



Anforderungsgerechte Fabrikplanung im Umfeld der Batterieproduktion

Unter den Gesichtspunkten Qualität, Kosten,
Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit



Vorworte

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

vor dem Hintergrund von Energiewende und Transformation zur Elektromobilität wird für die Batteriebranche sowohl abnehmer- als auch anbieterseitig ein enormes Marktwachstum prognostiziert. In diesem Kontext ist vor allem der Aufbau neuer Batteriefabriken in Europa hervorzuheben: Je nach Prognose können wir bis 2030 mit bis zu einer Verzehnfachung der aktuellen Produktionskapazitäten rechnen [1] [2].

Zeitgleich zu diesem ambitionierten Wachstum sehen sich die Planung und Realisierung der zugehörigen Produktionsstätten mit zahlreichen fachspezifischen Herausforderungen konfrontiert. Insbesondere zeichnet sich die Batterieproduktion durch die kausale Verkettung vieler Einzelfaktoren aus, die gemeinsam sowie einzeln auf die leistungs- und sicherheitsrelevanten Eigenschaften des Endproduktes einwirken. Daher ist im Sinne der Fabrikplanung beispielsweise nicht nur die Auswahl und Verkettung der richtigen Prozess- und Prüftechnologien ausschlaggebend, sondern auch die Gewährleistung einer konstant hochreinen und trockenen Produktionsatmosphäre, die Anordnung in einem prozessflussgerechten Layout sowie die Auswahl der richtigen Strategie für einen schnellen und sicheren Ramp-up. Selbstverständlich spielt dabei auch die Nachhaltigkeit eine große Rolle, denn der Material- und Energiebedarf der Produktion macht derzeit noch einen Großteil des ökologischen Fußabdrucks einer einzelnen Batteriezelle aus.

In diesem Zusammenhang ist klar: Zur schnellen und zielgerichteten Umsetzung einer zukunftsfähigen Batteriefabrik, die die benötigten Batteriezellen im Spannungsfeld verschiedener Einflussfaktoren möglichst wirtschaftlich und nachhaltig bereitstellt, ist ein integrierter Planungsansatz erforderlich, der die



spezifischen Herausforderungen der Batterieproduktion in ihrer Vielzahl zum richtigen Zeitpunkt adressiert und so die direkte Realisierung von Wettbewerbsvorteilen ermöglicht. Die Fraunhofer FFB geht in ihrem Forschungsalltag den sich hier ergebenden Fragestellungen intensiv nach. Auf Basis von umfangreichen Erfahrungswerten aus Wissenschaft und Praxis, Untersuchungen an der eigenen

Infrastruktur und unter Einbindung des Partnernetzwerkes umfasst dies die Entwicklung von Lösungsansätzen, die die Planung und Realisierung der Batteriefabrik von morgen ermöglichen. Ein zentraler Überblick wird Ihnen in diesem Whitepaper aus einer holistisch getriebenen Perspektive gegeben.

Viel Freude und anregende Impulse beim Lesen wünscht Ihnen

Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker MBA

Mitglied der Institutsleitung der Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung Batteriezelle FFB



Sehr geehrte Leserin,
sehr geehrter Leser,

unsere Projekterfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass ein Fabrikplanungsprojekt immer dann erfolgreich abgeschlossen wird, wenn die Projektbeteiligten eine Symbiose aus fachlicher Planungsexpertise und branchenspezifischem Fachwissen bilden. Ersteres ist unsere Kernaufgabe als

Planungs- und Beratungsunternehmen, indem wir methodische Vorgehensweisen, wie die VDI 5200 oder die HOAI, in die praktische Anwendung übersetzen. Die Adaption auf die Eigenschaften der Branche bildet dann die Voraussetzung, um ein individuelles Fabriksystem zu entwickeln – hierbei bringen wir unsere Erfahrungswerte aus Referenzprojekten ein, unabdingbar ist aber ebenso die enge Zusammenarbeit mit den Expertinnen und Experten auf Kundenseite.

Im Batterieumfeld charakterisieren sich die Brancheneigenschaften produktionsseitig insbesondere durch komplexe Material- und Prozessanforderungen, die eine geeignete Auslegung der Umgebung erforderlich machen. Dies spiegelt sich sowohl in stark regulierten Produktionsumgebungen (Rein- und Trockenräume) als auch in der Separierung von Logistik- und Lagerstrukturen wider. Darüber hinaus ist der

Verkettungsgrad von Batterieproduktionen i.d.R. sehr hoch, sodass hier integrative Lösungen entwickelt werden müssen. In Summe führen diese Eigenschaften dazu, dass das Zusammenspiel aller Planungsgewerke synchronisiert und aufeinander abgestimmt werden muss, um Interdependenzen zwischen den Teilergebnissen frühzeitig berücksichtigen zu können.

Aus diesem Bedarf heraus hat die Metroplan in Kooperation mit der Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batterie-zelle FFB ein Framework entwickelt, welches einen Ansatz zur ganzheitlichen Fabrikplanung im Umfeld der Batterieproduktion bildet. Der Entstehungsprozess einer Batteriefabrik bis zum stabilen Produktionsbetrieb wurde dafür in vier Hauptphasen zerlegt, für die jeweils die Kernherausforderungen und dedizierte Lösungsansätze beschrieben werden. Abgerundet wird dieses Whitepaper durch ein Praxisbeispiel, in dem große Teile des Frameworks bereits sehr erfolgreich angewandt wurden.

Ich wünsche Ihnen spannende Einblicke in die Welt der Fabrikplanung im Batterieumfeld!

Matthias Göke

Geschäftsführender Gesellschafter
// Metroplan Production Management GmbH

Inhalt

Vorworte	2
1. Einleitung	5
2. Phasenmodell	7
2.1. Standortsuche	8
2.2. Fabrikplanung	10
2.3. Realisierung	12
2.4. Operational Excellence	15
2.5. Übersicht der Phasen und Werkzeuge	17
3. Use Case	18
4. Zusammenfassung	20
Literatur	21
Kontaktdaten / Impressum	24



1. Einleitung

Batteriezellen haben sich in den letzten Jahren von einem Nischenprodukt zu einer der wichtigsten Schlüsseltechnologien für den Erfolg der Elektromobilität entwickelt. Ab 2035 wird jedes neu zugelassene Fahrzeug in der Europäischen Union (EU) elektrisch angetrieben. Vergleichbare Trends sind weltweit zu beobachten. Der Bedarf an Batteriezellen steigt daher rasant. Aktuelle Studien gehen von einem weltweiten jährlichen Batteriebedarf von 5500 GWh im Jahr 2040 aus (zum Vergleich 2021: 250 GWh). Dies entspricht einem Marktvolumen von ca. 500-600 Mrd. € in 2040 mit einem weiteren starken Marktwachstum in den Folgejahren [3]. Um diesen enormen Bedarf an Batteriezellen zu decken, entstehen derzeit an vielen Orten in Europa, Asien und Nordamerika neue, große Batteriezellfabriken (»Gigafactories«).

Der plötzliche und starke Anstieg der Nachfrage nach Batteriezellen und die damit verbundene Errichtung von Gigafactories birgt jedoch eine Vielzahl von Herausforderungen und potenziellen Risiken. Denn im Gegensatz zu konventionellen Fabrikplanungsprojekten, die in etablierten Industrien ohnehin schon komplex sind, kommen bei der Batteriezellfertigung weitere Herausforderungen hinzu. Dies sind beispielsweise mangelnde Erfahrung, fehlende Lieferketten, eine eingeschränkte Auswahl an etablierten Anlagenbauern und strenge regulatorische Anforderungen. Hinzu kommt eine hohe Dynamik sowohl in der Entwicklung der Marktanforderungen als auch in der Produkt- und Produktionstechnologie und vielem mehr. Um Risiken zu minimieren, bedarf es einer besonderen Vorsorge bei der Planung von Batteriezellfabriken und der Auswahl

involvierter Partner. Insbesondere Lessons Learned aus vergangenen Projekten sind hier relevant.

Um das Risiko bei der Planung und Inbetriebnahme von Batteriezellfabriken für den Kunden deutlich zu reduzieren, arbeiten Metroplan und die Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB (Fraunhofer FFB) eng zusammen. Metroplan ist ein Planungs- und Beratungsunternehmen und entwickelt ganzheitliche Lösungen über den gesamten Lebenszyklus einer Fabrik. Diese Kompetenz in der allgemeinen Fabrikplanung wird durch das Spezialwissen der Fraunhofer FFB im Umfeld der Batteriezellfertigung ergänzt. Die Fraunhofer FFB baut zurzeit im Rahmen eines bis zu 700 Millionen Euro umfassenden Projektes eine Batteriezellfabrik im Gigawattmaßstab zu Forschungszwecken in Münster. Gemeinsam konnten Metroplan und die Fraunhofer FFB in Fabrikplanungsprojekten für externe Partner die Vorteile der synergetischen Zusammenarbeit unter Beweis stellen und Lösungen entwickeln, die sowohl aus fabrikplanerischer als auch aus technologischer Sicht signifikante Vorteile bieten.

Dieses Whitepaper soll aufzeigen, wo aus unserer gemeinsamen Sicht und Erfahrung die besonderen Herausforderungen bei der Planung von Batteriezellfabriken liegen, worauf besonders zu achten ist und wo die größten Optimierungspotenziale verborgen sind. Wir unterstützen Sie von der Standortsuche über die Fabrikplanung und Realisierung bis hin zur Inbetriebnahme der Batteriezellfabrik – alles aus einer Hand. So erhalten Sie eine effiziente und nachhaltige Lösung, die auf Ihre Bedürfnisse und die Ihrer Kunden zugeschnitten ist.

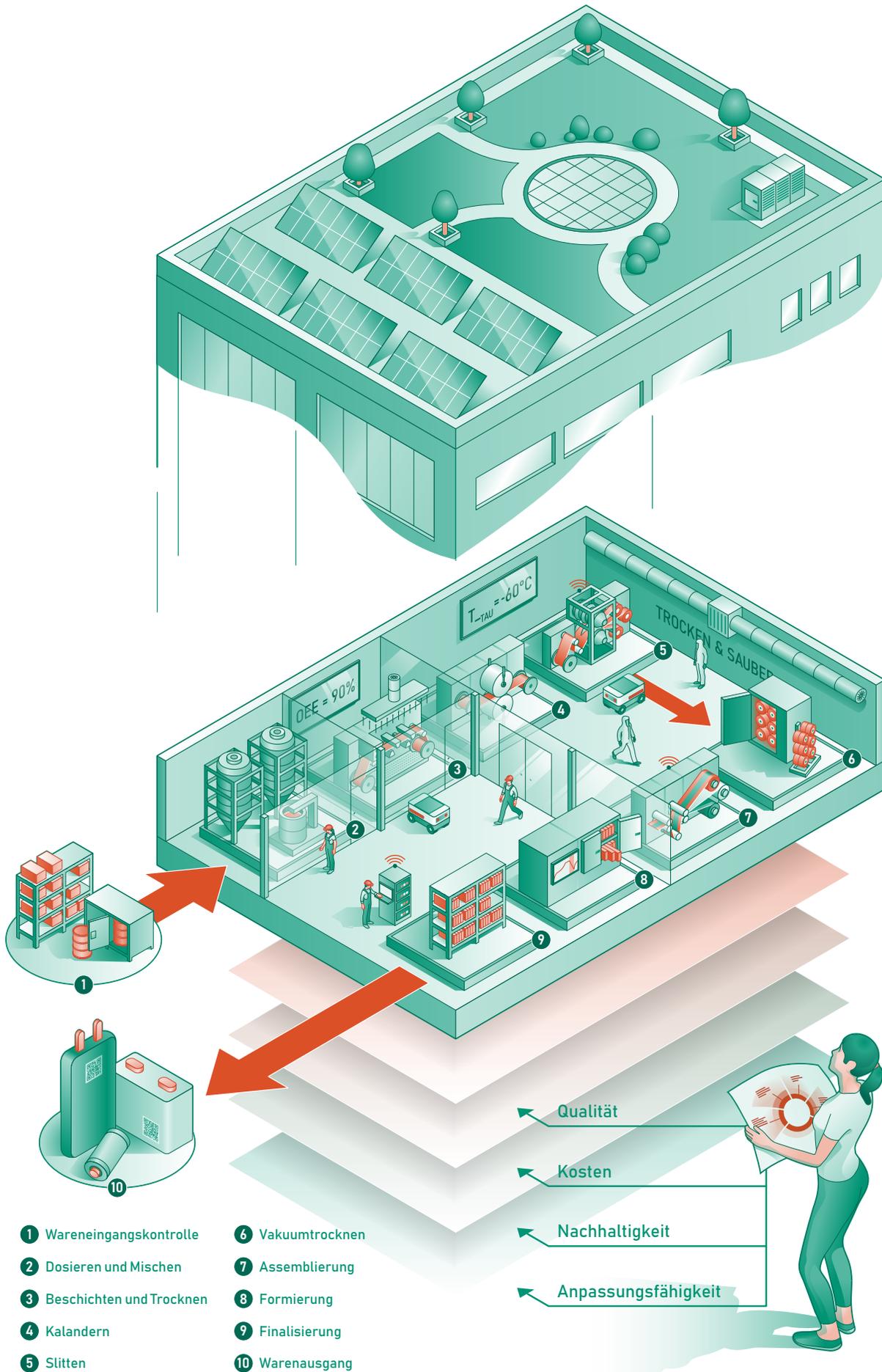


Abbildung 1: Ganzheitliche Betrachtung des Themenfeldes Fabrikplanung in der Batterieproduktion

2. Phasenmodell

Um die Verfügbarkeit der nachgefragten Batteriezellen in angemessener Qualität und Quantität auf ökonomische sowie ökologische Weise zu gewährleisten, ist eine schnelle Planung, Realisierung und Inbetriebnahme der zugehörigen Produktionsstätten unerlässlich. Diese Produktionsstätten müssen gleichzeitig zuverlässig eine Erreichung der gesetzten Qualitäts- und Quantitätsziele ermöglichen. Aus dieser Perspektive präsentieren die Fraunhofer FFBC und Metroplan in der vorliegenden Veröffentlichung einen ganzheitlichen Ansatz, der Herausforderungen methodisch mit bewährten und innovativen Lösungsansätzen begegnet und auf diese Weise effizient und effektiv den Weg zur Batteriefabrik der Zukunft ebnet. Die Lösungsansätze werden mit der Vision einer Fabrik, die in den

Zieldimensionen Qualität, Kosten, Nachhaltigkeit und Anpassungsfähigkeit optimiert wird, entwickelt (vgl. Abbildung 1). In den folgenden Abschnitten wird auf die Zieldimensionen und die entsprechenden Herausforderungen zum Erreichen dieser detailliert eingegangen. Dabei werden methodische Ansätze gegenübergestellt, um den einzelnen Herausforderungen konkret zu begegnen. Aus projektplanerischer Sicht ist zunächst die zeitliche Eingrenzung in vier Phasen sinnvoll, nach der auch der Aufbau dieser Veröffentlichung strukturiert ist: Standortsuche, Fabrikplanung, Realisierung und Operational Excellence (vgl. Abbildung 2), wobei die letzte Phase den Hochlauf sowie die Sicherstellung eines stabilen Produktionsbetriebs in der fertiggestellten Fabrik beschreibt.

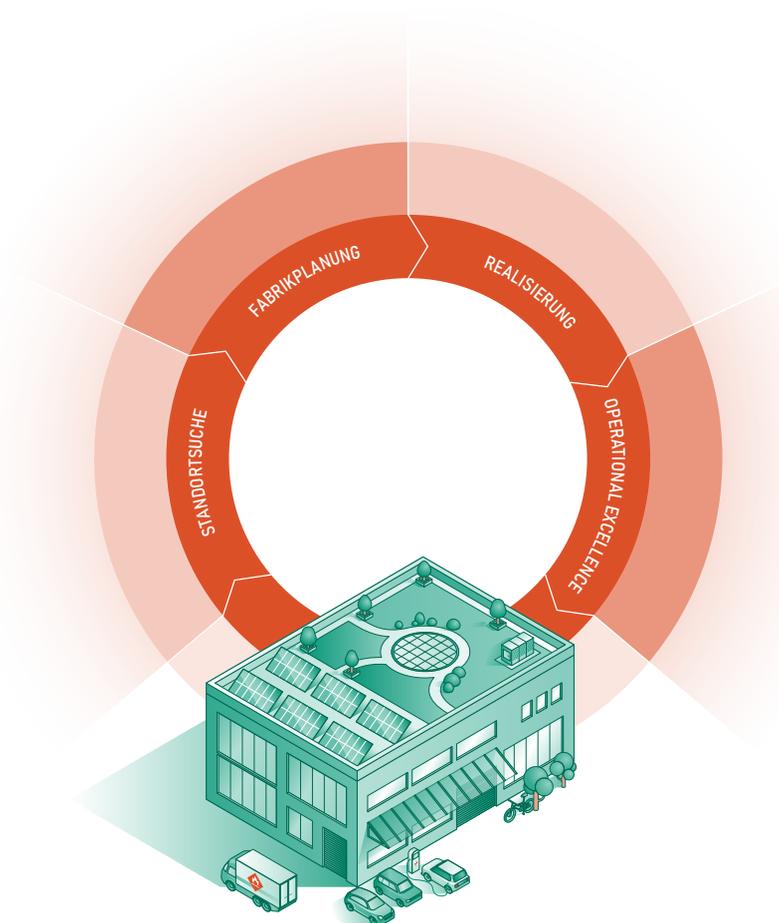


Abbildung 2: Phasen zur Entwicklung eines integrierten Ansatzes zur zielgerichteten Planung und Realisierung von Batteriefabriken

2.1. Standortsuche

Die Auswahl des geeigneten Standorts für den Aufbau einer neuen Produktionsstätte ist eine strategische Entscheidung und setzt eindeutig formulierte Ziele voraus. Im Batterieumfeld bedeutet dies konkret, die strategische Positionierung des aufzubauenden Werks hinsichtlich einer angestrebten Kosten- oder Wissensführerschaft frühzeitig zu kennen. Eine gleichzeitige Umsetzung beider Strategien an einem Standort ist nur eingeschränkt möglich, wodurch die Wichtigkeit einer transparenten Zielsetzung unterstrichen wird. [4]

Nachdem diese übergeordnete Ausrichtung festgelegt worden ist, können in der Folge zielführende Kriterien zur Bewertung der unterschiedlichen Standortoptionen abgeleitet werden. Dieser Prozess ist in der praktischen Umsetzung häufig durch eine fehlende Vergleichbarkeit sowie durch ein heterogenes Meinungsbild in Bezug auf die Wichtigkeit einzelner Kriterien geprägt.

Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit herzustellen, nutzen wir in unseren Standortauswahlprozessen ein kaskadiertes dreigliedriges Vorgehensmodell. Von der Länderanalyse über die Regionalanalyse bis hin zur Analyse einzelner Grundstücke werden die Standortoptionen vom Groben ins Feine untersucht und bewertet, sodass sich nach der Analyse eine Vorzugsvariante ableiten lässt.

In jeder der drei Phasen werden einmalig sechs bis zehn Bewertungskriterien projektindividuell definiert. Als Orientierung stellen wir einen auf Basis unserer Erfahrungen aufgebauten und sich stetig weiterentwickelnden Kriterienkatalog zur Verfügung. Die ausgewählten Kriterien sind in der Folge für alle untersuchten Optionen innerhalb einer Phase maßgebend, können jedoch in der darauffolgenden Phase angepasst werden. Dadurch wird abgesichert, dass nur geeignete Kriterien innerhalb einer Phase untersucht werden und eine uneingeschränkte Vergleichbarkeit zwischen den betrachteten Optionen sichergestellt wird. Der Einbezug von Subventionen ist im Rahmen der Länderanalyse beispielsweise wenig sinnvoll, da eine zuverlässige Aussage erst mit Beginn der Regionalanalyse getroffen werden kann.

Um einem heterogenen Bewertungsprozess der Standortoptionen zum Ende jeder Phase präventiv entgegenzuwirken, empfiehlt sich die Nutzung eines gewichteten Scoring-Modells. Hier findet sich die anfänglich bereits angesprochene Strategiefestlegung (Kosten- oder Wissensführerschaft) stark wieder, indem ausgewählten Kriterien eine hohe oder geringe Priorität unter Berücksichtigung der angestrebten Strategie zugesprochen wird. Im Falle einer anvisierten Kostenführerschaft hat

das Lohnkostenniveau beispielsweise eine höhere Priorität als die Integration des Werks in eine Cluster-Region – für eine angestrebte Wissensführerschaft stellt sich die Auswahl und/oder Priorisierung der Einzelkriterien hingegen abweichend dar. Da sich die Festlegung und Priorisierung der Kriterien aus der Strategie ableitet, setzt dieser Arbeitsschritt eine enge Zusammenarbeit mit dem Projekt-Sponsor voraus. Je nach Unternehmen kann dieser eine Einzelperson sein oder durch ein Gremium aus unterschiedlichen Stakeholdern vertreten werden – hier ist perspektivische Vielfalt wünschens- und eine Begrenzung auf die notwendige Anzahl der relevanten Stakeholder empfehlenswert.

Aktuelle Top-Themen bei der Standortsuche

Batterielösungen wird eine signifikant wichtige Rolle im Kontext der Energiewende zugesprochen. In unterschiedlichen Anwendungsbereichen werden elektrochemische Energiespeichersysteme als Schlüsseltechnologie tituliert und bereits flächendeckend eingesetzt oder ein zunehmender Einsatz prognostiziert. Vor dem Hintergrund dieses Beitragszuspruchs zum Megatrend Energiewende rückt auch der Herstellungsprozess der Batterien selbst zunehmend in den Fokus [5]. Der hohe Energieeinsatz bei der Zellproduktion bedeutet im Umkehrschluss auch, dass durch eine emissionsreduzierte Energiebereitstellung der Dekarbonisierungsbeitrag der jeweiligen Batterielösung ganzheitlich erhöht werden kann – dies gilt insbesondere für die Elektromobilität [6]. Bereits während der Standortsuche leitet sich daraus ein mittelbarer Einfluss ab, indem der bezogene Energiemix für den Herstellungsprozess kompatibel zum Nachhaltigkeitsanspruch im späteren Einsatz der Batterien sein muss. Dies führt dazu, dass der lokal verfügbare Energiemix ein zunehmend wichtiges Entscheidungskriterium darstellt und Analysen von Energiebilanzen bereits zum Bestandteil der Standortsuche werden [7]. Zusätzlich zum Energiemix stellt aufgrund des hohen Energiebedarfes auch die lokal verfügbare Anschlussleistung ein wichtiges Kriterium dar.

Weitere wichtige Themen sind die Mitarbeiterverfügbarkeit/-qualifikation sowie das Lohnkostenniveau, die vor dem Hintergrund der verfolgten Strategie im Rahmen der Standortsuche untersucht werden müssen. Wie zu Beginn bereits eingeführt, gibt es mit der Wissens- oder Kostenführerschaft zwei primäre Strategieoptionen im Batterieumfeld [4]. Beide Varianten weisen unmittelbare Interdependenzen zu den Themen Mitarbeiterverfügbarkeit/-qualifikation und Lohnkostenniveau als Untersuchungsgegenstände auf. Eine angestrebte Wissensführerschaft setzt den Zugriff auf einen Pool hochqualifizierter

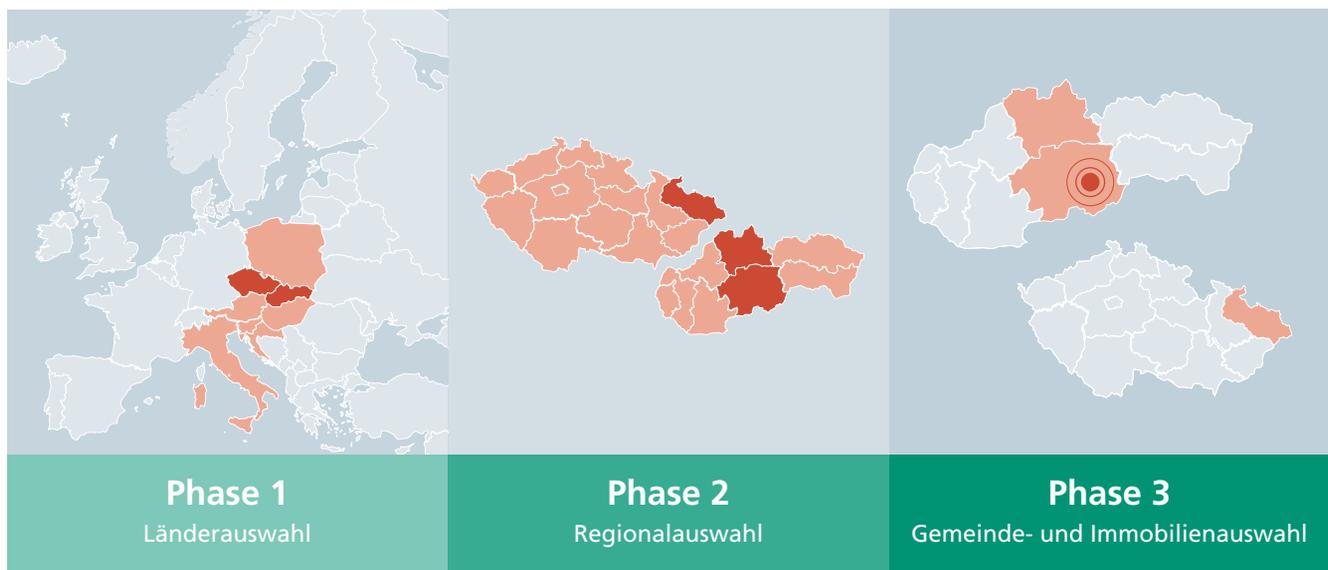


Abbildung 3: Kaskadierendes Modell zur Standortauswahl

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Einzugsgebiet des entsprechenden Standorts voraus, da qualifiziertes Personal für Forschung & Entwicklung (F&E) oder Engineering-Aktivitäten benötigt wird. Die Verfügbarkeit und das Qualifikationsniveau hängen jedoch wiederum stark von mittelbar wirkenden Faktoren, wie der infrastrukturellen Anbindung oder räumlichen Nähe zu Universitäten oder Hochschulen, ab. Dies unterstreicht die Multidimensionalität einer solchen Untersuchung. Für einen auf Kostenführerschaft getrimmten Standort hat die Verfügbarkeit von operativen Fachkräften zum attraktiven Lohnkostenniveau eine deutlich höhere Gewichtung. Wichtig ist dessen, dass die steigende Automatisierung der Batteriezellproduktion diese Fragestellung mittel- bis langfristig weiter verlagern wird, hat sie aktuell dennoch eine Bedeutung, vor allem wenn es um die Optimierung der Fertigungslinien und Absicherung im laufenden Betrieb geht. Um die Verfügbarkeiten und Qualifikationsniveaus der Arbeitskräfte am jeweils untersuchten Standort zu bewerten, bringen wir aktuelle Statistiken mit unseren Erfahrungswerten zusammen. [8]

Als drittes Top-Thema sind die Logistikkosten bei der Standort-suche zu nennen. Um diese ganzheitlich zu betrachten, sind sowohl die In- als auch die Outbound-Ströme von Bedeutung. Erstere rücken die vorgelagerte Supply Chain der Batterieproduktion in den Fokus – also die Beschaffung der benötigten Rohstoffe. Am Beispiel von Lithium-Ionen-Batterien (LiB) zeigt sich die starke Zentralisierung der Bezugsquellen der zur Produktion benötigten Hauptrohstoffe, wie beispielsweise Lithium, Nickel, Kobalt oder Mangan. Dieses Abhängigkeitsverhältnis steht im Spannungsfeld zur parallel dazu aufkommenden Lokalisierungstendenz bei Standortentscheidungen für

den Neuaufbau von Produktionsstätten, die sich durch anhaltende geopolitische Konflikte und protektionistische Aktivitäten formt [9]. Im Rahmen der Standortsuche muss dieser Trade-off sowohl quantitativ (Logistikkosten) als auch qualitativ (bspw. Risiko) bewertet werden, um eine optimale Entscheidung unter Berücksichtigung der vorliegenden Umstände treffen zu können.

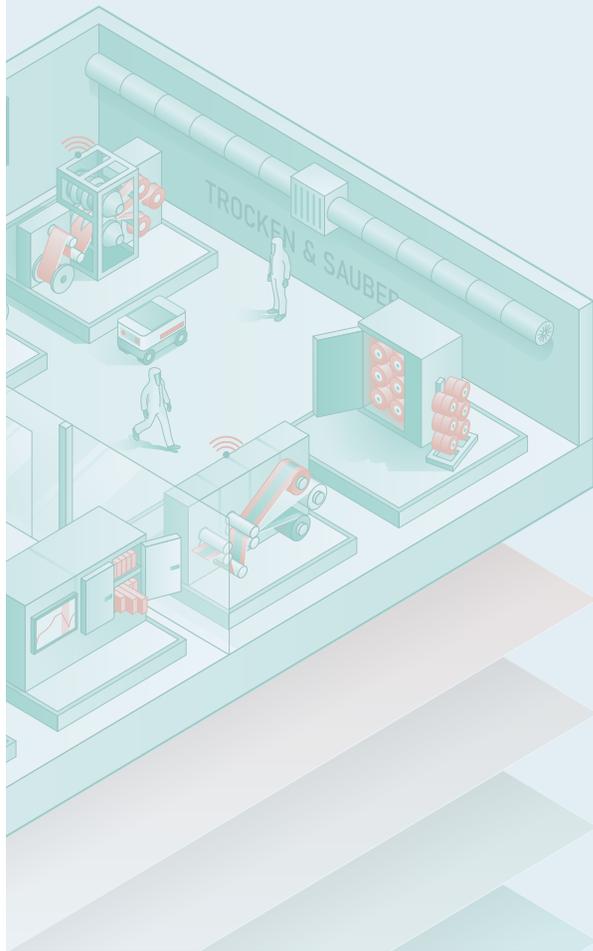
Die Outbound-Ströme rücken die logistischen Beziehungen in die jeweiligen Abnehmermärkte aus dem Werk in den Fokus. Wichtig ist hierbei, die Einbindung des Werks in den gesamten Footprint frühzeitig einfließen zu lassen – soll über das aufzubauende Werk die gesamte Versorgung der Märkte abgewickelt werden oder gibt es eine dezentrale Struktur? Dieses Verständnis ist wichtig, um die entstehenden Logistikkosten relational einordnen zu können. Durch den Einsatz von Simulations-Software sind wir in der Lage, auch komplexe Netzwerkstudien (bspw. Umschlag über zwischengeschaltete Distributionszentren, Intercompany-Geschäfte etc.) zu modellieren. Die dynamische Betrachtung ermöglicht die Überprüfung von Sensitivitäten, indem bestimmte Parameter (bspw. Veränderungen im Distributionsnetzwerk, Anpassung der Frachtraten etc.) im Modell verändert und die Auswirkungen unmittelbar ersichtlich werden.

2.2. Fabrikplanung

Zielkriterium Qualität und Kosten

Durch die enge Verbindung zwischen Prozess und Produkt in der Batteriefertigung, insbesondere in Bezug auf Kosten und Qualität, entsteht ein komplexes Netzwerk von sich gegenseitig beeinflussenden Stellhebeln [10]. Diese als Ursache-Wirkzusammenhänge bezeichneten Kausalitäten sind derzeit insbesondere auf Ebene der großskaligen Produktion noch nicht vollständig erforscht. Die Ausprägung der auftretenden Wirkzusammenhänge ist dabei hochgradig von den gewählten Produkt- und Prozesseigenschaften abhängig. In Verbindung dazu ergibt sich auf Ebene des Produktionsprozesses ein hoher Verkettungsgrad zwischen einzelnen Prozessschritten, mit einer Vielzahl an jeweils infrage kommenden Technologiealternativen. Übergreifende Standards für ein spezifisches Produkt- und Prozessdesign sind noch nicht etabliert, was eine systematisch an den Kundenanforderungen optimierte Technologieketten- und Qualitätsplanung erschwert [10]. Ähnliches gilt für die Ableitung eines Fabriklayouts, das durchgängig einen qualitäts- und durchsatzoptimierten Materialfluss ermöglicht. An dieser Stelle besitzen die Teams der Fraunhofer FFB und Metroplan geeignete Werkzeuge, verschiedene Technologiealternativen systematisch entlang der Prozesskette unter Qualitäts-, Kosten- und Zuverlässigkeitsgesichtspunkten aus der direkten Anwendung heraus zu evaluieren. Gleichzeitig wird die optimale Layoutplanung und Materialflussgestaltung mittels Fabrikmodellen (bspw. visTABLE oder Plant Simulation) untersucht. Je nach Anforderung der Kunden kann dabei mit einfachen Modellen oder hochkomplexen Simulationen gearbeitet werden. Auf diese Weise generierte Erkenntnisse können in einer kontinuierlich aktualisierten Datenbank als direkte Entscheidungshilfe aggregiert und so zur effektiven Unterstützung in den Prozessen der Anlagenkonfiguration und Lieferantenauswahl genutzt werden. Parallel zur Evaluierung aus Qualitätssicht erfolgt eine Bewertung der Kostentreiber, sodass das für die jeweilige Anwendung optimale Verhältnis aus Qualität und Kosten gefunden werden kann. An der Fraunhofer FFB werden kontinuierlich Technologiestudien zur Früherkennung zukünftiger Entwicklungen durchgeführt. Diese Studien ermöglichen die Erkennung von Technologiesprüngen und ihre Einordnung im Vergleich zum aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Als Beispiel seien hier vor allem Substitutionstechnologien wie beispielsweise das Trockenbeschichten genannt, mit deren Hilfe auf lange Sicht energie- und damit kostenintensive Prozessschritte umgangen werden können. Dabei sind durch veränderte Anlagenkonzepte direkte Layoutauswirkungen einzuplanen [11]. Gemeinsam mit der genauen Analyse der im Forschungsbetrieb anfallenden

Produktionsdaten ist es möglich, die Korrelationen zwischen Prozessparametern, Anlageneigenschaften und resultierenden Produkteigenschaften genauer zu verstehen und zu quantifizieren, sodass es im Folgenden ebenfalls möglich ist, der gewählten Technologieketten die bestmöglichen Prüf- und Qualitätssicherungsstrategien zuzuordnen. Hierunter fällt neben einer dedizierten Auswahl der einzelnen Messmittel zur Prozessüberwachung und Qualitätssicherung auch die Vorausplanung der anzustrebenden Prüffrequenzen und Quality Gates abhängig von der gewählten Produkt- und Prozesstechnologie. Um im Sinne der Wettbewerbsfähigkeit eine effektive Optimierung und kontinuierliche Überwachung der Qualitäts- und Leistungsparameter entlang der Prozesskette zu ermöglichen, ist ein hoher Digitalisierungsgrad der gesamten Produktionsinfrastruktur erforderlich. Auch aus legislativer Sicht ist die Umsetzung einer digitalisierten Fabrik zuträglich, um die im Rahmen des »Batteriepasses« ab dem 1. Januar 2026 innerhalb der EU gültigen Vorschriften an eine vollständige Transparenz jeder produzierten Batteriezelle hinsichtlich ihrer ESG-Parameter erfüllen zu können [12] [13]. Aus Sicht der Technologiekettenplanung ist unter diesen Gesichtspunkten die Umsetzung eines über die gesamte Prozesskette reichenden Traceability-Konzeptes zielführend, welches erfasste Prozessdaten jederzeit einem konkreten Produkt zuordenbar macht [14]. An der Fraunhofer FFB wird im Rahmen der laufenden Forschungsaktivitäten im Bereich der Digitalisierung ein solches Konzept umgesetzt und mit einem digitalen Gebäude-, Prozess-, und Produktwilling kombiniert. Dabei werden Herausforderungen insbesondere im Bereich der Schnittstellenkonfiguration und Standardisierung adressiert [15]. Die Fraunhofer FFB kombiniert diese Fachkenntnisse mit den umfangreichen Tools zur digitalen Fabrikplanung von Metroplan. Abgesehen von den prozess- und technologie-seitigen Anforderungen an die Fabrikplanung, nehmen zudem die verarbeiteten Materialien eine Sonderstellung ein. Innerhalb der Batterieproduktion werden teils toxische und hochenergetische Materialien verarbeitet [16]. Resultierende Risiken für Mensch, Umwelt und die investitionsintensive Infrastruktur sind als Eingangsgrößen für ein anforderungsorientiertes Sicherheits- und Brandschutzkonzept sowie zur Entwicklung eines geeigneten Lager- und Logistikkonzeptes für das spätere Fabrikgebäude inkl. Layout zu berücksichtigen.



In der Phase der Fabrik- und Technologiekettenplanung ergibt sich im Kontext der Batterieproduktion ein vielseitiges Spannungsfeld, das im Sinne eines ganzheitlichen Lösungsansatzes ausgehend von seinen Teilherausforderungen adressiert werden muss.

Jasper Döhrn

Fraunhofer-Einrichtung
Forschungsfertigung
Batteriezelle FFB

Zielkriterium Anpassungsfähigkeit

Auf dem Weg zur Anpassungsfähigkeit stellt derzeit vor allem auf Produktebene die Komplexität aus verfügbaren Zellformaten in Kombination mit einer Vielfalt an möglichen Zellchemien eine große Herausforderung dar. Dabei gibt es aktuell noch keine klare Durchsetzung eines bestimmten Zelltyps, sondern vielmehr eine anwendungsorientierte Kombination von Zellformaten und -materialien mit individuellen Vor- und Nachteilen. Vor allem das Zellformat bestimmt die Auslegung der Anlagentechnologie, welche insbesondere bei einer Optimierung auf hohes Durchsatzvolumen nur noch geringfügig flexibel hinsichtlich der erreichbaren Produktvielfalt ist [17]. Ähnlich zur Gestaltung der Technologiekettenplanung erfordert dieser Bereich ein vorausschauendes Technologie-monitoring auf Produktseite, um neue Trends zu erkennen. Entsprechende Bewertungen werden an der Fraunhofer FFB und über das Netzwerk der Fraunhofer-Gesellschaft mit der der Fraunhofer-Allianz Batterien kontinuierlich durchgeführt. Mit den erhobenen Informationen kann das Produktspektrum aus Sicht des Anwenders langfristig und sinnvoll vorausgeplant werden. Dadurch wird es möglich, im Planungsprozess zukunftsfähig zu agieren. Dieser Aspekt gewinnt vor allem vor dem Hintergrund von möglichen weiteren Technologiesprüngen, beispielsweise in Form der All-Solid-State-Batterie oder anderen Post-Lithium-Ionen Batterietechnologien, an

Wichtigkeit. Die für die Produktion dieser Batterien erforderlichen Prozesstechnologien und Anforderungen an die Produktionsumgebung unterscheiden sich teils erheblich und sollten somit vorausschauend während der strategischen Produktionsprogrammplanung abgewogen werden [3]. Zuletzt spiegelt sich auch der Aspekt der Digitalisierung in der Anpassungsfähigkeit wider. Als Herausforderung im Sinne der Fabrikplanung gestaltet sich vor allem die Bereitstellung der für die digitale Infrastruktur notwendigen technischen Gebäudeausstattung (TGA) über den gesamten Lebenszyklus der Fabrik. Grund hierfür ist, dass über die kommenden Jahre die Digitalisierung der Prozesskette kontinuierlich zunehmen und damit auch stets wachsende Anforderungen in den Bereichen Datendurchsatz, Datenverfügbarkeit und Vernetzung stellen wird [18]. Diesbezüglich kann die frühzeitige Definition eines vorausschauenden Digitalisierungskonzeptes mit Anforderungsableitung an die Gebäudeplanung späteren Limitationen vorbeugen.

Zielkriterium Nachhaltigkeit

Zuletzt sollte auch die Dimension der Nachhaltigkeit frühzeitig als Handlungsstrang in die Fabrik- und Technologiekettenplanung mit aufgenommen werden. Hierunter fällt zunächst die effektive Sicherstellung einer möglichst hohen Energieeffizienz von Fabrikgebäude und Produktionsprozess. Sowohl

im Hinblick auf die Kosten als auch auf die Nachhaltigkeit ist die Batteriezelle ein maßgeblicher Faktor, der sich auf die gesamte Wertschöpfungskette erstreckt, einschließlich der Endprodukte wie beispielsweise E-Fahrzeuge [19]. Die Zellproduktion stellt somit einen wichtigen Stellhebel zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen dar. Insbesondere sind die Prozessschritte der Elektrodenfertigung und der Finalisierung sehr energieintensiv, sodass über geeignete Maßnahmen wie beispielsweise der Energierückgewinnung und -wiedernutzung auf Gebäudeebene sowie der Prozessoptimierung der Energiebedarf des gesamten Produktionssystems so gering wie möglich gehalten werden sollte [20]. Die Zwischenprodukte entlang der Prozesskette reagieren sehr sensitiv auf Verunreinigungen und Feuchtigkeit, sodass in vielen Prozessschritten eine genaue Konditionierung der Produktionsumgebung hinsichtlich Sauberkeit und Trockenheit erforderlich ist. Die hierzu verwendeten Rein- und Trockenräume machen derzeit einen Großteil des Energieverbrauches einer Zellfertigung aus [21]. Die Fraunhofer FFB forscht an dieser Stelle ganzheitlich zu energieeffizienten Gebäudekonzepten auf Basis eines genauen Verständnisses der Energieverbraucher. Dies umfasst die Substitution energieintensiver Fertigungsschritte wie das Trocknen durch das Trockenbeschichten, die Konzeptionierung energieoptimierter Umgebungskonditionierung über Rein- und Trockenräume sowie die Integration von Makro- und Mini-Environments. Letztere konditionieren die Produktionsumgebung prozessnah und reduzieren den Energiebedarf erheblich, formulieren aber auch andere Anforderungen an die Gebäude als klassische Konzepte. Auf Ebene des Layouts ist für die

nachhaltige Batteriefabrik zukünftig die Integrierbarkeit von internen Recyclingkonzepten zu berücksichtigen. Diese ermöglichen eine umgehende Rückgewinnung der im Ausschuss gebundenen Materialien und stellen somit einen wesentlichen Einflussgröße zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen dar. Gleichzeitig befinden sich die zugehörigen Technologieansätze jedoch noch in der Entwicklung [22]. In dieser Hinsicht ist bei gewünschter Integration in das Fabriklayout mit angemessener Flexibilität zu planen. Zuletzt ist auch auf der Planungsebene bereits der voraussichtliche ökologische Fußabdruck des geplanten Fabrikkonzeptes zu berücksichtigen. Die frühzeitige Gegenüberstellung der absehbaren Emissionen einzelner Lösungsansätze hilft einerseits zur Identifikation eines nachhaltigen Gesamtkonzeptes und andererseits bei späteren Life Cycle Assessments aus legislativen Gesichtspunkten. Zuletzt ist es bereits innerhalb der Planungsphase erforderlich, u.a. im Rahmen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchG) anfallende Anforderungen umzusetzen und frühzeitig in einem förmlichen Antragsverfahren zu validieren. Hierunter fallen u.a. die Prozessschritte des Beschichtens aufgrund der verwendeten Lösemittel, sowie die Elektrolytbefüllung und die mit beiden Prozessen verbundene Gefahrstofflagerung. Leitlinien zur Sicherstellung der Konformität der geplanten Fabrik mit gesetzten Nachhaltigkeitszielen bietet übergreifend eine frühzeitige Entscheidung bezüglich der Einführung von Umwelt- und Energiemanagementsystemen, deren Anforderungen auf technischer Seite so direkt in das Gebäudekonzept eingebracht werden können.

2.3. Realisierung

Die Komplexität in den Umgebungsanforderungen charakterisiert Batterieproduktionen maßgeblich. Hierdurch entstehen direkte Implikationen auf die Raumstruktur der Fabrik, die Anforderungen an die technische Gebäudeausstattung (TGA) sowie die statischen Voraussetzungen des Gebäudes [23]. Eine umsetzbare Planung erfordert entsprechend hohe Abstimmungsbedarfe und Koordinationsaufwände zwischen der Technologie-, Fabrik- und Objektplanung (Bau, Statik und TGA) sowie weiteren einschlägigen Fachplanern. Neben der erforderlichen Fachexpertise in den jeweiligen Planungsdisziplinen hat eine übergreifende Koordination der vielen Schnittstellen einen großen Einfluss auf die Termin-, Kosten- und

Qualitätstreue des Projekts. Als Generalplaner füllt das Metroplan-Team diese Rolle aus und koordiniert alle relevanten Schnittstellen.

Einen ganzheitlichen Ansatz zur Organisation der durch die ansteigende Komplexität zunehmenden Schnittstellen liefert das Building Information Modeling, kurz BIM. Die im Baubereich bereits flächendeckend angewandte Methodik wird zunehmend auch in angrenzenden Planungsdisziplinen im Produktionsumfeld mit dem Anspruch erprobt, ein einheitliches Modell über den gesamten Lebenszyklus einer Fabrik zu generieren. Elementar ist hierbei das konsistente Zusammenbringen

Aktivität	Gewerk
Festlegung der funktionalen Spezifikation und Auslegung der Rein- und Trockenräume (unter Berücksichtigung der Material- und Prozessanforderungen)	Technologieplanung
Integration in die Fabrikstruktur sowie ins Layout (in Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der jeweiligen Planungsphase)	Fabrikplanung
Entwicklung eines geeigneten Raumkonzepts (unter Berücksichtigung von ISO, GMP etc.)	Laborplaner
Strukturierte Dokumentation der produktionsrelevante Nutzeranforderungen	Fabrikplanung
Integration der Rein- und/oder Trockenraumkonzepte in Gebäudestruktur	Bauplanung/Statik
Ausplanung der Medienstrukturen	TGA-Planer
...	...

Tabelle 1: Auszug zusammenspielender Gewerke bei der Rein- und Trockenraumplanung und -realisierung

der Raum- und Prozessperspektive über die unterschiedlichen Informationsträger aus allen Planungsdisziplinen [24]. Die fehlende Standardisierung führt aktuell noch zu vielen Freiheitsgraden in der Umsetzung, jedoch bestätigen Fachkreise bereits die prinzipielle Eignung der Methodik zur Behebung von Kommunikations- und Koordinationsherausforderungen in aktuellen Fabrikplanungsvorgehen, was eine aktuelle Erhebung bestätigt [25]. Derweil werden bereits erste methodische Ansätze in Vorbereitung auf eine operative Anwendung von BIM im erweiterten Anwendungsfeld konzipiert. Sofern sich das Vorgehen weiterentwickelt und etabliert, entstünde hier der nächste Meilenstein für die datenbasierte, integrative Fabrikplanung [26].

Auch die Fraunhofer FFB und Metroplan greifen auf die BIM-Methodik zurück, sofern es die Voraussetzungen ermöglichen und der Einsatz einen Mehrwert verspricht. Idealerweise erfolgt dabei die Initialisierung des BIM-Modells bereits durch die Fabrik- und Technologieplanung und kann nachgelagert von der Objektplanung als Grundlage übernommen werden.

Die grundsätzliche Relevanz zur Verzahnung von Fabrik- und Objektplanung geht bereits auf Wiendahl et. al. zurück und ist im Modell zur synergetischen Fabrikplanung methodisch beschrieben. Dabei werden die Vorgehensweisen der VDI 5200 (Fabrikplanung) und HOAI (Objektplanung) integrativ zusammengeführt [27]. Projektindividuell stellen wir in der praktischen Anwendung häufig Anpassungsbedarfe in den konsekutiven Abfolgen fest, jedoch wird die Wichtigkeit des Zusammenspiels durch das Modell sehr zutreffend verdeutlicht und ebenso auf projektindividuelle Adaptionen hingewiesen.

Top-Thema bei der Realisierung

Das synergetische Zusammenwirken weist im Kontext der Batterieproduktion durch die Realisierung der Rein- und Trockenräume (inkl. der darauffolgenden Maschinen- und Anlagen-einbringung) eine besondere Komplexität auf. Hierbei muss das Vorgehen aller beteiligten Gewerke sehr gut aufeinander

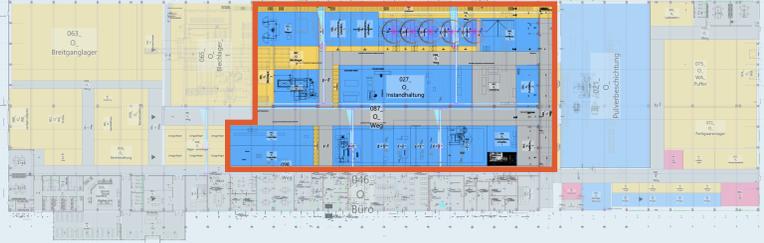
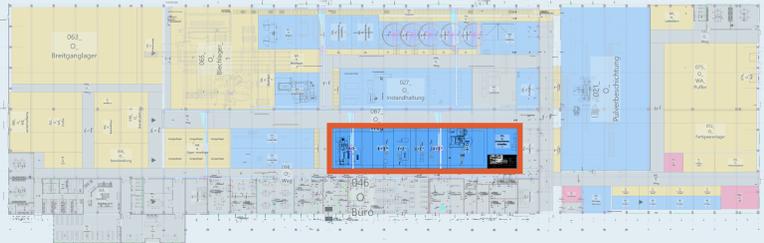
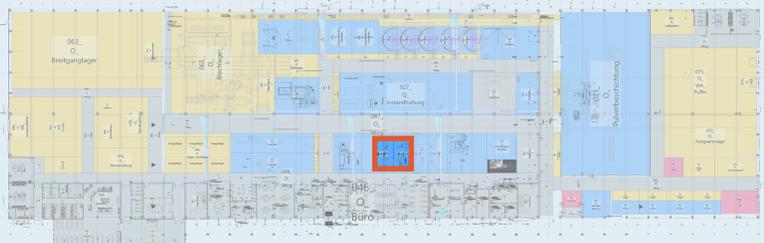
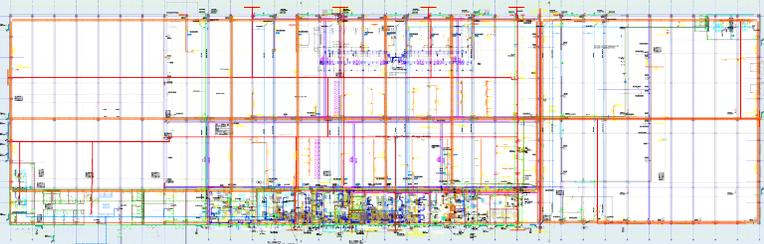
Detailierungsgrad	Nutzeranforderungen (Auszug)	Zugehöriges Layout
Halle	<ul style="list-style-type: none"> ■ Abmaße Grundstück ■ Abmaße Gebäudekubatur ■ Stützenraster ■ Deckenhöhen ■ ... 	
Bereich	<ul style="list-style-type: none"> ■ Fabrikstruktur ■ Flächendimensionen (Block) ■ ... 	
Teilbereich	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächendimensionen (Teilbereich) ■ Umgebungsanforderungen (bspw. Luftwechsel, Temperatur etc.) ■ Bauliche Anforderungen (bspw. Sonderfundamente etc.) ■ ... 	
Arbeitsplatz	<ul style="list-style-type: none"> ■ Flächendimensionen (Arbeitsplatz) ■ Arbeitsplatzindividuelle Anforderungen (bspw. Waschbecken, Notfallreinigung etc.) 	
Ausrüstung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Medienarten ■ Medienanschlusswerte ■ Medienanschlusspunkte ■ ... 	

Tabelle 2: Beispielhafte Detaillierungsstufen bei der Dokumentation der Nutzeranforderungen

abgestimmt sein, um im Anschluss eine reibungslose Umsetzung sicherzustellen. Tabelle 1 liefert einen entsprechenden Einblick.

Um vor diesem Hintergrund eine konsistente Informationsübergabe aller produktionsrelevanten Nutzeranforderungen an die realisierende Instanz abzusichern, setzt das Projektteam von Metroplan eine eigens entwickelte Lösung, das Plant Structure Directory (PSD), ein. Dieses Tool kann als Stückliste der Fabrik interpretiert werden und wird über eine Schnittstelle zum Layout parallellaufend entwickelt. In einer tabellarischen Übersicht werden hier alle produktionsrelevanten Anforderungen je Informationsträger über eindeutige IDs während des gesamten Planungsverlaufs strukturiert dokumentiert. Die kaskadierte Logik ermöglicht eine Betrachtung der Fabrik in unterschiedlichen Detaillierungsgraden. Der Umfang der zu pflegenden Nutzeranforderungen variiert projektindividuell, fällt in der Batteriezellproduktion aufgrund der zu spezifischen Material- und Prozesseigenschaften jedoch sehr umfangreich aus. Zur Verdeutlichung einer typischen Kaskadierung ist in Tabelle 2 ein beispielhafter Aufbau schematisch dargestellt.

Die Weitergabe des PSDs befähigt die Objektplanung dazu, aus den produktionsrelevanten Anforderungen eine geeignete

Grundlage für die bauliche Realisierung zu generieren. Neben den Planungsinhalten aus Bau, Statik und Technischer Gebäudeausrüstung gewinnt das Thema Nachhaltigkeit als Einflussgröße zunehmend an Bedeutung. Der Lösungsraum ist sehr vielschichtig, sodass unterschiedliche Impulse aus den drei bereits im Brundtland-Protokoll beschriebenen Nachhaltigkeitsdimensionen – Ökonomie, Ökologie und Soziales – in die Planung einfließen können [28]. Der Entscheidungsprozess hin zur nachhaltigen Lösung ist durchaus komplex, da die konventionelle Alternative in der Zeitpunkt Betrachtung häufig ein geringeres CAPEX ausweisen kann. Eine zuverlässige Entscheidungsvorlage benötigt hingegen eine differenziertere Betrachtung. Dafür arbeiten unsere Projektteams dedizierte Business Cases aus, die eine zielgerichtete Entscheidung für oder gegen eine Alternative zulassen. Darüber hinaus begleiten Metroplan und die Fraunhofer FFBSie durch unterschiedliche Zertifizierungsprozesse im Nachhaltigkeitskontext (DGNB, LEED, BREEAM etc.), um die vielen Einzelentscheidungen strukturiert zusammenzuführen.

Die angesprochenen Themen stellen lediglich einen Ausschnitt der Gesamtvielfalt dar, wodurch die Wichtigkeit einer zentralen Steuerungs- und Koordinationsinstanz abschließend unterstrichen wird.

2.4. Operational Excellence

Nach erfolgter Realisierung der Produktionsinfrastruktur stellen der Ramp-up und die anschließende Implementierung eines stabilen Produktionsprozesses mit den Methoden der Operational Excellence den letzten Meilenstein im erfolgreichen Fabrikplanungsprozess dar.

Im anhaltenden Zielkonflikt aus Qualität und Quantität der erzeugten Batteriezellen gilt es, eine steile Hochlaufkurve zu realisieren und gleichzeitig Ausschussraten zu minimieren. In diesem Zusammenhang ist eine stringente Führung der Produktionsprozesse maßgeblich. Aufgrund der enormen Materialkostenanteile in der Zellproduktion (ca. 70 Prozent, [29]) ist die Senkung des Produktionsausschusses während der Hochlaufphase hinsichtlich der Ressourceneffizienz eine Kernherausforderung. Die komplexe Verknüpfung von diskreten und kontinuierlichen Prozessen sowie die chemischen und mechanischen Eigenschaften der (Zwischen)produkte erschweren diese Herausforderung. Gleichzeitig gilt es, die hohen Anforderungen an die Prozessumgebung insbesondere bzgl.

Trockenheit und Reinheit zu beachten. Steigende Nickelgehalte im Kathodenaktivmaterial bedingen beispielsweise steigende Trockenheitsanforderungen. Zugleich benötigen immer dünner werdende Elektroden- und Separatorenfolien eine hochreine Produktionsumgebung [21, 30]. So formulieren Kwade et al.: »However, the transfer of developments in materials, cell design and processes from lab scale to production scale remains a challenge due to the large number of consecutive process steps and the significant impact of material properties, electrode compositions and cell designs on processes. This requires an in-depth understanding of the individual production processes and their interactions, and pilot-scale investigations into process parameter selection and prototype cell production.« [31]

Durch diese komplexe Gemengelage an Herausforderungen geraten u.a. die deutschen Automobilhersteller und ihre Batteriezelllieferanten mit den herkömmlichen Werkzeugen des Qualitätsmanagements und der Operational Excellence an

ihre Grenzen [32]. Die Forschenden der Fraunhofer FFB und die Fabrikplanenden von Metroplan kombinieren vor diesem Hintergrund ihr Domänenwissen aus der Batteriezellproduktion und der Inbetriebnahme neuer Fabriken, um einen fehlerfreien Hochlauf (»Safe Launch«) von Batteriezellproduktionskapazitäten zu gewährleisten. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang zunächst eine bedarfsgerechte Identifikation von Problemfeldern in der Zellfertigung [33]. Die FFB-Fehlerdatenbank zur Zellproduktion gibt einen Aufschluss zur »Heatmap of Pains« in der Linie. Die Verbindung mit strukturierten und methodisch abgesicherten FMEA-Prozessen ermöglicht die gezielte Überwachung und Verhinderung bzw. Erkennung von Produktionsfehlern im Anlauf [34]. Auf dieser Basis kann die Einhaltung von qualitätsrelevanten Merkmalen durch entsprechende Produktionslenkungspläne frühzeitig sichergestellt werden. Komplementär zu geplanten Inline-Quality Gates (vgl. Phase Fabrik- und Technologiekettenplanung), sind in der Anlaufphase auf Basis der Fehlerdatenbank zusätzliche Offline-Kontrollen von Qualitätsmerkmalen eine effiziente und effektive Maßnahme zur Ausschussreduktion. Dabei ist die Einstellung der entsprechenden Material-, Produkt- und Prozessparameter entscheidend. Die bereits erwähnten Ursache- und Wirkzusammenhänge erschweren auch in diesem Kontext die Arbeit, wie auch hier der Blick in die Wissenschaft zeigt: »The large number of variables and limited knowledge about their aggregated effect on the product properties requires parameterization through experimentation, although initial models for individual processes are available. This problem can be broken down into three categories: material parameters, design and process parameters, and industrial robustness parameters.« [31]

Der Übergang vom Anlauf in die Serienproduktion wird durch eine engmaschige statistische Prozesskontrolle der entsprechenden Größen begleitet. Das Operational Excellence-Team der Fraunhofer FFB hat zu diesem Zwecke seine Mitarbeitenden gemäß der Six-Sigma-Methodik auf dem Green Belt Level (Projektmitarbeitende, Arbeitspaketverantwortliche) und dem Black Belt Level (Projektleitung) qualifiziert. Die Mitarbeitenden wenden die Six-Sigma Methodik im Sinne des DMAIC-Zyklus in Verbindung mit Lean-Werkzeugen im Kontext der Besonderheiten der Zellproduktion an. Im Bereich der Maschinen- und Anlagenauslastung kommen OEE-Berechnungen zum Einsatz, um die Gesamteffektivität von Produktionsanlagen zu

bewerten. Gemeinsam mit weiteren Performance-Kennzahlen ermöglichen diese Berechnungen eine gezielte Identifizierung von Schwachstellen in den Prozessen und unterstützen die Entwicklung von Maßnahmen zur Reduzierung von Ausfallzeiten und Steigerung der Produktionsgeschwindigkeiten.

Eine zentrale Herausforderung stellt in diesem Sinne die technische Sauberkeit dar. Die Einhaltung der Sauberkeitsanforderungen ist gem. der Six-Sigma Methodik »Critical-to-quality« [35]. Die genauen Grenzwerte legen die Fraunhofer FFB-Mitarbeitenden im Automotive-Umfeld dabei gem. der VDA 19.1 und 19.2 fest. Die VDA 19.1 definiert dabei: »A cleanliness specification (or cleanliness limit value) is stated in cases where there is a significant risk that the function of a system or component could be damaged by particulate contamination. If no risk is present, a cleanliness specification should not be made.« [36]. Im Rahmen des Fabrikstartes gehört die Qualifizierung von Mitarbeitenden hinsichtlich batteriespezifischer Kompetenzen beispielsweise im Bereich technische Sauberkeit daher maßgeblich dazu. In Referenzprojekten wurden dabei, u.a. und zum Teil in Zusammenarbeit mit Metroplan, umfangreiche batteriespezifische Trainings (bspw. technische Sauberkeit, FMEA, Qualitätssicherung, Wertstrom) in der Anlaufphase für industrielle Kunden durchgeführt.

Über die Zieldimensionen Qualität und Kosten hinaus sind ebenfalls Nachhaltigkeitsaspekte gerade am Standort Europa im Fokus von Fabrikplanungs- und -anlaufprojekten. So sind für Großenergieverbraucher innerhalb von Europa Energiemanagementsysteme und entsprechende Energieaudits verpflichtend. Die Realisierung von Energieeinsparungen sind daher bereits in der Anlaufphase entscheidend.

Managementsysteme zur Steigerung der Energieeffizienz können hier unterstützend wirken. Die Einführung von Energiemanagementsystemen gem. internationalen Standards wie der ISO 50001 sind daher Gegenstand von Forschungsprojekten der Fraunhofer FFB, Metroplan und deren Partnern. Energieaudits stellen sicher, dass die Energieverbrauchsdaten korrekt erfasst und Potenziale zur Verbesserung der Energieeffizienz identifiziert werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei beispielsweise auf der Nivellierung von Lastspitzen. Durch Vermeidung von Lastspitzen lässt sich so der Energieverbrauch optimieren.

2.5. Übersicht der Phasen und Werkzeuge

Abbildung 4 stellt aggregiert eine Übersicht der von Metroplan und Fraunhofer FFB verwendeten Werkzeuge entlang des Fabrikplanungsprozesses dar. Diese werden kundenspezifisch

in gemeinsamen Projekten aggregiert. Im folgenden Kapitel wird ein Anwendungsfall mit einem industriellen Kunden unter Einbezug der genannten Werkzeuge beschrieben.

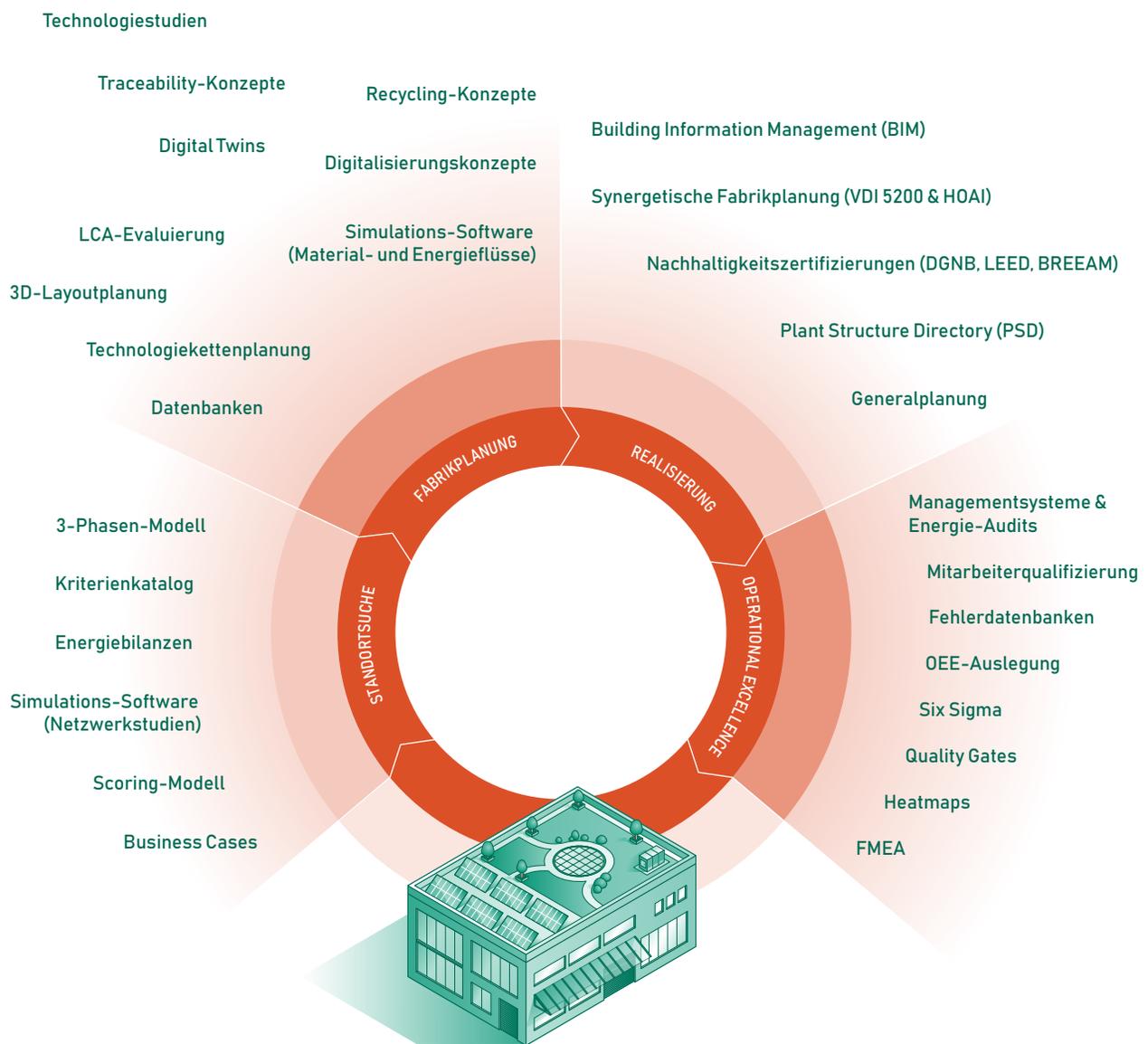


Abbildung 4 Fraunhofer FFB x Metroplan: Werkzeuge und Dienstleistungen auf dem Weg zur Batteriefabrik der Zukunft

3. Use Case

Das vorgestellte Framework zur anforderungsgerechten Fabrikplanung konnten Metroplan und die Fraunhofer FFB bereits im Rahmen eines gemeinsamen Fabrikplanungsprojektes bei einem Industriekunden in Europa erfolgreich umsetzen und validieren. Folgende Ausführungen gewähren einen Einblick in einen Teil der gemeinsamen Arbeiten, umfassen jedoch nicht das gesamte Projekt. Der Fokus der Tätigkeiten lag dabei in der initialen Phase zunächst auf der Zielfestlegung, Grundlagenermittlung und Konzeptplanung in Anlehnung an die VDI 5200. Zum Einsatz kam dabei eine Auswahl der zuvor erläuterten Methoden und Verfahren. Aufgrund der komplexen Anforderungslage auf Seiten des Projektpartners lag der Fokus zunächst auf einer umfangreichen Ermittlung von Zielen und Anforderungen an die neue Fabrik. Um historisch gewachsene Begebenheiten der bestehenden Produktion nicht unreflektiert zu übernehmen, wurde eine Erueierung des Ist-Zustandes durchgeführt. Ziel waren sowohl die wertstromtechnische Optimierung der Produktions- und Logistikprozesse im neuen Layout als auch die Reduzierung produktionsinduzierter Fehler im Endprodukt bzw. die Reduzierung von Ausschuss. Dazu hat das Metroplan- und FFB-Projektteam die bestehenden Produktionsprozesse des Projektpartners umfangreich analysiert. Zum einen kam dabei eine Wertstromanalyse (Ist-Produktion) und ein anschließendes Wertstromdesign (Soll-Produktion) als Anforderungsgeber für das Ideallayout zum Einsatz. Zum anderen wurden im Rahmen einer Prozess-FMEA die bestehenden Fertigungsprozesse hinsichtlich bestehender Prozessfehler

betrachtet (vgl. Abbildung 5). Die Fehlerbilder wurden anschließend hinsichtlich der Risikokategorie priorisiert, sodass daraufhin geprüft werden konnte, ob die entsprechenden Maßnahmen zur Risikomitigation und Prozessoptimierung eine Auswirkung auf das Soll-Layout bzw. das neue Fabrikgebäude haben. Somit wurde die Risikoanalyse der Ist-Prozesse als Brücke zur Anforderungsdefinition an die Soll-Prozesse genutzt.

Entsprechend konnten systematisch qualitätsorientierte und batteriespezifische Anforderungen im Fabrikplanungsprozess abgeleitet werden, um den eingangs beschriebenen Herausforderungen gerecht zu werden (vgl. Abbildung 6). Komplementiert wurde die Anforderungsaufnahme beispielsweise mit der Aufarbeitung von bestehenden Arbeits- und Betriebsanweisungen, Material- und Gefahrstoffinformationen, sowie der Produktprogrammplanung und Stückzahlprognose der entsprechenden Produkte. Anforderungen hinsichtlich Trockenheit und Reinheit der Produktionsumgebung spielen in der Batteriezellproduktion dabei eine essenzielle Rolle und erforderten daher ein besonderes Augenmerk in den Arbeiten. Auch hinsichtlich der Anpassungsfähigkeit zukünftiger Technologiesprünge wurden Anforderungen mit den Mitarbeitenden des industriellen Kunden erarbeitet. Dabei stand neben der Technologiekettenplanung die Bestimmung von Technologiealternativen inkl. eines Flexibilisierungskonzeptes hinsichtlich von Wachstumsflächen für mögliche Downstream- bzw.

Kategorie	Produkt	Betroffene Komponenten/ Materialien	Prozessschritt	FF/BF/ ZF/WF	Bezeichnung Anforderung
Materialanforderung	A	Slurry	Mischen Slurry	FF	Netzwerk
Prozessanforderung	A	Aktivmaterial Pulver	Vormischen	WF	Dosiervorrichtung
Prozessanforderung	C	Gehäuse	Bereitstellung	FF	Ausschleusung
...

Abbildung 6: Anforderungsliste Fabrikplanung (exemplarische Einträge)

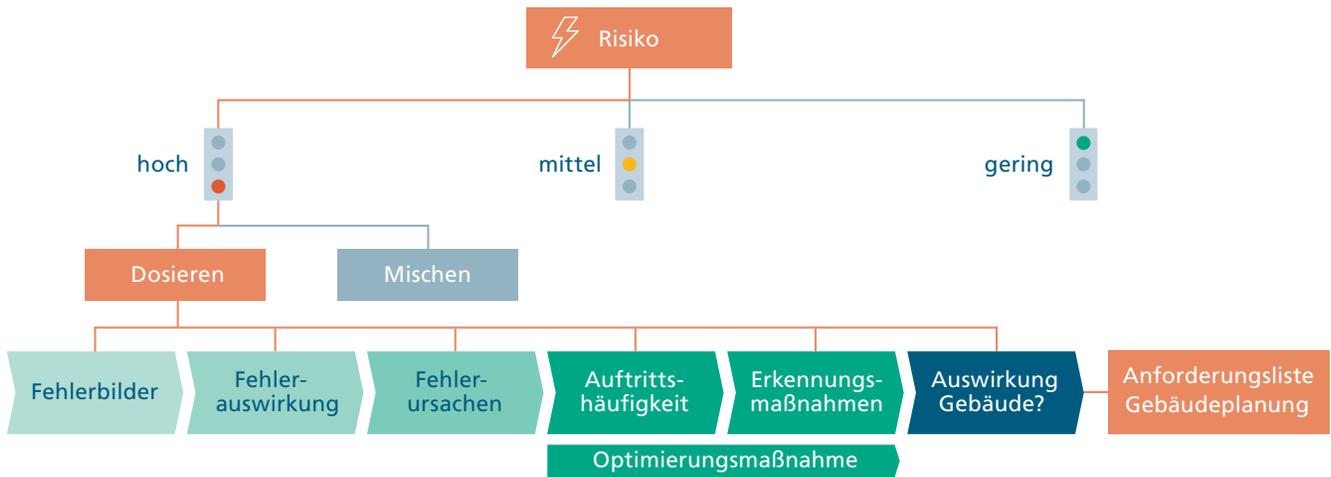


Abbildung 5: Prozess-FMEA als Werkzeug zur Anforderungsermittlung im Fabrikplanungsprozess

Upstream-Erweiterung der Wertschöpfungskette im Fokus der Arbeiten.

Nachdem unterschiedliche Konzeptvarianten entwickelt und eine Vorzugsvariante ausgewählt werden konnte, begleitete das Projektteam den Industriekunden weiterführend durch die Detailplanung. Hierbei wurden die entsprechenden Einzel-layouts weiter bis auf die Ausrüstungsebene ausgeplant und mehrere Iterationen bis hin zur flächen- und materialflussoptimierten Gesamtlayoutzusammenführung durchlaufen. Parallel dazu wurden die benötigten Betriebsmittel vollumfänglich spezifiziert und für den Beschaffungsprozess vorbereitet. Zum Ende der Phase wurde die Dokumentation aller produktionsrelevanten Nutzeranforderungen im Plant Structure Directory (PSD) bis zum finalen Definitionsstand abgeschlossen und als Vorbereitung auf das Raumbuch an die Objektplanung übergeben. Während dieser Phase hat sich erneut herausgestellt, wie wichtig eine parallellaufende, enge Synchronisation mit der Objektplanung ist, um die Fabrikplanung realisierungsreif abzuschließen. Zwar gab es zum Ende der Phase eine finale

Übergabe der produktionsrelevanten Nutzeranforderungen durch die Fabrikplanung an die Objektplanung, jedoch war der Weg dorthin durch viele Abstimmungszyklen zwischen allen Gewerken zu ebnen.

Darauffolgend erfolgte in enger Kooperation mit unserem Projektpartner die Vorbereitung der Realisierung. Im Rahmen dieser Phase lag der Fokus eindeutig auf der Betriebsmittelbeschaffung – ein strukturiertes Zusammenfassen in Betriebsmittelkategorien, weitere Spezifikationen sowie die Entwicklung eines klaren Zeit- und Aktivitätenplans unter Berücksichtigung der relevanten Meilensteine aus der Objektplanung (wie bspw. Baubeginn, Montagefreiheit, Start of Production etc.) bilden die Voraussetzungen für eine budget- und termintreue Realisierung.

Im Anschluss startete mit dem Spatenstich die Objektrealisierung, welche aktuell ebenfalls durch das Projektteam begleitet wird.

Wert	Bemerkung	Relevanz Layout	Ableitung für Layout	Quelle
-	Netzwerkanschlüsse Maschinenbereich	mittel	Netzwerkanschlüsse im Testbereich	Arbeitsanweisung
-	Grundriss Dosiervorrichtung neben Maschine beachten	hoch	Footprint Dosiervorrichtung	P-FMEA
-	Ausschuss Behälter einplanen	hoch	Footprint und Materialfluss beachten	Wertstrom
...

4. Zusammenfassung

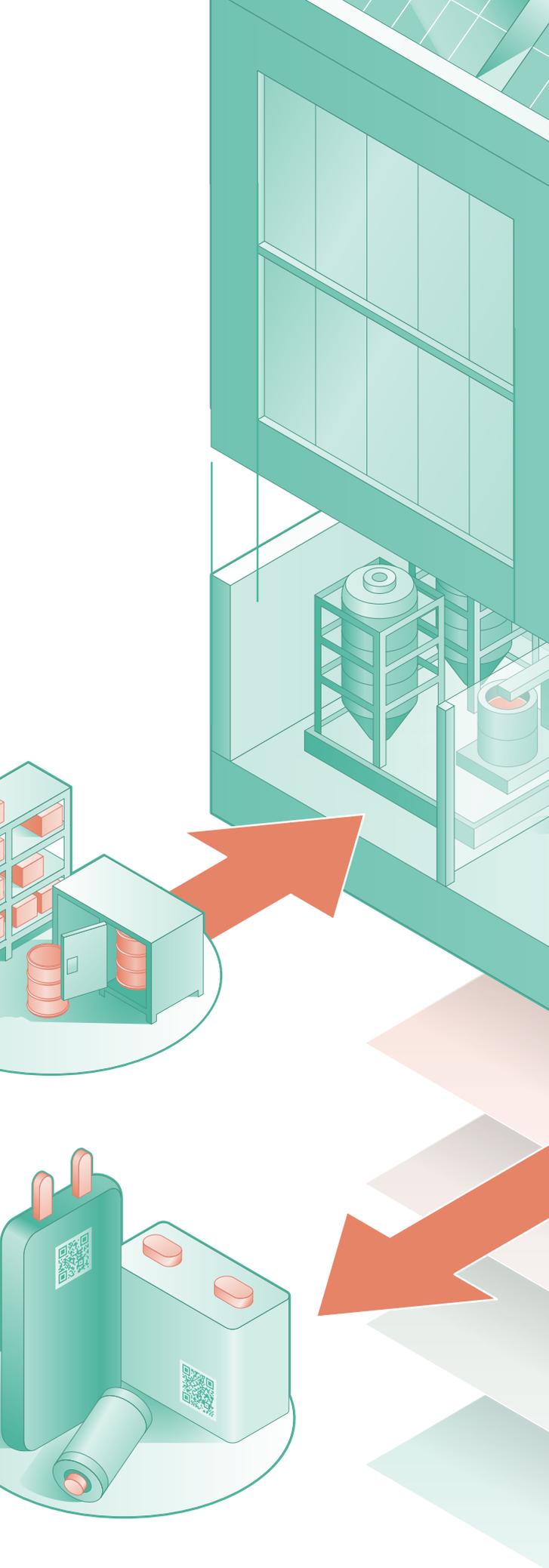
Speziell für die Batteriezelltechnologie sieht sich die Disziplin der Fabrikplanung und -realisierung mit einer Vielzahl von Herausforderungen konfrontiert, welche aufgrund ihrer hohen Komplexität und Interdependenz die bestehenden Ansätze an ihre Grenzen bringen. Sie sind vor allem durch einen hohen Kosten- und Volumendruck bei eingeschränkter Fachkräfteverfügbarkeit, einen hohen Energiebedarf und komplexe Ursache-Wirkzusammenhänge entlang einer Prozesskette mit hoher Sensitivität der qualitätsbestimmenden Produkteigenschaften geprägt. Zusätzlich existiert für die einzelnen Fertigungsschritte

eine Vielzahl von Technologiealternativen. Das resultierende Spannungsfeld wird von einem hohen Neuigkeitsgrad bei noch geringen Erfahrungen im europäischen Wirtschaftsraum und einem umfassenden Wettbewerb verstärkt. Ein Lösungsweg besteht in der Erweiterung etablierter Methoden, um dedizierte Ansätze und die direkte Integration wissenschaftlich fundierter Forschungsergebnisse in den Planungszyklus. Dieser wird von der Firma Metroplan und der Fraunhofer FFB in gemeinsamen Projekten angewendet.

Executive Summary

- Die **Fraunhofer FFB** und **Metroplan** verbinden vor dem Hintergrund aktueller Herausforderungen ihre Kompetenzen in den Kernfeldern Batterieproduktionstechnologie und Fabrikplanung synergetisch zu einem **Methodenansatz** für die anforderungsorientierte **Batteriefabrikplanung und -realisierung**
- Dieser adressiert **modular und projektspezifisch** die phasenbezogenen Herausforderungen, welche sich auf dem Weg zur zukunftsfähigen Batteriefabrik vielseitig ergeben – von der **Standortsuche, Planung** und **Realisierung** bis zur **Inbetriebnahme** (»Operational Excellence«) neuer Batteriefabriken
- Auf diese Weise können Kunden **effektiv und effizient** dabei unterstützt werden, ihren Produktionsstandort für Batteriezellen optimiert unter den Kriterien **Qualität, Flexibilität, Kosten und Nachhaltigkeit** zu planen und umzusetzen
- Zugehörige **Tools** werden kontinuierlich in Projekten angewandt und weiterentwickelt. Zusammen mit den Experten der Fraunhofer FFB und Metroplan liefern diese einen nachhaltigen Mehrwert für Ihr Projekt – **sprechen Sie uns für ihr Fabrikplanungsprojekt an!**





Literatur

- [1] L. Weymann. »Battery Update: Battery cell production in Europe: In which countries will European manufacturers dominate - and where do international companies want to gain a foothold?« <https://www.isi.fraunhofer.de/en/blog/themen/batterie-update/globale-batterieproduktion-analyse-standorte-mengen-zellen-lfp-nmc-nca-kathoden.html> (Zugriff am: 28. August 2023).
- [2] A. Bunting, H. Lickert und S. Vogl. »Accompanying Research Battery Cell Production: Build-up of the battery industry in Europe - Status Quo and challenges.« Market Analysis Update Q2 2023. https://www.ipcei-batteries.eu/fileadmin/Images/accompanying-research/market-updates/2023-07-BZF_Kurzinfo_Marktanalyse_Q2-ENG.pdf
- [3] T. Schmaltz, T. Wicke, L. Weymann, P. Voß, C. Neef und A. Thielmann, »Solid-State Battery Roadmap 2035+,«, 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/2022/SSB_Roadmap.pdf
- [4] F. Duffner, O. Krätzig und J. Leker, »Battery plant location considering the balance between knowledge and cost: A comparative study of the EU-28 countries,« Journal of Cleaner Production, Jg. 264, S. 121428, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121428.
- [5] M. von Schwerin, M. Reichert und K. Urban, Hg. Tagungsband zum 3. Innovationskongress Ulm: Neu-Ulm: am 17. Mai 2022. Ulm: TH Ulm, 2022. Zugriff am: 23. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://oparu.uni-ulm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/38579/EnergieNeuDenken.pdf>
- [6] M. Bechberger, F. Vorholt, A. Bunting und N. Oehl-Schalla, »Studie_Nachhaltigkeit_der_Batteriezellfertigung_in_Europa,«. [Online]. Verfügbar unter: https://vdivde-it.de/sites/default/files/document/Studie_Nachhaltigkeit_der_Batteriezellfertigung_in_Europa.pdf
- [7] M. C. Asaba, F. Duffner, F. Frieden, J. Leker und S. von Delft, »Location choice for large-scale battery manufacturing plants: Exploring the role of clean energy, costs, and knowledge on location decisions in Europe,« J of Industrial Ecology, Jg. 26, Nr. 4, S. 1514–1527, 2022. doi: 10.1111/jiec.13292. [Online]. Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.13292>

- [8] B. Bürklin et al., »Umfeldbericht zum europäischen Innovationssystem Batterie 2022,«, 2022, doi: 10.24406/publica-749.
- [9] G. Bridge und E. Faigen, »Towards the lithium-ion battery production network: Thinking beyond mineral supply chains,« *Energy Research & Social Science*, Jg. 89, S. 102659, 2022. doi: 10.1016/j.erss.2022.102659. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629622001633>
- [10] T. Kornas, R. Daub, M. Z. Karamat, S. Thiede und C. Herrmann, »Data-and Expert-Driven Analysis of Cause-Effect Relationships in the Production of Lithium-Ion Batteries,« in *2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*, 2019, S. 380–385, doi: 10.1109/COASE.2019.8843185.
- [11] F. Degen und O. Kratzig, »Future in Battery Production: An Extensive Benchmarking of Novel Production Technologies as Guidance for Decision Making in Engineering,« *IEEE Transactions on Engineering Management*, S. 1–19, 2022, doi: 10.1109/TEM.2022.3144882.
- [12] Das europäische Parlament und der Rat der europäischen Union, Verordnung (EU) 2023/1542 des europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien, zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG und der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG: Verordnung (EU) 2023/1542, 2023.
- [13] K. Berger, R. J. Baumgartner, M. Weinzerl, J. Bachler, K. Preston und J.-P. Schögl, »Data requirements and availabilities for a digital battery passport – A value chain actor perspective,« *Cleaner Production Letters*, Jg. 4, S. 100032, 2023. doi: 10.1016/j.clpl.2023.100032. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666791623000052>
- [14] J. Wessel, A. Schoo, A. Kwade und C. Herrmann, »Traceability in Battery Cell Production,« *Energy Tech*, Jg. 11, Nr. 5, 2023, Art. Nr. 2200911. doi: 10.1002/ente.202200911. [Online]. Verfügbar unter: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ente.202200911>
- [15] J. Krauß et al., *Der Digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung*, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/05cc0964-10f5-43fd-b8b5-6b4d05bad628/details>
- [16] J. Garche und K. Brandt, *Li-Battery Safety (Electrochemical power sources)*. San Diego: Elsevier, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5516469>
- [17] A. Kampker, H. Heimes, B. Dorn, H. Clever und A. Scheibe, *Potentials and Implementation Strategies For Flexible Battery Cell Production*. Hannover: publish-Ing, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/13616>
- [18] E. Ayerbe, M. Bercibar, S. Clark, A. A. Franco und J. Ruhland, »Digitalization of Battery Manufacturing: Current Status, Challenges, and Opportunities,« *Advanced Energy Materials*, Jg. 12, Nr. 17, S. 2102696, 2022, doi: 10.1002/aenm.202102696.
- [19] M. Romare und L. Dahllöf, »The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries,«, IVL Svenska Miljöinstitutet, Mai. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://ivl.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1549706&dswid=-2223>
- [20] F. Degen und M. Schütte, »Life cycle assessment of the energy consumption and GHG emissions of state-of-the-art automotive battery cell production,« *Journal of Cleaner Production*, Jg. 330, S. 129798, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129798. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621039731>
- [21] M. Heller et al., *Energieeffiziente und qualitätsorientierte Anlagenkonzepte für die Batteriezellfertigung*, 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/d709c2df-c4da-4e7d-8fde-d573e3148bc0/details>
- [22] C. Neef, T. Schmaltz und A. Thielmann, »Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau,«. [Online]. Verfügbar unter: https://recyclingportal.eu/wp-content/uploads/2021/11/VDMA_Kurzstudie_Batterierecycling.pdf
- [23] R. Simon, »Aufbau einer Fabrik zur Zellfertigung,« in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013, S. 249–257. [Online]. Verfügbar unter: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-30653-2_19
- [24] L. Rieke, S. F. Schäfer, L. Hingst, J. Hook und N. Peter, »Einsatz von BIM in der Fabrikplanung/Use of BIM in factory planning,« *wt*, Jg. 111, 11-12, S. 881–886, 2021, doi: 10.37544/1436-4980-2021-11-12-111.

- [25] Neuhäuser et al., »Relevanz von BIM in der Fabrikplanung,« WT Werkstatttechnik, Band 113, Nr. 3, 2023.
- [26] S. F. Schäfer, L. Hingst, J. Hook, L. Rieke und P. Nyhuis, »Improving The Planning Quality Through Model-Based Factory Planning In BIM,«, 2022, doi: 10.15488/12041.
- [27] H.-P. Wiendahl, J. Reichardt und P. Nyhuis, Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten, 2. Aufl. München, Wien: Hanser, 2014.
- [28] World Commission on Environment and Development, Our common future. Oxford, New York, Auckland: Oxford University Press, 2009.
- [29] L. Mauler, F. Duffner, W. G. Zeier und J. Leker, »Battery cost forecasting: a review of methods and results with an outlook to 2050,« Energy Environ. Sci., Jg. 14, Nr. 9, S. 4712–4739, 2021. doi: 10.1039/D1EE01530C. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ee/d1ee01530c>
- [30] Grabow et al., »Particle Contamination in Commercial Lithium-Ion Cells—Risk Assessment with Focus on Internal Short Circuits and Replication by Currently Discussed Trigger Methods,« Batteries, Jg. 9, Nr. 1, S. 9, 2023, doi: 10.3390/batteries9010009.
- [31] A. Kwade, W. Haselrieder, R. Leithoff, A. Modlinger, F. Dietrich und K. Droeder, »Current status and challenges for automotive battery production technologies,« Nat Energy, Jg. 3, Nr. 4, S. 290–300, 2018, doi: 10.1038/s41560-018-0130-3.
- [32] S. Schaal, »electrive.net,« RabbitPublishing GmbH, 24. Juni 2022. <https://www.electrive.net/2022/06/24/vw-unterbricht-id-buzz-produktion-wegen-fehlerhafter-batterien/> (Zugriff am: 23. August 2023).
- [33] M. Kehrler, M. Locke, C. Offermanns, H. Heimes und A. Kampker, »Analysis of Possible Reductions of Rejects in Battery Cell Production during Switch-On and Operating Processes,« Energy Technology, Jg. 9, Nr. 7, S. 2001113, 2021, doi: 10.1002/ente.202001113.
- [34] C. Hendricks, N. Williard, S. Mathew und M. Pecht, »A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA) of lithium-ion batteries,« Journal of Power Sources, Jg. 297, S. 113–120, 2015, doi: 10.1016/j.jpowsour.2015.07.100.
- [35] M. Mostafee, Six Sigma for quality assurance of Lithium-ion batteries in the cell assembly proce: A DMAIC field study at Northvolt. Zugriff am: 23. August 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://tu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1573372/FULLTEXT01.pdf>
- [36] Quality Management In The Automotive Industry - Inspection of Technical Cleanliness: Particulate contamination of functionally-relevant automotive components, 19.1, Verband der Automobilindustrie e.V., Mrz. 2015.

Kontaktinformationen / Impressum

Autoren:

Jasper Döhrn

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Gruppe »Operational Excellence«
jasper.doehrn@ffb.fraunhofer.de

Hendrik Walter

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
Gruppenleiter
Gruppe »Operational Excellence«
hendrik.walter@ffb.fraunhofer.de

Florian Degen

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB
Bereichsleiter
Bereich »Strategie und Corporate Development«
florian.degen@ffb.fraunhofer.de

Simon Vehof

Metroplan Production Management GmbH
Business Development Manager
simon.vehof@metroplan.de

Matthias Göke

Metroplan Production Management GmbH
Geschäftsführender Gesellschafter
matthias.goeke@metroplan.de

Sven Carmincke

Metroplan Production Management GmbH
Senior Manager
sven.carmincke@metroplan.de

Herausgeber:

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezelle FFB

www.ffb.fraunhofer.de
Bergiusstraße 8
48165 Münster

Metroplan Production Management GmbH

www.metroplan.de
Ludwig-Erhard-Straße 18
20459 Hamburg

