht auch die Frage der weiteren Nutzung und Entwicklung von Separatoren, insbesondere mit recycelten und nachwachsenden Rohstoffen (auch Polymere), im Raum.

Zur Erhöhung der gravimetrischen sowie volumetrischen Energiedichte müssen die Foliendicken weiter verringert werden (< 16 µm (12 µm Basisfolie + 4 µm Coating), perspektivisch 8-10 µm (5-7 µm Basisfolie + 3 µm Coating)). Heutiger Standardseparator hat eine Schichtdicke von ca. 16 µm und besteht wie beschrieben aus mehreren Lagen bzw. einer aufgetragenen Beschichtung. Die größte Herausforderung bei den dünneren Folien ist die gleichbleibende

hohe Qualität aller Komponenten, um die hohen Anforderungen der Zellsicherheit zu garantieren. Weiter wird das Handling der Folien mit abnehmender Dicke schwieriger (RBW 4.4).

Lösungsansätze

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. Zudem sollte eine kritische Endproduktkontrolle durchgeführt werden, um die größtmögliche Sicherheit und die Einhaltung der finalen Produkthanforderungen zu gewährleisten.

Die Produktionsgeschwindigkeit der Basisfolie muss zur effizienten Steigerung des Durchsatzes ohne Auswirkungen auf die Qualität auf eine Geschwindigkeit von mindestens 80 m min^{-1} und Breiten von $> 6 \text{ m}$ angehoben werden. Dies ermöglicht die Produktion von „Mutterrollen“ mit größerer Produktkapazität bei gleicher Rollenlänge.

Um wettbewerbsfähige Produktionen von Beschichtungen der Basisfolie sowie vliesbasierten keramischen Separatoren zu betreiben, muss auch hier die Geschwindigkeit der Beschichtung erhöht werden. Die Breite von geeigneten Beschichtungsanlagen sollte deutlich über einen Meter erweitert werden, um nachfolgend effektiv in schmalere, passende Rollenbreiten für die Anwendung in der Batterieassemblierung konfektioniert werden zu können.

Durch die Durchsatzerhöhung könnte der angestrebte Separatorbedarf der zukünftig leistungsfähigeren Zellproduktionslinien kosteneffizient und nachhaltiger gedeckt werden.

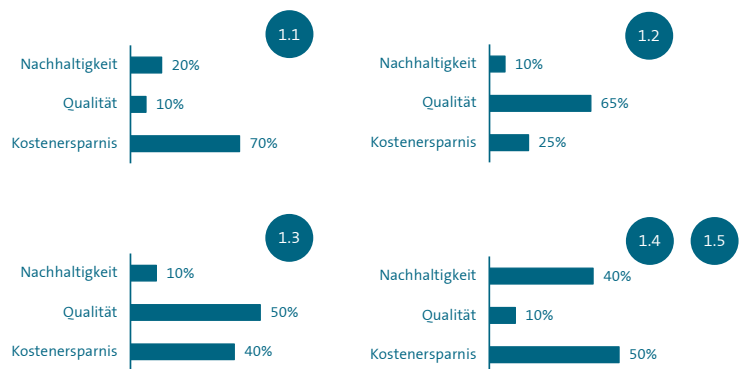
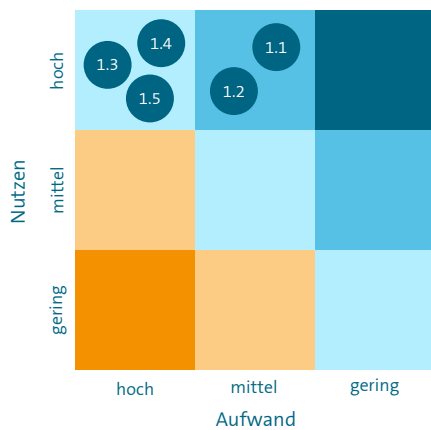
Ein besonderes Augenmerk sollte zudem bei der Separatorproduktion auf der zukünftig geforderten dünneren Separatordicke liegen. Anlagen müssen noch genauer ausgerichtet werden und Prozesse dürfen kein Reißen der Separatorfolie verursachen. Zudem gilt es elektrische Ladungen für ein gutes Handling zu entfernen bzw. zu vermeiden.

Für ein vereinfachtes Handling, insbesondere eine Qualitäts- (z.B. Ausrichtung bzw. Überlappgenauigkeit des Separators zwischen den Elektroden) und Effizienzsteigerung durch weniger Einzelteilhandling in der Zellfertigung, ist die Lamination des Separators mit einer Elektrode ein zentrales, mit dem Separator gekoppeltes Themenfeld in der Industrie.

In den kommenden Jahren spielt zudem die Reduktion des Lösemittelbedarfs bei der Produktion und die Verringerung des Energiebedarfs eine wesentliche Rolle, um der „grünen“ Batterie gerecht zu werden. Durch Prozesstechnologien wie die Extrusion können Lösemittelbedarfe für Beschichtungen und Folienherstellung verringert werden. Die Prozesse und Anlagen sollten so ausgelegt werden, dass unkritische Lösemittel, bestenfalls Wasser, genutzt werden.

Des Weiteren stellen auch grüne Polymere, die aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden, ein großes Potential für die Herstellung von Separatoren. Dieser Zweig wird in Zukunft eine immer größere Bedeutung gewinnen und ermöglicht eine Reduktion des ökologischen Fußabdrucks, da der Separator in großen Mengen in Zellen verbaut wird. Für neue Separatortechnologien müssen bestehende Anlagen anpassbar und umrüstbar ausgelegt werden.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



4.1 Durchsatz erhöhen

4.2 Qualitätskontrolle

4.3 Verringerung der Foliendicke

4.4 Umweltschutz / Nachhaltigkeit

Aufwand- und Nutzenbewertung

Die Erhöhung des Durchsatzes bei der Separatorproduktion bewirkt eine größere Wirtschaftlichkeit sowie eine stabilere kontinuierliche Produktion, wodurch sowohl die Kosten gesenkt als auch die Qualität durch weniger Produktwechsel erhöht werden können. Für die Produktion bzw. die produzierenden Unternehmen hat dies einen hohen Nutzen, der mit einem mittleren Nutzenaufwand verbunden ist.

Die Qualitätskontrolle der Beschichtungsgüte und weiterer Produktparameter gilt im Allgemeinen für die Zukunft als sehr relevant, da sie aufgrund der bereits genannten Vorteile bei mittlerem Aufwand einen hohen Nutzen haben. Die Integration von Inline-Prozess- und Produktmonitoring stellt je nach überwachten Parametern einen mittleren bis hohen Aufwand dar. Jedoch können so bereits beim Herstellungsprozess bzw. bei den Eingangsmaterialien kritische

Qualitätsparameter überprüft werden, damit die finalen Zellanforderungen und besonders die Zellsicherheit eingehalten werden können. Da somit Ausschuss und Effizienz dieser Prozessschritte verbessert werden, ist der Nutzen als sehr hoch zu bewerten.

Als wichtigste zu überwachenden Größen sind die Temperatur, die Schichtdicke sowie die Schichtgüte zu nennen. Hauptsächlich ist es dadurch möglich die Kosten für das Produkt zu senken sowie die Qualität zu steigern bzw. auf dem gleichen Niveau zu halten.

Für zukünftige Zelltechnologien wird die Verringerung der Separatorfoliendicke sowie die Verbesserung des Folienhandling angestrebt. Mit dieser Verbesserung wird eine Erhöhung der volumetrischen, aber auch gravimetrischen Energiedichte erreicht. Der Aufwand zur Umsetzung wird als hoch bei gleichzeitig hohem

Nutzen eingeschätzt. Diese Technologie der Verringerung der Foliendicke ermöglicht es sowohl die Kosten signifikant zu senken als auch die Qualität der Membran zu steigern, da Membranfehler einen stärkeren Einfluss auf die Zellperformance haben können. Zudem wird weniger Material verwendet, wodurch im Allgemeinen die Nachhaltigkeit bzw. Ressourceneffizienz verbessert wird.

Mit fortschreitender Erfahrung mit dem Produkt Batterie und allgemeingültigen gesetzlichen Vorgaben rückt die Nachhaltigkeit bzw. der Umweltschutz bei Produktionsprozessen ins Augenmerk. Aufwändige und teilweise kritische Herstellungsprozesse müssen durch Alternativen und alternative Prozessführungsrouten mit unkritischen Edukten ersetzt werden. Die Verwendung von organischen Lösemitteln sollte vermindert bzw. gänzlich vermieden werden. Der Aufwand zur Realisierung wird als hoch eingeschätzt, wobei der Nutzen für den Separatorhersteller im mittleren Bereich zu sehen ist. Vorrangig wird dadurch die Nachhaltigkeit signifikant gesteigert. Bei Ersetzung von teuren Edukten ist zudem denkbar, dass die Produktionskosten des Produkts Separator gesenkt werden können.

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Dr. Christoph Weber, Head of Lithium Ion Battery Separators, Freudenberg Performance Materials SE & Co KG;
Karl Zimmermann, Director Sales & Marketing
Dr. Thomas Knoche, Research & Development
Brückner Maschinenbau GmbH & Co. KG

Mit weiterer Unterstützung von:

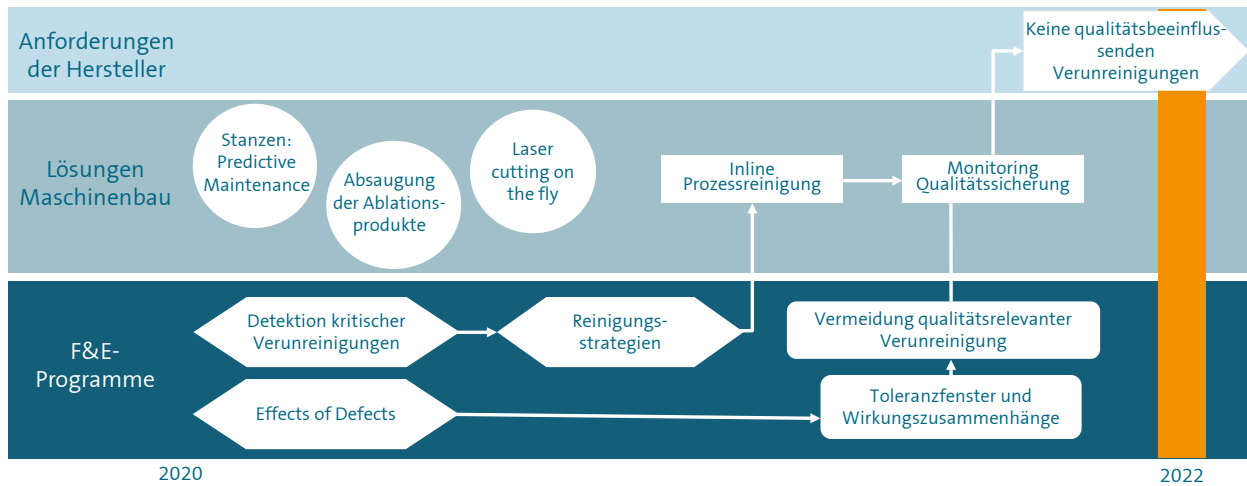
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
VITRONIC Dr.-Ing. Stein
Bildverarbeitungssysteme GmbH
SIEMENS AG
NETZSCH-FEINMAHLTECHNIK GMBH
Maschinenfabrik Gustav Eirich GmbH & Co. KG
KROENERT GmbH & Co KG
GEBR. LÖDIGE Maschinenbau GmbH
Erhardt + Leimer GmbH
BST GmbH

Vereinzeln

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
5.1	Qualität und verlässliches Monitoring	Fortschritt erzielt	Hoch	2022
5.2	Verbesserung der Taktzeit durch produktivere Handhabungssysteme	Fortschritt erzielt	Hoch	2023
5.3	Qualitätssicheres Vereinzeln von Elektroden mit hoher Beschichtungsdicke	Fortschritt erzielt	Hoch	2024
5.4	Hohe Schnittkantenqualität	Fortschritt erzielt	Mittel	2022

RBW 5.1: Vereinzeln — Qualität und verlässliches Monitoring

Im Vereinzelungsprozess entstehende Rückstände können aufgrund ihrer Größe Kurzschlüsse in der Zelle verursachen. Die Partikelgröße variiert mit der Vereinzelungstechnologie. 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, konkrete 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 2035)

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

RBW 5: Vereinzeln

Grundlagen

Beim Vereinzeln werden aus den Elektroden-/ Separatorencoils einzelne Anoden-, Kathoden und Separator sheets herausgetrennt. Der Prozess kann durch Stanzen mittels Schermesser oder Schneiden mittels Laserstrahlung erfolgen. Mit Hilfe des Stanzprozesses lassen sich aktuell bereits sehr saubere Schnittkanten realisieren. Aufgrund der Abnutzung des Werkzeugs kann es zu einer mechanischen Umformung der Schnittkanten und im schlimmsten Fall sogar zum Lösen von Partikeln der Beschichtung kommen.

Das Laserschneiden von Elektroden ist mittlerweile State-of-the-art. Es erfüllt die Anforderungen bezüglich Schnittgeschwindigkeit, einer möglichst geringen Gratbildung und einer Wärmeeinflusszone (WEZ). Zudem ermöglicht die hohe Flexibilität der Laserführung grundsätzlich einen Formatwechsel. Ein Nachteil bei der Vereinzelnung mittels Laserschneiden ist, dass es sich trotz des Einsatzes von Kurzpulslasern, um einen thermischen Trennprozess handelt, was eine gewisse WEZ entlang der Schnittkante bedeutet. Die lokale Erhitzung und das unterschiedlich schnelle Verdampfen der Beschichtung und der Trägerfolie kann insbesondere bei großen Dicken $>250\mu\text{m}$ zu Gratbildungen der Schnittkante führen [Schmitz 2014].

Aktuell werden bereits Filtertechnologien und Predictive Maintenance¹ eingesetzt, um Verunreinigung durch Fremdpartikel zu vermeiden und die Abnutzung des Schneidwerkzeugs frühzeitig zu erkennen. So können Gegenmaßnahmen rechtzeitig veranlasst werden. Ein positiver Nebeneffekt ist die damit einhergehende längere Lebensdauer der Werkzeuge. Beim Laserschneiden stellt die Absaugung der

entstehenden Gase und Mikropartikel eine Maßnahme dar, qualitätsmindernde Verunreinigungen zu minimieren.

Die Schneidgeschwindigkeiten liegen beim Stanzen bei bis zu $0,1\text{ s/sheet}$. Beim Laserschneiden werden zwischen 1 und 4 m/s , je nach Elektrodendicke, realisiert. Je nach auszu-schneidender Geometrie führt dies zu einer Schneidgeschwindigkeit von bis zu $0,06\text{ Sheet/s}$. Unabhängig davon ist aber stets der Greif- und Handlingsprozess der Elektroden und Separatorblätter der zeitlich limitierende Faktor beim Vereinzeln, welches zu deutlich höheren Taktzeiten führt [Luetke2011], [Korthauer2013].

Herausforderungen

Qualitätskritische Verunreinigungen können durch das Resublimieren von Material an der Schnittkante beim Laserschneiden, durch das Abplatzen der Beschichtung, durch eine Gratbildung beim Stanzen oder lose Partikel auf dem Aktivmaterial entstehen. In der Lithium-Ionen-Zelle können diese Verunreinigungen Lithium-Plating hervorrufen. Dies führt im schlimmsten Fall zu einer Separatorbeschädigung und zum Kurzschluss. Eine Herausforderung liegt daher grundsätzlich in der Vermeidung von Verunreinigungen. Darüber hinaus kann eine verlässliche Qualitätssicherung den Ausschuss in der Produktion signifikant senken.

Neben der Verbesserung der Schnittkantenmerkmale konventioneller Elektroden sowie dicker Hochleistungselektroden beim Laserschneiden, liegen die Herausforderungen in der schnellen Handhabung des Materials. Durch die hohen erzielbaren Schnittgeschwindigkeiten ist der geschwindigkeitslimitierende Schritt nicht mehr der Laserschneidprozess, sondern die Handhabung bzw. die Zu- und Abführung des Elektrodenmaterials. Hierbei ist die Realisierung

¹ Prädiktive Instandhaltung auf Basis historischer Daten oder in Echtzeit verfügbarer Qualitätsmerkmale

einer Hochgeschwindigkeitshandhabung aufgrund des veränderten Zwischenproduktzustandes von kontinuierlich zu diskontinuierlich sowie der Sensibilität des Produktes als besonders herausfordernd zu erachten.

Lösungsansätze

Die Qualitätsmessung ermöglicht den Unternehmen eine genaue Kontrolle der Schnittkantenqualität und der Sheet-Oberfläche. Um eine solche Qualitätssicherung bereitstellen zu können, ist die Entwicklung geeigneter Monitoring-Systeme mit einer zuverlässigen Ausschusserkennung notwendig. Essenziell dafür sind optische Systeme mit hoher Auflösung, die die kritischen Ablationsprodukte auf der Oberfläche identifizieren können. Die Qualität der Schnittkanten kann so bewertet und Verschleiß am Werkzeug frühzeitig erkannt werden. Neuartige bildgebende Inline-Oberflächeninspektionsverfahren aus verwandten Industrien bieten die Chance auf weitere Prozessoptimierung. Mit Hilfe von Technologietransfers werden diese auf die Batterieproduktion appliziert und in Forschungsvorhaben weiterentwickelt.

Die Optimierung der Absaugung beim Laserschneiden ist notwendig, um das Resublimieren von Partikeln an der Schnittkante zu vermeiden. An die Partikelgröße anpassbare Filtertechnik ist bereits am Markt verfügbar. Die Trends zur Erhöhung der Beschichtungsdicke erschweren jedoch eine Etablierung des Laserschnittverfahrens. Größere Schichtdicken erfordern einen höheren Energieeintrag. Die Verdampfung an der Schnittkante nimmt zu, was zu einer stärkeren Kontaminationsbelastung führt [Schmitz 2014]. Durch die stetig steigende Brillanz und zunehmend größeren mittleren Laserleistungen der Laserstrahlquellen und der damit verknüpften hohen Rayleighlänge wird es jedoch möglich sein, diesen Einfluss zu reduzieren (single mode Faserlaser).

Ein weiterer Lösungsansatz ist die Reinigung der Elektrodenblätter nach dem Vereinzeln. Dabei dürfen sich die Eigenschaften der Zellmaterialien nicht verändern. Außerdem muss sich der Mehraufwand für die Zellhersteller finanziell lohnen. Einen Lösungsansatz stellt die CO₂-Schneestrahlnreinigung dar, bei der Verunreinigungen mittels Kohlenstoffdioxid rückstandslos und trocken entfernt werden. 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.

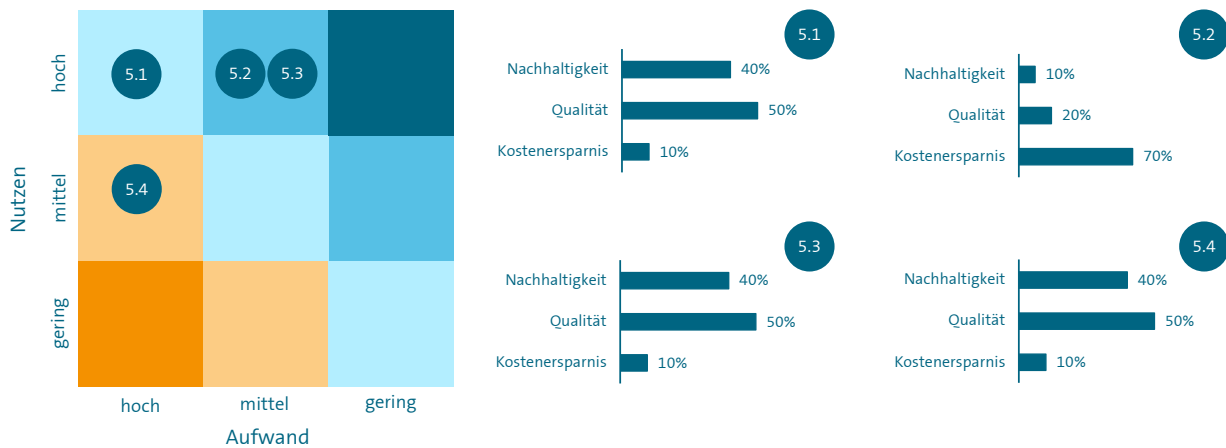
Generell ist es wichtig, Toleranzfenster und Wirkzusammenhänge zur Vermeidung von qualitätsrelevanten Verunreinigungen zu erforschen und zu validieren.

Im Hinblick auf die Erhöhung der Taktzeit bietet das kontinuierliche Laserschneiden (cutting on the fly) das größte Potenzial. Eine kontinuierliche Bearbeitung ist insbesondere vorteilhaft, da hierdurch transiente Belastungen des Elektrodenmaterials vermieden werden und somit Folienrisse oder Beschädigungen aufgrund hoher An- und Abfahrtgeschwindigkeiten ausgeschlossen werden können. Mögliche Lösungen bzw. Projekte zur kontinuierlichen Handhabung beim Laserschneiden sind derzeit unbekannt bzw. nicht in der deutschen Forschungslandschaft anzutreffen.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Da das Vereinzeln wesentliche Auswirkungen auf die spätere Zellperformance hat, wird der Nutzen als hoch eingeschätzt. Die Einführung verlässlicher Monitoring Methoden bietet die Chance, Qualität zu erhöhen und Ausschuss zu reduzieren. Geringere Kontaminationsgrade durch einen verbesserten Schneidprozess oder entsprechende Qualitätssicherung resultieren in einer höheren Lebensdauer der Lithium-Ionen-

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



5.1 Qualität und verlässliches Monitoring 5.2 Verbesserung der Taktzeit durch produktivere Handhabungssysteme, 5.3 Qualitätssicheres Vereinzeln von Elektroden mit hoher Beschichtungsdicke, 5.4 Hohe Schnittkantenqualität

Zellen und somit zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit. Eine Herausforderung liegt in dem hohen Aufwand der Implementierung der Messtechnik und dem Aufbau des notwendigen Prozessverständnisses.

In Anbetracht des stetig steigenden Zelloutputs geplanter Produktionsanlagen bieten höhere Taktzeiten durch produktivere Handhabungssysteme einen hohen Kostenvorteil im Hinblick zukünftiger Terra-Factorys. Hierbei kann die notwendige Entwicklungsarbeit als mittel und der Nutzen als hoch eingeschätzt werden.

Qualitätssicheres Vereinzeln von Elektroden mit hoher Beschichtungsdicke führt zu einer besseren Qualität sowie zu einer Steigerung der Nachhaltigkeit produzierter Zellen. Kostenersparnisse aufgrund der Reduzierung möglicher Zellausfälle sind als gering einzustufen. Der Aufwand ist ebenfalls als mittel und der Nutzen als hoch einzuschätzen.

Eine weitere Verbesserung der Schnittkantenqualität führt aus den zu vor genannten Gründen ebenfalls zu einer Erhöhung der Nachhaltigkeit bzw. der Produktqualität. Da der Einfluss der Schnittkante bei konventionellen Systemen als geringer einzustufen ist und bereits sehr gute Schnittkanten erzielt werden können, ist der Aufwand als hoch einzuschätzen bei einem moderaten Nutzen.

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Johannes Bührlé, Industry Manager Automotive
- E-Mobility, TRUMPF Laser- und Systemtechnik
GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

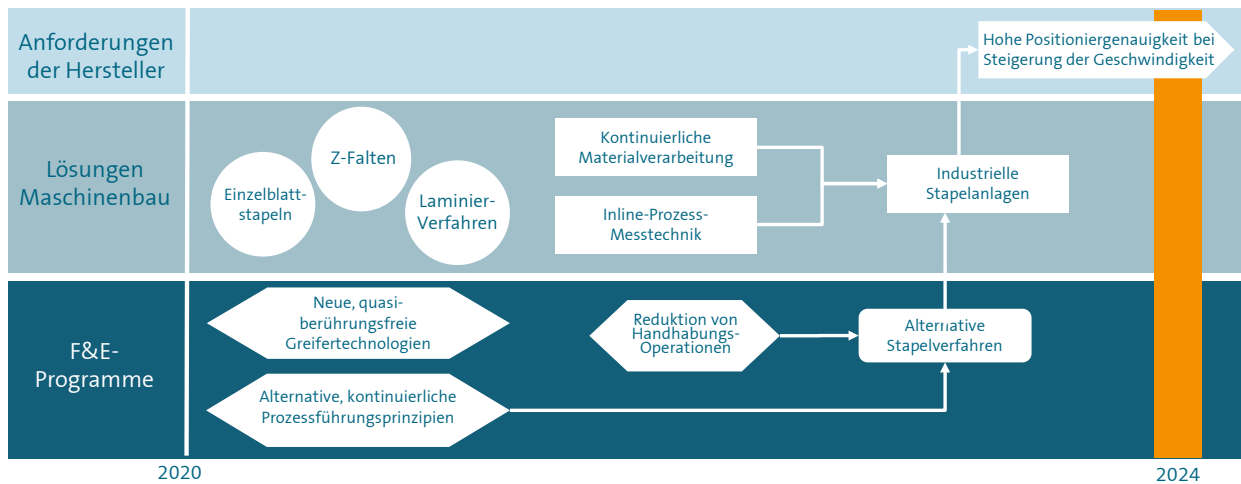
BST eltromat International GmbH
Festo Vertrieb GmbH & Co KG
Dr. Ullmann Consulting GmbH
Grob-Werke GmbH & Co. KG
Industrie Partner GmbH
Manz AG
Marposs AG
Omron Electronics GmbH
Maschinenbau Kitz GmbH
PIA Automation Bad Neustadt GmbH
Robert Bosch GmbH
SCHUNK GmbH & Co. KG
Sick AG
VITRONIC Dr.-Ing. Stein
Bildverarbeitungssysteme GmbH

Stapeln

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
6.1	Hohe Positioniergenauigkeit bei gleichzeitiger Steigerung der Geschwindigkeit	Mäßiger Fortschritt erzielt	Mittel bis Hoch	2024-2025
6.2	Zellformatspezifische Unterschiede in den Griff bekommen	Fortschritt erzielt	Hoch	(2021-2022)
6.3	Umgang mit empfindlichen Materialien	Geringer Fortschritt erzielt	Mittel	2023-2025

RBW 6: Stapeln — Steigerung der Geschwindigkeit

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



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW6: Stapeln

Grundlagen

Zur Herstellung einer Lithium-Ionen-Zelle werden je nach Zellformat unterschiedliche Assemblierungsverfahren angewendet. Pouch-Zellen werden in der Regel im Stapelverfahren, zylindrische und prismatische Zellen im Wickelverfahren produziert [Pettinger2013]. Zunehmend werden auch prismatische Zellen gestapelt, um die Raumausnutzung im Zellgehäuse zu erhöhen und die Elektrolytbenetzung zu verbessern.

Auf Zellebene hat das Stapeln Vorteile wie eine gleichmäßige mechanische Belastung der Elektrode, eine homogenere Wärmeverteilung, erhöhte Leistungsdichten, Zyklfestigkeiten, Langlebigkeit und Sicherheit. Dem gegenüber steht aber die niedrigere Prozessgeschwindigkeit im Vergleich zum Wickeln.

Das Stapeln wird industriell als Einzelblatt-, oder Z-Falten ausgeführt. Beim Einzelblattstapeln werden in abwechselnder Reihenfolge Separator, Anode und Kathode aufeinandergelegt [Baumeister2014, Heimes2018, Kampker2014]. Beim Z-Falten wird der Separator von einem Coil abgewickelt und die vereinzelt Elektroden werden alternierend zwischen den Separator z. B. mittels Vakuumbreifern eingeführt [Kampker2013]. Dieses Verfahren ist wesentlich schneller als das Einzelblattverfahren. Durch Aufaminieren der Einzelblattelektroden auf den Separator vor dem Stapeln kann der Prozess noch deutlich beschleunigt werden [Kwade2018b].

Beim Wickeln werden hingegen Separator- und Elektrodenbänder (Anode und Kathode) auf einen Kern gewickelt und hieraus eine Jelly-Roll erzeugt [Heimes2018, Kampker2013]. Für die Rundzelle ergibt sich ein Rundwickel, für die prismatische Zelle ein Flachwickel. Für zukünftige Zellgenerationen wie die Lithium-Metall-Batterie wird erwartet, dass sich diese wesent-

lich besser mit Stapel- als Wickeltechnologien herstellen lassen. Ein weiterer Vorteil beim Stapeln gegenüber dem Wickeln ist die bessere Wärmekontrolle bzw. -abfuhr bei Betrieb der Zelle, was für eine höhere Sicherheit und Langlebigkeit der Zelle sorgen kann.

Die erreichbaren Taktzeiten beim Stapeln sind stark abhängig von der Elektrodengröße und der verwendeten Produktionstechnik. Beim Z-Falten können mittlerweile Taktzeiten von deutlich unter 1 s/Elektrodenverbund (Anode + Separator + Kathode) realisiert werden. Beim Wickeln sind durch die kontinuierliche Prozessführung Geschwindigkeiten von 0,1 s/Umdrehung möglich [Heimes2018]. Eine Zelle ist damit in wenigen Sekunden gewickelt, wohingegen das Stapelverfahren bei etwas unter 1/s pro Elektrodenverbund bei mehreren Dutzend Lagen mindestens eine Größenordnung langsamer ist [Heimes2018]. 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.

Seit 2018 konnten kontinuierliche Fortschritte in der Geschwindigkeit sowie der Stapelgenauigkeit erreicht werden. Mittels Z-Folding kann die oben genannte Geschwindigkeit mit einer Stapelgenauigkeiten 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 [Schröder2016a]. Trotz einer geforderten Durchsatzserhöhung müssen hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und Sauberkeit erfüllt

werden. Die Qualität des Stapelprozesses beeinflusst die spätere Zellperformance maßgeblich [Thielmann2017]. Die hohe Positioniergenauigkeit bei gleichzeitiger Steigerung der Geschwindigkeit wird daher als wichtigste Herausforderung für diesen Fertigungsschritt angesehen (RBW 6.1.).

Um zum einen Zellen mit höherer Energiedichte zu erhalten und zum anderen den Durchsatz zu erhöhen, wird die zunehmende Folien- bzw. Zellgröße diskutiert [Kurfer2012]. Dieser Ansatz birgt Herausforderungen für das Folienhandling und erfordert, zellformatspezifische Unterschiede in den Griff zu bekommen (RBW 6.2). Zudem erschweren sowohl die Größe wie auch der Einsatz von sehr dünnen und empfindlichen Materialien den Prozess durch das notwendige schonende Handling (RBW 6.3) [Kampker2014].

Lösungsansätze

Im Fokus der Optimierung des Stapelns liegt die Entwicklung neuer Greifertechnologien [Stühm 2014], die Realisierung eines durchgehend kontinuierlichen Prozessablaufs sowie die Implementierung von schnellerer Bilderkennungstechnologie zur verbesserten Lageregelung [Schröder 2016b]. Quasi-berührungsfreie Greifer mit Ultraschallführung oder auch luftgeführte Systeme gewinnen damit an Relevanz, sind aber noch nicht serienreif. Durch diese Entwicklungen ist die Durchbrechung der RBW 6.1 in den nächsten vier Jahren realistisch.

Einen weiteren Lösungsansatz zur Erhöhung der Prozesskontinuität stellt die Verwendung robuster Zwischenprodukte aus Elektrode-Separator-Verbunden dar. Die Elektrodensheets können zum Beispiel auf den Separator laminiert werden. Durch diesen Zwischenschritt wird die nötige Anzahl an Stapelvorgängen je Lithium-Ionen-Zelle verringert und der Falten- und Knickbildung der Elektroden und Separatoren entgegengewirkt. Dieses Verfahren verspricht insbesondere für die immer größeren Zellforma-

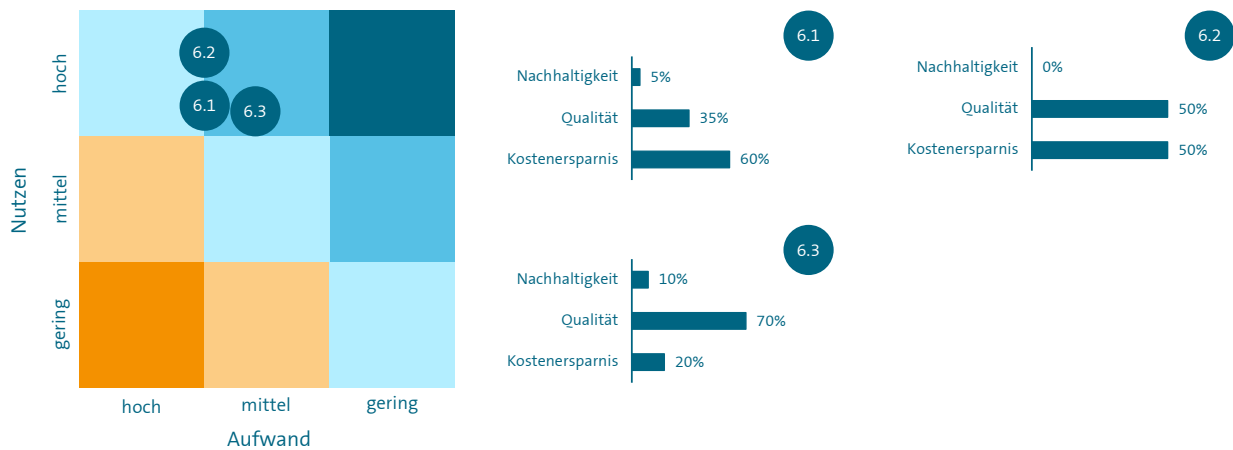
te eine Verbesserung des Handlings im Stapelprozess und eine noch exaktere Position. Auch immer empfindlichere Materialien können stabile Halbprodukte in der Fertigung erforderlich machen. Der Ansatz kann somit zur Lösung der Herausforderung der RBW 6.2 und RBW 6.3 beitragen.

In unterschiedlichen Forschungsanlagen werden deutschlandweit mehrere, neuartige Stapeltechnologien erprobt und anschließend für die industriellen Anwendung vorbereitet [Weinmann-2020, Baumeister2014, Pelisson-Schecker2017, Fleischer2017, KontiBAT2020], 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 – [Schutzrecht-2015]), in der Kombination mit Förderbändern oder in effizienteren Faltmechanismen [KontiBAT2020], auch teilweise bekannt als “Stack and Fold-Mechanismen.” So sollen Geschwindigkeiten von deutlich unter 0,5s pro Elektrodenverbund erzielt werden und damit die Prozessgeschwindigkeit erhöht werden. Gemeinsam mit bereits vorhandenen, aber noch weiter zu optimierenden Technologien aus den Bereichen der Inline-Prozessmesstechnik, Bilderkennung und Kenntnissen über die kontinuierliche Materialverarbeitung können diese Maßnahmen dazu beitragen, den Stapelvorgang weiter zu beschleunigen und dabei auch noch den Ausschuss – auch im Anlauf – zu verringern.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Da das Stapeln 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. Der damit verbundene Aufwand wird durch die Experten als mittel bis hoch eingeschätzt. Die Handlingsmethoden stoßen derzeit an ihre

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



6.1 Steigerung der Geschwindigkeit 6.2 Zellformatspezifische Unterschiede 6.3 Umgang mit empfindlicheren Materialien

Grenzen, so dass Alternativen entwickelt und für eine Massenproduktion tauglich gemacht werden müssen [Thielmann2017, Michaelis2018]. Die Verwendung stabiler Zwischenprodukte muss sich gegen die herkömmlichen Produktionsprozesse behaupten. In Zukunft könnte diese insbesondere für empfindliche Materialien eine Alternative darstellen.

Der Umgang mit zellformatspezifischen Unterschieden (RBW 6.2) ist ebenfalls eine Herausforderung mit mittlerem bis hohem Aufwand, der aufgrund der immer weiter zunehmenden Zellgrößen, eine große Bedeutung beigemessen wird.

Der Einsatz von immer empfindlicherem Material erfordert immer anspruchsvolleres Folienhandling. Der Aufwand auch dann die angestrebten Geschwindigkeiten und Positionsgenauigkeiten zu erzielen, wird mit mittlerem Aufwand bewertet. Neue Materialien werden zur Optimierung der Batterie eingesetzt, so dass der Nutzen entsprechend hoch ist.

All diese Herausforderungen zeigen, dass der Nutzen ihrer Bewältigung als sehr hoch anzusehen ist, da durch eine Steigerung der Geschwindigkeit der Anlageninvest und der Footprint sinken und die Kosten der Batterien somit gesenkt werden können.

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Maximilian Wegener, Product Manager Energy Storage, Manz AG;
Oliver Meister, Sales Manager, VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

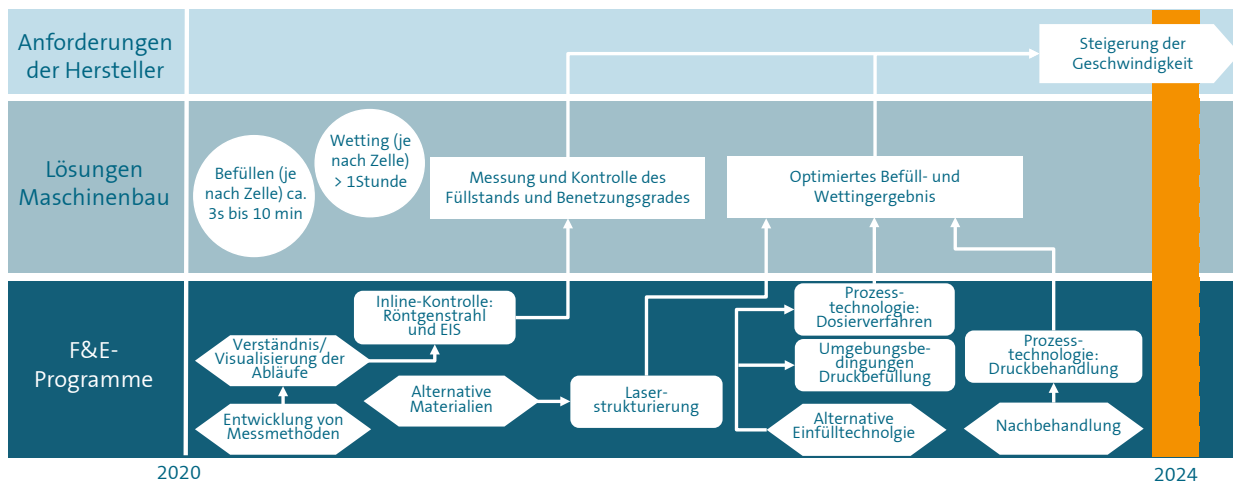
Bosch Rexroth AG
BST eltromat International GmbH
Festo Vertrieb GmbH & Co KG
Dr. Ullmann Consulting GmbH
Grob-Werke GmbH & Co. KG
Industrie Partner GmbH
KUKA Systems GmbH
Liebherr Verzahntechnik GmbH
Maschinenbau Kitz GmbH
Omron Electronics GmbH
PIA Automation Bad Neustadt GmbH
Robert Bosch GmbH
SCHUNK GmbH & Co. KG
Sick AG
Weiss GmbH

Elektrolytbefüllung

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
7.1	Elektrolytbefüllung & Wetting: Steigerung der Geschwindigkeit durch Prozess und Materialanpassungen bei gleichzeitigem homogenerem Wetting des Zellstapels	Mäßige Fortschritte erzielt	Mittel bis Hoch	2021-2024
7.2	Hohe Genauigkeit bei der Befüllung (Volumen, Druck bzw. Vakuum)	Unverändert	Mittel bis Hoch	2021-2022
7.3	Verlässliches Monitoring des Befüll- und Benetzungsprozesses in der Volumenproduktion (z.B. Temperatur, Druck, etc.)	Unverändert	Mittel	2023-2026

RBW 7: Elektrolytbefüllung - Geschwindigkeit und Qualität

Das Vermeiden von Schaumbildung und das gleichmäßige Benetzen des Materials sind qualitätskritisch. Materialeigenschaften von Separator, Elektrolyt und Elektroden beeinflussen den Einfüllprozess. Das übergeordnete Ziel ist die Verkürzung der Befüll- und Wetting-Zeit bei gleichzeitig gewährleisteter Zellperformance unabhängig vom Zelldesign durch ein verlässliches Monitoring des Prozesses. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Maschinenbau und Materialentwicklung ist dazu notwendig.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 7: Elektrolytbefüllung

Grundlagen

Bei dem Prozessschritt der Elektrolytbefüllung wird zwischen zwei Prozessen unterschieden: der Befüllung und der Benetzung 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. Beide Prozesse sind äußerst zeit- und qualitätskritische Produktionsprozesse der Zellausfertigung. 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 herrschen in der Zelle unterschiedliche Ströme, wodurch Dendritenwachstum entstehen kann.

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 und zudem das Zellinnere durch das Evakuieren der Zelle keinerlei Restfeuchte mehr aufweisen kann. Der verwendeten Standardelektrolyt ist mit LiPF_6 hochentflammbar und würde bei Kontakt mit Wasser Flusssäure bilden, welche die Zellkomponenten angreift sowie deren Lebensdauer entscheidend herabsetzt [Korthauer 2013].

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 2019]

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, das sog. Wetting. Dabei kommt es, ausgehend von den Kapillarkräften, zur mikroskopischen Benetzung der Poren in den Aktivmaterialien und Separatoren. Die Befüllung und der Druckausgleich werden so lange wiederholt, bis die Lithium-Ionen-Zelle ausreichend benetzt ist.

Es hat sich gezeigt, dass durch eine Nachbehandlung der befüllten und versiegelten Pouchzelle mit Druck (Press Rolling) die Benetzungszeit deutlich reduziert werden kann. In den letzten Jahren konnte basierend auf Erkenntnissen über den Befüll- und Wettingvorgang die Benetzungszeit einer Batteriezelle bereits um 50 Prozent reduziert werden.

Herausforderungen

Die Bildung von Schaum während des Einfüllvorgangs und die langen Wettingphasen bis zur vollständigen Benetzung sind maßgeblich für die langen Prozesszeiten verantwortlich, die je nach Zelltyp über eine Stunde betragen können (große prismatische Zellen mit Jelly-Roll). Die Elektrolytbefüllung ist ein Bottleneck innerhalb der Zellausfertigung. Die Steigerung der Geschwindigkeit durch Prozess- und Materialanpassungen ist daher eine Kernherausforderung insbesondere durch den Trend zu großformatigen Batteriezellen.

Zusätzlich werden die Prozesse des Befüllens und des Wettings 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 Wettingprozess, der je nach Zellchemie und Zellformat, bis zu 48 Stunden dauern kann, sind ebenfalls bisher nur wenig

erforscht. Zu geringe Mengen führen zu nicht benetzten Stellen, zu hohe Mengen zu einer längeren Prozesszeit und höheren Innenwiderständen. 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.

Zur Kontrolle und Optimierung des Elektrolyt-befüll- und Benetzungsvorganges bereits im Produktionsprozess fehlt es außerdem an verlässlichen Inline-Monitoringtechnologien.

Lösungsansätze

Die Optimierung dieses Prozesses kann durch verschiedene Ansätze erfolgen. Dabei sind die Vermeidung der Schaumbildung, schnellerer 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. Darüber hinaus sind bei der Befüllung vor allem der Befüll- und Umgebungsdruck qualitätskritische Einflussgrößen. Bei der Benetzung beeinflussen insbesondere das Volumen und die Nachbehandlung mit Druck die Qualität der Zelle. [Davoodabadi2019]

Darüber hinaus ist es denkbar, die Prozesszeit über alternative Prozessführungen zu reduzieren. Möglichkeiten wären zum einen die Einstellung von unterschiedlichen Druckgradienten und zum anderen die Umsetzung einer Vorbefüllung oder einer Befüllung an mehreren Stellen in der Lithium-Ionen-Zelle, die auch am Füllstand orientiert ist. Die Befüllung an

mehreren Stellen ist insbesondere für Pouchzellen realisierbar. Für Hardcase-Zellen ist die Umsetzung deutlich schwerer.

Ein weiterer Forschungsansatz liegt bei der 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 Befüllergebnis 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. Deren Eigenschaften müssen jedoch nicht nur prozess-, sondern auch produktseitig und technologiebedingt getrieben werden.

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 des Separators mittels eines Plasmas. 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 führen.

Die Verwendung von Additiven im Elektrolyten kann zu einer geringeren Schaumbildung und/oder besserer Benetzung führen. Die Entwicklungen in diesem Bereich tragen vor

allem zu dem Durchbrechen der RBW 7.1 in den nächsten vier Jahren bei. Bis zum Jahr 2024 soll eine deutliche Verbesserung der Prozesszeit und -sicherheit des Befüll- und Benetzungsprozesses erreicht werden.

Die Entwicklung und Verwendung von Festkörperelektrolyten würde den klassischen Elektrolytbefüllungsschritt zwar gänzlich obsolet machen. Serienreife Zellen mit Festkörper-Technologie etablieren sich aber voraussichtlich frühestens in den nächsten 5 -10 Jahren im Markt. [Habedank2019]

Neben der Prozess- und Materialanpassung ist die Entwicklung und Integration neuer Messverfahren notwendig, um eine industrialisierte, detaillierte Prozessüberwachung zu ermöglichen. Die Analyse trägt zu einem besseren Prozessverständnis der Abläufe und Wirkzusammenhänge bei und ist zur Optimierung des Durchsatzes der Zellfertigung und der Qualität der Lithium-Ionen-Zelle notwendig. Es wird 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 zurzeit Röntgenstrahlen und Neutronenradiographie zum Einsatz. Diese Verfahren bieten den Vorteil, die Zelle zerstörungsfrei 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 sind die Zelltemperatur, der Befülldruck, der Massenstrom sowie das Gewicht und die Dichte der Lithium-Ionen-Zelle.

Dieser Lösungsansatz wird zum Durchdringen der RW 7.3 beitragen und durch die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf Parameter-Qualitätsbeziehungen ebenfalls zur Durchdringung der RBW 7.2 führen. [Knoche2016, Weydanz2018]

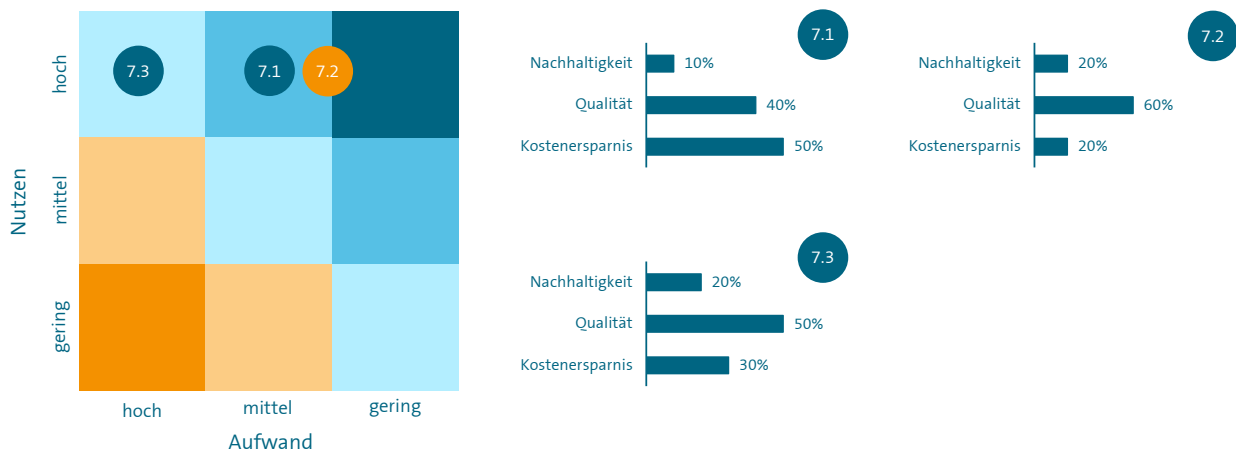
Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Nutzen aller RBWs im Bereich Elektrolytbefüllung wird als hoch eingestuft. Besonders durch eine Verringerung der Prozesszeiten, vor allem des Wettings, 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 eingeschätzt, da durch Materialanpassungen bereits Verbesserung in diesem Bereich erreicht werden konnten. Die Nachhaltigkeit wird durch das Erreichen dieser RBW nur geringfügig 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 RWB 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 Wettingzeit.

Die Entwicklung einer Inline-Qualitätskontrolle für das Erreichen der RBW 7.3 weist ebenfalls einen hohen Nutzen auf. Durch das bessere Verständnis des Befüllvorgangs kann der Befüllvorgang besser kontrolliert und auf unterschiedliche Formate und Größen angepasst werden. Das hat einen großen Effekt auf die Qualität der Zelle.

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

Durch die höheren Kenntnisse über den Befüllungs- und Wettingvorgang kann der Ausschuss an Elektrolyten verringert werden. Dies würde sich positiv auf die Kosten und die Nachhaltigkeit auswirken. Allerdings geht das Erreichen dieser RBW mit einem erhöhten Aufwand einher, da die Integration von Inline-Messverfahren zur Erkennung des Füllstands und Benetzungsgrad bei einer geschlossenen Zell erschwert ist. Die bisherigen Ansätze lassen sich nicht ohne Weiteres in eine Produktionslinie integrieren.

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Ulrike Polnick, Projektleiterin
/Qualitätsmanagementbeauftragte, Industrie Partner GmbH Radebeul-Coswig

Mit weiterer Unterstützung von:

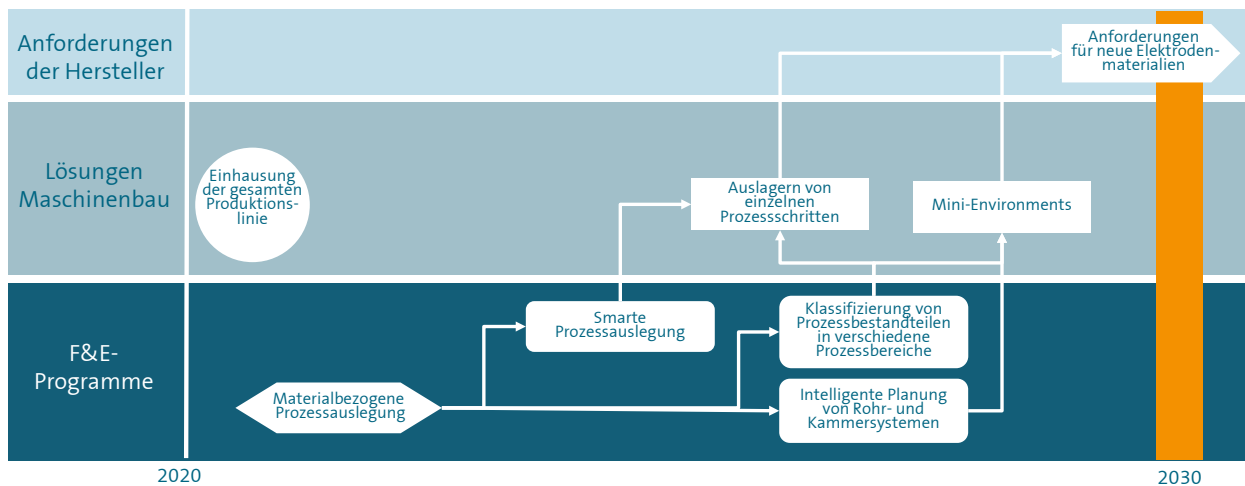
Festo Vertrieb GmbH & Co KG
Gebr. Becker GmbH
Grob-Werke GmbH & Co. KG
Industrie Partner GmbH
Leybold GmbH
Manz AG
Sick AG
VITRONIC Dr.-Ing. Stein
Bildverarbeitungssysteme GmbH

Rein- und Trockenräume

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
8.1	Kosten- und Nutzenoptimale Auslegung des Rein- und Trockenraums für heutige und zukünftige Zellgenerationen	Unverändert	Hoch	2030
8.2	Trockenraum und Reinraum: Verbesserung der Energieeffizienz	Fortschritt erzielt	Mittel	2020-2024

RBW 8.1: Rein- und Trockenräume – Kosten- und nutzenoptimale Auslegung des Reinheits- und Trockenraums für heutige und zukünftige Zellgenerationen

Um die Wettbewerbsfähigkeit der Batterie gegenüber anderen Technologien zu erhöhen, ist eine große Herausforderung die Kosten zur Herstellung der Zellen zu verringern. Ein großer Kostenpunkt ist die Herstellung der geforderten Fertigungsbedingungen durch Trocken- und Reinräume. Insbesondere die Auslegung von Rein- und Trockenräumen für heutige und zukünftige Elektrodenmaterialien (beispielsweise Kathodenmaterial mit hohem Nickelgehalt) stellt eine Kernherausforderung dar.



Legende: ○ State of the Art ◀▶ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

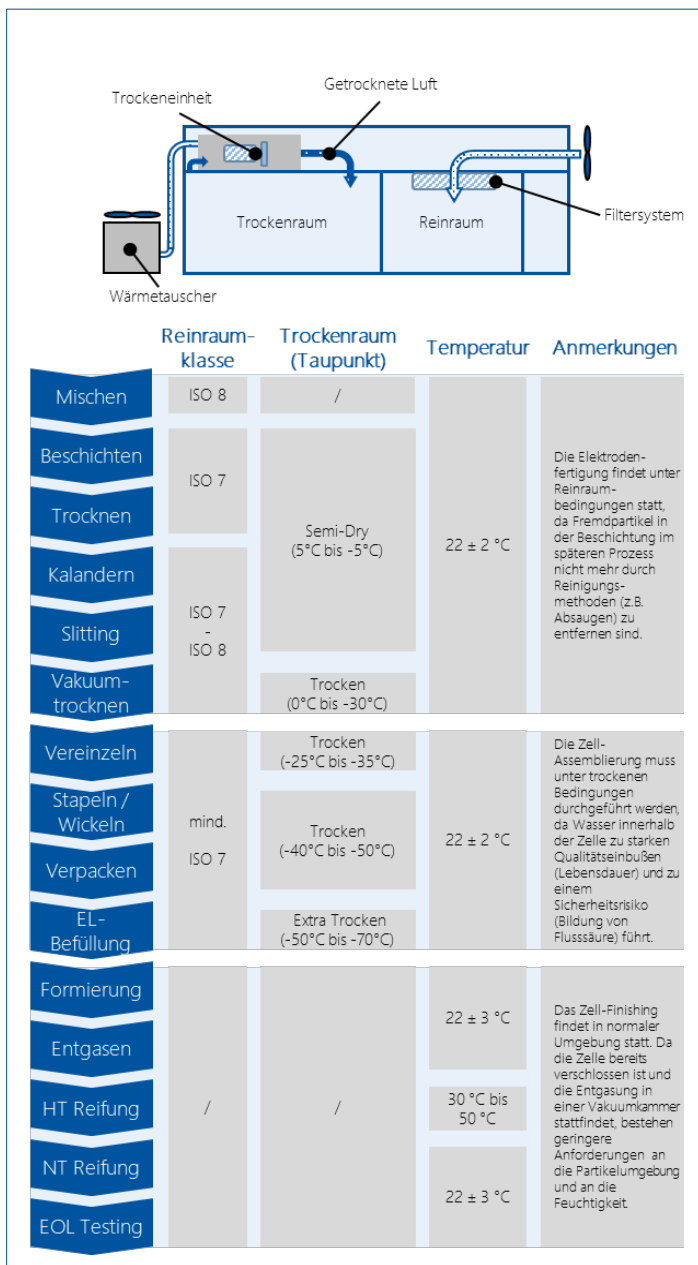
Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen, BLB der TU Braunschweig nach Phaal2003b

RBW 8: Rein- und Trockenräume

Grundlagen

Die Produktionsumgebung spielt eine Schlüsselrolle bei der Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen. Insbesondere die Luftfeuchtigkeit und eine

mögliche Kontamination durch Fremdpartikel während des Produktionsprozesses haben einen großen Einfluss auf die Qualität und Sicherheit der gefertigten Batteriezelle. Erst nach dem Versiegeln der Zelle werden weniger strikte Bedingungen an die Umgebung gestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Prozessschritte an die Fertigungsumgebung (siehe Tabelle 93) ist eine entsprechende Berücksichtigung bei der Auslegung und Planung der Produktionslinie notwendig. Zurzeit werden zur Einhaltung dieser hohen Prozessanforderungen große Teile des Produktionsprozesses in Rein- und Trockenräumen durchgeführt.



Im Vordergrund der Diskussion um die Trocken- und Reiräume stehen die hohen Investitionskosten, hohe laufende Kosten und die hohen CO₂-Emissionen durch den Betrieb der Infrastruktur. Es fallen bis zu 20 Prozent der Investitionskosten und 40 Prozent einer Batteriezellproduktionslinie allein durch die Einstellung und den Betrieb der Trocken- und Reinraumatmosphäre an. Es besteht daher ein großer Bedarf an Kosten- und CO₂-Einsparungen, die durch technische Innovationen in diesem Bereich realisiert werden sollen. [Nelson2019, Yuan2017]

Herausforderungen

Innerhalb der Trockenraumatmosfera wird der Umgebungsluft die Feuchtigkeit entzogen, um mögliche Reaktionen von sensitiven Materialien mit Feuchtigkeit (Kathode, Elektrolyt) mit Wasser zu verhindern. Dazu werden die Trockenräume über ihre Taupunkte kategorisiert. Abhängig vom zu bearbeiteten Material und dessen Eigenschaften müssen Anforderungen an den Trockenraum eingehalten werden. Insbesondere bei der Elektrolytbefüllung müssen Taupunkte von -50 bis -70°C eingehalten werden, da der Elektrolyt bereits bei kleinsten Mengen Luftfeuchtigkeit Flusssäure bildet.

Übersicht über die Anforderungen der Prozessschritte an die Fertigungsumgebung, Quelle: VDMA, PEM der RWTH Aachen

Bei der Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen wird an die Trockenraumumgebung eine zusätzliche Reinheitsanforderung gestellt, um eine Kontamination mit Partikeln aus der Umgebung zu verhindern. Reinräume werden in der Produktion außerdem benötigt, um Querkontaminationen zwischen den einzelnen Prozessschritten zu verhindern. Hierbei werden in der Zellausfertigung üblicherweise Reinräume der ISO-Klasse 6-7 gefordert. In der Elektrodenfertigung werden vor allem bei den Prozessschritten Mischen, Kalandern und Slitten Reinräume mit einer Klassifizierung ISO7-8 gefordert. Bereits geringe Abweichungen von dem geforderten Sollwert innerhalb der Trocken- und Reinraumumgebung haben einen negativen Einfluss auf die Lebensdauer und damit die Qualität der Zelle. [Heimes2018]

Die genauen Anforderungen sind abhängig von den verwendeten Batteriematerialien insbesondere der Elektroden. Der Zusammenhang zwischen Material- bzw. Prozessparametern und den Anforderungen an den Rein- und Trockenraum ist bisher noch nicht vollständig erforscht. Insbesondere bei der Entwicklung und anschließenden Verwendungen von neuen Kathodenmaterialien mit hohem Nickelgehalt können zusätzliche Aufwände zur Aufrechterhaltung der materialeitig geforderten Produktionsbedingungen entstehen. Die Auslegung von heutigen Rein- und Trockenräumen auf Anforderungen heutiger und zukünftiger Zellgenerationen stellt durch die hohen Investitionskosten eine Kernherausforderung dar (RBW 8.1).

Aufgrund der Größe und der kontinuierlichen Aufrechterhaltung der Trocken- und Reinraumumgebung fällt ein Großteil des Energiebedarfs der Zellproduktion darauf. Die Innovationen zur Steigerung der Energieeffizienz in diesem Bereich könnten sich direkt auf die Senkung der

Betriebskosten und so auf die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit der Produktionslinie auswirken, wenn eine gleichbleibende Produktqualität gewährleistet werden kann (RBW 8.2).

Zuletzt muss nicht nur eine kontinuierliche Überwachung der Trocken- und Reinraumparameter, sondern auch die Begrenzung der Personenanzahl zur Verringerung des Feuchteintrags in diesem zur Einhaltung der Anforderungen umgesetzt werden. Eine weitere Herausforderung ist die begrenzte Aufenthaltszeit für das Personal aus gesundheitlichen Gesichtspunkten. [Scientific Climate Systems 2020]

Lösungsansätze

Der Aufbau von verbessertem Prozessverständnis in Bezug auf die Zusammenhänge zwischen Betriebsparameter, Auslegung und Energiebedarf ist elementar für die Optimierung und die Prozessstabilität der Trocken- und Reinräume. Kenntnisse über mögliche Querkontaminationen zwischen Prozessschritten sowie potenzielle Kontaminationspotenziale bei einzelnen Prozessschritten sind relevant für eine optimale Prozessauslegung und -stabilität. Insbesondere für zukünftige Elektrodenmaterialien kann so basierend auf den Zusammenhängen eine intelligente und wirtschaftliche Prozessauslegung und -steuerung realisiert werden. Durch Erforschung der Anforderungen zukünftiger Elektrodenmaterialien in Zusammenhang mit einer intelligenten Prozessauslegung und -steuerung wird erwartet, dass die RBW 8.1 in den nächsten 10 Jahren durchbrochen werden kann. [Ahmed2016]

In Bezug auf die Verringerung des Energiebedarfs gibt es verschiedene Ansätze. Allgemein gilt, dass der Energiebedarf der Trocken- und Reinräume abhängig von dem Luftvolumen ist. Kleinere Räume haben einen sehr viel geringeren Energiebedarf und lassen sich deutlich gezielter steuern und kontrollieren. Basierend

auf diesem Ansatz werden Konzepte erprobt, bei denen nur die Anlage selbst eingehaust wird. Durch Verwendung kleiner, gekapselter Rein- und Trockenräume, sogenannte Handschuhkästen oder Mini-Environments, kann das Luftvolumen deutlich reduziert werden. Dabei kann im Inneren der Box eine reine Gas-Atmosphäre durch z. B. hochreinen Stickstoff- oder Argon realisiert werden, um die geforderte Restkonzentration von Verunreinigungen einhalten zu können. Des Weiteren kann das Kontaminationsrisiko durch das Personal reduziert werden, da dieses den Prozess lediglich über Gummihandschuhe, die Zugang zum gesamten Prozessraum gewährleisten, bedient. Schwierigkeiten liegen bei den gekapselten Rein- und Trockenräumen zurzeit bei den Schnittstellen zwischen den einzelnen Prozessschritten sowie der Flexibilität und Zugänglichkeit im Prozess und bei Wartungsarbeiten. Eingriffe in den laufenden Produktionsprozess werden durch den nur indirekten Zugang erschwert. Für den Einsatz in der Volumenproduktion erfordert diese Lösung stabil laufende, robuste Prozesse, die nahezu keine Eingriffe von außen erfordern.

Weitere Energieeinsparpotenziale lassen sich durch den Einsatz von energieeffizienteren Komponenten wie z. B. Pumpen und die Nutzung von Abwärme innerhalb des Gesamtprozesses realisieren.

Die Auslagerung ganzer Prozessschritte aus dem Trocken- und Reinraum macht nur Sinn, wenn hohe Aufwände und Qualitäts- und Zeitverluste (z.B. durch zusätzliches Ein- und Ausschleusen der Zellen) vermieden werden können. Ein Ansatz verfolgt die Verwendung von verschließbaren Dosierventilen. Diese ermöglichen das Arbeiten unter Normalbedingungen bereits

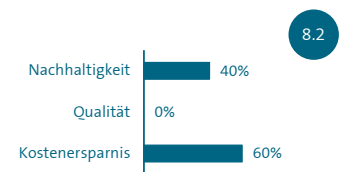
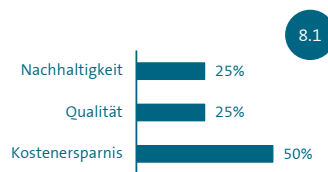
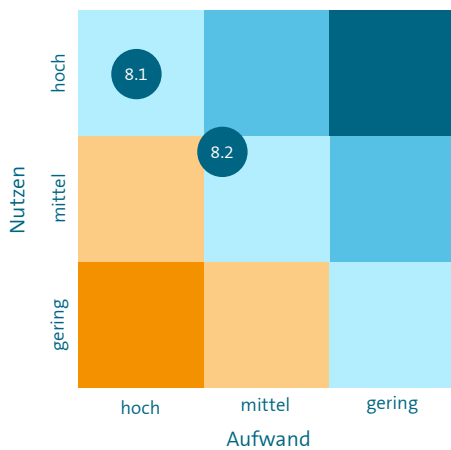
nach dem Einbringen der Zelle in das Pouchgehäuse und dem entsprechendem vollständigen Siegel-schritt. Die Elektrolytbefüllung sowie alle folgenden Prozessschritte können so außerhalb des Trockenraums erfolgen. Das Ein- und Ausschleusen ist bei den Folgeprozessen nach dem Siegel-schritt nicht mehr nötig. Alle diese Ansätze dienen zur Durch-brechung der RBW 8.2 in vorrausichtlich den nächsten vier Jahren.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Nutzen einer Auslegung der Trocken- und Reinräume auf zukünftige, materialseitig bedingte Anforderungen wird als hoch eingeschätzt. Dies liegt vor allem an dem hohen Potenzial, die Kosten durch intelligente Prozessauslegung für den Betrieb des Rein- und Trockenraums zu verringern. Durch die angepasste Prozesssteuerung und dadurch eingesparte CO₂-Emissionen kann die Qualität und die Nachhaltigkeit verbessert werden. Allerdings geht der hohe Nutzen einher mit einem hohen Aufwand. Dieser lässt sich auf die komplexe Planungsphase und Prozessauslegung zurückführen.

Der Aufwand in Bezug auf die Verbesserung der Energieeffizienz, durch z. B. den Einsatz von Mini-Environments, energieeffizienteren Komponenten und durch die Auslagerung von Prozessschritten, wird von den Experten als mittel bis hoch eingeschätzt. Durch diese Änderungen muss die Prozesskette überarbeitet werden und es entsteht ggfs. Mehraufwand bei der Produktion. Der Nutzen der RBW 8.2 wird als mittel bis hoch eingeschätzt. Durch die Änderungen können Einsparung von hohen Energiekosten und CO₂-Emissionen entstehen. Das wirkt sich sowohl positiv auf die Kosten als auch auf die Nachhaltigkeit aus.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



8.1 Kosten- und Nutzenoptimale Auslegung des Rein- und Trockenraums für neue Elektrodenmaterialien

8.2 Verbesserung der Energieeffizienz

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Christian Voigt, Geschäftsführer;
Dirk Möder, Projektvertrieb technische
Sauberkeit und Reinraum
MKF GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

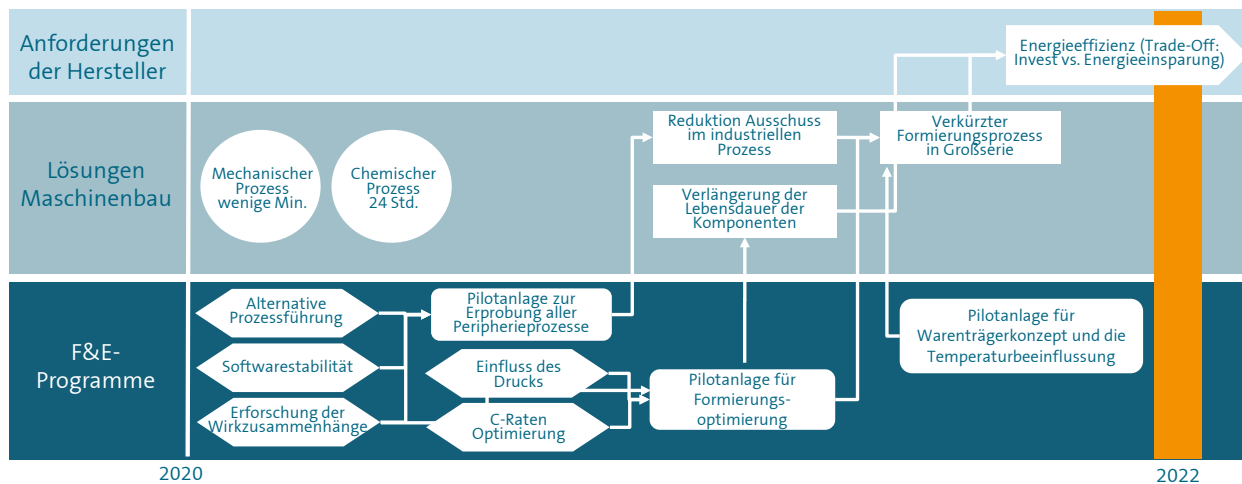
BST eltromat International GmbH
Colandis GmbH
Festo Vertrieb GmbH & Co KG
Gebr. Becker GmbH
Grob-Werke GmbH & Co. KG
Industrie Partner GmbH
Leybold GmbH

Formierung und Reifung

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
9.1	Energieeffizienz der Formierung – (Trade-Off: Invest vs. Energieeinsparung)	Unverändert	Hoch	2022
9.2	Prozessführung zur Reduktion der Prozessdauern	Unverändert	Hoch	2030 (alle 2 Jahre Update)

RBW 9.1: Energieeffizienz der Formierung (Trade off: Invest vs. Energieeinsparung)

Die Formierung ist einer der energieintensivsten Prozessschritte in der Batteriezellfertigung. Es existieren dazu verschiedene Konzepte, u. a. durch optimierte Prozessführung und die Erforschung der Wirkzusammenhänge während der Formierung, die Prozesszeit zu verkürzen, um den Energiekosten entgegenzuwirken. Die Herausforderung besteht dabei, dass die eingesparten Kosten durch eine höhere Energieeffizienz höher ausfallen müssen als die Investitionskosten zur Integration der neuen Konzepte.



Legende: ○ State of the Art ◀▶ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 9: Formierung und Reifung

Grundlagen

Während der Formierung werden die Batteriezellen erstmals zyklusweise mit steigenden Strömen geladung und entladen. Es bildet sich die sogenannte Solid Electrolyte Interface (SEI). Diese stellt den wohl wichtigsten Qualitätsparameter der Lithium-Ionen-Zelle dar und beeinflusst maßgeblich die Sicherheit und die Lebenszeit. [Li2017]

Es werden bei der Formierung immer mehrere Lithium-Ionen-Zellen gleichzeitig innerhalb eines Warenträgers formiert. Grundsätzlich existieren zwei Konzepte, die von Maschinen- und Anlagenbauern verfolgt werden. Bei dem Regalkonzept werden die Batteriezellen in Regalen kontaktiert und gelagert. Beim Kammerkonzept werden die Batteriezellen dagegen auf einem Modulwarenträger kontaktiert und gemeinsam in eine Kammer zur Formierung geschoben.

Die Kontaktierung wird über Kontaktierstifte realisiert, welche eine sichere Verbindung und einen geringen Übergangswiderstand gewährleisten. Die einzelnen Kontaktieranschlüsse werden Kanäle genannt. Die Prozessparameter bei der Formierung werden in Flow Charts festgehalten. Die Formierung dauert bis zu 24 Stunden abhängig von der Zellchemie und bestimmt maßgeblich die Lebensdauer und Sicherheit der Lithium-Ionen-Zelle. Die langen Formierzeiten sind dadurch bedingt, dass bei höheren C-Raten der initiale Kapazitätsverlust und die Kontaktwiderstände deutlich höher ausfallen als bei geringen C-Raten.

Des Weiteren besteht bei der Formierung ein erhöhtes Risiko durch einen Kanalausfall an einer Lithium-Ionen-Zelle und durch ein thermisches Durchgehen. Diese können aufgrund von Kontaktierungsproblemen, Zelldefekten oder instabiler Software auftreten und dazu führen, dass eine gesamte Charge beschädigt

wird und dadurch erhebliche Kosten auftreten. Besonders an den Kontaktierungsstellen besteht durch die große Wärmeentwicklung bzw. Wärmestaus die Gefahr des thermischen Durchgehens. Um der erhöhten Brandgefahr durch die große Anzahl gleichzeitig ladender Zellen auf engem Raum Rechnung zu tragen, werden bei der Formierung entsprechende Sicherheitskonzepte eingehalten.

Der anschließende Selbstentladungstest, ehemals als Prozessschritt „Reifung“ definiert, dient ausschließlich der Qualitätssicherung und wird aus diesem Grund dem Prozessschritt „End-of-Line-Test“-Schritt zugeordnet. Dazu werden die formierten Lithium-Ionen-Zellen über mehrere Wochen, in denen regelmäßige Zellspannungsmessungen durchgeführt werden, gelagert. Anhand der Selbstentladerate können Prognosen über die Lebensdauer der Lithium-Ionen-Zelle getroffen werden. Aufgrund der langen Ruhezeiten wird über den Bedarf an Lagerplätzen und Warenträgern sowie der Lithium-Ionen-Zellen viel Kapital gebunden.

Eine wesentliche Verbesserung zur Reduzierung des Energieaufwands ist die Rekuperation bei der Formierung. Dabei wird die Energie, die bei der Entladung einer Lithium-Ionen-Zelle freigesetzt wird, für die Ladung einer anderen genutzt. Bei Lithium-Ionen beträgt der Coulombische Wirkungsgrad bei dem ersten Lade-/entladezyklus ca. 67 Prozent [Pham2016]. Das wirkt sich positiv auf den Energieverbrauch während der Formierung aus. Weitere Verbesserungen konnten seit 2018 für den Massenmarkt kaum erzielt werden.

Die Prozesse der Formierung, Reifung und EOL-Test einer Lithium-Ionen-Zelle machen ca. ein Drittel der Zellkosten aus und nehmen in der Regel anderthalb bis drei Wochen in Anspruch. Die Relevanz für Batteriehersteller ist daher unverändert hoch. [An2016]

Herausforderungen

Bei der Formierung ist die größte Herausforderung die Verbesserung der Energieeffizienz (RBW 9.1), da Formierungsanlagen hohe Anschlussleistungen im Dauerbetrieb aufweisen. Der Betrieb der Anlagen ist einer der größten Kostenfaktoren bei der Herstellung von Batteriezellen. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Energieverluste bei der Formierung zu reduzieren, oder durch neue Ansätze die Formierzeit im Zusammenhang mit einem geringen Energieeinsatz zu reduzieren. Die eingesparten Kosten durch die Änderungen des Formierungsprozesses müssen dabei höher ausfallen als die Investitionskosten zur Integration der neuen Konzepte.

Eine weitere Herausforderung liegt bei der hohen Prozesszeit bei der Formierung und bei der Reifung (RBW 9.2). Durch die Untersuchung von Einflüssen auf diese Prozessschritte und die Erforschung der Zusammenhänge zwischen Prozessparametern auf die chemischen Abläufe und auf die Bildung der SEI soll eine zielgerichtete Formierung der Batterie durchgeführt werden können. Neben einer höheren Qualität könnte dadurch die lange Prozesszeit reduziert werden und Kapitalkosten eingespart werden.

Lösungsansätze

Zur Steigerung der Energieeffizienz bei der Formierung werden zurzeit die Wirkzusammenhänge, die einen Einfluss auf die Ausbildung der SEI haben, erforscht. Das Ziel ist eine homogene und möglichst dünne SEI-Schicht bei einem möglichst geringem Energieeinsatz und möglichst geringer Formierzeit auszubilden. Zur Herleitung dieser Zusammenhänge wird die Messung von Prozess- und Produktparametern und deren Sammeln, Analysieren und Verwerten bei vorgelagerten Prozessschritten und während des Formierungsprozesses immer relevanter. Basierend auf diesen Erkenntnissen sollen neue Formierungsstrategien und -protokolle, z. B. mit einer geringeren Anzahl an Formierzyklen und der Optimierung von Spannungsstufen, um

Energieverlust bei der Formierung zu verringern, entwickelt werden. Allerdings müssen zur Ableitung dieser Zusammenhänge die gesamte Produktionslinie digitalisiert werden und ein großes Daten- und Analysemodell mithilfe von KI-Anwendungen entwickelt werden (siehe auch RBW Wirkzusammenhänge). Ein Projekt, was diesen Lösungsansatz adressiert ist das Projekt Effiform. Ziel des Projektes ist es den Formierprozess zu beschleunigen und eine intelligente Prüfmethode zu etablieren. Damit könnten die Zellen schneller freigegeben und Infrastruktur eingespart werden.

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion der Formierzeit zielt auf den Einsatz von Additiven und Modifizierung des Elektrodenmaterials und Substitution des Bindemittels ab, mit deren Hilfe die Dauer der Formierung und der Energieeinsatz durch beschleunigte chemische Reaktionen reduziert werden kann. Um darüber hinaus eine hochqualitative SEI zu bilden, muss die Elektrolytzusammensetzung aufgrund des Zersetzungspotenzials genau auf die Graphitanode angepasst werden [Buqa2006].

Die Laminierung der einzelnen Elektroden-Separator-Verbunde in der Lithium-Ionen-Zelle hat einen positiven Einfluss auf die Dauer des Formierungsprozesses. 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]

Die Herausforderung bei diesen Ansätzen zur Steigerung der Energieeffizienz ist allerdings, einen Trade-Off zwischen höheren Investitionskosten zur Integration der neuen Konzepte in die Batteriezellproduktion und den daraus entstehenden geringeren Betriebs- und Energiekosten zu finden, um somit die RBW 9.1 zu durchstoßen.

Zur Verringerung der Prozesszeit und damit einhergehend der gebundenen Kapitalkosten wurden bei der Formierung und Reifung in den letzten Jahren unterschiedliche Konzepte erforscht. Der Einfluss der Temperatur und eines aufgetragenen mechanischen Druckes während der Formierung zeigen einen vielversprechenden Ansatz. Die Erhöhung der Temperatur bis auf ca. 50°C hat Einfluss auf die Leitfähigkeit des Elektrolyten durch den Separator, das Feststoffdiffusionsvermögen in den aktiven Materialteilen und auf den Ladungsübergangswiderstand an der Elektrode-Elektrolyt-Grenzfläche [Leng 2017]. Diese Faktoren führen zu einer erhöhten Reaktionsgeschwindigkeit und einem verringerten Gesamtwiderstand der LIB-Zelle. Eine hochtemperierte Formierung führt zu einer schnelleren, gleichmäßigeren Ausbildung der SEI, wodurch die Kapazität der Graphitelektrode bei anschließender Zyklisierung der Zelle bei Raumtemperatur erhöht wird [Bhattacharya 2014]. Dabei muss das Temperaturfenster genau eingehalten werden. Bereits geringe Temperaturabweichungen oberhalb der 50°C führen zu unerwünschten Nebenreaktionen und zur Degradierung der Zelle.

Durch den aufgetragenen Druck kann der physikalische Abstand zwischen den Elektroden aufgrund der Elastizität des Separators verringert und die Diffusion des Elektrolyten erhöht werden [Weber2014]. Dies führt zu einer Reduktion des Innenwiderstands in der Zelle und somit zur Reduktion der Formierzeit. Die Formierung unter einem gewissen mechanischen Druck reduziert aber nicht nur die Formierzeit, sondern auch das Risiko des thermischen Durchgehens der Zelle während des Prozesses. Zur Realisierung dieser Druck- und Temperaturanforderungen bei der Formierung gibt es Ansätze für Warenträgerkonzepte in Formieranlagen. Diese können neben der Gewährleistung der Formierparameter ebenfalls das Handling und die Prozesszeit der Li-Ionen-Zellen durch alternative Prozessführung verbessern. Durch einen vor-

installierten Anschluss zu einer Kontaktierungseinheit wird außerdem die Gefahr eines Kabelverschleißes vermieden. [Heimes2020]

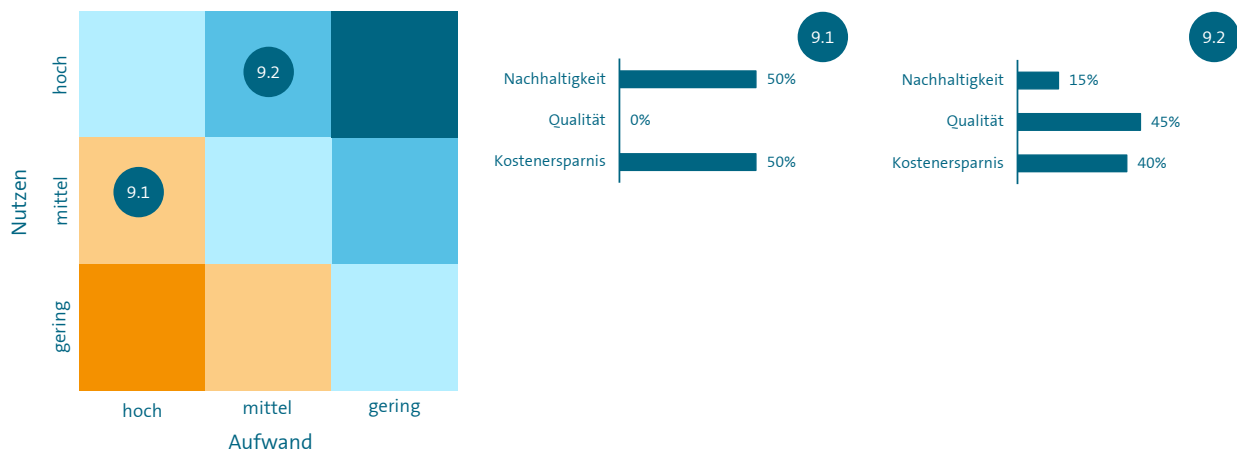
Die Temperatur hat neben der Formierung ebenfalls einen positiven Effekt auf die Reifung der Zelle. Durch die Ruhelagerung bei höheren Temperaturen können Prozesse innerhalb der Zelle beschleunigt und damit Qualitätsmängel schneller und/oder sicherer erkannt werden. Die Zyklisierung bei höheren Temperaturen führt zu einer Abnahme der Zellperformance, weil der Zellwiderstand durch ein weiteres Wachstum der SEI steigt [He2008]. Des Weiteren soll durch die Integration des End-of-Line Test in die Formierprozedur die Prozesszeit reduziert und die Qualität der Zelle frühzeitig erkannt werden.

Eine externe Formierung außerhalb des Zellgehäuses [Patent1], vor der finalen Siegelung, könnte die Effizienz der Formierung maßgeblich verbessern. Die Zellstapel würden in einem Elektrolytbad formiert werden, so können entstehende Gase schneller abgeleitet und Nebenreaktionen besser vermieden werden. Der Wegfall des Entgasungsschrittes ist ein weiterer Vorteil, der bei einem Verfahren für Pouch-Zellen adressiert wird. Dieses ermöglicht eine Formierung mit gleichzeitiger Entgasung durch eine Porttechnologie [Patent2]. Das entstehende Gas wird während der Formation direkt durch Ports (ventilähnliche Anschlüsse) abgeführt.

Zur Reduktion der Prozesszeit bei der Reifung kann die Digitalisierung dieses Prozessschrittes nützlich sein. Das Sammeln von Daten während der Reifung mittels eines Warenträgerkonzeptes mit BMS-System soll ein besseres Verständnis über die Qualität der Zelle und die Zellalterung ermöglichen. Dieses Verständnis könnte Basis für eine individuell angepasste Reifungszeit sein.

Durch die Vielzahl an Ansätzen wird erwartet, dass die RBW 9.2 in den nächsten Jahren durchstoßen werden kann.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



9.1 Energieeffizienz

9.2 Reduktion der Prozessdauern

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Nutzen einer besseren Energieeffizienz wird als mittel bewertet, da zu Beginn höhere Investitionskosten für die Hersteller bestehen. Die Durchbrechung der RBW führt zu einer höheren Nachhaltigkeit und einer Kostenersparnis. Durch den Umbau der Anlagen auf die neuen Konzepte wird der Aufwand als hoch eingeschätzt.

Der Nutzen einer Verringerung der Prozessdauer bei der Formierung und Reifung der Li-Ionen-Zellen ist hoch, da bei beiden Prozessschritten viel Kapital gebunden wird. Der Aufwand für den Maschinen- und Anlagenbauer wird im mittleren Bereich gesehen, da z. B. durch das Hinzufügen von Additiven der Formierprozess und die Anlagen nicht verändert werden müssen. Das Durchbrechen der RBW hat daher

vor allem einen Einfluss die Kosten einer Batteriezelle. Darüber hinaus sollen zugefügte Additive auch dazu beitragen, die Qualität der Zelle zu erhöhen. Die Nachhaltigkeit wird durch die höhere Qualität nur geringfügig verbessert.

Fachliche Unterstützung

Themenpaten:

Tobias Grobe, Account Manager Battery Solutions;

Toni Wolfgang, Account Manager Formation, thyssenkrupp System Engineering GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

Festo Vertrieb GmbH & Co KG

Industrie Partner GmbH

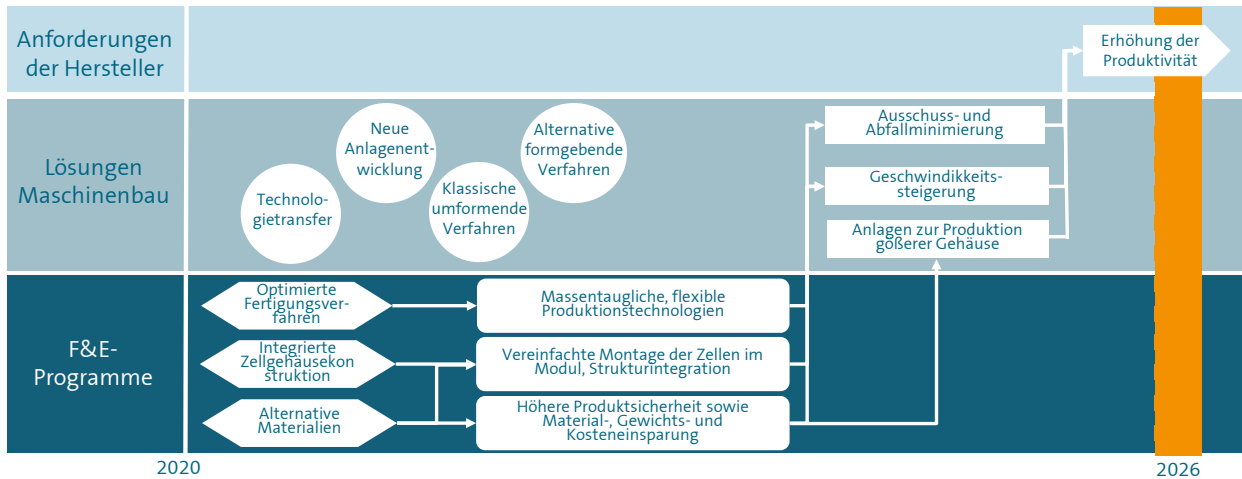
Maschinenbau Kitz GmbH

Gehäusefertigung (Zelle)

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
10.A.1	Effiziente Produktion: Minimierung des Ausschusses und der Stanzgitterabfälle	Fortschritt erzielt	Mittel bis Hoch	2023-2026
10.A.2	Verarbeitung innovativer Materialien in der Zelle: Leichtbau, Stähle, Aluminiumlegierungen	Geringer Fortschritt erzielt	Mittel bis Hoch	2023-2025

RBW 10.A.1: Gehäusefertigung (Zelle) – Erhöhung der Produktivität

Die Variantenvielfalt hinsichtlich Zelldimensionen steigt durch das breite Anwendungsspektrum von Lithium-Ionen-Zellen weiter an. Zudem werden Lithium-Ionen-Zellen unabhängig vom Zelltyp größer. Daraus ergeben sich auch in der Zellgehäusefertigung Herausforderungen, denen optimierten Fertigungsprozessen und -anlagen sowie alternativen Materialkombinationen begegnet werden muss. Weiterhin sind zur langfristigen Sicherstellung der Konkurrenzfähigkeit Potentiale der Ausschuss- und Abfallreduzierung zu heben und innovative Zellgehäusekonzepte zu realisieren.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 10.A Gehäusefertigung (Zelle)

Grundlagen

Mit zunehmender Verbreitung der Elektromobilität und des damit verbundenen stark wachsenden Bedarfs an Batterien gewinnt auch die Produktion der Zellgehäuse zunehmend an Relevanz. Je nach Gehäusotyp basiert die Fertigung auf unterschiedlichen Prozesstechnologien. So beruhen die Fertigungsstrategien prismatischer und zylindrischer Zellgehäuse grundsätzlich auf den Verfahren des Tiefziehens oder Fließpressens [Pettinger2013]. Bei der Pouch-Zelle kann eine Aluminium-Kunststoff-Verbundfolie mittels Tiefziehens in Halbschalenform gebracht werden [Singer2020]. In den letzten Jahren sind diese Prozesse weiter optimiert worden. Es konnten Fortschritte im Bereich der Produktionsgeschwindigkeit und Prozessgenauigkeit erreicht werden, sodass die bestehenden Zellgehäusefertigungstechnologien als industrialisiert bezeichnet werden können, es werden aber Kostenreduktionsziele von bis zu 50 Prozent für diese Fertigung gefordert.

Zur Steigerung der Sicherheit wird die Absicherung der Zellgehäusefertigung durch eine Dichtheitsprüfung als sinnvoll bewertet, obwohl diese auch signifikante Kosten verursacht. Produktionstechnisch sollten Leckagen aber über ausreichend sichere Prozesse vermieden werden.

Herausforderungen

Um dem vorausgesagten Kostendruck in den nächsten Jahren gerecht werden zu können, müssen die derzeit verwendeten Produktionsprozesse der Gehäusefertigung und deren Qualitätssicherung effizienter gestaltet werden (RBW 10.A.1). Es besteht Bedarf, die Fertigung neuer Geometrien zu realisieren und die Effizienz des Produktionsprozesses durch die Minimierung der Stanzgitterabfälle und des Ausschusses

weiter zu steigern. Die Verwendung alternativer Verfahren wie den Fließpressverfahren für Hard-Case-Zellen (Prismatisch und Zylindrisch) wird zudem immer relevanter [Singer2020].

Verstärkt werden diese Anforderungen durch den Trend zu größeren Zellformaten, durch welche die Prozessführung in der Gehäuseproduktion komplexer wird. Bei der Pouch-Zelle stellen die Verarbeitbarkeit der Aluminiumverbundfolie im Tiefziehprozess sowie die Siegelung zum Zellverschluss die wesentlichen Herausforderungen dar [Michaelis2018]. Eine immer bessere Prozessauslegung kann größere Tiefzieh-Tiefen ermöglichen. Bei den prismatischen und zylindrischen Zellen ist es eine Herausforderung, Gehäuse zu realisieren, die sich durch immer dünnere Wandstärken und damit weniger Gewicht bei gleicher Festigkeit auszeichnen [Thielmann2017]. Insgesamt gilt für größere Zellen, dass die Dichtfläche größer und die Verbindungstechniken aufwendiger gestaltet sein müssen. Durch Leckage des gesundheitsschädlichen Elektrolyten aus einem undichten Gehäuse würde eine Batteriezelle unbrauchbar und ein signifikantes Sicherheitsrisiko werden.

Eine weitere Herausforderung besteht in der Erforschung und dem Umgang von innovativen Materialien, die z. B. zur Verringerung des Gewichts und Erhöhung der Stabilität der Gehäuse beitragen [Foreman2017, Hong2019, Zhang 2019]. Die Fertigung von Zellgehäusen aus neuen Materialkombinationen würde zudem Potentiale der Strukturintegration sowie eine Verbesserung der inhärenten Sicherheit des späteren Batteriepacks eröffnen. Anlagen müssen für diese neuen Materialien ausgelegt werden (RBW 10.A.2).

Lösungsansätze

Zunächst kann ein Technologietransfer von branchenähnlichen Fertigungstechniken, wie das Highspeed-Pressen, für eine massentaugliche, kostengünstige Produktion von Nutzen sein. Durch die Integration dieser neuen Technologieansätze ist eine beschleunigte Weiterentwicklung der Produktionsprozesse möglich. Spätestens in den nächsten sechs Jahren sollen die Herausforderungen zur RBW 10.A.1 gelöst werden, um Kosten zu senken. Ein wichtiger Ansatz kann darüber hinaus die Standardisierung der Zellgrößen sein.

Im Tiefziehprozess der Al-Halbschalen für die Pouch-Zellen können Parameterstudien und der Aufbau eines tiefgehenden Prozessverständnisses zielführend sein [Fleischer2017]. Ein Reißen oder Ausdünnen der Folie gilt es bei Erhöhung der Tiefziehtiefe zu vermeiden.

Um den Trend hin zu großformatigen, dicken Zellen aufzugreifen, wird an Pouchfolien mit höherer Dicke geforscht, die stärker tiefergezogen werden können. Andere Entwicklungen gehen dahin, die Produktionstechnik weiter zu optimieren, um die derzeitige Tiefziehtiefe von 0,5 cm weiter zu erhöhen.

Kleinere Wandstärken zur Gewichtseinsparung lassen sich möglicherweise über feste Aluminium-Legierungen realisieren [Thielmann 2018].

Generell müssen auf der einen Seite Anlagen zur Produktion größerer Zellgehäuse entwickelt und auf der anderen Seite die Produktionsgeschwindigkeit erhöht und Restriktionen der etablierten Verfahren reduziert werden.

Neben der Optimierung der bestehenden Prozessansätze existiert aktuell größeres Forschung- und Entwicklungspotential in den Bereichen alternativer Gehäusekonzepte und -geometrien, die sich durch neue Materialkombinationen und eine Funktionsintegration auszeichnen [Forman2017, Hong2019, Zhang2019]. So können zum Beispiel Kühlkanäle oder Sensoren in die Zelle integriert werden, um die Funktionalität und Sicherheit der Zelle zu verbessern.

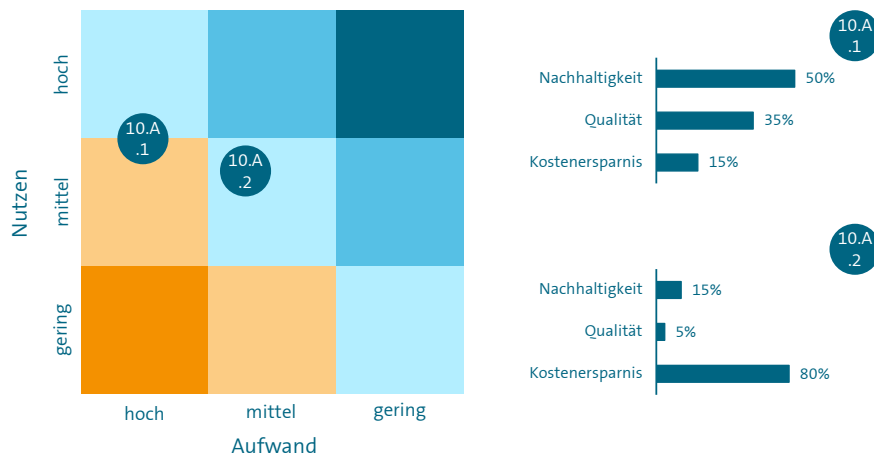
Aufwand- und Nutzenbewertung

Im Vergleich mit anderen Red Brick Walls der Batterieproduktion ist die Gehäusefertigung auf Zellebene als industrialisiert zu bezeichnen und die Materialien werden Stück für Stück weiter optimiert (10.A.1).

Bei einer ansteigenden Stückzahl und verstärktem Konkurrenzdruck auf den Märkten wird der Nutzen einer Optimierung des Ausschusses in der Zellgehäusefertigung in den nächsten Jahren insgesamt vermutlich steigen. Allerdings wird der Aufwand durch die Veränderungen in diesem Bereich als hoch eingeschätzt (RBW 10.A.2).

Größeres Potential mit aktuell niedriger Reife bietet hingegen die Verwendung neuer Gehäusekonzepte und -materialien, wodurch leichtere oder nachhaltigere Produkte realisiert werden können, ggf. auch mit integrierten Sensoren.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



10.A.1 Innovative Materialien

10.A.2: Ausschussminimierung

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Volker Seefeldt, Geschäftsführer
H&T Marsberg GmbH & Co. KG

TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
VITRONIC Dr.-Ing. Stein
Bildverarbeitungssysteme GmbH
Zeltwanger Dichtheits- und Funktions-
prüfsysteme GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

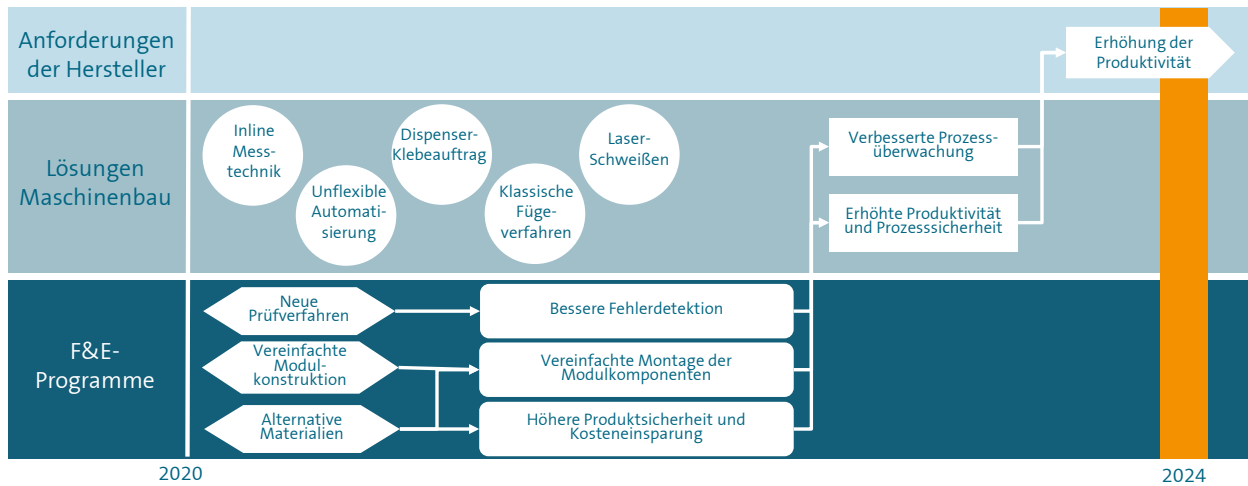
Achenbach Buschhütten GmbH & Co. KG
Bielomatik GmbH
Dr. Ullmann Consulting GmbH
F&S Bondtec Semiconductor GmbH
Hesse GmbH
HIGHYAG Lasertechnologie GmbH
Industrie Partner GmbH
Manz AG
Marposs AG
Maschinenbau Kitz GmbH
Pfeiffer Vacuum AG
pro-beam GmbH & Co. KGaA
Schuler AG
Sick AG

Gehäusefertigung (Modul)

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
10.B.1	Erhöhung der Produktivität und Komplexitätsbeherrschung	Geringer Fortschritt erzielt	Hoch	2021-2024
10.B.2	Verarbeitung innovativer Materialien im Modul: Leichtbau, Kunststoffgehäuse, Verbundmaterialien, Stähle, Aluminiumlegierungen	Geringer Fortschritt erzielt	Mittel bis Hoch	2023-2025
10.B.3	Designflexible Anlage	Geringer Fortschritt erzielt	Mittel	2023

RBW 10.B.1: Gehäusefertigung (Modul) – Erhöhung der Produktivität und Komplexitätsbeherrschung

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.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 10.B Gehäusefertigung (Modul)

Grundlagen

Für die Modulfertigung und -assemblierung sind besonders viele präzise Handling- und Fügeprozesse erforderlich, die vor allem in kleineren Serien einen niedrigen Automatisierungsgrad aufweisen. Dazu zählt das sichere Handling der Zellen wie auch Fügetechnologien im Gehäuse wie Kleben, Schrauben und Schweißen, alle in direkter Umgebung oder an der Zelle selbst mit entsprechenden Sicherheitskonzepten [Larsson 2019, Kampker2014, Das2018, Schmidt2015].

Herausforderungen

Um dem bestehenden Kostendruck der Massenproduktion 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 (RBW 10.B.1) und einer Steigerung des Automatisierungsgrades. In Sonderanwendungen besteht gleichzeitig die Herausforderung einer hohen Variantenvielfalt, der begegnet werden muss.

Bei der Modulfertigung besteht zudem eine große Herausforderung bei der Erforschung und dem Umgang von innovativen Materialien (RBW 10.B.2) z. B. zur Verringerung des Gewichts und zur Erhöhung der Stabilität der Gehäuse [Foreman2017, Hong2019, Zhang2019]. Beispiele dafür können Module sein, die sich durch integrierte Kühlkanäle, besondere Kombinationen von thermischer Isolierung und Leitfähigkeit oder kabellose Sensorkommunikation sowie der Einsatz von Verbundwerkstoffen im Modul sein.

Die Vielfalt an unterschiedlichen Fügeverfahren macht die Prozesse komplex und erhöht die Fehleranfälligkeit. Typisch sind der Einsatz von Verklebungen mittels Kleberauppenapplikation, Laser- oder Ultraschallverschweißung der einzelnen Zellen sowie Verschraubung von

weiteren elektrischen Komponenten am Modul [Heimes2018, Das2018]. Insbesondere bei kleineren Stückzahlen und hohen Flexibilitätsanforderungen außerhalb der Automotive-Anwendungen, muss die Modulgehäusefertigung in der Lage sein, in der Größe flexibel zu fertigen (RBW 10.B.3).

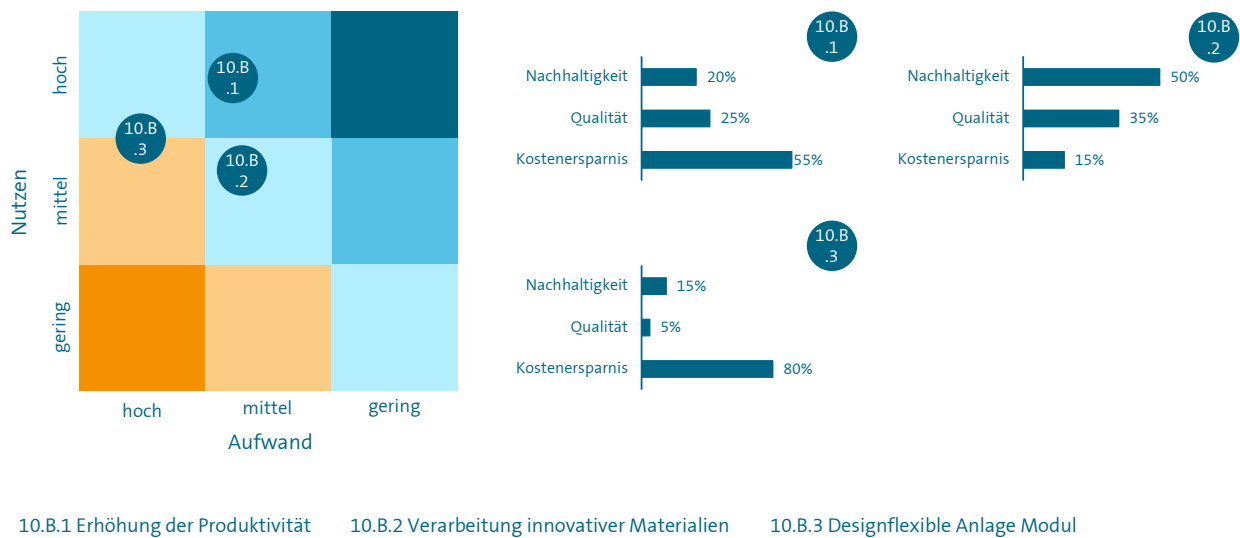
Grundsätzlich ist es eine Herausforderung, dass die Kenntnisse über Möglichkeiten der Prozesstechnologie häufig nicht mit den Konstruktionen der Systementwickler zusammenpassen.

Lösungsansätze

Auf Modulebene ist vor allem die Produktgestaltung gefragt, Lösungsansätze zu entwickeln, die eine durchgängige Verwendung von Fügeverfahren erlaubt. Aber auch neuartige Prüfverfahren wie zum Beispiel Optical Coherence Technologie zur Überprüfung von erfolgreicher Applikation von Kleberauppen kann verstärkt zum Einsatz kommen, um die Qualität in der Modulfertigung zu steigern. Automatisiert geführte Handlingssysteme mit In-Situ Messtechnik sind eine mögliche Lösung, um die Modulfertigung noch effizienter zu machen (RBW 10.B.1).

Neue Materialien, wie Faserverbundwerkstoffe müssen einer aufwändigen Prozessentwicklung unterzogen werden. Bei diesen Ansätzen sind nicht nur die Prozessentwicklung gefordert, sondern auch Produktentwicklungsansätze sowie leichte und integrierte Konstruktionen zu schaffen. Faserverbundwerkstoffen stellen zudem hohe Anforderungen an die Dichtheitsprüfung. Die dünnwandigen Materialien ändern bei Durchbeaufschlagung (negativ wie positiv) ihre Form und führen somit zu Scheinleckagen und ähnlichen Messfehlern. Die wiederum in verlängerten Inbetriebnahmen und weiteren Mehraufwänden resultieren. (RBW 10.B.2.)

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



Die Designflexibilität kann über eine modulare Produktgestaltung, wie zum Beispiel anpassbare Verspannelemente, erreicht werden. Grundsätzlich sollte der Austausch zwischen Anlagenbauern und Fertigungstechnologieexperten und den Batteriemodulentwicklern für bessere Synergien intensiviert werden (RBW 10.B.3).

Aufwand- und Nutzenbewertung

Im Vergleich mit anderen Red Brick Walls der Batterieproduktion ist die Modulfertigung schon stark industrialisiert, weil übliche Fertigungsverfahren verwendet werden. Insbesondere eine weitere Effizienzsteigerung ist in diesem Kontext als lösbare Aufgabe anzusehen. Für die Effizienzsteigerung der Modulfertigung wird der Aufwand als mittelgroß angesehen, der Nutzen für die Modulfertigung jedoch als hoch (RBW 10.B.1).

Insgesamt tragen diese Maßnahmen hauptsächlich zu einer Kostenreduktion, aber auch einer Steigerung der Nachhaltigkeit und Qualität bei. Die Verarbeitung innovativer Materialien wird von den Experten als mittlerer Aufwand und Nutzen eingestuft (RBW 10.B.2). Der Aufwand für die Gestaltung von designflexiblen Produkten und dafür geeigneten Produktionsanlagen für mittlere Stückzahlen in der Modul- und Systemfertigung wird von den Experten als mittelhoch eingeschätzt und zielt insgesamt auf die Reduktion von Kosten ab (RBW 10.3),

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Volker Seefeldt, Geschäftsführer
H&T Marsberg GmbH & Co. KG

Mit weiterer Unterstützung von:

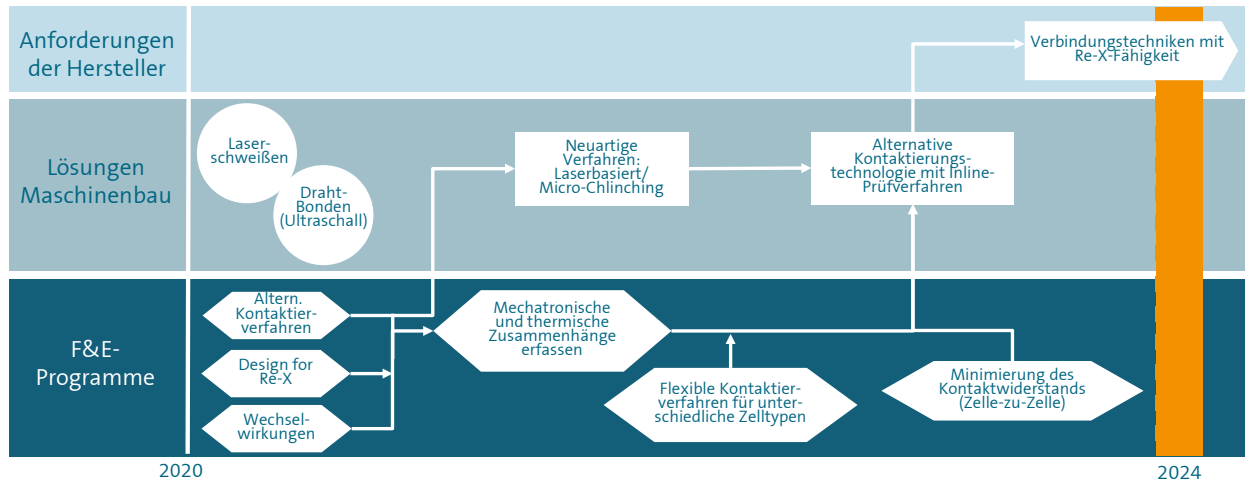
Achenbach Buschhütten GmbH & Co. KG
Bielomatik GmbH
Dr. Ullmann Consulting GmbH
F&S Bondtec Semiconductor GmbH
Hesse GmbH
HIGHYAG Lasertechnologie GmbH
Industrie Partner GmbH
Manz AG
Marposs AG
Maschinenbau Kitz GmbH
Pfeiffer Vacuum AG
pro-beam GmbH & Co. KGaA
Schuler AG
Sick AG
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungs-
systeme GmbH
Zeltwanger Dichtheits- und Funktions-
prüfsysteme GmbH

Kontaktierung

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
11.1	Verbindungstechniken, die für Remanufacturing / Recycling / schnelle Kontaktunterbrechung ausgelegt sind	Unverändert	Mittel	2020-2024
11.2	Kontaktflächen für größere Ströme und größere Zellen	Fortschritt erzielt	Hoch	2020-2024

RBW 11.1: Verbindungstechniken mit Re-X-Fähigkeit

Zur sicheren Handhabung großer Ströme werden die Ableiter zwangsläufig größer und die Kontaktierung dadurch komplexer. Außerdem werden die Zellverbinder durch die dynamischen Belastungen im Fahrzeug zusätzlich beansprucht. Zeitgleich stellt die Steigerung der packseitigen Spannungen die Kontaktierungstechnik vor enorme Herausforderungen. Zur Umsetzung der Re-X-Fähigkeit der Lithium-Ionen-Batterie wird zudem die schnelle und möglichst materialschonende Lösung der Kontaktierung immer relevanter. Durch optimierte Verbindungstechnik können die Sachmängelkosten reduziert werden.



Legende: ○ State of the Art ◁ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 11: Kontaktierung

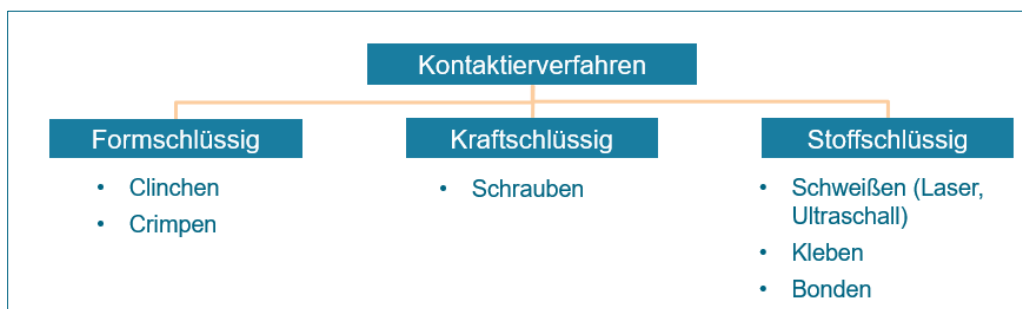
Grundlagen

Die Forderung nach einer Steigerung der Systemspannungen im Batteriesystem ist durch die Ziele der Erhöhung der Energie- und Leistungsdichte, sowie von schnelleren Ladezyklen bedingt. Die Qualität der Kontaktierung hat einen großen Einfluss zur Erreichung dieser Ziele. Es wird in der Verbindungs- und Kontaktierungstechnik zwischen drei Arten von Kontaktierungen unterschieden: Form-, kraft- und stoffschlüssige Verbindungen [Haberhauer1996]. Aktuell sind zentrale Kontaktierungssysteme oder Busbars in der Industrie Standard. In der Regel werden Module mittels Laserschweißen, Laserbonden und Ultraschallschweißen 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 zeigt die „Montageprozesse eines Batteriemoduls und -packs“ [Heimes2018]. Die Auswahl des Kontaktierverfahrens ist zudem abhängig vom Material der Busbars und des Zellformats [Das2018].

Herausforderungen

Eine große Herausforderung ist die Entwicklung eines Verfahrens, 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 und zu gewährleisten (RBW 11.1). Unter dem Begriff Re-X werden alle Prozesse zur Lebensdaueroptimierung einer Batterie und den Batteriekomponenten zusammengefasst. Darunter fallen u. a. die Prozesse Reuse, Remanufacturing und Recycling. Der Einsatz der Verschraubung als kraftschlüssiges Verfahren zur Kontaktierung ist einerseits gut lösbar, andererseits hat die Kontaktierung mittels Verschraubung gegenüber der Kontaktierung mittels Laser einen doppelt bis dreifachen Kontaktwiderstand [Schmidt2015].

Eine weitere Herausforderung stellt die Kontaktierung der einzelnen Komponenten des Moduls bei höheren Strömen und großformatigen Zellen dar (RBW 11.2). Durch höhere Ströme, die im Batteriemodul fließen, müssen die Ableiter vergrößert werden, um den Übergangswiderstand zu verringern. Für den Kontakt steht somit mehr Fläche zur Verfügung. Außerdem führt die dynamische Beanspruchung in mobilen Anwendungen zu einer starken mechanischen Belastung der Kontakte. Die Sachmängelkosten können dabei durch eine optimierte Kontaktierungstechnik gesenkt werden.



Durch entsprechende Techniken müssen hohe Wärmeeinträge verhindert und eine gute Kontaktierung der Komponenten dauerhaft gewährleistet sein. Versprödung und Korrosion auch bei anspruchsvollen klimatischen Betriebsbeanspruchungen der Kontakte gilt es unbedingt zu verhindern.

Die Oberfläche des Kontakts sollte zudem nur einen geringen, isotropen elektrischen Widerstand besitzen. Je nach Batteriedesign ist ein Materialmix zuverlässig zu verbinden. Bedingt durch eine fehlerhafte Kontaktierung können Kurzschlüsse bei Lithium-Ionen-Zellen hervorgerufen und damit das Batteriesystem beschädigt werden. Aus diesem Grund muss der Verschleiß an den Kontakten minimiert werden. Stoffschlüssige Verfahren bieten den Vorteil einer schwingungsfesten Verbindung mit geringen Übergangswiderständen zwischen den unterschiedlichen Materialien zu ermöglichen. Allerdings ist das zerstörungsfreie Lösen der Verbindungen nicht ohne größeren Aufwand möglich. Kraftschlüssige Verbindungen, wie z. B. Schrauben, lassen sich in der Regel wieder gut lösen. Diese werden im Automobilbereich allerdings weniger eingesetzt, da sie einen hohen Übergangswiderstand besitzen.

Lösungsansätze

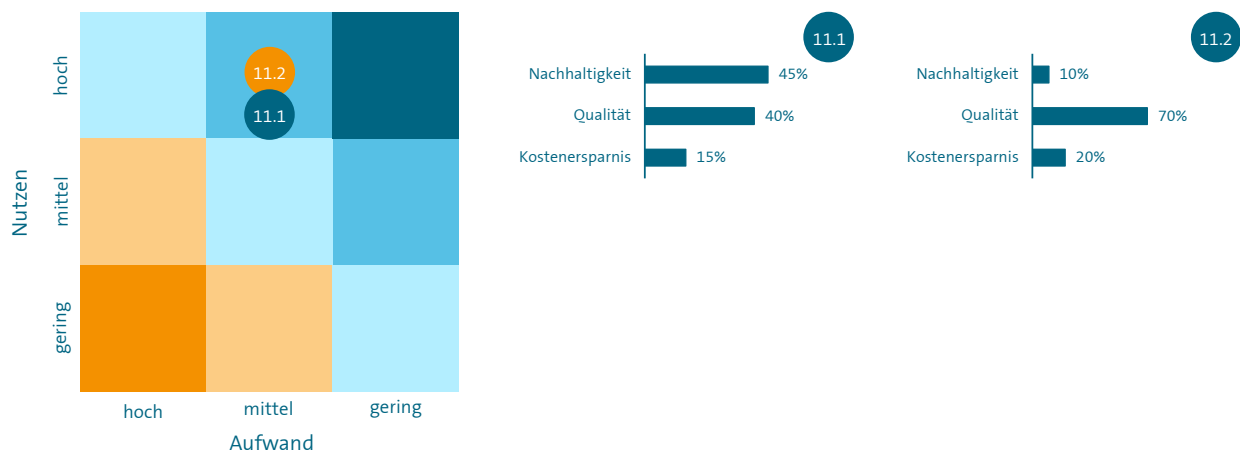
Im Hinblick auf einen 2nd-Life Einsatz von Automobilzellen als stationäre Speicher oder als erneute mobile Anwendungen steht die Kontaktierungstechnik vor großen Herausforderungen. Diese entstehen im Besonderen dann, wenn die Kontakte geschweißt sind und eine nicht-lösbare Verbindung vorliegt (form- oder stoffschlüssige Verbindungen).

Diese müsste dann die Mindestanforderungen beider Anwendungen erfüllen, ansonsten ist ein Austausch der Zellen nicht möglich. Laserbonden und mechanische Verbindungen auf Modulebene adressieren diese Herausforderung. Die relativ dünnen elektrischen Verbinder beim Laserbonden mit drahtförmigen Bondmaterial oder sog. Bändchen mit rechteckigem Querschnitt können mit begrenztem Aufwand entfernt werden und begünstigen eine Wiederverwendung oder einen Austausch defekter Zellen.

Die Verbesserung bestehender Verfahren oder die Entwicklung neuer Verfahren sowie der frühzeitige Einbezug der elektrischen Verbindung in die Zelldesigns sind notwendig, um eine massentaugliche Kontaktierung von Hochvoltverbindern im System zu realisieren. Das Laserbonden und das Micro-Clinching bieten hier vielversprechende Ansätze. [Das2018]

Durch die Entwicklung alternativer Kontaktierungsverfahren können außerdem Kenntnisse über thermische Zusammenhänge gewonnen und inline ausgewertet werden, um eine direkte Beurteilung der Qualität der Verbindung zuzulassen. Eine Qualitätskontrolle nach dem Kontaktieren könnte durch die Integration von Inline-Messtechnik ersetzt werden. Eine mögliche zerstörungsfreie Inline-Qualitätsüberprüfung der Verbindungsstelle ist beispielsweise die thermografische Analyse und die optische 3D Kontrolle. Die Entwicklung von flexiblen

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



11.1 Re-X-Fähigkeit

11.2 Größere Ströme

Kontaktierungsverfahren für die Anforderungen der unterschiedlichen Zellformate ist bei einer variantenflexiblen Produktion von Batteriemodulen und Batteriepacks 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. Die Weiterentwicklung bestehender und Entwicklung neuer Kontaktierverfahren sollen zur Durchbrechung der RBWs 11.1 und 11.2 beitragen. Durch die bisherigen Fortschritte wird dies bis zum Jahr 2024 erwartet. Die Erkenntnisse stellen einen entscheidenden Faktor für die Lebensdauer des Batteriesystems dar.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Die Auslegung der Kontaktierung auf größere Ströme und Zellformate und die Remanufacturingfähigkeit des Batteriesystems spielen in Zukunft eine immer wichtiger werdende Rolle, wodurch der Nutzen des Durchbruchs der Red Brick Walls als hoch einzustufen ist. Die RBW 11.1 wird von Experten als die langfristig wichtigere RBW bezeichnet, da durch Verbesserungen in diesem Bereich die Wertschöpfung der Batterie, Modulen und Zellen erhöht werden kann. Die RBW 11.2 ist dagegen dringender, da die Kontaktierung für höhere Ströme und größere Zellformate die Wettbewerbsfähigkeit der Batterie durch eine bessere Performance im Vergleich zu konventionellen Technologien stärkt und damit die Basis für weitere Entwicklungen darstellt.

Die Nachhaltigkeit und die Qualität der Batteriesysteme wird durch die Remanufacturingfähigkeit deutlich gesteigert. Zum einen kann durch lösbare Verbindungen die Nutzungsdauer der Batterie verlängert werden. Zum anderen wird die Qualität durch die Weiterentwicklung der Verfahren verbessert. Eine Kostenersparnis wird durch die Remanufacturingfähigkeit eines Batteriesystems nur in einem geringen Ausmaß erreicht.

Die Auslegung der Kontaktierung auf höhere Ströme besitzt nur einen geringen Einfluss auf die Nachhaltigkeit und die Kosten des Batteriesystems. Da allerdings unter anderem ein guter Stoffschluss bei unterschiedlichen Materialien und Komponenten und ein geringer Widerstand bei höheren Strömen relevanter wird, ist zu erwarten, dass durch die Durchbrechung dieser RBW die Qualität der Kontaktierung deutlich verbessert werden kann.

Der Aufwand der Weiterentwicklung vorhandener Kontaktierverfahren und die Erforschung neuer Alternativen ist dabei als mittel einzuschätzen, da in den letzten Jahren bereits viel Entwicklungsaufwand in die Lösung der RBWs investiert wurde und einige vielversprechende Ansätze sich bereits in einem sehr weiten Entwicklungsstadium befinden, beispielsweise das Laserbonden.

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Dr. Hubert Reinisch, Head of Engineering and Technology, PIA Automation Bad Neustadt GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

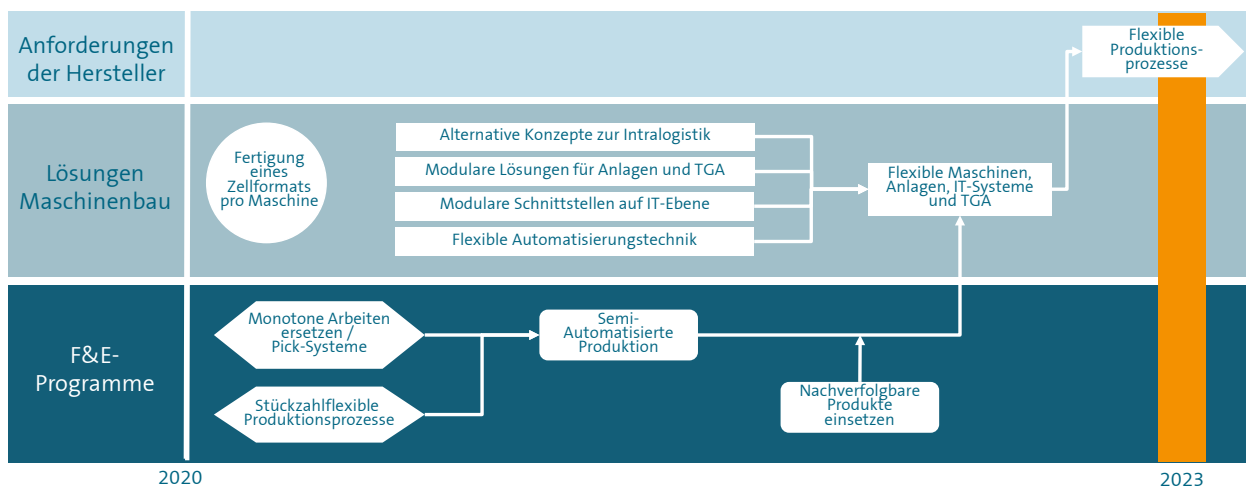
Bielomatik GmbH
Dr. Ullmann Consulting
Festo Vertrieb GmbH & Co KG
F&S Bondtec Semiconductor GmbH
Hesse GmbH
H&T Marsberg GmbH & Co. KG
KUKA Systems GmbH
Manz AG
Maschinenbau Kitz GmbH
pro-beam GmbH & Co. KGaA
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
VITRONIC Dr.-Ing. Stein
Bildverarbeitungssysteme GmbH
ZELTWANGER Holding GmbH

Flexible Produktion

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
12.1	Gestaltung flexibler Produktionsprozesse: Ramp-Up und Stückzahlflexibilität	Fortschritt erzielt	Mittel bis Hoch	2023
12.2	Umgang mit „ähnlichen“ Zellen auf einer Anlage / Wandlungsfähigkeit	Fortschritt erzielt	Mittel bis Hoch	2022

RBW 12: Flexible Produktion – Modular und Stückzahlflexibel

Die Anzahl unterschiedlicher Zellformate und -chemien wächst weiter an. Daraus ergeben sich vor allem für die Modul- und Packfertigung unterschiedliche Herstellprozesse, worauf mit flexiblen und modularen Konzepten für Maschinen und technischer Gebäudeausstattung (TGA) reagiert werden muss. Flexibilität umfasst die Varianten-, Prozess- und Stückzahlflexibilität sowie die Skalierbarkeit (Scale-Up oder Modifikation des Produktionsequipments).



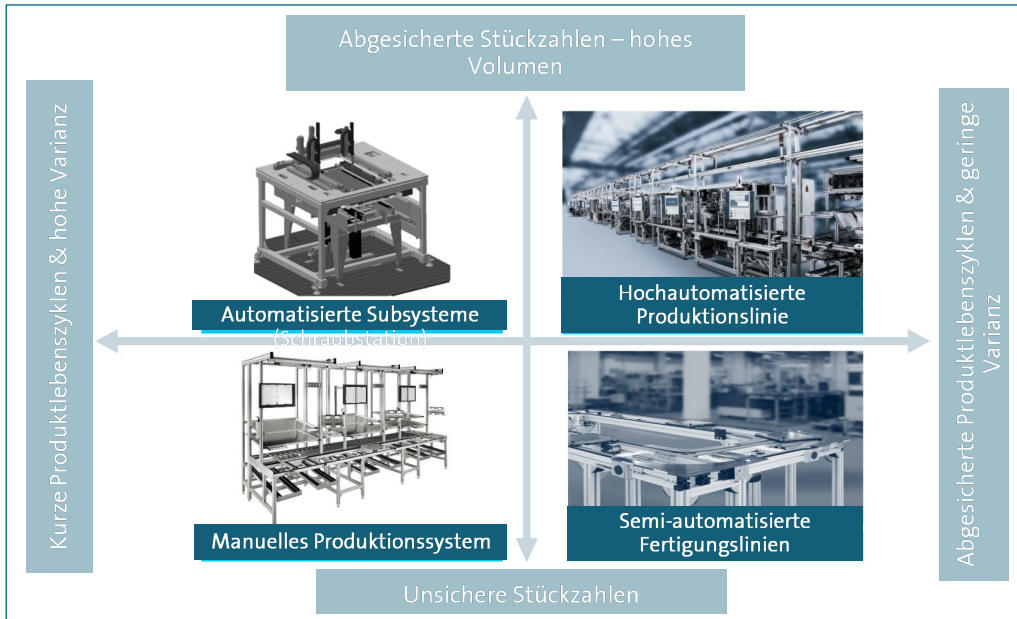
Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete Lösungsansätze □ Massentaugliche Technologie

*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 2035)

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



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

RBW 12: Flexible Produktion

Grundlagen

Eine flexible Produktion bei der Zelle, im Sinne von eine Fertigung von unterschiedlichen Zellformaten und auch unterschiedlichen Abmaßen auf einer Linie, wird aus Aufwandssicht nicht als Sinnvoll erachtet. Zum einen entstehen erhebliche Geschwindigkeitseinbußen und zum anderen wirken sich hohe Ausschüße beim jeweiligen Anlaufen der Produktion direkt auf die Rentabilität aus. Die folgenden Ausführungen adressieren daher Herausforderungen und Lösungen für die Modul- und Packproduktion.

Aktuell werden prismatische, zylindrische und Pouch-Zellen in Batteriemodulen und -systemen verbaut. Diese Zelltypen unterscheiden sich grundlegend in ihren Geometrien und Eigenschaften [Kampker2014a,b]. Mit der steigenden Anzahl an Batterieanwendungen erhöht sich die Variantenzahl der am Markt vertretenen Batte-

riemodule und -systeme. Durch die exponentiell ansteigenden Verkaufszahlen von Elektrofahrzeugen und damit einhergehenden höheren Produktionsvolumen wird ein höherer Grad an Automatisierung in der Modul- und Systemproduktion, vor allem für die Fahrzeugindustrie, zunehmend wirtschaftlicher. Aufgrund der insgesamt größeren Stückzahlen nimmt die Bedeutung der Flexibilität daher in den letzten Jahren für diesen Bereich leicht ab [Sonnenberg 2018]. Mit einem hohen Automatisierungsgrad und einem entsprechend großen Invest gehen auch besonders hohe Qualitätsanforderungen einher.

Weniger automatisiert verhält es sich im Bereich der sonstigen Anwendungen wie Nutzfahrzeuge, Zweiräder, Flurförderfahrzeuge und Non-Automotive-Anwendungen wie Schiffe und Power-Tools. Bei deutlich geringerem Produktionsvolumen ist die Variantenzahl um ein vielfaches größer als bei den Elektrofahrzeugen

[Sonnenberg 2018]. Insbesondere im Bereich der Modul- und Systemmontage gewinnt eine möglichst varianten- und stückzahlflexible Produktion bei gleichzeitig hoher Wirtschaftlichkeit an Bedeutung. Die Auslegung eines flexiblen Produktionskonzepts umfasst dabei neben der Anlagen- und Automatisierungsplanung, Aspekte der Logistik, der technischen Gebäudeausstattung sowie IT-gestützte Organisationsprozesse innerhalb der Produktion [Edström 2020]. Die Möglichkeiten der Ausgestaltung in Abhängigkeit von Flexibilität und Stückzahl sind zusammenfassend in der Grafik auf Seite 116 dargestellt.

Herausforderungen

Die Herausforderungen an eine flexible Modul- und Packproduktion sind vielfältig. Eine wesentliche Fragestellung liegt in der Gestaltung der flexiblen Produktionsprozesse selbst, damit diese z. B. im Sinne eines Scale-up auf geänderte Produktionsvolumina reagieren können. Dies gilt auch für die Messtechnik. Über einzelne Prozesse hinaus ist die Fähigkeit des Gesamtsystems auf Änderungen reagieren zu können und unterschiedlichste Modulformate und Packvarianten innerhalb eines Systems produzieren zu können, von großer Bedeutung. Daneben entwickeln sich Zellgenerationen schneller weiter, als Produktionsanlagen ausgewechselt werden. Die Anlagen müssen deshalb mit unterschiedlichen, aber „ähnlichen“ Zellen kompatibel sein [Bognar 2018, Küpper2018]. Diese Flexibilität ist im Modul- und Systemdesign zu berücksichtigen.

Track- und Trace-Anwendungen, die in der Zellfertigung schon weitgehend für Automotive-Anwendungen realisiert sind, müssen in den varianten- und stückzahlflexiblen Anlagen ebenfalls umgesetzt werden, um eine bestmögliche Wandlungsfähigkeit zu gewährleisten (RBW 12.2).

Lösungsansätze

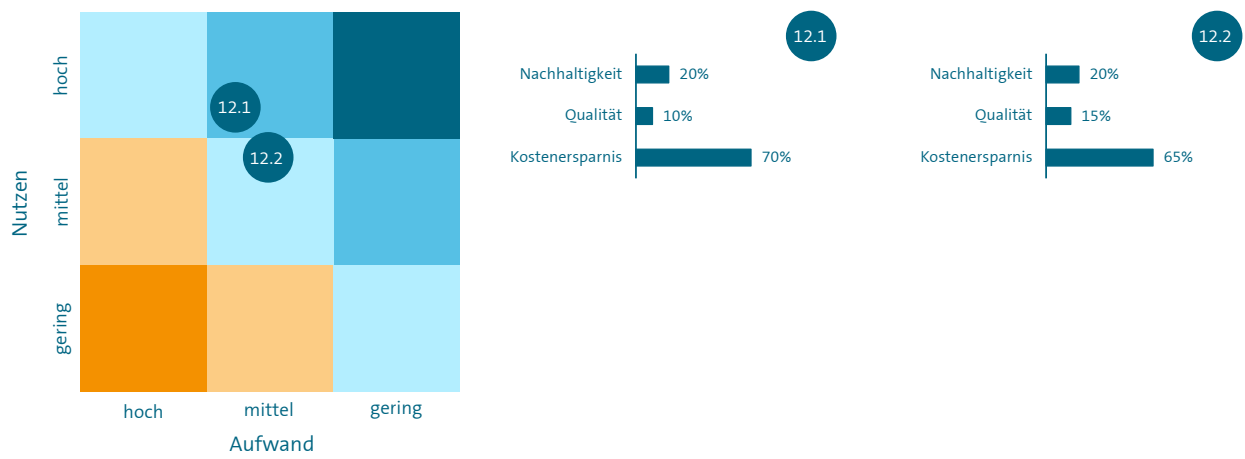
Vorherrschende Lösungsansätze zielen auf die Gestaltung flexibler Anlagen, Prozesse und Produktionssysteme ab [Fuchslocher2019, Heidelberger2020]. Durch die in den nächsten Jahren weiter steigenden Produktionsvolumina könnte ein mitwachsender Automatisierungsgrad Vorteile bringen. Darüber hinaus ist es wünschenswert, stückzahlflexibel auf einer Linie produzieren zu können.

Bereits in kleineren Produktionen lassen sich durch semi-automatisierte Prozesse und Mensch-Roboter-Kollaboration monotone und kreative Montagearbeiten sinnvoll in einer Station abbilden oder die Variantenvielfalt durch eine noch bessere Bedienung mit Augmented Reality in der Montage beherrschbar machen.

Besonders die Systemmontage eignet sich für den Einsatz einer Mensch-Roboter-Kollaboration [Küpper2018]. Menschliche Fähigkeiten, wie bspw. Erfahrung, Improvisation oder die Kombination menschlicher Sinne zum Beispiel für die filigrane Kabelmontage werden mit den Stärken der Roboter, wie Genauigkeit, Kraft und Wiederholbarkeit kombiniert. Die dadurch eintretende qualitativ hochwertige Ausführung der Produkte und gleichzeitig steigende Produktivität wirkt sich positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit der Batterieproduktion aus. Durch die Erkenntnisse und Erfahrung im Bereich Prozessautomatisierung wird erwartet, dass die RBW 12.1 in den nächsten 2-3 Jahren durchbrochen werden kann.

Eine Flexibilität der Anlagen der Modulfertigung, insbesondere für ähnliche Batteriezellen, erfordert ein sehr gutes Prozessverständnis in Bezug auf Toleranzen, Füge- und Greiftechnik sowie eine Anlagenverkettung, die eine flexible Anpassung von Prozessparametern in Bezug auf sich

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



12.1 Gestaltung flexibler Produktionsprozesse

12.2 Umgang mit „ähnlichen“ Zellen

ändernde Eingangsprodukte erlaubt. Eine tatsächlich angewandte Standardisierung von Zellen könnte auch diese Flexibilitätsbedarfe senken.

Eine Vereinheitlichung der Batteriemodule zielt darauf ab, die Variantenvielfalt erst zum Ende des Produktionsprozesses bei der Systemmontage entstehen zu lassen. Durch diese Ansätze sinkt der Flexibilitätsbedarf. Zur Lösung der RBW 12.2 wird die Herausforderung daher sowohl produkt- als auch prozessseitig betrachtet. Durch diesen Ansatz wird eine Durchbrechung dieser RBW in den kommenden zwei Jahren erwartet.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der Aufwand semi-automatisierte Prozesse, Mensch-Maschine-Kollaboration, vereinheitliche Datenstrukturen, digitale Zwillinge und auch Track & Trace-Systeme in der Batteriemodul- und -systemproduktion einzuführen, ist als Mittel einzuschätzen. Die vorhandenen Technologien werden bereits in verwandten Industrien erfolgreich genutzt. Ein großer Mehrwert ergibt sich durch qualitativ wertigere Produkte. Zudem führen die Variantenflexibilität sowie die höhere Produktivität, insbesondere für mittlere Stückzahlen, zu reduzierten Kosten. [Sonnenberg2018] (RBW 12.1).

Der effiziente Umgang mit „ähnlichen“ Zellen in der Modul-Fertigung ist insgesamt einem mittleren Aufwand und Nutzen zuzuordnen; durch eine effektive Umrüstbarkeit können Wechselaufwände und so Kosten und Lieferantenabhängigkeiten reduziert werden (RBW 12.2).

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Andreas Gryglewski, Business Development,
Bosch Rexroth AG

Mit weiterer Unterstützung von:

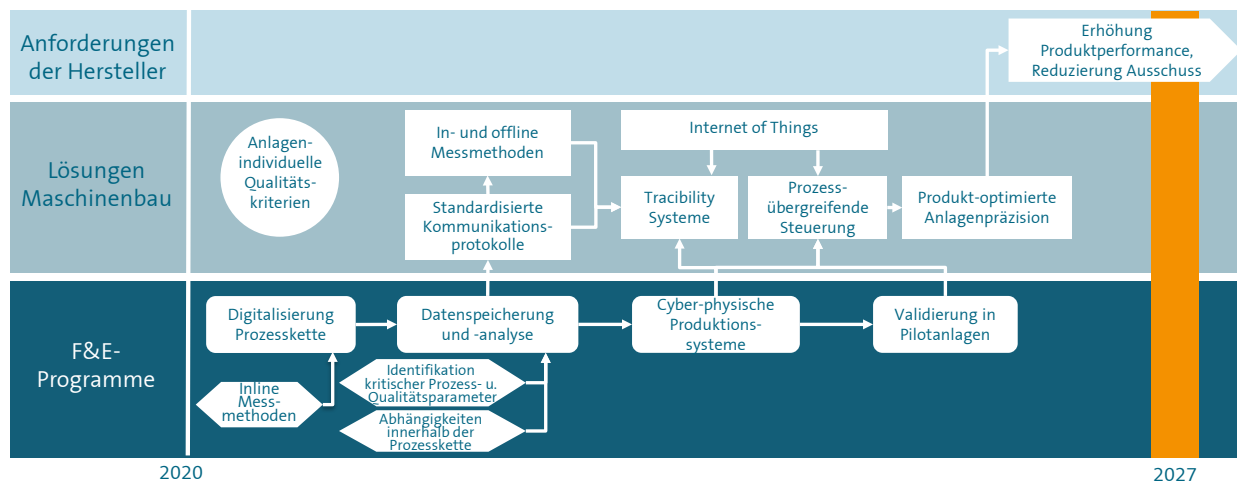
Balluff GmbH
Bielomatik GmbH
BST eltromat International GmbH
Dr. Ullmann Consulting GmbH
Festo Vertrieb GmbH & Co. KG
F&S Bondtec Semiconductor GmbH
Hesse GmbH
Industrie Partner GmbH
KUKA Systems GmbH
Liebherr Verzahntechnik GmbH
Manz AG
Marposs AG
Maschinenbau Kitz GmbH
Omron Electronics GmbH
PIA Automation Bad Neustadt GmbH
Robert Bosch GmbH
SCHUNK GmbH & Co. KG
Sick AG
Siemens AG
thyssenkrupp System Engineering GmbH
TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH
Weiss GmbH
Zeltwanger Dichtheits- und Funktions-
prüfsysteme GmbH

Wirkzusammenhänge

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
13.1	Identifizierung der wesentlichen Wirkzusammenhänge entlang der Prozesskette	Fortschritt erzielt	Hoch	2027
13.2	Kommunikation zwischen heterogenen Produktionslagern + prozessübergreifende Steuerung / Regelung	Fortschritt erzielt	Hoch	2027
13.3	Nachverfolgbarkeit der Batteriezelle und deren Produktmerkmale über den gesamten Lebenszyklus	Fortschritt erzielt	Mittel	2030

RBW 13.1: 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 KI-basierter Steuerungs- und Regelungssysteme genutzt werden, um bspw. den Einfluss der Umgebung oder schwankender Materialparameter auf die Produktion zu eliminieren. Hierbei ermöglicht eine Kommunikation der heterogenen Produktionsanlagen über einheitliche Standards eine prozessübergreifende Einflussnahme hin zu einer vollautomatisierten Produktion, sodass die Produktqualität erhöht und der Ausschuss reduziert wird.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 13: Wirkzusammenhänge – Einsatz von Digitalisierung, Industrie 4.0, effiziente Produktion

Grundlagen

Batteriezellen und deren Herstellungsprozess zeichnen sich durch komplexe Wirkzusammenhänge zwischen den Prozessen, der Struktur der einzelnen Zwischenprodukte sowie den Eigenschaften der finalen Zelle aus. Diese Wirkzusammenhänge erfordern ein hohes Verständnis in den Bereichen Elektrochemie, Elektronik, Mechanik, Verfahrenstechnik und Fertigungstechnik. 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 robusten 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.

Effizienz der einzelnen Prozessschritte	Prozessketteneffizienz (bei 25 Prozessen)
99,5	88,2
99	77,8
97	46,7
95	27,7

Auswirkung von unterschiedlichen Prozesseffizienzen auf die gesamte Prozessketteneffizienz mit 25 Prozessschritten.
Quelle: BLB der TU Braunschweig

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. Der Einsatz von Industrie 4.0 Lösungen, wie bspw. cyber-physische Produktionssysteme, Data-Management in Cloud-computing oder künstliche Intelligenz, verspricht dabei eine wesentliche Reduktion der bisherigen Ausschussquoten sowie Erhöhung der Flexibilität.

Herausforderungen

Zur Erschließung der Prozess- und Prozesskettenpotentiale ist ein tiefes Verständnis der Wirkzusammenhänge erforderlich (RBW 13.1). Jeder Prozessschritt weist individuelle Prozessparameter auf, welche direkt 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 potenzieren.

Bspw. verursacht eine Prozesseffizienz bzw. Ausbeute von 99,5 Prozent eine Gesamteffizienz von rund 88 Prozent für eine Prozesskette mit 25 Prozessschritten (siehe Tabelle 121). Somit stellt die Identifikation von qualitätskritischen Stellgrößen sowie deren Auswirkungen entlang der Prozesskette eine der wesentlichen Herausforderungen einer effizienten Prozessauslegung dar.

Zusätzlich bewirkt die Heterogenität der Produktionsanlagen von meist unterschiedlichen Herstellern ein breites Spektrum unterschiedlicher Parameter sowie Kommunikationsschnittstellen (RBW 13.2). 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 der Umsetzung geeigneter Standards für die Kommunikation zwischen den Anlagen.

Gleichermaßen müssen Standards für die zu übergebenden Inhalte der einzelnen Anlagen (bspw. Anlagenparameter, Key Performance Indicators (KPI) festgelegt werden.

Für die erfolgreiche Etablierung der Elektromobilität müssen neben der Betrachtung der Produktionsdaten auch die Auswirkung auf die Batteriezellperformance in der Nutzungsphase in einer lebenszyklusorientierenden Bewertung und Analyse der Batteriezellen berücksichtigt werden (RBW 13.3). 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 sowie der Einsatz von Industrie 4.0 Ansätzen einen wertvollen Beitrag leisten (RBW 13.1), indem bspw. Transparenz hinsichtlich verschiedener Wirkzusammenhänge, oder aber sensitive Einstellparameter identifiziert werden können.

Dabei ermöglicht die Digitalisierung 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. Darüber hinaus sollten für die Charakterisierung der Zwischenprodukte vermehrt inline Messverfahren eingesetzt werden, um die Entwicklung zu einer effizienten Produktion zu unterstützen. Die Gesamtheit der Daten können entweder intern auf Servern oder in einer Cloud-Plattform 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 Verarbeitung 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 mechanistischer Modelle ermöglicht eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung der Produktionskosten bzw. Erhöhung der Produktqualität, da so Kosten für unnötig genaue Toleranzen umgangen werden können.

Für die Kopplung sequentieller Produktionsanlagen werden herstellerübergreifende Standards für die Schnittstellen der Anlagen benötigt, bspw. OPC UA (RBW 13.2). 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 künstlichen Intelligenz (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 AnlagenführerInnen in die Entwicklungen der Regelungs- und Steuerungsalgorithmen einfließen.

Zusätzlich kann durch den Einsatz eines cyber-physischen Produktionssystems ein digitales Abbild 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.

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 13.3). 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 kann im Rahmen eines Batteriepasses gebündelt werden. (siehe auch Bericht CEID Traktionsbatterien)

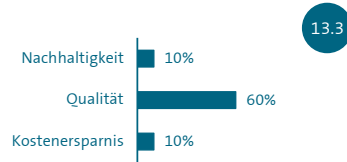
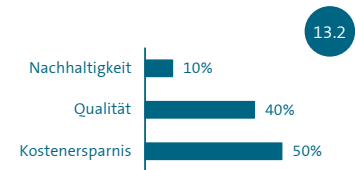
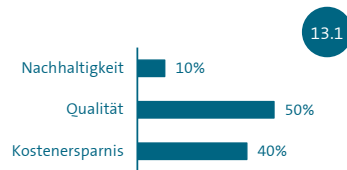
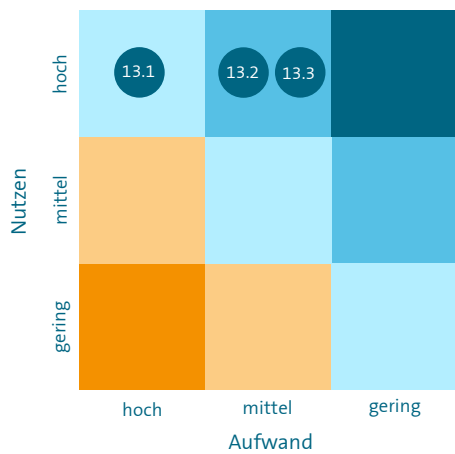
Aufwand- und Nutzenbewertung

Die Eruierung der Zusammenhänge innerhalb der Produktion (RBW 13.1) 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 essentielle Messgrößen zu beschränken, sodass die Investitionen für die Digitalisierung (bspw. Messinfrastruktur inkl. Wartung und Betrieb) sowie deren Datenspeicherung (bspw. lokale Server, Cloud) weitestgehend reduziert werden. Eine solche bedarfsorientierte Anlagenauslegung kann zur weiteren Steigerung der Rentabilität einer Anlageninvestition beitragen.

Gleichmaßen kann ein tiefgreifendes Wissen über Wirkzusammenhänge entlang der Prozesskette einen wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der zurzeit noch hohen Ausschussquoten liefern. Folglich steht dem hohen Nutzen eines tiefen Prozessverständnisses ein im Vergleich mittlerer Mehraufwand für die Digitalisierung sowie die Analyse der großen Datenmengen gegenüber.

Auch die Etablierung einer vollautomatisierten Produktion auf Basis von kommunizierenden Anlagen (RBW 13.2) bietet einen hohen Nutzen bei gleichzeitig mittlerem Aufwand für den Batteriehersteller. Durch die Unterstützung mit KI-basierten Steuerungs- oder Regelungssystemen ist eine Erhöhung der Prozessstabilität zu erwarten, wodurch die Batteriezellqualität positiv beeinflusst und der Ausschuss der Produktion reduziert wird.

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



13.1 Identifizierung der Wirkzusammenhänge

13.2 Kommunikation und Steuerung/Regelung heterogener Produktionsanlagen

13.3 Nachverfolgbarkeit über Lebenszyklus

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.

Gleichermaßen 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 13.3). 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 Erkenntnisse können 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.

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Alina Rost, Technical Consulting, Siemens AG

Mit weiterer Unterstützung von:

Balluff GmbH

Bielomatik GmbH

F&S Bondtec Semiconductor GmbH

Hesse GmbH

Industrie Partner GmbH

KUKA Systems GmbH

Liebherr-Verzahntechnik GmbH

Manz AG

Maschinenbau Kitz GmbH

Omron Electronics GmbH

PIA Automation Bad Neustadt GmbH

Robert Bosch GmbH

Sick AG

thyssenkrupp System Engineering GmbH

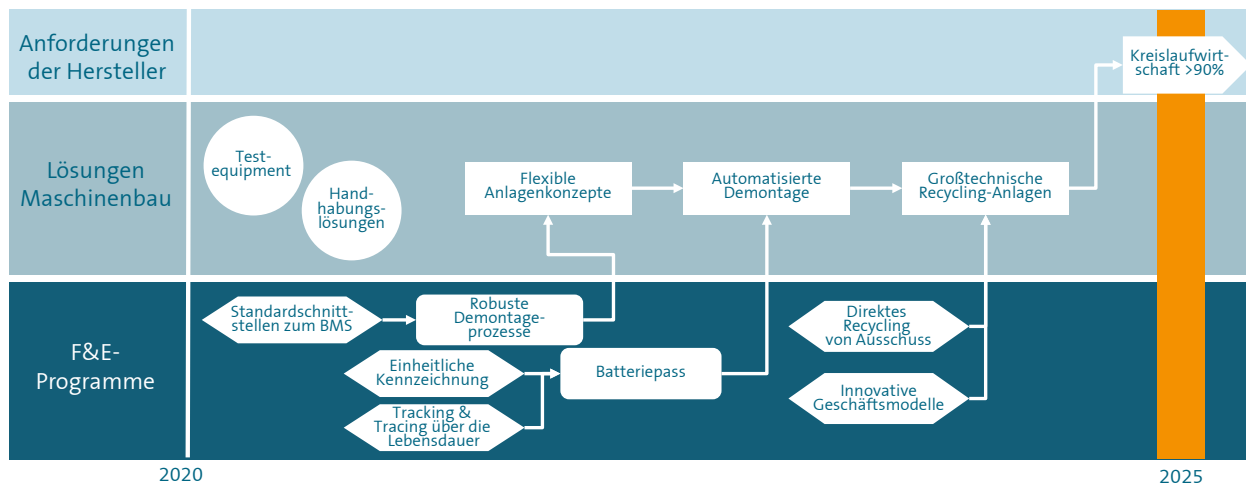
VITRONIC Dr.-Ing. Stein Bildverarbeitungssysteme GmbH

Kreislaufwirtschaft

Nr.*	Red Brick Wall	Aktueller Stand im Vergleich zu 2018	Relevanz**	Timeline***
14.1	Automatisierung der Demontage bei großer Packvielfalt	Fortschritt erzielt	Hoch	2025
14.2	Recycling von Ausschüssen direkt in der Produktion	Fortschritt erzielt	Mittel	2022
14.3	Remanufacturability im Produktionsprozess umsetzen	Unverändert	Mittel bis Hoch	2022
14.4	Innovative Geschäftsmodelle zur Stützung von 2nd Life und Wiederverwertung	Unverändert	Mittel	2025

RBW 14.1: 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 gewinnt die Flexibilität und Automatisierung der Batteriesystemdemontage an Bedeutung. Remanufacturing von ausgedienten Batteriesystemen und Second Life Konzepte unterstützen das Ziel der Kreislaufwirtschaft.



Legende: ○ State of the Art ◁▷ Forschungsansätze/-projekte □ Pilotanlagen, konkrete 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 2035)

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

RBW 14: Kreislaufwirtschaft

Grundlagen

Die Kreislaufführung von Batteriematerialien hat für die Nachhaltigkeit des Gesamtsystems Batterie eine entscheidende Bedeutung, da durch die Wiederverwendung von Zellmaterialien deren Umweltwirkungen reduziert werden können. Eine zentrale Voraussetzung für diesen Leitgedanken ist eine hohe Qualität der sekundären Batteriematerialien.

Zur Sicherung der wichtigen Rohstoffe einer Batteriezelle ist es das Ziel, bis 2025 eine funktionierende Kreislaufwirtschaft zu etablieren, in der über 90 Prozent der Stoffe im Kreislauf erhalten bleiben im Gegensatz zu aktuellen Materialrückgewinnungsquoten zwischen 50 und 80 Prozent. Zumindest sollten die ressourcenkritischen und umweltbelastenden Stoffe recycelt werden. Die technischen Grundvoraussetzungen für das Erreichen dieses Ziels sind in großen Teilen bereits vorhanden. Derzeit werden überwiegend pyrometallurgische Recyclingverfahren auf Material- bzw. Zellebene angewendet. Darüber hinaus werden auch mechanische und hydrometallurgische Recyclingverfahren weiterentwickelt [Ciez2019], [CEID2020].

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 Europäische Green Deal forciert. In diesem Kontext wird die EU-Direktive 2006/66/EC geprüft und aktualisiert, die derzeit vorgibt, dass mindestens 50 Prozent des Batterieabfalls wiederverwendet werden müssen. Es ist davon auszugehen, dass für ressourcenkritische Stoffe hohe Rückgewinnungsquoten vorgegeben werden [CEID2020].

Herausforderungen

Eine Reihe von Hindernissen müssen überwunden werden, um eine echte Batterie-Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen.

Im Vordergrund steht die Wirtschaftlichkeit des Recyclingverfahrens, welche von den Kosten des Recyclingprozesses und den Preisen für den Sekundärmaterialoutput und den Altbatterieinput abhängig ist. Diese Beziehung ist auch ausschlaggebend dafür, welche Sekundärmaterialien in welcher Höhe zurückgewonnen werden. Bspw. ist die Quote an rückgewonnenem Kobalt beim pyrometallurgischen Prozess mit über 95 Prozent bedingt durch die teuren Materialpreise schon heute sehr hoch, was aber zu Lasten anderer Stoffe wie Lithium geht.

Bedingt durch die große Variantenvielfalt an eingesetzten Batteriezellen, -modulen und -systemen wird der Zerlegeprozess derzeit in kostenintensiver Handarbeit ausgeführt. In Anbetracht steigender Rückläufermengen von weltweit über 1 Mio. genutzten Li-Ion Batteriesystemen allein aus Elektrofahrzeugen bis 2028 müssen flexible Automatisierungslösungen für die Batteriedemontage implementiert werden. Die notwendige Demontagetiefe ist abhängig von der Qualität der Batterie, welche meist als SoH (engl. State of Health) angegeben wird, sowie dem Demontageprozess und der sich daran anschließenden materialorientierten Recyclingprozesse.

Weiterhin bedingt die Variantenvielfalt, dass gemischte Fraktionen von Aktiv- und Inaktivmaterialien in den Recyclingprozessen robust verarbeitet werden müssen, woraus sich ein großer Einfluss auf die Prozesssicherheit und die Produktqualität ergibt [Diekmann2017]. Daraus folgt die Herausforderung einer robusten bzw. wandlungsfähigen Prozesstechnik, mit der Recyclingprozesse auf unterschiedliche Materialfraktionen reagieren können [CEID2020].

Neben der Wiederverwertungsstrategie ist die Vermeidung von Ausschuss eine zweite zentrale Herausforderung, welche im Einflussbereich der Batteriehersteller liegt. Im Bereich der Produktion bezieht sich diese Strategie auf das direkte Recycling von Ausschüssen im Produktionsprozess einerseits durch intelligentes Prozessdesign und andererseits durch ein ausschussreduzierendes Design der Batterie.

Lösungsansätze

Bei der Demontage werden die Batteriemodule und -systeme zunächst entladen, sodass die Peripheriekomponenten anschließend demonstert 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 Handhabungs- und Anlagentechnik in der Entwicklung. Eine einheitliche oder gar standardisierte BMS-Schnittstelle kann an dieser Stelle eine robuste Prozessführung unterstützen. Wichtige Informationen über das Nutzungsprofil und mögliche Fehler der Batterie, insbesondere aber über den SoH könnten über die Schnittstelle ermittelt und als Information für den weiteren Prozess genutzt werden, um den folgenden Entladeprozess zu steuern und auf Sicherheitsrisiken im Prozess reagieren zu können. Hierfür müssen sichere, zerstörungsfreie und kostengünstige Analyse-Verfahren etabliert werden [CEID2020].

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 eine Kennzeichnung und BMS-Schnittstelle ergänzt. Dadurch können flexible Anlagenkonzepte

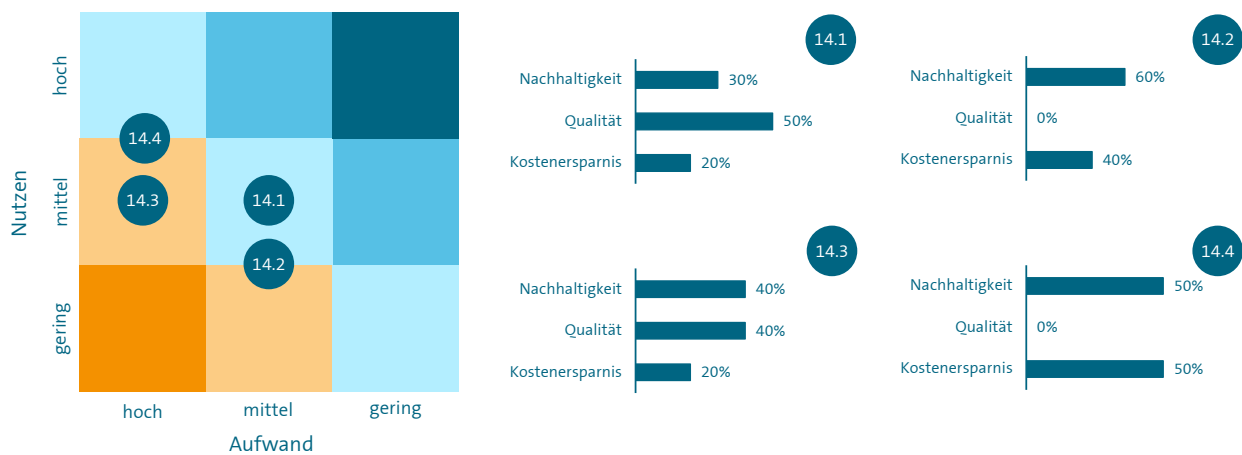
geschaffen werden, die auf das vorliegende Batteriesystem reagieren können. Für die Umsetzung müssen jedoch zunächst Geschäftsmodelle entwickelt werden. Zudem sind Kenntnisse über den SoH für Second Life Anwendungen wertvoll, um die jeweilige am besten passende Sekundäranwendung zu bestimmen.

Das daran anschließende Recycling der Lithium-Ionen-Zellen zielt darauf ab, die wertvollen Metalle wie Kobalt, Nickel und Kupfer zurückzugewinnen. Neben den etablierten pyrometallurgischen Prozessen werden vermehrt mechanische und hydrometallurgische Prozessrouten entwickelt. Neben der Rückgewinnung der einzelnen Stoffe mit der notwendigen Reinheit werden auch Ansätze verfolgt, die Aktivmaterialien zu rekonditionieren und erneuern in Zellen einzusetzen. Das in 2020 gestartete BMBF-Kompetenzcluster „Recycling/Grüne Batterie“ erforscht in diesem Zusammenhang innovative Recyclingprozesse, um die erzielbaren Wiederverwertung auf mehr als 80 Prozent der Batterie zu steigern [Kwade2018a].

Innerhalb der Batterieproduktion lassen sich zwei Lösungsansätze für die Kreislaufwirtschaft identifizieren. Im Vordergrund steht die Reduktion von Ausschuss innerhalb der Produktion, da dieser einen enormen Einfluss auf die Kosten einer Batteriezelle hat. Hier müssen inline Qualitätsmessungen an den richtigen Stellen in den Prozessen ermöglicht werden, um Ausschuss frühzeitig zu erkennen und zurückzuführen. Oft werden schlechte Zellen erst nach dem Formieren erkannt. Eine frühe Fehlererkennung und Prozessrückführung könnte einen wertvollen Beitrag zur Kostendegression leisten.

Zusätzlich zur Ausschussreduktion müssen Lösungen für die Aufbereitung der Ausschüsse ohne Qualitätsverlust umgesetzt werden, die eine Rückführung der Ausschüsse in den Produktionsprozess ermöglichen. Prozesse dafür sind

Aufwand Nutzen Diagramm und Einfluss auf Nachhaltigkeit, Qualität und Kosten



14.1 Automatisierung der Demontage

14.2 Direktes Recycling

14.3 Remanufacturability

14.4 Innovative Geschäftsmodelle

größtenteils im Portfolio der europäischen Industrie vorhanden, ein Beispiel dazu sind mechanische Trennprozesse.

Die elektrohydraulische Zerkleinerung, bei der mittels Schallwellen eine materialelektive Zerkleinerung erfolgt, eignet sich besonders für Zellen mit mangelhafter Qualität nach dem End-of-Line Test. In diesem Fall können Funktionsmaterialien (bereits synthetisierte Verbindungen) direkt aufbereitet werden anstatt der metallurgischen Auftrennung in einzelne Elemente. [NEW-BAT2016]

Das Produktdesign im Sinne des „Design for Recyclability“ kann eine erhebliche Erleichterung des Demontage- und Recyclingprozesses mit sich bringen und ist daher ein zentrales Forschungsthema. Jedoch sind viele hiermit verbundenen Designoptionen gegenläufig zur derzeitigen Entwicklung, wie z.B. bezüglich der

Modularisierung, Substitution der Klebstoffe oder Reduktion der Batteriemodulspannung. An dieser Stelle gilt es Kooperationen zwischen den OEMs und Maschinen- und Anlagenbauern zu schaffen und die Entwicklung eines Recyclingkonzeptes und neuer 2nd-life Geschäftsmodelle voranzutreiben.

Aufwand- und Nutzenbewertung

Der sich aus den RBWs ergebende Nutzen hängt stark von den Geschäftsmodellen ab, mit dem die Batteriehersteller agieren. Der im mittleren Bereich eingestufte Nutzen für alle RBWs unterliegt daher einer gewissen Unsicherheit.

Ein wirtschaftliches Recyclingsystem ist die Voraussetzung für eine Kreislaufwirtschaft. Da bereits vielversprechende, technologische Ansätze existieren, lässt sich dieses Potenzial mit mittlerem bis hohem Aufwand realisieren.

Durch eine Kreislaufwirtschaft mit einer Kreislaufführung von >90 Prozent der Batteriematerialien wird ein nachhaltiger und verantwortungsvoller Umgang mit den Rohstoffen ermöglicht, die für die Batterieproduktion unersetzlich sind. Zudem bietet es das Potenzial, die Kosten und Umweltwirkungen der Batteriezelle zu senken und unabhängiger in der Rohstoffversorgung zu werden. In der Diskussion ist derzeit noch, inwieweit die Rückgewinnung von Elektrolyt, Binder und Carbon Black wirklich sinnvoll ist².

Damit wirkt sich die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft besonders auf den Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit aus. Da von der Hebung dieses Potenzials neben dem Batteriehersteller auch Recyclingunternehmen profitieren können, ist derzeit noch unklar, in welcher Verantwortlichkeit die Kreislaufwirtschaft in Zukunft umgesetzt wird. Entscheidend wird in dieser Frage die Gestaltung wirtschaftlicher Konzepte und Geschäftsmodelle sein, die primär durch Kosten bestimmt sind.

Die Automatisierung der Demontage hat neben dem Einfluss auf Kosten- und Nachhaltigkeitsaspekte insbesondere Einfluss auf die Sortenreinheit der Eingangsströme in den Recyclingprozess und damit auf die Qualität des Materials aus dem Recycling.

Fachliche Unterstützung

Themenpate:

Rainer Forster, Head of Technology Competence Centre
Maschinenbau Kitz GmbH

Mit weiterer Unterstützung von:

Festo Vertrieb GmbH & Co. KG
Gebr. Becker GmbH
Gebrüder Lödige Maschinenbau GmbH
Industrie Partner GmbH
KUKA Systems GmbH
Liebherr-Verzahntechnik GmbH
Manz AG
PIA Automation Bad Neustadt GmbH
Robert Bosch GmbH
Siemens AG
ULT AG

² Derzeit wird intensiv diskutiert, inwieweit eine Gesamtrückgewinnungsquote wirklich sinnvoll ist und ob nicht besser eine materialbezogene Rückgewinnungsquote definiert werden sollte. So ist derzeit fraglich, ob die Rückgewinnung von Elektrolyt, Binder und

Leitfähigkeitsadditiven insgesamt ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist [CEID2020].

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
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
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 Silicatforschung (ISC), PEM der RWTH Aachen	2019-2022	6, 7, 13
cyberKMU ²	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
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
EcoBatRec	Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Lithion-Ionen-Batterien der Elektromobilität	IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen	2012-2016	14
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 (Beschichtungsprozess)	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
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
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)	PEM RWTH Aachen, WWU Münster, MEET Batterieforschungszentrum der Uni Münster	2016-2019	1, 2

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
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
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 Füge-technik zur flexiblen Produktion von Batteriemodulen	Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT	2016-2018	11, 12
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
HEBEL	Hochenergiebatterie mit verbessertem Elektrolyt-Separator-Verbund (HEBEL)“ keramischer Separator/Elektrolyt	FAU Erlangen, Lehrstuhl für Chemische Reaktionstechnik	2009-2012	4
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
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
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 Nachrocknung von Komponenten für Lithium-Ionen-Zellen in diskontinuierlichen Trockenöfen	TU Braunschweig, Hochschule Landshut	2018-2020	2
InTreS	Innovative Trägermaterialien zur Optimierung der Stromableiter von elektrischen Speichern	PEM der RWTH Aachen, ISF der RWTH Aachen	2017-2019	11
KonSuhl	Kontinuierliche Suspensionsherstellung	Battery LabFactory (BLB) und TU Braunschweig	2016 - 2019	1
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 elektrische 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
LiOptiForm	Leistungselektronische Optimierung von Formiereinrichtungen für LIB	WHS Zwickau, Fakultät Elektrotechnik, Fraunhofer IKTS	2016-2018	9
LithoRec II	Recycling von Lithium-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

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
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
MiBZ	Entwicklung einer multifunktionalen intelligenten Batteriezelle	Technische Universität München, Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie	2015-2018	10
MiKal (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
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
NeW-Bat	Neue energieeffiziente Wiederverwertung von Batteriematerialien	Fraunhofer-Institut für Silicatforschung	2016-2019	14
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 Kernprozestechnologien 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
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
OptiZellForm	Beschleunigung und energetische Optimierung der Zellformierung	PEM der RWTH Aachen, elenia - Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen, MEET Batterieforschungszentrum	2016-2019	9
PErfektZell	Prozessqualitätssteigerung durch eine neuartige Erweiterung am Kalandrier für die Bearbeitung von Batterieelektroden zur Zellerstellung	Karlsruher Institut für Technologie - Fakultät für Maschinenbau - wbk Institut für Produktionstechnik	2019-2021	3
PräLi (ProZell 2)	Beschichtung und Präliithierung 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, iwb, 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

134 FORSCHUNGSPROJEKTE MIT BEZUG ZU DEN RED BRICK WALLS

Projekt	Kurzbeschreibung	Forschungsinstitute	Laufzeit	RBW
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)
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
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
S-PROTRAK	Separatorbeschichtung im Rahmen des Projekts Produktionstechnik für die Herstellung von LIB	Fraunhofer ISIT, Battery LabFactory (BLB) der TU Braunschweig	2013-2014	4
STACK	Schnelles Stapeln für die Massenfertigung von kostengünstige 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 ersten 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. 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. Stand heute sind diese noch nicht in der Qualifikation. 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 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. 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. Häufig besitzen jedoch 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 Zellausbaueinheit 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 aus hochverfügbaren und damit potentiell sehr günstigen Elementen bestehen. Ein klares Reduktionspotential ergibt sich aus dem Verzicht der auf einer Cu-Folie aufgetragenen Graphit-Anode. Gerade Feststoffbatterien 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 Feststoffbatterien. 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.

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 weniger als ein Zehntel des Li_2CO_3 (Li-Carbonats). 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. Für Na-IBs gibt es ähnliche Wirtsmaterialien wie für LIBs (Schichtoxide, Phosphate). Lediglich aufgrund der Ionengröße von Natrium kann als Anode kein Graphit verwendet werden. 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 Abschlügen bei den Leistungsparametern von 20 bis 30 Prozent verbunden ist. Auch der FuE-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 materialeitig 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.

Me-Luft/O₂-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 Degradationserscheinungen zu verhindern. Bisher 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 gespeicherte 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

ermöglicht. 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

Das aktuelle Update bestätigt den Trend der Vorgängerversionen. Die Marktdurchdringung der Elektromobilität schreitet stetig voran. Damit einhergehend wächst die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien (LIB). Für das Jahr 2019 wurden global 200 GWh an LIB-Zellen nachgefragt.

Der rasant wachsende Aufbau von Zellproduktionskapazitäten, insbesondere in China und Europa, unterstreicht dabei eindrucksvoll die weltweite Dynamik. Die Terawattstunden (TWh)-Grenze der LIB-Zellnachfrage für Elektrofahrzeuge insgesamt könnte bei einer optimistischen Entwicklung der Elektromobilität bereits zwischen 2023 und 2024 erreicht werden. Während die global relevanten Zellhersteller nach wie vor fast ausschließlich aus dem asiatischen Raum stammen, verlagern sich die Standorte der Produktionsstätten zunehmend dorthin, wo die Nachfrage entsteht. Insbesondere Europa profitiert als Standort von den Sitzten der größten Fahrzeug-OEM. Mit der Firma Northvolt als Vorreiter haben auch europäische Zellhersteller die Herausforderung angenommen sich als Zulieferer im Automobilmarkt zu behaupten.

Daraus ableitend ergeben sich für den global agierenden europäischen Maschinen- und Anlagebau in den dynamischen Märkten der Elektromobilität und LIB-Produktion große Geschäftspotentiale. Die hohe Innovationskraft des Maschinen- und Anlagebaus kann dazu beitragen, den Wandel zu alternativen Technologien wie der Elektromobilität zu befähigen. In verwandten Branchen wurde dies bereits eindrucksvoll bewiesen.

Roadmapping Prozess

Unterschiedliche Anforderungen von Anwenderseite und verschieden weit entwickelte Technologien für elektrische Energiespeicher sowie eine große Vielfalt an Prozesstechnologien erfordern wohldefinierte Rahmenbedingungen für das Vorgehen bei der Erstellung von Roadmaps. Diese wurden bereits 2014 formuliert und werden auch für das vorliegende Update 2020 eingehalten.

Wir haben den weit verbreiteten Roadmapping-Prozess der Halbleiterindustrie auf die Batterieproduktion angewendet. Roadmaps der Anwender, Batteriehersteller und des Batteriemaschinenbaus werden getrennt voneinander erstellt. Die Anforderungen der Batterieproduzenten definieren dabei unverrückbare Zielkorridore, für welche die Maschinenbauer versuchen, Lösungsangebote zu formulieren. Wenn diese aus heutiger Sicht nicht existieren, kristallisieren sich mit dieser Vorgehensweise Technologiebarrieren, sog. „Red Brick Walls“ heraus. Daraus lässt sich ein klar umrissener konkreter Forschungs- und Entwicklungsbedarf im Betrachtungszeitraum ableiten.

Fokus LIB-Technologie

Die aus heutiger Sicht aussichtsreichste Batterietechnologie bleibt die LIB-Technologie. Im Rahmen der Roadmap werden schwerpunktmäßig großformatige Zellen für Hochenergieanwendungen betrachtet, aber auch Hochleistungszellen für 48 V Batterien. Produktionsforschung braucht serienreife Technologien. Optimierte LIB (bis zu Generation 3) werden nach heutiger Erkenntnis die zentrale Technologie für die nächsten 10 bis 20 Jahre darstellen. Für die Produktion dieser optimierten LIB-Zellen

werden die globalen Kapazitäten im kommenden Jahrzehnt aufgebaut. Die Produktionstechnologie ist dabei im Bereich der LIB-Generationen 1 bis 3 aufwärtskompatibel.

Fokus Produktionstechnik

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.

Betrachtungszeitraum bis 2030

Der Betrachtungszeitraum wird wie in den Vorgängerversionen bis 2030 festgelegt. Durch die hohe Marktdynamik werden Prozesslösungen vor allem in den nächsten Jahren relevant. Für viele der formulierten RBW ist daher bereits bis 2022 eine Durchbrechung anzustreben, für fast alle bis 2025. 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 der Auswertung von Fragebögen sowie offener und zielgerichteter 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 fachlicher Unterstützung je Technologie-Kapitel haben sich die Mitgliedsunternehmen noch stärker in den Prozess mit eingebracht. Die Roadmap ist öffentlich zugänglich und findet weltweit Beachtung. Viele Vorschläge und Anregungen können so aufgegriffen und implementiert werden. Wir haben den zielorientierten Dialog zwischen Batterieproduzenten, Produktionsforschung und dem Maschinen- und Anlagenbau fortgeführt, auch unter Einbeziehung der Erfahrung mit internationalen Kompetenzträgern.

Ausgangsbasis für den Maschinen- und Anlagenbau

Intelligente Produktionstechnologien sind eine wesentliche Stellschraube zur dringend benötigten Kostenreduzierung von Batterien für die Elektromobilität und stationäre Speicherung von Energie. Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau punktet hier durch seine starke Spezialisierung und bringt Erfahrungen aus anderen Industrien sowie der Digitalisierung (Industrie 4.0) mit. Asiatische Player profitieren dafür nach wie vor von dem Erfahrungsaustausch durch die langjährige Ausrüstung von Fabriken an die Produktion von Consumer-Batterien. 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.

Handlungsempfehlungen

Forschungsbedarf gezielt angehen

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 essentiell. Fördermaßnahmen des BMBF wie Batterie 2020 oder das ProZell-Cluster adressieren bereits wichtige Themen [ProZell2016]. Weitere Maßnahmen wie das InZePro-Cluster wollen stärker in die Umsetzung gehen. Darüber hinaus bietet das Konjunkturpaket 35c die Chance, Forschung mit starkem Industriebezug und breitem Transfer auch im Bereich der Batterieproduktionsmittel zu realisieren. 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-Verbänden mit dem Ziel Gigafabriken in Europa zu errichten, gibt es innerhalb der ETIP Batteries Europe und der European Battery Partnership weitere Aktivitäten.

Industrielle Gemeinschaftsforschung ermöglicht 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 Basis für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Zellfertigung und ist der Schlüssel für Prozessinnovation und für die Entwicklung von Alleinstellungsmerkmalen. Referenzen und Alleinstellungsmerkmale 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.

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 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.

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.

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

Um international wettbewerbsfähig anbieten zu können, braucht es Referenzen und Alleinstellungsmerkmale. Um diese erfolgreich zu entwickeln, ist Produktionsforschung notwendig. Europäische Maschinen- und Anlagen überzeugen durch Innovationskraft und Effizienz in Total Cost of Ownership-Betrachtungen sowie in der 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 zeigt zudem, 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. Der Ausbau globaler Zellfabriken erfolgt in den kommenden 10 Jahren fast ausschließlich durch asiatische Player vor allem aus China. Die Standorte verlagern sich allerdings auf alle Weltregionen (Asien, Amerika und Europa). Die Exportgeschäfte erlauben es dem Maschinen- und Anlagenbau, Einblicke in Produktionen in Übersee zu erlangen und damit wichtige technologische Bedarfe zu erkennen und Lösungsangebote entwickeln zu können. 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 essentiell. 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 integrierte Resynthese bzw. Rekonditionierung von Batteriematerialien.

Mut und Risikobereitschaft anregen

Produktionsforschung ist der Schlüssel für Innovationen, die es zwingend braucht, um im Batteriemaschinenbau Erfolg zu haben. 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 wichtig, die Investitionsrisiken minimieren. Hieraus ergibt sich die Forderung nach den folgenden Rahmenbedingungen:

- Einführung der steuerlichen Forschungsförderung
- Allgemeine degressive Abschreibung, um hohe Wertminderungen von Anlagen durch wirtschaftliche und technische Entwicklungen in den ersten Jahren abschreiben zu können
- Vorwettbewerbliche und breitenwirksame industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)
- Verbundforschung mit Transferleistungen für eine breite Innovationskultur.
- Zusammenarbeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette in geförderten Projekten, wie es zum Teil bereits in so genannten „Important Projects of Common European Interests“(IPCEI) umgesetzt wird

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
Al	Aluminium
ASP	Average Sales Price
BEV	Batterieelektrisches Fahrzeug
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMS	Batteriemanagement-System
COP	Penetrationskoeffizient
C-Rate	Lade- (oder Entladestrom) eines Akkus bezogen auf seine Kapazität
Cu-Folie	Kupfer-Folie
DCM	Dichlormethan
EIS	Elektrochemische Impedanzspektroskopie
EOL Test	End of Line Test
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
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IPCEI	Important Project of Common European Interest
IR-Trockner	Infrarot-Trockner
KPI	Key Performance Indicators
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LCOE	Levelized Cost Of Electricity
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
Li	Lithium
LiB	Lithium-Ionen-Batterie
Li-S	Lithium-Schwefel
LiTFSI	Lithium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide
Me	Metall
Me-S	Metall-Schwefel
Na-IB	Natrium-Ionen-Batterien
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NDA	Englisch: Non-disclosure agreement, Verschwiegenheitsvereinbarung
Ni-Anteil	Nickel-Anteil
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
NMP	N-Methyl-2-pyrrolidon Lösungsmittel
NPE	Nationale Plattform Elektromobilität
OEM	Original Equipment Manufacturer z. dt. Originalausrüstungshersteller
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
Pb Batterien	Blei-Säure Batterien
PbC	Blei-Carbon
PE	Polyethylen

PET-Vliesstoff	Polyethylenterephthalat-
PHEV	Plug-In-Hybriden
PP	Polypropylen
PV	Photovoltaik
PVD-Verfahren	Physical Vapour Deposition- Beschichtungsverfahren
RBW	Red Brick Wall
Re-X	Mögliche Recyclingverfahren werden unter Re-X zusammengefasst
RFB	Redox-Flow-Batterien
SEI	Solid Electrolyte Interface
SG&A	Selling, General and Administrative Expenses
Si/C-Komposite	Silizium/Kohlenstoff-Komposite
SoH	engl. State of Health, Qualität der Batterie
SPC	Festkörperpermeabilität
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/>
- [Ahmed2016] Ahmed, S; Nelson, P. A; Dees, D. W. (2016). Study of a dry room in a battery manufacturing plant: Study of a dry room in a battery manufacturing plant using a process model. In: Journal of Power Sources, Jg. 326, S. 490–497
- [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
- [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
- [Bognar2018] Bognar, N; Filz, M.-A; Herrmann, C; Thiede, S. (Assessment of Changeability in Battery Cell Production): Assessment of Changeability in Battery Cell Production Systems. In: Procedia CIRP, Jg. 72, 2018, S. 695–700
- [Brodd2013] Brodd, R. J., Helou, C., (2013) Cost comparison of producing high-performance Li-ion batteries in the U.S. and in China, Journal of Power Sources, Volume 231, 1 June 2013.
- [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
- [CEID2020] acatech/Circular Economy Initiative Deutschland (6. Oktober 2020) “Ressourcenschonende Batteriekreisläufe. Mit Circular Economy die Elektromobilität antreiben <https://www.acatech.de/publikation/ressourcenschonende-batteriekreislaeufe/>
- [Chung2018] Chung, D; James, T; Elgqvist, E; Goodrich, A; Santhanagopalan, S. (2018). Automotive Lithium-ion Battery Supply Chain and U.S. Competitiveness Considerations. <https://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63354.pdf>. Abruf 11.07.2018
- [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: WEVJ, 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
- [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.
- [Dörr2011] Tobias Müller-Prothmann, Nora Dörr: Innovationsmanagement. Strategien, Methoden und Werkzeuge für systematische Innovationsprozesse. Hanser, München
- [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
- [Edström2020] Edström, K; Dominko, R; Fichtner, M; Perraud, S; Punckt, C; Asinari, P; Castelli, I. E; Chistensen, R; Clark, S; Grimaud, A; Hermansson, K; Heuer, A; Lorrmann, H; Løv-vik, M. O; Vegge, T; Bayle-Guillemaud, P; Behm, J; Berg, E; Hahlin, M; Hartmann, S; Latz, A; Lyonnard, S; Amici, J; Berecibar, M; Bodoardo, S; Jabbour, L; Kallo, J; Pail-lard, E.-E; Raccurt, O; Heiries, V; Guillet, N; Tarascon, J.-M; van Laethem, D; Ayerbe, E; Diehm, R; Hofmann, J; Miguel, O; Placke, T; Sheridan, E; Barboux, P; Chanson, C; Jacques, P; Meeus, M; Trapp, V; Weil, M; Wenzel, W. (Inventing the sustainable batteries of the future): Inventing the sustainable batteries of the future. Research Needs and Future Actions Battery 2030+ Roadmap. Sweden, 2020

- [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); Ergebnisreport 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
- [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
- [Fuchslocher2019] Fuchslocher, G. (Startschuss für Projekt KomVar): Startschuss für Projekt KomVar. <https://www.automobilproduktion.de/technik-produktion/produktionstechnik/batteriezellenfertigung-in-deutschland-startschuss-fuer-projekt-komvar-111.html>. Abruf 29.05.2020
- [Groenveld1997] Groenveld, P. (1997). Roadmapping Integrates Business and Technology. Research-Technology Management, Vol 40:5.
- [Günter2019] 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
- [Habedank2019] Habedank, J. B.; Günter, F. J.; Billot, N.; Gilles, R.; Neuwirth, T.; Reinhart, G.; Zaeh, M. F. (2019). Laser structured electrodes: Rapid electrolyte wetting of lithium-ion batteries containing laser structured electrodes: in situ visualization by neutron radiography. In: Int J Adv Manuf Technol, Jg. 102, Nr. 9-12, S. 2769-2778
- [Haberhauer1996] Haberhauer, H; Bodenstein, F.; Maschinenelemente - Gestaltung, Berechnung, Anwendung, 1996
- [He2008] He, Y.-B; Tang, Z.-Y; Song, Q.-S; Xie, H; Liu, Y.-G; Xu, Q. (2008). Effects of Temperature on the Formation of Graphite/LiCoO₂ Batteries. In: J. Electrochem. Soc., Jg. 155, 2008, Nr. 7, A481
- [Heidelberg2020] Heidelberg, M. (AgiloBat: Batteriezellen flexibel produzieren): AgiloBat: Batteriezellen flexibel produzieren. Im Forschungsprojekt AgiloBat arbeiten KIT und Partner an der Zukunft der Batterieproduktion in Deutschland. https://www.kit.edu/kat/pi_2020_012_agilobat-batteriezellen-flexibel-produzieren.php. Abruf 31.05.2020
- [Heimes2014] Heimes, Heiner (2014): Methodik zur Auswahl von Fertigungsressourcen in der Batterieproduktion. 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verlag (Edition Wissenschaft - Apprimus, Bd. 2014,41).
- [Heimes2018a] Heimes, H (2018) Produktion einer All-Solid-State-Batterie zelle. 1. Auflage, PEM der RWTH Aachen und VDMA Eigendruck
- [Heimes2018b] Heimes, H; Kampker, A; Lienemann, C; Locke, M; Offermanns, C; Michaelis, S; Rahimzei, E. (Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie zelle): Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie zelle. 3. Auflage, revidierte Ausgabe Aufl. Aachen: PEM der RWTH Aachen University, 2018
- [Heimes2020] Heimes, H.; Offermanns, C.; Mohsseni, A.; Laufen, H.; Westerhoff, U.; Hoffmann, L.; Niehoff, P.; Kurat, M.; Winter, M.; Kampker, A. (2020) The Effects of Mechanical and Thermal Loads during Lithium-Ion Pouch Cell Formation and Their Impacts on Process Time. In: Energy Technology, Nr. 8
- [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
- [Hettesheimer2018] Hettesheimer, T; Thielmann, A; Neef, C. (2018) Employment effects and value chains in the battery machinery and plant engineering industries, Short report on behalf of the VDMA 2018
- [Hitech2018] <https://hitech-campus.de/frugale-innovation/> Abruf 02.September 2018

- [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
- [Hoyer2015] Hoyer, C; Kieckhäfer, K; Spengler, T. S. (2015). Technology and capacity planning for the recycling of lithium-ion electric vehicle batteries in Germany. In: J Bus Econ, Jg. 85, 2015, Nr. 5, S. 505–544
- [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
- [Kampker2013] Kampker, A; Hohenthanner, C.-R; Deutskens, C; Heimes, H. H; Sesterheim, C (Fertigungsverfahren von LIB): Fertigungsverfahren von Lithium-Ionen-Zellen und -Batterien. In: Korthauer, R. (Hrsg.): Handbuch Lithium-Ionen-Batterien Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 237-247
- [Kampker2014] Kampker, A, (Elektromobilproduktion): Elektromobilproduktion. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014
- [Kampker2015a] Kampker, A, Deutskens, C., Heimes, H. Ordnung, M., Maiser, E., & Michaelis, S. (2015). Der Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie-Zelle. RWTH-WZL / VDMA, Aachen / Frankfurt.
- [Kampker2015b] Kampker, A, Deutskens, C., Heimes, H. Ordnung, M., Maiser, 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
- [KontiBAT2020] TU Berlin (KontiBAT - Hochdurchsatz-Batteriestapelbildung): KontiBAT - Hochdurchsatz-Batteriestapelbildung. https://www.hm.tu-berlin.de/menue/for-schung_und_industrie/projekte/kontibat/. Abruf 08.04.2020
- [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
- [Küpper2018a] Küpper, D; Kuhlmann, K; Wolf, S; Pieper, C; Xu, G; Ahmad, J. (The Future of Battery Production for Electric Vehicles): The Future of Battery Production for Electric Vehicles. <https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/future-battery-production-electric-vehicles.aspx>. Abruf 03.04.2020
- [Küpper2018b] Küpper, D; Sieben, C; Kuhlmann, K; Lim, Y; Ahmad, J. (Will Flexible-Cell Manufacturing Revolutionize Carmaking?): Will Flexible-Cell Manufacturing Revolutionize Carmaking? <https://www.bcg.com/publications/2018/flexible-cell-manufacturing-revolutionize-carmaking.aspx>. Abruf 09.06.2020
- [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 Li(Ni_{0.6}Mn_{0.2}Co_{0.2})O₂ and Graphite Electrodes, J. Electrochem. Soc. 2017, 164, A1037-A1049
- [Li2016] 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. (2017). Toward Low-Cost, High-Energy Density: Toward Low-Cost, High-Energy Density, and High-Power Density Lithium-Ion Batteries. In: JOM, Jg. 69, Nr. 9, S. 1484-1496
- [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>
- [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

- [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; Rah-Ifs, S; Uerlich Roland; Bognar, N. (Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2018. 3 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
- [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
- [NEW-BAT2016] Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS, Effiziente Wiederverwertung (Batterien), Projektstart 2016, BMBF Forschungsprojekt
- [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)
- [Patent1] Hock, R., Franz, J, Polnick, U., Weiler, C., „Verfahren zur Herstellung einer Lithium-Ionen-Batterie zelle“, DE, Aktenzeichen: 10 2019 003 574.7, Anmeldetag: 22.05.2019, Offenlegungstag: 26.11.2020
- [Patent2] Hock, R., Franz, J, Polnick, U., Weiler, C., „Verfahren zur Herstellung einer Lithium-Ionen-Pouchzelle“, DE, Aktenzeichen: 10 2019 003 594.1, Anmeldetag: 22.05.2019, Offenlegungstag: 26.11.2020
- [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
- [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
- [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
- [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
- [Schuh2020] Schuh, G; et al. (2020) Effiziente Produktion mit Digitalen Schatten, In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*
- [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
- [Sonnenberg2018] Sonnenberg, V. (flexible Zellfertigung - Automobilherstellung revolutionieren?): Wird die flexible Zellfertigung die Automobilherstellung revolutionieren? In: *Maschinenmarkt* 2018.
- [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
- [Thielmann2019] Thielmann, A; Neef, C; Hettesheimer, T. (2019) „All solid state batteries – What is the benchmark for a future commercialization?“ –Dresden Battery Days 2019, Fraunhofer ISI
- [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.
- [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
- [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
- [Yuan2017] Yuan, C; Deng, Y; Li, T; Yang, F. (2017). Manufacturing energy analysis of LIB pack: Manufacturing energy analysis of lithium ion battery pack for electric vehicles. In: CIRP Annals, Jg. 66, Nr. 1, S. 53–56
- [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
- [Zeschky2010] Marco Zeschky, Bastian Widenmayer, Oliver Gassmann (2011): FRUGAL INNOVATION IN EMERGING MARKETS. In: Research-Technology Management. Band 54, Nr. 4, S. 38–45



Batterieproduktion

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.

<http://battprod.vdma.org>



Der Chair of 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 Gruppe Battery Production des Lehrstuhls von Professor Kampker beschäftigt sich mit den Fertigungsprozessen der Lithium-Ionen-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 Batteriezelle 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 uns, grundlegende und anwendungsorientierte Forschungs- und Entwicklungsfragen zu untersuchen. Der Fokus liegt auf flexibler Produktions- und Verfahrenstechnik zur Erhöhung der Energiedichte, Qualität und Sicherheit von Batterien. 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/blr/>

Impressum

Herausgeber

VDMA Batterieproduktion
Lyoner Str. 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>

Autoren

VDMA Batterieproduktion	Dr. Sarah Michaelis, Ehsan Rahimzei
PEM RWTH Aachen University	Prof. Dr. Achim Kampker, Dr. Heiner Heimes, Christian Offermanns, Marc Locke, Hendrik Löbbberding, Sarah Wennemar
Fraunhofer ISI	Dr. Axel Thielmann, Dr. Tim Hettesheimer, Dr. Christoph Neef
BLB Braunschweig	Prof. Dr. Arno Kwade, Dr. Wolfgang Haselrieder, Steffen Blömeke, Stefan Doose, Nicolas von Drachenfels, Robin Drees, Arian Fröhlich, Laura Gottschalk, Louisa Hoffmann, Maher Kouli, Ruben Leithoff, Sina Rahlfs, Julian Rickert, Lars Oliver Schmidt, Alexander Schoo, Matthias Thomitzek, Artem Turetskyy, Filip Vysoudil

Für die Inhalte der Publikation sind ausschließlich die Autoren verantwortlich. Die Kapitel-Paten und Industriefirmen, die fachlich unterstützt haben, tragen dafür keine Verantwortung. (Eine Übersicht, wer bei welchem Kapitel unterstützt hat ist auf Seite 46 -53 zu finden.)

Redaktion

Dr. Sarah Michaelis, Ehsan Rahimzei, Jennifer Zienow, Alice Persichetti

Verlag und Produktion

VDMA Verlag GmbH, Frankfurt am Main

Druck

h. reuffurth gmbh, Mühlheim am Main

Copyright 2020

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.

Bildnachweis

Titelbild	©shutterstock.com "Um die Herausforderungen der Zukunft in der Batterieproduktion zu meistern, braucht es Mut und Risikobereitschaft."
-----------	---

Andere Bildquellen	siehe Bildunterschriften
--------------------	--------------------------

VDMA

Batterieproduktion

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1186

Fax +49 69 6603-2186

E-Mail jennifer.zienow@vdma.orgInternet <http://battprod.vdma.org><http://battprod.vdma.org>