

Dezember 2022

Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022

Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022

Inhaltsverzeichnis

1. Executive Summary	3
2. Einleitung	6
2.1. Marktentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien	8
2.2. Die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB	10
3. Rohstoffgewinnung, Materialherstellung und Recycling	13
3.1. Industriestruktur in Europa	14
3.2. Innovationen und aktuelle Entwicklungen	16
3.3. F&E-Herausforderungen	16
4. Maschinen- & Anlagenbau und Messtechnik	18
4.1. Industriestruktur in Europa	19
4.2. Innovationen und aktuelle Entwicklungen	21
4.3. F&E-Herausforderungen	23
5. Zellherstellung	25
5.1. Industriestruktur in Europa	26
5.2. Innovationen und aktuelle Entwicklungen	27
5.3. F&E-Herausforderungen	29
6. Innovationspfade an der Fraunhofer FFB	32
6.1. Die F&E Plattform der Fraunhofer FFB	33
6.2. Innovationspfade	36
6.3. Transfer von Innovationen und Technologien in die Industrie	38
6.4. Förderung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Deutschland	39
Literaturverzeichnis	41
Abkürzungen	45
Danksagung	46
Impressum	47

1. Executive Summary

Das Wertschöpfungsnetzwerk Lithium-Ionen-Batterie umspannt den gesamten Globus und hat sich in den letzten Jahren deutlich vergrößert. In vielen Industriebranchen sind neue Akteure entstanden oder bestehende Unternehmen, wie aus der Automobilzulieferbranche, haben ihr Geschäft neu auf den wachsenden Batteriemarkt ausgerichtet. Diese Transformation erfasst schon heute alle an der Gewinnung von Rohstoffen, Produktion von Komponenten, von Batterien und schließlich von Batterieanwendungen beteiligten Wertschöpfungsstufen und wird in Zukunft auch die Nutzung und Behandlung von Batterien nach ihrem Lebensende verändern. Getrieben durch den wachsenden Bedarf der Elektromobilität enden viele der weltweiten Batteriewertschöpfungsketten in Europa. Seit einigen Jahren strebt die hiesige Industrie und Politik hin zu einer Ausweitung der Marktanteile auch in den der Batterienutzung vorgelagerten Wertschöpfungsschritten.

Der »Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022« beleuchtet diese Entwicklung und benennt konkrete Herausforderungen, vor welche sich die Industrieunternehmen in Europa gestellt sehen. Neben dieser industriellen Perspektive wirft der Bericht einen Blick auf die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB und skizziert, welchen Beitrag diese neue Forschungsinfrastruktur zur Lösung der genannten F&E-Herausforderungen, gerade hinsichtlich Technologien mit hohem Reifegrad, leisten kann.

Rohstoffe und Batteriematerialien aus Europa

Die geringen Vorkommen von Batterierohstoffen in Europa haben dazu geführt, dass sich hier bislang wenige Rohstoffunternehmen angesiedelt haben. Steigende Rohstoffpreise, die Verknappung wichtiger Vormaterialien und die immer größer werdende Frage nach der Nachhaltigkeit in der Rohstoffgewinnung haben einen Trend ausgelöst, welcher einerseits auf die Exploration europäischer Rohstoffquellen zielt, andererseits auf den Aufbau einer Materialproduktion aus global eingekauften Rohstoffen.

Im Bereich der Rohstoffförderung und Materialherstellung wurden zum Zeitpunkt der Berichtsverfassung ca. 40 aktive Unternehmen identifiziert. Neben der Skalierung von Fabriken für etablierte Batteriematerialien und einer treibhausgas- und kosteneffizienten Produktion steht auch die Weiterentwicklung dieser Materialien im Vordergrund industrieller Aktivitäten. F&E-Aufgaben bestehen insbesondere für die Verfügbarmachung von Materialien, welche nicht auf der Nutzung kritischer Rohstoffe basieren, oder von Hochenergiematerialien der nächsten Generation, wie z. B. Silizium. Neben dem Erreichen der gewünschten elektrochemischen Materialeigenschaften besteht die Aufgabe auch in der Sicherstellung der Kompatibilität zu den nachgelagerten Produktionsprozessen. Dies betrifft die Kompatibilität mit Lösungsmitteln und der

Prozessatmosphäre, das Gefahrenpotenzial beim Umgang mit Stäuben oder die Anwendbarkeit existierender Messtechnik bei der Verarbeitung neuer Materialien.

Die Knappheit originär europäischer Rohstoffe erhöht auch die Wichtigkeit der Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus dem Recycling. In unterschiedlichen Konstellationen zwischen OEM, etablierten Recyclingunternehmen und Technologieunternehmen sind eine Vielzahl von Aktivitäten zum Batterierecycling entstanden, sodass nach aktuellem Stand über 20 Unternehmen in den nächsten Jahren mit Recycling-Kapazitäten an den Markt gehen wollen oder bereits aktiv sind. Neben dem Zugang zu End-of-Life Batterien stehen die Recyclingunternehmen vor den Herausforderungen der Verfahrensskalierung, welche am Ende kostengünstig und im Einklang mit der europäischen Regulierung ausgestaltet sein muss. Um den sich verändernden Batterietechnologien Rechnung zu tragen, werden auch die Prozesse selbst kontinuierlich weiterentwickelt werden müssen.

Effiziente und nachhaltige Anlagentechnik

In allen Stufen der Batterieherstellung wird industrielle Anlagentechnik benötigt, welche einen hohen Durchsatz, eine hohe Prozessqualität und einen hohen Automatisierungsgrad ermöglicht. Die große Branche der besonders im mitteleuropäischen Raum ansässigen Maschinen- und Anlagenbauer umfasst eine niedrige dreistellige Anzahl an in der Batterietechnologie tätigen Unternehmen. Der Anteil an kleinen und mittelgroßen Unternehmen als Zulieferer von Maschinen und Anlagen für die Lithium-Ionen Batteriezellfertigung ist im deutschen Raum eher gering. Gemessen an ihrer Anzahl sind weniger als die Hälfte der in diesem Marktsegment aktiven Unternehmen den KMUs zuzurechnen. Die derzeit größten Umsatzvolumina zur Deckung der Nachfrage nach Anlagentechnik werden gegenwärtig von chinesischen, koreanischen oder japanischen Unternehmen erwirtschaftet.

Die europäische Branche will dieser Situation einerseits mit der stärkeren und unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit von Know-How und der Integration technologischer Kompetenzen begegnen, andererseits mit der Entwicklung und dem Angebot innovativer und damit vom asiatischen Stand der Technik abweichender Technologie, welche z. B. Trends in der Entwicklung regulatorischer Vorgaben zum ökologischen Fußabdruck der Produktion aufgreift. Die daraus resultierenden F&E-Herausforderungen umfassen die Steigerung von Qualität, Durchsatz und Effizienz in der Zellherstellung und spiegeln sich in unterschiedlichen Aktivitätsfeldern wie lösemittelreduzierter Elektrodenfertigung, Integration von Inline-Messtechnik oder energieoptimiertem Betrieb von Trockenräumen wider. Neben rein technologischen Fragen spielen jedoch auch im Anlagenbau die Skala und damit die Herstellungskosten und

die Umlage von Entwicklungskosten eine große Rolle. Europäische Anbieter müssen dazu schnell signifikante Marktanteile erreichen und das vorhandene Know-How der europäischen Forschung effizient einbinden.

Investitionen in europäische Giga-Fertigungen

Kaum ein Bereich der Batteriewertschöpfungskette hat in den letzten Jahren höhere öffentliche und politische Aufmerksamkeit erhalten als die Zellfertigung selbst. Nach einigen Jahren, in denen sich die Industrie eher abwartend verhalten hatte, wurde in den letzten wenigen Jahren eine Vielzahl von Aktivitäten zum Aufbau von Zellfabriken in Europa angekündigt. Heute sind über 20 Zellfabriken europäischer und außereuropäischer Betreiber geplant, welche spätestens bis zum Jahr 2030 ihren Betrieb aufnehmen sollen. Der hauptsächliche Fokus der Aktivitäten liegt auf Batteriezellen für Elektroautos und damit auf der Belieferung europäischer OEMs. Dies spiegelt sich auch in den Betreiber(-konsortien) wider, welche häufig Kooperationen zwischen OEM und Technologieunternehmen, Automobilzulieferern und bereits etablierten Zellherstellern darstellen. Ebenso sind aber auch neue Akteure ohne direkte Verbindungen in die Automobilbranche aufgetaucht, welche vielfach mit dem Versprechen einer Spitzentechnologie oder einer besonders nachhaltigen Produktion antreten. Der Fortschritt der unterschiedlichen Aktivitäten ist sehr divers und reicht von der erfolgten Unternehmensgründung und Ankündigung bis hin zur Umsetzung und gestarteten Produktion. Den meisten Unternehmungen ist gemein, dass sie auf hoher, d.h. zweistelliger jährlicher GWh-Produktionsskala ansetzen wollen. Dies erfordert zunächst hohe Investitionsanstrengungen für den Aufbau, erscheint jedoch für das Erreichen wettbewerbsfähiger Produktionskosten unabdingbar. Spätestens mit dem Produktionsstart werden sich die Herausforderungen jedoch auf den technischen Teil der Produktion, und damit auf den Hochlauf verschieben. Die Skalierung und Sicherung einer hohen Qualität hat sich in der Vergangenheit immer wieder als herausfordernd dargestellt, da große Abhängigkeiten zwischen vor- und nachgelagerten Prozessschritten bestehen und folglich eine parallele Optimierung an unterschiedlichen Stellen durchgeführt werden muss. Der Transfer von Wissen aus bereits optimierter Kleinserien- oder Pilotfertigung kann entscheidend zur Verkürzung von Einfahrzeiten und der Senkung der damit verbundenen Kosten beitragen. Mittelfristig werden die Steigerung der Nachhaltigkeit durch den Einsatz neuer Verfahren und die Digitalisierung in der Produktion ebenfalls große Ziele von F&E-Aktivitäten sein.

Innovationspfade an der Fraunhofer FFB

Die Forschungsfertigung Batteriezelle FFB in Münster ist eine Einrichtung der Fraunhofer Gesellschaft, die mit der Absicht

ins Leben gerufen wurde, die Industrie bei der Lösung von F&E-Herausforderungen an der Schwelle zur industriellen Technologienutzung zu unterstützen. Um dies leisten zu können, muss die FFB selbst über eine industrielle Batteriezellfertigung verfügen, welche die Prozessart und den Durchsatz einer Giga-Fertigung abbildet. Im Unterschied zu einer Zellfabrik wird die FFB jedoch über einen, diesem industriellen Durchsatz vorgelagerten, Skalierungsmechanismus verfügen. Aufgeteilt auf die FFB PreFab und die FFB Fab werden Entwicklungsmöglichkeiten im Labor-, Pilot- und Fertigungsmaßstab zur Verfügung stehen, um Technologien je nach Reifegrad und Fragestellung auf der passenden Skala untersuchen und weiterentwickeln zu können. Zusätzlich werden durch die Zurverfügungstellung von digitalen Zwillingen F&E-Möglichkeiten geschaffen, die ohne den Einsatz physischer Infrastruktur anwendbar sind. Dies soll die Entwicklungskosten für die Industrie deutlich reduzieren und durch die Bündelung von Batteriekompetenzen an einem Standort Entwicklungszeiten auch deutlich beschleunigen.

Innovationspfade an der Fraunhofer FFB sind an F&E-Aktivitäten gebunden und befassen sich mit der Weiterentwicklung von Technologien im Anwendungsfeld der Batteriezellfertigung. Neben der direkten Finanzierung über Industriepartner im Sinne auftragsgebundener Forschung kann auch auf eine Vielzahl von Fördermaßnahmen für die Batterieforschung und mittlerweile auch deren industrielle Skalierung aus nationalen und europäischen Programmen zurückgegriffen werden. Der übliche Verwertungspfad sieht eine anschließende Verwertung beim am Entwicklungsprojekt beteiligten Industriepartner vor.

An der Fraunhofer FFB umfassen entsprechende Arbeiten mehrere Skalierungsstufen, beginnend mit Vorstudien hin zu Systemintegrationsarbeiten und Leistungstests von konkreten Technologien und dem Ziel der schrittweisen Vorbereitung auf die industrielle Nutzung. Dazu sollen die Einrichtungen der Fraunhofer FFB sowohl Flächen und Anlagentechnik für F&E-Projekte als auch automatisierte Produktionslinien zur Realisierung von Fertigungskampagnen für Musterzellen oder Elektroden in Kleinserie zur Verfügung stellen. Durch das Europäische Lernlabor Batteriezelle (ELLB) werden an der Fraunhofer FFB zudem Schulungen für einen breiten Adressatenkreis angeboten, um zukünftigen Fachkräften Wissen im Bereich der Batteriezellfertigung zu vermitteln.

2. Einleitung

Weltweit befindet sich die Batterieindustrie an der Schwelle zur großskaligen Massenfertigung und hat sich damit nicht nur für die Automobilbranche, sondern auch für viele andere Anwendungen zu einem Schlüsselzulieferer entwickelt. Längst stehen in der Entwicklung und Kommerzialisierung nicht mehr nur Fragen der Leistungsfähigkeit von Batterien, sondern ebenso der Ressourcenverfügbarkeit für den Hochlauf der Elektromobilität und die mit der Batterieproduktion und Nutzung verbundenen Umweltwirkungen im Vordergrund. Zwar dominieren asiatische Unternehmen nach wie vor entlang der gesamten Wertschöpfungskette Batterie, doch besteht in Europa der erklärte politische Wille zur deutlichen Ausweitung europäischer Marktanteile. Als zentrale Strategie der EU gilt dabei der "European Green Deal", welcher mit dem Ziel der Klimaneutralität bis 2050 eine Vielzahl wirtschafts- und förderpolitischer sowie regulativer Maßnahmen vorsieht [1].

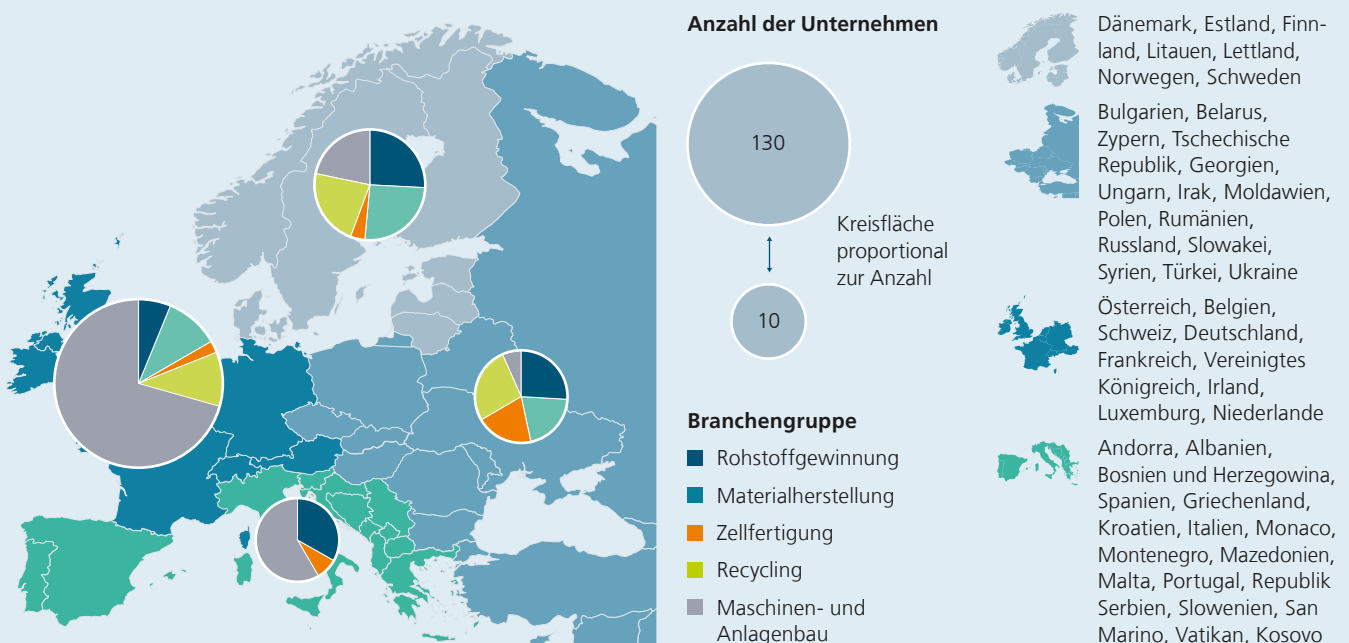
Der Aufbau einer Batteriewertschöpfungskette in Europa wird insbesondere im Hinblick auf den Umstieg zu einer nachhaltigen Mobilität gefordert. Als eine entscheidende Herausforderung erweist sich die stetig wachsende Produktionsskala, welche für den Einstieg in die Batterieindustrie nötig ist, um wettbewerbsfähige Kosten zu erzielen. Dies gilt gerade für Wertschöpfungsketten mit dem Ziel der Automobilzulieferung, welche je nach Prozessschritt Investitionen im hohen Millionen- bis Milliarden-Euro Bereich erfordern.

Beim Aufbau dieser Wertschöpfungsketten spielt der Gedanke der Zirkularität eine immer größere Rolle. So sollen einerseits

Batterien nach ihrem ersten Leben einer anwendungsübergreifenden Zweitnutzung zugeführt werden und durch Recycling sollen Materialien für die Produktion neuer Batterien verfügbar gemacht werden. Andererseits rücken in diesem Kreislauf auch viele Akteure der unterschiedlichen Wertschöpfungs-schritte näher zusammen. Dies geschieht im Rahmen von Entwicklungskooperationen z. B. zwischen Anlagenbauern und Zellfertigern bei der Optimierung von Herstellungsprozessen, zwischen Zellfertigern und OEM beim Design mechanischer Eigenschaften von Zellen, Packs und Fahrgestell oder beim sogenannten „Design for Recycling“ entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Kooperationen zwischen Industrieunternehmen unterschiedlicher Branchen sind somit zu einem großen Treiber für technologische Batterieentwicklung geworden.

Von politischer Seite aus wird der Aufbau der europäischen Batterieindustrie insbesondere durch die Stärkung der Innovationskraft der Unternehmen gefördert. Dies geschieht einerseits durch nationale und europäische Förderungen von Grundlagen- und angewandter Forschung, andererseits durch Programme wie die "Important Projects of Common European Interest" (IPCEI), welche Entwicklungsarbeiten bis vor die Serieneinführung fördern. Gerade beim Transfer von Forschungsergebnissen in eine industriell relevante Produktionsskala bestand bislang eine Infrastrukturlücke, welche die Validierung von Materialien, Zellen und Prozessen z. B. bei hohen Durchsatzgeschwindigkeiten und unter automatisierten Realbedingungen, betrifft. Durch den durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und das Land

Abbildung 1: Industriestruktur in Europa und Verteilung von Branchengruppen entlang der Wertschöpfungskette Batterie



Nordrhein-Westfalen geförderten Aufbau der Forschungsfertigung Batteriezelle FFB in Münster wird diese Lücke aktuell geschlossen.

Die Fraunhofer FFB wird mit dem Ziel einer hohen Anschlussfähigkeit an Ergebnisse aus der Forschung mit niedrigen bis mittleren TRL sowie an die industrielle Übertragbarkeit mit höchsten TRL aufgebaut. Übergreifende Ziele sind die Skalierung neuer Prozess- und Zelltechnologien und die Steigerung von Qualität, Senkung von Kosten und Verbesserung des ökologischen Fußabdrucks. Insbesondere für ihre deutschen und europäischen Industriepartner will die Fraunhofer FFB damit die Dauer von Innovationszyklen deutlich verkürzen.

Der im Rahmen der BMBF Projektförderung [2] entstandene „Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022“ gibt einen Überblick über die aktuelle Industriestruktur in Europa, sowie über den Fortschritt beim Aufbau der Fraunhofer FFB und ihrem zukünftigen Angebot zur Unterstützung dieser Schlüsselindustrie in Europa und ordnet dabei die relevanten Akteure zueinander ein.

- **Kapitel 2** gibt einen Überblick über den zu erwartenden Lithium-Ionen-Batterie Bedarf in Europa und weltweit und stellt die Aufgaben und Ausrichtung der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB vor.
- In den **Kapiteln 3, 4 und 5** werden die Ausprägung der Branchengruppen *Rohstoffförderung, Materialherstellung und Recycling, Maschinen und Anlagenbau sowie Messmittelherstellung und Zellherstellung* in Europa diskutiert und aktuelle Entwicklungen und (F&E-)Herausforderungen benannt.
- **Kapitel 6** skizziert die technische Infrastruktur der Fraunhofer FFB, mögliche Projektformate zwischen FFB und Industrie im physischen und digitalen Bereich und beispielhafte Innovationspfade.

2.1. Marktentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien

Der globale Batteriemarkt wird derzeit von Bleibatterien (Pb) und Lithium-Ionen-Batterien (LIB) beherrscht. Bleibatterien werden vor allem als Starterbatterie und für eine Vielzahl stationärer und industrieller Anwendungen eingesetzt und stellen einen etablierten Markt dar. Anwendungen im Bereich Elektromobilität sind der Haupttreiber für den wachsenden Marktanteil von LIB. Insgesamt lag die weltweite Nachfrage nach LIB im Jahr 2021 bei etwa 470 GWh. Erste Hochrechnungen für das

Jahr 2022 deuten auf eine Kapazitätsnachfrage von 500 bis 650 GWh hin. In den letzten Jahren lag das jährliche Wachstum zwischen 30 % und über 40 %.

Entwicklungen des Marktwachstums

Bis 2030 könnte die weltweite Nachfrage nach LIB etwa 3 TWh pro Jahr erreichen (Abbildung 2) [3]. Die meisten Marktprognosen gehen für das Jahr 2030 von einer weltweiten Nachfrage von 2 bis 4 TWh aus [4–7]. Maximale Szenarien gehen von einem Bedarf von bis zu 6 TWh aus. Auch nach 2030 wird der Markt zusätzlich wachsen. Bis dahin könnten neue Anwendungen, z. B. die Passagierluftfahrt und andere, einen relevanten Marktanteil erreichen, was die insgesamt Nachfrage weiter erhöhen wird. Langfristig wird eine weltweite Batterienachfrage von mehr als 10 TWh pro Jahr als realistisch angesehen [3]. Der europäische Bedarf an LIB-Zellen liegt bei 20–30 % des weltweiten Bedarfs. Mit dem Anlauf der Elektromobilität in Regionen außerhalb der heutigen Kernmärkte (China, USA, Europa) könnte sich dieser Anteil zukünftig reduzieren. Aufgrund der hohen Produktions- und Verkaufszahlen der Automobilhersteller, z. B. in Deutschland und Frankreich, ist die Nachfrage in Europa im weltweiten Vergleich nochmal stärker an den Hochlauf der Elektromobilität gekoppelt.

Anwendungsbereiche mit dem höchsten Batteriebedarf

Haupttreiber des wachsenden globalen LIB-Marktes ist die Elektromobilität in Form von Elektrofahrzeugen (EV). Der Markt für Elektro-Pkw generiert bereits heute die höchste Nachfrage unter den LIB-Anwendungen (Abbildung 2). Neben Elektroautos gibt es weitere LIB-Anwendungen wie kommerzielle EVs (cEV), stationäre Speicher (ESS), tragbare Geräte wie Power Tools, Computer und Mobiltelefone (3C) und weitere Spezialanwendungen (Oind) sowie Mikromobilität auf zwei oder drei Rädern (2/3W). Elektrifizierte Personenkraftwagen (pEV) wie Batterie-EVs (BEV) oder Plug-in-Hybrid-EVs (PHEV) machen heute mehr als 60 % der LIB-Nachfrage aus. In Zukunft wird dieser Anteil auf bis zu 80 % ansteigen. So ist die globale Nachfrage nach LIB für Elektroautos von 95 GWh im Jahr 2019 auf 295 GWh im Jahr 2021 angestiegen.

Nutzfahrzeuge (z. B. E-Busse oder E-Trucks) spielen noch keine große Rolle an der Gesamtnachfrage, könnten sich aber bis 2030 und darüber hinaus zu einem weiteren wichtigen Markt entwickeln. Die Zahl batterieelektrischer schwerer Nutzfahrzeuge ist zwar noch gering (2021 etwa 15.000 E-Truck- und 90.000 E-Bus-Neuzulassungen [8]), aber sie verfügen über deutlich höhere Batteriekapazitäten. Der Absatz von leichten Nutzfahrzeugen wie Lieferwagen oder Fahrzeugen für Handwerker steigt rapide an (2021 etwa 180.000 Neuzulassungen

[8]). Die Batteriekapazitäten solcher Fahrzeuge sind mit denen von Pkw vergleichbar [3].

Der Markt für stationäre Speicher (ESS) wächst stark, aber insgesamt auf niedrigem Niveau. Nach eher konservativen Prognosen könnte sich der jährliche Bedarf aus stationären Anwendungen im Jahr 2030 auf etwa 100 GWh belaufen. Optimistischere Prognosen gehen von einer Nachfrage von 200 bis 300 GWh pro Jahr bis dahin aus [3].

3C-Anwendungen sind bereits etablierte LIB-Märkte, die weiter wachsen werden. Für den Markt der Laptops, Tablets und Mobiltelefone werden einstellige Wachstumsraten erwartet. Das Segment der Elektrowerkzeuge und tragbaren Haushaltsanwendungen gilt als starker Wachstumsmarkt für die nächsten Jahre, mit jährlichen Wachstumsraten von 15–20 %. Andere Elektronik- und Verbraucheranwendungen wie Kameras und Drohnen sind derzeit noch vergleichsweise klein, könnten sich aber in Zukunft sehr viel dynamischer entwickeln.

Mikromobilitätsanwendungen wie E-Bikes oder E-Scooter (2021 jeweils Verkauf von etwa 10 Mio. Stück [8,9]) stellen ebenfalls einen wachsenden Markt dar, wobei sich der Scooter-Markt wesentlich auf Asien beschränkt und E-Bikes global deutlich stärker verbreitet sind. Die bisherigen jährlichen Wachstumsraten liegen im Bereich von 8 bis 14 %. Bis 2030 könnte sich die Nachfrage etwa verdoppeln [3].

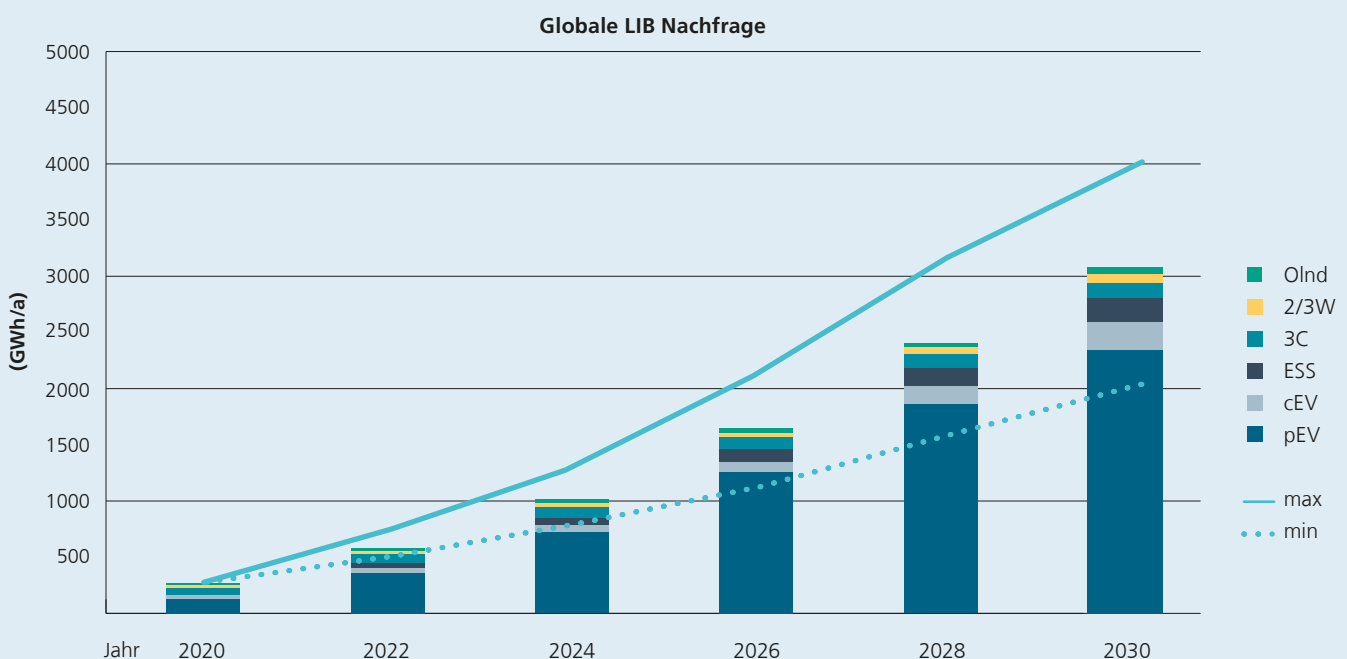
Auch in anderen Verkehrssektoren, z. B. bei Zügen, Schiffen und Flugzeugen, wird die Elektrifizierung in den nächsten Jahren beginnen oder weiter vorangetrieben werden. Neben rein elektrischen Alternativen könnte die Hybridisierung von Antriebssystemen beispielsweise in der Schifffahrt eine Option sein. In der Luftfahrt wird der Bedarf an Batterien voraussichtlich erst nach 2030 in größerem Umfang steigen [3]. Der Batteriebedarf sonstiger Spezialanwendungen ist gering und wird in Abbildung 2 der Kategorie »OInd« zugeordnet.

Marktumsatz und Entwicklung der Batteriekosten

Insgesamt hatten die verkauften LIB-Zellen im Jahr 2021 einen Marktwert von 50 bis 60 Mrd. EUR. Aufgrund des prognostizierten Marktwachstums könnte der Umsatz bis 2030 auf über 200 bis 300 Mrd. EUR steigen [3]. Studien gehen von derzeitigen durchschnittlichen Zellkosten von ca. 100 EUR/kWh für moderne LIB aus [10]. Viele Prognosen sagen einen weiteren Preisrückgang auf ca. 50 bis 80 EUR/kWh im Jahr 2030 voraus. Diese Prognosen berücksichtigen jedoch meist noch nicht die im vergangenen Jahr erlebten Preisanstiege für Batterierohstoffe.

Die Materialkomponenten für die Zelle (Anode, Kathode, Separator und Elektrolyt) machen den größten Teil der Zellkosten aus. Die teuerste Zellkomponente ist die Kathode, da sie wertvolle Rohstoffe wie Lithium, Kobalt und Nickel enthält.

Abbildung 2: LIB Markthochlaufprognose bis 2030 für Elektro-PKW (pEV), Nutzfahrzeuge (cEV), stationäre Speicher (ESS), Elektronik und tragbare Anwendungen (3C), 2/3-Räder (2/3W) und andere industrielle Anwendungen (OInd). Das Minimal- und Maximalszenario geben die Bandbreite möglicher Entwicklungen wieder.



Insgesamt macht die Kathode mehr als die Hälfte der Materialkosten aus. Im Vergleich zu den Materialkosten machen die Herstellungskosten einen geringeren Anteil an den gesamten Zellkosten aus, zwischen 10–27 EUR/kWh [75]. Die Wertschöpfung durch die Zellproduktion (ohne Materialien etc.) wird für Europa auf ca. 20 Mrd. EUR und weltweit auf 82 Mrd. EUR im Jahr 2030 geschätzt. Neben der Herstellung von Batteriezellen ist auch die Montage von Zellen zu Modulen und Packs ein weiterer wichtiger Markt. Die Kosten für die Packmontage belaufen sich auf ca. 17 EUR/kWh [3]. Ein weiterer relevanter Markt ist der Maschinen- und Anlagenbau, der die für die hochautomatisierte Zellproduktion benötigten Systeme herstellt. Die Kosten für die Installation von Produktionslinien in allen angekündigten Zellfabriken belaufen sich bis 2030 weltweit auf ca. 180 Mrd. EUR. In Europa werden die Batteriehersteller bis 2030 ca. 44 Mrd. EUR investieren müssen. In Deutschland müssen bis dahin mehr als 12 Mrd. EUR in Produktionslinien investiert werden. [11]

Viele Prognosen deuten auf eine in den kommenden Jahren stetig steigende Nachfrage nach Batteriezellen hin, welche von den beteiligten Industriebranchen: Material- und Komponentenherstellung, Maschinen- und Anlagenbau und Zellherstellung adressiert werden muss. Das mittelfristige Wachstumspotenzial ist bis zum Jahr 2030 und darüber hinaus sehr hoch. Im Jahr 2030 wird der Bedarf an Batterien zwischen 2 und 4 TWh liegen. In den kommenden Jahren sind Wachstumsraten von deutlich über 20 % realistisch. Haupttreiber der Nachfrage ist der wachsende Markt für Elektrofahrzeuge. Auf dieses Marktsegment werden in Zukunft bis zu 80 % der weltweiten

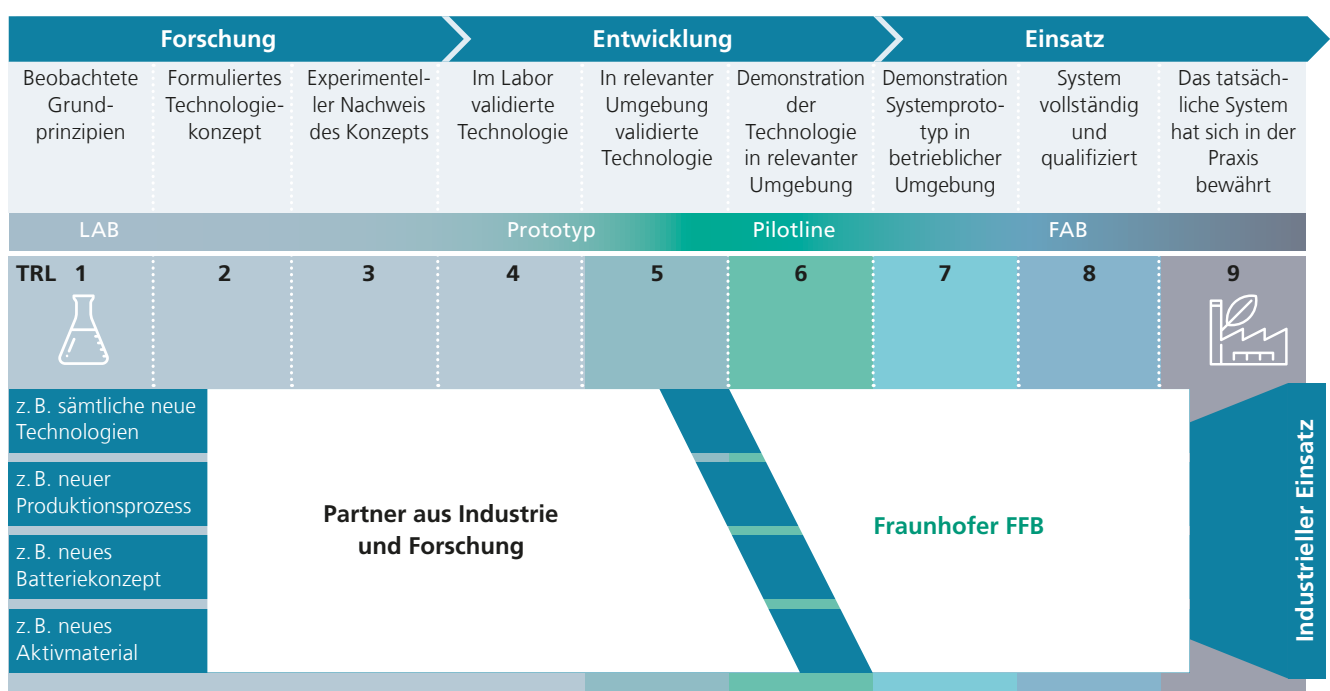
Zellnachfrage entfallen. Der Standort der Produktionsanlagen wird sich in gewissem Maße von Asien nach Europa verlagern, so dass sich auch in Europa eine stärkere Gesamtwertschöpfung rund um die Zellproduktion herausbilden wird.

2.2. Die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

Die Fraunhofer FFB entwickelt und skaliert Innovationen für eine effiziente und nachhaltige Batteriezellproduktion. Ziel ist es, den Innovations- und Kommerzialisierungsprozess von Produktionstechnologien für bestehende und zukünftige Zellformate zu beschleunigen, um die Zeit bis zum Markteintritt von Innovationen zu verkürzen.

Gemäß Abbildung 3 lässt sich der Innovations- und Kommerzialisierungsprozess anhand von Technology Readiness Levels (TRL) strukturieren. Der Großteil von Forschungseinrichtungen forscht und entwickelt in den unteren TRL-Stufen. So wird

Abbildung 3: Einordnung der Fraunhofer FFB in die Forschungslandschaft



beispielsweise im Rahmen von Experimenten die grundlegende Funktionsweise von Technologien untersucht und es werden erste Prototypen zur Validierung gebaut (bis TRL 6).

Am anderen Ende des Innovations- und Kommerzialisierungsprozesses steht der industrielle Einsatz von Technologien beispielsweise in Gigafactories. Neben einer problemfrei einsetzbaren Technologie kommt es in der Batteriezellfertigung auf eine Integration der Technologie in einen verketteten Produktionsprozess an. So müssen zum Beispiel Material- und Personalflüsse bedacht, Maschinen im Wartungskonzept berücksichtigt und physische wie digitale Schnittstellen definiert werden. Die zu leistenden Entwicklungsarbeiten in diesen TRL-Stufen (>TRL 6) sind mit hohen Kosten verbunden, da nicht mehr vornehmlich Einzelprozesse betrachtet werden, sondern für diese Entwicklungsschritte eine vollständige Prozesskette zur Verfügung stehen muss. Zudem findet auf diesem Entwicklungsstand die Validierung von Prozessen und Technologien in der Regel mit einer kleinen bis mittleren Serie (einige hundert) an Prototypenzellen statt.

Übergeordnetes Ziel der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB ist es, diese »Lücke« zwischen Forschung und Industrie durch die Bereitstellung einer Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur zu schließen (siehe Abbildung 4).

Darüber hinaus steht der Erfahrungsgewinn im Betrieb einer großskaligen Fertigung von Batteriezellen im Vordergrund. Dies zeigt sich beispielsweise in den umfangreichen Aus- und Weiterbildungsprogrammen, die die Fraunhofer FFB anbietet.

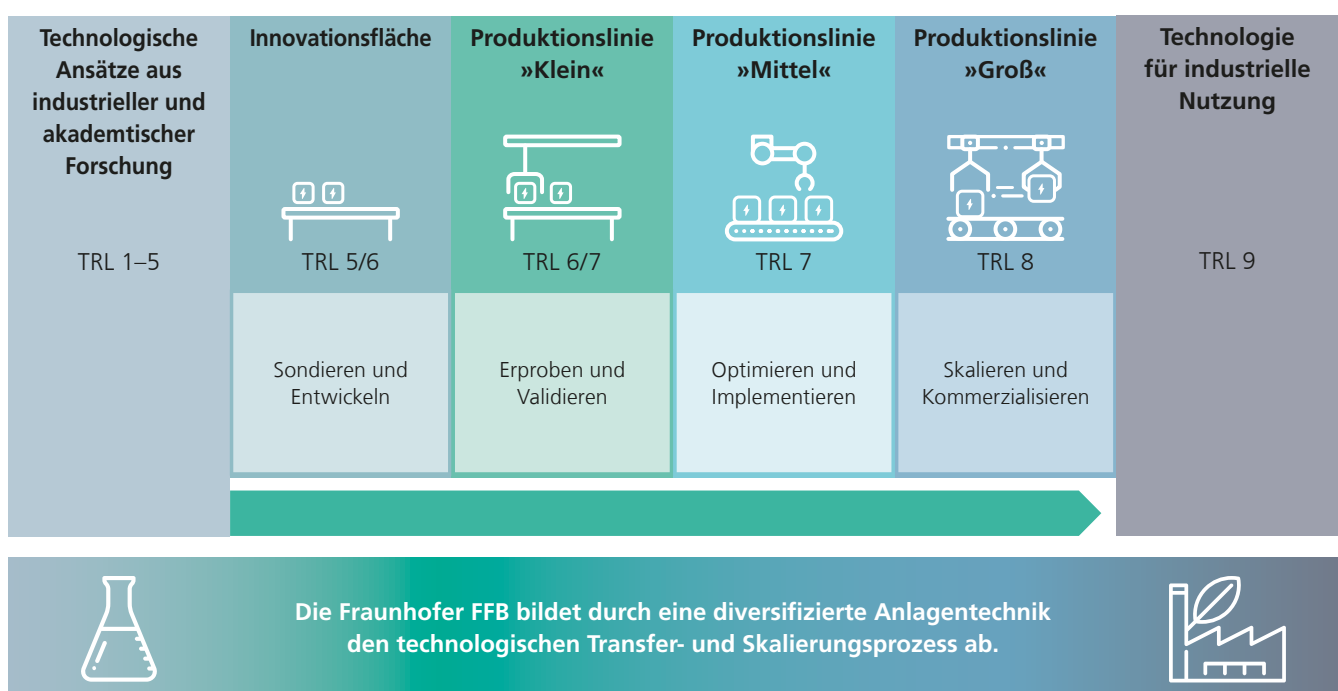
Weiterhin kommen während des Betriebs digitale Methoden zum Einsatz. So werden für das Gebäude, die Anlagen und die erzeugten Batteriezellen digitale Zwillinge erstellt, die miteinander vernetzt sind. Dies ermöglicht u. a. eine Rückverfolgung von Umgebungs- und Prozessparametern auf Ebene einzelner Batteriezellen oder den Einsatz von künstlicher Intelligenz in der Batteriezellfertigung, um die Produktionsqualität zu steigern.

Um Innovations- und Kommerzialisierungsprozesse zu beschleunigen, ist ein modularer Aufbau sowie ein Höchstmaß an Flexibilität der Produktionsmittel erforderlich. Daher sieht das Konzept der FFB eine Kombination aus Labor- und Produktionsforschung vor. Je nach Bedarf können Prozessschritte der Batteriezellproduktion in Bezug auf Material, Produktionstechnologie, Energieeffizienz, Ressourceneffizienz, Qualität, Durchsatz und Kosten erprobt und optimiert werden. Dazu steht bereits heute Analgentechnik zur Verfügung, die in den kommenden Jahren weiter ausgebaut wird.

»FFB Workspace«

2021 hat die Fraunhofer FFB im »AlexProWerk« der Alexianer Werkstätten in Münster erste Anlagen zur Elektrodenfertigung in einer Reinraumumgebung in Betrieb genommen. Die Entwicklungstätigkeiten im »FFB Workspace« beziehen sich vor allem auf das kontinuierliche Mischen, bei dem Materialien zur Beschichtung in einem durchgängigen Verfahren vermengt werden, sowie auf die Validierung von alternativen Trocknungsverfahren. Im »FFB Workspace« werden die produzierten Elektroden untersucht, um Optimierungspotenziale

Abbildung 4: Schematische Übersicht des Infrastrukturangebots der Fraunhofer FFB



bei der Rezeptur und den Herstellungsprozessen zu identifizieren. Der »FFB Workspace« hat eine Nutzfläche von 430 m² und eine jährliche Maschinenkapazität von 50 MWh für die Anodenfertigung.

»FFB PreFab«

Nach Fertigstellung übergibt das Land NRW das erste Gebäude (»FFB PreFab«) an die Fraunhofer-Gesellschaft. Auf einer Nutzfläche von 3.000 m² wird eine Pilotlinie für Pouchzellen aufgebaut, sodass alle Prozessschritte von der Wareneingangskontrolle über die Elektrodenfertigung und Zellaassemblierung bis hin zur Formierung und der End-of-Line Inspektion abgebildet werden können. Die »FFB Prefab« wird eine jährliche Maschinenkapazität von 200 MWh besitzen. Darüber hinaus verfügt die »FFB PreFab« über Innovationsflächen. Dies sind Freiflächen, die zur Weiterentwicklung von Maschinenprototypen genutzt werden können, und über alle notwendigen Ausstattungsmerkmale (Medienanschlüsse, Trockenraumatmosphäre) für Entwicklungstätigkeiten im Stand-alone Betrieb verfügen. Durch die modular aufgebaute Pilotlinie können Maschinenprototypen aus den Innovationsflächen in einem weiteren Skalierungsschritt im verketteten Betrieb in der Pilotlinie validiert werden.

»FFB Fab«

Im zweiten Bauabschnitt (»FFB Fab«) nimmt die Fraunhofer FFB Fertigungslinien für die großskalige Batteriezellproduktion in Betrieb. Hier werden in industrieller Skalierung Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in allen Zellformaten durchgeführt. Die Nutzfläche beträgt etwa 20.000 m² und die Maschinenkapazität etwa 6 GWh im Jahr.

3. Rohstoffgewinnung, Materialherstellung und Recycling

Die Gewinnung von Rohstoffen, deren Verarbeitung zu Materialien und das End-of-Life (EoL) Recycling spielen in der Batteriewertschöpfungskette eine zentrale Rolle. Sowohl die Rohstoffe als auch später die aus Rohstoffen hergestellten Materialien sind die wesentlichen Inputgüter für die Batterieherstellung.

Eine stabile Versorgung ist elementar für die schnell in Anzahl und Produktionskapazität wachsenden Zellhersteller. Gleichzeitig tragen ihre teils energieintensiven und umweltbelastenden Prozesse und Verfahren in erheblichem Maße negativ zur ökologischen Gesamtbilanz der Wertschöpfungskette bei [12,13].

Die Rohstoffgewinnung, Materialherstellung und das Recycling sehen sich komplexen technologischen sowie marktseitigen Herausforderungen ausgesetzt. Das Wachstum des Batteriemarktes und der Wettbewerb um eine nachhaltige Deckung des hieraus entstehenden Material- und Rohstoffbedarfs wirken sich auf die Nachfrage- und Wettbewerbssituation aus [14]. Diese brancheninternen Effekte werden an den Rohstoffmärkten zusätzlich durch externe Effekte überlagert. So konnte zu Beginn des Ukrainekrieges innerhalb eines einzigen Tages eine Verdopplung des Nickelpreises beobachtet werden [15].

Neben ökonomischen Aspekten verschärfen technologische Entwicklungen und politische, soziale sowie regulatorische Rahmenbedingungen die Dynamik innerhalb der Branchen.

Um diese Herausforderungen und damit einhergehende Lösungsmöglichkeiten besser zu verstehen, werden die Branchen im Folgenden im Detail untersucht. Dabei wird zunächst die Industriestruktur in Europa aufgezeigt. Des Weiteren werden die Innovationen und damit einhergehende aktuelle Entwicklungen beschrieben. Abschließend werden die F&E-Herausforderungen der betrachteten Branchen beleuchtet.

3.1. Industriestruktur in Europa

Status Quo der Industriestruktur in Europa

Abbildung 5 bietet einen Überblick über die Anzahl und Verteilung von Unternehmen der Rohstoffgewinnung, der Materialherstellung und des Recyclings in Europa. Bezüglich der Unternehmensgröße lässt sich festhalten, dass der jeweilige relative Anteil von kleinen, mittelständischen oder großen Unternehmen sowie Start-ups von Branche zu Branche stark variieren. In

Abbildung 5: Übersicht von Unternehmen der Rohstoffgewinnung, der Materialherstellung und des Recyclings ausgewählter Inputgüter von Lithium-Batterien (Aktivmaterialien, Rohmaterialien Li, Co, Ni, C)

Fallbeispiele



Kelibers Zoning-Anträge für 3 Lithium-Minen in Norwegen wurden gestattet



Northvolt plant 100 GWh Fabrik für Kathodenaktivmaterial in Schweden



Fortum kündigt erste Deployment-Tests ihrer LIB Recyclinganlage in 2022 an



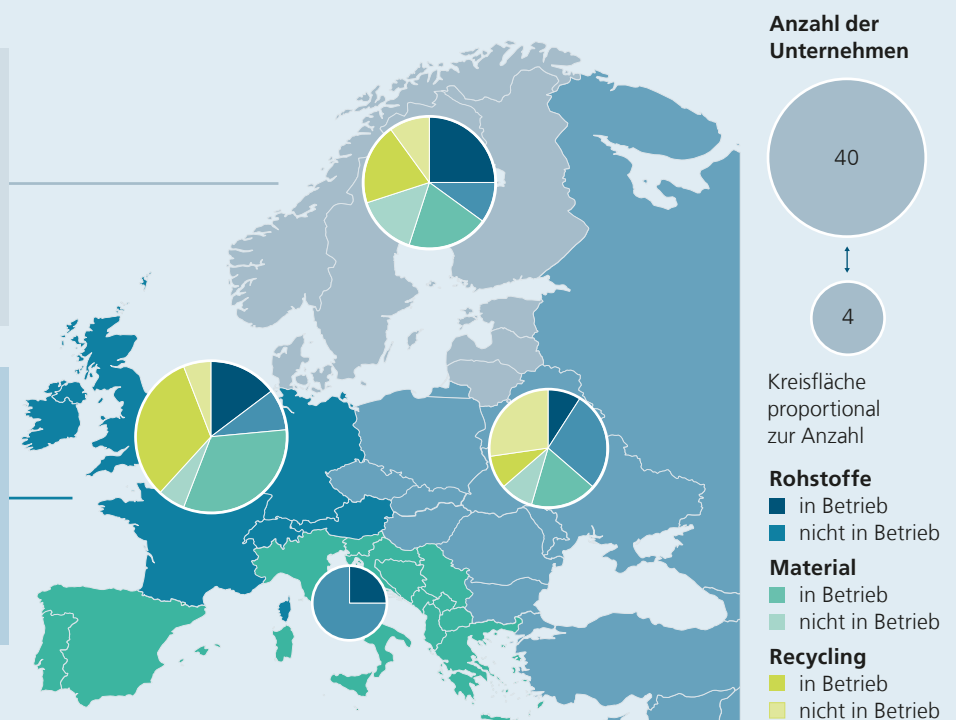
Volkswagen und Vulcan Energy Resources schließen Lithium-Liefervertrag ab



OCSiAL plant 300 Mio USD Investition in Anlage für Graphit-Nanoröhren



BASF Recyclingcenter in Schwarzehe soll 2023 in Betrieb gehen



der Rohstoffgewinnung sind überwiegend Großunternehmen und Beteiligungsgesellschaften aktiv, während Start-ups keine signifikante Marktdurchdringung aufweisen. Mögliche Gründe sind die hohen Investitionskosten, Unsicherheiten bei der Exploration und Überbrückungszeiten zwischen initialer Investition und Inbetriebnahme. Die Landschaft der Material- und Recyclingunternehmen gestaltet sich dagegen heterogener. So finden sich hier sowohl Unternehmen wie Umicore und BASF mit Marktanteilen von 6 % respektive 2 % am globalen Markt für Kathodenmaterialien [16] als auch die größte Anzahl von Start-ups [17]. Beispielsweise recycelt die Duesenfeld GmbH als Spin-off der TU Braunschweig mittlerweile 3.000 t/a an LIB und die im Jahr 2017 gegründete Northvolt AB plant eine Fabrik für Kathodenaktivmaterial, die eine jährliche Produktion von 100 GWh an LIB ermöglichen soll [18,19].

Um sich in dem intensiven Wettbewerbsumfeld die notwendigen Rohstoffe und Materialien zu sichern und Investitionsrisiken zu reduzieren, bieten sich als strategische Mittel Partnerschaften und langfristige Lieferverträge an [14]. Der aktuelle Trend zeigt, dass letztere nicht mehr ausschließlich zwischen Materialherstellern und Rohstofflieferanten geschlossen werden. Vielmehr sichern sich auch die in der Batteriewertschöpfungskette später angesiedelten Akteure wie OEMs eine langfristige Versorgung. So schlossen beispielsweise die Automobilhersteller Volkswagen, Renault und Stellantis langfristige Lieferverträge über Lithium mit der Vulcan Energy Resources Ltd. ab [20].

Im globalen Vergleich bleibt die europäische Batteriewertschöpfungskette hinter Marktführern wie China nach wie vor zurück [13,14]. Insbesondere bei Rohstoffen und Materialien ist Europa auf Importe angewiesen, da die Gewinnung von Rohmaterialien in Europa nur einen marginalen Beitrag liefert und die Nachfrage der gestiegenen Produktionskapazitäten in der Batterieherstellung bei weitem nicht decken kann [12,21]. Im 5-Jahres-Zeitraum bis 2020 betrugen die europäische Importabhängigkeit von Lithium 100 % und die von Kobalt 86 % [22]. Nicht zuletzt aufgrund dieser Abhängigkeit zielen sowohl Industrie als auch Politik seit Jahren darauf ab, die europäische Rohstoffgewinnung und Materialherstellung auszubauen.

Vor dem Hintergrund dieser eingeschränkten Primärversorgung, dem Bestreben nach nachhaltigen und ökologisch verträglichen Lieferketten, sowie der kontinuierlich ansteigenden Anzahl an EoL-Batterien nimmt der Recyclingprozess eine zunehmend wichtige Rolle in der Lieferkette ein. Im Jahr 2022 gab es über 35 operative oder konkret geplante Recyclinganlagen für LIB mit einer angekündigten kumulierten Recyclingmenge von ca. 130.000 t/a in Europa [3]. Neue Recyclingkonzepte sind darauf ausgelegt, Wiedergewinnungsquoten zu erhöhen und die Rohstoffabhängigkeit sukzessive zu verringern. Es bleibt dennoch offen, ob die verfügbaren Ressourcen die steigende Nachfrage bedienen können.

Europäische und globale Ressourcenverfügbarkeit im Detail

Global wird wie bereits in Kapitel 2 dargelegt die Nachfrageentwicklung für LIB weitläufig als steigend prognostiziert [14,23]. Uneinheitlich gestalten sich jedoch Prognosen hinsichtlich der zukünftigen Deckung der steigenden Rohstoffnachfrage. Die Investmentbank Goldman Sachs antizipiert in einer Studie, dass die erheblichen Investitionen in das Angebot von Batteriemetallen in der jüngsten Vergangenheit zumindest kurzfristig die Nachfragesituation entschärfen werden [23]. Für größere Zeiträume fallen die Prognosen jedoch unterschiedlich aus: So wird vom Beratungshaus McKinsey mittelfristig (bis 2030) erwartet, dass die aktuell voranschreitenden Initiativen zur Angebotssteigerung den Bedarf an Lithium für LIB decken können, während das Advanced Propulsion Centre UK akut vor einem potenziellen Lithiummangel warnt [24,25]. Mit Sicherheit festhalten lässt sich, dass die globale Angebots- und Nachfrageentwicklung verschiedener Batterieressourcen sowohl in der Industrie als auch in der Forschung weiterhin als kritischer Einflussfaktor berücksichtigt werden muss.

Bezüglich der Erschließungen von Rohstoffen in Europa besteht zwar eine umfassende Übersicht über mögliche Rohstoffreserven, aber nur begrenzte Sicherheit darüber, ob und in welchem Umfang diese letztendlich in ausreichender Qualität und unter wirtschaftlichen Rahmenbedingungen gewonnen werden können [12,21,22]. So erfordern Erschließungsprojekte das Durchlaufen aufwendiger Zulassungsprozesse, umfangreiche Infrastruktur und hohe Investitionen, um unter der Unsicherheit politischer Entwicklungen ausreichende operative Skalen zu erreichen. Die für Batterieanwendungen erforderlichen Reinheitsgrade und aufwendigen Veredlungsverfahren erschweren den direkten Übertrag von Rohstoffvorkommen auf Aussagen über letztlich verfügbare Materialien zusätzlich [13]. Die potenzielle Ressourcenverfügbarkeit durch Recycling spielt entsprechend eine erhebliche Rolle für Europa. Zum jetzigen Zeitpunkt sind potenziell recyclingfähige Materialflüsse in Europa hinsichtlich Größe, Form und chemischer Zusammensetzung der Produkte überwiegend heterogen. Diese Materialflüsse setzen sich aktuell aus Batterien verschiedenster Kleinanwendungen und Produktionsabfällen zusammen. Langfristig ist jedoch davon auszugehen, dass die Materialflüsse überwiegend aus EV-Batterien bestehen werden. Zeitgleich wird das Gesamtvolumen durch das Wachstum des EV-Marktes erheblich zunehmen. Es wird folglich ein Wandel der für das Recycling verfügbaren Materialströme erwartet: von geringen, heterogenen Volumina hin zu hohen, homogenen Volumina. Des Weiteren sind die Recyclingvolumina durch die Lebensdauer von ca. 10 Jahren bei EVs im Vergleich zum Produktionsvolumen stets stark zeitversetzt, was insbesondere durch die andauernd hohen Wachstumszahlen des Batteriemarktes eine Herausforderung darstellt, da so die Volumina der Produktion und der zum Recycling verfügbaren Materialströme zwangsläufig abweichen [12].

3.2. Innovationen und aktuelle Entwicklungen

Nachdem im vorherigen Kapitel die Betrachtung des Status Quo erfolgte, werden in diesem Kapitel Innovationen und Impulse im Umfeld der betrachteten Branche vorgestellt. Hierzu wird zunächst auf Investitionen, Neugründungen und Ansiedlungen internationaler Akteure in Europa eingegangen. Anschließend werden die Rolle von Start-ups sowie die Anbindung an Forschung und öffentliche Institutionen in der Branche betrachtet.

Investitionen, Neugründungen und Ansiedlungen internationaler Akteure

Die vom EV-Marktwachstum getriebenen rapiden Entwicklungen und umfangreichen Expansionen des Batterie- bzw. Zellherstellermarktes (siehe Kapitel 5) wirken sich konsequenterweise auf die Branchen der vor- und nachgelagerten Wertschöpfungsstufen aus. So wurden auch in Europa erhebliche Investitionen geplant oder bereits getätigt. Beispielsweise schreiten bei der BASF SE der Bau einer Produktionsstätte für Vorprodukte von Kathodenmaterialien in Harjavalta, Finnland und der in Schwarzheide begonnene Bau einer Produktionsanlage für Kathodenmaterialien voran. In Schwarzheide ist zusätzlich eine Prototypenanlage für Batterierecycling geplant. Die Inbetriebnahme ist bei den Produktionsstätten für 2022 und bei der Prototypenanlage für 2023 vorgesehen. [26] Das Nanotechnologieunternehmen OCSiAL SA gab im Februar 2022 bekannt, 300 Millionen USD in die Entwicklung einer Anlage für Kohlenstoff-Nanoröhren in Luxemburg zu investieren [27].

Auch außereuropäische Akteure wollen auf dem hiesigen Markt aktiv werden. So z. B. das durch eine 80 Millionen USD Beteiligung der Private Equity Firma Ara Partners unterstützte Recyclingunternehmen Blue Whale Materials LLC, das in Zusammenarbeit mit der Investmentfirma die Errichtung von mindestens fünf Recyclinganlagen in den USA und Europa plant [28]. Von außerhalb Europas kündigte das indische Elektronik-Recyclingunternehmen Attero Recycling Pvt. Ltd. eine über fünf Jahre verteilte Investition von einer Milliarde USD in LIB-Recycling – unter anderem in Polen – an [29].

Anbindung der Branchen an Forschung und öffentliche Institutionen

Es besteht ein ausgeprägtes Netzwerk an Initiativen und Allianzen, die in Europa die Verknüpfung der Branchen mit

Forschung und öffentlichen Einrichtungen fördert. Ein Beispiel für die Rohstoffbranche ist das vom European Institute of Innovation and Technology (EIT) geförderte „EIT RawMaterials“ Projekt. Dieses stellt mit über 120 Partnern aus Industrie und Forschung eines der weltweit größten Konsortien im Bereich Rohstoffe dar. Es bietet ein unterstützendes Rahmenwerk und Fördermöglichkeiten zur Integration von Forschung und industrieller Praxis mit dem Ziel, Innovation und Entrepreneurship in der Branche voranzutreiben. Die von der Europäischen Kommission ins Leben gerufene European Battery Alliance mit über 760 Mitgliedern beschäftigt sich mit der gesamten Batteriewertschöpfungskette zum Zweck der projektgetriebenen Stärkung der Branche in Europa. Daneben besteht eine Vielzahl regionaler und europäischer Forschungsprojekte.

3.3. F&E-Herausforderungen

Entwicklungsimpulse und Digitalisierung

Die technologischen Neuerungen der Branchen werden in erheblichem Maße durch zwei Impulse angetrieben: Einerseits durch die technischen Entwicklungen in der Batterieherstellung und andererseits durch das Bestreben zur Prozessoptimierung.

Aktuell werden eine Vielzahl neuer Materialien für den Einsatz in LIB oder anderen Batterien entwickelt. Zum einen zielen die Anstrengungen auf die Reduktion der Abhängigkeit von spezifischen Rohstoffen oder Materialien ab, zum anderen sollen die Leistungsfähigkeit verbessert oder die Kosten gesenkt werden. Im elektrochemischen Gesamtsystem Batterie umfasst dies die Erforschung neuer chemischer Zusammensetzungen für Anoden, Kathoden oder Elektrolyte, bis hin zu neuen technischen Produktlösungen wie bspw. Festkörperbatterien. Wichtige Entwicklungsstränge für LIB bilden aktuell der Einsatz Si-basierter Anodenmaterialien oder Mn- und Fe-basierter Kathodenmaterialien. Hierfür müssen je nach Technologie und Anforderungen gegebenenfalls neue Herstellungsprozesse entwickelt werden. Besondere Herausforderungen ergeben sich aus den Anforderungen der Zellhersteller, die eine hohe Kompatibilität neuer Materialien mit etablierten Prozessen der Zellproduktion fordern.

Im Interesse der Energie- und Ressourceneffizienz sowie des Nachhaltigkeitsbewusstseins von Politik und Gesellschaft besteht in den Branchen überdies ein erheblicher Antrieb Prozesse zu optimieren und neue technologische Lösungen zu identifizieren. Ein wesentlicher Treiber dieser

Prozessoptimierung ist die Digitalisierung. Wie auch in anderen Branchen werden die Echtzeit-Optimierung und die datengestützte Transparenz entlang der Wertschöpfungskette angestrebt. Dies umfasst potenzielle technologische Neuerungen wie die datenbasierte Modellierung metallurgischer Prozesse oder durch Machine Learning unterstützte Sortierprozesse im Recycling. Die Automatisierung der Prozesse bleibt ebenfalls eine wichtige Herausforderung für die betrachteten Branchen, auch im Hinblick auf den antizipierten Nachfragewachstum bei gleichzeitigem zunehmendem Preisdruck. [12,22]

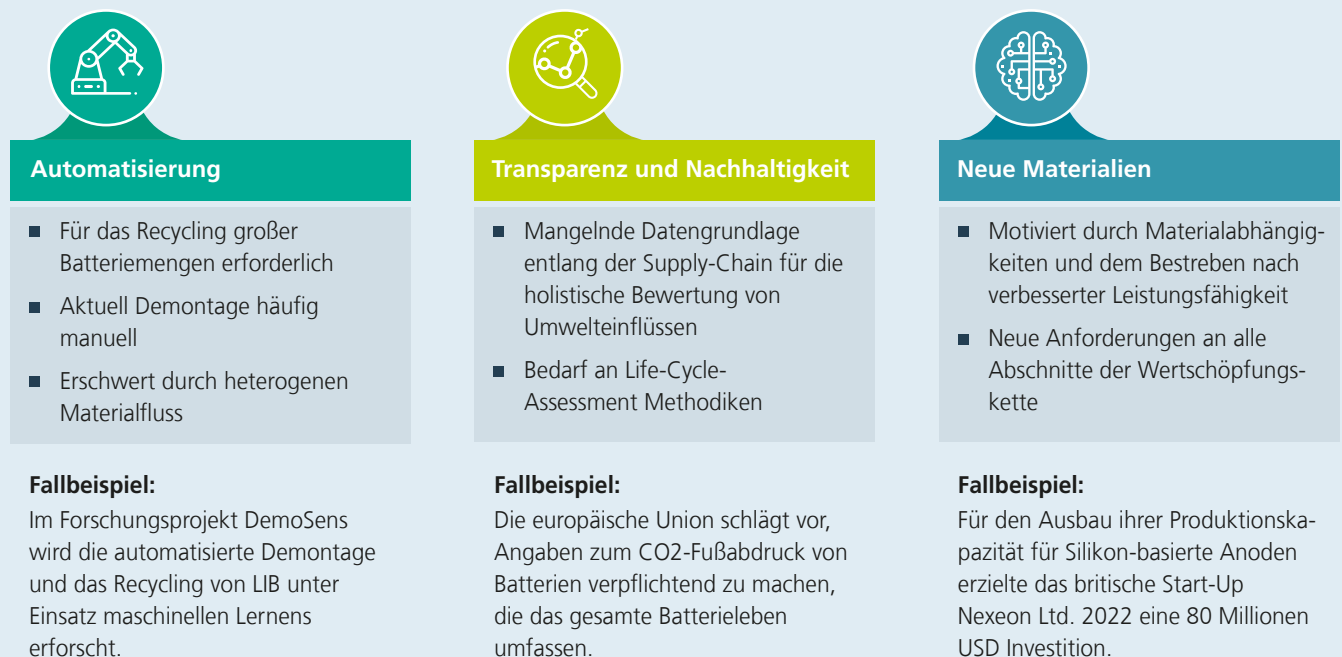
Aktuelle Herausforderungen und Forschungspotenziale

Unternehmen der Rohstoffgewinnung sehen sich hohen Investitionskosten für Explorations- und Minenprojekte sowie unsicheren Erfolgsaussichten gegenüber. Recyclingunternehmen wiederum können kaum auf etablierte Geschäftsmodelle zurückgreifen, während fehlende Standards und zumindest übergangsweise heterogene Materialflüsse effiziente Recyclingprozesse erschweren. Es mangelt an homogenisierten, abgestimmten Systemen und einheitlichen Kennzeichnungen.

Aus ökologischer Perspektive sind die Umwelteinflüsse von Förder-, Verarbeitungs-, und Recyclingprozessen sowie der hohe Importanteil von besonderer Bedeutung. Die

Auswirkungen der Prozesse auf die Umwelt verstärken den bereits aus wirtschaftlicher Perspektive festgehaltenen Forschungsbedarf im Hinblick auf Prozessentwicklung und -optimierung. So bedarf es holistischer, material- und energieeffizienter Prozesse mit geringer Umweltbelastung bei gleichzeitig hoher Wiedergewinnung der Materialien. Nicht zuletzt erschwert der Mangel an etablierten Methodiken und Datengrundlagen die Beurteilung von Umwelteinflüssen. Dies trifft in besonderem Maße bei importierten Gütern zu. Ein wichtiger Faktor kann hierbei die durchgängige Nachverfolgbarkeit und Transparenz (Traceability), z. B. im Sinne eines „battery passports“ sein. Zero-Waste Recycling droht ansonsten an mangelnder Transparenz zu scheitern. Mögliche Ansatzpunkte sind die Erforschung von Life-Cycle-Assessment Methodiken, um auch bei hohem Importanteil Transparenz sicherzustellen und die Importabhängigkeit zu reduzieren.

Abbildung 6: Automatisierung, Transparenz und Nachhaltigkeit, sowie "künstliche Intelligenz" -> "neue Materialien" als Entwicklungs- und Forschungsthemen [30–33]



4. Maschinen- & Anlagenbau und Messtechnik

Die Branche des Maschinen- und Anlagenbaus, sowie ihre verbundenen Partnerbranchen der Mess-, Digitalisierungs- und Automatisierungstechnik bilden einen zentralen Baustein für den nachhaltigen Erfolg der Batteriezellfertigung in Europa.

Zur Realisierung einer kosteneffizienten Produktion ist das branchenübergreifende Zusammenspiel einzelner Akteure im Sinne von kooperativen Arbeiten an individuellen Problemlösungen der Zellfertigung zielführend und konnte bereits in der Vergangenheit als eine große Stärke der lokalen Industrieland-schaft identifiziert werden.

Mit Blick auf die Kostenstruktur von Li-Ionen Batteriezellen wird deutlich, dass der überwiegende Anteil (ca. 70 %) von Materialkosten bestimmt wird [34]. Entsprechende Bemühungen in Form technologischer Innovationen mit dem Ziel einer fortschrittlichen Prozessierung zur Erhöhung der Ausbeuten sowie der Energie- und Ressourceneffizienz können die lokalen Mehrkosten kompensieren und zusätzlich eine globale Wettbewerbsfähigkeit sichern.

4.1. Industriestruktur in Europa

In Abbildung 7 wird ein Überblick von in Europa ansässigen Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus im Bereich der Batteriezellfertigung dargestellt. Auffällig ist die Konzentration entsprechender Zulieferer für Fertigungsmaschinen aus dem mitteleuropäischen Raum. Insbesondere in Deutschland sind bereits eine Vielzahl Unternehmen entlang der Prozesskette der Zellfertigung aktiv.

Grundsätzlich ist Anlagentechnik aus europäischer Fertigung für alle bestehenden Prozessschritte der Fertigung von Lithium-Ionen Zellen nach dem Stand der Technik verfügbar [35]. Die Kompetenzen reichen dabei von Kernprozessen der LIB-Produktion wie der Misch- und Beschichtungstechnik, über Trocknungstechnik, Präzisionswalzen, Schneiden, Stapeln und Wickeln bis hin zu übergeordneten Technologien wie Intralogistik, Automation und Robotik. Durch die ausgeprägte Innovationskraft des europäischen Maschinen- und Anlagenbaus haben diese das Potential auch für das Aktivitätsfeld der Batteriezellfertigung bedarfsgerechte und wettbewerbsfähige Lösungen anzubieten und auch global langfristig am Markt präsent zu sein.

Ausgeprägtes Vorwissen kann der hiesige Maschinen- und Anlagenbau auch durch technische Lösungen der Automatisierung,

Abbildung 7: Übersicht von Unternehmen des Maschinen- und Anlagenbaus

Fallbeispiele

-  Das schwedische Unternehmen **Munters** bedient neben einer Vielzahl anderer Branchen auch die Batterie-zellfertigung mit **Trocken-raumtechnologien**.
-  In der Kalandriertechnologien-forschung ist die **Breyer GmbH Maschinenfabrik** mit Akteuren der F&E Landschaft in den Projekten **PERfektZell** und **Tropex** involviert.
-  Die **Manz AG** als einer der wenigen deutschen Anbieter von **Assemblierungsanlagen für gestapelte Zellen** beliefert auch den britischen Zellhersteller **Britishvolt**.

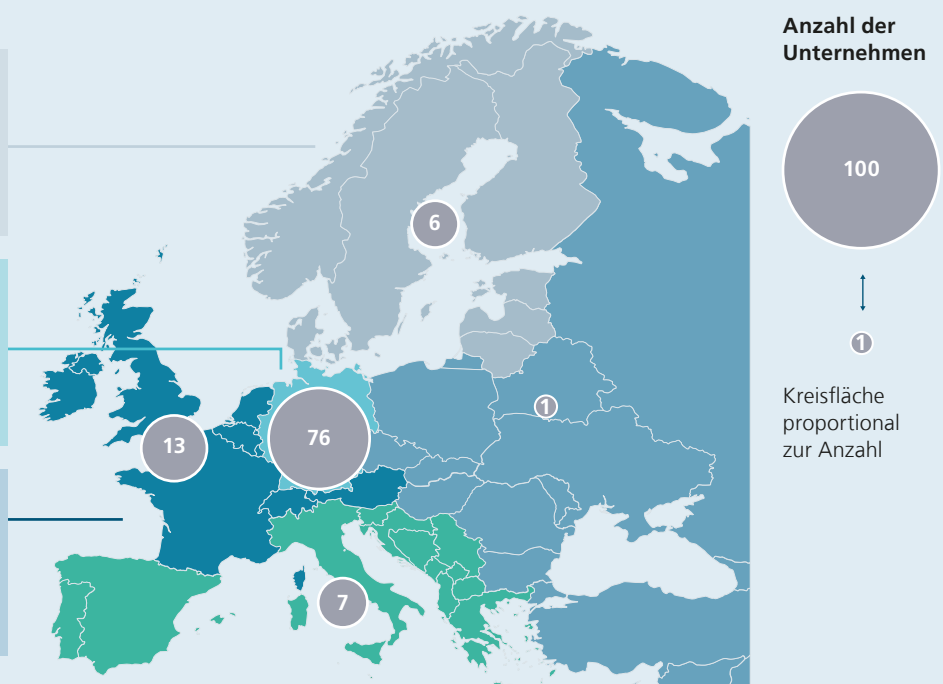
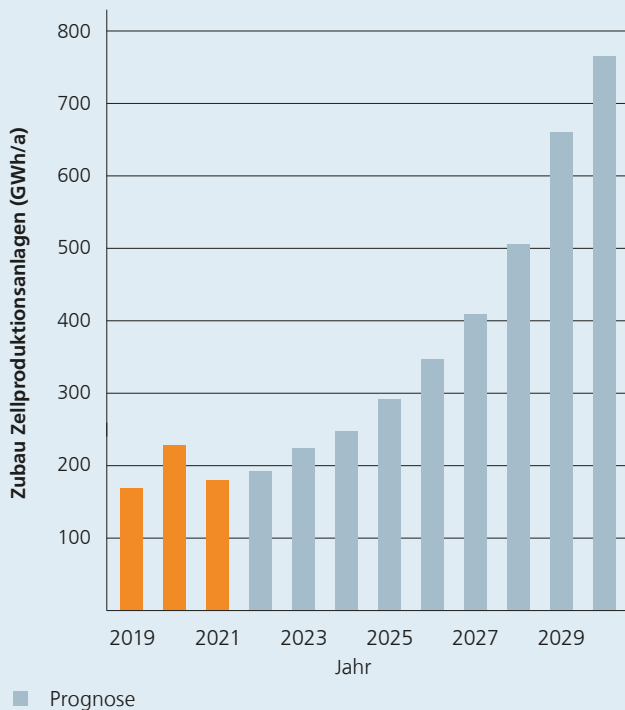
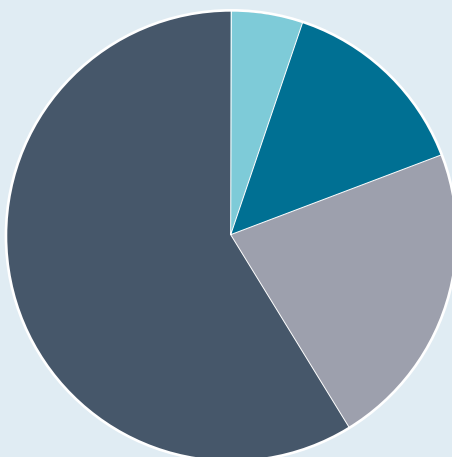


Abbildung 8: Globaler Markt für Maschinen und Anlagen und Unternehmensstruktur der Branche der Maschinen- und Anlagenbauer

Globaler Markt für Zellproduktionsanlagen in GWh-Kapazität



Segmentierung nach Größe (nach MA-Anzahl und Umsatz)



- Kleinstunternehmen (< 2 Mio €, 1–9 MA)
- Kleinstunternehmen (2 ≤ X < 10 Mio €, 10–49 MA)
- Mittelgroße Unternehmen (10 ≤ X < 50 Mio €, 50–249 MA)
- Nicht KMUs (≥ 50 Mio €, ≥ 250 MA)

Grenzwerte in Klammern. Falls ein Unternehmen eine der beiden Grenzen überschreitet, findet die entsprechend höhere Einstufung Anwendung.

Vernetzung und Produktionsperipherie einbringen. Zudem besteht die Möglichkeit durch Vorerfahrungen aus technologischen Problemlösungen anderer Branchen, wie der Solar- oder Halbleiterindustrie, innovative Prozesse und Produktionsumgebungen für die Batteriezellfertigung zu entwickeln.

Die Präsenz ist durch das breite Vorwissen aus der Automobilindustrie, der stark vernetzten Zuliefererindustrie sowie aus anderen, teils verwandten Prozessindustrien zu erklären. Insbesondere kommt dem europäischen Maschinen- und Anlagenbau die jahrzehntelange Erfahrung aus Zulieferergeschäften zu regional ansässigen OEMs und anderen Branchen zugute. So kann ein gegenseitiges Verständnis von betrieblichen Abläufen, Anforderungen an Qualitätssicherung, Standardisierung und Zertifizierung einen Vorteil zur Zusammenarbeit darstellen.

Aktuelle Analysen, sowohl zur Nachfrage von Fertigungsequipment als auch zur entsprechenden Marktgröße prognostizieren einen steigenden, an die Entwicklung der globalen LIB Nachfrage orientierten Trend (siehe Abbildung 8) [36]. Derzeit werden die größten Umsatzvolumina zur Deckung der Nachfrage an Anlagentechnik in China, Korea und Japan erwirtschaftet. Dennoch bieten aktuelle regulatorische Entwicklungen hin zu Nachhaltigkeitsauflagen ein Wachstumspotential durch Erschließung größerer Marktanteile für Akteure mit innovativen Lösungen.

Kleine und mittelgroße Unternehmen sind als Zulieferer von Maschinen und Anlagen für die Li-Ionen Batteriezellfertigung im deutschen Raum, gemessen an ihrer Anzahl, von eher untergeordneter Bedeutung (<50 %) (siehe Abbildung 8). Die Bereitstellung von Produkten zur Batteriezellfertigung stellt für viele Unternehmen einen neuen Geschäftsbereich dar. Es besteht oftmals der Bedarf hoher Investitionen in Entwicklungstätigkeiten, um einen erfolgreichen Markteinstieg zu realisieren. Sowohl die hohe Kapitalintensität von Entwicklungsarbeiten als auch das Risiko technischer und wirtschaftlicher Rückschläge können ggf. von größeren Unternehmen besser abgepuffert werden. Dieser Effekt könnte die Verteilung erklären.

Die Anknüpfung der Branche des Maschinen- und Anlagenbaus der Batteriezellfertigung an Forschungseinrichtungen ist u. a. durch eine Vielzahl von bilateralen und öffentlich geförderten Projektkooperationen gegeben. Im Überblick der Gesamtheit an nationalen, öffentlich geförderten Projekten zum Thema der Forschung zur Batteriezellfertigung lassen sich einige zentrale Schlüsselakteure sowohl aus dem F&E-Bereich (z. B. die TU Braunschweig, das ZSW, die TU München oder die RWTH Aachen) als auch auf Seiten der Industrie erkennen (z. B. die Manz AG, die Saueressig GmbH & Co. KG, thyssenkrupp systems engineering und die Siemens AG) [37]. Die starke Verflechtung von Akteuren der öffentlichen Forschung mit Industrieunternehmen des M&A demonstriert die Anknüpfungsfähigkeit öffentlicher Forschungsarbeiten und die generelle Transferfähigkeit beforschter Technologien.

4.2. Innovationen und aktuelle Entwicklungen

Prozessinnovationen verändern die etablierte Prozesskette zur Fertigung von Lithium-Ionen Zellen und bieten Chancen für die Erschließung neuer Geschäftsfelder für bestehende, bereits im Feld der Batteriezellfertigung aktive Unternehmen aber auch für neu entstehende (Start-Ups) oder bislang branchenfremde Akteure. Es ist zu beobachten, dass die angebotenen anlagentechnischen Produkte zur Elektrodenfertigung sehr viel spezifischer auf die einzelnen Prozessschritte zugeschnitten sind, während für die Zellassemblierung und das -finishing in erster Linie „Gesamtpakete“ in Form von Teillinien als Systeme angeboten werden. Dies lässt sich mitunter mit der unterschiedlichen Prozessführung der Elektrodenfertigung erklären. Der Mischprozess wird nach aktuellem Stand im Batch-Verfahren betrieben und das Entfernen der Restfeuchte aus den Elektroden geschieht durch Einlagerung in Vakuumöfen. Die Zwischenschritte vom Beschichten bis zum Kalandern finden im Rolle-zu-Rolle Prozess statt, ermöglichen dadurch eine zusammenhängende Linie als Produkt, sind jedoch bereits so standardisiert, dass eine modularisierte Betriebsweise aus Maschinen unterschiedlicher Anbieter betriebsfähig ist. Ab den Schritten der Zellassemblierung wird die Spezifizierung der Anlagentechnik auf die Bedarfe der Zellen deutlich erhöht.

Der Erwerb von Teillinien wird aktuell bevorzugt, da das Risiko eines nicht funktionsfähigen Zusammenspiels der Einzelanlagen dann nicht beim Zellhersteller liegt. Das Zellfinishing wird aus ähnlichen Gründen generell auch als Teillinie angeboten. Gerade die für unterschiedliche Zellchemien zum Einsatz kommenden Zyklisierungsprogramme sind Kern-Know-How von Anbietern und sorgen (noch) dafür, dass Produktbündelung (Maschine und Know-How) beim Erwerb entsprechender Anlagen geläufig ist. [38]

Als ein vielversprechender Weg zur Erhöhung der Prozesskontrolle, der Ausschussreduktion und der Nachverfolgbarkeit in Fertigungslinien von Batteriezellherstellern gilt die Integration von Inline-Messtechnik. Entlang des Fertigungsprozesses kommen je nach Beschaffenheit des Halbzeuges und der kritischen Fehlertypen und -ausprägungen unterschiedliche Messverfahren zum Einsatz (siehe Abbildung 9). Kritische Eigenschaften der Elektrodenpaste werden im Mischprozess durch die Viskosität, die Partikelbeschaffenheit (z.B. Größenverteilung und Morphologie) und die Homogenität abgebildet. Verfahren zur Messung der rheologischen Eigenschaften und Dichte, sowie Verfahren zur Abbildung strahlenbasierten Reflexionsverhaltens können hier zum Einsatz kommen. Für die Prozessierung ab dem Beschichten bieten sich primär Verfahren der optischen Inspektion zur Identifikation von Inhomogenitäten der Beschichtung sowie Verfahren zur Abstandsmessung an, um Schichtdicken zu beobachten. Auch die Beobachtung der Temperaturverteilung durch Wärmebildkameras kann einen Hinweis auf Fehler durch ungleichmäßigen

Abbildung 9: Übersicht zu messtechnischen Verfahren entlang des Fertigungsprozesses von Lithium-Ionen-Batterien



Energieeintrag im Trocknungsprozess geben. Unter Berücksichtigung, dass die Prozessschritte der Zellassemblierung in der Regel in Trockenraumatmosphäre stattfinden, werden zur Überwachung der Prozessumgebung zwingend Sensoren zur Ermittlung des Taupunkts / der Restfeuchtigkeit benötigt. Während der Stapel-/Wickelprozesse können Verfahren der optischen Bildprüfung Fehler bzgl. der Positioniergenauigkeit identifizieren. Nach der Einhausung bieten inline-fähige, röntgenbasierte Verfahren Möglichkeiten ein eventuelles Verrutschen des Zellstapels/-wickels zu erkennen. Im Zuge der Elektrolytbefüllung können zur Identifikation des Benetzungsgrads Ultraschall-basierte Messmethoden und zur Dichtheitsprüfung Helium-Prüfung in der Vakuumkammer zum Einsatz kommen. Neben der weiteren optischen Inspektion der nun versiegelten Zellen auf mögliche Fremdpartikel, kommen beim Zellfinishing elektronische Messmethoden wie die elektrochemische Impedanzspektroskopie oder die indirekte CV-Selbstentladungsmessung zum Einsatz.

Insgesamt lassen sich aus Ankündigungen und Pressemitteilungen der jüngeren Zeit Wachstumsstrategien der Branche erkennen [39]. Es ist generell ein Trend des Zusammenführens von Know-How und der Integration technologischer Kompetenzen zu beobachten. Zielsetzung dieser Bemühungen ist vermutlich das Heben von Synergien und die Stärkung der jeweiligen Positionierung auf dem globalen Markt der Batteriezellfertigung. Ausprägungen dieses zielgerichteten Zusammenführens liegen in horizontaler Integration, z. B. in kooperativer Arbeit von Maschinen- und Anlagenbauern, als auch in vertikaler Integration, z. B. durch die strategische Partnerschaft von Maschinen- und Anlagenbauern und Zellherstellern. Die Integration von wertvollem Know-How wird neben einer kooperativen Arbeitsweise auch durch die Übernahme - den Kauf von Unternehmen realisiert.

Um Reproduzierbarkeit der Zellfertigung zu gewährleisten, sowie um gegenseitige Kosten- und Risikoreduktion umzusetzen, entstehen unternehmerische Bindungen zwischen Maschinen und Anlagenbauern und Zellherstellern. Volkswagen plant zur Belieferung der konzerneigenen Fahrzeugfertigung derzeit sechs Batteriezellfabriken in Europa [40]. Als Hauptlieferant für die Ausstattung der Zellfabriken benannte VW den chinesischen Maschinen- und Anlagenbauer Wuxi Lead [41]. Den Startpunkt der Zusammenarbeit bildet die Belieferung des Werks im niedersächsischen Salzgitter. Dieses soll mit entsprechender Anlagentechnik zu den Prozessschritten Kalandrieren, Vakuumtrocknen, Zellassemblierung, Elektrolytbefüllung, Backen der Zellen, Formierung und Alterung sowie für die gesamte Linienlogistik von dem chinesischen Unternehmen ausgestattet werden. An anderer Stelle scheint das Unternehmen jedoch auch den Schulterschluss zu deutschen Technologieanbietern zu suchen. Als Beispiel für eine vertikale Integration des Maschinen- und Anlagenbaus in Richtung der Zellfertiger kann die angekündigte Gründung eines

Joint-Ventures mit Bosch genannt werden, welches das Ziel hat Anlagentechnik für die Batterieherstellung zu entwickeln und anzubieten. Entsprechend der gemeinsamen Zielsetzung planen die Unternehmen die weitere Industrialisierung der Batterietechnologie durch Zulieferung von Anlagentechnik an Zellhersteller und Unterstützung bei Ramp-Up und Wartung [42].

Der britische Zellhersteller Britishvolt verfolgt bei der Anlagenbeschaffung einen anderen Weg und setzt für die Realisierung des Mischprozesses in der ersten Gigafabrik in Northumberland auf den schweizerischen Anlagenbauer Bühler und somit auf europäische Technologie [43]. Für die Ausstattung des Vakuumprozesses hat sich der Zellhersteller für den deutschen Maschinenbauer PINK Thermosysteme entschieden, bei der Assemblierung für Manz [44].

Als weiteres Beispiel einer strategischen Unternehmenskooperation im Sinne einer vertikalen Integration ist die mit 40-prozentige Beteiligung des Maschinenbau-Unternehmens Manz aus Reutlingen am Batteriezellenentwickler und -hersteller Customcells zu nennen [45]. Die Kooperation der beiden Unternehmen erfolgt mit dem Ziel der Erprobung und Qualifizierung von Prozessen und Anlagen im direkten Einsatz. Währenddessen hat die Daimler Truck AG eine Beteiligung an der Manz AG mitgeteilt. Die mit der Beteiligung verbundene Kapitalerhöhung von 30,6 Millionen Euro soll zum weiteren Wachstum von Manz beizutragen [46]. Ein Beispiel einer Unternehmenskooperation zur horizontalen Integration wurde auf dem Aktivitätsfeld des Zellfinishings bekannt. So wollen die Unternehmen Digatron und Safion künftig für Entwicklungs- und Produktionsvorhaben kollaborieren, um zielgerichtet bestehende Kompetenzen zu bündeln [47]. Die Integration von kritischem Know-How der Batteriezellfertigung kann neben der Nutzung kooperativer Arbeitsmodi auch durch strategische Unternehmensakquisitionen erfolgen. Die US-amerikanische Matthews International Corporation baute ihre Position durch die Akquise weiterer deutscher Unternehmen OLBRICH und R+S Automotive nach der Übernahme von Saueressig auf dem Feld der Kalandriertechnik aus [48]. Der Zellhersteller und OEM Tesla übernahm die Unternehmen Maxwell Technologies, die aus der Branche der SuperCaps stammen und einen innovativen Prozess der Trockenbeschichtung in das Unternehmen einbrachten, sowie Hibar Systems für ihr umfassendes Know-How zum kritischen Schritt der Elektrolytbefüllung [49]. Die deutschen Unternehmen Manz, Grob-Werke und Dürr haben eine Allianz mit dem Ziel eines umfassenden Anlagenangebots für die Zellfertigung geschlossen [76].

Zur Realisierung eines erleichterten Zugangs zum europäischen Markt der Lithium-Ionen Batteriezellfertigung setzen verstärkt asiatische Maschinen- und Anlagenbauer entweder auf direkte lokale Vertriebsbüros oder auf die Unterstützung von Netzwerkorganisationen und Handelspartnern. Als Beispiele sind

hier einerseits die "korea trade-investment promotion agency" KOTRA für den Vertrieb von koreanischer Anlagentechnik, sowie die "Itochu Deutschland GmbH" für einen Kontakt zu japanischen Anlagenbauern zu nennen.

4.3. F&E-Herausforderungen

Mit Blick auf die Bedürfnisse von technologischer Performance, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit, findet sich an ausgewählten Stellen im Produktionsprozess der Batteriezellfertigung ein starker Bedarf an Innovationen.

Um Maschinen und Anlagen zu einem konkurrenzfähigen Preis und mit attraktiver Leistung für die Zellfertigung bereitzustellen, müssen sowohl die Investitionskosten als auch die anfallenden Kosten im Betrieb durch innovative Entwicklungsarbeit vom Anlagenhersteller abgesenkt werden. Ein geringerer Anlagenfootprint (Fläche und CO₂), eine Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz (z. B. durch Einsatz effizienter Qualitätssicherung oder reduziertem Energie- / Hilfsstoffbedarf) und ein gesteigerter Durchsatz tragen zu geringeren Betriebskosten der Zellhersteller bei und sind daher ein Kaufargument für die entsprechende Anlagentechnik. Der zunehmende Einsatz von Inline-Messtechnik und Digitalisierungs- / Automatisierungstechnologien kann Maschinen- und Anlagenbauern neben der Realisierung einer verbesserten Qualitätssicherung und optimierten Prozessabläufen außerdem eine Verbesserung der Integrationsfähigkeit innovativer Prozesstechnologien bieten.

Konkrete F&E-Herausforderungen zu denen sowohl Akteure aus öffentlicher Forschung als auch des Maschinen- und Anlagenbaus konkrete Problemlösungen entlang der Prozesskette der Li-Ionen Batteriezellfertigung erarbeiten, werden nachfolgend beschrieben:

Prozessinnovationen zur Senkung des Energieverbrauchs

Um dem hohen Energieverbrauch der momentan in der Elektrodenfertigung genutzten Konvektionstrocknung entgegenzuwirken, finden technologische Entwicklungen mit dem Ziel der erhöhten Feststoffgehalte (>90 %) bis hin zu gänzlich trockener Prozessierung von Materialien statt. Durch die Reduktion von zu verdampfendem Lösungsmittel wird sowohl der notwendige Energieeintrag im Prozess als auch der entsprechende Anlagenfootprint drastisch abgesenkt. Forschungsarbeiten

finden z. B. in den Projekten des Kompetenzclusters ProZell statt. Auch wurden bereits industrielle Aktivitäten beispielsweise bei dem deutschen Batteriehersteller EAS Batteries GmbH (durch annähernd trockene Prozessierung im Extrusionsverfahren) und von dem amerikanischen Automobilhersteller Tesla (durch Nutzung und Weiterentwicklung des von Maxwell Technologies entwickelten Trockenbeschichtungsverfahrens) bekannt. Neben dem Trocknungsschritt nach dem Beschichten in der Elektrodenfertigung sind die Formierung und die Bereitstellung einer Trockenraumatmosphäre besonders energieintensive Prozesse in der Zellherstellung. Die Entwicklung und Erprobung von Konzepten zu Anlageneinhausungen, Schleusentechnik und Intralogistik können entscheidend zur Senkung des Energieverbrauchs beitragen.

Prozessinnovationen zur Optimierung von Fertigungsabläufen

Eine engere Verzahnung der Prozessschritte kann in der Elektrodenfertigung zur Erhöhung des Automatisierungsgrads und zur Reduzierung des entsprechenden Personalbedarfs beitragen. Da die Überführung der in der Regel im Batch-Prozess gemischten Elektrodenpaste in den Beschichter durch manuellen Eingriff erfolgt, sind Ansätze einer kontinuierlichen Prozessführung des Mischprozesses und eine Anlagenkopplung sowohl Entwicklungsgegenstand in F&E-Projekten als auch bereits in vorläufiger Form im industriellen Einsatz. Mit Blick auf die weiteren Prozessschritte der Assemblierung und des Finishings wird der zunehmende Einsatz von Robotik, Konzepte modularer Prozessierung und der Aufbau automatisierter Transportwege vorangetrieben. Starke Kompetenzen entstehen dazu aus öffentlicher Forschung u. a. in den Aktivitäten des Kompetenzclusters InZePro.

Prozessinnovationen zur Realisierung von Durchsatzerhöhungen

Durchsatzlimitationen bestehen momentan insbesondere in den Prozessschritten der Stapelbildung von Elektroden (v.a. Einzelblatt), der Elektrolytbefüllung (Benetzungszeit) sowie im Reifungsprozess (Identifikation unregelmäßigen Kapazitätsabfalls) der Zellen. Durch Entwicklungsarbeiten der kontinuierlichen Prozessführung in der Assemblierung und dem Einsatz innovativer und inline-fähiger Analytik zur Identifikation von Zelldefekten soll die Fertigungsgeschwindigkeit für diese kritischen Prozessschritte drastisch erhöht werden. Kontinuierliche Stapelbildung wird in Deutschland in mehreren geförderten Projekten beforscht. Weitere Entwicklungen zu einem vorgelagerten Laminationsschritt sowie fortschrittliche röntgenbasierte Monitoringmethoden können hier auf Systemebene Vorteile der Prozessstabilität bieten. Ultraschallmessverfahren, sowie das Roll-Pressing können vielversprechend für die

Durchsatzerhöhung im Prozessschritt der Elektrolytbefüllung sein. Innovative Mess- und Auswertungsmethoden der elektrochemischen Impedanzspektroskopie können zu beschleunigter Zellreifung beitragen. Ein generell verbessertes Prozessverständnis in der Zellassemblierung und dem -finishing sowie ihrer Produktionsperipherie können zur Fertigung kosteneffizienterer Maschinen und Anlagen führen und damit auch zur langfristigen Reduzierung von CapEx.

Neben den innovativen, technologischen Entwicklungsarbeiten des Maschinen- und Anlagenbaus zur Reduzierung der operativen Kosten einer Anlage, um ihre Attraktivität gegenüber Kunden aus der Zellfertigung zu erhöhen, stellt auch die Verringerung der internen Produktentwicklungskosten die Hersteller vor große Hindernisse. Bemühungen zur Standardisierung von Fertigungsanforderungen der Batteriezellfertigung, stärkere Regulatorik und Zertifizierungen Orientierungspunkte für den Maschinen- und Anlagenbau bieten. Der stärkere Einsatz von Prozessmodellierung leistet Hilfestellung zur flexibleren Auslegung von Anlagentechnik entsprechend den jeweiligen Kundenwünschen.

Probleme resultieren oftmals aus mangelnden Möglichkeiten der Validierung und Qualifizierung von innovativen Prozessen an realen Fertigungsbedingungen. Gemeinsame Arbeiten mit Entwicklungspartnern aus dem F&E-Umfeld, wie der Fraunhofer FFB, können hier eine wertvolle Hilfestellung bieten. Auch im Spannungsfeld zwischen kapazitiver Auslastung beim Bedienen des Bestandsmarktes und Gewährleistung der Anschlussfähigkeit zu Zukunftstechnologien, kann die Zusammenarbeit mit Entwicklungspartnern aus dem F&E-Umfeld für den Maschinenbau eine wertvolle Hilfestellung bieten.

5. Zellherstellung

Die Batteriezellherstellung stellt den entscheidenden Schritt bei der Umsetzung von Materialeigenschaften in anwendbare Produkte dar. Ausgehend von den Anwendungsanforderungen hinsichtlich Zellformat und –Größe sowie Leistungsfähigkeit und Kosten werden im Schritt der Zellherstellung die zuvor definierten Eigenschaften der Batteriezelle physisch umgesetzt. Das Design hinsichtlich thermischer und elektrischer Eigenschaften sowie häufig auch die exakte Auslegung auf das geplante Batteriesystem und die Anwendung, welche sich z. B. im Anschluss- und Kühlkonzept niederschlägt, werden somit maßgeblich auch durch die Fertigung bestimmt. In der Zellherstellung fließen mikroskopische Eigenschaften der Materialien und Elektrodenstruktur sowie die mechanischen und elektrochemischen Eigenschaften des fertigen Produkts zusammen.

In Europa ist die Nachfrage und damit auch die Ausrichtung vieler der entstehenden Zellfabriken durch den Automobilsektor bestimmt. Im weltweiten Vergleich nimmt die Automobilbranche in Europa ein hohes Gewicht ein. So lag der Marktanteil europäischer OEM bei BEV im Jahr 2021 mit etwas über einer Million verkaufter Fahrzeuge bei 22 % [50]. Zwar sind die Produktionsstätten europäischer OEM global verteilt, jedoch im Bereich der Elektromobilität aktuell noch stark auf Europa fokussiert. Dies hat in den letzten Jahren zu einer Vielzahl von Zellproduktionsprojekten im europäischen Raum geführt.

5.1. Industriestruktur in Europa

In Europa, insbesondere in Deutschland und Frankreich, existieren bereits seit vielen Jahren LIB-Zellhersteller mit dem Fokus auf Elektronik-, stationäre und Spezialanwendungen. In den letzten Jahren entstehen verstärkt Produktionseinrichtungen für Batterien für Elektrofahrzeuge. Die Produktionsskala der verschiedenen Zellhersteller ist entsprechend ihrer Zielmärkte sehr unterschiedlich. Die überwiegende Zahl der kleineren und mittleren Zellhersteller waren in den letzten Jahren mit einer Produktionsskala im Bereich um 100 MWh aktiv, dies entspricht der Marktgrößen der Endanwendungen im Bereich Elektronik (viele kleine Zellen), industrielle Spezialmaschinen (geringe Stückzahlen) oder anderen Anwendungen, die gegenüber der hohen Nachfrage aus der Elektromobilität eher als Nische angesehen werden können.

Die bis vor wenigen Jahren größten Anwendungsmärkte für LIB: Handys, Notebooks und andere Kommunikationsgeräte besitzen eine zur Elektromobilität vergleichbare Größe von vielen GWh pro Jahr, wurden jedoch von den europäischen

Abbildung 10: Übersicht von Unternehmen der Batteriezellfertigung mit Kapazitäten in GWh geordnet nach Herkunft des Unternehmens

Fallbeispiele



Northvolt ist europäischer Vorreiter mit 10 GWh an Produktion in 2022.



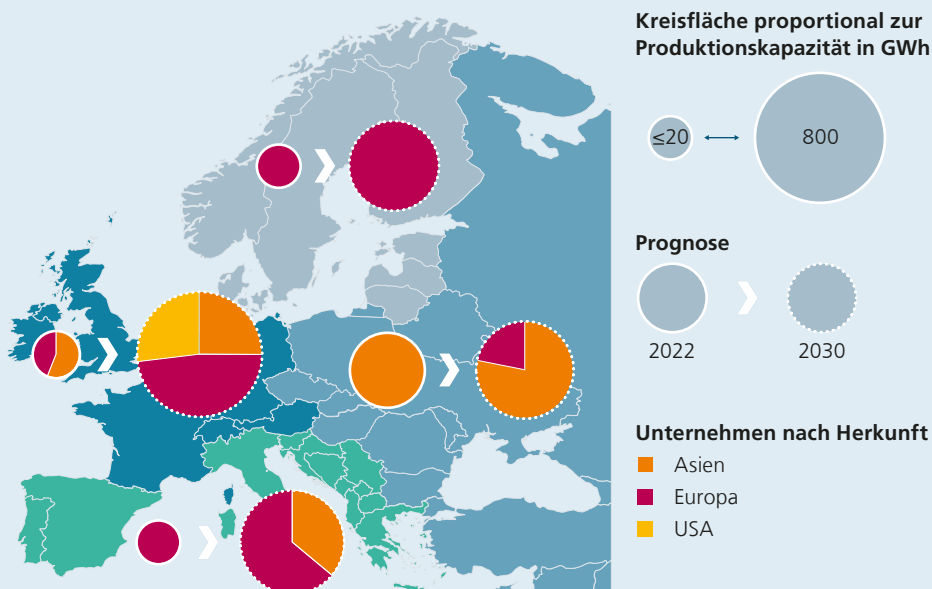
Tesla wird in seiner ersten Ausbaustufe in Europa mit 60 GWh p.a. starten.



Samsung SDI & LG Chem führen seit längerem Werke (30 und 35 GWh) in Europa.

Key-Facts

- In Europa sind bis **2030** insgesamt **1465 GWh** an Kapazität angekündigt, wovon aktuell nur 100 GWh in **Betrieb** sind.
- Mit **516 GWh** befindet sich 2030 ein großer Anteil in **Deutschland**.
- Hauptakteure im europäischen Markt sind **Automobilhersteller** sowie **europäische** und **asiatische Batteriezellenhersteller**.



Verteilt sich die angekündigte Kapazität für 2030 auf verschiedene Standorte und es liegen keine Informationen über die Aufteilung vor, wird diese grafisch zu gleichen Teilen auf verschiedene Regionen aufgeteilt.

Zellherstellern bislang nicht adressiert. Hier war und ist Asien alleiniger Hersteller.

In den letzten Jahren wurden die etablierten kleineren europäischen Hersteller durch größere Unternehmen oder Projekte ergänzt, welche Giga-Fabriken in Europa aufgebaut haben, die den Fokus ausschließlich auf die Produktion für Elektrofahrzeuge setzen. In Osteuropa haben sich die etablierten koreanischen Hersteller Samsung SDI, LG Energy Solutions und SK Innovation angesiedelt, welche dort im GWh-Maßstab produzieren. Diese Skala reflektiert einerseits die Kundenanforderungen aus dem Automobilbereich, welche mit wachsenden Elektromobilitätsmärkten auch größere Batterievolumina fordern und andererseits den Zusammenhang zwischen Produktionsskala und Produktkosten, welcher eine für den Automobilbereich wettbewerbsfähige Fertigung quasi nur noch bei Volumina jenseits von 10 GWh pro Jahr zulässt.

Im Jahr 2022 haben die Unternehmen Northvolt in Schweden und das chinesische CATL in Deutschland ihre Giga-Fertigungen in Betrieb genommen. Northvolt ist damit bislang noch das einzige europäische Unternehmen, welches auf dieser Skala produziert.

Andere europäische Konsortien und Unternehmen treiben aktuell ebenfalls den Aufbau und die Inbetriebnahme ihrer Fertigungen voran, sodass sich dieses Bild in den nächsten Jahren ändern dürfte. Der Hintergrund der unterschiedlichen Aktivitäten ist sehr divers. So finden sich darunter einige OEM-Beteiligungen mit folglich klaren Abnehmerzielen. So zum Beispiel Volkswagen und Partner oder ACC als Unternehmung zwischen den Konzernen Mercedes-Benz, Stellantis und Total. Neben den Argumenten der Lieferverfügbarkeit und stärkeren technologischen Mitgestaltung forcieren einige OEM diesen Schritt auch zur Ausweitung ihres Wertschöpfungsanteils und Beschäftigungspotenzials der Elektromobilität.

Auch unter den nicht-europäischen Zellherstellern finden sich bereits vorhandene Lieferbeziehungen mit OEM, so z. B. Tesla mit der zukünftigen Zellfertigung für die eigene EV Produktion oder CATL, Envision AESC, LGES, SDI und SKI mit Lieferbeziehungen zu z. B. Volkswagen, BMW, Mercedes-Benz, Renault, Stellantis, Volvo und anderen [51].

Neben diesen OEM-Beteiligungen finden sich weitere Aktivitäten neuer Zellhersteller, für welche noch keine klare Kundenzuordnung im Automobil- oder anderen Bereichen ersichtlich ist. Die Unternehmen sind häufig in Verbindung mit Technologiekompetenzen aus Forschungseinrichtungen entstanden oder treten mit dem Versprechen einer grünen Zellfertigung aufgrund der lokalen Verfügbarkeit regenerativer Energie, z. B. Nord-Europa, an. Die teilweise noch nicht offensichtlichen Lieferbeziehungen zu OEM, bzw. die teilweise klar formulierte Strategie zur Adressierung anderer Märkte, könnte die Chance

einer europäischen großskaligen Belieferung auch von Herstellern für z. B. stationäre Batteriespeicher und weitere mobile Anwendungen eröffnen.

Die kleineren, bereits seit mehreren Jahren produzierenden europäischen Unternehmen, sind in den genannten OEM-getriebenen, als auch in den kundenoffenen Initiativen insbesondere aufgrund ihrer Technologiekompetenz eingebunden, so z. B. Customcells im Joint-Venture CellForce Group mit Porsche, SAFT Batteries als Teil von ACC oder EAS Batteries, welche vom zukünftigen Zellfertiger Britishvolt übernommen wurden [52]. Varta, als langjährig operierender Zellhersteller, treibt die Skalierung der Fertigung auf Grundlage eigener Technologien voran.

Wenn alle als relativ sicher einzustufenden Ankündigungen, sowohl von europäischen als auch von außereuropäischen Akteuren, für 2022 für den Aufbau von Zellfertigungen umgesetzt werden, so könnte Europa insgesamt einen Anteil von knapp über 10 % an den globalen Zellproduktionskapazitäten erreichen. Im Jahr 2021 lag dieser Anteil noch bei etwa 7 % [51].

5.2. Innovationen und aktuelle Entwicklungen

Fortschritt der GigaFactory-Projekte

Durch das Aufkommen der Giga-Fertigungen in Europa, auch bekannt als „GigaFactories“, hat sich die Industriestruktur wesentlich verändert. Die Zellfabriken etablierter außereuropäischer Hersteller wurden dabei im Wesentlichen nach einem „copy and paste“ Prinzip nach der Blaupause existierender, insbesondere asiatischer Fertigungen aufgebaut. Sie gleichen diesen im grundsätzlichen Layout und den eingesetzten Technologien.

Viele der neuen europäischen Aktivitäten auf grüner Wiese sind ohne eine vergleichbare Schablone ins Rennen gegangen und besitzen somit einen großen Spielraum bezüglich des Produkt- und Fertigungskonzeptes. Als typisch hat sich jedoch die Vorgehensweise herausgestellt, mit der der Aufbau der Projekte durchgeführt wird. Die überwiegende Zahl der Projekte ist mit einem Zelldesign gestartet, auf dessen Grundlage eine Pilotfertigung aufgebaut wurde, oder welches zunächst an einer Pilotfertigung, z. B. einer kooperierenden Forschungseinrichtung, getestet wurde. Im Fall des bereits weit fortgeschrittenen Projekts Northvolt fand und findet dies im schwedischen Västerås statt. Die Unternehmen Blackstone, Britishvolt,

ElevenEs, Freyr, InoBat, Morrow, Phi4Tech, Vekor [53–58] und andere arbeiten zurzeit am Aufbau entsprechender Pilotfertigungen. Ziel der Pilotfertigungen ist die Darstellung der Fertigungskompetenz und die Schaffung einer Möglichkeit zur Zellbemusterung für Kunden.

Als wesentlicher Meilenstein kann die Auswahl und Erschließung eines Standorts für die Giga-Fertigung betrachtet werden. Diesen Punkt haben aktuell noch nicht alle angekündigten Aktivitäten erreicht. Die Giga-Fertigung selbst kann erst nach der Aufbau-, Hochlauf- und Optimierungsphase als erreicht angesehen werden, was typischerweise mehrere Jahre erfordert.

Der Fortschritt der unterschiedlichen Aktivitäten spiegelt sich auch im Volumen der aufgebrachten Finanzierung wider. Als typisch hat sich hier ein Rahmen von etwa 100 Mio. Euro erwiesen, welcher der Größenordnung der für den Aufbau einer Pilotfertigung oder eines Technologiezentrums nötigen Finanzierung entspricht. Eine Vielzahl der angekündigten europäischen Projekte befindet sich zurzeit in dieser Phase. Die jeweiligen Investoren kommen dabei aus unterschiedlichen Branchen. So finden sich sowohl zahlreiche Hedge-Fonds und Venture Capital Geber, als auch Industrieunternehmen aus den Bereichen Automobilherstellung und -zulieferung, Rohstoffe und Materialien, Anlagenbau, Energie bis hin zu Banken und klassischen Pensions- oder Versicherungsfonds unter ihnen.

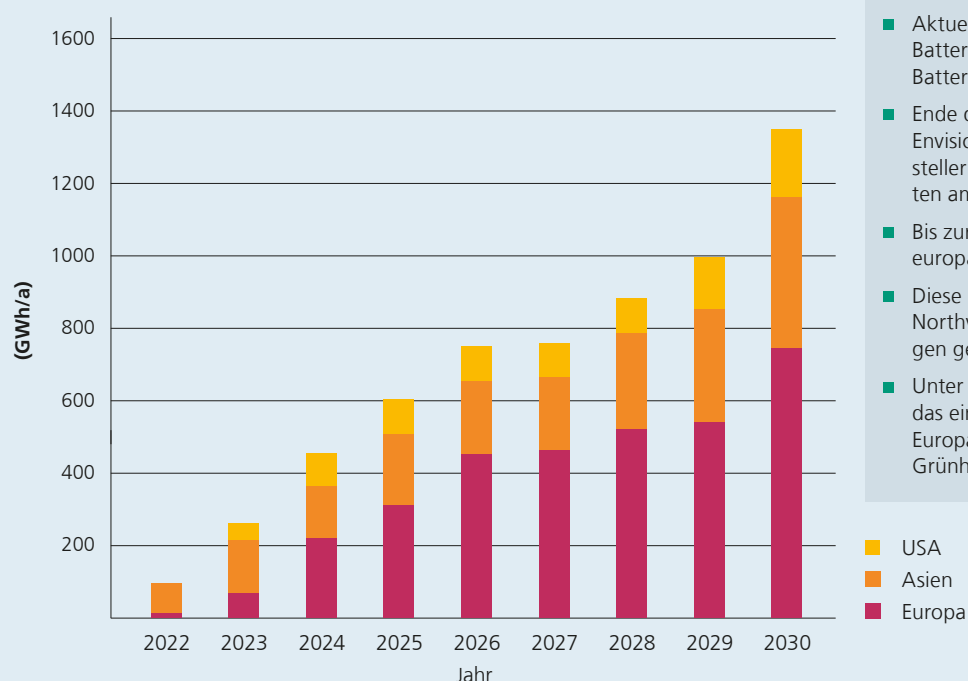
Meist steht gerade in der Anfangsphase ein größeres Konsortium mit mehreren Hauptkapitalgebern hinter den Produktionsprojekten. Nach erfolgreicher Validierung des Produkt- und Produktionskonzept schließt sich ein Kapitalbedarf an, welcher direkt mit der Größenordnung der geplanten Giga-Fertigung korreliert. Öffentlich verfügbaren Informationen zu Folge beläuft sich das durch das Unternehmen Northvolt bislang eingesammelte Kapital auf eine Größenordnung von 6 Mrd. Euro [59], das durch das Unternehmen Freyr eingesammelte Kapital auf etwa 1 Mrd. Euro [60]. Bei ungefähren Kosten von 100 Mio. Euro für den Aufbau einer Produktionskapazität von 1 GWh pro Jahr lassen sich folglich Kapazitäten im zweistelligen Bereich realisieren, bzw. wurden im Fall von Northvolt bereits realisiert.

Forschungszusammenarbeit und Förderung

Während die meisten europäischen Akteure die Kompetenz zur großskaligen Zellfertigung noch aufbauen müssen, liegen u. a. durch die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen bereits Erfahrungen mit den vorgelagerten Schritten des Zeldesigns und der Prototypenfertigung vor. So handelt es sich z. B. bei dem in Spanien tätigen Unternehmen Basquevolt um ein Spin-Off von CIC EnergiGUNE, einer seit vielen Jahren im Batteriebereich tätigen Einrichtung. Weitere Kooperationen

Abbildung 11: Prognostiziertes Wachstum der Batteriezellproduktionskapazitäten in Europa aufgeschlüsselt nach Herkunftsregion des Batteriezellherstellers.

Batteriezellproduktionskapazitäten



Key-Facts

- Aktuell sind asiatische (China, Korea, Japan) Batteriezellhersteller führend bei den Batteriezellproduktionskapazitäten in Europa
- Ende des Jahrzehnts werden CATL und Envision AESC die asiatischen Batteriezellhersteller mit den größten Produktionskapazitäten am europäischen Markt sein
- Bis zur Mitte der 2020er werden diese durch europäische Hersteller überholt werden
- Diese Entwicklung wird maßgeblich durch Northvolt, Freyr, Italtvolt, ACC und Volkswagen getrieben
- Unter Unternehmen aus den USA bleibt Tesla das einzige mit Produktionskapazitäten in Europa (bis zu 200 GWh sind am Standort Grünheide geplant)

bestehen z. B. zwischen Britishvolt und UK BIC, einer unter anderem durch die University of Warwick aufgebauten Zellfertigungseinrichtung. Auch unter etablierten Herstellern finden sich Beispiele für die F&E-Zusammenarbeit mit europäischen Forschungseinrichtungen, so z. B. zwischen CATL und dem Fraunhofer IKTS oder Volkswagen und der BLB Braunschweig.

Als wichtiges Instrument für die Förderung europäischer industrieller F&E-Vorhaben wurde durch die Europäische Kommission der "Batterie IPCEI" ins Leben gerufen [61]. Unter diesem Rahmen werden bei einer Gesamtförderung von etwa 6 Mrd. Euro über 50 Unternehmen aus 12 EU-Mitgliedsstaaten für Forschungsvorhaben auch hoher TRL gefördert. Ziel der Projekte ist häufig die Entwicklung und Pilotproduktion von Zellen neuester oder nächster Generation oder die Entwicklung "grüner" Produktionsprozesse. Fördervoraussetzung sind die Adressierung der durch die EU vorgegebenen wirtschaftspolitischen Ziele, die finanzielle Beteiligung durch die Unternehmen und zu erwartende Spill-over-Effekte in die Batterieindustrie. Unter den in der Zellfertigung aktiven Unternehmen finden sich im IPCEI Workstream "cells and modules" ACC, Cellforce, FAAM, InoBat, Northvolt und Varta und damit ein guter Teil der europäischen Unternehmen mit der Absicht zum Bau einer Giga-Fertigung [61].

Aufbau der gesamten Wertschöpfungskette

Für viele der genannten Initiativen besteht der nächste Schritt nun in der erfolgreichen Produktionsskalierung an den Standorten. Aufgrund des hohen finanziellen Bedarfs werden die nötigen Investitionen höchstwahrscheinlich nur Hand in Hand mit Lieferverträgen künftiger Kunden getätigt werden. Zumindest auf dem Papier scheint der für die kommenden Jahre prognostizierte LIB-Bedarf einen ausreichenden Markt für die Umsetzung aller europäischen Fertigungsprojekte zu bieten. Interessanterweise finden sich unter den erklärten zukünftigen Abnehmern der neuen Zellfertiger auch jenseits der Automobilbranche viele Unternehmen, z. B. aus den Bereichen öffentlicher Transport, Industrieanwendungen, stationäre Speicher oder Luftfahrt.

Ebenso gilt es aber auch die Versorgung mit den für die Fertigung nötigen Materialien, bzw. vorgelagert auch Rohstoffen sicherzustellen, was aufgrund der angespannten Rohstoffsituation und der vertraglichen Bindung vieler Rohstofflieferanten an etablierte Zellhersteller und OEM für (noch) kleinere, bzw. neue Abnehmer herausfordernd sein kann. Gleiches gilt für den Zugang zu Fachkräften für die Entwicklung und Fertigung. Der Bedarf nach qualifiziertem Personal wird gerade in Europa für die nächsten Jahre als extrem hoch eingeschätzt [62].

5.3. F&E-Herausforderungen

Im Zuge des Aufbaus der Giga-Fertigungen in Europa zeichnen sich Trends bzw. Schwerpunkte in Forschung und Entwicklung ab, die die europäischen Projekte von ihren internationalen Konkurrenten unterscheiden. Ein bestimmender Trend ist hierbei vor allem das Ziel, die gesamte Batteriezellproduktion Ressourceneffizient und CO₂-neutral zu gestalten. Neben den bereits beschriebenen kurzen Transportwegen zwischen Rohstoffgewinnung, -verarbeitung und -verwendung sowie dem Closed-Loop-Recycling der wichtigen Batterierohstoffe, ist vor allem die Senkung des Energiebedarfs der Batteriezellproduktion selbst eine große Herausforderung. Gemeinsam mit der Reduktion des Ausschusses und der verbesserten Ausnutzung der Anlagen kann darüber hinaus eine erhebliche Senkung der Produktionskosten erzielt werden. Die Herausforderungen bei der Ausschussreduktion umfassen insbesondere ein verbessertes Prozessverständnis sowie engmaschige Prozessüberwachung und Datenauswertung im Rahmen einer Digitalisierung der Produktion.

Energie- und ressourceneffiziente Produktion

Anlagenseitig wurden bereits in den Kapiteln 3 und 4 Ansätze zur Reduktion des Energiebedarfs diskutiert. Hierbei spielt insbesondere die Trocknung und Rückgewinnung des Lösungsmittels mit ca. 47 % des Gesamtenergiebedarfs der Produktion eine große Rolle, der mit effizienteren Trocknungsverfahren wie Lasertrocknen oder mit einer Reduktion des Lösungsmittels bis hin zum Trockenbeschichten begegnet wird. An zweiter Stelle folgt der Betrieb der Rein- und Trockenräume mit knapp 30 %. Zur Reduktion des Energiebedarfs der Rein- und Trockenräume geht der Trend vor allem dahin, nicht mehr eine gesamte Anlage in einen Rein- und Trockenraum zu stellen, sondern diese möglichst eng einzuhausen. Man spricht in diesem Zusammenhang oftmals von Mini- oder Micro-Environments. Das zu reinigende und zu entfeuchtende Luftvolumen wird hierdurch erheblich reduziert. Aufgrund hydrophiler Kathodenmaterialien ist die Sicherstellung einer kontinuierlichen Atmosphäre besonders qualitätsrelevant, weswegen vor allem Schleusen- und Transferprozesse bei der Entwicklung der Mini-Environments aktuell noch eine Herausforderung darstellen. Aufgrund der hohen Relevanz der Qualität und Sicherheit der Batteriezellen im Automobilsektor wird daher in Großserienfertigungen noch größtenteils auf den Einsatz solcher Anlagenkonzepte verzichtet.

Weitere Maßnahmen auf dem Weg zu einer CO₂-neutralen Batteriezellproduktion sind die Nutzung und Eigenproduktion von erneuerbaren Energiequellen sowie die möglichst lokale

Produktion der Vormaterialien. Einige Zellhersteller haben angekündigt ihre Materialien vor Ort und zu produzieren und hierbei auch auf recycelte Materialien zurückzugreifen [63,64]. Dies bietet gleichzeitig den Vorteil die Produktionsabfälle vor Ort aufzubereiten und in die Produktion zurückzuführen. Ziel ist es hierbei das Anfallen von Abfällen im Sinne einer "Zero Scrap Production" gänzlich zu vermeiden.

Ausschussreduktion und Digitalisierung der Produktion

Innerhalb des zweiten Themenkomplexes, der Reduktion des Ausschusses, existiert eine große Zahl eng zusammenhängender Verbesserungsansätze, die mit verbessertem Prozessverständnis, verstärkter Datenaufnahme und -auswertung sowie einer allgemeinen Digitalisierung der Produktion einhergehen. Die Herstellung von Batteriezellen wird daher zunehmend digitalisiert, um die Produktqualität zu verbessern und einen transparenteren und effizienteren Herstellungsprozess zu erreichen. Der Einsatz von Inline-Messtechnik zur Reduzierung von Ausschussraten und zur allgemeinen Erhöhung der Produktqualität knüpft direkt an die Entwicklungsarbeiten hin zu einer digitalisierten Produktion an und erfährt eine umfangreiche Förderung u. a. im neuen BMBF Kompetenzcluster InZePro. Je nach einzusetzender Messtechnologie und dem Grad ihrer Einbindung in den Gesamtfertigungsprozess, sind derzeit sehr unterschiedliche Entwicklungs- und Anwendungsfälle vorhanden. Entwicklungsgegenstände sind mitunter die Definition von Qualitätsparametern und Toleranzgrenzen für unterschiedliche Szenarien (z. B. Pilotanlagen), aber auch Standardisierungs- und Zertifizierungsbemühungen. Diese werden beispielsweise in Netzwerkverbünden (wie LiPlanet [65]) oder durch kollaborative Arbeiten zwischen Forschungsinstituten und Standardisierungsgremien (u. a. FFB und VDMA [66]) vorangetrieben. Als Vision wird eine digitalisierte, intelligente Prozessführung skizziert, bei der die Inline-Messtechnik kritische Daten aufnimmt und eine anschließende Verarbeitung sowie abschließende Rückkopplung an die Prozesssteuerung erfolgt.

Die Kombination von digitalen Zwillingen der Batteriezelle mit dem digitalen Fabrikbetrieb wird als vielversprechendste Maßnahme bewertet. Untersuchungen aus jüngerer Vergangenheit thematisieren die Anwendung des digitalen Fabrikbetriebs an beiden kritischen Prozessschritten der Elektrolytbefüllung, sowie der Formierung und kommen zu dem Schluss, dass eine optimierte Elektrolytbenetzung der Elektroden mit einem digitalen Zwilling beschrieben werden kann und somit ein tieferer Einblick in den Prozess ermöglicht wird [67]. Der Einsatz von vernetzten Dichtungen, Rohren, Ventilen und Verschleißmodellen ist eine Möglichkeit, eine vorausschauende Wartung („predictive maintenance“) zu realisieren. Im Bereich der Formierung kann eine Reduzierung der Kosten und Prozesszeiten erreicht werden, wenn digitale Zwillinge und ein digitaler Fabrikbetrieb

die Zellen sortieren und individuelle Formationsprotokolle verwenden können, um die Zellqualität zu verbessern und die Auslastung der Formationseinheiten zu erhöhen. Die Implementierung eines intelligenten Energiemanagementsystems und die Umstellung auf ein DC-Microgrid führt in beiden Prozessen zu Energie- und Kostenreduzierungen.

Neue Zellformate und -chemien

Eine weitere Herausforderung für die Zellhersteller ist der Grad der Flexibilisierung der Zellfabrik hinsichtlich der von den Kunden geforderten Zellformate. Bei der Auslegung der Batteriezellen selbst spielen zunächst zahlreiche Faktoren auf Anwendungsebene eine wichtige Rolle, z. B. beginnend bei dem zur Verfügung stehenden Bauraum in Fahrzeugen, über die Systemspannung, den Energiegehalt, die Zellchemie, die Schnellladefähigkeit, Sicherheit und Lebensdauer. Die genannten Parameter weisen darüber hinaus starke Interdependenzen auf. Die Abhängigkeiten steigen weiter mit der Zunahme der Zellgröße. Der allgemeine Trend im Fahrzeugbau geht durch Konzepte wie „Cell-to-Pack“ zu größeren Zellformaten. Von Seiten der Prozesskette, der Schnittstellen und der Anlagen in den Einzelschritten ist jedoch zumeist kein bis maximal ein enges Fenster des Flexibilitätskorridors des Zellformats gegeben, wenn die Produktionslinie geplant wird. Aufgrund dieser Herausforderungen geht der Trend daher eher zu einer Vereinheitlichung der Zellformate und die Varianz der unterschiedlichen Formate wird in den nächsten Jahren zurückgehen. Prominente Beispiele dafür sind Tesla mit der 4680 Rundzelle, VW mit seiner prismatischen Einheitszelle sowie BYD mit seiner Blade Battery, die bereits in Fahrzeugen des Konzerns zum Einsatz kommt und zukünftig auch an andere Fahrzeughersteller ausgeliefert werden soll [68-70].

Erhöhung des Produktionsdurchsatzes bezogen auf das Equipment

Zur Erfüllung von Kostenzielen, gerade im Automobilbereich, bestehen Entwicklungsbestrebungen zur Durchsatzerhöhung von Zellproduktionsanlagen. Besonders die Schritte der Formierung und der Reifung bzw. des Testlagerns benötigen im Gegensatz zu vorangegangenen Schritten vergleichsweise lange. Bei zunehmender Größe der Batteriezellen nehmen auch die Befüllung und die anschließende Benetzung mit dem Elektrolyten mehr Zeit in Anspruch. In Abschnitt 4.3 wurden hierzu bereits anlagenseitige Optimierungsmaßnahmen aufgeführt, wie die Einführung von In-line-Messungen.

Werden die Optimierungsmöglichkeiten auf Gesamtprozess-ebene betrachtet, bietet sich die Möglichkeit, die Benetzungszeit des Elektrolyten zu reduzieren. Im Allgemeinen wird die Benetzungszeit durch die Porosität der Aktivmaterialien, die

Eigenschaften des Separators sowie die Art und Größe des Zellstapels oder –wickels beeinflusst. Da eine Erhöhung der Porosität die Energiedichte der Zelle reduziert, kann beispielsweise eine Mikrostrukturierung durch Laserverfahren oder im Kalandrieren erfolgen. Weiterhin wird am Einsatz von Zwischenschichten in der Zelle geforscht, die die Benetzung beschleunigen. Zwischenschritte mit erhöhter Temperatur, HT-Aging genannt, die die Viskosität des Elektrolyten herabsetzen, sind inzwischen Stand der Technik. Die Herausforderung in der Elektrolytbefüllung liegt in der wirtschaftlichen Abwägung zwischen teureren Materialien, geringerer Energiedichte oder zusätzlichen Prozessschritten.

6. Innovationspfade an der Fraunhofer FFB

6.1. Die F&E Plattform der Fraunhofer FFB

Forschung und Entwicklung im »FFB Workspace« und an der »FFB PreFab«

Im »FFB Workspace« und der »FFB PreFab« stehen bereits heute, bzw. sollen ab 2023 Flächen und Anlagentechnik für auf Forschung und Entwicklung ausgerichtete Projekte zur Verfügung gestellt werden. Die Zellfertigungskapazität kann z. B. für die Musterzell- oder Elektrodenpilotproduktion in Losgrößen von 50 kWh bis etwa 1 MWh genutzt werden. Auf diese Art kann z. B. die Produktionskompatibilität neuer Materialien und Zellkonzepte untersucht werden und grundsätzliche Produktionsparameter ermittelt werden. Dies könnte z. B. Produktionsprozesse wie den Mischprozess sowie dessen Dauer oder die Elektrodentrocknung umfassen. Weiterhin ist die Qualifizierung von unterschiedlichen Messverfahren zur Ermittlung von Pasteneigenschaften, zur Bewertung der Beschichtungsoberfläche und zur Bestimmung von elektrochemischen Eigenschaften der Elektroden möglich. Neben neuen Zellchemien sollen an der »FFB PreFab« auch neue Zelldesigns und Geometrien produziert und erprobt werden können, z. B. um ein geeignetes Design für atmende Materialien wie Silizium oder Lithium zu finden. Diese könnten die Nutzung neuer Werkzeuge beim Stacking, Schweißen oder der Elektrolytbefüllung erfordern, welche an der »FFB PreFab« entwickelt werden können.

Ein zweiter Hauptfokus des Angebots an der »FFB PreFab« liegt auf der Entwicklung neuer Verfahrenstechnologien. Konkret soll die Fertigungslinie im Verlauf des Aufbaus der »FFB PreFab« bereits Möglichkeiten zur kontinuierlichen Herstellung von Slurries und zur Trockenbeschichtung von Elektroden erhalten. Diese Technologien weisen schon heute vergleichsweise hohe TRL auf. Um fortlaufend weitere Prozessinnovationen entwickeln und beforschen zu können, stehen an der »FFB PreFab« Innovationslabore und Innovationsflächen zur Verfügung. Diese bieten eine Realumgebung, z. B. mit konditionierter Trockenatmosphäre. Die Ergebnisse oder Zwischenprodukte der Innovationsbereiche können als Halbzeuge an der »FFB PreFab« zu Zellen weiterverarbeitet werden. Die »FFB PreFab« ist damit eine Entwicklungsumgebung insbesondere für den industriellen Maschinen- und Anlagenbau, aber auch eine Forschungs- und Demonstrationsumgebung für Materialhersteller und Zellfertiger.

Jenseits von Konzepten zu Lithium-Ionen-Batterien sollen in den Innovationslaboren der »FFB PreFab« verschiedene andere Forschungsschwerpunkte gesetzt werden. Mit dem Ziel der Steigerung von Energiedichten, Leistungsdichten, Sicherheit und Langlebigkeit künftiger Batteriezellen, wird der Einsatz

neuer Zellchemien und -materialien seit langem erforscht und verändert den technischen Stand permanent. Die Frage nach der Prozessierbarkeit dieser innovativen Zellkonzepte und -materialien ist von entscheidender Bedeutung für die Zukunftsfähigkeit bestehender Anlagen und Produktionslinien.

Ein Beispiel sind Natrium-Ionen-Batterien, welche zwar ein ähnliches Funktionsprinzip wie Lithium-Ionen-Batterien besitzen, jedoch von anderen Materialien (Aktivmaterialien, Elektrolyte) Gebrauch machen. Dies hat Implikationen auf den Herstellungsprozess, z. B. beim Materialhandling, der Prozessatmosphäre, dem Einsatz von Lösungsmitteln und nicht zuletzt bei der Zellformierung.

Auch Fortschritte bei der Lithium-Ionen-Technologie erfordern weitere Anpassungen in der Herstellung. Beim Verfahren der Präolithierung von Anoden wird durch eine externe Quelle bereits vor der Formierung Lithium eingebracht, um irreversiblen Lithiumverlusten, damit auch Kapazitätsverlusten, entgegenzuwirken. Dies kann insbesondere die Lebensdauer von Anoden mit einem hohen Anteil an elementarem Silizium erhöhen, da diese durch Volumenänderungen von bis zu 300 % bei der Zyklierung einer stärkeren Alterung ausgesetzt sind. Dieser Prozess erfordert Innovationen im Maschinen- und Anlagenbau, da entweder eine elektrochemische Vorbehandlung oder das Handling größerer Mengen an metallischem Lithium oder stabilisiertem Lithium Metallpulver (SLMP) nötig wäre.

Die nächste Generation an elektrochemischen Energiespeichern könnten Festkörperbatterien darstellen. In diesem Anwendungsfeld gibt es viele Bedarfe und Ankündigungen von OEMs und Start-Ups, jedoch fehlt es aktuell noch an einer finalen Auswahl der Technologie für automobilen Anwendungen sowie an hochskalierten Fertigungen. Übergreifende Implikationen der Festkörperbatterien lassen sich zum einen für die Produktionsumgebung ableiten. Sowohl die angestrebte Verwendung von metallischem Lithium als Anodenmaterial, als auch die Verwendung einiger Elektrolyt-Klassen (vor allem sulfidische Elektrolyte), setzen in der Elektrodenfertigung sehr hohe Anforderungen an die Trockenraum-Atmosphären, bis hin zu einer Inertgas-Umgebung, um Produktqualität und Sicherheit der Arbeitsumgebung zu gewährleisten. Für die Prozessierung von metallischem Lithium gibt es verschiedene Ansätze, zu denen Direktwalzen, Extrusion, oder Beschichtung von geschmolzenem Lithium gehören. Zum anderen haben Festkörperbatterien einen großen Einfluss auf Assemblierung und das Zelldesign. Nach aktuellem Stand müssen mehrlagige Zellen laminiert und über Einzelblatt-Stapelverfahren gestapelt werden. Da diese Prozesse noch nicht dem Stand der Technik entsprechen, kann die Assemblierung zu einem entscheidenden Bottleneck werden. Zu den genannten, aber auch weiteren Themen, sollen an der »FFB PreFab« Entwicklungsmöglichkeiten aufgebaut werden und im Rahmen eigener Forschungsprojekte, aber auch als Angebot für externe Partner verfolgt werden.

Skalierung und Produktion an der »FFB Fab«

In der »FFB Fab« sollen automatisierte Produktionslinien auf industrieller Skala zur Verfügung gestellt werden, mit denen u. a. Fertigungskampagnen für Musterzellen oder Elektroden in Kleinserie, z. B. von 500 kWh bis über 10 MWh, möglich sind. Auf diese Art können Fragen der Produktionsskalierung untersucht werden, das Volumen der Zellfertigung lässt aber auch die Kopplung mit nachfolgenden Anwendungsprojekten zu.

Die Anforderungen der industriellen Produktion stellen alle beteiligten Industriebranchen, von der Material- und Komponentenherstellung über den Maschinen- und Anlagenbau bis hin zur Zellfertigung, vor Herausforderungen. Das Erreichen niedriger Produktionskosten ist an die stetige Steigerung des Durchsatzes gekoppelt. Hohe Prozessgeschwindigkeiten wiederum erschweren die Kontrolle und Einhaltung einer hohen Qualität. An den Anlagen der »FFB Fab« können diese Abhängigkeiten untersucht und optimiert werden. Dazu können unterschiedliche, wie zum Beispiel Aktivmaterialien, Separatoren und Stromableiterfolien eingebracht werden und auf ihr Verhalten bei hohem Durchsatz untersucht werden. Auch die Erprobung neuer in-line Messtechnik ist an der »FFB Fab« möglich. Dies betrifft z. B. schnelle und hochauflösende Bildgebungsverfahren in der Elektrodenfertigung bei bis zu einer Geschwindigkeit von 80 m/min. Auch ganze Anlagen oder Anlagenteile sollen mittelfristig in die Linien der »FFB Fab« eingebracht und validiert werden können, um eine automatisierte Prozessverkettung zu demonstrieren.

Ein Beispiel für neue technologische Ansätze, die in der »FFB Fab« implementiert werden sollen, ist das Einkapseln von Anlagen in sogenannte Mini- oder Micro-Environments. Der Vorteil ist die Reduktion des Volumens, welche auf eine definierte Prozessatmosphäre konditioniert werden muss. Mini-Environments sind bereits heute Teil der laufenden Forschungsprojekte der Fraunhofer FFB. An der »FFB Fab« sollen alle drei hoch-automatisierten Linien in Mini-Environments eingekapselt werden. Dabei ist aktuell besonders die Konzeptionierung und Auslegung der Rundzelleassemblierung 21700 im Fokus. Die Mini-Environment Lösung soll hier als erstes ausgerollt werden. In diesem Punkt unterscheiden sich auch die Konzepte an »FFB Fab« und »FFB PreFab«. In der »FFB PreFab« sollen Forschungsaktivitäten mit hohem manuellem Eingriff ermöglicht werden, sodass eine Atmosphärenkonditionierung der gesamten umgebenden Raumluft vorgesehen ist.

An anderer Stelle ist jedoch gerade die einfache Übertragbarkeit von »FFB PreFab« auf »FFB Fab« vorgesehen. Der kontinuierliche Mischprozess der »FFB PreFab« ist einer der Technologien mit sehr hohem TRL und soll daher auch beim Aufbau der »FFB Fab« berücksichtigt werden. Andere Innovationen wie das Schneiden / Vereinzeln der Elektroden mittels Laser sollen kurzfristig für die Fertigungslinien der »FFB Fab« skaliert werden,

um hier das konventionelle mechanische (unflexible) Schneiden substituieren zu können. Auch alternative Trocknungstechnologien, bspw. die Infrarot-Trocknung, werden aktuell im Pilotmaßstab validiert. Es ist geplant, diese als Hybrid zur Konvektionstrocknung in der Fertigungslinie nutzbar zu machen und damit die Trocknertemperatur der Konvektionstrocknung und den damit verbundenen Energieaufwand deutlich reduzieren zu können.

Digitalisierung der Batterieentwicklung und -produktion

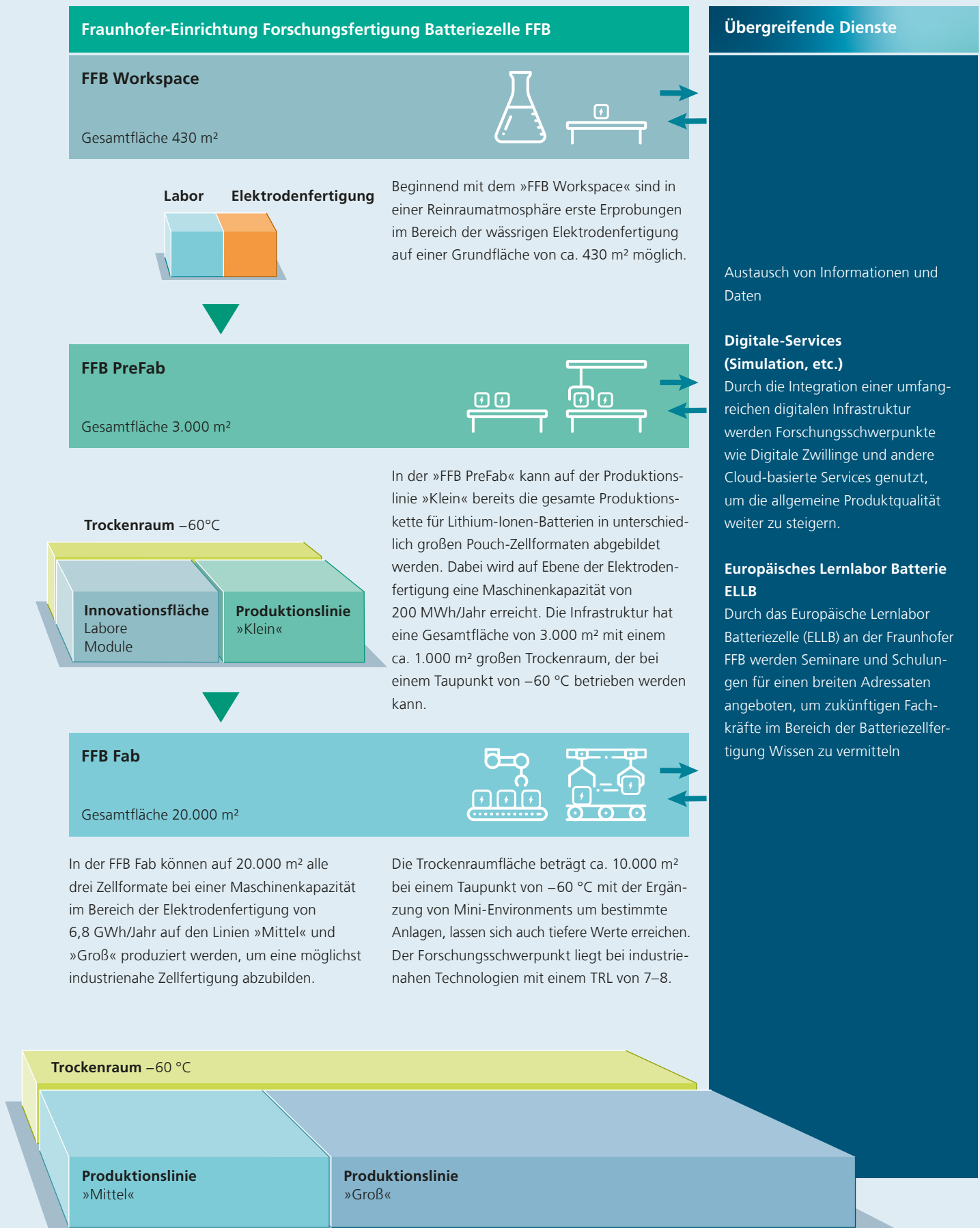
Die physischen Infrastrukturen an »FFB PreFab« und »FFB Fab« lassen eine Vielzahl von Entwicklungsaktivitäten zu. Diese setzen sich auch im digitalen Raum fort, bzw. können dort vorbereitet und beschleunigt werden. Dazu sind an der Fraunhofer FFB drei Ebenen des digitalen Zwillings geplant: Die Produkt-, Anlagen- und Gebäudeebene. Alle drei Zellformate werden als digitaler Zwilling umgesetzt. Im ersten Schritt steht die Pouch-Zelle der »FFB PreFab« im Fokus, dann folgt die Rundzelle der »FFB Fab« und final die prismatische und Pouch-Zelle der »FFB Fab«. Auch im Bereich der Anlagen sollen alle in den Fertigungslinien von »FFB PreFab« und »FFB Fab« enthaltenen Anlagen als digitaler Zwilling umgesetzt werden. Bei den Gebäuden beschränkt sich die Implementierung auf die »FFB Fab« und damit auf den industrieähnlichen Bereich der Fraunhofer FFB. Die digitalen Zwillinge können sowohl für F&E-Fragestellungen im Bereich der Zellfertigung, aber auch für vor- und nachgelagerte Industrien genutzt werden. So z. B. das Design von Batteriesystemen oder die Spezifikation von Prozessen und Anlagen auf Grundlage der digitalen Zelle.

Auch in der laufenden Produktion der Fraunhofer FFB sollen Digitalisierungslösungen für die Prozessoptimierung genutzt werden. Dazu wird aktuell im »FFB Workspace« ein Traceability-Konzept für bahnförmige Prozesse erarbeitet, welches später auf die gesamte Fertigungslinie ausgerollt werden soll. Der Anspruch ist dabei eine vollständige Traceability jeder Zelle über alle Prozessschritte bis zurück zur Eingangsmaterialcharge. Eine große Herausforderung ist dabei die »unsichtbare« Markierung z. B. der Elektrodenfolien und Rollen. Die mit den Produkteigenschaften verknüpften Prozessdaten können zur digitalen Optimierung der eigenen Produktion genutzt werden, sollen jedoch auch für Entwicklungspartner und damit für die Nutzung außerhalb der Fraunhofer FFB zur Verfügung gestellt werden.

Aufbau des Ökosystems Batterie in Europa

Eine wesentliche Aufgabe der Fraunhofer FFB ist der Transfer von Technologien und Innovationen in die Industrie. Genauso steht auch der Wissenstransfer im Fokus. Dieser soll u. a. im Rahmen des Europäischen Lernlabors Batteriezelle (ELLB)

Abbildung 12: Innovationspfade der FFB



umgesetzt werden. Das Bildungsangebot richtet sich übergreifend an alle Industriebranchen der Batteriewertschöpfungskette und an wissenschaftliche Einrichtungen und wird Möglichkeiten vom digitalen Lernen in virtuellen Umgebungen bis hin zur Ausbildung an der physischen Infrastruktur umfassen.

Die Batterieproduktion und Anwendung von Batteriezellen sind immer stärker mit systemischen Fragen der Nachhaltigkeit, Ressourcenverfügbarkeit und Zirkularität verknüpft. Ausgehend von den an den Infrastrukturen der Fraunhofer FFB entstehenden Realdaten und Erfahrungen sollen solche übergreifenden Fragestellungen beantwortbar werden. Dazu werden bereits heute an der Fraunhofer FFB Kompetenzen in den Bereichen Nachhaltigkeit und Lebenszyklusanalyse aufgebaut, welche dann für die Industrie und das Ökosystem Batterie in Europa zur Verfügung stehen sollen.

6.2. Innovationspfade

Der Innovationspfad durch die Fraunhofer FFB beschreibt, wie und in welchen Einzelschritten Forschungs- und

Entwicklungstätigkeiten zur Skalierung von Technologien durchgeführt werden können. Dies betrifft vor allem Produktionstechnologien (Prozesse, Maschinen und Werkzeuge), ist aber auch auf Produkttechnologien (Batterien, Batteriezellen und deren Komponenten) übertragbar. Gemäß der Abbildung 13 und 14 kann der idealtypische Skalierungsprozess in zwei Phasen und fünf Einzelprojekte gegliedert werden.

Phase 1

Bevor mit der eigentlichen Skalierung (vgl. Abbildung 14) begonnen wird, wird in der Regel mit einer Vorabanalyse begonnen. Art und Umfang dieser Analyse(n) können in Abhängigkeit von der bereits vorhandenen Informationsbasis stark variieren und umfassen einen oder eine Kombination aus (1) der Bewertung von unterschiedlichen Technologiealternativen, (2) eine detaillierte Anforderungsanalyse der betrachteten Technologie (3) eine Markt- und Wettbewerbsanalyse und (4) der Berechnung eines Business Case. Ziel dieser Analysen ist es, die Unsicherheit vor der Entscheidung, ob eine kostenintensive Skalierung stattfinden soll, auf ein Minimum zu reduzieren.

Sofern die oben genannte Entscheidung positiv verläuft, beginnt die Skalierung im engeren Sinne. Dazu wird zunächst mit der Projektplanung begonnen. In diesem Schritt werden

Abbildung 13: Innovationspfad durch die Fraunhofer FFB Phase 1



unter anderem (5) Ziele für die folgenden Projekte definiert, und die (6) Planung der Skalierungsarbeiten durchgeführt. Dies umfasst etwa die Auswahl von Materialien, die Definition von Prozessparametern und die Beschreibung der Datenauswertung. Abgerundet wird dieser Schritt durch eine (7) belastbare Kosten- und (8) Zeitplanung, sodass ein vollständiger Projektplan für die letztendliche Skalierung vorliegt. Dieser Schritt kann sowohl als separates Projekt oder als Arbeitspaket eines größeren Skalierungsprojektes durchgeführt werden.

Phase 2

Die sich in der zweiten Phase des Innovationspfads anschließenden Schritte greifen auf die Infrastruktur der Fraunhofer FFB zurück. Ziel ist hier die schrittweise Skalierung und Qualifizierung der erprobten Technologien für das Anwendungsfeld der Li-Ionen Batteriezellfertigung. In Abhängigkeit des Technologietyps und seinem jeweiligen Entwicklungsstand werden unterschiedliche Aktivitäten unter Nutzung verschiedener Fertigungslinien / -umgebungen der Fraunhofer FFB durchgeführt.

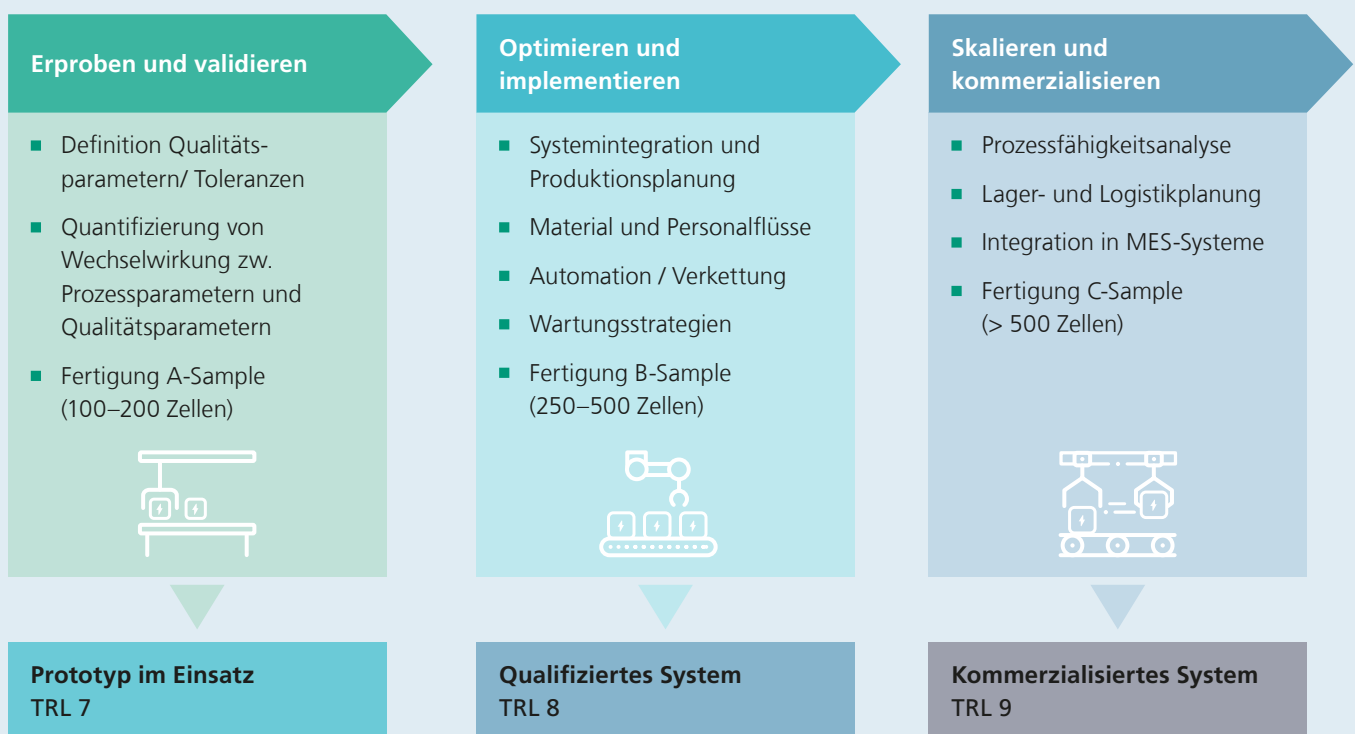
Den Einstieg zur physischen Einbringung von Technologien in die Fraunhofer FFB bilden einerseits die Innovationslabore - und -module sowie andererseits die direkten Arbeiten an der Musterlinie im Fabrikteil der »FFB PreFab«. Voraussetzung für

eine gemeinsame Weiterentwicklung (üblicherweise durch F&E Kooperationen) finden Technologien, die bereits durch den jeweiligen Wissensträger als Demonstrator im Technikumsmaßstab den Funktionsnachweis für die Anwendung in der Batteriezellfertigung erbracht haben und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Ferner sind für die erste technologische Einbringung, entweder durch eigene Vorarbeiten des Wissensträgers oder durch Analyse-/Projektplanungsaktivitäten der Fraunhofer FFB, bereits relevante Parameter der Qualitäts-/Prozesskontrolle sowie Spezifikationen des späteren Fertigungssystems und dessen Betriebsumgebung bekannt.

Im Schritt 1 der zweiten Phase setzen Projektaktivitäten zur Weiterentwicklung von Technologien mit Arbeiten rund um ihre weitere Qualifizierung für die LIB-Fertigung an (TRL 6–7). Es ist zunächst das Ziel den Nachweis der technologischen Leistungsfähigkeit und Nutzbarkeit im Betriebsumfeld durch standardisierte Testprotokolle nachzuweisen. Diese umfassen sowohl die prozessspezifische Basis der Qualitätssicherung als auch der Anbindung in die physische und digitale Fertigungsumgebung.

Im Schritt 2 behandeln die Arbeiten weniger individuelle Prozessschritte als vielmehr Problemstellungen, die eine Nutzung der Technologie auf Systemebene gewährleisten (TRL 7–8). Zielsetzungen der Prozessintegration zuvor qualifizierter,

Abbildung 14: Innovationspfad durch die Fraunhofer FFB Phase 2



innovativer Fertigungstechnologien stehen bei Aktivitäten an der Erprobungslinie im Mittelpunkt.

Im abschließenden Schritt 3 des Innovationspfades befassen sich Projektarbeiten unter Einsatz von Infrastruktur der Fraunhofer FFB auf höchstem Skalierungsgrad mit notwendigen Fragestellungen vor einem späteren kommerziellen Einsatz auf industriellem Maßstab (TRL 8–9). So werden Prozessoptimierungsarbeiten zur Erreichung von wettbewerbsfähigen Durchsätzen und Prozessqualitäten an der Fertigungslinie der Fraunhofer FFB durchgeführt und auf einen vollständig integrierten Fertigungsbetrieb geprüft.

6.3. Transfer von Innovationen und Technologien in die Industrie

Nach der erfolgreichen, gemeinsamen Entwicklung von Innovationen und Weiterentwicklung von Technologien bildet deren Transfer in die industrielle Nutzung den direkten Anschluss an bislang erfolgte F&E-Aktivitäten. Die Generierung von Einnahmen aus dem Einsatz entsprechender Technologien haben den Anspruch die zuvor getätigten Investitionen in F&E-Arbeiten von öffentlicher und industrieller Seite idealerweise mindestens zu decken und zu nachhaltiger Wertschöpfung beizutragen. Um dem Transferauftrag der Fraunhofer FFB nachzukommen, innovative Technologien zur Batteriezellfertigung möglichst schnell zur Marktreife zu entwickeln, wird eine entsprechende Verwertungsbereitschaft im Anschluss an die Kooperation beim Entwicklungspartner vorausgesetzt.

Für den Transfer von technologischem Wissen existieren diverse Verwertungswege, die in Abhängigkeit der entsprechenden Kooperationsvereinbarungen zur Technologieentwicklung im

Abbildung 15: Übersicht zu Verwertungspfaden für Technologieentwicklungen aus gemeinsamen F&E-Aktivitäten



Nachgang zum Einsatz kommen können. Der Regelfall einer Technologieentwicklung mit Partnern an der Fraunhofer FFB sieht vor, dass diese bereits vorhandenes geschütztes Wissen bei Kooperationsbeginn einbringen (Background-IP). Eine Voraussetzung zur Initiierung einer zur FFB-Mission kompatiblen Kooperation liegt darin, dass die Partner eine Verwertungsbereitschaft in Form der gegenseitigen Erteilung von Nutzungsrechten (wenn beidseitiges IP benötigt wird / vorhanden ist) zeigen.

Die Fraunhofer FFB wird in ihrer Rolle als Einrichtung der öffentlichen F&E-Landschaft zur Batteriezellfertigung wissenschaftliche Erkenntnisse in Form von Publikationen der breiten Öffentlichkeit aus Forschung und Industrie zugänglich machen, um ihrer Aufgabe der unabhängigen Wissensgeneration und Dissemination gerecht zu werden. Implizites Wissen, also „Know-How“, zur praktischen Nutzung und dessen bedarfsgerechte Anpassung auf industrielle Akteure, wird in Form von Beratungsdienstleistungen angeboten.

Liegen die wissenschaftlichen Erkenntnisse in Form technologischer Problemlösungen vor, können sich die Anmelder durch die Einreichung von Patenten ein rechtlich exklusives Nutzungsrecht auf Zeit als Aufwandsentschädigung für die Entwicklungsleistung sichern. Die FFB als Teil der Fraunhofer-Gesellschaft arbeitet wie auch alle anderen Akteure der öffentlichen F&E-Landschaft zum Teil mit öffentlichen Mitteln und hat daher die Aufgabe Wissen langfristig und unabhängig dem Geltungsbereich des jeweiligen Fördergebers (z. B. des deutschen Wirtschaftsraums) zur Verfügung zu stellen. Erwünscht ist daher, dass in kooperativer Forschungsarbeit geschaffene Erfindungen durch die FhG angemeldet und gehalten werden. Kooperationspartner erhalten generell die Option auf nichtausschließliche Nutzungsrechte (Lizenzierung) zu beihilferechtskonformen Bedingungen. Der Innovationspfad sieht somit eine industrielle Verwertung unter Rückgriff auf das angemeldete IP direkt beim Industriepartner vor. Nur in gesonderten Ausnahmefällen werden dem Kooperationspartner das Eigentum oder auch unbeschränkte Exklusivrechte an dem im Auftrag entstandenen Fraunhofer IP übertragen bzw. eingeräumt. Entscheidend dafür ist der Wert für das Patent- und Technologieportfolio der Fraunhofer-Gesellschaft und die Möglichkeit, die Ergebnisse auch auf anderen Anwendungsgebieten oder über andere Transferpfade zu verwerten.

Zeichnen sich, trotz des generellen gegenseitigen Interesses an einer Zusammenarbeit, nicht zu überwindende Schwierigkeiten bei der Einigung von IP-Fragen ab, kann der Wechsel von »F&E-Kooperation« zu »Auftragsforschung« als Arbeitsmodus eine geeignete Lösung darstellen. In dem Fall, dass sich kein Industriepartner im Forschungskonsortium befindet und auch während des laufenden F&E-Projekts kein Interesse an einer Verwertung geäußert wurde, existiert die Möglichkeit der

direkten Verwertung von geschütztem Wissen aus dem öffentlichen F&E-Umfeld durch die Gründung eines Spin-Offs. Eine Übersicht an Entscheidungsmöglichkeiten zur direkten Verwertung mit Kooperationspartnern ist nachfolgend abgebildet.

6.4. Förderung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Deutschland

In Deutschland und Europa findet sich eine Vielzahl von Fördermaßnahmen für die Batterieforschung und mittlerweile auch die industrielle Skalierung. Neben europäisch-nationalen Programmen und solchen auf Ebene der deutschen Bundesländer bieten insbesondere das BMBF, das BMWK und die Europäische Union mehrere wichtige Plattformen für Forschungsvorhaben. Unter dem Dachkonzept Forschungsfabrik Batterie [71] hat das BMBF wichtige Forschungsprogramme zu Batteriethemen zusammengefasst und bietet z. B. mit dem Programm Batterie2020 (Transfer) technologieoffene Fördermöglichkeiten für Projekte unterschiedlichster Technologiereife. Eine Bündelung entlang spezifischer Technologiefelder findet in den Kompetenzclustern u. A. zu den Themen Produktion, Feststoffbatterien, Analytik, Nutzung und Recycling statt. Durch weitere Maßnahmen wurden und werden bspw. internationale Kooperationen und vorbereitende Maßnahmen für die industrielle Zellproduktion gefördert.

Seitens der Europäischen Kommission wurden die „Important Projects of Common European Interest“ (IPCEI) auf den Weg gebracht, die in Deutschland durch das BMWK gefördert werden [72]. Damit besteht die Möglichkeit, risikobehaftete Innovationen bis zur ersten gewerblichen Nutzung in Form großer Vorhaben zu fördern. Förderfähig sind z. B. Kosten für den ersten industriellen Einsatz zwischen Pilot- und Massenproduktion. In diesem Kontext können unter anderem Investitionsaufwendungen und Betriebskosten gefördert werden. In Deutschland sind bisher 14 Unternehmen an dem Programm beteiligt.

Ergänzend zu den IPCEI hat das BMWK die Schwerpunktförderung Batteriezellfertigung ins Leben gerufen, welche ebenfalls zur Stärkung des außerindustriellen Ökosystems Batterie beitragen soll und auf Themen der Nachhaltigkeit, Digitalisierung und Prüfung fokussiert [73]. Darüber hinaus fördert das BMWK die Entwicklung eines sogenannten „Battery passports“,

welcher digital Daten über den gesamten Lebenszyklus der Batterie speichern soll, u. a. um Transparenz über den ökologischen Fußabdruck zu schaffen und diesen mit regulativen Vorgaben abgleichen zu können.

Beiträge im Rahmen von Batterie-IPCEI vergleichbaren Maßnahmen.

Auf europäischer Ebene existiert eine Vielzahl von Programmen unter dem Schirm Horizon Europe. Neben F&E-Vorhaben, z. B. zu Technologien der nächsten Generation, Materialforschung, Batterietests und Nachhaltigkeit werden außerdem Koordinations- und Vernetzungsmaßnahmen gefördert, welche die Zusammenarbeit auf europäischer Ebene unterstützen sollen. Als Flaggschiff-Initiative der EU wurde das Programm Battery2030+ ins Leben gerufen, welches die Entwicklung von Batterien der nächsten Generation zum Ziel hat und sechs umfangreiche Einzelprojekte bündelt [74]. Diese fokussieren mitunter Themen der Materialentwicklung, der Sensorik und des Recyclings.

Die Rolle der Fraunhofer FFB in der deutschen und europäischen Forschungslandschaft

Der Aufbau der Forschungsfertigung Batteriezelle in Münster als weitere Fraunhofer Einrichtung wird seit 2019 vom BMBF im Rahmen der »FoFeBat«-Projekte [2] und vom Bundesland Nordrhein-Westfalen gefördert. Die »FoFeBat«-Teilprojekte dienen dabei insbesondere der Bearbeitung von F&E-Fragestellungen rund um den Aufbau, die Auswahl und die Inbetriebnahme von Fertigungsanlagen und Prozessen sowohl niedriger als auch hoher TRL. Ferner werden erste Produkte wie Batteriezellen entwickelt und mit dem Ziel untersucht diese später in der Fraunhofer FFB skaliert fertigen zu können.

Auch über die initiale »FoFeBat«-Förderung hinaus besitzt die Fraunhofer FFB aufgrund ihres integrativen Charakters, sowohl in Richtung Forschung als auch in Richtung Industrie, eine hohe Passfähigkeit zu den vorgestellten Förderinitiativen auf nationaler und europäischer Ebene. Durch ihre Einbettung im Dachkonzept Forschungsfabrik Batterie des BMBF bestehen natürliche Anknüpfungspunkte zu allen enthaltenen Maßnahmen. Insbesondere in Zusammenarbeit mit den Clustern sollen gemeinsame F&E-Roadmaps entwickelt werden, die für ausgewählte Technologien einen Transfer an die Fraunhofer FFB vorsehen.

Als Fraunhofer Forschungseinrichtung fällt die Fraunhofer FFB nicht unter die Empfängergruppe der IPCEI Förderung der EU bzw. des BMWK. Im Allgemeinen fallen jedoch auch fremde F&E-Leistungen, die von den industriellen Förderempfängern beauftragt werden, unter die förderfähigen Kosten. Das Leistungsangebot der Fraunhofer FFB adressiert explizit die von der Europäischen Kommission für die IPCEI benannte Lücke zwischen Pilotfertigung und Massenfertigung. Somit bietet die Fraunhofer FFB die Grundvoraussetzungen für zukünftige

Literaturverzeichnis

- [1] The European Green Deal, COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS, COM/2019/640 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
- [2] Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Förderkennzeichen 03XP0256, 03XP0416A, Gesamtvorhaben: Forschungsfertigung Batteriezelle Deutschland, "FoFeBat"
- [3] MetaMarktMonitoring LIB, Fraunhofer ISI 2022, Das MetaMarktMonitoring ist eine Integration und Meta-Analyse von Marktanalysten, Datenquellen, sowie Fraunhofer ISI Batteriemarkt Modellen. Die genutzten Daten stammen beispielsweise von Avicenne, BNEF, Takeshita B3, Benchmark Minerals, Yole, F&S, SNE, Yano, P3, UBS, FEV, Syrah, Roland Berger, Wood Mackenzie, IEA sowie aus vielen weiteren Quellen.
- [4] Statista, Projected global battery demand from 2020 to 2030, by application, 2021, <https://www.statista.com/statistics/1103218/global-battery-demand-forecast/>
- [5] S&P Global Market Intelligence, Top electric vehicle markets dominate lithium-ion battery capacity growth, 2021, <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/blog/top-electric-vehicle-markets-dominate-lithium-ion-battery-capacity-growth>
- [6] Frost & Sullivan, 2021-Global Li-ion Battery Materials Growth Opportunities, 2021
- [7] Bloomberg New Energy Finance BNEF, Global Energy Storage Market Set to Hit One Terawatt-Hour by 2030, 2021, <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-set-to-hit-one-terawatt-hour-by-2030/>
- [8] International Energy Agency IEA, Global EV Outlook 2022 - Securing supplies for an electric future, 2022
- [9] Statista, Size of the global market for electric bicycles in 2021 and 2027, 2021, <https://www.statista.com/statistics/674381/size-global-market-electric-bicycles/>
- [10] Bloomberg New Energy Finance BNEF, 2021 Battery Pack Prices Fall to an Average of \$132/kWh, But Rising Commodity Prices Start to Bite, 2021, https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-to-an-average-of-132-kwh-but-rising-commodity-prices-start-to-bite/#_ftn1
- [11] Die Daten für prognostizierte Produktionskapazitäten stammen wie die Daten der Batterienachfrage aus dem Fraunhofer ISI MetaMarktMonitoring LIB [3]. Es wurde angenommen, dass ca. 67% der Zellkosten auf die Materialien entfallen. Bei einem mittleren Zellpreis von 65 €/kWh kann nach Abzug der Materialkosten die Wertschöpfung der Zellproduktion selbst errechnet werden. Insgesamt wurde mit 5 % Produktionsausschuss gerechnet.
- Für die Errichtung einer Zellfabrik sind durchschnittliche Investitionskosten von 43 Mio € pro GWh/a Produktionskapazität angenommen. Die Kosten der Produktionslinien wurden mittels eines Umrechnungsfaktor von 0,67 aus den Gesamtinvestitionskosten berechnet (restliche Kosten entfallen beispielsweise auf das Gebäude).
- [12] Working Group 2 of the European Commission, Roadmap on Raw Materials and Recycling, 2021, https://energy.ec.europa.eu/roadmap-raw-materials-and-recycling_en#details
- [13] Neef, Schmaltz, Thielmann, Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau, IMPULS Stiftung, 2021, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2021/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf
- [14] Campagnol, Pfeiffer, Tryggstad, Capturing the battery value-chain opportunity, McKinsey & Company, 2021, <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/capturing-the-battery-value-chain-opportunity>
- [15] Chin, Wallace, Horner, Nickel Prices Sent on Wild Ride by Russia-Ukraine War, The Wall Street Journal, 2022, <https://www.wsj.com/livecoverage/russia-ukraine-latest-news-2022-03-08/card/nickel-market-sent-on-wild-ride-by-russia-concerns-oepHo6J9PSoxNNoOCbZf>
- [16] B3 Corporation, E21Q3 5 LIB Material market, 2021

- [17] Metzger, Pausch, Zellner, Batterietechnologie Start-ups in der Automobilindustrie: Hype oder Flaute? In welche Richtung entwickeln sich die zukünftigen Geschäftsmodelle. berylls, 2022, <https://www.berylls.com/batterietechnologie-Start-ups-in-der-automobilindustrie-hype-oder-flaute-in-welche-richtung-entwickeln-sich-die-zukuenftigen-geschaeftsmodelle/>
- [18] Jendrischik, Duesenfeld recycelt jährlich 3.000 Tonnen Lithium-Ionen-Batterien in Wendeburg, Cleanthinking.de, 2022, <https://www.cleanthinking.de/duesenfeld-recycelt-3000-tonnen-lithium-ionen-batterien-niedersachsen/>
- [19] Northvolt AB, Northvolt to transform closed paper mill in Sweden into new gigafactory, 2022, <https://northvolt.com/articles/northvolt-to-transform-closed-paper-mill-in-sweden-into-new-gigafactory/>
- [20] Stellantis beteiligt sich an Lithium-Startup Vulcan, Handelsblatt, 2022, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autobauer-stellantis-beteiligt-sich-an-lithium-startup-vulcan/28452470.html>
- [21] DERA stellt Ergebnisse der Rohstoffrisikobewertung Lithium vor: Hohe Angebotskonzentration bei Lithium – Schlüsselrohstoff und limitierender Faktor für die Verkehrswende und Speicherung regenerativer Energien, Deutsche Rohstoff Agentur DERA, 2022, https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Oeffentlichkeitsarbeit/Pressemitteilungen/BGR/DERA/dera-bgr-2022-06-24_pm_dera-stellt-ergebnisse-der-rohstoffrisikobewertung-lithium-vor.html?nn=1542388
- [22] Europäische Kommission, Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken, 2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474&from=DE>
- [23] Snowdon, Rai, Schiavon, Sharp, Currie, Chen, Zhang, Battery Metals Watch: The end of the beginning. Goldman Sachs, 2022, <https://www.goldmansachs.com/insights/pages/gs-research/battery-metals-watch-the-end-of-the-beginning/report.pdf>
- [24] Azevedo, Baczynska, Hoffman, Krauze, Lithium mining: How new production technologies could fuel the global EV revolution, McKinsey & Company, 2022, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/lithium%20mining%20how%20new%20production%20technologies%20could%20fuel%20the%20global%20ev%20revolution/lithium-mining-how-new-production-technologies-could-fuel-the-global-ev-revolution.pdf?shouldIndex=false>
- [25] Q1 2022 Automotive industry demand forecast, Advanced Propulsion Centre UK, 2022, <https://www.apcuk.co.uk/app/uploads/2022/06/Q1-2022-automotive-industry-demand-forecast-report.pdf>
- [26] BASF-Bericht 2021: Konzernlagebericht, BASF SE, 2022, https://bericht.basf.com/2021/de/_assets/downloads/mgr-management-report-basf-gb21.pdf
- [27] OCSiAl receives the green light for Luxembourg graphene nanotube facility project to power the next generation of electric vehicles in Europe, OCSiAl, 2022, <https://ocsial.com/de/news/ocsial-receives-the-green-light-for-luxembourg-graphene-nanotube-facility-project-to-power-the-next-generation-of-electric-vehicles-in-europe/>
- [28] Blue Whale Materials Announces Investment of up to \$80 Million by Ara Partners to Build Leading Lithium-Ion Battery Recycling Network and Facilities, Blue Whale Materials LLC, 2022, <https://www.bluewhalematerials.com/blue-whale-materials-release>
- [29] Das, India's top e-recycler Attero to spend \$1 bln to expand as EVs take off, Reuters, 2022, <https://www.reuters.com/world/india/indias-top-e-recycler-attero-spend-1-bln-expand-evs-take-off-2022-05-31/>
- [30] DemoSens Verbundprojekt erforscht Demontage und Recycling von E-Mobil-Akkus, PEM RWTH Aachen University, <https://www.pem.rwth-aachen.de/cms/PEM/Forschung/Projekte/~pkazx/DemoSens/https://tu-freiberg.de/eitrawmaterials>
- [31] REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, COM(2020) 798 final, 2021, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52020PC0798>
- [32] ANNEXES to the Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020, COM(2020) 798 final, 2020, https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_2&format=PDF
- [33] Nexeon Raises Significant Funding to Scale-up Production of Step Change Battery Materials, Nexeon Ltd., 2022, <https://www.nexeon.co.uk/significant-funding-skc/>
- [34] Kwade, Haselrieder, Leithoff, Current status and challenges for automotive battery production technologies. Nat Energy 3, 290–300, 2018, <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0130-3>

- [35] Schlüssel zur Batterieproduktion, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. VDMA, 2019, <https://www.vdma.org/documents/34570/35405938/Branchenführer+VDMA+Batterie+DE+ENG.pdf/ea95c153-eff5-0ec3-e660-bcb980635a98?t=1639561587467>
- [36] SNE Report Lithium Ion Battery Manufacturing Equipment Technology Trend and Market Outlook (2030), SNE Research, 2021
- [37] Projektdatenbank Batterieforum Deutschland, Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. (KLiB), <https://www.batterieforum-deutschland.de/projektdatenbank/>
- [38] PRODUKTIONSPROZESS EINER LITHIUM-IONEN-BATTERIEZELLE, PEM der RWTH Aachen University und Verband Deutscher Maschinen und Anlagenbau e.V. VDMA, 2015, https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaoqixv
- [39] Chen, Tan, Jean, Foreign knowledge acquisition through inter-firm collaboration and recruitment: Implications for domestic growth of emerging market firms, International Business Review 25(1), 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2015.01.009>.
- [40] Schaal, Batteriefabrik: VW legt Grundstein für die „Salzgiga“, electrive.net, 2022, <https://www.electrive.net/2022/07/07/batteriefabrik-vw-legt-grundstein-fuer-die-salzgiga/>
- [41] Schaal, VW bestellt Anlagen für Batteriefabriken bei LEAD, electrive.net, 2022, <https://www.electrive.net/2022/06/27/vw-bestellt-anlagen-fuer-batteriefabriken-bei-lead/>
- [42] Volkswagen and Bosch want to industrialize manufacturing processes for battery cells, Volkswagen Group, 2022, <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/press-releases/volkswagen-and-bosch-want-to-industrialize-manufacturing-processes-for-battery-cells-7707>
- [43] Britishvolt nutzt in erstem Gigawerk die kohlenstoffarme Batterie-Mischtechnologie von Bühler, Bühler AG, 2022, https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup/global/de/media/media-releases/britishvolt_nutztinerstemgigawerkdie-kohlenstoffarmebatterie-misc.html
- [44] Maschinenbauer PINK beliefert Britishvolt, PEM Motion GmbH, 2022, <https://battery-news.de/index.php/2022/05/18/deutscher-maschinenbauer-pink-beliefert-britishvolt/>
- [45] Beteiligung in Tübingen: CUSTOMCELLS und Manz AG bündeln Kräfte für nächste Generation der Batteriezellenproduktion, CustomCells, 2022 <https://www.customcells.de/unternehmen/presse/detail/customcells-und-manz-ag-buendeln-kraefte-fuer-naechste-generation-der-batteriezellenproduktion/>
- [46] Manz AG: Daimler Truck beteiligt sich an Manz im Rahmen einer strategischen Partnerschaft, Manz AG, 2022, <https://www.manz.com/de/unternehmen/news/manz-ag-daimler-truck-beteiligt-sich-an-manz-im-rahmen-einer-strategischen-partnerschaft/>
- [47] DIGATRON & SAFION ANNOUNCE STRATEGIC PARTNERSHIP, Digatron Power Electronics GmbH, 2021, <https://www.digatron.com/en-us/Exhibitions-Events-Press-Release/Digatron-Safion-Partnership>
- [48] Matthews International acquires OLBRICH GmbH and R+S Automotive GmbH, Saueressig Group, 2022, <https://www.saueressig.com/en/matthews-international-uebernimmt-die-olbrich-gmbh-und-rs-automotive-gmbh/>
- [49] Palmer, Tesla reportedly bought a company that specializes in high-speed battery manufacturing, CNBC, 2019, <https://www.cnbc.com/2019/10/07/tesla-reportedly-bought-a-company-for-high-speed-battery-manufacturing.html>
- [50] Marklines Co L Automotive Industry Portal <http://www.marklines.com>
- [51] Fraunhofer ISI CellDB, The database covers global existing and announced cell production capacities (GWh/a) distinguished by company, cell format and location. The database is linked to a forecast model describing potential future production capacities based on the type of company who made the announcement and proposed time frame in the announcement.
- [52] Britishvolt Acquires EAS, the German-Based Advanced Technology Battery Cell Manufacturer, Britishvolt Ltd., 2022, <https://www.britishvolt.com/news/britishvolt-acquires-eas-the-german-based-advanced-technology-battery-cell-manufacturer/>
- [53] A future-focused company project, Verkor SA, 2022, <https://verkor.com/en/ambition/>
- [54] Presentation of the first battery cell pilot line in Noblejas, PHI 4 TECHNOLOGY S.L., 2022, <https://www.phi4tech.com/news/presentation-of-the-first-battery-cell-pilot-line-in-noblejas/>

- [55] Morrow signs agreement to start the construction of its Pilot Factory, Morrow Batteries, 2021, <https://www.morrow-batteries.com/post/morrow-signs-agreement-to-start-the-construction-of-its-pilot-factory>
- [56] Freyr EVP Operations: "Opening Pilot Factory in 2022", High North News, 2021, <https://www.highnorthnews.com/en/freyr-evp-operations-opening-pilot-factory-2022>
- [57] Jolly, Britishvolt to invest more than £200m in Midlands test facility, The Guardian, 2022, <https://www.theguardian.com/business/2022/may/31/britishvolt-to-invest-more-than-pounds-200m-midlands-testing-site-uk-battery-startup-hams-hall-gigafactory>
- [58] Randall, Blackstone begins series production of 3D-printed battery cell, electrive.net, 2021, <https://www.electrive.net/2021/12/07/blackstone-begins-series-production-of-3d-printed-battery-cells/>
- [59] Northvolt raises \$2.75 billion in equity to deploy further battery cell capacity – expands Swedish gigafactory to 60 GWh, Northvolt AB, 2021, <https://northvolt.com/articles/northvolt-equity-june2021/>
- [60] FREYR 1Q 2022 Earnings Call, Freyr Battery, 2022, https://s27.q4cdn.com/476984837/files/doc_financials/2022/q1/FREY-1Q22-Earnings-Deck_MASTER-FINAL.pdf
- [61] Workstream 2: Battery Cells, VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, <https://www.ipcei-batteries.eu/technology-fields/workstream-2-battery-cells>
- [62] Thielmann, Neef, Hettesheimer, Ahlbrecht, Ebert, Future Expert Needs in the Battery Sector; eit RawMaterials and Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, 2021
- [63] Kane, Northvolt Plans 100 GWh/Year Cathode Material Gigafactory In Sweden, InsideEVs, 2022, <https://insideevs.com/news/572204/northvolt-cathode-material-gigafactory-sweden/>
- [64] Umicore and Volkswagen AG to create European EV battery materials Joint Venture, Umicore, 2021, <https://www.umicore.com/en/umicore-and-volkswagen-ag-to-create-european-ev-battery-materials-joint-venture/>
- [65] LiPLANET Network Founded, Technische Universität Braunschweig, https://www.liplanet.eu/newsroom/press-releases/liplanet_network_founded
- [66] Werwitzke, VDMA und FFB Münster: Bündnis für Akku-Maschinenbau, electrive.net, 2021, <https://www.electrive.net/2021/09/30/vdma-und-ffb-muenster-buendnis-fuer-akku-maschinenbau/>
- [67] Wanner Bahr, Full, Weeber, Birke, Sauer, Technology assessment for digitalization in battery cell manufacturing, Procedia CIRP 99 520-525, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.110>
- [68] Field, Everything You Need To Know About Tesla's New 4680 Battery Cell, CleanTechnica, 2020, <https://cleantechnica.com/2020/09/22/everything-you-need-to-know-about-teslas-new-4680-battery-cell/>
- [69] Schaal, Batteriefabrik: VW legt Grundstein für die „Salzgiga“, electrive.net, 2022, <https://www.electrive.net/2022/07/07/batteriefabrik-vw-legt-grundstein-fuer-die-salzgiga/>
- [70] BYD's New Blade Battery Set to Redefine EV Safety Standards, BYD Auto Co. Ltd., <https://en.byd.com/news/byds-new-blade-battery-set-to-define-ev-safety-standards/>
- [71] Förderungen der Batterieforschung, Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e. V. KLib, <https://batterie-2020.de/foerderinitiative/foerderungen-der-batterieforschung-durch-das-bmbf/>
- [72] IPCEIS in der Batteriezellfertigung, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK, 2021, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/I/ipceis-in-der-batteriezellfertigung.pdf?__blob=publicationFile&v=4
- [73] Bekanntmachung Förderaufruf: Forschung in der Schwerpunktförderung Batteriezellfertigung, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK, 2021, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/B/bekanntmachung-foerderaufruf-forschung-in-der-schwerpunktforderung-batteriezellfertigung.pdf?__blob=publicationFile&v=8
- [74] Battery 2030+ Webseite, <https://battery2030.eu/>
- [75] Degen, Krätzig, Modelling Large Scale Manufacturing of Automotive Battery Cells – Impact of New Technologies on Production Economies, 2021, <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4019171>
- [76] Manz, GROB-WERKE und Dürr schließen einzigartige europäische Kooperation im Bereich der Produktionstechnologie für Li-Ion Batterien, Manz, 2022, <https://www.manz.com/de/unternehmen/news/manz-grob-werke-und-duerr-schliessen-einzigartige-europaeische-kooperation-im-bereich-der-produktionstechnologie-fuer-li-ion-batterien/>

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
LIB	Lithium-Ionen-Batterie
EV	Electric vehicle / Elektrofahrzeug
BEV	Batteriebetriebenes EV
PHEV	Plug-in Hybrid EV
HEV	Hybrid EV
cEV	Commercial electric vehicle / Elektrisches Nutzfahrzeug
pEV	Passenger electric vehicles / Elektrischer PKW
ESS	Energy storage system / Stationärer Batteriespeicher
3C	Computing, consumer and communication
OInd	Industrielle Spezialanwendungen
2/3W	Zwei- oder Dreiräder
kWh	Kilowattstunde (10^3 Wh)
MWh	Megawattstunde (10^6 Wh)
GWh	Gigawattstunde (10^9 Wh)
TWh	Terawattstunde (10^{12} Wh)
TRL	Technology Readiness Level / Technologiereifegrad
F&E	Forschung und Entwicklung
KMU	Kleine- und mittelständische Unternehmen
OEM	Original Equipment Manufacturer (meist sind Automobilhersteller damit gemeint)
EU	Europäische Union
IPCEI	Important Projects of Common European Interest
EIT	Europäisches Institut für Innovation und Technologie
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
FhG	Fraunhofer-Gesellschaft
FFB	Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
ELLB	Europäisches Lernlabor Batterie
EoL	End-of-Life

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), sowie für die Koordination der Projektdurchführung durch den Projektträger Jülich. Großer Dank gilt ebenfalls dem gesamten FoFeBat-Projektteam für die inhaltliche Unterstützung.

Impressum

Herausgeber

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48
76139 Karlsruhe
www.isi.fraunhofer.de

Förderung

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
Heinemannstraße 2, 53175 Bonn-Bad Godesberg,
Postanschrift 53170 Bonn
www.bmbf.de
Förderkennzeichen: 03XP0256

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Partner

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
<https://www.ipt.fraunhofer.de/>

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
<https://www.ffb.fraunhofer.de>

Production Engineering of E-Mobility Components PEM,
RWTH Aachen University
<https://www.pem.rwth-aachen.de>

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
<https://www.isi.fraunhofer.de/>

Projektträger

Projektträger Jülich (PtJ)
Neue Materialien und Chemie
Werkstofftechnologie für Energie und Mobilität (NMT 1)
52425 Jülich

Autoren

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
Bastian Bürklin, Tim Latz, Leonard Schenk

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
Dr. Florian Degen, Marcel Diehl, Dr. Oliver Krätzig, Dr. Thomas Paulsen, Dr. Saskia Wessel

Production Engineering of E-Mobility Components PEM,
RWTH Aachen University
Prof. Dr. Achim Kampker, Nikolaus Lackner

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Dr. Christoph Neef, Tim Wicke

Layout

Peer und Stefanie Ziegler, scientific design

Abbildungen

Bastian Bürklin und Tim Latz, Fraunhofer IPT

Titelbild

Marius C. Merkel

© Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI,
Karlsruhe, Stand Dezember 2022



**RWTHAACHEN
UNIVERSITY**

Kontakt

Dr. Thomas Paulsen
Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
thomas.paulsen@ffb.fraunhofer.de

Technologiehof
Mendelstraße 11
48149 Münster
www.ffb.fraunhofer.de