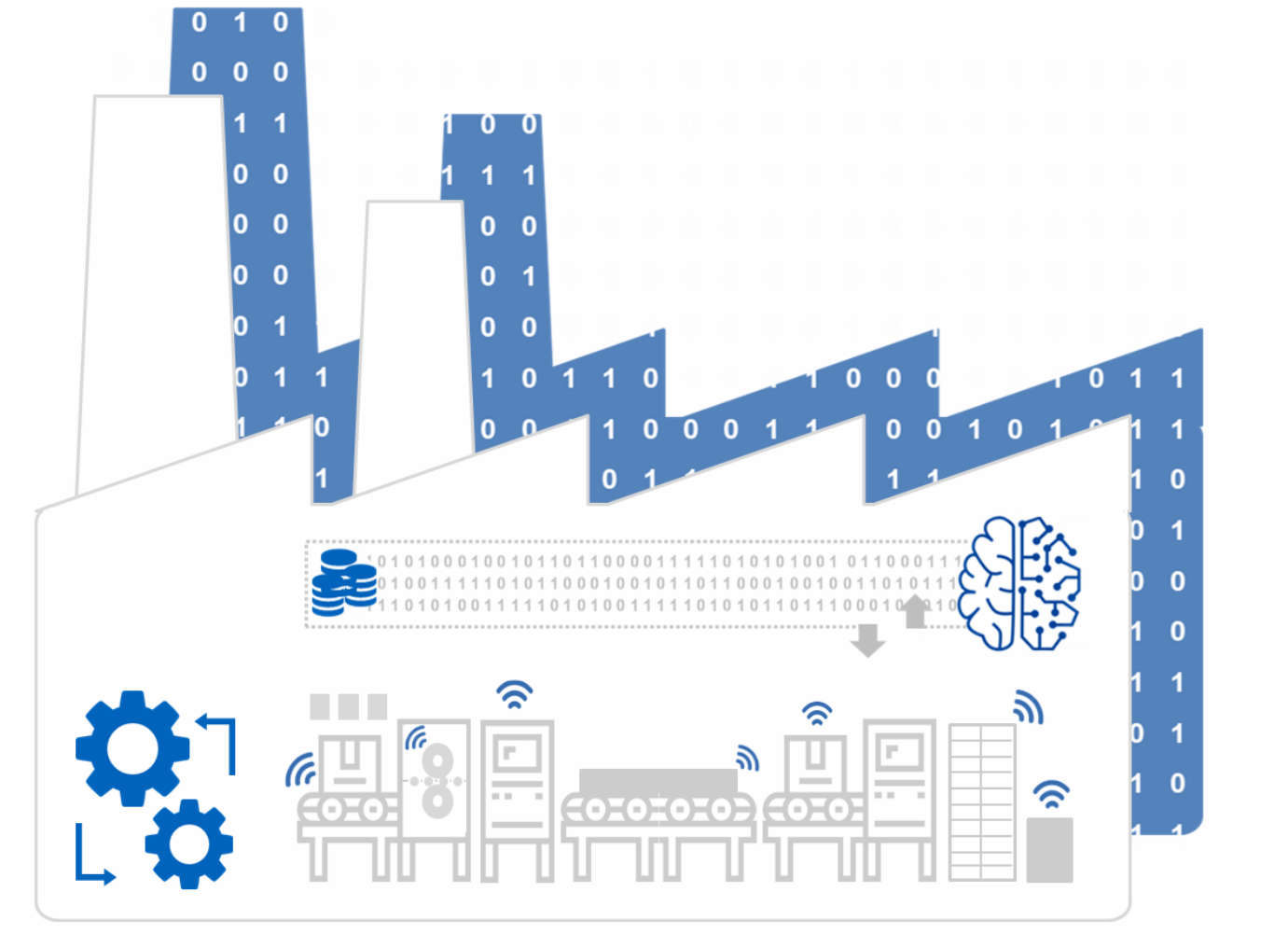
Rahmenplan zum BMBF-Kompetenzcluster Intelligente Batteriezellproduktion – *InZePro*

InZePro
Kompetenzcluster
Intelligente Batteriezellproduktion



Clusterkoordinator 1 (Sprecher):
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut
für Produktionstechnik (wbk)
Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe
+49 721 608 44009
juergen.fleischer@kit.edu

Clusterkoordinator 2:
TU München
Institut für Werkzeugmaschinen und
Betriebswissenschaften (iwb)
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub
Boltzmannstr. 15, 85748 Garching
+49 821 90678 121
ruediger.daub@iwb.tum.de

Clusterkoordinator 3:
TU Braunschweig
Institut für Werkzeugmaschinen und
Fertigungstechnik (IWF)
Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder
Langer Kamp 19b, 38106 Braunschweig
+49 531 391 7600
k.droeder@tu-braunschweig.de

Clusterkoordinator 4:
RWTH Aachen University
Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)
Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker
Campus-Boulevard 30, 52074 Aachen
+49 241 80 27406
A.Kampker@pem.rwth-aachen.de

1. Mission & Ziele

1.1. Mission und Ziele - Zusammenfassung

Die Mission des BMBF-Kompetenzclusters *Intelligente Batteriezellproduktion* (*InZePro*) ist die **Reduzierung der Produktionskosten** und die **Erhöhung der Produktqualität** von Batteriezellen. Dabei steht insbesondere die **Erhöhung der Produktivität** bzw. der Ausbringung der Zellproduktion durch die **ganzheitliche Optimierung des Produktionssystems** unter Einsatz von Lösungen der Industrie 4.0 im Fokus. Hierbei soll auch die **Flexibilität des Produktionssystems** hinsichtlich Menge, Format, Material und verwendeten Technologien adressiert werden.

In einem ganzheitlichen Ansatz sollen allgemeingültige Erkenntnisse und Methoden erarbeitet werden, wobei sowohl Klein-, Mittel- als auch Großserien[1] berücksichtigt werden und die Skalierbarkeit mitbetrachtet wird. Hierfür fehlen bis jetzt jedoch die entsprechende Anlagentechnik sowie intelligente Ansätze der Produktionssteuerung. Durch eine Produktivitätssteigerung reduzieren sich die Fixkosten pro hergestellter Batteriezelle und damit die Produktkosten. Ermöglicht wird dies durch eine auch bei schwankender Auftragslage hohe Gesamtanlageneffektivität sowie durch ressourceneffiziente Prozesse. Zur Erhöhung ersterer gilt es Verluste durch Rüstaufwände, Anlagenausfälle, Ausschuss und Anlaufverzögerungen zu minimieren. Dies soll durch eine flexible Anlagentechnik, virtuelle Modelle zur Inbetriebnahme sowie ein datenbasiertes Qualitäts- und Instandhaltungsmanagement erfolgen. Je detaillierter Planungsmodelle durch virtuelle Abbilder von Anlagen, Prozessen und Produkten hierfür miteinander in einen Kontext gebracht werden können, desto höher ist die Planungssicherheit und desto geringer fallen Änderungskosten im Aufbau sowie Anlaufkosten während der Inbetriebnahme aus. Besonders neue und innovative Materialien können so schneller und ohne Erzeugung von Ausschuss verarbeitet werden. Bereits in frühen Planungsstadien von Anlagen und Fertigungslinien ist es somit notwendig, den Wertstrom der Produktion zu kennen und digital abzubilden. Die Ressourceneffizienz im Betrieb kann anschließend aufbauend auf dem digitalen Zwilling des Produktionssystems durch simulations- und datengestützte Wertstromanalysen erhöht werden. Die hierfür notwendigen virtuellen Produktionssysteme, welche die Produktion simulieren sowie Zustände voraussagen können, müssen mit Daten parametrisiert und validiert werden. Die Erfassung der Daten über Sensorik, Kommunikation der Anlagen über definierte Schnittstellen sowie Datenaufbereitung und -speicherung in Datenbanken stellen die Industrie aufgrund von fehlenden Standards und mangelnder Expertise vor Herausforderungen. Stehen echtzeitfähige Datenbanken und Inline-Sensorik zur Verfügung, kann neben den Prozessen die gesamte Produktionssteuerung inline mittels klassischer Methoden sowie Ansätzen der künstlichen Intelligenz optimiert werden. Ein besonderer Fokus des BMBF-Kompetenzclusters liegt dabei auf der **Erhöhung der Produktqualität**. Charakteristische Eigenschaften der Zelle sollen möglichst wenig voneinander abweichen.

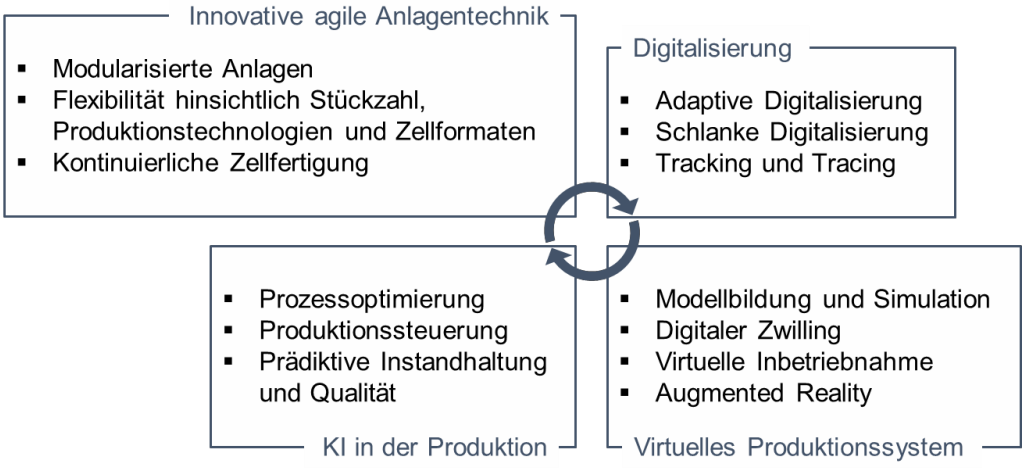


Abbildung 1: Übersicht der Themenschwerpunkte des BMBF-Kompetenzclusters

[1] Kleinserie: 0 - 10 $\mathrm{kWh\ a^{-1}}$, Mittelserie: 10 $\mathrm{kWh\ a^{-1}}$ - 1 $\mathrm{GWh\ a^{-1}}$, Großserie: > 1 $\mathrm{GWh\ a^{-1}}$

Insgesamt ergeben sich zur Zielerreichung des BMBF-Kompetenzclusters die vier in Abbildung 1 dargestellten Themenschwerpunkte **Innovative agile Anlagentechnik**, **Digitalisierung**, **Künstliche Intelligenz (KI) in der Produktion** sowie **Virtuelles Produktionssystem**. Für diese sollen innerhalb des BMBF-Kompetenzclusters allgemeingültige Methoden sowie Standards erarbeitet und gesetzt werden. Diese Standards sollen den weiteren BMBF-Kompetenzclustern (*ProZell, ExcellBattMat, FestBatt, AQua, GreenBattery* und *Batterienutzungskonzepte*), der *FFB* und dem VDMA zur Verfügung gestellt werden, beispielsweise über Workshops oder Vorträge auf Fachkonferenzen.

1.2. Ausführliche Beschreibung des Lösungsansatzes

Ausgehend von der zuvor ausgeführten Mission des Clusters *InZePro* wird nachfolgend der Stand der Technik zu den vier Themenschwerpunkten vorgestellt.

1.2.1. Stand der Technik und Forschung

1.2.1.1. Innovative agile Anlagentechnik

Die Batteriezellproduktion entspricht heutzutage einer konventionellen Transferstraße, wie sie von Henry Ford entwickelt wurde. Die Prozessschritte von der Aufbereitung der Materialien bis hin zum Formieren der Batteriezellen sind starr verkettet und an eine feste Taktzeit gebunden [1]. Dies hat den Vorteil, dass bei entsprechend hohen Produktionsvolumina zu verhältnismäßig geringen Kosten produziert werden kann. Das gilt allerdings nur, solange sich die Bedingungen innerhalb der Produktionslinie nicht ändern. Materialneu- und -weiterentwicklungen führen schnell zu kostenintensiven Anpassungen innerhalb der Produktionslinie, ebenso wie Änderungen an den herzustellenden Zellformaten. Der Vorteil hoher Produktionskapazitäten, Produktivität und scheinbar kontrollierbarer Qualität besteht nämlich nur, solange sich die Verhältnisse in der starr verketteten Linie nicht ändern. Ein weiteres Problem in konventionellen Transferstraßen entsteht, wenn diese volatile Marktnachfragen bedienen sollen. Das Linienlayout dieser Transferstraßen wurde für einen bestimmten Produktionsoutput geplant und sieht nicht vor, diesen im Nachhinein anpassen zu können. Mangelnde Agilität bestehender Zellproduktionslinien ist folglich ein inhärentes und systemisches Problem, welches sich nur durch ein Überdenken derzeitiger Produktionskonzepte lösen lässt.

Flexibilität bezüglich des zu verarbeitenden Materials, der herzustellenden Zellformate, aber auch der zu produzierenden Kapazitäten gewinnt aufgrund volatiler und neuer Märkte sowie Anwendungsfelder zudem stetig an Bedeutung. Hersteller sind in den vergangenen Jahren dazu übergegangen ihre Produktlebenszyklen sukzessive zu verkürzen. Dies zeigt sich besonders im Bereich der Consumer Electronics, in dem mittlerweile halbjährlich neue Modellvarianten angekündigt werden. Dieser Trend schlägt sich jedoch auch in vielen klassischen Industrien mit üblicherweise langen Entwicklungszyklen nieder. In der Automobilindustrie, beispielsweise, ist zu beobachten, dass auch hier die Produktlebenszyklen immer kürzer wurden. Ist der Golf I ganze neun Jahre lang gebaut worden, so betrug die Produktion des Golf V lediglich fünf Jahre. Da die Einführung eines neuen Produktes oft mit Änderungen der bestehenden Bauräume einhergeht, schlagen sich diese natürlich unmittelbar im zur Verfügung stehenden Bauraum (z.B. für die Zellen) nieder. Produktneuerungen gehen in der Regel mit einer Verbesserung der Produkteigenschaften (Schnellladefähigkeit, Kapazitätserhöhung, umweltfreundliche Materialien, etc.) einher, weshalb die verwendeten Materialien (z.B. Aktivmaterialien) ebenfalls einem evolutionären Prozess unterliegen und kontinuierlich verbessert werden. Aus Sicht der Produktionstechnik stellen Materialänderungen eine große Herausforderung dar, da der Prozess auf die neuen Materialien eingestellt werden muss. Ist die Produktionstechnik nicht flexibel genug, sind unter Umständen kostspielige Änderungen an den Anlagen notwendig. Um dieses Problem zu adressieren bedarf es einer agilen Anlagentechnik sowie eines tiefgreifenden Prozessverständnisses, durch welches letztlich auch der Materialausschuss verringert werden kann. Ein Grund für die forschungsseitig unaufhörlich vorangetriebene Materialneu- und -weiterentwicklung ist das Bestreben nach immer höheren Energie- und Leistungsdichten [2 bis 4]. Materialentwicklungen beginnen naturgemäß in sehr kleinen Mengen und erfordern einen schrittweisen „Scale-Up“, sodass eine

Industrialisierung aus dem Forschungsbereich heraus erfolgen kann. Die Hochskalierung bringt jedoch zahlreiche unbekannte Herausforderungen mit sich [5 bis 7]. So kann sich beispielsweise selbst die Zugabe kleinster Mengen an Additiven oder eine minimale Variation der Materialzusammensetzung maßgeblich auf mechanischen Eigenschaften des Materials und damit die Prozessierbarkeit des zu verarbeitenden Materials auswirken [4, 7]. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es im Labormaßstab andere Anlagen-Material-Wechselwirkungen gibt als in einer Großserienproduktion – beispielsweise durch die üblicherweise manuellen oder nur teilautomatisierten Prozesse. Einen weiteren Einfluss auf die Verarbeitbarkeit hat die zunehmende Prozessgeschwindigkeit in Industrieprozessen, welche ihre Limitation nicht selten in der Belastbarkeit der zu verarbeitenden Materialien findet [6]. Es ist folglich davon auszugehen, dass das Handhaben großer Mengen oder Prozessieren mittels hoher Geschwindigkeiten anderen Anlage-Material- Korrelationen unterliegt, als ein Prozess im laboratorischen Umfeld.

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Aspekt in starr verketteten Produktionslinien ist die Problematik fehlender Formatflexibilität [8]. Diese ist gegenwärtig nur in einem sehr eingeschränkten Rahmen möglich, nämlich solange bestehende Anlagen beispielsweise den Wechsel auf eine andere Werkzeuggröße erlauben. Passt das Werkzeug nicht in den vorhandenen Bauraum der Bestandsanlage, muss demzufolge die komplette Anlage ausgetauscht werden. Dies gilt unabhängig vom Zellformat – Pouch, zylindrisch und prismatisch – und insbesondere für alle Prozesse, welche nicht im Rolle-zu-Rolle-Verfahren stattfinden. Neben den Defiziten beim Wechsel von Werkzeugen spielen außerdem entstehende Werkzeugkosten eine entscheidende Rolle. Ein Tausch von Werkzeugen, Inlays und Vorrichtungen ist in der Regel mit hohen Kosten und langen Stillstandzeiten verbunden [8, 9]. Die eingangs beschriebenen **Marktanforderungen an neue Zellformate mit geometrisch unterschiedlichen Formen** zeigen zusätzlich den **Bedarf an flexibler Anlagentechnik** und das **Abkommen von starr verketteten Produktionslinien** auf.

Der Aspekt **fehlender Agilität** in gegenwärtigen Zellproduktionslinien ist bisher ein ebenfalls nicht adressiertes Problem. Aufgrund der starren Verkettung der Produktionsprozesse kann deren Durchsatz im Wesentlichen nur über die Verringerung bzw. Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit variiert werden [10]. Die Spannweite deren möglicher Variation werden durch die Leistungsmerkmale der einzelnen Produktionsanlagen bzw. Prozessfenster der jeweiligen Prozesse beschrieben. Das schwächste Glied in der Kette bestimmt dementsprechend den maximalen Output der gesamten Linie. Ebenso kann es Höchst- und Mindestprozessgeschwindigkeitsanforderungen für einzelne Prozessschritte geben. Diese sind oft notwendig, um Prozesse stabil und auf einem qualitativ hohen Niveau halten zu können. Exemplarisch sei hier die Materialführung von Elektrodenbahnen und Separatoren genannt.

In Transferstraßen ist es zudem in der Regel nicht möglich bei Bedarf Anlagen zu ergänzen bzw. aus der Linie zu nehmen, da dieses spezifische Produktionssystem nicht dafür konzipiert wurde. Dies führt dazu, dass nicht auf steigende oder sinkende Bedarfe reagiert werden kann. Ist eine starre Transferstraße nicht ausgelastet, kann diese folglich nicht mehr maximalwirtschaftlich produzieren und ist somit ungeeignet.

Um den oben genannten Herausforderungen zu begegnen, ist im ersten Schritt ein **tiefgreifendes Prozessverständnis** von großer Bedeutung. Dies ermöglicht die Beschreibung der Korrelationen zwischen Materialeigenschaften, Fehlerbildern und Prozessparametern, um möglichst agil auf die Herausforderungen neuer Materialien, Formate und schwankender Nachfrage reagieren zu können. Aufgrund der Beschreibung der heutigen Batteriezellproduktion als konventionelle Transferstraße, ist ersichtlich, dass diese **Herausforderungen nicht allein über das Prozessverständnis und die Anpassung von Prozessparametern adressiert** werden können. Zudem bedarf es eines Überdenkens gegenwärtig vorhandener Prozess- und Anlagentechnik. Diese muss möglichst **agil** gestaltet sein, was wiederum eine **Neuentwicklung innovativer Anlagentechnik** nach sich zieht. Erst damit gelingt die Transformation von der starren Verkettung hin zu einer agilen Produktion, welche auf neue Gegebenheiten und Anforderungen eingestellt werden kann.

Auch aus wirtschaftlicher Sicht sind innovative und agile Anlagentechniken nicht nur für die Material- und Formatflexibilität erforderlich, sondern auch aus Sicht schwankender Auftragslagen, wie eingangs erwähnt. Ebenfalls von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist die **Verringerung des Materialausschusses** entlang der Prozesskette, denn dieser ist selbst in modernen Produktionsanlagen immer noch beträchtlich [3, 11]. Ein tiefes Prozessverständnis über die Wechselwirkungen innerhalb der Prozesskette bildet auch hierfür eine

Grundvoraussetzung.
Gegenwärtig unterliegt die Batteriezellproduktion einem enormen Kostendruck, welcher sich in der gesamten Wertschöpfungskette (vom Material bis hin zum Anlagenbau) der Batteriezellherstellung niederschlägt. Die gegenwärtige Wettbewerbsstrategie ist im Bereich der Kostenführerschaft angesiedelt und zielt darauf ab, Standardformate zu geringstmöglichen Preisen (per Definition Kostenführerschaft) anzubieten. Ein erfolgreicher Markteintritt in den bestehenden Wettbewerb setzt voraus, dass (deutsche) Anlagen- und Maschinenbauer sowie Zellhersteller Zellen zu geringeren oder zumindest vergleichbaren Preisen wie die asiatische Konkurrenz anbieten können. Da die Marktpreise für Batteriezellen aufgrund staatlicher Subventionen jedoch stark verzerrt sind, ist dies für Unternehmen der freien Marktwirtschaft quasi unmöglich. Die grundlegende Idee und Vision besteht folglich darin, sich mit einer anderen Wettbewerbsstrategie am Markt zu platzieren – nämlich der Differenzierung. Bei dieser stehen die spezifischen Bedürfnisse des Kunden, Produkteigenschaften und Serviceleistungen im Vordergrund und nicht alleinig der Preis. Dieses Geschäftsmodell wird bereits von der Fa. Custom Cells verfolgt, allerdings existiert noch keine agile Anlagentechnik zur Skalierung der Produktion. Zusammengefasst besteht die Vision darin, Kunden aller Branchen Zellen in Klein-, Mittel- und Großserien und in industrieller Qualität anbieten zu können. Die Zellen können flexibel an die Bedürfnisse der Kunden angepasst und beispielsweise von einem Lohnfertiger hergestellt werden. Durch die Produktion für mehrere Branchen können branchenspezifische Schwankungen zudem besser ausgeglichen werden. Die Agilität der Anlagen erlaubt ein „digitales Rüsten“, sodass effizient von einem auf das andere Los umgestellt werden kann.

1.2.1.2. Digitalisierung

Ein zentraler Aspekt in der Batteriezellproduktion ist die Optimierung der Prozessqualität unter Berücksichtigung aktueller Fortschritte hinsichtlich Zellchemie, Energiedichte und die Weiterentwicklung von innovativen Produktionstechnologien. Um die Produktionskosten von Batteriezellen bei gleichbleibender Qualität zu senken, bedarf es neben moderner Fertigungsverfahren auch neue Ansätze und Konzepte zur Digitalisierung von etablierten Produktionssystemen und Anlagenstrukturen. Die Digitalisierung thematisiert die Überführung von analogen Produktmerkmalen in digitale Werte zur elektronischen und informationstechnischen Übertragung, Speicherung und Verarbeitung. [12] Durch die erfolgreiche Integration digitaler Ansätze in eine automatisierte Produktion lassen sich die Gesamtkosten der Batterie signifikant senken. [13] Die Grundvoraussetzung ist die Etablierung einer durchgängigen Computerisierung und ganzheitlichen Konnektivität des Produktionssystems [14]. Allerdings beschränkt sich der Einsatz von Sensoren und Aktoren und deren Interaktion mit ihrer Umwelt aktuell noch auf grundlegende Sicherheitsfunktionen oder automatische Einmessung von Werkstücken. [15] Durch die Vernetzung von intelligenten, eingebetteten Systemen wird eine erweiterte Funktionalität bestehender Produktionsanlagen ermöglicht. Insbesondere dienen cyber-physische Systeme als Schnittstelle zwischen den physischen Komponenten und der virtuellen Datenebene eines Produktionssystems, indem die entsprechenden Technologien zur Datenerfassung, Datenspeicherung und Datenverarbeitung integriert betrachtet werden. Diese Systeme berücksichtigen unter anderem Aspekte wie Machine-to-Machine-Kommunikation (M2M) sowie der Mensch-Maschine-Interaktion (HMI). Dabei wird ein kontinuierlicher Datenstrom aus Prozessparametern, Informationen von Peripheriegeräten und Produktmerkmalen erzeugt, welcher mit Hilfe von leistungsfähigen Algorithmen und Rechensystemen analysiert werden kann. Die Integration dieser intelligenten Sensorik ermöglicht eine höhere Flexibilität und höhere Reliabilität durch die Kombination verfügbarer Datenquellen und entsprechender Datenanalysemethoden wie z.B. Machine-Learning und Data Mining (siehe auch Kap. 1.2.1.4). [16, 17] In Hinblick auf den hohen Investitionsbedarf bei der Digitalisierung und der Umrüstung bestehender Anlagen besteht daher der Bedarf, **Ansätze zur Integration innovativer und agiler Anlagentechnik sowie intelligenter Produktionssteuerung** zu erforschen. Die Herausforderungen bestehen unter anderem in der **Strategie für den Einsatz geeigneter Sensortechnologien**, der **horizontalen Integration von Datenstrukturen**, der **Integration von Steuerungskomponenten in bestehende**

Produktionssysteme und der **Übertragbarkeit und Skalierbarkeit auf reale Produktionssystemumgebungen**. Insbesondere soll hier eine "digitale Kette" als verbindendes Element die Cluster miteinander verknüpfen. Das bedeutet, im ProZell-Cluster werden Prozessdaten wie beispielsweise Zellperformancedaten aus dem Prozessschritt der Formierung bereitgestellt. Die Erfahrung aus den dort erhobenen Daten wird die Auslegung der Schnittstellen der Produktions- und Anlagentechnik in InZePro erleichtern. Das Cluster ExcellBattMat gibt Aufschluss darüber, wie vielfältig ein Manufacturing-Execution-System (MES) ausgelegt werden muss, d.h. konkret welche Materialeigenschaften dort abgespeichert werden müssen, sodass eine Qualitätsanalyse bis zu den Rohmaterialien möglich ist. Eine Vernetzung zum Cluster FestBatt liegt in der Auslegung der Datenverarbeitung für zukünftige Zellen. Neben den aktuellen Materialien gilt es hier, die Prozesse, welche für die Fertigung von Festkörperbatterien notwendig sind, mit aufzunehmen. Über diese unabdingbare „digitale Kette“ zu den anderen Clustern kann eine zukunftsfähige digitale Plattform für die Batterieproduktion geschaffen werden.

1.2.1.3. Virtuelles Produktionssystem

Die Batteriezellproduktion ist durch eine komplexe Prozesskette mit vielfältigen Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen gekennzeichnet. Die Ergebnisse der einzelnen Prozesse unterliegen Schwankungen innerhalb definierter Toleranzen, welche sich auf Folgeprozesse sowie die finalen Batteriezelleigenschaften auswirken und sich nur mit steigendem Aufwand und höheren Kosten in engeren Grenzen halten lassen [18]. Engere Toleranzgrenzen bzw. eine Reduktion von Prozessschwankungen sind meist mit steigendem Aufwand und höheren Kosten verbunden [19], sodass die **Kenntnis über prozessübergreifende Parameterfortpflanzungen** und deren **Auswirkungen auf die Batterieperformance** notwendig sind. Ein **virtuelles Produktionssystem**, welches sich durch die digitale Abbildung der Edukt- und Zwischenprodukteigenschaften sowie der Prozess- und Anlagenparameter ergibt, bietet die Möglichkeit diese Auswirkungen näher zu untersuchen, indem die verschiedenen virtuellen Prozess- und Produktmodelle, die sich auf allen Ebenen des Produktionssystems befinden, miteinander vernetzt und verbessert werden, um ein **vollständiges und entlang der gesamten Wertschöpfungskette durchgängiges Modell aufzubauen**. Neben der **Beschreibung der Zwischenprodukteigenschaften** ermöglichen die digitalen Abbildungen die **Simulation der Stoff- und Energieflüsse** innerhalb der Produktion, um so zusätzliche Informationen für die Bewertung der Produktivität und der Kosten zu generieren.

Im Bereich der Produktionssystemsimulation für die Batteriezellenfertigung existieren verschiedene Modellierungs- und Simulationsansätze zur Beschreibung der Prozess-Struktur-Beziehung für die einzelnen Prozesse in der Batteriezellproduktion. In [20] werden numerische Strömungssimulationen für die Dimensionierung und Auslegung von Beschichtungsmodulen angewendet. Das Verhalten der Schichtdicke und des Lösemittel-Feststoff-Verhältnisses während des Trocknens von Anoden wird [21, 22] modelliert. Der Einfluss der Linienlast beim Kalandrieren auf die Strukturparameter der Elektrode wird in [23, 24] modelliert und daraus wird ein empirisch-basiertes Verfahren zur Bestimmung der minimalen Porosität und des Verdichtungswiderstands der Beschichtung ermittelt. Darüber hinaus gibt es jedoch nur wenige bekannte internationale Ansätze, welche sich mit der Modellierung von Prozess-Produkt-Wechselwirkungen beschäftigen. In [25] werden die Produktivität und Qualität modelliert, ohne jedoch auf einzelne Prozesse einzugehen. Andere Ansätze befassen sich mit der Modellierung von Umweltauswirkungen und Batteriezellkosten [26, 27]. **Ansätze, welche eine Verknüpfung verschiedener Prozessmodelle über mehrere Prozessschritte ermöglichen, existieren bisher nicht.**

Im Bereich der elektrochemischen Modellierung sind verschiedene Ansätze beschrieben, um das Verhalten von Batterien abzubilden. Das in [28] entwickelte mechanistische Modell bietet einen guten Kompromiss zwischen physikalischer Genauigkeit und Rechenzeit [29] und kann als Stand der Technik angesehen werden. In diesem Modell wird von einem homogenen System ausgegangen, welches durch partielle Differentialgleichungen beschrieben wird, die je über die Elektrodendicke und Partikelradien die Transport- und Reaktionsprozesse in der Zelle aufzeigen. Im Rahmen von verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten wurde das Modell angewendet, um Struktur-Eigenschafts-Beziehungen zu untersuchen. In [30] wurde der Einfluss von Porosität, Schichtdicke und Tortuosität auf die Kapazität untersucht. Weiterhin wurde in [31]

untersucht, wie sich die Partikelgrößenverteilung auf die elektrochemischen Eigenschaften auswirkt. In [32] wurde der Einfluss des Kalandrierprozesses erforscht. In [29] wird das Verhalten der Elektrodenstruktur entlang des Kalandrierprozesses mittels DEM simuliert sowie deren mechanische, elektrische und ionische Eigenschaften modelliert [33]. Auch eine detaillierte Untersuchung des Einflusses der Elektrodenstruktur auf Batteriemodellparameter und elektrochemischen Eigenschaften konnte so durchgeführt werden. In [34] und [35] wurde der Zusammenhang zwischen der Elektrodenstrukturierung und der effektiven Parameter, wie der elektrischen und ionischen Leitfähigkeit erforscht. In Zusammenhang mit dem verwendeten Batteriemodell wurde gezeigt, wie basierend auf künstlich erstellen Elektrodenstrukturen neue Zusammenhänge für die effektiven Parameter in das Batteriemodell eingebunden und dadurch die Aussagekraft und die Vorhersage der Eigenschaften verbessert werden konnten [36]. Es gibt allerdings nur **wenige modellbasierte Untersuchungen**, wie **sich Schwankungen und Inhomogenitäten innerhalb der Elektrodenstruktur auf die elektrochemischen Eigenschaften auswirken** und welche **Optimierungsmöglichkeiten** sich daraus für den **Produktionsprozess** ergeben.

Im *ProZell*-Clusterprojekt *Sim2Pro* wurde die Untersuchung der Elektrodenproduktion mit Hilfe von drei gekoppelten Prozessmodellen für das Beschichten, Trocknen und Kalandrieren exemplarisch betrachtet. Dadurch konnte der Einfluss von Schwankungen relevanter Prozessparameter im Fertigungsprozess auf die Strukturparameter untersucht und die Fortpflanzung und Veränderung durch die verschiedenen Prozessschritte analysiert werden. Die ermittelten verteilten Strukturparameter wurden an das Batteriezellmodell übergeben und die Streuung der elektrochemischen Eigenschaften wurde bestimmt. Es zeigt sich, dass Schwankungen bzw. Toleranzgrenzen in unterschiedlichen Prozessschritten einen unterschiedlich starken Einfluss auf die Streuung der Eigenschaften haben. *Sim2Pro* liefert dadurch eine erste Methodik einer gekoppelten Prozessketten- und Batteriezellsimulation zur Beschreibung des Einflusses von Prozessparameter auf Folgeprozesse und Zelleigenschaften und verknüpft die Forschungsfelder der Produktionssystem- und Zellsimulation [37].

Um die Anlagen- und Produktdaten, die als Eingangsparameter für viele der Simulationen dienen, für mögliche Steuerungs- oder Regelungsoperationen mit den virtuellen Produktionssystem zu koppeln, sind ein echtzeitfähige Kommunikationsstrukturen notwendig. Die rasante Entwicklung der Mikroelektronik und Sensorik im Kontext Industrie 4.0/Internet of Things bietet das technische und wirtschaftliche Potential, verteilte Sensorknoten für die drahtlose Kommunikation im industriellen Umfeld aufzubauen. Alle vorhandenen drahtlosen Systeme beruhen dabei auf einem zentralisierten System mit festen Strukturen. So müssen die einzelnen Sensoren meist statisch konfiguriert werden und es gibt in der Regel weder eine Unterstützung für bestimmte Dienstgüteklassen, noch eine Fehlertoleranz oder gar die Unterstützung mobiler Knoten. Viele Ansätze zur Integration verfolgen außerdem die Nutzung von Protokollen wie ZigBee oder dem Internet-Protokoll (IP) in Version 6. Da diese **Protokolle** jedoch **nicht hinsichtlich ihrer Energieeffizienz optimiert** sind, sind die **erreichbaren Betriebszeiten der auszubringenden Sensoren stark eingeschränkt**. Außerdem ist die jeweilige **Fähigkeit zur Selbstkonfiguration stark limitiert** und eine **Übertragungsgarantie ist oft ebenso wenig gewährleistet** wie eine **Toleranz gegenüber temporären Unterbrechungen**. Das Mobiltelefonnetz der fünften Generation (5G) befindet sich gerade in der Standardisierung. 5G kann dabei gegebenenfalls in der Zukunft Teile der geplanten Infrastrukturen ersetzen, da es (in Teilbereichen) eine geringe Latenz und (in anderen Teilbereichen) eine hohe Zuverlässigkeit sicherstellen soll. Bei diesem System handelt es sich ebenfalls um einen zentralisierten Ansatz, der dann (in der Regel) von einer weiteren Partei (Mobilfunknetzbetreiber) betrieben wird. Das kann aus mehreren Gründen bei den späteren Anwendern kritisch gesehen werden, da die **Datenhoheit so nicht mehr gewährleistet** ist und sich (in ggf. kritischen Betriebsmitteln) von der Dienstleistung eines Dritten abhängig machen. Weitere technische Entwicklungen, wie z.B. Self-Organising-Networks (SON) zur automatischen Konfiguration von Sensorik, begünstigen insbesondere einen **mobilen Einsatz von Sensoren**. Deren Einsatz kann idealerweise im Projekt untersucht werden.

Über **innovative Visualisierungskonzepte** können zulaufende Informationen aus dem virtuellen Produktionssystem kontext- und zielgruppenbezogen auch Mitarbeitern in verständlicher Form zur Verfügung gestellt werden. Bisherige Arbeiten erfordern noch sehr leistungsfähige und stationäre Hardware, was eine **Umsetzung in mobile Systeme bisher erschwert**. Eine große Herausforderung ist hier, mit begrenzten Ressourcen (Arbeitsspeicher und Rechenleistung) bestehende Ansätze (z.B. aus der

Spielesoftware-Entwicklung) soweit zu befähigen, dass echte **Mess- und Simulationsdaten in einer korrekten räumlichen Orientierung intuitiv zugänglich dargestellt und bedient** werden können. Dabei müssen erforderliche Geschwindigkeiten und Genauigkeit sichergestellt werden. Vielversprechend sind ebenfalls aktuelle und zukünftige Verfahren der Bildverarbeitung [38] und neuartige Darstellungsgeräte wie Hologramm-Brillen (sog. „Mixed Reality Devices“). Eine Herausforderung in der Nutzung von Mixed-Reality-Geräten im industriellen Kontext ergibt sich häufig aufgrund der Größe und des Gewichts der Geräte [39]. Insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen, in dem das Tragen von Schutzanzügen erforderlich ist, ist der Einsatz der Geräte nur schwer oder gar nicht möglich. Viele Geräte verfügen zurzeit nur über ein eingeschränktes Sichtfeld [40]. Hierbei wird die mögliche Größe von virtuellen 3D-Objekten oder anderen grafischen Benutzerelementen künstlich beschnitten. Weiterhin ergeben sich verschiedene Herausforderungen im Tracking [41], in der Objekterkennung [42] und der Interaktion [43, 44]. Insbesondere Interaktionsansätze und -paradigmen lassen sich nicht eins-zu-eins von Anwendungen auf einem Smartphone oder Tablet auf ein Mixed-Reality-Gerät übertragen. Lösungsansätze sind hierbei eine Steuerung mittels Gesten [45], einer kontextabhängigen Darstellung von grafischen Elementen [46] oder die Einführung einfacher Abstraktionen [43], die mit entsprechenden Aktionen verknüpft sind.

In der Forschung existieren bislang erste Ansätze zum Aufbau eines virtuellen Produktionssystems in der Batteriezellproduktion. Diese bedürfen jedoch noch intensiverer Forschung, um das Gesamtsystem Batteriezellfabrik vollständig über die Skalen Produktionsanlage, Automatisierung und Materialhandling, technische Gebäudeausstattung und Kommunikationsinfrastruktur bis zur Fabrikhülle abbilden zu können. Auch OEM forcieren konkret einen Einsatz virtueller Produktionssysteme, die Ursache-Wirkungsbeziehungen prozessübergreifend wiedergeben und so als Entscheidungsunterstützung in der Produktion dienen.

Daher wird im Rahmen des Clusters InZePro angestrebt, ein möglichst ganzheitliches simulatives und digitales Abbild der Batteriezellproduktion mit hohem Reifegrad zu entwickeln und damit ein virtuelles Produktionssystem umzusetzen, das die wesentlichen Ursache-Wirkungsbeziehungen entlang der Prozesskette beschreibt und auf FFB- und Industriemaßstab transferierbar ist.

1.2.1.4. KI in der Produktion

Die Verbreitung von Technologien der KI in bestehenden Produktionssystemen ist gegenwärtig noch gering. Laut aktuellen Marktdaten setzen derzeit weniger als 30 % der europäischen Maschinenbauunternehmen auf die Unterstützung ihrer Produktionsprozesse durch KI-Verfahren [47]. Am weitesten verbreitet sind Anwendungen, bei denen KI zur Effizienzoptimierung einzelner Logistikketten oder zur Verbesserung der Anlagenauslastung durch zustandsbasierte Wartungspläne eingesetzt wird [48]. Die bisher durch den Einsatz von KI erzielten Verbesserungen schöpfen jedoch nur einen Bruchteil des vollen Potenzials der Technologie aus. Gründe für eine **geringe Verbreitung von KI in der Produktionstechnik** sind unter anderem fehlende Methoden zur Bewertung der Datengrundlage, ein hoher Grad an Expertenwissen, der zum Aufbau und Betrieb einer geeigneten Infrastruktur erforderlich ist, und die geringe Akzeptanz seitens der Beschäftigten aufgrund fehlender Partizipation bei der Konzeptionierung von KI-Systemen [48].

Trotz der geringen Akzeptanz der KI in der industriellen Fertigung ist die Forschung und Entwicklung im Bereich der industriellen KI-Anwendungen sehr vielfältig. Im Projekt *IFaCOM* (Förderer: EU, Förderprogramm: FP7-NMP) wird KI für in verschiedenen Fertigungsprozessen eingesetzt, um Störungen zu erkennen und selbstkorrigierenden Regelmechanismen zu ermöglichen [49]. Auch zur Unterstützung einer sicheren Mensch-Maschine-Interaktion in flexiblen Fertigungsumgebungen soll KI genutzt werden [50]. Ebenfalls erforscht wird der Einsatz von KI beim Remote-Laserstrahlschweißen zur echtzeitfähigen Prozess-beobachtung und -regelung, um hochflexible Produktionsanlagen zu befähigen [51]. Im Bereich der Produktionsplanung wird unter anderem an einer Optimierung durch automatisierte Bewertung von Aufträgen mittels KI geforscht [52]. Basierend auf grundlegenden Konzepten zur Vernetzung von Produktionsanlagen [53] liegen Erfahrungen aus mehreren Forschungsprojekten im Bereich der Digitalisierung und der KI vor. Dadurch kann auf ein Lösungsportfolio mit Kompetenzen in den Bereichen MES/APS, Industrie 4.0, Digitalisierung und der

Automatisierung mit der Möglichkeit eines Regelkreises zwischen Planung und Ausführung in der Produktion in Quasi-Echtzeit zurückgegriffen werden [54 bis 56]. Die systematische Anwendung statistischer Methoden auf große Datenbestände [57] konnte bereits auf Produktionsnetzwerkebene [58], auf Maschinen- und Anlagenebene [59] und auf Prozessebene [60] für Anwendungen aus den Bereichen Logistikplanung, Maschinenzustandsbestimmung und Batteriezellproduktion evaluiert werden.

Die hochgradig komplexe Produktion der Lithium-Ionen-Batteriezellen beinhaltet divergierende und konvergierende Materialströme sowie Produktionsschritte der Verfahrens- und der Fertigungstechnik, so dass sich Zustände der Zwischenprodukte stetig ändern und eine Verfolgung der wichtigen Struktureigenschaften erschwert wird. Die Annahme von homogenen Struktureigenschaften einer Produktionscharge gleichen Ausgangsmaterials kann nur theoretisch getroffen werden. Bisherige Ansätze des Qualitätsmanagements im Bereich der Batteriezellfertigung kommen u.a. aus den Richtungen der FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) [61] und der Quality Gates [62]. Die Qualitätsmanagementstrategie des Tracking & Tracing-Ansatzes zur Vermeidung und zum generellen bzw. frühzeitigen Erkennen von Ausschussmaterial wurde bisher im Anwendungsfall der Batteriezellproduktion in der Literatur nicht beschrieben.

Ebenso sind die Wechselwirkungen der einzelnen Prozessschritte untereinander unklar, da sich vorhandenes Expertenwissen meistens nur auf einige wenige Prozessschritte und nicht auf die Batteriezellfertigung als ein Ganzes beschränkt, wodurch eine Steuerung und Regelung nur auf Prozessschrittebene möglich ist [1]. Die konventionellen industriellen Datenerfassungs- und Datenverwaltungssysteme sind für eine breite Masse an Produktionslinien ausgelegt und verfügen nicht über die Funktionalität, die erhobenen Daten im Detail auszuwerten. Die anschließende Nutzung der Daten bleibt aufgrund fehlenden Datentransfers in Datenanalysesysteme und fehlenden Wissens diese Daten auszuwerten aus. Somit bleiben große Datenmengen in der Produktion ungenutzt [63]. Zur Analyse von größeren Datensätzen stellen Data Mining-Methoden gute Werkzeuge dar, welche zur Klassifizierung von bspw. i. O.- und n. i. O.-Produkten oder der Identifikation von Einflussgrößen bei Prädiktion genutzt werden. Allerdings hängt die Qualität der Ergebnisse stark von der Qualität, der Menge und der Verarbeitung der erhobenen Daten ab. Data Mining-Verfahren wurden bereits erfolgreich genutzt, um über die Auswertung von Zelldaten aus den Produktionsschritten der gesamten Prozessschritte Aussagen über die zu erwarteten Zelleigenschaften zu machen und Korrelationen zwischen Prozessparametern zu identifizieren [60]. Auch zur multikriteriellen Qualitätsvorhersage von Batteriezelleigenschaften [64] sowie zur zeiteffizienten Anpassung eines Batteriezellmodels für die End-of-Line-Zellcharakterisierung [65] wurden Data Mining-Verfahren eingesetzt. Verfahren des maschinellen Lernens wurden in [66] zur Vorhersage des State-of-Charge und State-of-Health von Batteriezellen genutzt. Auch zum Design [67] und zur Optimierung von Batteriematerialien [68] wurde Data Mining in der Forschung bereits eingesetzt.
Neben den vorgenannten Arbeiten zur rein datenbasierten Analyse von Batteriezellen wird neben ausschließlich Experten-basierten Ansätzen zur Identifikation von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen in der Batteriezellproduktion [69] auch ein kombiniertes Verfahren aus beiden Ansätzen vorgestellt [70].

Es wird deutlich, dass der Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz und des Data Mining vielversprechend ist, um die Ziele der Produktivitätssteigerung bei gleichzeitiger Senkung der Produktionskosten und Steigerung der Qualität zu erreichen. Jedoch erfolgt bisher **noch keine durchgängige Anwendung von KI-Methoden entlang der gesamten Prozesskette zur Batteriezellproduktion**. Entsprechend wird angestrebt, im Rahmen des Cluster *InZePro* **konkrete Anwendungen von KI in Einzelprozessen, aber vor allem prozesskettenübergreifend, zu entwickeln und umzusetzen**, die auf *FFB*- und Industriemaßstab transferierbar sind.

1.2.2. Umsetzung der Zielerreichung

Die Zellproduktion am Standort Deutschland wird zukünftig in der Lage sein müssen, eine große Variantenvielfalt an Batteriezellen in Klein-, Mittel- und Großserie für verschiedenste Anwendungen und Märkte flexibel sowie automatisiert herzustellen zu können. Dabei muss schnell und bedarfsgerecht auf Markt- und Technologieeinflüsse reagiert werden können. Aus diesem Grund umfasst der Themenschwerpunkt **Innovative agile Anlagentechnik** (vgl. auch Abbildung 1) die Entwicklung, Integration und Erprobung neuer Produktionstechnologien. Ziele sind das kontinuierliche Prozessieren vom Ausgangsmaterial bis zur fertigen Batteriezelle, die Befähigung zur variantenflexiblen und stückzahlangepassten Batteriezellfertigung sowie die Flexibilisierung der Anlagen und deren Verkettungen, sodass agile (adaptierbare und modulationsfähige) und dadurch rekonfigurierbare Produktionssysteme entstehen. Hierzu zählt auch die Betrachtung der Energie-effizienz durch bspw. flexible Micro-Environments oder agile Trockenräume.

Die **Digitalisierung**, **virtuelle Produktionssysteme** und der Einsatz von **KI in der Produktion** befähigen als Lösungsansätze die Entwicklung und Implementierung der innovativen agilen Anlagentechnik.

Die **Digitalisierung** des gesamten Produktionssystems baut auf der innovativen Anlagentechnik auf und stellt den zweiten Themenschwerpunkt des BMBF-Kompetenzclusters dar (vgl. Abbildung 1). Fragestellungen bezüglich des notwendigen Umfangs der Digitalisierung, bezüglich hardware- und softwaretechnischen Komponenten, Gestaltung von Schnittstellen und Standards sowie der aufwandsarmen, gewinnbringenden Erhebung der Daten und ihrer sicheren Verwahrung, sollen im Hinblick auf die Batteriezellproduktion erforscht werden.

Die konsequente Erstellung digitaler Zwillinge sämtlicher Anlagen, Prozesse und Produkte stellt die Grundlage für den Aufbau eines **virtuellen Produktionssystems** und den Inhalt des dritten Themenschwerpunkts dar. Dieser soll Planung und Inbetriebnahme der Anlagentechnik im Kontext des gesamten Produktionssystems unterstützen. Es werden die Modellierung der digitalen Zwillinge, die Verknüpfung dieser sowie ihre experimentelle Validierung angestrebt. An den Plattformansatz aus *Sim4Pro* aus dem BMBF-Kompetenzcluster *ProZell* anknüpfend, soll damit eine digitale Plattform entstehen, die es ermöglicht, die Bestandteile der Batterieproduktion ganzheitlich abzubilden. Hierzu soll ein regelmäßiger Austausch, der Simulationsprojekte in *InZePro* mit Sim4Pro stattfinden, welches als Brückenprojekt fungiert. Potentielle Themen sind die technische Umsetzung der Simulationen und der Austausch von Ergebnissen, um Synergien zu nutzen.

Im vierten Themenschwerpunkt **KI in der Produktion** (vgl. Abbildung 1) sollen Methoden und Standards basierend auf ausgewählten mathematischen Algorithmen erarbeitet werden, die das Produktionssystem und die Anlagentechnik unterstützen. Diese sollen genutzt werden zur globalen übergreifenden Optimierung der Produktion von Batteriezellen sowie zur Befähigung der Anlagentechnik, um lokal bei Prozessunsicherheiten agil einzugreifen und damit zur Fertigungsstabilität beizutragen. Weitere Ziele in diesem Bereich sind die Themen „Predictive Maintenance“, um unvorhergesehene Störungen und Ausfallzeiten zu verhindern, und „Predictive Quality“, um die Lebensdauer der Batteriezellen vorhersagen zu können.

Darüber hinaus sollen alle Prozesse für eine schlanke Qualitätssicherung über Inline-Messverfahren selbst unter geringsten Durchlaufzeiten verfügen können. So werden auch bei neuen und innovativen Materialien kürzeste Durchlaufzeiten erzielt.

Auch das Ziel der **Energieeffizienz** von Zellfabriken soll in den Themenschwerpunkten 2-4 adressiert werden. Ansätze hierfür sind zum Beispiel die Erfassung, Abbildung und Simulation von Energieströmen mithilfe digitaler Methoden und deren Integration in das virtuelle Produktionssystem und die Nutzung von KI-Methoden zur intelligenten, energieoptimierten Steuerung von Anlagen.

Die Umsetzung der geplanten Inhalte der Themenfelder erfolgt zum aktuellen Planungsstand (30.03.2020, Einreichung der 5-seitigen Projektskizzen) durch jeweils mehrere eng miteinander verbundene Projekte. Hierbei adressieren einige Projekte mehrere Themenfelder. Sogenannte „Brückenprojekte“ verknüpfen in ihren Forschungsinhalten das Cluster *InZePro* mit weiteren Modulen des Dachkonzepts „Forschungsfabrik

Batterie“. Des Weiteren erarbeiten einige Projekte Standards, die innerhalb des *InZePro*-Clusters sowie darüber hinaus nutzbar sein sollen.
Jedes Clusterprojekt muss sowohl eine Erhöhung der Entwicklungsstufe in Bezug auf Industrie 4.0, als auch eines der Ziele des Clusters adressieren und den Fortschritt über Prozessindikatoren bzw. Key Performance Indicator (KPI) darstellen. Der Reifegrad der in den Clusterprojekten entwickelten Methoden und Technologien soll sich im Rahmen von TRL3 bis TRL6 bewegen und mit der Projektlaufzeit steigen.
Die Koordination des BMBF-Kompetenzclusters sowie die Zusammenführung der erarbeiteten Ergebnisse zur Erreichung des Gesamtziels des Clusters soll durch ein Begleitprojekt realisiert werden. In dessen Rahmen sollen Standards (logistische, mechanische und informationstechnische; z. B. OPC UA (engl.: Open Platform Communiations Unified Architecture) oder Umati (engl.: universal machine technology interface) erarbeitet und den Clusterprojekten zur Verfügung gestellt werden. Hierzu zählt u.a. ein allgemeingültiger Digitalisierungsleitfaden mit den Anwendungsebenen Maschinen- und Anlagentechnik, Qualitätsmanagement, Prozesstechnik sowie Planung, Steuerung und Logistik. Diese sollen als Grundlage für eine Standardisierung genutzt werden.

2. BMBF-Dachkonzept Forschungsfabrik Batterie

Das BMBF beabsichtigt die Batterieforschung umfassend zu begleiten, um die industrielle Produktion von Batterien in Deutschland zu unterstützen. Zur Veranschaulichung wird das Konzept der Innovationspipeline verwendet. Diese soll vom Material bis zur Produktion alle relevanten Schritte umfassen. Die Einspeisung in diese Pipeline erfolgt Top-Down und Bottom-Up durch Initiativen, die das BMBF aktiv unterstützt. Das Cluster *InZePro* ist eine dieser Initiativen und reiht sich in das Modul *Batteriezellfertigung* ein. Neben diesem Modul gibt es die drei Module *Material*, *Zelle und Prozess* sowie die Querschnittsinitiative *Batterielebenszyklus*. Der Fokus der Initiativen im Fabrikmodul liegt auf der Untersuchung der Batterieproduktion und der Skalierung neuer Zellen und Prozesse. Mit dem Ziel wettbewerbsfähige Technologien zu entwickeln wird als Kern- Enabler die Digitalisierung betrachtet. Die beiden Initiativen, die *Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB)* und das Cluster *InZePro*, grenzen sich insbesondere durch den Technologiereifegrad (Technology Readiness Level TRL) im Betrachtungsbereich voneinander ab. So sollen früh Produktinnovationen auf ihre Industrialisierbarkeit im Cluster *InZePro* getestet werden (TRL3 – 6). Diese kommen mittelfristig insbesondere aus den anderen Modulen des Dachkonzepts. Sind die Untersuchungen erfolgreich, gilt es auszuwählen, welche in der *FFB* in großem Maßstab erprobt und auf ein höheres Level gehoben werden (TRL 6 – 9). Damit werden bestehende Ergebnisse der Grundlagenforschung im Sinne einer Kaskade immer weiter auf die nächste Entwicklungsstufe gehoben.
Die unterschiedlichen Technologiereifegrade bedingen auch den unterschiedlichen Produktfokus. Auf Basis der zwangsläufigen zeitlichen Verschiebung in der Reifung fokussiert der Cluster immer auf die Konzeption und Erforschung der übernächsten Zellgeneration, wohingegen die *FFB* an der nächsten Zellgeneration forscht. Die Verwendung findenden Methoden sind aufgrund der Anordnung im selben Modul und dem damit einhergehenden gleichen Forschungsschwerpunkt zwar ähnlich, lassen sich aber doch differenzieren. Grundsätzlich kann im Cluster *InZePro* mit experimentelleren Methoden gearbeitet werden, da zuerst immer ein Pilotmaßstab betrachtet wird (eine detaillierte Gegenüberstellung findet sich in Tabelle *1*).
Zudem findet eine Differenzierung durch die verwendete Fertigungstechnologie statt. Im Rahmen des Clusters soll es möglich sein, neue digitalisierte Fertigungstechnologien und Prozessketten zu entwickeln und zu erproben. Dies dient der Sicherstellung der Fertigbarkeit neuer Zellformate und -chemien. Die Einbringung neuer Fertigungstechnologien erfolgt in der *FFB* anhand von Innovationsmodulen, welche in die bestehenden Linien integriert werden.

Tabelle 1: Gegenüberstellung Cluster *InZePro* und *FFB*

	Cluster *InZePro*	***FFB***
TRL	3 – 6	6 – 9
Produktfokus	Konzeption und Erforschung der übernächsten Zellgeneration	Konzeption und Erforschung der nächsten Zellgeneration
Methoden	Digitalisierung von Lab Scale-Produktions-technologie; Erprobung neuartiger digitaler und physischer Systeme sowie deren Kombination; Anwendung neuartiger Digitalisierungsmethoden auf die Batterie-zellfertigung; Reduzierung der Anlaufdauer der Produktion neuer Zellgenerationen; Erzeugung von Transparenz im Entwicklungs-prozess neuer Zelltypen und -chemie mit dem Ziel der Entwicklungszeitverkürzung und Steigerung der Erfolgsaussichten	Digitalisierung der Großserientechnologie; Verwendung reifer Technologie zur Ermöglichung bzw. der Steigerung des Outputs der *FFB*; Wissensgenerierung von Prozessinterdependenzen im Großserienprozess unter Zuhilfenahme von Big Data Ansätzen
Verwendung findende Fertigungs-technologie	Erarbeitung neuer Fertigungstechnologie für neue Zellformate und -chemien, die im digitalisierten Produktionssystem einen Mehrwert liefern.	Fertigung zunächst mit bekannten Technologien; Skalierung von neuen Zelltechnologien auf großserientaugliche Produktionstechnik; Einbringung und Reifung von Technologie ab TRL 6 durch Innovationsmodule

Innerhalb der bereits erwähnten Innovationspipeline bildet das BMBF-Kompetenzcluster *InZePro* einen weiteren, missionsorientierten Baustein (Top-Down-Ansatz), welcher die Weiterentwicklung von Grundlagenforschungsergebnissen hin zu industriellen Anwendungen beschleunigen und effizienter gestalten wird. Dabei steht insbesondere die Erhöhung der Produktivität bzw. der Ausbringung der Zellproduktion durch die ganzheitliche Optimierung des Produktionssystems unter Einsatz von Lösungen der Industrie 4.0 im Fokus. Die Themenschwerpunkte Digitalisierung, KI in der Produktion, Virtuelles Produktionssystem und Innovative agile Anlagentechnik erweitern die Inhalte der Innovationspipeline entlang der Wertschöpfungskette vom Material bis zur Produktion und leisten vor allem in Ergänzung zum *ProZell*-Cluster einen Beitrag zu einer wettbewerbsfähigen Produktionsforschung in Deutschland. Im globalen Wettbewerb wird die systematische Entwicklung von Industrie 4.0-Ansätzen und Methoden bis hin zur industriellen Anwendung dabei als essentieller Differenzierungsfaktor verstanden.

Des Weiteren grenzen sich das Projekt *AgiloBat* und das Cluster *InZePro* aktiv voneinander ab. Eine Gegenüberstellung der Projekte zueinander wird im Folgenden dargestellt und ist in Tabelle *2* dargestellt. Im Projekt *AgiloBat* (Entwicklung (und Aufbau[2]) eines agilen Produktionssystems für die format-, material- und stückzahlflexible Pouch-Zellen Produktion) wird ein Produktionssystem entwickelt, welches vollständig modular in Hard- und Software als Baukastensystem aufgebaut ist. Die Modularität wird über flexible Kinematiken gelöst und wurde bereits für die Assemblierung erfolgreich umgesetzt. Die Stückzahlflexibilität, die in *AgiloBat* betrachtet wird, fokussiert sich insbesondere auf die vollautomatisierte, serienreife und wirtschaftliche Fertigung von Mittel- und Kleinserien. Durch die redundante Nutzung einzelner Module ist es möglich das *AgiloBat*-Produktionssystem auch großserienfähig auszulegen. Der Cluster *InZePro* hingegen betrachtet etablierte Fertigungssysteme, um diese hinsichtlich der Serienfähigkeit zu optimieren. Die Schnittstelle zwischen *AgiloBat* und *InZePro* ist jedoch durch den Clusterbaustein Innovative Anlagentechnik gegeben und muss über aktive Verknüpfung zwischen den Partnern auch zu Austausch führen. Ein

[2] Das Projekt AgiloBat 2 – Aufbau eines agilen Produktionssystems für die format-, material- und stückzahlflexible Pouch-Zellen Produktion befindet sich derzeit in der Skizzenphase beim BMBF

wesentliches Unterscheidungsmerkmal zwischen *AgiloBat* und dem Cluster *InZePro* ist auch der systemische Ansatz über die integrierte Produktentwicklung. Die Entwicklung von Produkt und Produktionssystem finden hier simultan statt. Ein weiterer Fokus in *AgiloBat* ist die Materialflexibilität. Dabei geht es in *AgiloBat* nicht nur um Materialweiterentwicklung im Bereich Lithium-Ionen wie die Minimierung des Kobalt-Anteils, was insbesondere Fokus der Materialflexibilität in InZePro darstellt, sondern auch die Betrachtung von anderen Zellchemien wie beispielsweise Natrium-Ionen. Dies ist insbesondere durch die Anbindung an den DFG Exzellenzcluster *PoLiS* (Energy Storage Beyond Lithium) am KIT gegeben. Im *AgiloBat*-Projekt soll auch eine Rekonfiguration der Anlagen in Bezug auf neue Materialien wie Natrium oder Magnesium in Betracht gezogen werden. Der Cluster *InZePro* fokussiert sich hingegen vollständig auf die Li-Ionen-Technologien, um eine solche Zellfertigung in Deutschland zu befähigen.

Tabelle 2: Gegenüberstellung des Clusters *InZePro* und *AgiloBat*

	Projekt *AgiloBat*	**Cluster *InZePro***
Modularisierung	Im Fokus steht die Modularisierung mit flexiblen Kinematiken	Im Fokus steht innovative Anlagentechnik, die durch Digitalisierung, virtuelle Produktionssysteme und Künstliche Intelligenz befähigt wird, serienreif und anschlussoptimiert wirtschaftlich zu fertigen.
Serienreife	Wirtschaftliche Fertigung von Klein- und Mittelserien	Lösungen für wirtschaftliche Fertigung serienübergreifend
Material	Fokus auf Materialflexibilität (auch hinsichtlich weiterer Zell-Chemien, sog. Post-Lithium wie beispielsweise Na-Ionen)	Fokus auf Li-Ionen und Weiterentwicklung von Li-Ionen-Materialien
Produktionssystem	Systemischer Ansatz, von Produktspezifikationen zur Zelle und zum Produktionssystem	Von der Energieeffizienz der Fabrik über die Produktionssteuerung bis hin zur Anlagentechnik.
Produktgestaltung	Starker Fokus auf dem parallelen Produktentstehungsprozess	Feedback auf Material und Produkt aus dem Erkenntnisprozess der digitalen Anlagentechnik

3. Cluster- & Governancestruktur

3.1. Clusterstruktur

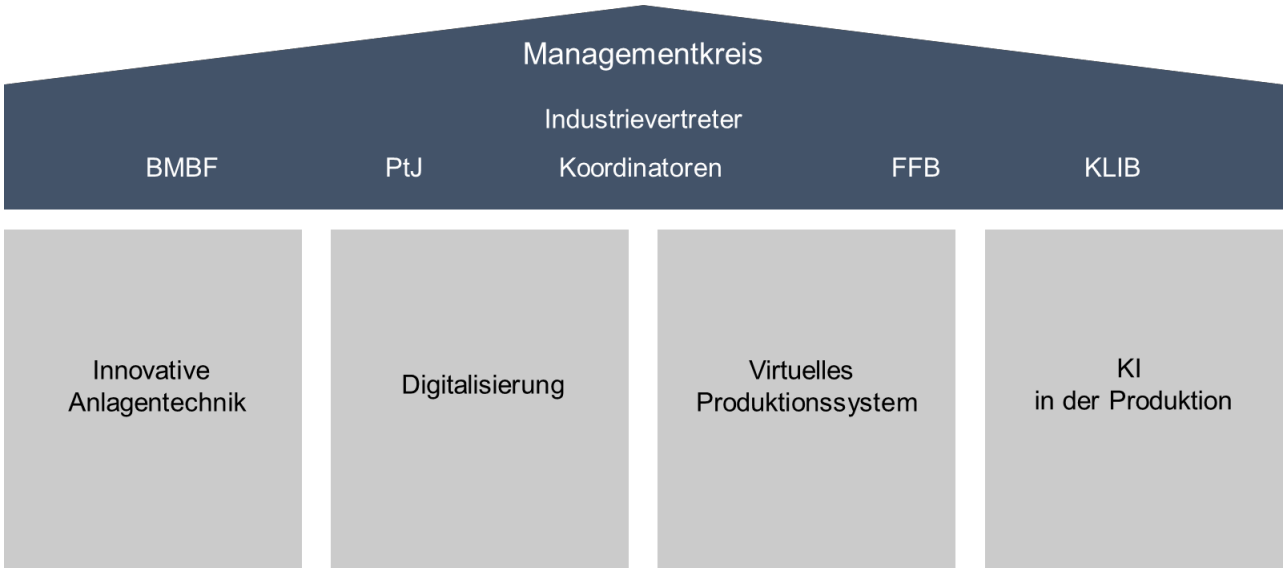


Abbildung 2: Organisationsstruktur des BMBF-Kompetenzclusters Intelligente Batteriezellproduktion

Die Organisationsstruktur des BMBF-Kompetenzclusters *InZePro* ergibt sich wie Abbildung 2 dargestellt aus dem Managementkreis, der sich aus Vertretern der Industrie, des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, der *Forschungsfertigung Batteriezelle (FFB)* sowie den Koordinatoren der vier Standorte zusammensetzt.

Als Themenschwerpunkte in diesem BMBF-Kompetenzcluster wurden **Virtuelles Produktionssystem, KI in der Produktion, Digitalisierung und Innovative Anlagentechnik** identifiziert. Die verschiedenen Clusterprojekte des BMBF-Kompetenzclusters sind einem der vier Themenschwerpunkten zugeordnet. Losgelöst von den Themenschwerpunkten wird es ein Begleitprojekt geben, welches die aus allen Clusterprojekten entstehenden Ergebnisse in einem Digitalisierungsleitfaden bündelt und daraus Werkzeugkästen für die industrielle Anwendung entwickelt und erprobt. Ein weiterer Schwerpunkt des Begleitprojekts wird die Entwicklung von Standards sein. Das Begleitprojekt wird von allen vier koordinierenden Standorten gemeinsam betreut.

Alle durchzuführenden Clusterprojekte sollen eng verknüpft sein, um die Kompetenzen der Forschungseinrichtungen sinnvoll zu bündeln und eine effiziente Zusammenarbeit zu fördern. Um diesen Gedanken in der Planungsphase und während der Durchführungsphase zu stärken, soll der Managementkreis die Projekte begleiten und beraten. Ein gewählter Managementkreis-Vorsitzender aus dem Kreise der Industrievertreter sowie der aktuelle amtsführende Koordinator des BMBF-Kompetenzclusters aus der Akademie bilden die Kommunikationsschnittstelle zu BMBF und PtJ. Zum Zweck der fachlichen Beratung und Lenkung können BMBF und PtJ den Beirat „Batterieforschung Deutschland “ hinzuziehen. Die verschiedenen Organisationselemente und ihre Aufgaben werden nachfolgend weiter detailliert.

3.2. Governance-Struktur

Die Sprecherrolle unter den vier Koordinatoren wird in der ersten Clusterphase von Hrn. Prof. Fleischer übernommen. Bei einer eventuellen zweiten Phase wird die Sprecherrolle nach München zu Hrn. Prof. Daub wechseln. Kontinuität in der Organisation der Clusteraktivitäten wird durch eine Geschäftsstelle, bestehend aus Geschäftsstellenleitung sowie den Funktionen Assistenz und Marketing, gewährleistet, die für die Dauer der Clusterförderung eingerichtet wird. Als fixer Standort für die erste Förderphase des Clusters wird das

Karlsruher Institut für Technologie (KIT) vorgeschlagen. Bei einer zweiten Förderphase soll die Technische Universität München (TUM) den Standort stellen.
Der Projektfortschritt des Clusters und der Clusterprojekte wird von einem Managementkreis jedes halbe Jahr bewertet. Hierfür werden Kolloquien organisiert und abgehalten. Zur Bewertung und Fortschrittskontrolle der Projekte dienen KPI. Der Managementkreis wird vom BMBF berufen. Er besteht aus mindestens acht Industrievertretern und -vertreterinnen. Als nicht stimmberechtigte Gäste sind die vier Standortkoordinatoren, ein/e Vertreter/in des BMBF, ein/e Vertreter/in des PTJ sowie [redacted] als Geschäftsführer des KLIB dem Managementkreis assoziiert. Die Industrievertreter/-innen sollen einen Querschnitt der deutschen Unternehmen abbilden, welche von den Ergebnissen des Clusters profitieren können und welche in den Themenbereichen Expertise haben. Somit wird neben den Industrietagen ein weiterer Ideen- bzw. Technologietransfer verfolgt.

3.3. Kooperation mit weiteren Clustern

In den Themenbereichen des Clusters *InZePro* bieten sich eine Vielzahl potentieller Kooperationsmöglichkeiten sowie die Nutzung von Schnittstellen mit den weiteren Modulen und BMBF- Kompetenzclustern des BMBF.

Kooperation mit dem Modul *Material*

Zum Modul *Material* gehören die *Excellent Battery*-Zentren sowie das BMBF-Kompetenzcluster für Festkörperbatterien (*FestBatt*).
Da die Forschungseinrichtungen an der TU München und der RWTH Aachen Teil des *Excellent Battery-Zentren* sind, können Synergien hier direkt genutzt und ein enger Kontakt zwischen diesen und dem Cluster *InZePro* zum wissenschaftlichen Austausch gepflegt werden. Zu den *Excellent Battery*-Zentren Ulm/Stuttgart und Dresden werden Kooperationsmöglichkeiten durch Projekte, die von den beteiligten Instituten im Cluster *InZePro* beantragt werden, erwartet.
Ein weiterer Bestandteil der Forschungsstrategie des Bundes ist der Ende 2018 gestartete BMBF-Kompetenzcluster *FestBatt.* Ziel des Clusters ist es, die Grundlagen von Festkörperbatterien zu erforschen und die gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Anwendung zu bringen. Mit dem BMBF-Kompetenzcluster soll auch der Grundstein für den Aufbau und die nachhaltige Weiterentwicklung einer international führenden, wettbewerbsfähigen Batteriezellproduktion für Festkörperbatterien in Deutschland gelegt werden. Das KIT und die TU Braunschweig sind mit mehreren Instituten an *FestBatt* beteiligt, insgesamt liefern die beiden Standorte den umfangreichsten Beitrag zu *FestBatt*.
Der Austausch mit dem Cluster *FestBatt* findet zudem über Prof. Helmut Ehrenberg (KIT) statt. Dieser leitet im Cluster die Methoden-Plattform und ist über das KIT Batterietechnikum eng mit der Clusterleitung von Prof. Fleischer mit dem *InZePro* Cluster verbunden.

Für die weitere Zukunft sollten intensive Austauschformate wie gemeinsame Industrietage oder Forschungskolloquien mit allen BMBF-Kompetenzclustern geplant werden, um auch die Produktionstechnik auf die anstehenden Herausforderungen durch die neuen Materialien der Feststoffbatterie vorzubereiten.

Kooperation mit dem Modul *Zelle und Prozesse*

Das Forschungscluster *ProZell* zielt auf die Analyse von Produktionsprozessen und den Aufbau eines vertieften Verständnisses der Prozess-Produkt-Eigenschafts-Beziehungen von Fertigung von Batteriezellen ab. Damit soll eine wissenschaftliche Basis für den Aufbau einer wettbewerbsfähigen Batteriezellproduktion in Deutschland gelegt und die Entwicklung innovativer Produktionsprozesse für die Batteriezellproduktion gefördert werden. Das von Prof. Kwade (TU Braunschweig) koordinierte *ProZell*-Cluster beinhaltet insgesamt 13 Projekte zu verschiedenen Prozessschritten der Batteriezellproduktion und bietet eine Vielzahl von

Anknüpfungsmöglichkeiten für Projekte des Clusters *InZePro*. Es wird ein aktiver Austausch des durch beide Cluster aufgebauten Wissens im Bereich der intelligenten Prozesssteuerung und -modellierung angestrebt. Das mit den *ProZell*-Projekten aufgebaute vertiefte Prozessverständnis kann beispielsweise zur Optimierung oder Validierung von Modellen eingesetzt werden, welche auf Basis von Machine Learning in Projekten des *InZePro*-Clusters entwickelt werden. Weiter können die in *InZePro* entwickelten intelligenten Methoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit auf neuartige Produktionsprozesse der *ProZell*-Projekte untersucht werden. Konkret ist ein enger Austausch zu der in ProZell erstellten Digitalisierungsplattform *Sim4Pro*, welche Produktionsprozesse mithilfe physikalischer Modelle beschreibt, geplant. Bzgl. Qualitätssicherung soll ein Austausch durch Workshops mit dem ProZell-Projekt *E-Qual* stattfinden.
Neben dem Austausch des in beiden Clustern aufgebauten Wissensschatzes und der entwickelten Methoden oder Modelle über Fachkonferenzen und gemeinsame Treffen der Kompetenzcluster, besteht die Möglichkeit des Austauschs von Materialproben zur intensiven und direkten Kooperation (z.B. strukturiere Batterieelektroden des *ProZell*-Projektes *HiStructures* zur weiteren Untersuchung in Projekten des *InZePro*-Clusters).

Kooperation mit Querschnittsinitiativen

Das Forschungscluster *GreenBattery* strebt die Schaffung von Voraussetzungen für eine nachhaltige Batterie durch einen energie- und materialeffizienten Batterielebenszyklus mit Fokus auf die Schließung von Stoff- und Materialkreisläufen an. Bedingt durch diese ganzheitliche Betrachtung des Batterielebenszyklus, bietet das Cluster *GreenBattery* eine Vielzahl an Anknüpfungs- und Kooperationsmöglichkeiten für Projekte des *InZePro*-Clusters. Batteriezellen, welche mit innovativen Prozessen der *InZePro*-Projekte gefertigt wurden, können mit Methoden welche im Rahmen der Projekte des *GreenBattery*-Clusters entwickelt wurden, hinsichtlich ihrer Recycelbarkeit bewertet werden. In *InZePro*-Projekten entwickelte Methoden, die auf eine Optimierung von Produktionsprozessen abzielen, können ebenso hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit zur Optimierung von Recyclingprozessen untersucht werten.
Projekte der beiden Cluster, welche simulative Betrachtung von Produktionsprozessen anstreben, bieten weiterhin die Möglichkeit zum direkten Austausch und zur gegenseitigen Validierung der entwickelten Modelle. Dank des parallelen Startes der Projekte der Cluster *GreenBattery* und *InZePro* bietet sich außerdem die Möglichkeit einer direkten Berücksichtigung der jeweiligen Zwischenergebnisse der Clusterprojekte noch während der Projektlaufzeit.
Der *InZePro*-Mitglied PEM der RWTH strebt eine Beteiligung an verschiedenen Forschungsvorhaben innerhalb des neuen BMBF-Kompetenzclusters *GreenBattery* an. Hierbei ergeben sich durch die Kooperation mit weiteren RWTH Instituten (z.B. IME) Schnittstellen für den Informationsaustausch. Beispielsweise soll in diesem Cluster die Automatisierung und Digitalisierung von Re-X Prozessen für Batteriepacks, Batteriemodule und Batteriezellen untersucht werden. Diese Erkenntnisse können und sollen direkt in die Entwicklung von intelligenten Batterieproduktionsprozessen einfließen. Gleiches gilt für die Untersuchung des Alterungsverhaltens von Batteriezellen und intelligenter Sensorik, welche ebenfalls in dem *GreenBattery*-Cluster adressiert werden soll. Erkenntnisse aus diesen Vorhaben lassen Rückschluss auf das Produktdesign und die Produktion zu. Dabei ist ein Wissensaustausch zum einen durch die enge Vernetzung der beteiligten Institute sowie die gleichzeitige Beteiligung des PEM in mehreren dieser Projekte gewährleistet.
Das IWF der TU Braunschweig ist über die Funktion des Clusterkoordinators von Herrn Prof. Herrmann im BMBF-Kompetenzcluster *GreenBattery* mit diesem verbunden. Darüber hinaus steht das IWF durch die Zusammenarbeit in der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) mit den anderen in der Batterieforschung tätigen Instituten aus Braunschweig in engem Kontakt, welche ebenfalls an Forschungsvorhaben in diesem BMBF-Kompetenzcluster beteiligt sind. Daraus ergeben sich clusterübergreifend Schnittstellen für die Forschungsvorhaben. Ein reger Informations- und Wissensaustausch über Fachkonferenzen und gemeinsame Clustertreffen sowie eine enge Vernetzung zwischen den beiden BMBF-Kompetenzclustern über bilateralen Austausch der Projekte wird angestrebt.

Im BMBF-Kompetenzcluster *„Batterienutzungskonzepte“* soll Know-how zur Modul- bzw. Zell-Diagnose inklusive einer End-of-Life-Schnellcharakterisierung bzw. Zustandsbestimmung erarbeitet werden. Zusätzlich werden beschleunigte Alterungsverfahren, Lebensdaueruntersuchungen, Performanceanalyse und Sicherheitskonzepte adressiert. Die gesammelten Daten sollen zurück in die Zellentwicklung und die Fertigungsprozesse fließen und ein Basiskonzepten zur Diagnostik entwickelt werden. Zur erfolgreichen Implementierung des Moduls wird eine ergänzende System- und Anwendungsanalyse vorgeschlagen. Dabei liegt der Fokus sowohl auf der sowohl ökologischen Betrachtung als auch auf den Rohstoffverfügbarkeiten. Neben der Beobachtung von Trends im Bereich Energiespeicherung gilt es, die wirtschaftlichen, energetischen und umweltrelevanten Daten zu erfassen und zu analysieren. Darunter fallen neben Kostenstrukturen Anwendungsanalysen sowie Stoff- und Energiebilanzen. Mit dem Ziel einer (Batterie-)Systembewertung werden darüber hinaus auch potentielle künftige Batteriesysteme auf ihre Wirtschaftlichkeit, Anwendungsrelevanz und Ökobilanz hin analysiert. Insgesamt dient das Cluster der Analyse der Skalierbarkeit Richtung großer Batteriezellen und Batteriepacks zur Verkürzung der Innovationszyklen und der Time-to-Market für neue Materialien und Zellen.
Durch die Vernetzung mit Forschungsinstituten aus dem neuen BMBF-Kompetenzcluster Batterienutzungskonzepte (insbesondere mit dem ISEA der RWTH Aachen) können auch hier Schnittstellen und ein kontinuierlicher Informationsaustausch gewährleistet werden. Insbesondere die Rückkopplung der gesammelten Daten in die Fertigungsprozesse ist hervorzuheben.

Ziel des BMBF-Kompetenzclusters *Analytik / Qualitätssicherung* (*AQua*) ist es mit Unterstützung bestehender und Entwicklung neuer Analytik(verfahren) die Effizienz und Langlebigkeit von Batterien zu erhöhen. Ausgangspunkt ist die Charakterisierung der Batterien. Ergänzen sollen sich hier Methoden auf Zellebene mit Methoden auf Materialebene. Zum einen sollen prozessübergreifend Eigenschafts-Struktur-Beziehungen zwischen Fertigungsfehlern und der elektrochemischen Performance der Elektrode bzw. Zelle ermittelt und darauf aufbauend Toleranzfenster für Kriterien der Qualitätssicherung definiert werden. Dafür notwendige Inline-/Online-Sensorik soll als Schnittstelle für die Material-/Prozessmodellierung dienen. Zum anderen sollen intrinsische Eigenschaften und Prozesse auf Materialebene durch neuartige in situ- und operando-Methoden analysiert werden und damit ein tiefergehendes Verständnis des Materialverhaltens in Batterien ermöglichen.
Auch in diesem Bereich soll die enge Zusammenarbeit der Lehrstühle und Institute der TU München der Initiative TUM.Battery, die die Aktivitäten und Kompetenzen der Batterieforschung bündelt, genutzt werden, um Mehrwert durch den engen Informationsaustausch zwischen dem Cluster *InZePro* und dem Cluster *AQua* zu schaffen. Insbesondere die etablierte Zusammenarbeit zwischen dem *iwb* und dem Lehrstuhl für Technische Elektrochemie (Prof. Gasteiger) aus den „ExZellTUM“-Projekten wird diesen Austausch unterstützen.
Die Clusterarbeiten können durch die Kompetenzen des PEM und des *iwb* in der Analyse möglicher Fehlerbilder und dem Ableiten der Notwendigkeit von Quality Gates mittels Methoden der Qualitätssicherung ergänzt werden. Am PEM existieren besondere Erfahrung in Projekten der Prozessplanung sowohl für die Batterieproduktion aus Kooperationen mit dem *Battery Industrialization Center* in Großbritannien (UK BIC), als auch aus dem Forschungsprojekt *StarTest* zur Testplanung. Grundsätzliche Prozess-Qualitätsbeziehungen wurden in *OptiZellForm* und *Cell-Fi* im Detail untersucht und können ergänzend im Cluster eingebracht sowie erweitert werden.
Das KIT ist dahingehend in den Cluster *Aqua* eingebunden, dass Prof. Helmut Ehrenberg, einer der Leiter des KIT-Batterietechnikums, eine Leitungsfunktion in diesem übernimmt. Das KIT Batterietechnikum ist damit eine ideale Schnittstelle zwischen *AQua* und *InZePro*. Die Forschungsvorhaben werden an den gemeinsam betriebenen Anlagen durchgeführt – das technische Personal arbeitet eng zusammen. Somit können Ergebnisse aus dem *AQua*-Cluster direkt in *InZePro* überführt werden. Die Brückenprojekte zwischen *InZePro* und Aqua sind daher von besonderer Bedeutung.

Die *FFB* in Münster ist ein zentraler Bestandteil einer exzellenten deutschen Batterieforschungslandschaft und Befähiger für die Forschung und Entwicklung innovativer Technologien in der Batteriezellproduktion. Dabei dienen Erkenntnisse von öffentlich geförderten Forschungsclustern als Grundlage für den Einsatz von Fertigungstechnologien mit fortgeschrittener technologischer Reife. Das Ziel ist es, insbesondere die technologischen Hürden durch geringere Investitionsrisiken für Unternehmen zu überwinden und dadurch die Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette von der Herstellung bis hin zum Recycling auszubauen. Einen wesentlichen Erfolgsfaktor stellt die enge Zusammenarbeit mit den deutschen Batteriekompetenzzentren und der schnelle Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung.
Das BMBF-Kompetenzcluster Intelligente Batteriezellproduktion sieht sich im Fabrikmodul Batteriezellfertigung als Schnittstelle zur FFB. In diesem Cluster vorentwickelte Innovationen aus den benannten Themenschwerpunkten (TRL 3-6) sollen ohne Zeitverzug in die „Pipeline“ der vorindustriellen Produktion der FFB (TRL > 6) und damit deutlich beschleunigt in die Industrie (TRL 9) einfließen. Übergeordnetes Ziel ist die Integration und Implementierung der Erkenntnisse aus den Clusterprojekten in einen umfassenden produktionstechnischen Kontext der FFB. Die Integration und Implementierung geschieht im engen Austausch mit dem Fabrikmodul Material und dem Fabrikmodul Zelle und Prozesse sowie den Querschnittsinitiativen Batterielebenszyklus und Analytik/Qualitätssicherung.
Das PEM ist umfangreich in den Aufbau der *FFB* in Münster eingebunden. Dabei unterstützt das PEM die Fraunhofer Gesellschaft in nahezu allen Arbeitspaketen des *FFB*-Projektes, von der Zellspezifikation über die Anlagenauslegung bis hin zu Digitalisierungsthemen. So ist eine intensive Zusammenarbeit mit dem *FFB*-Team durchgehend gewährleistet. Gleichzeitig bietet diese enge Abstimmung den Vorteil, dass potentielle Innovationsmodule für die *FFB* in dem BMBF-Kompetenzcluster *InZePro* bis zu einem gewissen Reifegrad entwickelt und dann in der *FFB* erprobt werden können. Umgekehrt können Innovationsideen aus der *FFB* in das Cluster eingebracht und in neuen Projekten erforscht werden.

4. Ideen-, IP- & Technologietransfer – Verwertungsplan

4.1. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Übergeordnetes Ziel des Clusters *InZePro* ist es, die Produktionskosten von Batteriezellen zu reduzieren und gleichzeitig deren Produktqualität zu erhöhen. Hierzu soll unter Einsatz von Lösungen der Industrie 4.0 eine ganzheitliche Optimierung des Produktionssystems erfolgen. Hierfür ist neben einer breiten Wissensbasis zu Fertigung von Lithium-Ionen-Zellen die Ausbildung von Fachkräften, insbesondere am Standort Deutschland, essentiell. Nach erfolgreichem Abschluss der im Cluster geförderten Projekte, können die erzielten Erkenntnisse und Entwicklungen wesentlich zur Rationalisierung der Lithium-Ionen-Batteriefertigung beitragen und damit Deutschland als Standort für Batterieproduktionen im Großserienmaßstab attraktiver machen. Hierzu tragen beispielsweise die angestrebten Reduktionen der Prozesszeiten bei. Weiterhin wird die Patentierung schützenswerter Erfindungen und deren Transfer in die Unternehmen über Lizensierungen angestrebt.
Im Sinne der Innovationspipeline unterstützt die Übertragung und Weiterentwicklung der Ergebnisse des Clusters *InZePro* als Innovationsmodule in die *FFB* deren Hebung auf hohe TRL. Dazu werden in *InZePro* Lösungen für innovative Anlagen und Produktionssysteme auf TRL 3 bis 6 erarbeitet. Diese Lösungen können von der *FFB* aufgenommen werden, welche die Erprobung der Massen- bzw. Großserienproduktion (TRL 6-9) fokussiert und den Weg für die direkte Anwendung in Unternehmen bereitet.

4.2. Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten

Die angesprochenen Erkenntnisse aus den im Cluster geförderten Projekten können nicht nur in Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen für die Forschungsfabrik (z. B. Schulungen, Praktika, univ. Vorlesungen) integriert werden, sondern sollen vor allem in der Forschungsfabrik als Basis zur Hochskalierung und effizienten Steuerung und Überwachung des Fabrikbetriebes und der Einzelprozesse dienen. So werden wertvolle Beiträge zur Reduzierung der Kosten und der Sicherstellung der Produktqualität auf industriellem Maßstab innerhalb der Forschungsfabrik geliefert. Den beteiligten akademischen Partnern wird es ermöglicht, ihr wissenschaftliches Profil im Bereich der Entwicklung und Produktion von Lithium-Ionen-

Zellen durch weitere Publikationen auszubauen und das Wissen der Öffentlichkeit zugänglich zu machen. Des Weiteren sollen wissenschaftliche Erkenntnisse patentiert bzw. lizensiert werden können. Schon während der Projektlaufzeit wird die Ausbildung von Studierenden vorangetrieben, indem wissenschaftliche Mitarbeiter unterstützt von Studierenden an den InZePro-Projekten mitwirken. Auch Seminare, Messeauftritte und das Format der Industrietage ermöglichen einen zeitnahen Übertrag gewonnener Erkenntnisse an Studierende, Unternehmen und Fraunhofer Institute. Insbesondere die Industrietage sollen auch als „Keimzelle“ für bilaterale Kooperationen zwischen Forschungsinstituten und Industrie dienen. Die zu erwartenden Forschungsergebnisse mit hohem Neuheitscharakter, die herausragende Forschungsinfrastruktur und die interdisziplinäre Vernetzung zwischen den unterschiedlichen Forschungspartnern bietet eine hervorragende Plattform für den Wissensaustausch und die Ausbildung zukünftiger Fachkräfte für die Wissenschaft, die geplante Forschungsfabrik und die Wirtschaft.

4.3. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Im Anschluss an den erfolgreichen Abschluss der InZePro-Projekte, sollen die gewonnenen Erkenntnisse und Entwicklungen vom vorindustriellen Maßstab der Projekte auf einen industriellen Maßstab übertragen werden. Hierzu sind die Projekterkenntnisse sowohl an die industriellen Produktionsprozesse, als auch an die industriell verwendeten Batterieformate und Maschineninfrastruktur anzupassen. Dies kann in anschließenden Verbundprojekten mit Industriepartnern oder in bilateralen Vorhaben zwischen Industrie und Akademia erfolgen. Dieser Transfer dient im Weiteren der zusätzlichen Validierung der Ergebnisse und kann die industriell realisierbare Kostensenkungen und Qualitätssteigerungen für die Zellfertigung aufzeigen.

Literaturangaben

[1] Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, Michaelis, S., Rahimze, E., Kampker, A., Heimes, H., Lienemann, C., Offermanns, C., Kehrer, M., Kwade, A., Haselrieder, W., Rahlfs, S., Uerlich, R. u. Bognar, N., Frankfurt am Main 2018

[2] Singh, M., Kaiser, J. u. Hahn, H.: A systematic study of thick electrodes for high energy lithium ion batteries. Journal of Electroanalytical Chemistry 782 (2016), S. 245–249

[3] Kampker, A.: Elektromobilproduktion. Berlin: Springer Vieweg 2014

[4] Weinmann, H. W. u. Fleischer, J.: Influences of Increasind Coating Thicknesses and Calendering Degrees on Single-Sheet-Stack Formation. International Battery Production Conference IBPC. International Battery Production Conference IBPC. 2019, S. 49

[5] Ebert, L., Roscher, M. A. u. Wolter, M.: Schnellere Serienproduktion von Lithium-Ionen-Batterien. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 116 (2014) 4, S. 60–63

[6] Schilling, A., Schmitt, J., Dietrich, F. u. Dröder, K.: Analyzing Bending Stresses on Lithium-Ion Battery Cathodes induced by the Assembly Process. Energy Technology 4 (2016) 12, S. 1502–1508

[7] Thielmann, A., Neef, C., Hettesheimer, T., Döscher, H., Wietschel, M. u. Tübke, J.: Energiespeicher-Roadmap (Update 2017). Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien, 2017. http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-4812318.pdf, abgerufen am: 12.03.2020

[8] Reinhart, G., Zeilinger, T., Kurfer, J., Westermeier, M., Thiemann, C., Glonegger, M., Wunderer, M., Tammer, C., Schweier, M. u. Heinz, M.: Research and Demonstration Center for the Production of Large-Area Lithium-Ion Cells. In: Schuh, G. (Hrsg.): Future trends in production engineering. Proceedings of the first conference of the German Academic Society for Production Engineering (WGP), Berlin, Germany, 8th - 9th june 2011. Berlin: Springer 2013, S. 3–12

[9] Weinmann, H. W. u. Fleischer, J.: Highly integrated machine module for single sheet stacking. Tagungsband zur International Battery Production Conference (IBPC). 2018, S. 58

[10] Nationale Plattform Elektromobilität: Roadmap integrierte Zell- und Batterieproduktion Deutschland, Berlin 2016. http://nationale-plattform-elektromobilitaet.de/fileadmin/user_upload/Redaktion/NPE_AG2_Roadmap_Zellfertigung_final_bf.pdf, abgerufen am: 12.03.2020

[11] Diehm, R., Weinmann, H., Kumberg, J., Schmitt, M., Fleischer, J., Scharfer, P. u. Schabel, W.: Edge Formation in High-Speed Intermittent Slot-Die Coating of Disruptively Stacked Thick Battery Electrodes. Energy Technology 8 (2020) 2, S. 1900137

[12] Mertens, P., Barbian, D. u. Baier, S.: Digitalisierung und Industrie 4. 0 - eine Relativierung. Wiesbaden: Vieweg 2018

[13] Küpper, D., Kuhlmann, K., Wolf, S., Pieper, C., Xu, G. u. Ahmad, J.: The Future of Battery Production for Electric Vehicles, 2018

[14] Merz, S. L. u. Siepmann, D.: Industrie 4.0 – Vorgehensmodell für die Einführung. In: Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2016, S. 83–132

[15] Fraunhofer IPT: Industrie 4.0 - Vernetzte, adaptive Produktion. https://www.ipt.fraunhofer.de/content/dam/ipt/de/documents/Broschueren/Industrie%2040-Vernetze%20adaptive%20Produktion.pdf, abgerufen am: 12.03.2020

[16] Weinreich, U.: Lean Digitization. Digitale Transformation durch agiles Management. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2016

[17] Mayr, A., Weigelt, M., Lindenfels, J. von, Seefried, J., Ziegler, M., Mahr, A., Urban, N., Kuhl, A., Huttel, F. u. Franke, J.: Electric Motor Production 4.0 – Application Potentials of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing of Electric Motors. 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC). Proceedings : 4 and 5 December 2018, Schweinfurt, Germany. [Piscataway, New Jersey]: IEEE 2018, S. 1–13

[18] Geiger, W. u. Kotte, W.: Handbuch Qualität. Grundlagen und Elemente des Qualitätsmanagements: Systeme, Perspektiven. Praxis und Studium. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden 2008

[19] Zhang, J., Li, S. P., Bao, N. S., Zhang, G. J., Xue, D. Y. u. Gu, P. H.: A robust design approach to determination of tolerances of mechanical products. CIRP Annals 59 (2010) 1, S. 195–198

[20] Kaiser, J., Wenzel, V., Nirschl, H., Bitsch, B., Willenbacher, N., Baunach, M., Schmitt, M., Jaiser, S., Scharfer, P. u. Schabel, W.: Prozess- und Produktentwicklung von Elektroden für Li-Ionen-Zellen. Chemie Ingenieur Technik 86 (2014) 5, S. 695–706

[21] Jaiser, S., Kumberg, J., Klaver, J., Urai, J. L., Schabel, W., Schmatz, J. u. Scharfer, P.: Microstructure formation of lithium-ion battery electrodes during drying – An ex-situ study using cryogenic broad ion beam slope-cutting and scanning electron microscopy (Cryo-BIB-SEM). Journal of Power Sources 345 (2017), S. 97–107

[22] Jaiser, S., Friske, A., Baunach, M., Scharfer, P. u. Schabel, W.: Development of a three-stage drying profile based on characteristic drying stages for lithium-ion battery anodes. Drying Technology 35 (2017) 10, S. 1266–1275

[23] Meyer, C., Bockholt, H., Haselrieder, W. u. Kwade, A.: Characterization of the calendering process for compaction of electrodes for lithium-ion batteries. Journal of Materials Processing Technology 249 (2017), S. 172–178

[24] Meyer, C., Kosfeld, M., Haselrieder, W. u. Kwade, A.: Process modeling of the electrode calendering of lithium-ion batteries regarding variation of cathode active materials and mass loadings. Journal of Energy Storage 18 (2018), S. 371–379

[25] Ju, F., Li, J., Xiao, G., Arinez, J. u. Deng, W.: Modeling, analysis, and improvement of integrated productivity and quality system in battery manufacturing. IIE Transactions 47 (2015) 12, S. 1313–1328

[26] Hao, H., Mu, Z., Jiang, S., Liu, Z. u. Zhao, F.: GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China. Sustainability 9 (2017) 4, S. 504

[27] Berckmans, G., Messagie, M., Smekens, J., Omar, N., Vanhaverbeke, L. u. van Mierlo, J.: Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030. Energies 10 (2017) 9, S. 1314

[28] Doyle, M., Fuller, T. F. u. Newman, J.: Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell. Journal of The Electrochemical Society (1993) 140, S. 1526–1533

[29] Sangrós Giménez, C., Finke, B., Schilde, C., Froböse, L. u. Kwade, A.: Numerical simulation of the behavior of lithium-ion battery electrodes during the calendaring process via the discrete element method. Powder Technology 349 (2019), S. 1–11

[30] Suthar, B., Northrop, P. W. C., Rife, D. u. Subramanian, V. R.: Effect of Porosity, Thickness and Tortuosity on Capacity Fade of Anode. Journal of The Electrochemical Society 162 (2015) 9, A1708-A1717

[31] Röder, F., Braatz, R. D. u. Krewer, U.: Multi-Scale Simulation of Heterogeneous Surface Film Growth Mechanisms in Lithium-Ion Batteries. Journal of The Electrochemical Society 164 (2017) 11, E3335-E3344

[32] Lenze, G., Röder, F., Bockholt, H., Haselrieder, W., Kwade, A. u. Krewer, U.: Simulation-Supported Analysis of Calendering Impacts on the Performance of Lithium-Ion-Batteries. Journal of The Electrochemical Society 164 (2017) 6, A1223-A1233

[33] Sangrós Giménez, C., Schilde, C., Froböse, L., Ivanov, S. u. Kwade, A.: Mechanical, Electrical, and Ionic Behavior of Lithium-Ion Battery Electrodes via Discrete Element Method Simulations. Energy Technology 8 (2020) 2, S. 1900180

[34] Inoue, G. u. Kawase, M.: Numerical and experimental evaluation of the relationship between porous electrode structure and effective conductivity of ions and electrons in lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 342 (2017), S. 476–488

[35] Mu, D., Liu, Z.-S., Huang, C. u. Djilali, N.: Determination of the effective diffusion coefficient in porous media including Knudsen effects. Microfluidics and Nanofluidics 4 (2008) 3, S. 257–260

[36] Laue, V., Wolff, N., Röder, F. u. Krewer, U.: Modeling the Influence of Mixing Strategies on Microstructural Properties of All-Solid-State Electrodes. Energy Technology 8 (2020) 2, S. 1801049

[37] Thomitzek, M., Schmidt, O., Röder, F., Krewer, U., Herrmann, C. u. Thiede, S.: Simulating Process-Product Interdependencies in Battery Production Systems. Procedia CIRP 72 (2018), S. 346–351

[38] Fahem, I.: 3D-Matching und Tracking von Produktionsanlagen-Komponenten und Visualisierung von Verbrauchswerten auf Mobilgeräten, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Diplomarbeit. Hannover 2014

[39] Syberfeldt, A., Danielsson, O. u. Gustavsson, P.: Augmented Reality Smart Glasses in the Smart Factory: Product Evaluation Guidelines and Review of Available Products. IEEE Access 5 (2017), S. 9118–9130

[40] Zhou, F., Duh, H. B.-L. u. Billinghurst, M.: Trends in augmented reality tracking, interaction and display: A review of ten years of ISMAR. 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, 2008. ISMAR 2008 ; Sept. 15 - 18, 2008, Cambridge, UK. Piscataway, NJ: IEEE Service Center 2008, S. 193–202

[41] Mur-Artal, R. u. Tardos, J. D.: ORB-SLAM2: An Open-Source SLAM System for Monocular, Stereo, and RGB-D Cameras. IEEE Transactions on Robotics 33 (2017) 5, S. 1255–1262

[42] YOLOv3: An Incremental Improvement, Redmon, J. u. Farhadi, A., 2018

[43] Scurati, G. W., Gattullo, M., Fiorentino, M., Ferrise, F., Bordegoni, M. u. Uva, A. E.: Converting maintenance actions into standard symbols for Augmented Reality applications in Industry 4.0. Computers in Industry 98 (2018), S. 68–79

[44] Billinghurst, M., Clark, A. u. Lee, G.: A Survey of Augmented Reality. Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction 8 (2015) 2-3, S. 73–272

[45] Rautaray, S. S. u. Agrawal, A.: Vision based hand gesture recognition for human computer interaction: a survey. Artificial Intelligence Review 43 (2015) 1, S. 1–54

[46] ElSayed, N. A.M., Thomas, B. H., Marriott, K., Piantadosi, J. u. Smith, R. T.: Situated Analytics: Demonstrating immersive analytical tools with Augmented Reality. Journal of Visual Languages & Computing 36 (2016), S. 13–23

[47] Küpper, D., Lorenz, M., Kuhlmann, K., Bouffault, O., Lim, Y., van Wyck, J., Köcher, S. u. Schlageter, J.: AI in the Factory of the Future. The Ghost in the Machine, 2018. https://www.bcg.com/de-de/publications/2018/artificial-intelligence-factory-future.aspx, abgerufen am: 12.03.2020

[48] Hatiboglu, B., Schuler, S., Bildstein, A. u. Hämmerle, M.: Einsatzfelder von künstlicher Intelligenz im Produktionsumfeld. Kurzstudie im Rahmen von "100 Orte für Industrie 4.0 in Baden-Württemberg", Stuttgart 2019. http://publica.fraunhofer.de/documents/N-549107.html, abgerufen am: 12.03.2020

[49] Europäische Kommission: IFaCOM. Intelligent Fault Correction and self Optimizing Manufacturing systems. https://cordis.europa.eu/project/id/285489/de, abgerufen am: 12.03.2020

[50] Europäische Kommission: THOMAS. Mobile dual arm robotic workers with embedded cognition for hybrid and dynamically reconfigurable manufacturing systems. https://cordis.europa.eu/project/id/723616, abgerufen am: 12.03.2020

[51] Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften: RoKtoLas. Robotergeführte, scannerbasierte optische Kohärenztomographie für das Remote -Laserstrahlschweißen zur Flexibilisierung von Prozessketten im Karosseriebau. https://www.iwb.mw.tum.de/roktolas/, abgerufen am: 12.03.2020

[52] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz: BaSyPaaS. https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/projekte/projekt/basypaas/, abgerufen am: 12.03.2020

[53] Reinhart, G.: Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017

[54] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz: CyProS. Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung für den Mittelstand durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/projekte/projekt/cypros/, abgerufen am: 12.03.2020

[55] Fachhochschule Dortmund: inMachine. Lokale Intelligenz und vernetzte Planung zur Effizienzsteigerung technischer Produktionsmaschinen in kollaborativen Produktionsverbünden von KMU. https://www.inmachine.de/index.html#, abgerufen am: 12.03.2020

[56] Klöber-Koch, J., Schreiber, M., Klimm, B. u. Reinhart, G.: Vorausschauende Instandhaltung für Fertigungsressourcen. Vorgehensmodell zur Integration von Predictive-Maintenance-Werkzeugen in Fertigungsressourcen. wt-online (2018) 3, S. 155–159

[57] Schuh, G., Reinhart, G., Prote, J.-P., Sauermann, F., Horsthofer, J., Oppolzer, F. u. Knoll, D.: Data Mining Definitions and Applications for the Management of Production Complexity. Procedia CIRP 81 (2019), S. 874–879

[58] Knoll, D., Neumeier, D., Prüglmeier, M. u. Reinhart, G.: An automated packaging planning approach using machine learning. Procedia CIRP 81 (2019), S. 576–581

[59] Zhai, S., Riess, A. u. Reinhart, G.: Formulation and Solution for the Predictive Maintenance Integrated Job Shop Scheduling Problem. 2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). Piscataway, NJ: IEEE 2019, S. 1–8

[60] Schnell, J., Nentwich, C., Endres, F., Kollenda, A., Distel, F., Knoche, T. u. Reinhart, G.: Data mining in lithium-ion battery cell production. Journal of Power Sources 413 (2019), S. 360–366

[61] Westermeier, M., Reinhart, G. u. Steber, M.: Complexity Management for the Start-up in Lithium-ion Cell Production. Procedia CIRP 20 (2014), S. 13–19

[62] Schnell, J. u. Reinhart, G.: Quality Management for Battery Production: A Quality Gate Concept. Procedia CIRP 57 (2016), S. 568–573

[63] Gröger, C., Niedermann, F. u. Mitschang, B.: Data Mining-drivenManufacturing Process Optimization. In: Proceedings of the World Congress on Engineering. Lecture notes in engineering and computer science, III. IAENG 2012

[64] Thiede, S., Turetskyy, A., Kwade, A., Kara, S. u. Herrmann, C.: Data mining in battery production chains towards multi-criterial quality prediction. CIRP Annals 68 (2019) 1, S. 463–466

[65] Artem Turetskyy, Vincent Laue, Raphael Lamprecht, Sebastian Thiede, Ulrike Krewer, Christoph Herrmann: Artificial Neural Network enabled P2D Model Deployment for End-of-Line Battery Cell Characterization. IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN) (2019)

[66] Ng, M.-F., Zhao, J., Yan, Q., Conduit, G. J. u. Seh, Z. W.: Predicting the state of charge and health of batteries using data-driven machine learning. Nature Machine Intelligence 114 (2020), S. 11414

[67] Ghadbeigi, L., Sparks, T. D., Harada, J. K. u. Lettiere, B. R.: Data-mining approach for battery materials. 2015 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). IEEE 2015 - 2015, S. 239–244

[68] Lu, W., Xiao, R., Yang, J., Li, H. u. Zhang, W.: Data mining-aided materials discovery and optimization. Journal of Materiomics 3 (2017) 3, S. 191–201

[69] Westermeier, M.: Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen, Herbert Utz Verlag GmbH Dissertation

[70] Kornas, T., Daub, R., Karamat, M. Z., Thiede, S. u. Herrmann, C.: Data-and Expert-Driven Analysis of Cause-Effect Relationships in the Production of Lithium-Ion Batteries. 2019 IEEE 15th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). August 22-26, 2019, Vancouver, BC, Canada. [Piscataway, New Jersey]: IEEE 2019, S. 380–385