

Energieeffiziente und qualitätsorientierte Anlagenkonzepte für die Batteriezellfertigung

Mini- und Makro-Environments

Vorwort

Ein Schlüssel zu einer nachhaltigeren Gesellschaft ist die Entwicklung und Nutzung neuer Energieträger. Aufgrund der begrenzten Ressourcen und der negativen Ökobilanz ist es notwendig, fossile Energieträger langfristig zu ersetzen. Die Batteriespeichertechnologie ist dafür einer der vielversprechendsten Ansätze, insbesondere die Lithium-Ionen-Batterie, die zum Beispiel aus der Elektromobilität nicht mehr wegzudenken ist. Die Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batterien ist in den vergangenen Jahren signifikant gestiegen, und es ist zu erwarten, dass dieser Trend sich exponentiell fortsetzen wird.

Die Batterie hat gegenüber fossilen Energieträgern einen großen Vorteil in Bezug auf Schadstoff-Emissionen. Darüber hinaus gilt es allerdings, auch die gesamte Wertschöpfungskette und den Lebenszyklus einer Batterie nachhaltiger zu machen. Dazu zählen die in einer Batterie verwendeten Materialien, innovative Recyclingkonzepte und nicht zuletzt neue Technologien für die Produktion von Batteriezellen. Die Prozesse der Batteriezellproduktion sind teils sehr energieintensiv. Daher beschäftigen sich die Forschenden der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB unter anderem mit neuen Technologien, die die Produktion von Batteriezellen effizienter sowie energiesparender und auf diesem Wege nachhaltiger und ökonomischer machen. Neben Innovationen im Bereich der Anlagentechnik spielt auch die Umgebung, in der die Produktion stattfindet, eine besondere Rolle. Derzeit befindet sich die Produktion üblicherweise in Rein- und Trockenräumen. Um die klimatischen Bedingungen dieser Räume zu erzeugen, bedarf es teils sehr energieintensiver Prozesse.

Eine vielversprechende Alternative stellt der Einsatz von so genannten »Mini- und Makro-Environments« dar. Das bedeutet, dass die Prozessschritte in einer kleineren Umgebung stattfinden, bis hin zur Arbeit mittels Handschuhkästen, den so genannten »Gloveboxen«. Bislang begrenzt sich die Nutzung von »Mini-Environments« auf den Labor- beziehungsweise Pilotmaßstab. Gloveboxen sind zuverlässig und langjährig in den Batteriezelllaboren im Einsatz und lassen sich durch manuelle Schritte oder durch teilautomatisierte Prozesse miteinander koppeln, um den gesamten Wertschöpfungsprozess



einer Batteriezelle abzubilden. Die Forschenden der Fraunhofer FFB evaluieren in diesem Whitepaper die Möglichkeiten, »Mini- und Makro-Environments« auch im Serienmaßstab zu etablieren. Einen Durchbruch erwarten die Forschenden bereits in den kommenden Jahren.

Die Mitarbeitenden der Fraunhofer FFB arbeiten durch ihre Forschung in diesem und vielen weiteren Gebieten täglich daran, Batterietechnologien effizienter und ökologischer zu gestalten. So werden diese langfristig zu einer rundum nachhaltigen Alternative zu fossilen Energieträgern.

Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen des vorliegenden Whitepapers sowie spannende Einsichten und Erkenntnisse.

Prof. Dr. rer. nat. Jens Tübke
Geschäftsführender Leiter der Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

Inhalt

1. Einleitung und Motivation	4
2. Grundlagen und Stand der Technik	6
2.1. Feuchtigkeit in der Lithium-Ionen-Batteriezellfertigung	7
2.2. Bisherige technische Lösungen für die Luftbehandlung und -regulierung	8
2.3. Zwischenfazit	9
3. Prozessnahe Einhausungen – Herausforderungen und Chancen in der Batteriezellfertigung	10
3.1. Verständnis und Umsetzung von Environments	10
3.2. Herausforderungen und Chancen	16
3.3. Anwendungsfall der Fraunhofer FFB	20
3.4. Zwischenfazit	22
4. Ausblick und Fazit	24
4.1. Adaption lokaler Environments auf den Wertschöpfungsprozess der Batteriezelle	24
4.2. Einsatzfähigkeit der Mini-Environments in der Gigawatt-Fertigung	25
4.3. Die Batteriezellfabrik der Zukunft	26
5. Fraunhofer FFB am Standort Münster als Partner für Forschung und Entwicklung	29
Literaturverzeichnis	30
Impressum	31

1. Einleitung und Motivation

Die Batteriespeichertechnologie ist einer der vielversprechendsten Ansätze zur Substitution fossiler Energieträger. Dabei gilt die Lithium-Ionen-Batterie (LIB) in ihrem Anwendungsbereich als die fortschrittlichste Variante. Als Energiespeicher hält sie längst Einzug in die Verbraucherelektronik und stellt für E-Fahrzeuge den Stand der Technik dar. Im Vergleich zu anderen Batterietypen weist die LIB die höchste Speicherkapazität und Leistungseigenschaften auf. Aufgrund diverser Materialzusammensetzungen können Wirkungsgrade von bis zu 95 Prozent erzielt werden [2]. Der Bedarf an höheren Energiedichten, neuen Prozesstechnologien und Fragestellungen zum Recycling machen die LIB heute zum Gegenstand weltweiter Forschung [3]. Wie stark die globale Nachfrage nach der LIB-Technologie für verschiedenste Anwendungen in den kommenden Jahren steigt, zeigt die Abbildung 1-1. Der Gesamtbedarf an LIB wird laut einer aktuellen Studie bis zum Jahr 2030 auf 3.127 GWh prognostiziert [4]. Verglichen mit der vergangenen Marktbeobachtung für das Jahr 2020 ist das eine Nachfragesteigerung um mehr als das 10-Fache. Der Bedarf an LIB im Jahr 2030 entspricht etwa der Kapazität von ca. 54.000.000 VW ID.3 Traktionsbatterien.

Als fester Bestandteil hat sich die LIB längst in mobilen Geräten bewährt. Abbildung 1-1 zeigt die Nachfrage nach LIB für verschiedene Anwendungen. Als Speichersystem kommt sie aufgrund ihrer hohen Energiedichte zum Beispiel bei Heim- und Großspeicherprojekten zum Einsatz. Den größten Zukunftsmarkt bildet die Elektromobilität. Neben der Verbraucherelektronik und stationären Energiespeichersystemen ist eine weitreichende Elektrifizierung des Personen- und Güterverkehrs zu erwarten. Die Elektrifizierung der Mobilität nimmt den Großteil des zu erwartenden Gesamtbedarfs ein und ist der Treiber für die jährlich steigende Nachfrage nach LIB im Gigawattstunden-Bereich.

Eines der Hauptziele in der Weiterentwicklung von LIB ist die Erhöhung der Energiedichte, um beispielsweise die Reichweite von Elektrofahrzeugen zu erhöhen. Dies gelingt auf Materialebene durch die Einbringung von innovativen hochenergetischen Elektrodenmaterialien. [4], [30] Abbildung 1-2 veranschaulicht die Entwicklung von innovativen Elektrodenmaterialien in den nächsten Jahren. Hierbei lässt sich eine eindeutige Tendenz in Richtung nickelreicher Kathodenmaterialien erkennen. Auf Anodenseite zeigt sich eine fortschreitende Abkehr von Graphit hin zu Silizium-Graphit-Mischanoden und letztendlich der Transfer zu Lithium-Metall. Letzteres

»Der Einsatz von »Mini-Environments« in der Batteriezellfertigung erschließt neue Möglichkeiten und Fertigungsansätze mit dem Ziel der Kostenreduzierung (z.B. Energie- und Betriebskosten), der Produktionssteigerung (zunehmende Automatisierung) sowie der Qualitätssicherung und -verbesserung. Weitere technische Fortschritte (z.B. in der Trocknungstechnik) und das jetzt erworbene Knowhow werden es auch zukünftig ermöglichen, dass bestehende und neue Herausforderungen an die Batteriezellfertigung mit innovativen »Mini-Environment« Lösungen adressiert und erfolgreich gemeistert werden können.«

Dr. Maximilian Dobler
Weiss Klimatechnik GmbH

benötigt jedoch die Anwendung eines Festkörperelektrolyten und stellt in Kombination mit den nickelreichen Kathoden und Lithium-Metall-Anoden die höchsten volumetrischen Energiedichten dar. [4], [5] Dieser Zelltyp wird auch Festkörperbatterie genannt, da keine Flüssigkomponente mehr enthalten ist [1]. Die neuen Materialien stellen zunehmend höhere Anforderungen an die Prozessumgebung während der Batteriezellherstellung. Zum Beispiel setzen sich Kathodenmaterialien wie NCM622 aus den Mischverhältnissen Nickel (6), Cobalt (2) und Mangan (2) zusammen, sind aber keine kritische Größe, wie nickelreiche Lithium-Ionen- oder Lithium-Metall-Batterien mit der Kathode NCM 811, dessen Nickelanteil bereits 80 Prozent beträgt.

Diese zukünftigen Zellmaterialien stellen Anlagenhersteller vor neue Herausforderungen, um die bestehenden Qualitäts-, Sicherheits- und vor allem Kostenanforderungen gewährleisten zu können. [14], [28] Über 50 Prozent der Treibhausgasemissionen resultieren aus dem benötigten Strombedarf für die Produktion in der Batteriezellherstellung. [6], [7] Davon

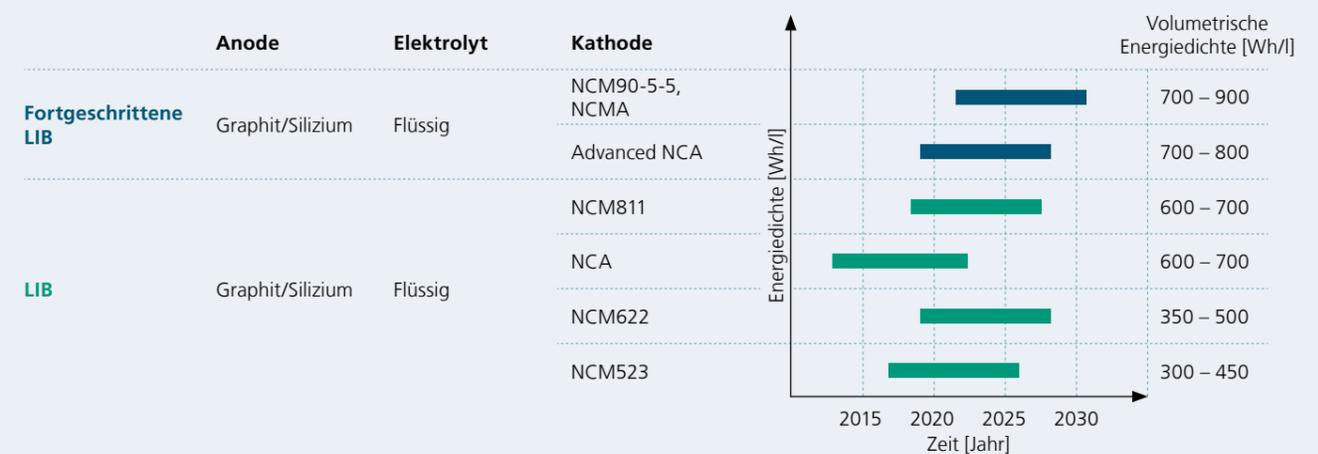
wiederum entfallen etwa 43 Prozent des Energiebedarfs auf die erforderliche Fertigungsumgebung, den Betrieb der Rein- und Trockenräume (RuT) [8]. Daher wird verstärkt nach Einsparpotenzialen und Effizienzstrategien in der Herstellung gestrebt. Neben den Bemühungen nach kostengünstigeren Batterien ist auch die ökologische Nachhaltigkeit ein forderndes Kriterium, sei es in gesellschaftlicher Hinsicht oder bezüglich verschärfter Gesetzgebung. Entsprechend sehen sich Hersteller gefordert, die globalen Ressourcen zu schonen [29].

Insbesondere im Hinblick auf den weltweiten Ausbau der Produktionskapazitäten müssen technologische Innovationen zu einer kostengünstigen und ressourcenschonenden Produktion verhelfen. Neue, effektive und effiziente Anlagenkonzepte werden in diesem Whitepaper als Lösungsstrategie für die Zellfertigung vorgestellt und analysiert.

Abbildung 1-1: Prognostizierte Nachfragesteigerung von LIB-Zellen bis 2030 i. A. a. [4]



Abbildung 1-2: Erhöhung der volumetrischen Energiedichte in zukünftigen Zellchemien [4]



2. Grundlagen und Stand der Technik

Von kleinsten mobilen Anwendungen bis hin zu Traktionsbatterien hat sich die LIB-Technologie durchgesetzt. Dabei werden verschiedene Zellformate eingesetzt, die bei den jeweiligen Anforderungen die besten Eigenschaften mitbringen. Wie Abbildung 2-1 zeigt, wird typischerweise zwischen Rundzellen, prismatischen Hardcasezellen und Pouchzellen unterschieden.

Die Batterieherstellung ist durch eine komplexe Prozesskette gekennzeichnet, welche sich je nach Batterieformat teilweise unterscheidet. Abbildung 2-2 zeigt den vereinfachten Fertigungsprozess von der Materialbereitstellung bis hin zur funktionsfähigen Batterie. Unterteilt wird die Prozesskette in drei Hauptfertigungsabschnitte: Elektrodenfertigung, Assemblierung und Zellfinalisierung. Die Elektrodenherstellung besteht aus einem Trocken- und einem Nassmischprozess, in dem die Komponenten zu einer Paste (Slurry) aufbereitet werden. Die Stromabnehmerfolien werden mit dieser Paste beschichtet, anschließend getrocknet und im Kalandrierprozess verdichtet. Nach dem Zuschneiden der Elektrodenfolien auf das spezifische Zellformat (Slitting) und der finalen Trocknung der Elektroden unter Vakuum, erfolgt die

Zellassemblierung. Innerhalb der Zellassemblierung werden die Batteriekomponenten zu einer funktionsfähigen Batterie montiert. Je nach Zellformat weichen die Assemblierungsprozesse voneinander ab. Die Elektroden (Anode und Kathode) werden zusammen mit weiteren Komponenten, wie bspw. Separatoren und Ableiterfäden in das Gehäuse eingebracht. Anschließend wird die Zelle mit einem Elektrolyten befüllt und verschlossen. Zuletzt folgt der Prozess der Zellfinalisierung, bei dem die Zelle geladent und die Funktionsfähigkeit der Zelle geprüft wird. [9], [10]

Eine essenzielle Anforderung innerhalb der Batterieherstellung ist die reine und trockene Fertigungsumgebung aufgrund der zu verarbeitenden sensiblen Zellmaterialien. Heutzutage erfolgt die Sicherstellung der Umgebungsanforderungen durch die RuT, welche in die Fabrikinfrastruktur integriert werden. Die Reinheit kann mit entsprechenden Filtern verhältnismäßig einfach sichergestellt werden, während die Entfeuchtung der Luft technisch und energetisch deutlich aufwendiger ist.

Abbildung 2-1: Drei Zellformate Rundzelle, Prismatische Zelle, Pouchzelle



Abbildung 2-2: Prozessschritte entlang der Wertschöpfungskette in der Batterieherstellung



Aufgrund der Relevanz dieses Themas wird folgend auf die Feuchte-sensibilität der Zellmaterialien eingegangen. Anschließend werden die Ursachen für die Feuchtigkeit in der Batteriezellproduktion aufgeführt. Die Behandlung der Luft mit Entfeuchtungstechnik wird im letzten Abschnitt dieses Kapitels erläutert.

2.1. Feuchtigkeit in der Lithium-Ionen-Batterieherstellung

Die Zellqualität wird einerseits durch die Fertigungstechnik bestimmt, andererseits aber auch maßgeblich durch die Atmosphärenzustände in der Elektrodenfertigung und Assemblierung bestimmt. Der Feuchte-eintrag kann zu Oberflächenpassivierung und Elektrolytzersetzung führen, wodurch die Leistung der Zelle negativ beeinflusst wird. Das Elektrolyt kann zudem mit der Feuchtigkeit zu toxischer Flusssäure reagieren [11]. Ebenso entstehen in der Zelle eine erhöhte Gasbildung, Degradationseffekte und somit Sicherheitsrisiken für den Betrieb. Eine hohe Bedeutung hat auch die Reinheit in der Zellfertigung, weshalb kontaminations-kontrollierte Wertschöpfung im Vordergrund sicherer und qualitativ hochwertiger Batteriezellen steht.

2.1.1. Feuchteempfindlichkeit heutiger und zukünftiger Zellmaterialien

Die Zellchemie bestimmt die grundlegenden Eigenschaften der LIB. Umso wichtiger ist es, die Materialien gegen negative Einflüsse zu schützen. Bereits heutige Elektrodenmaterialien zeigen bei Kontakt mit Feuchtigkeit einen Einfluss auf die spätere Energiedichte. Flüssigelektrolyte, wie sie heute üblicherweise in der Batterie vorkommen, sind hierbei am empfindlichsten. Selbst kleinste Einträge von Feuchtigkeit führen zur Zersetzung des Elektrolyten und haben erhebliche Einflüsse auf die spätere Lebenszeit und Kapazität der Batterie [12]. Weiterhin kann es zum Aufschwellen und damit zum Verformen der Batterie kommen. Grund dafür sind zwei wesentliche Faktoren: Zum einen absorbieren das Bindemittel und die porösen Strukturen (z. B. Graphit) die Feuchtigkeit, zum anderen besitzt das Elektrodenmaterial eine hohe Reaktionsbereitschaft [13]. Diese Problematik wird sich, wie in Abbildung 2-3 zu sehen, mit zukünftigen Zellmaterialien weiter intensivieren. Daher wird eine zunehmend trockenere Umgebung benötigt. [5], [14], [15] Bestimmte Klassen von Festkörperelektrolyten müssen zu jeder Zeit vollständig feuchtfrei bleiben, da ein Nach-trocknen nicht möglich ist und bereits geringste Wassereinträge zur Entstehung hoch toxischer Gase, wie z. B. Schwefelwasserstoff, führen [16].

Definiert wird die Trockenheit der Atmosphäre über den Taupunkt (TP) eines Gasgemisches (Luft). Der TP ist die Temperatur, bei deren Erreichen die relative Luftfeuchtigkeit 100 Prozent beträgt und die Luft mit Wasserdampf gerade gesättigt ist. Das Wasser würde daher bei weiterer Temperaturabsenkung kondensieren. Abbildung 2-4 zeigt den Wassergehalt der Luft in Abhängigkeit der Temperatur. Aufgrund der hochsensiblen Materialien gegenüber Wasser ist das Bestreben in der Batterieherstellung sehr geringe TP zu erreichen. Bereits bei LIB gemäß Stand der Technik werden TP bis zu -40 °C in der Fertigung vorgehalten. Darüber

Abbildung 2-3: Steigende Feuchtesensibilität der Zellmaterialien, i. A. a. [3]

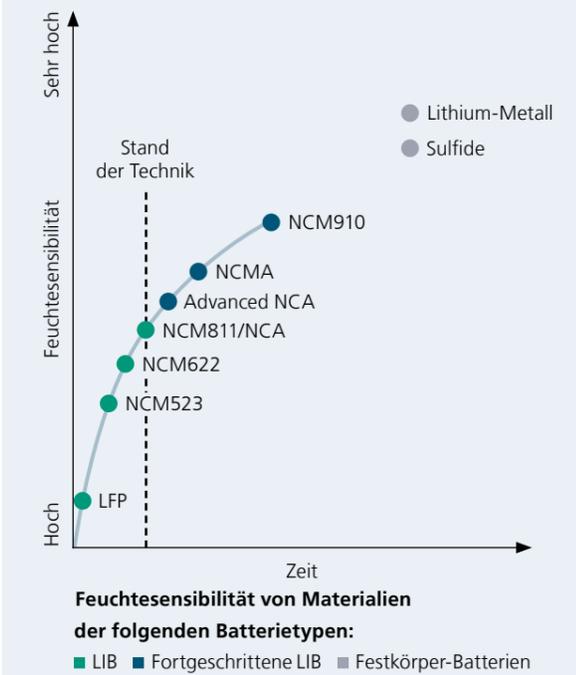
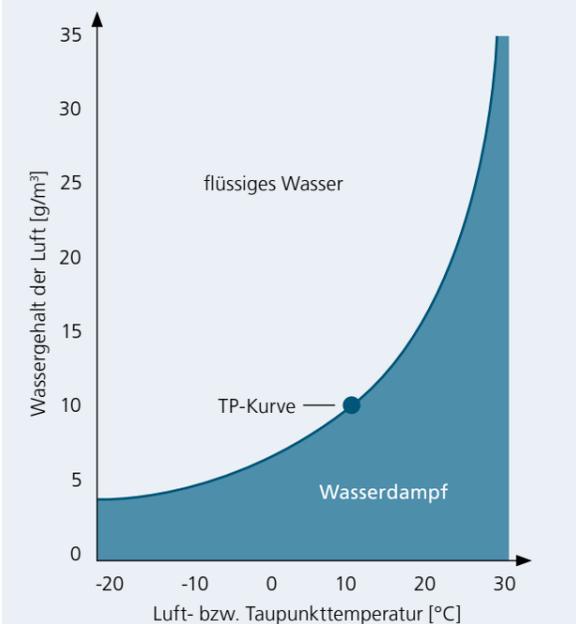


Abbildung 2-4: Temperatur-Feuchtigkeits-Diagramm für Luft

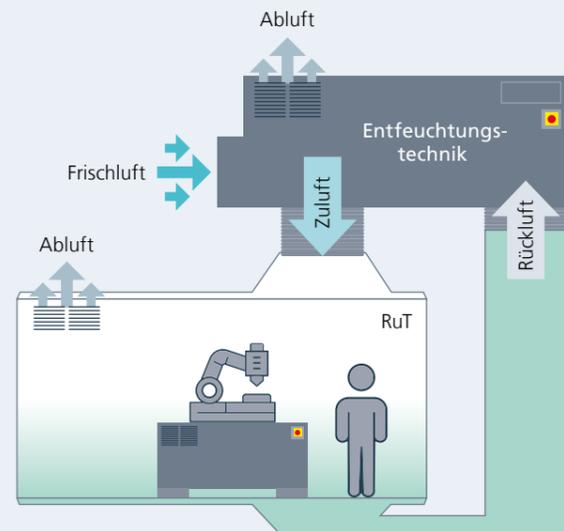


hinaus können TP-Temperaturen von -60 °C bei bspw. nickelreichen Kathoden und Festkörperbatterien notwendig sein. Durch die erhöhten Anforderungen an die Produktqualität für kritische Anwendungsbereiche steigen gleichzeitig die Anforderungen an die Fertigungsumgebung.

2.1.2. Ursachen für den Feuchteintrag in der Batteriezellproduktion

Feuchtigkeit kann über mehrere Wege in die Batteriezellproduktion gelangen. Um unter möglichst geringem Energieverbrauch den erforderlichen TP zu halten, sollte der Feuchtigkeitseintritt präventiv vermieden werden. Die größte Feuchtebelastung geht vom Menschen aus und stellt für den Prozess eine kritische Feuchtigkeitsquelle dar. Durch ihre Atmung, Transpiration oder durch Feuchtigkeit in der Kleidung wird Wasser an die Umgebung abgegeben. Insbesondere stellt der lokale Feuchteinfluss durch Ausatmen in der Produkt- bzw. Prozessumgebung eine kritische und unkontrollierbare Größe dar. Die Feuchtelasten durch Menschen in der Batteriezellfertigung lassen sich mit durchschnittlich 110 g/h annehmen [17] aber können je nach Arbeitsbelastung variieren. Ein weiterer Eintrag von Feuchtigkeit findet durch Schleusen statt und dem damit verbundenen Personen- und Materialtransfer. Schleusen bilden die Verbindung zwischen zwei unterschiedlichen Atmosphärenbedingungen und vermeiden trotz notwendiger Logistikvorgänge die direkte Vermischung der Gase. Jedoch tragen die von außen eingeschleusten Materialien und Personen die Restfeuchte in den trockeneren Bereich. Ein weiterer Faktor für den Feuchtigkeitseintrag ist die

Abbildung 2-5: Schematische Darstellung eines Rein- und Trockenraums mit Entfeuchtungstechnik



Undichtigkeit der Raumpaneele, welche als Folge von mechanischen Schnittstellen, wie sie z. B. bei Schleusen, Türen oder Durchführungen von elektrischen Leitungen und Rohrleitungen zu finden sind. Je nach Druckniveau innerhalb der Prozessatmosphäre tritt entweder aufwendig aufbereitete trockene Luft aus dem Raum aus oder es tritt feuchte Luft in den trockenen Raum ein. Die verwendeten Paneel-Materialien für die RuT-Infrastruktur und deren Eigenschaft als Wasserdampfdiffusionsbarriere stellen eine vernachlässigbare Feuchtigkeitsquelle dar [18].

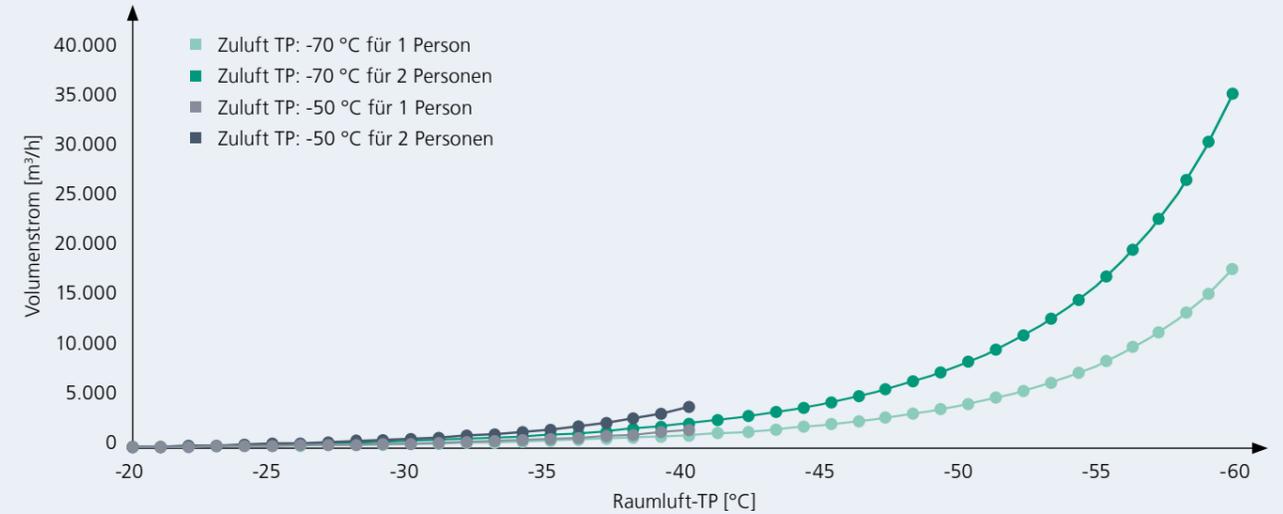
2.2. Bisherige technische Lösungen für die Luftbehandlung und -regulierung

Der Einsatz von RuT in der Batterieproduktion ist erforderlich, um eine Kontamination der Zellmaterialien aufgrund zu hoher Luftfeuchtigkeit und Partikelverunreinigung vorzubeugen. Für die Planung und Auslegung von Batteriefabriken ist es daher essenziell, die Entfeuchtungsprozesse sowie die dafür erforderlichen Anlagen und Peripherien zu berücksichtigen und in die Fabrikinfrastruktur zu integrieren.

2.2.1. Rein- und Trockenräume

Nach dem Stand der Technik erfolgt die Batterieproduktion in RuT. Sie sind weitestgehend hermetisch dicht und trennen somit die innere von der äußeren Atmosphäre ab. So kann die für die Batteriezellproduktion erforderliche saubere und trockene Atmosphäre aufrechterhalten werden. Innerhalb des RuT befinden sich sowohl die Produktionsanlagen als auch Personen, die die Anlagen bedienen. Produktionsmaterial und Mitarbeitende gelangen durch die Schleusen in den RuT. Die trockene Atmosphäre wird durch Entfeuchtungstechnik erzeugt. In Abbildung 2-5 ist der Zusammenhang zwischen dem RuT und der Entfeuchtungstechnik dargestellt. Die Entfeuchtungsanlagen saugen Frischluft aus der Umgebung und Rückluft aus dem RuT an. Diese Luft wird getrocknet und als Zuluft dem RuT wieder zugeführt. Bei der Fertigung von Batteriezellen entsteht verunreinigte Luft, welche als Abluft aus dem RuT geleitet werden muss. Eine weit verbreitete Technologie zur Entfeuchtung der Luft ist die Trocknung mittels Adsorptionstrockner. Dabei wird ein Adsorptionsrad, z. B. bestehend aus Silicagel, verwendet [19]. Durch einen Teil dieses Rads strömt die zu entfeuchtende Luft. Das Silicagel adsorbiert das Wasser und trocknet somit die Luft. Ein weiterer hochtemperierter Luftstrom strömt durch eine andere Stelle des Adsorptionsrads und trocknet wiederum das Silicagel. Dieser Luftstrom verlässt als Abluft die Entfeuchtungstechnik. Da sich das Adsorptionsrad dreht, wird kontinuierlich eine andere Stelle des Rotors regeneriert. Für den Regenerationsprozess sind hohe Temperaturen und somit sehr hohe Energiebedarfe erforderlich.

Abbildung 2-6: Modellrechnung des Zuluftvolumenstroms in den Rein- und Trockenräumen in Abhängigkeit vom Raumlufttaupunkt und der Feuchtelast (pro Person 110 g/h)



2.2.2. Auswirkungen auf Energiekosten und Prozesstechnik

Die Auslegung der Entfeuchtungsanlagen hängt maßgeblich von der geforderten Trockenheit und der Feuchtelast ab. In Abbildung 2-6 ist der Zusammenhang zwischen dem Raumluft-TP und dem Volumenstrom durch die Entfeuchtungsanlage dargestellt.

Deutlich erkennbar ist die exponentielle Zunahme des Volumenstroms mit sinkendem Raumluft-TP. Wird beispielsweise der TP von -40 °C auf -60 °C gesenkt, erhöht sich der benötigte Volumenstrom um mehr als das 15-Fache. Dieser wird benötigt, um den erforderlichen TP trotz der Feuchtelast halten zu können. Bei dieser Modellrechnung ist angenommen worden, dass der Zuluftvolumenstrom in den RuT jeweils einen TP von 10 °C unter dem Raumluft-TP liegt, also bei -50 °C beziehungsweise -70 °C. Bei der Anlagenauslegung muss also ein 15-facher Volumenstrom bei zeitgleich niedrigerem Zuluft-TP berücksichtigt werden. Dieser enorme Mehraufwand bei niedrigeren geforderten TP ist eine Herausforderung für die Produktion zukünftiger Zell-Designs. Für die Feuchtelast wird zum Vergleich mit einer und mit zwei Personen gerechnet. Jede Person hat eine angenommene Feuchteabgabe von 110 g/h. Zu erkennen ist, dass sich mit doppelter Personenanzahl auch der erforderliche Volumenstrom verdoppelt. Es wird mit zunehmend geringerem TP immer wichtiger, die Feuchtelasten so weit wie möglich zu reduzieren, um die Investitionen und Betriebskosten zu minimieren. [2], [13]

»Bei den heutigen Trockenräumen in einer Batterie-zellfertigung, die nahezu 50 Prozent der gesamten Fertigungsfläche ausmachen, sind sowohl der Invest als auch die Betriebskosten sehr hoch. Die trockene Luft wird allerdings lediglich direkt am Produkt benötigt. Deshalb sehen wir bei der Batterie-zellfertigung eine ähnlich Entwicklung, die bei der Halbleiterfertigung bereits vor ca. 30 Jahren begonnen hat: Die Prozessierung des Produktes in sogenannten »Mini- oder Makro-Environments« und dazugehörige Transportboxen.«

Dr. Klaus Eberhardt
Exyte Management GmbH

2.3. Zwischenfazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zukünftige Batterien leistungsfähiger, aber auch feuchteempfindlicher werden. An die Batterie-zellfertigung sowie Entfeuchtungstechnik werden erhöhte Anforderungen gestellt. Allerdings stoßen Prozess- und Produktionstechniken an ihre technischen Grenzen. Eine bedeutende Forschungs- und Entwicklungsaufgabe ist der Aufbau einer energie- und ressourceneffizienteren Produktionsinfrastruktur gegenüber dem Stand der Technik. Hierdurch ergeben sich neue Aufgabenstellungen insbesondere für den Maschinen- und Anlagenbau, welcher durch neue Lösungsansätze die erschwerten Anforderungen zu erfüllen hat.

3. Prozessnahe Einhausungen – Herausforderungen und Chancen in der Batteriezellfertigung

Kapitel 3 umfasst die Definition und Beschreibung unterschiedlicher Environments in der Batteriezellfertigung, stellt die Komplexität sowie die Chancen aus techno-ökonomischer Sicht dar und beschreibt den Anwendungsfall von »Mini- und Makro-Environments« in der Fraunhofer FFB. Im Kapitel 3.1 erfolgt die Herleitung unterschiedlicher Environment-Konzepte und deren Definition basierend auf der bestehenden Literatur. Mithilfe von Differenzierungsmerkmalen werden die Systemgrenzen von vier unterschiedlichen Environments definiert. Anhand von drei typologischen Merkmalen werden die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Ausprägungen abgeleitet. Aufbauend auf der Definition werden zu jeder Ausprägung Beispiele skizziert und beschrieben. Darauf folgend werden die Herausforderungen und Chancen von neuartigen Environment-Konzepten in Kapitel 3.2 hervorgehoben. Neben der Auflistung von technischen Anforderungen werden zudem wirtschaftliche Analysen anhand definierter Szenarien vorgestellt. Kapitel 3.3 beschreibt die erstmalige Umsetzung eines »Mini-Environment-Konzepts« in der Fraunhofer FFB. Das geplante Clusterkonzept für die Zellassemblierung der Rundzelle 21700 in der »FFB Fab« wird abschließend vorgestellt und erläutert.

3.1. Verständnis und Umsetzung von Environments

Innerhalb technischer Bereiche mit besonderen Anforderungen an die Fertigungsumgebung (Environment) beschreibt der Begriff »Mini-Environment (MiE)« eine begrenzte, abgetrennte Produktumgebung zum Schutz des Produkts vor Kontamination [20]. Die räumliche Abgrenzung wird durch physische Barrieren geschaffen. Innerhalb dieser Umgebung ist das Ziel, Produkte vor möglichen Kontaminationen wie z. B. Fremdpartikeln, Feuchtigkeit oder Wärme zu isolieren und damit optimale Produktionsbedingungen zu schaffen. Im Bereich der Batteriezellfertigung bestehen Definitionslücken und Unklarheiten innerhalb der gängigen Begrifflichkeiten zur Einkapselung der Produkt-, Prozess- bzw. Produktionsumgebung. Insbesondere existieren im sprachlichen Gebrauch voneinander abweichende Interpretationen der gängigen Begrifflichkeiten. Neben den bereits beschriebenen MiE werden u. a. Definitionen wie RABS (Restricted Access Barrier Systems), Isolator, Mikro-, Meso- oder Makro-Environments verwendet. Aufgrund des Defizits hinsichtlich der Definitionen werden in dieser Veröffentlichung die genannten Begrifflichkeiten aus den bekannten Richtlinien und Nachschlagwerken anderer Branchen analysiert, um diese

»Mini-Environments« gelten als hochinnovativer Konzeptansatz in zukunftsorientierten Anlagen zur Erforschung und Herstellung von Batteriezellen. Im Vergleich zu herkömmlichen Technologien, wie zum Beispiel Trockenräumen, gelingt es, entscheidende Parameter zu optimieren. Dazu zählen für uns vor allem: Die signifikante Senkung der Betriebskosten durch einen geringen Strombedarf und die Möglichkeit, die Anlagen in normalen, bestehenden Fertigungsumgebungen zu installieren, da kein Trocken- oder Reinraum benötigt wird. Doch auch die Mitarbeitenden sind geschützt, da sie durch die hermetische Kapselung im Fertigungsprozess nicht in Kontakt mit potentiell schädlichen Stoffen kommen. Weiterhin ist es möglich, die Anlagen sehr kompakt zu bauen, so dass nur ein Minimum an Platzbedarf benötigt wird. Für uns sind Mini-Environments die Anlagen der Zukunft.«

Ferdinand Schmitt
M. Braun Inertgas-Systeme GmbH

auf neuartige Anlagenkonzepte für die Batteriezellfertigung zu adaptieren. Der Begriff »Mini-Environment« (lateinisch minimus = sehr klein) wurde bereits in der VDI-Richtlinie 2083 Blatt 16.2 [20] definiert. Daher wird im Sprachgebrauch der weit verbreitete Begriff »Mikro-Environment« nicht weiterverfolgt und durch das gleichbedeutende MiE ersetzt. In Anbetracht der Differenzierung über das Gesamtsystem wird das »Makro-Environment (MaE)« eingeführt (griechisch makros = groß) und stellt eine Zwischenlösung von MiE und RuT dar. Die Fraunhofer FFB definiert in der Batteriezellfertigung die folgenden vier Environment-Konzepte:

- Rein- und Trockenraum (RuT)
- Mini-Environment (MiE)
 - aktiv
 - passiv
- Makro-Environment (MaE)

Die definierten Ausprägungen können sich gemäß Differenzierungsmerkmalen eindeutig voneinander abgrenzen. Zudem lassen sich weitere typologische Merkmale für die unterschiedlichen Umgebungsausprägungen ableiten, welche mit den einzelnen Konzepten einhergehen. Das übergeordnete Ziel ist die Etablierung einer einheitlichen Begriffsdefinition im Bereich der Batteriezellfertigung für Forschung und Industrie.

Mithilfe von Abbildung 3-1 lässt sich durch die zwei wesentlichen Differenzierungsmerkmale, Barriersystem, Umfang der Einhausung sowie deren Ausprägungen, eine klare Definition und somit eine Abgrenzung für die jeweilige Environment-Ausprägungen herleiten. Angelehnt an die Elemente eines Produktionssystems nach Westkämper [21] werden die möglichen Einhausungsumfänge abgeleitet. Die physikalischen Elemente eines Produktionssystems sind u.a. Mensch, Material, Fertigungsmittel sowie Lager- und Transportmittel.

Abbildung 3-1: Differenzierungsmerkmale zur Definition der Environment-Ausprägungen in der Batteriezellfertigung

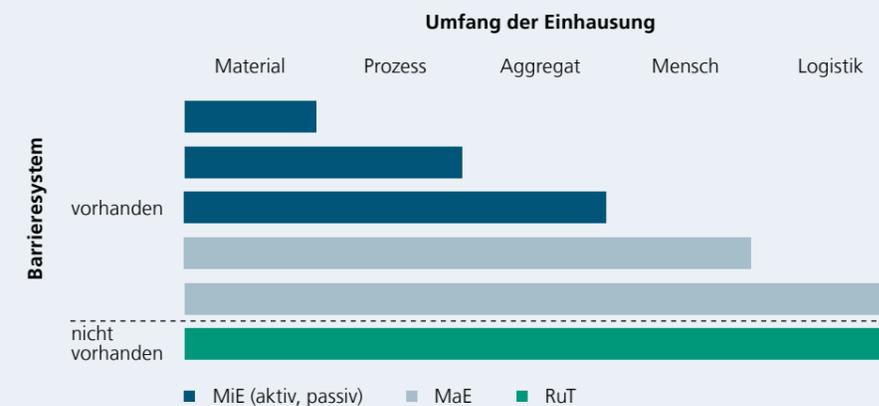
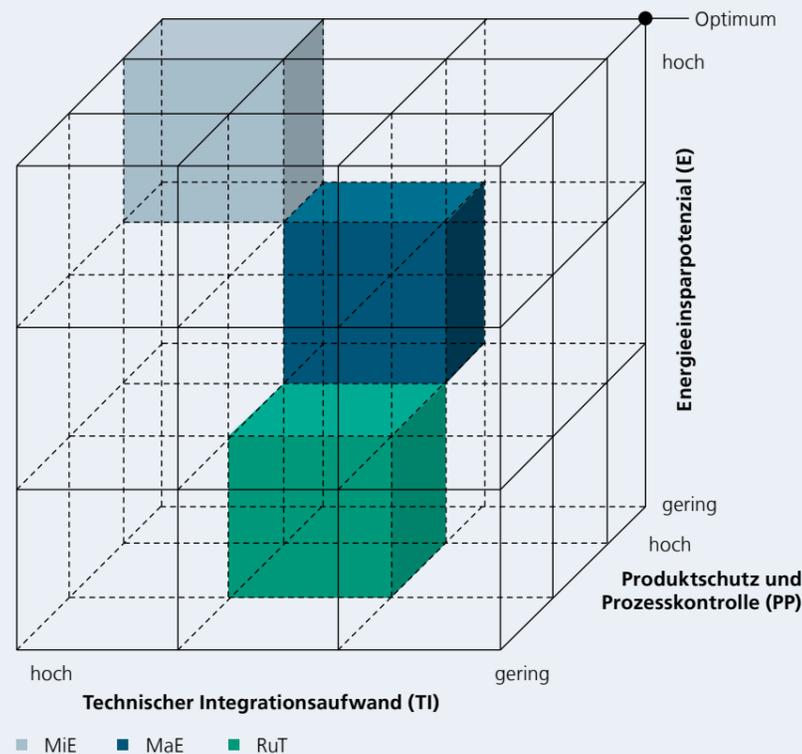


Abbildung 3-2: TIPPE-Würfel zur Darstellung der typologischen Merkmale unterschiedlicher Environment-Konzepte in der Batteriezellfertigung



»In der Batteriezellproduktion sind Umweltbedingungen ein entscheidender Faktor für die Qualität der Batterien und die damit verbundene Produktionssicherheit. Je nach Zellchemie werden Trockenraumbedingungen bis zu inerten Atmosphären bei der Zellaassemblierung oder einzelnen Prozessschritten benötigt. Aktuell wird die Trockenraumatmosphäre kostenintensiv mittels Trockenräume umgesetzt. Mit der zunehmenden Standardisierung der Produkte und Prozesse lohnt sich klar/eindeutig der Umstieg auf das/die nachhaltigeren und wirtschaftlicheren/kostenreduzierenden Mini-Environments.«

Dr.-Ing. Rolf Jungnickel
Jonas & Redmann
Automationstechnik GmbH

Beim Fertigungsmittel wird folgend noch einmal zwischen Aggregaten und Prozessen differenziert. Die Tabelle zeigt den Umfang der Einhausung. So wird beispielsweise das aktive MiE als Einhausung verstanden, das durch aktive Belüftung speziell konditionierte Prozessbedingungen schafft. Die Umfänge der Einhausung beschränken sich hierbei auf das Produkt, den Prozess und das Aggregat. Die abgetrennte und begrenzte Produktumgebung schützt zudem das Produkt vor Verunreinigungen. Die Positionierung von wärme-, feuchte- oder partikelemittierenden Aggregaten (Peripherie, Betriebsmittel) außerhalb der Einkapselung minimiert Störquellen innerhalb des Prozessraums. Passive MiE werden in der Batteriezellfertigung hauptsächlich für den Produkttransport genutzt. Die Einhausung hat keine aktive Luftversorgung [20]. Die Abgrenzung des RuT erfolgt ebenfalls über physikalische Barrieren (Paneele) und beinhaltet eine offene Produktion nach dem Stand der Technik. Die Integration und Nutzung der lokalen Einhausung einzelner Prozesse ist weiterhin möglich. Für den Fall der Einhausung im MaE ist mindestens ein kontinuierliches Barriersystem zwischen einem oder mehreren Elementen vorgesehen. Dies erfolgt meist zur Abgrenzung des Menschen vom Prozess

zur Aufrechterhaltung unterschiedlicher Atmosphärenniveaus. Die Barrierearten sind je nach Anwendung und Anforderung in Anlehnung an VDI 2083 Blatt 16.1 [22] umzusetzen.

Abbildung 3-2 zeigt drei entscheidende typologische Merkmale und deren Ausprägungen mithilfe des hier aufgestellten TIPPE-Würfels. Die drei wesentlichen Eigenschaften Technischer Integrationsaufwand (TI), Produktschutz und Prozesskontrolle (PP) sowie Energieeinsparpotenzial (E) werden hierbei zur Gegenüberstellung der Environments herangezogen. Durch die 3x3x3-Darstellung erfolgt die Bewertung und somit der Vergleich in drei Stufen. Ebenso lässt sich eine techno-ökonomische Korrelation der drei Merkmale erkennen. So besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen dem technischen Integrationsaufwand und den Investitionen, Energieeinsparpotenzial und Betriebskosten sowie Produktschutz und Prozesskontrolle und Qualitätsrate.

Aus der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Ausprägungen lässt sich ableiten, dass sowohl das MiE als auch das MaE bessere techno-ökonomische Eigenschaften



Die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFb entwickelt, realisiert und erforscht unterschiedliche Environment-Konzepte, um technische und ökonomische Potenziale durch innovative Lösungsansätze auszuschöpfen. Durch die enge Zusammenarbeit von Forschung und Industrie gelingt die Wende zur ökonomischen und ökologischen Batteriezellfertigung der Zukunft.

gegenüber konventionellen RuT besitzen. Das Ausschöpfen des Produktschutzes, der Prozesskontrolle und des Energieeinsparpotenzials erfordert einen hohen technischen Integrationsaufwand, um Fertigungsumgebung und Prozesstechnologie in einem Anlagenkonzept zu vereinen. Der daraus resultierende technische Integrationsaufwand nimmt ebenso direkten Einfluss auf die Erhöhung der Investitionen. Unter Berücksichtigung hochautomatisierter und komplexer Wertschöpfungsprozesse, insbesondere in der Zellaassemblierung, gilt es geeignete Anlagenkonzepte zu identifizieren. Durch die Optimierung von MaE können weitere Einsparpotenziale erzielt werden, während das Ziel für MiE die Reduzierung der technologischen Komplexität ist. Nachfolgend werden die unterschiedlichen Environment-Konzepte näher erläutert sowie deren Vor- und Nachteile für den Einsatz in der Batteriezellfertigung hervorgehoben.

3.1.1. Rein- und Trockenraum

RuT entsprechen dem Stand der Technik in der Fertigung von LIB und sind die größtmögliche Ausbaustufe zur Sicherstellung der Atmosphäre in der Produktionsumgebung. [23], [24] Der Einhausungsumfang des konventionellen RuT umfasst alle mit der Produktion zusammenhängenden Komponenten. Neben Produkt und Prozess befinden sich der Mensch und die Logistik im RuT. Demnach existiert keine Abtrennung der Atmosphäre innerhalb des Produktionssystems zur Fertigung der (Zwischen-)Produkte. Einkapselungen, wie z.B. für die Elektrolytbefüllung oder weitere lokale Einhausungen, können sich ebenfalls im RuT befinden. Durch die direkte Zugänglichkeit zum Prozess stellen nicht nur die Prozesse selbst, sondern auch Menschen eine lokale Kontaminationsquelle dar. Des Weiteren sind aufgrund des Feuchteinflusses durch den Menschen

Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines Rein- und Trockenraums in der Batteriezellfertigung

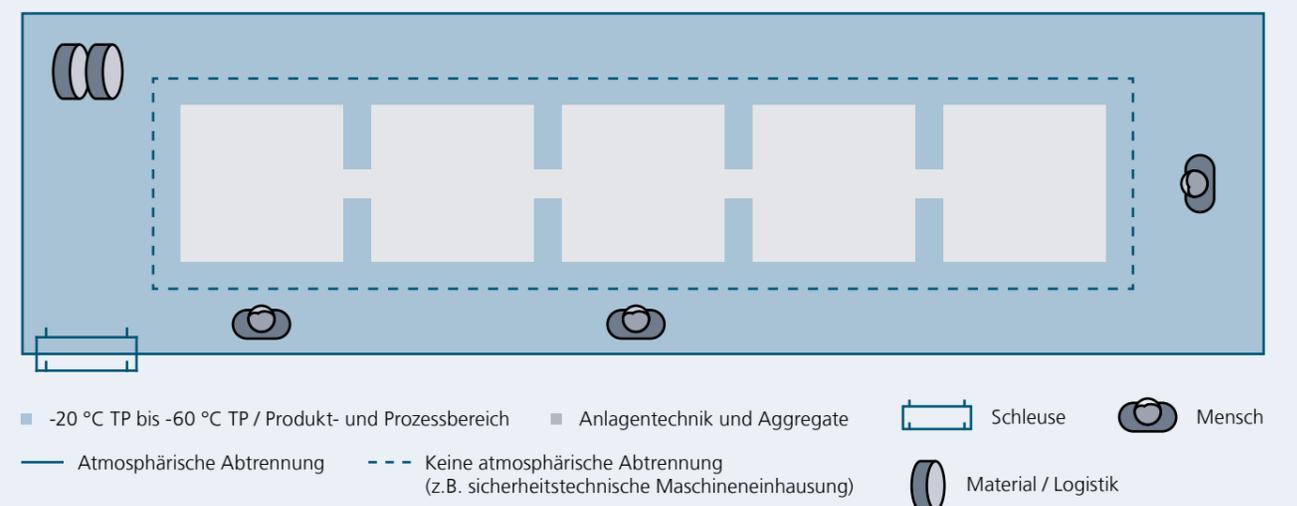
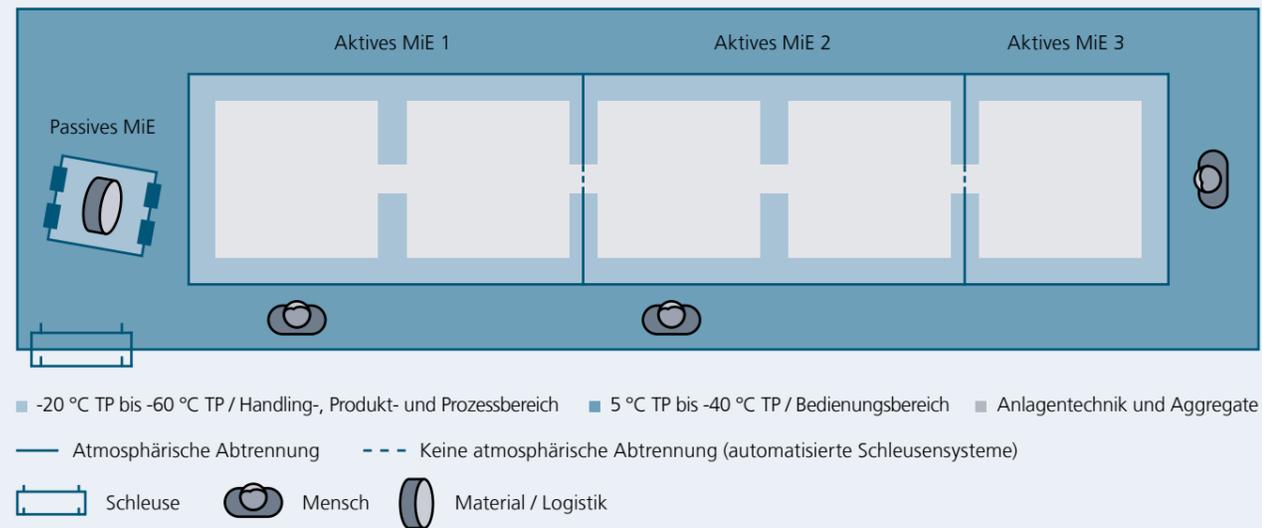


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung eines Mini-Environments in der Batteriezellfertigung



bei niedrigen TP enorme Energieaufwände erforderlich. Die Belastung für den Menschen durch die trockene Atmosphäre nimmt mit höheren TP-Anforderungen ebenfalls zu, wodurch die Arbeitsbedingungen erschwert werden. Zudem ist aus betrieblicher Sicht die Größe der Einkapselung eine Herausforderung, den Prozess auf spezifische Produktanforderungen anzupassen. Zusammengefasst bergen die RuT aus technökonomischer Sicht hohe Optimierungspotenziale.

3.1.2. Mini-Environment

MiE sind vereinfacht beschrieben als RuT zu verstehen und haben die gleiche Funktion. Allerdings wird über den Umfang der Einhausung sowie der vorhandenen Barriere (physikalisch, aerodynamisch) differenziert (vgl. Abbildung 3-4). Das MiE lässt sich gemäß VDI 2083 BLATT 16.2 [20] in zwei Typen unterteilen. Zum einen wird das passive MiE als direkte Produkteinhausung definiert, welche durch eine Einkapselung das Produkt schützt und vor äußerlichen Einflüssen abtrennt [20]. Zum anderen wird das aktive MiE als Produkt- und Prozesseinhausung definiert, welches durch Luft- beziehungsweise Schutzgasströmungen speziell konditionierte Prozessbedingungen schafft. Die Ausführungsformen können hierbei basierend auf der zuvor genannten VDI-Norm [20] unterschiedlich ausfallen. Integrierte MiE sind dauerhaft mit der Fertigungseinrichtung verbunden und bilden somit einen festen Bestandteil des Gesamtanlagenkonzepts. Ist von einem adaptierten MiE die Rede, so ist das

MiE nicht fest mit der Fertigungseinrichtung verbunden und kann damit einfach demontiert werden. In Form von Retrofit-Methoden können die Potenziale bestehender Anlagentechnik ausgeschöpft werden. Des Weiteren ist die Ausführung von Anlageneinhausungen als aktives MiE zu verstehen. Eine weitere Möglichkeit bei der Ausgestaltung eines Lüftungskonzeptes für das aktive MiE ist die Verfolgung eines Ansatzes des »Point of Use« (POU). Der POU wird als unmittelbare Prozessumgebung um das zu fertigende Produkt und Halbzeug definiert, innerhalb dessen die geforderten Parameter einzuhalten sind [20]. Daneben können durch die Reduzierung der TP-Differenzen benachbarter Räume die lokalen Verunreinigungseffekte minimiert werden.

3.1.3. Makro-Environment

Das MaE ist branchenübergreifend noch nicht eingeführt beziehungsweise ausreichend definiert. Im sprachlichen Gebrauch wird der Begriff insbesondere in der LIB-Zellfertigung genutzt. Aufgrund mehrerer Randbedingungen und Größen, die Einfluss auf das MiE nehmen, ist das neue Anlagenkonzept als intelligente Zwischenlösung von RuT und MiE zu verstehen. Insbesondere in Anbetracht großindustrieller Fertigungsstraßen können sich MaE als prozesssichere und energiesparende Zwischenlösung erweisen. Durch MaE gelingt die Verbesserung der Arbeitsbedingungen für die Mitarbeitenden sowie die Sicherstellung der Atmosphärenstabilität

Abbildung 3-5: Beispielvariante I: Schematische Darstellung eines Makro-Environments in der Batteriezellfertigung

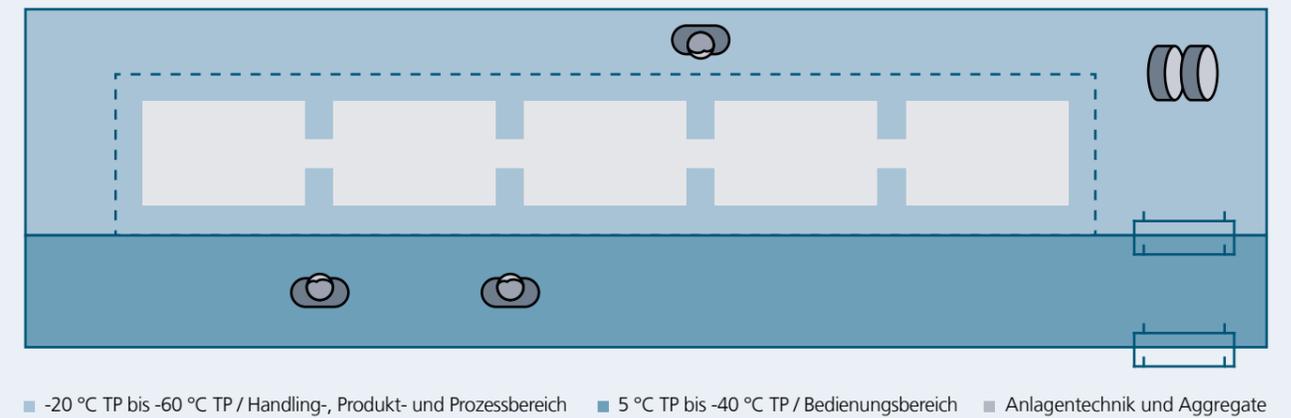
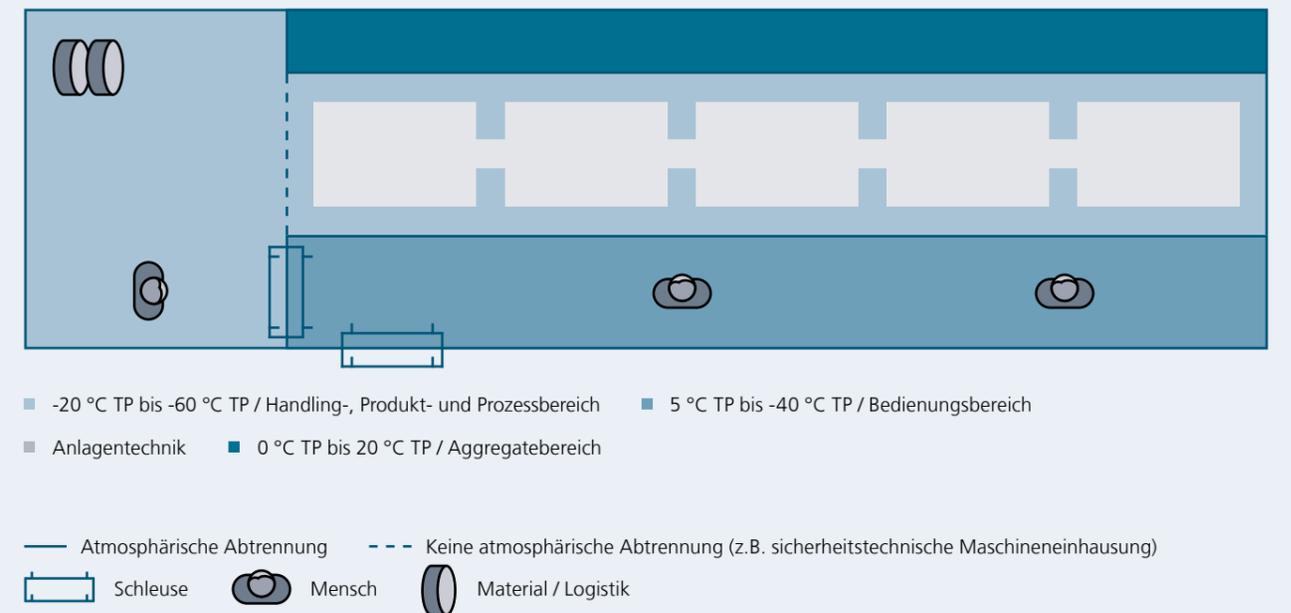


Abbildung 3-6: Beispielvariante II: Schematische Darstellung eines Makro-Environments in der Batteriezellfertigung



im Produkt- und Prozessbereich. Die Mitarbeitenden müssen nur in kritischen Fällen, wie Störfallbehebung oder Wartung, in den Prozessbereich eintreten. Vereinfacht lässt sich sagen, dass ein gesonderter Bedienungsbereich mit feuchteren Umgebungsbedingungen für den Menschen vorgehalten wird. Außerdem wird dem Menschen weiterhin die Möglichkeit zum direkten Prozesseingriff über integrierte Schleusensysteme und ergonomische Vorräume gegeben. Allerdings werden die Gewerke von Anlagenbau und Klimatechnik gegenüber

RuT in einem Gesamtsystem miteinander vereint und als vollständiges Anlagenkonzept umgesetzt. Gerade in Anbetracht der Feuchtigkeitsdiffusion und der damit zusammenhängenden Wiederaufbereitung der Umgebung erweist sich das Konzept als vorteilhaft gegenüber herkömmlichen RuT. Die konstruktive Umsetzung eines sogenannten Druckstufenprinzips ermöglicht die etappenweise Absenkung der Atmosphärenanforderungen bei unterschiedlichen Prozessbedingungen.

3.2. Herausforderungen und Chancen

Das Verfolgen neuer Konzepte für Fertigungsumgebungen von RuT birgt neue Anforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau. Gleichzeitig eröffnen die Konzepte neues Innovationspotential, um die Energieeffizienz der Anlagen zu steigern und Kosten zu senken. Für die Umsetzung von Environments werden nachfolgend Einflussgrößen aufgezeigt, welche die Umsetzung des Gesamtsystems aus technischer Sicht erschweren. Auf Grundlage von verschiedenen Szenarien wird eine techno-ökonomische Bewertung der neuen Anlagenkonzepte durchgeführt und mit einem konzeptionellen Anlagenentwurf der Fraunhofer FFB veranschaulicht.

3.2.1. Relevante Einflussgrößen auf das Environment-Konzept

Es wurde bereits herausgearbeitet, dass die Alternative zu den kostenintensiven RuT das MiE- beziehungsweise MaE-Konzept darstellt. Dennoch werden diese Konzepte in der Batteriezellfertigung bisher kaum angewendet. Die bestehenden Herausforderungen für den Aufbau und den funktionsfähigen Betrieb einer energieeffizienten und qualitätsorientierten Einkapselung zeigt vereinfacht Abbildung 3-7. Die möglichen Einflussgrößen auf das Environment-Konzept in der Batteriezellfertigung werden in sechs Hauptursache-Kategorien: Prozess, Material, Umgebung, Maschine, Methode und Mensch, gegliedert.

Die sechs identifizierten Haupteinflussgrößen stellen einerseits große Problemstellungen für die Umsetzung lokaler Environments dar, andererseits ermöglichen sie auch Chancen zur Umsetzung eines effizienten und effektiven Systems. Ziel ist es, mögliche Fehler bereits frühzeitig zu erkennen, um die Funktion und Sicherheit sowie eine hohe Produkt- beziehungsweise Prozessqualität gewährleisten zu können. Anhand dieser Ausarbeitung können im Vorfeld mögliche Verbesserungs- oder Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, um den Aufbau des MiE-Konzepts umzusetzen. Beispielsweise ist der Recovery-Prozess (Wiederherstellung der atmosphärischen Ausgangsbedingungen) nach der Verunreinigung durch feuchtere Quellen innerhalb eines lokalen Environments eine unter zeitlichen Parametern zu lösende Aufgabe. Insbesondere unter Berücksichtigung von Hochdurchsatzanlagen sind die Recovery-Zeiten nach dem Produktionsbeziehungsweise Prozesseingriff höchst dynamisch und somit gering zu halten. Prozess- und produktorientierte Einkapselungen bieten die Möglichkeit der Atmosphärenabtrennung, wobei die Entwicklung und Umsetzung einen großen Aufwand erfordern. Die prozessorientierte Atmosphärenabtrennung ermöglicht die Vermeidung von Partikel- und Feuchtigkeitsverteilungen entlang der Wertschöpfungskette. Der Mensch und dessen weiterhin erforderlicher Prozesseingriff ist eine weitere Herausforderung für die lokalen Environments. Die Beachtung von effizienten und ergonomischen Eingriffsmöglichkeiten unter Einhaltung der Atmosphärenbedingungen ist zentraler Bestandteil bei der Auslegung. Im Gegenzug kann die Umgebung des Arbeitsbereichs für den Menschen angepasst und somit die Arbeitsbedingungen

verbessert werden. Auch die Verkettungsmethoden nehmen erheblichen Einfluss auf das Anlagenkonzept und die Prozessstabilität. Eine beispielhafte Einflussgröße ist das Entfeuchtungssystem, welches sowohl sehr dynamisch ausgelegt, aber auch zur weiteren Energieeffizienzsteigerung im möglichen Teillastbetrieb gefahren werden kann. Gleichbedeutend dazu ist der Aufbau von intelligenter Zustandsüberwachung mit individuell angepassten Steuerungs- und Regelungsstrategien zwischen Produktionssystem und Lufttechnik. Weitere präventiv ausgerichtete Maßnahmen sind auszuarbeiten, um einen effizienten Prozess zu realisieren und mögliche Fehler und Betriebskosten zu senken.

3.2.2. Techno-ökonomischer Vergleich

Für die Zellmontage hat die Fraunhofer FFB ein innovatives Anlagenkonzept ausgearbeitet. Die Abbildung 3-8 zeigt schematisch die Vereinzelnungsprozesse für Anode und Kathode sowie das kontinuierliche Stapeln der Elektrodenblätter, verkettet durch quasi-kontinuierliche Transfersysteme inklusive Bypass. Ausgeführt ist der Anlagenpilot als MaE unter Beachtung der sechs kritischen Haupteinflussgrößen (vgl. Abb. 3-7) auf die Funktionsfähigkeit und Anlageneffektivität. Kritisch sind bei dem Vereinzelnungsprozess die entstehenden Partikel, welche nicht in vor- bzw. nachgelagerte Prozessschritte gelangen sollen.

»Mini-Environments« in Form von Prozesskapselung der Produktionsmaschinen und Produktionsabläufen sparen enorme Betriebskosten bei den Fertigungsprozessen von Batteriezellen ein. Die Aufbereitung von extrem trockenen Prozessluftumgebungen in der Zellfertigung minimiert sich somit um ein Vielfaches im Vergleich zu konventionellen großen Trockenräumen innerhalb der Produktion.«

Frank Schimmelmann
ULT Dry-Tec GmbH

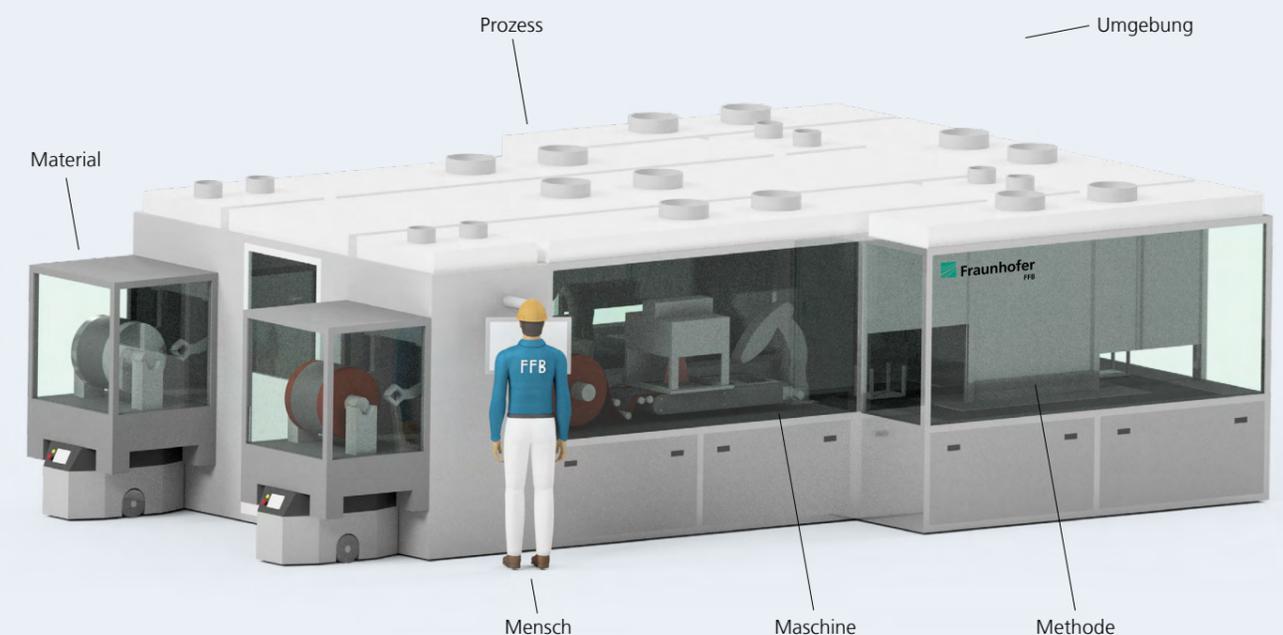
»Mini- bzw. Makro-Environments« können in der Zukunft einen wesentlichen Beitrag zu einer energieeffizienteren Herstellung von Batterien beisteuern. Das Engineering eines solchen Environments bedarf einer intensiven Abstimmung zwischen den beteiligten Parteien. Die Wirtschaftlichkeit sollte zu jeder Zeit geprüft werden, da nicht jedes Environment wirtschaftlich und technisch umsetzbar sein wird.«

André Meyer
Munters GmbH

Abbildung 3-7: Relevante Einflussgrößen auf das Environment-Konzept in der Batteriezellfertigung als Ishikawa-Diagramm



Abbildung 3-8: Konzept eines Anlagenpiloten der Fraunhofer FFB in U-Anordnung als Makro-Environment



»Aktuell setzt die Industrie auf klassische Rein- und Trockenräume. Wenn entsprechende Lösungen gefunden werden, sollte sich die zukünftige Anlagentechnik in Richtung »Mini-Environments« bewegen. Ausentwickelte Mini-Environments können zukünftig flächendeckend Anwendung finden und damit derzeitige Rein- und Trockenräume ablösen.«

Lukas Olbrich
Northvolt AB

Durch innovative Anlagenkonzepte wie in Abbildung 3-8 dargestellt, können wirtschaftliche Potenziale neben den genannten technischen Vorteilen ausgeschöpft werden. Anhand eines spezifizierten Anwendungsfalls basierend auf realen Layoutplanungen wurden drei unterschiedliche Szenarien zur ökonomischen Bewertung der Environment-Konzepte in der industriellen Zellassemblierung gegenübergestellt. Hierbei bildet das Szenario I die LIB-Produktion gemäß dem aktuellen Stand der Technik im RuT bei einem TP von -60 °C ab, in welcher die Fertigung von Batterien der nächsten Generation möglich ist. Während das Szenario II die Produktion in MiE darstellt, beinhaltet Szenario III die Produktion von Batteriezellen mittels einer MaE-Variante. Alle Szenarien basieren auf einer Rundzellmontagelinie von der Wickelanlage bis zum Verschließen der Zelle mit einem Durchsatz von 40 Zellen pro Minute (cpm), welches einer Produktionskapazität von etwa 375 MWh/a entspricht. Tabelle 3-1 zeigt die detaillierte Auflistung der relevanten Produktionsparameter für die drei Produktionsszenarien.

Um die Environment-Konzepte in ihren unterschiedlichen Anwendungsausprägungen untersuchen zu können, dient die techno-ökonomische Bewertung als Grundlage, um zukünftige Entscheidungen hinsichtlich der

Unternehmensstrategie und der Investitionen vergleichbar zu machen. Die wirtschaftliche Gegenüberstellung der unterschiedlichen Environment-Konzepte in Abbildung 3-9 basiert auf den Investitionen und Betriebskosten. Die Betriebskosten wiederum werden aus den Energiekosten abgeleitet und beinhalten keine Wartungs- oder weitere Produktionskosten. Die Investitionen der RuT basieren auf marktüblichen Preisen aus dem Jahr 2022 und umfassen die Entfeuchtungstechnologien sowie die Wandpaneele für die RuT und die dafür vorzusehende Verrohrung. Die Investitionen für die MaE sowie MiE wurden in einem mittleren Bereich angenommen, da die Kosten einer höheren Schwankungsbreite unterliegen. Dies ist auf das jeweilige Anlagenkonzept und dem damit zusammenhängenden technischen Integrationsaufwand zurückzuführen. Mit der Umsetzung prozessindividueller Luftströmungen und der daraus resultierenden Anzahl an Entfeuchtungsaggregaten können die Investitionen für MiE sowie MaE sehr hoch ausfallen. Ebenso nehmen die automatisierten Verkettungs- und Logistikprozesse einen großen Einfluss auf die Investitionen.

Aufwendungen für die Weiterentwicklung von neuartigen Prozesstechnologien können mit erhöhten Entwicklungskosten einhergehen. Langfristig lässt sich jedoch mit der Reduzierung

der Kosten für Forschung und Entwicklung rechnen, wodurch weitere Kostensenkungspotenziale für Anlagenkonzepte ausgeschöpft werden können. Die Betriebskosten resultieren aus den Leistungsdaten marktüblicher Entfeuchtungsanlagen. Auch hier spielt die Auswahl der Entfeuchtungstechnologie eine entscheidende Rolle, welche sich entsprechend auf den Energieverbrauch und somit in den Betriebskosten widerspiegelt (z.B. Molekularsieb, Adsorptionsrad). Für den Anwendungsfall wurden wettbewerbsfähige Systeme berücksichtigt. Die Betriebskostenkalkulation basiert auf 0,21€/kWh sowie bei einer durchschnittlichen CO₂-Bepreisung von 55€/t CO₂ bei einer Nutzungsdauer von zehn Jahren ab dem Jahr 2021 [25].

Abbildung 3-9 zeigt die ökonomischen Einsparpotenziale von bis zu 79 Prozent gegenüber den Fertigungsumgebungen nach dem Stand der Technik unter den angenommenen Produktionsszenarien. Ebenso ist der ökologische Fußabdruck entscheidend, welcher beim RuT mit einem CO₂-Ausstoß von bis zu 33.000t beträgt.

Um die Amortisationszeit aufgrund der erhöhten Investition bei MaE und MiE zu verkürzen, gilt es das techno-ökonomische Optimum für die unterschiedlichen

Produktionsanforderungen entlang der Wertschöpfungskette zu identifizieren. Der TIPPE-Würfel (vgl. Abbildung 3-2) spiegelt die wirtschaftliche Betrachtung wider, da eine Wechselseitigkeit von technischem Integrationsaufwand zu Investitionen, Energieeinsparpotenzial zu Betriebskosten sowie Produktschutz und Prozesskontrolle zu Qualitätsrate besteht.

»Die »Mini-Environments« ermöglichen eine definierte Prozessatmosphäre und bieten aufgrund reduzierter Investitions- und Betriebskosten ein enormes Potenzial für eine wettbewerbsfähige Batterieproduktion in Deutschland und Europa.«

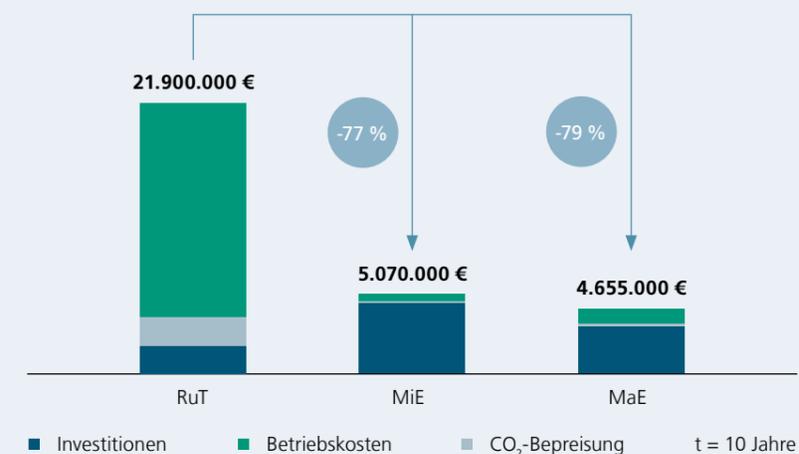
Joachim Szaunig
GROB-WERKE GmbH & Co. KG

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der betrachteten Environment-Konzepte für den optimierten Anwendungsfall einer 40 cpm Rundzellassemblierung

Szenario	Environment-Typ	Produktionsbedingung [°C TP]	Eingehautes Gesamtvolumen [m³]	Gesamtvolumenstrom* [m³/h]
I	RuT	-60	2.080	80.000
II	MiE	-60	180	6.400
III	MaE	Bedienung: -40 Prozess & Logistik: -60	350	11.700

*Annahmen: Maschinenabwärme, Personenanzahl, Leckage, Atmosphärendruck, Intralogistik und Anlageneffektivität

Abbildung 3-9: Kostenbetrachtung der unterschiedlichen Environment-Konzepte für einen Zeitraum von 10 Jahren



3.3. Anwendungsfall der Fraunhofer FFB

Die Fraunhofer FFB plant im Rahmen des Projekts »FoFeBat« (Förderkennzeichen: 03XP0256, 03XP0416, 03XP0501A) den Aufbau von drei Produktionslinien im Industriemaßstab zur Assemblierung von Rundzellen, prismatischen Hardcasezellen sowie Pouchzellen. Die Produktionsanlagen werden in innovativen Umgebungen geplant, realisiert und erforscht. Ziel ist es hierbei, langfristig einen Benchmark für qualitätsorientierte und energieeffiziente Anlagentechnik gegenüber dem bestehenden Stand der Technik zu etablieren. In diesem Kapitel werden die bisherigen Lösungen und Ansätze der Fraunhofer FFB vorgestellt. Die erste geplante Assemblierungslinie bezieht sich auf Rundzellen des Typs 21700, welcher Gegenstand der folgenden Ausführungen ist.

Aufgrund des bereits aufgezeigten ökonomischen und ökologischen Einsparpotenzials der innovativen Environments wurde in der frühen Planungsphase festgelegt, dass die Fraunhofer FFB mit einem energieeffizienten und innovativen Anlagenkonzept umgesetzt wird. Aufgrund der flexiblen und wandlungsfähigen Fabrik werden weiterhin umliegende RuT vorgehalten, um keine Einschränkungen

hinsichtlich zukünftiger Auftragsforschungen zu erhalten (siehe Abbildung 3-10). Dies wiederum ermöglicht eine stufenweise Erprobung der Environment-Konzepte aufgrund der einstellbaren Atmosphärendifferenz, um die Mindestanforderungen sowie Dynamik solcher Anlagenkonzepte zu erforschen. Die Fraunhofer FFB befähigt sich, unterschiedliche Atmosphären bedarfsgerecht einzustellen und zu regeln. Die produkt- und prozessnahen Umgebungen können TP von bis zu -60 °C erreichen, während die umliegenden RuT-Bedingungen auf einen TP von -40 °C und oberhalb eingestellt werden können. Des Weiteren ist aufgrund von häufig auftretenden Montage- und Demontearbeiten die maximale Flexibilität sichergestellt. Für industrielle Batteriefabriken ist jedoch das Ziel, gänzlich auf umliegende RuT zu verzichten, um die Energieeinsparung zu maximieren und die Investitionen gering zu halten.

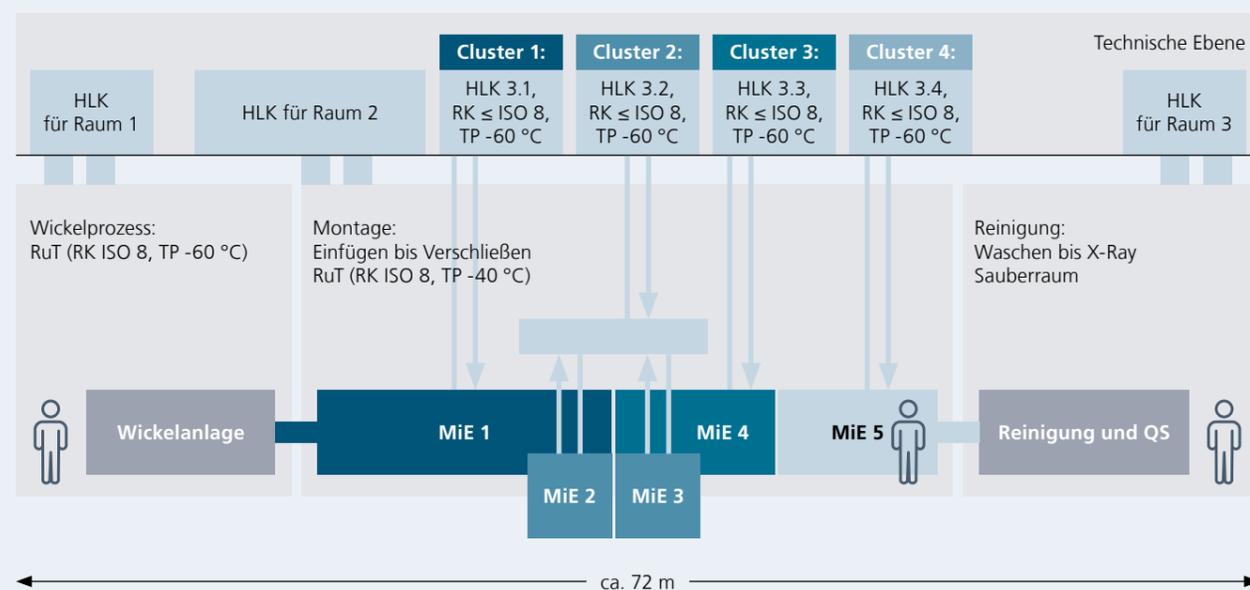
Die Wertschöpfungskette in der Rundzellansemblierung besteht insgesamt aus mehreren Einzelprozessen, welche wiederum unterschiedliche Auswirkungen auf ihre Umgebung und somit auf das Entfeuchtungs- und Gesamtsystem nehmen. Bei der Auslegung des Environment-Konzepts wurden die benachbarten Prozesse und Verfahren bewertet, um im kleinstmöglichen Raum (MiE) die entstehenden Einflüsse auf die

Produktqualität lufttechnisch zu vermeiden und insbesondere die Verteilung in vor- beziehungsweise nachgelagerte Prozesse zu unterbinden. Je prozessindividueller und kleiner das Einhausungskonzept ist, desto größer ist die Anforderung an die Prozesskontrolle und das damit verbundene Lüftungskonzept. Neben der Partikelkontamination gilt es des Weiteren, im Fall eines aktiven Prozesseingriffs die Feuchtigkeitskontamination und -verteilung minimal zu halten. Während der Feuchtigkeitsanstieg nur wenige Sekunden dauert, sind die Recovery-Zeiten um ein Vielfaches höher. Die kontinuierliche Aufrechterhaltung des sogenannten POU beziehungsweise das schnelle Wiederherstellen der gewünschten Prozessbedingungen ist einer der Kernaspekte, die bei der Anlagenauslegung berücksichtigt werden sollten, um die maximale Produktqualität zu erzielen. Der Vorteil der prozessindividuellen Einkapselungen liegt in der bedarfsgerechten und dynamischen Prozessregulierung sowie der Verhinderung von prozessübergreifender Kontamination durch die Anzahl von mehreren Barriersystemen. Als Nachteil erweist sich bei diesem Konzept der hohe technische Integrationsaufwand. Aus diesem Grund wurde der Nutzen eines Clusterkonzepts als sehr hoch eingestuft, welches die Vorteile der unterschiedlichen Ansätze kombiniert. Der Begriff »Clustering« im Kontext der MiE bedeutet

die Zusammenführung beziehungsweise Gruppierung benachbarter Anlagen mit gleichen Kontaminationsquellen und Prozesseigenschaften. Dadurch werden unter anderem komplexe Rohrsysteme vermieden und weitere techno-ökonomische Vorteile ausgeschöpft, wie z. B. das Zusammenlegen identischer Verunreinigungen für ein einheitliches Filtersystem. Dies hat geringere Investitionen sowie nachhaltig geringere Wartungskosten zur Folge.

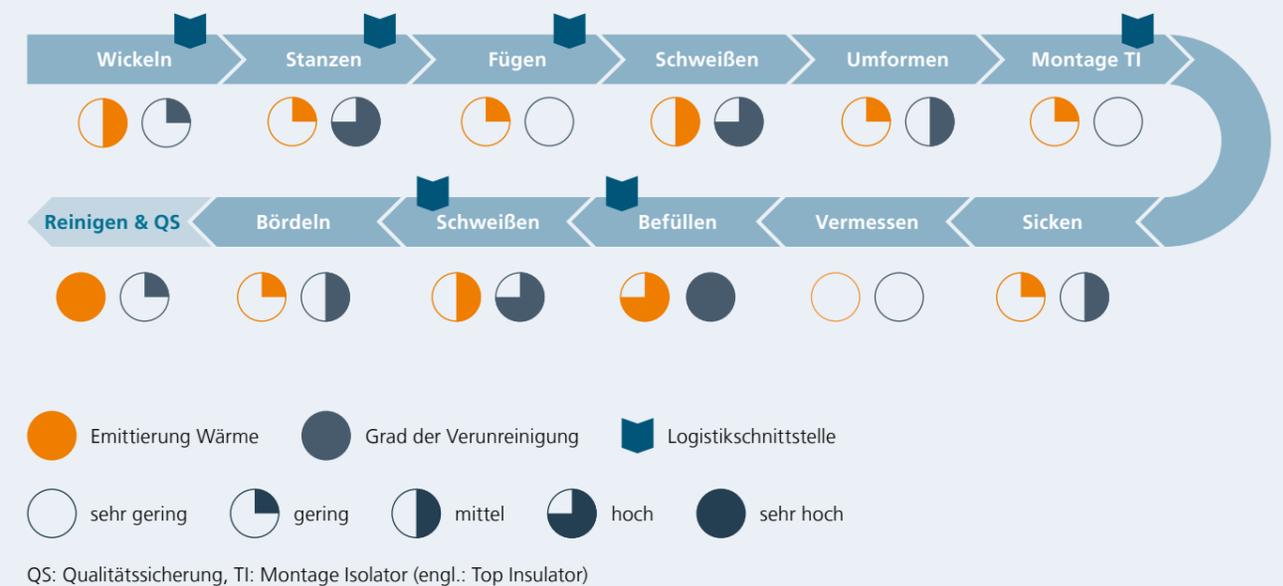
Um die MiE mit der geforderten Trockenluft zu versorgen, sind clusterspezifisch Entfeuchtungsanlagen und Trockenluftkreisläufe vorgesehen, welche den entsprechenden Prozessanforderungen innerhalb der gemeinsamen Einhausung gerecht werden müssen. Die Vermischung der Atmosphären zwischen den Clustern ist zu vermeiden. Zusätzlich benötigen die Transfer- und Logistiksysteme eine eigene Trockenluftzufuhr, um beispielsweise Feuchtigkeitsnester zu vermeiden und so im gesamten System homogen kontrollierbare Bedingungen zu schaffen.

Abbildung 3-10: Clusterung der Mini-Environments in der Assemblierungslinie zur Realisierung unterschiedlicher Trockenluftkreisläufe unter Berücksichtigung der jeweiligen Prozesseigenschaften



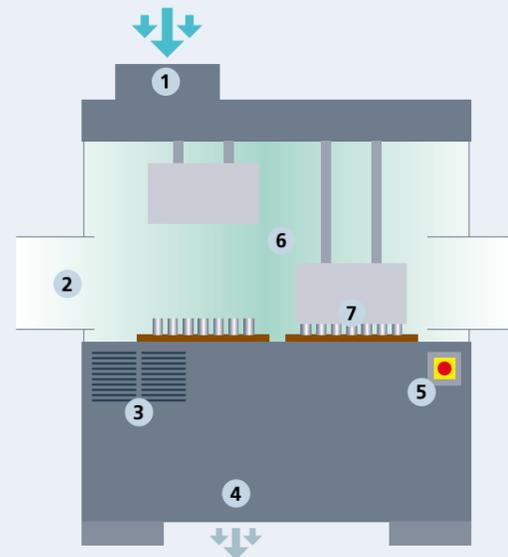
HLK: Heizung, Lüftung, Klimatechnik; TP: Taupunkt; RK: Reinheitsklasse; MiE: Mini-Environment, MatV: Materialversorgung, M: Montage, GSt: Gefahrstoffe, QS: Qualitätssicherung

Abbildung 3-11: Qualitativer Überblick zu den jeweiligen Einflussgrößen auf die Produktionsumgebung



QS: Qualitätssicherung, TI: Montage Isolator (engl.: Top Insulator)

Abbildung 3-12 Beispiel eines Mini-Environments mit Point of Use



- 1 Zuluftführung
- 2 Zugang zum MiE (wahlweise mit Schleusensystem)
- 3 Aggregateinhausung
- 4 Abluftführung
- 5 Sicherheitsschalter
- 6 MiE-Atmosphäre
- 7 Point of Use (POU)

Bei der Clustereinheit »Materialversorgung (MatV)« (vgl. Abbildung 3-11) ist eine temperierte und erhöhte Luftzufuhr vorgesehen, um die Vortrocknungsprozesse zu beschleunigen und den Anforderungen an eine Hochdurchsatzproduktion gerecht zu werden. Die Ausgasungsprozesse von feuchten Materialien können durch höhere Lufttemperaturen und turbulente Strömungen beschleunigt und optimiert werden. Hierfür sind sogenannte Pufferräume vorgesehen, die als separates Cluster umzusetzen sind beziehungsweise direkt als Trocknungsmodul umgesetzt werden können. Innovative Post-Drying-Verfahren können hier direkt im Anlagenkonzept integriert werden, wie zum Beispiel die Argon-Vortrocknung. [26], [27] Die Materialien werden nach dem Trocknen automatisiert der Montagelinie zugeführt. Die Integration automatisierter Transportsysteme (fahrerlose Transportsysteme als passive MiE), welche über standardisierte Schnittstellen den Materialtransfer unter gleichbleibenden Bedingungen sicherstellen, erweisen sich als effiziente Lösung.

»Wenn sich konventionelle Rein- und Trockenräume in Produktionsstätten zukünftig nicht mehr als geeignet erweisen, bietet der Einsatz von »Mini-Environments« für solche Produktionsbereiche eine effiziente und kostengünstigere Alternative. Wir glauben, dass sich »Mini-Environments« als innovative Technologie in der Batteriezellproduktion zunehmend durchsetzen werden.«

Juan Boeta
FISAIR S.L.U

Bei den Prozessclustern »Montage (M)« und »Gefahrstoffe (GSt)« ist z. B. die Regulierung der Wärme wiederum eine Herausforderung, welche zum Teil nur über externe Kühlsysteme abgeleitet werden kann. Daher sind Anlagenkonzepte vorzusehen, in der die wärmeemittierende Peripherie, wie etwa Vakuumpumpen oder Steuergeräte, außerhalb des gekapselten Prozessraums positioniert wird. Zentraler Bestandteil für die Prozesskontrolle ist der POU (vgl. Abbildung 3-12). Aus diesem Grund sind im POU Messeinheiten und -strategien zu berücksichtigen, welche die Umgebungstabilität kontinuierlich überwachen. Folglich werden gleichermaßen Anforderungen an die Steuer- und Regelungstechnik eines dynamischen Luft-handlings gestellt. Da der ergonomische Eingriff des Menschen durch die Umsetzung von MiE negativ beeinflusst wird, werden geeignete Maßnahmen wie Gloveboxen oder entsprechend ausgelegte Strömungsvorhänge vorgesehen.

3.4. Zwischenfazit

Es wurden zwei innovative Environment-Konzepte (MiE und MaE) definiert und auf die Batteriezellfertigung übertragen. Durch erste konstruktive Umsetzungen auf Pilotebene und Entwurfskonzepte für die Serienfertigung konnte gezeigt werden, dass die Umsetzbarkeit mit technischen Lösungen gegeben ist. Das wirtschaftliche und umwelttechnische Einsparpotenzial wurde für eine konventionelle Batteriezellfertigung in Zahlen gegenübergestellt. Die langfristige Kosteneinsparung von bis zu 79 Prozent für den Betrieb der RuT kann in den aufgezeigten Szenarien gleichzeitig zu einer Einsparung von 16 Mio. € führen. Neben den gezeigten Ansätzen müssen jedoch weitere technologische Aufgaben in der Entwicklungs- und Erprobungsphase gelöst werden, um einen stabilen Produktionsbetrieb zu gewährleisten.



Bilder S. 23 © ARTVISU/Artur Krause

4. Ausblick und Fazit

RuT nehmen bereits in der Planungsphase aufgrund ihrer Komplexität einen erheblichen Einfluss auf die Ausgestaltung der Batteriezellfabrik. Die Schnittstellenanforderungen zwischen Produktion, Maschinen- und Anlagenbau, Bau und Medienversorgung sind hochkomplex und bergen während des Fabrikbaus zugleich hohes Fehlerpotenzial. Ebenso sind sie für einen Großteil der Investitionen und Betriebskosten heutiger Zellfabriken verantwortlich. Durch die Einbindung disruptiver Technologieansätze, wie die vorgestellten Lösungen, können langfristig die ganzheitlichen Kosten im Zellfabriklebenszyklus reduziert werden. Im Folgenden Kapitel werden die notwendigen Entwicklungs- und Forschungsbedarfe herausgearbeitet.

4.1. Adaption lokaler Environments auf den Wertschöpfungsprozess der Batterie zelle

Neben der Zellassemblierung bietet insbesondere die Elektrodenfertigung weitere Anwendungspotenziale in der Batterie zellfertigung. Zukünftige Zellgenerationen, welche bereits im frühen Wertschöpfungsstadium hochsensibel

gegenüber Umgebungseinflüssen reagieren, benötigen produkt- und prozessnahe technische Lösungen zum Schutz. Schon heute sind Lösungen im Bereich der Elektrodenfertigung für die Laborerprobung gefragt. Durch die Betrachtung von Optimierungsansätzen entlang der gesamten Wertschöpfungskette auf Fabrik- und Netzwerkebene können die Potenziale lokaler Environments ganzheitlich ausgeschöpft und langfristig konventionelle RuT durch MiE und MaE substituiert werden. Durch die Umsetzung der definierten, qualitätsorientierten Lieferketten in der Batterie zellfertigung (vgl. Abbildung 4-1) ergeben sich ökologische und ökonomische Vorteile. Damit eine neu aufgesetzte Lieferkette gelingt, müssen Standardisierungen zur Vermeidung interoperabler Schnittstellen für RuT sowie für neue Anlagen- oder Logistikkonzepte wie MiE in der Batterie zellfertigung entwickelt, erprobt und kommuniziert werden. Die Etablierung eines Standards ermöglicht die hersteller- beziehungsweise standortübergreifende Fertigung von Batterie zellen. Sowohl die inner- als auch außerbetrieblichen Prozesse nehmen daher eine zentrale Rolle in der Batterie zellfertigung ein und befähigen die netzwerkgebundene und standortflexible Wertschöpfung.

Mit einem hohen Wertanteil der Materialien am Endprodukt der Batterie ist der kontinuierliche Schutz vor Feuchtigkeit und Unreinheit entlang der Wertschöpfungskette zu gewährleisten und Ausschussraten sind zu minimieren. Durch die Sicherstellung der bedarfsgerechten Atmosphäre und Sauberkeit für die hochsensiblen Zellmaterialien, insbesondere in der netzwerkgebundenen Wertschöpfung, können die höchsten Qualitätsanforderungen eingehalten werden.

Der Einsatz notwendiger und mobiler Lager- und Transportsysteme stellt die innerbetrieblichen Abläufe im Gegenzug vor neue Herausforderungen, weshalb die Themenfelder Schleusen-, Handhabungs- und Reinigungstechnik eine neue Bedeutung gewinnen. Die spätere Einsatzfähigkeit des Transport- und Lagersystems ist maßgeblich von den zuvor genannten Schnittstellentechnologien abhängig. Zur Potenzialausschöpfung sollten bestehende Fabriklayouts analysiert, bewertet und in neue Layoutvarianten überführt werden. Erst durch die nachhaltige Nutzung eines integrierten, zirkulären Transport-Managements können Batterie zellen ressourcen- und kosteneffizient produziert werden.

4.2. Einsatzfähigkeit der Mini-Environments in der Gigawatt-Fertigung

Insbesondere der Einsatz von MiE ist bisher noch auf Laborbeziehungsweise Pilotmaßstab begrenzt. Gloveboxen kommen zuverlässig und langjährig in den Batterie zelllaboren zum Einsatz

und lassen sich durch manuelle Schritte oder durch teilautomatisierte Prozesse miteinander koppeln, um den gesamten Wertschöpfungsprozess einer Batterie zelle abzubilden. Der Pilotlinienmaßstab für die Batterie zellproduktion ist bisher noch nicht ausreichend erforscht und erprobt. Erste Konzepte werden in gemeinsamer Zusammenarbeit zwischen Maschinen- und Anlagenbauern und Batterie zellherstellern umgesetzt, um langfristig die Funktion und Prozessstabilität in weiteren Skalierungsstufen sicherzustellen. Ziel der Forschung und der Industrie ist die Skalierung und Befähigung der MiE auf den Serienmaßstab. Hierbei gilt es, einen Technologiedurchbruch von Pilot- auf Serienmaßstab zu vollziehen, da die Anforderungen der Hochdurchsatzproduktion erheblichen Einfluss auf das System eines solchen Environment-Konzepts nehmen (siehe Kapitel 3).

Auf der Grundlage von Marktbeobachtungen und Industrie-gesprächen erwartet die Fraunhofer FFB den Durchbruch für MiE von Pilotlinienmaßstab auf Serienmaßstab ab dem Jahr 2027. Für MaE wird eine frühere Marktintegration und -nutzung erwartet, da der technische Investitionsaufwand geringer ist. Nach Erprobung und Untersuchung der atmosphärenkontrollierten Serienproduktionsanlagen für die gängigen Zellformate gilt es, parallel neue Fabrikkonzepte und -layouts zu entwickeln, um die gesamte Wertschöpfungskette auf die großindustrielle Fertigung zu skalieren. Damit zukünftig der weitere Skalierungsschritt gelingen kann, ist die Erprobung einer vollautomatisierten und atmosphärenkontrollierten Integration dieser Anlagenkonzepte entlang der gesamten Wertschöpfungskette noch sicherzustellen.

Abbildung 4-1: Innovationsebenen für Ansätze einer ökonomischen und ökologischen Batterie zellfertigung

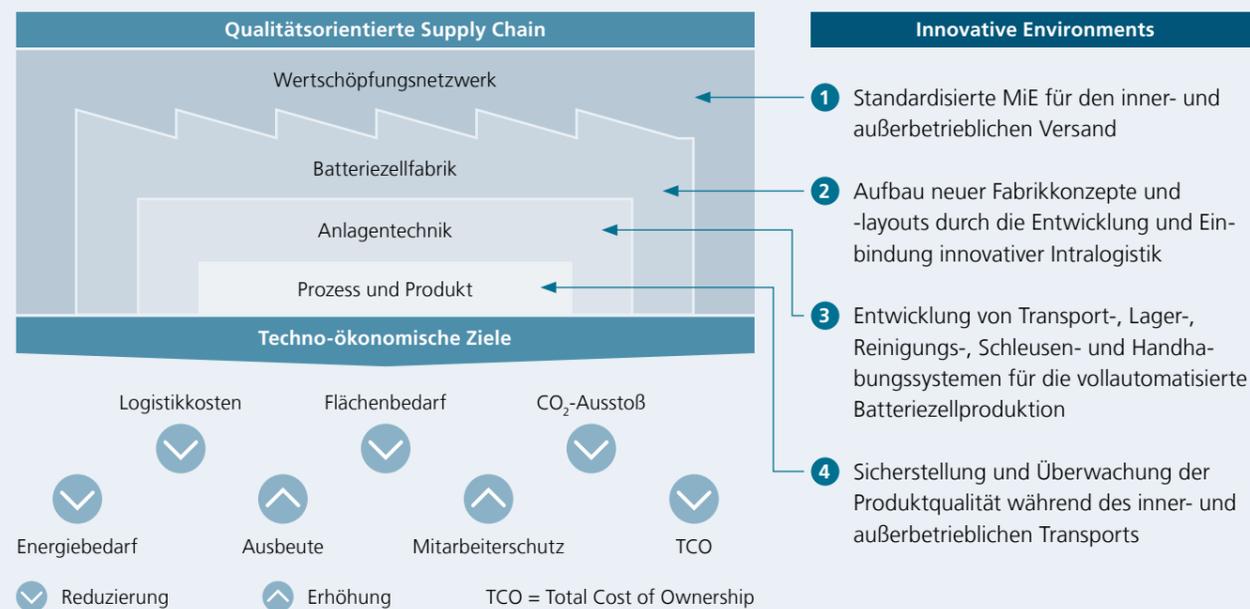
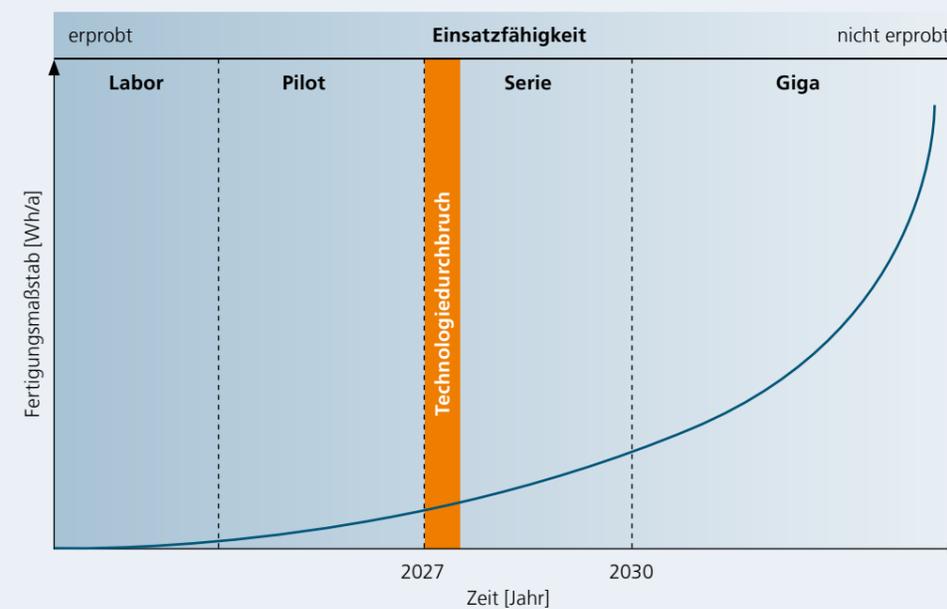


Abbildung 4-2: Skalierungsstufen für Mini-Environments in der Batterie zellfertigung



4.3. Die Batteriezellfabrik der Zukunft

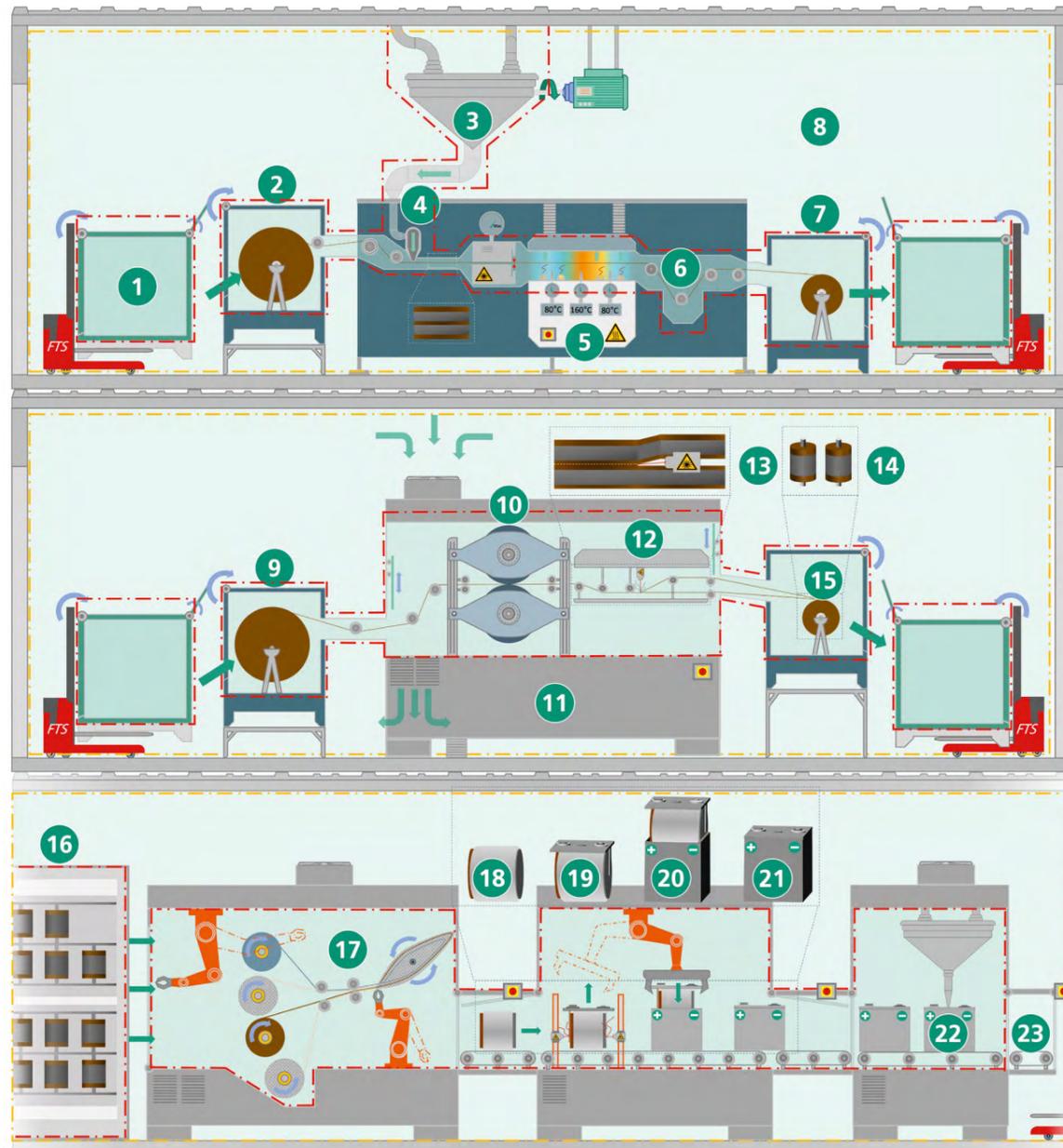


Abbildung 4-3: Musterbeispiel der Fraunhofer FFB einer Batteriezellfabrik der Zukunft

- | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Passives MiE | 9 Beschichteter Muttercoil | 18 Gewickelte Jelly-Roll |
| 2 Kupfer- oder Aluminiumcoil | 10 Kalander | 19 Kontaktierung der Zelleiter |
| 3 Mischsystem Slurry | 11 MiE | 20 Einbringung in das Zellgehäuse |
| 4 Beschichtungssystem mit Schlitzdüse | 12 Laserslitter | 21 Unbefüllte Zelle |
| 5 Trocknungssystem | 13 Geslittete Elektrodencoils | 22 Elektrolytbefüllung |
| 6 Kühlwalzen | 14 Aufgewickelte Tochtercoils | 23 Schleuse zur Zellfinalisierung |
| 7 Aufwicklung der beschichteten Muttercoils | 15 Aufwicklung für Tochtercoils | — MiE/MaE |
| 8 Sauberraum | 16 Vakuumtrockner | — Umliegende Raumumgebung |
| | 17 Zellstapelbildung | |

Abbildung 4-3 stellt schematisch die Batteriezellfabrik der Zukunft dar, welche aus einer kontrollierten Prozessatmosphäre als ganzheitliche Wertschöpfungskette besteht. Neben dem Einsatz von Environments in der Assemblierung ist ein zunehmender Trend von erhöhten Umgebungsanforderungen in der Elektrodenfertigung zu erkennen.

Die frühzeitige Vermeidung von Partikel- und Feuchtekontamination entlang der gesamten Wertschöpfungskette stellt die Batteriezellfertigung vor neue Fragestellungen, führt jedoch zur qualitätsorientierten Fertigung von Batteriezellen. Insbesondere gelingt hierdurch auch die mittel- beziehungsweise langfristige Produktion von Zellen der nächsten Generation. Das zentrale Element zur erfolgreichen Transformation ist die Intralogistik, welche durch die Aufrechterhaltung des hohen Automatisierungsgrads eine Kopplung der einzelnen Prozesstechnologien entlang der Wertschöpfungskette sicherstellt. Durch das Nachrüsten beziehungsweise die Integration neuer Schlüsseltechnologien und optimierter Produktionsansätze, wie z. B. das MiE, gelingt es zukünftigen Batteriezellproduzenten die Produktionskosten um mehr als 79 Prozent (siehe Kapitel 3.2) zu senken.

Die Chancen, die sich mit dem Aufbau neuer Batteriezellfabriken im Gigawatt-Bereich ergeben, sind zu erkennen und zu ergreifen. Bestehende Zellfabriken sind dazu angehalten, ihre Produktionskonzepte umzugestalten, um auch wettbewerbsfähig zu bleiben und nachhaltige Batteriezellen zu marktgerechten Preisen anbieten zu können. Schlüsselansätze und -innovationen für den Aufbau der Batteriezellfabrik der Zukunft sind:

- Substitution kostenintensiver, konventioneller Fertigungsumgebungen bei gleichzeitiger Steigerung der Ertragsrate und Schutz der Mitarbeitenden
- Einführung eines vollautomatisierten Produktionskonzepts für die qualitätsorientierte und energieeffiziente Zellproduktion
- Integration disruptiver und optimierter Produktionstechnologien (z. B. Trockenbeschichtung)
- Einführung eines digitalen Gebäude-, Anlagen- und Produktzwillings

»Mini-Environments sind sehr innovative Konzepte, um zukünftig enorme Einsparungen von OpEx in skalierfähigen Zellfabriken und insbesondere der Assemblierung zu erzielen. Wuxi Lead und die Fraunhofer FFB erarbeiten gemeinsam in dem spannenden Themenfeld neue Ansätze und Verfahren, um den Transfer dieser fortschrittlichen Lösung in die Batterieindustrie zu ermöglichen.«

Xiao Lu
Wuxi Lead Intelligent Equipment Co., Ltd.



Mit dem Ziel, die innovativen Environments für die Hochdurchsatzproduktion und demzufolge für Fabriken im Gigawattbereich zu befähigen, ergeben sich neue Forschungsfelder für die Material- und Ingenieurwissenschaften sowie der Produktionstechnik. Um neue Erkenntnisse zu erlangen, welche maßgeblich zur ökonomischen und ökologischen Batteriezellfertigung beitragen, gilt es, Fragestellungen hinsichtlich der Feuchtesensibilität zu beantworten.

Durch Ansätze, wie den des digitalen Zwillings, können Rückschlüsse aus der Performance und der Lebensdauer einer Batteriezelle auf die Produktumgebungs- und den Prozessparametern abgeleitet werden. Hiermit gelingt langfristig die Analyse und Identifikation des minimal erforderlichen TP für unterschiedliche Wertschöpfungsprozesse. Das Themenfeld Feuchtemanagement im Umfeld der Batteriezellfertigung ist bisher noch nicht ausreichend erforscht.

Zukünftige Fragestellungen

- **Welcher Taupunkt wird in der Zellfertigung gefordert?**
- **Erfordert die Produktdiversität eine Taupunkt-Flexibilität?**

Ebenso ergeben sich für den Ingenieurbereich neue Fragestellungen auf Anlagen- und Prozessebene. Als bisher unbekanntes Themenfeld steht der Maschinen- und Anlagenbau vor der Aufgabe, produktionsintegrierte Steuerungen für das Lufthandling zu implementieren. Es müssen technische Lösungen für die Wechselwirkung von verändernder Umgebungsbedingung und vollverketteter automatisierter Produktion entwickelt und erprobt werden. Für die Realisierung eines innovativen Luftmanagements werden Konzepte zur Zustandsüberwachung als Grundlage für die erweiterte Prozesskontrolle erforderlich. Aufgrund der Diversität der Prozesse in der Batteriezellfertigung werden prozessrelevante Druckniveaus gefahren, welche wiederum Einfluss auf die dynamische Luftregulierung nehmen.

Des Weiteren steht die Automatisierungstechnik vor neuen Aufgaben, wie z. B. der Entwicklung von quasi-kontinuierlichen Transfersystemen und innovativen Bypass-Konzepten, um die Anlageneffektivität und -effizienz hochzuhalten. Als Entwicklungsunterstützung dienen hier simulationsbasierte Untersuchungen in der Konzeptphase. So erweisen sich CFD-Simulationen als ein hilfreiches Werkzeug, um ein Verständnis des Luft- und Strömungsverhaltens zu bekommen.

Zukünftige Fragestellungen

- **Wie sieht das Lufthandlingskonzept für den bedarfsgerechten Produkt- und Mitarbeiterschutz aus?**
- **Wie sind flexible und dynamische Entfeuchtungsanlagen zu gestalten?**
- **Welche Regelungsmethoden für die Wechselwirkung von Atmosphäre und Hochdurchsatzproduktion erweisen sich als anforderungsgerecht?**
- **Wie sind atmosphärenkontrollierte Intralogistiksysteme zu gestalten?**

Die Identifikation einer kostengünstigen und funktionsfähigen Environment-Ausbaustufe ist die grundlegende Aufgabe, der sich der Maschinen- und Anlagenbau stellen muss. Insbesondere ist ein Verständnis für die komplexen Wechselwirkungen und Schnittstellen von Prozess und Produktion zu erarbeiten, um dann unterschiedliche Ausprägungen der MiE und MaE technisch umzusetzen. Ebenso ist der Einfluss der Gesamtanlageneffektivität zu berücksichtigen, welcher Stand der Technik in der Batteriezellfertigung noch sehr gering ist. Dies führt zu einer hohen Eingriffsfrequenz. So ist die Basis eines funktionsfähigen Environment-Konzepts die Prozessstabilität und -effizienz. Mit der erfolgreichen Umsetzung einer Hochdurchsatzproduktion ergeben sich weitere Fragestellungen hinsichtlich der Skalierung auf Fabrikebene.

Zukünftige Fragestellungen

- **Wie sieht das Fabriklayout der Zukunft aus?**
- **Werden MiE den Produktionsanforderungen in der Batteriezellfertigung gerecht?**
- **Welche Environment-Ausbaustufe ist techno-ökonomisch ausreichend?**



Erster Bauabschnitt (PreFab) der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle im Hansa-BusinessPark in Münster
© ARTVISU Artur Krause

5. Fraunhofer FFB am Standort Münster als Partner für Forschung und Entwicklung

Die Fraunhofer FFB bietet eine flexible und wandlungsfähige Fabrik zur Erprobung und Skalierung innovativer Anlagenkonzepte in industrieller Einsatzumgebung. Diese werden in sogenannten Technologie-Reifegraden bzw. Technology Readiness Levels (TRL) bemessen, welche die technologische Entwicklungsreife der Konzepte und Anlagen quantifizieren. Die TRLs erstrecken sich von TRL1 »Beobachtung und Beschreibung des Funktionsprinzips« bis hin zu TRL9 »Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes« [31]. Die Demonstrationsplattform bietet die Möglichkeit, innovative Technologien und Produktionsansätze vom Pilotmaßstab (TRL 6) in den großskaligen Serienmaßstab zu überführen (TRL 8 bis 9). Dabei stellt die Etablierung und Erforschung des Einsatzes von MiE sowie MaE einen attraktiven Produktionsansatz dar, welcher enorme ökonomische und ökologische Einsparpotenziale birgt. Fokusthema in der Zellassemblierung für alle drei Zellformate ist die Realisierung von maschinenintegrierten und adaptierten MiE und MaE auf vollautomatisierter Ebene.

Des Weiteren bietet die Fraunhofer FFB konventionelle rein- und trockenraumtaugliche Fertigungsumgebungen, um innovative Prozess- und Produktionstechnologien zu erproben und zu qualifizieren.

Die Leistungen des Bereiches Produkt- und Produktionstechnologie der Fraunhofer FFB decken unter anderem die folgenden Felder ab:

- Maschinenentwicklung
- Anlagen- und Prozessoptimierung
- Produktionsdesign
- Versuche und Auswertung
- Prozessmodellierung und -simulation

Treten Sie in Kontakt mit uns für mehr Informationen.



Mehr Informationen finden Sie unter:
www.ffb.fraunhofer.de

Literaturverzeichnis

- [1] G. E. Blomgren, »The Development and Future of Lithium Ion Batteries,« J. Electrochem. Soc., Jg. 164, Nr. 1, A5019-A5025, 2017, doi: 10.1149/2.0251701jes.
- [2] F. Duffner, N. Kronemeyer, J. Tübke, J. Leker, M. Winter und R. Schmich, »Post-lithium-ion battery cell production and its compatibility with lithium-ion cell production infrastructure,« Nat. Energy, Jg. 6, Nr. 2, S. 123–134, 2021, doi: 10.1038/s41560-020-00748-8.
- [3] K. Edström, Hg., »BATTERY 2030+: Inventing the sustainable batteries of the future. Research needs and future actions,« 2022. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://battery2030.eu/wp-content/uploads/2022/07/BATTERY-2030-Roadmap_Revision_FINAL.pdf
- [4] W. Bernhart, »The Lithium-Ion (EV) battery market and supply chain: Market drivers and emerging supply chain risks,« 2022. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://content.rolandberger.com/hubfs/07_presse/Roland%20Berger_The%20Lithium-Ion%20Battery%20Market%20and%20Supply%20Chain_2022_final.pdf
- [5] »Technologie E-Mobilität: material,« Deutsche Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), o. J. Zugriff am: 29. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.deutscherohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/m-e-mobilitaet.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [6] S. Michaelis et al., »Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030: Update 2020,« 2020. Zugriff am: 4. Oktober 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vdma.org/documents/34570/35405938/VDMA+Batterieproduktion+Roadmap+2030+%28Update+2020%29.pdf/587fba4e-7de7-f2a0-477b-bccc13154cba?t=1639483139718>
- [7] E. Emilsson und L. Dahllöf, »Lithium-Ion Vehicle Battery Production: Status 2019 on Energy Use, CO2 Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling,« Rep. C 444, 2019. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ivl.se/download/18.14d7b12e16e3c5c36271070/1574923989017/C444.pdf>
- [8] M. Thomitzek, N. von Drachenfels, F. Cerdas, C. Herrmann und S. Thiede, »Simulation-based assessment of the energy demand in battery cell manufacturing,« Procedia CIRP, Jg. 80, S. 126–131, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.01.097.
- [9] »Lithium-Ionen-Batterien: Industrielösungen,« Fraunhofer-Institut für keramische Technologien und Systeme IKTS, o. J. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.ikts.fraunhofer.de/content/dam/ikts/downloads/profile/IKTS_Industrieloesungen-Li-Ionen_Batterien.pdf
- [10] H. H. Heimes et al., »Produktionsprozess einer Lithium-Ionen-Batterie,« 2018. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.pem.rwth-aachen.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaabcgujq
- [11] G. Gachot et al., »Gas Chromatography/Mass Spectrometry As a Suitable Tool for the Li-Ion Battery Electrolyte Degradation Mechanisms Study,« Anal. Chem., Jg. 83, Nr. 2, S. 478–485, 2011, doi: 10.1021/ac101948u.
- [12] J. C. Eser et al., »Moisture Adsorption Behavior in Anodes for Li-Ion Batteries,« Energy Technol., Jg. 8, Nr. 2, 2020, Art. Nr. 1801162, doi: 10.1002/ente.201801162.
- [13] Y. Bi, Q. Li, R. Yi und J. Xiao, »To Pave the Way for Large-Scale Electrode Processing of Moisture-Sensitive Ni-Rich Cathodes,« J. Electrochem. Soc., Jg. 169, Nr. 2, 2022, Art. Nr. 020521, doi: 10.1149/1945-7111/ac4e5d.
- [14] C. Busà, M. Belekoukia und M. J. Lovridge, »The effects of ambient storage conditions on the structural and electrochemical properties of NMC-811 cathodes for Li-ion batteries,« Electrochim. Acta, Jg. 366, 2021, Art. Nr. 137358, doi: 10.1016/j.electacta.2020.137358.
- [15] F. Xin et al., »What is the Role of Nb in Nickel-Rich Layered Oxide Cathodes for Lithium-Ion Batteries?,« ACS Energy Lett., Jg. 6, Nr. 4, S. 1377–1382, 2021, doi: 10.1021/acsenergylett.1c00190.
- [16] Y.-T. Chen et al., »Investigating Dry Room Compatibility of Sulfide Solid-State Electrolytes for Scalable Manufacturing,« J. Mater. Chem. A, Jg. 10, Nr. 13, S. 7155–7164, 2022, doi: 10.1039/D1TA09846B.
- [17] Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation), VDI 2078, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Jun. 2015.
- [18] »The Dehumidification Handbook,« Munters Corporation, 2019. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.munters.com/globalassets/documents/airt/solutions/the-dehumidification-handbook---third-edition.pdf>
- [19] »Adsorptionstrockner: Für Lebensmittel- Pharmaindustrie, Lagerung und Prozessstrocknung,« Swegon Germany GmbH, 2016. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.swegon.com/siteassets/_product-documents/entfeuchtung/adsorptionstrockner/prospekt_airblue_adsorptionstrockner_2016-10.pdf
- [20] Reinraumtechnik - Barrieresysteme - Minienvironments, VDI 2083 Blatt 16.2, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Apr. 2021.
- [21] E. Westkämper, Einführung in die Organisation der Produktion (Springer-Lehrbuch). Berlin, Heidelberg: Springer, 2006.
- [22] Reinraumtechnik - Barrieresysteme (Isolatoren, Mini-Environments, Reinraummodule) - Wirksamkeit und Zertifizierung, VDI 2083 Blatt 16.1, Verein Deutscher Ingenieure, Berlin, Aug. 2010.
- [23] J. Pinho, »Dry Rooms: Why They Are Needed and a Review of the Complex Issues Associated With Building Them - Particularly the Large Ones Required to Mass Produce Lithium Batteries,« Rep. Vol. 46 Num. 10, 2010. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.scs-usa.com/docs/ABT_John_Pinho_Technical_Report_October_2010.pdf
- [24] S. Ahmed, P. A. Nelson und D. W. Dees, »Study of a dry room in a battery manufacturing plant using a process model,« J. Power Sources, Jg. 326, S. 490–497, 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.107.
- [25] W. Zimmer, R. Blanck, K. Kreye, J. Graichen und P. Kasten, »Die Rolle der CO2-Bepreisung im Instrumentenmix für die Transformation im Verkehrssektor: Zwischenbericht,« Rep. 27/2022, 2022. Zugriff am: 8. September 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/cc_27-2022_die_rolle_der_co2-bepreisung_im_instrumentenmix_fuer_die_transformation_im_verkehrssektor.pdf
- [26] D. Burow, »Degradation graphitbasierter Anoden in Lithium-Ionen Batteriezellen für automobiler Anwendungen,« Dissertation, Freie Universität Berlin, Berlin, 2016.
- [27] F. Huttner, W. Haselrieder und A. Kwade, »The Influence of Different Post-Drying Procedures on Remaining Water Content and Physical and Electrochemical Properties of Lithium-Ion Batteries,« Energy Technol., Jg. 8, Nr. 2, 2020, Art. Nr. 1900245, doi: 10.1002/ente.201900245.
- [28] C. A. Heck, M.-W. von Horstig, F. Huttner, J. K. Mayer, W. Haselrieder und A. Kwade, »Review—Knowledge-Based Process Design for High Quality Production of NCM811 Cathodes,« J. Electrochem. Soc., Jg. 167, Nr. 16, 2020, Art. Nr. 160521, doi: 10.1149/1945-7111/abcd11.
- [29] F. Degen und M. Schütte, »Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production,« J. Clean. Prod., Jg. 330, S. 129798, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129798.
- [30] M. Armand et al., »Lithium-ion batteries – Current state of the art and anticipated developments,« J. Power Sources, Jg. 479, 2020, Art. Nr. 228708, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228708.
- [31] DIN EN 16603-11:2020-02: Raumfahrttechnik - Definition des Technologie-Reifegrades (TRL) und der Beurteilungskriterien (ISO 16290:2013, modifiziert); Deutsche Fassung EN 16603-11:2019, Berlin, Feb. 2020.

Impressum

Diese Publikation entstand unter Mitwirkung von

Marius Heller, Hasibe Turhan, Niels Holöchter, Matthias Miggelt, Max Niggelstich, Nele Schöne, Florenz Janning, Dr. Saskia Wessel

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB

Prof. Dr. rer. nat. Jens Tübke

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT und Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB

Beteiligte Institute im Kontext der energieeffizienten und qualitätsorientierten Anlagenkonzepte für die Batterie zellfertigung

- Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
- Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen

Druck

Stober Medien GmbH
Industriestraße 12
76344 Eggenstein

DOI

10.24406/publica-355

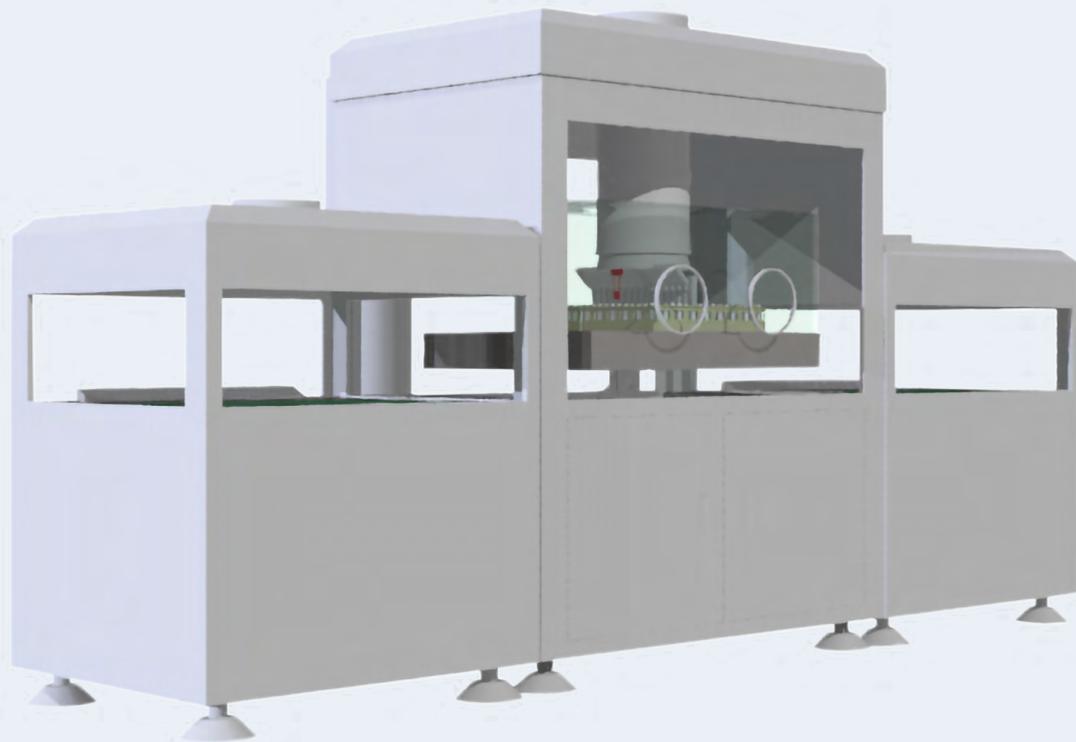
Bildquellen

Seite 6: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Seite 23, Seite 27, Seite 29: ARTVISU Artur Krause

Herausgeber

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie zelle FFB
Bergiusstraße 8
48165 Münster

© Fraunhofer-Gesellschaft e.V., München 2023



Modulares Anlagenkonzept eines »Mini-Environments« der Fraunhofer FFB für eine automatisierte Elektrolytbefüllanlage

Kontakt

Marius Heller M.Sc.
Produkt- und Produktionstechnologie
Gruppe Assemblierung und Formierung
Tel. +49 241 8904-627
marius.heller@ffb.fraunhofer.de

Hasibe Turhan M.Sc.
Produkt- und Produktionstechnologie
Gruppe Assemblierung und Formierung
Tel. +49 241 8904-617
hasibe.turhan@ffb.fraunhofer.de

Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
Bergiusstraße 8
48165 Münster
www.ffb.fraunhofer.de