



Intelligente Batteriezellproduktion

# **Leitfaden für Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion**

# Leitfaden für Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion

## Editorial

Der vorliegende Leitfaden zur Digitalisierung entstand aus der gemeinsamen Expertise und Zusammenarbeit der Technischen Universitäten Braunschweig, München, Karlsruhe und Aachen – vier führenden Forschungseinrichtungen im Bereich der Batterieproduktion – im Rahmen des Kompetenzclusters Intelligente Batteriezellproduktion (InZePro).

In diesem Kompetenzcluster wird angestrebt, Produktionssysteme zur Batteriezellfertigung durch den Einsatz von Industrie-4.0-Lösungen ganzheitlich zu optimieren. Diese Optimierung erfolgt durch die Flexibilisierung der Produktion in Bezug auf Menge, Format, Material und eingesetzte Technologien. Angestrebte Ergebnisse sind die Steigerung der Produktqualität von Batteriezellen, der Produktivität der Batteriezellproduktion und die Reduktion der Produktionskosten. Der InZePro-Cluster richtet sich vor allem an Zellhersteller und Anlagenbauer im Bereich der Batteriezellproduktion. Die entwickelten Forschungsergebnisse einzelner Produktionstechnologien werden in die industrielle Anwendung bei Herstellern von Maschinen- und Anlagentechnik zur Produktion von Batteriezellen übertragen.

Der vorliegende Leitfaden soll als Wegweiser für Unternehmer, Industrieexperten und Akademiker dienen, um den Grad der Digitalisierung und damit auch die Effizienz der Batteriezellproduktion zu steigern. Auf den nachfolgenden Seiten wird eine praxisnahe Vorgehensweise erläutert, die auf bewährte Methoden zur Digitalisierung der Produktion mittels Industrie 4.0 gestützt ist und mit Anwendungsbeispielen und Erkenntnissen aus der Praxis illustriert wird. Sie erhalten einen Einblick in die Herausforderungen, Chancen und Best Practices, um die digitale Transformation der Batteriezellproduktion anzugehen.

Wir danken allen Beteiligten für ihren Beitrag zu den präsentierten Ergebnissen und sind zuversichtlich, dass eine Umsetzung der Digitalisierung bedeutend zum Aufbau und zur nachhaltigen Weiterentwicklung einer international führenden, wettbewerbsfähigen Batteriezellproduktion in Deutschland beitragen wird.

Prof. Dr.-Ing. **Jürgen Fleischer**, Karlsruher Institut für Technologie  
Prof. Dr.-Ing. **Klaus Dröder**, TU Braunschweig  
Prof. Dr.-Ing. **Rüdiger Daub**, TU München  
Prof. Dr.-Ing. **Achim Kampker**, RWTH Aachen

# 1. Einführung

## Welchen Zweck hat der vorliegende Leitfaden?

Die Batteriezellproduktion ist geprägt von komplexen Prozessketten und erfordert ein tiefgreifendes Verständnis der verbundenen technologischen und organisatorischen Aspekte. Industrie 4.0-Konzepte zur Digitalisierung der Prozesse und Anlagen in der Produktion können zur Beherrschung dieser Komplexität beitragen. Industrie 4.0 wird als Befähiger erachtet, die Produktivität zu steigern, die Flexibilität zu verbessern, Qualitätsstandards zu erhöhen und die Gesamteffizienz der Batteriezellherstellung zu optimieren. Durch den Einsatz digitaler Technologien und Prozesse können Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken und innovative Produkte schneller auf den Markt bringen. Diese Chancen hingegen nicht zu nutzen, könnte perspektivisch die Wettbewerbsfähigkeit der Zellproduktionen in Deutschland und Europa beeinträchtigen.

Übergeordnetes Ziel des Leitfadens ist es deshalb, Unternehmen bei der Entwicklung einer umfassenden Digitalisierungsstrategie für die Batteriezellproduktion zu unterstützen und ihnen das erforderliche Wissen und die Werkzeuge zur Verfügung zu stellen, um die Chancen und Herausforderungen der Industrie 4.0 erfolgreich zu bewältigen.

## Der Leitfaden zeichnet sich durch folgende Aspekte aus:

### ■ Strukturiertes Vorgehen

Es wird ein strukturiertes Vorgehen präsentiert, das es Unternehmen ermöglicht, die verschiedenen Aspekte der Digitalisierung in der Batteriezellproduktion systematisch in verschiedenen Bereichen anzugehen. Der Leitfaden enthält klare Leitlinien und Schritte, die befolgt werden können, um eine erfolgreiche Umsetzung zu gewährleisten.

### ■ Praxisorientierte Beispiele („Best Practices“)

Anwendungsbeispiele, die in Batteriezellproduktionsanlagen erfolgreich implementiert wurden, illustrieren das strukturierte Vorgehen und bieten konkrete Empfehlungen zur Umsetzung.

### ■ Flexibler Ansatz

Der Leitfaden berücksichtigt, dass in Unternehmen unterschiedliche Ausgangssituationen und Ziele bestehen können. Er bietet einen flexiblen Ansatz, der es ermöglicht sowohl Einzelprozesse als auch umfassende Produktionslinien zu digitalisieren. Unternehmen können somit den Leitfaden an ihre individuellen Bedürfnisse anpassen.

### ■ Unterstützung der Anwender

Im Leitfaden werden in der Praxis einsetzbare Hilfsmittel und Empfehlungen zur Planung, Umsetzung und Überwachung der digitalen Transformation bereitgestellt.

An welche Zielgruppe ist der Leitfaden gerichtet?

Dieser Leitfaden ist an alle gerichtet, die ein fundiertes Verständnis der Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion aufbauen möchten oder aktiv eine solche Produktionseinrichtung planen. Dies schließt Erstausrüster (OEMs, engl.: Original Equipment Manufacturer), Batteriezellhersteller, Pilotlinienbetreiber und weitere Stakeholder der Batterieindustrie mit ein. Weiterhin können auch Maschinen- und Anlagenbauer profitieren, da diese über das erforderliche Fachwissen verfügen, um die Implementierung der Industrie 4.0-Ansätze in den Zellproduktionsanlagen erfolgreich umzusetzen.

1 Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in diesem Leitfaden das generische Maskulinum verwendet. Die in diesem Leitfaden verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich - sofern nicht anderes angegeben - auf alle Geschlechter

## Wann wird der Leitfaden eingesetzt?

**Greenfield-Projekte:** Bei der Errichtung einer neuen Batteriezellproduktionslinie auf Greenfield-Flächen (freie, unbebaute Flächen) ist ein systematisches Vorgehen von immenser Bedeutung. Hierbei wird empfohlen, den Leitfaden frühzeitig in der Planung einzusetzen. Mit der durch den vorliegenden Leitfaden gegebenen strukturierten Herangehensweise sind ideale Voraussetzungen geschaffen, um von Anfang an digitale und Industrie 4.0-orientierte Konzepte und Prinzipien in die Planung und Gestaltung der Fabrik zu integrieren. Der Leitfaden unterstützt bei der Auswahl geeigneter Technologien, Prozesse und Infrastrukturen, um eine effiziente, flexible und vernetzte Produktion zu ermöglichen.

**Brownfield-Projekte:** Wenn bereits bestehende Produktionsstätten mithilfe von Industrie 4.0-Prinzipien auf- und umgerüstet werden sollen, kann der Leitfaden ebenfalls genutzt werden. Er bietet Anleitungen zur Anpassung und Optimierung bestehender Unternehmensprozesse, zur Integration von digitalen Technologien und zur Schaffung einer vernetzten Produktionsumgebung. Der Leitfaden hilft dabei, bestehende Engpässe zu identifizieren, Potenziale zu erschließen und die Effizienz der Batteriezellproduktion zu steigern.

## Wer sind die Stakeholder der Digitalisierungs- und Industrie-4.0-Projekte?

Bei der Anwendung des Leitfadens zur Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion in einem Unternehmen sind typischerweise Personen mit verschiedenen Sichtweisen und Rollen beteiligt. Folgende Schlüsselrollen arbeiten typischerweise in einem interdisziplinären Projektteam zusammen (s. Abbildung 1-1):

### ■ Management

Das Management hat eine übergeordnete Rolle und ist für die Definition der Vision und der strategischen Ziele des Unternehmens verantwortlich. Es treibt die Digitalisierungsinitiative voran und schafft die Rahmenbedingungen für die Umsetzung. Zu Beginn des Projekts ist die Einbindung des Managements besonders wichtig, um die Prioritäten und die Richtung vorzugeben sowie Ressourcen bereitzustellen. Im Laufe des Projekts kann es eine überwachende und unterstützende Rolle einnehmen.

### ■ Informationstechnologie (IT)

Der Beteiligung von Expertise aus dem Bereich der IT kommt eine zentrale Rolle bei der Umsetzung der digitalen Technologien und der Integration von Systemen zu. Die beteiligten Expertinnen und Experten sind für die Auswahl, Implementierung und Wartung der Software und Hardware zuständig, die zur Realisierung der Industrie 4.0-Konzepte benötigt wird. Die IT-Fachkräfte arbeiten eng mit anderen Abteilungen zusammen, um sicherzustellen, dass die technologischen Lösungen den Anforderungen entsprechen.

### ■ Prozessplanung

Die Prozessplanung hat die Gestaltung, Analyse und Optimierung der Produktionsprozesse zum Ziel. Die Mitarbeiter dieser Abteilung identifizieren Engpässe, analysieren den Ist-Zustand und entwickeln gemeinsam mit den anderen Abteilungen Prozessmodelle, die digitale Technologien und Automatisierung integrieren.

## ■ Anlagenplanung

Die Fachkräfte in der Anlagenplanung haben die Aufgabe, geeignete Maschinen und Anlagen für die Batteriezellproduktion auszuwählen, zu installieren und zu warten. Sie arbeiten eng mit den Maschinen- und Anlagenbauern zusammen, um sicherzustellen, dass die Anlagen den Anforderungen einer digitalisierten Produktion gerecht werden. Sie tragen auch die Verantwortung, die Anlagenleistung zu überwachen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

## ■ Qualitätsmanagement

Die Aufgabe des Qualitätsmanagements ist es sicherzustellen, dass die Qualität der produzierten Batteriezellen den definierten Anforderungen entspricht. Ihre Mitarbeiter arbeiten mit den anderen Abteilungen zusammen, um Qualitätssicherungsmaßnahmen zu entwickeln und umzusetzen. Im Rahmen der Digitalisierung können sie digitale Qualitätssicherungstools und -methoden einführen, um Produktionsprozesse zu überwachen und Qualitätsabweichungen frühzeitig zu erkennen.

## ■ Projektmanagement

Das Projektmanagement ist für die Ressourcen- und Terminplanung des Digitalisierungsprojekts zuständig. Sie koordiniert die verschiedenen Aktivitäten, stellt sicher, dass Meilensteine eingehalten werden und unterstützt bei der Budgetierung. Sie arbeitet mit den anderen Abteilungen zusammen, damit die Implementierung der digitalen Lösungen reibungslos erfolgt und die Produktionsziele erreicht werden.

## ■ Forschung und Entwicklung

Der Forschungs- und Entwicklungsabteilung kommt eine wichtige Rolle bei der Identifikation neuer Technologien, Trends und Innovationsmöglichkeiten zu. Die Experten dieser Abteilung bringen ihr Fachwissen ein, um neue Ansätze zu evaluieren und zu testen. Sie arbeiten mit den anderen Abteilungen zusammen, um sicherzustellen, dass die digitalen Lösungen den aktuellen und zukünftigen Anforderungen der Batteriezellproduktion gerecht werden.

Die enge Zusammenarbeit dieser verschiedenen projektbeteiligten Stakeholder ist entscheidend für die erfolgreiche Umsetzung der Digitalisierung in der Batteriezellproduktion. Es erfordert ein interdisziplinäres und agiles Team sowie die Unterstützung des Managements, um die übergeordnete Strategie zu implementieren und die Herausforderungen der digitalen Transformation erfolgreich zu bewältigen.



## 2. Hintergrundinformationen

Der nachfolgende Abschnitt bietet Grundlageninformationen zur Batteriezellproduktion und verschiedenen Batteriezellformaten. Weiterhin werden die Begriffe Digitalisierung und Industrie 4.0 erläutert sowie das Reifegradmodell vorgestellt, welches dem Leitfaden zugrunde liegt.

### Batteriezellproduktion

Im vorliegenden Leitfaden wird die Produktion von Lithium-Ionen-Batteriezellen fokussiert, die aktuell kommerziell verfügbar und Stand der Technik sind, z.B. für Batterieelektrofahrzeuge (BEV, engl.: Battery Electric Vehicle), Hybridelektrofahrzeuge (HEV, engl.: Hybrid Electric Vehicle) oder Hybridelektrofahrzeuge mit Ladestecker (PHEV, engl.: Plug-in Hybrid Electric Vehicle). Diese Batteriezellen enthalten typischerweise Kathoden aus Übergangsmetallbasierten Materialien wie Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid (kurz: NMC), Lithium-Eisenphosphat (LFP) oder Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Aluminium-Oxid (kurz: NCA), einen organischen Flüssigelektrolyten und Anoden basierend auf Titanat oder Kohlenstoff (Michaelis et al. 2023), ggf. als Komposit mit Silizium-Anteil.

Nachfolgend wird auf die Vielfalt an Batteriezellformaten sowie die Prozesskette zur Herstellung dieser eingegangen.

#### ■ a) Batteriezellformate

Die Produktvielfalt angebotener Batteriezellen lässt sich in drei wesentliche Formate untergliedern: Zylindrische Zellen (auch Rundzellen genannt), prismatische Zellen und Pouchzellen (s. Abbildung 1-2). Während zylindrische und prismatische Zellen ein Gehäuse aus Blech, bspw. Aluminium oder Edelstahl aufweisen, werden für das Gehäuse von Pouchzellen üblicherweise Aluminium-Kunststoff-Verbundfolien verwendet. Auch die Art der Kontaktierung der Elektroden zum Gehäuse sowie der Pole der Batteriezellen beim Verbund zum Batteriepack unterscheidet sich abhängig vom Zellformat. Weiterhin weisen die verschiedenen Formate jeweils Vor- und Nachteile hinsichtlich möglicher Produktionsgeschwindigkeiten und erreichbarer Energiedichten auf. Während bei einem Wickelprozess höhere Prozessgeschwindigkeiten erzielt werden können als beim Stapeln oder Flachwickeln der prismatischen Zellen und der Pouchzellen, erlauben letztere eine vorteilhaftere Bauraumausnutzung innerhalb von Batteriemodulen und packs, was zu höheren Energiedichten führt. Für detaillierte Informationen zu den einzelnen Batteriezellvarianten sei beispielsweise auf die Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030 (Michaelis et al. 2023) verwiesen.



Abbildung 1-2: Gängige Zellformate (Bildquelle: PEM (RWTH Aachen))

## ■ b) Prozesskette

Die Prozesskette untergliedert sich in die aufeinanderfolgenden Abschnitte der Elektrodenherstellung, der Zellmontage und der Zellfinalisierung (s. Abbildung 1-3). Die Herstellung der Elektroden (Kathode und Anode) erfolgt mittels Rolle-zu-Rolle-Prozessen in zwei analogen, getrennten Prozesskettenabschnitten: Zunächst werden die synthetisierten Rohmaterialien zu einer homogenen Masse (Slurry) gemischt. Diese wird auf die Substratfolie beschichtet und getrocknet, bevor das entstandene Elektrodenkomposit im Kalandrierprozess verdichtet wird. Die Elektrodenbahnen werden auf die notwendige Breite zur Weiterverarbeitung zugeschnitten, bevor sie in der Zellmontage zu Batteriezellen assembliert werden. In dieser werden die einzelnen Schritte grob in Wickel- (zylindrische Zellen und flachgewickelte prismatische Zellen) und Stapelprozesse (Pouch- oder prismatische Zellen) unterschieden. Gegebenenfalls verbliebene Restfeuchte in den Elektroden wird im Nachtrockenschritt vor der Assemblierung entfernt. Die Kathoden und Anoden der entstandenen Zellwickel bzw. Zellstapel werden kontaktiert und in Gehäuse verpackt. Nach dem Befüllen der Zelle mit Elektrolyt ist die Zellmontage abgeschlossen. In der Zellfinalisierung werden die Zellen endgültig verschlossen und in der Formierung zum ersten Mal geladen und entladen (sogenannte „Zyklisierung“). Nach herstellerabhängigen Verweilzeiten („Altern“) und elektrischen Tests findet eine finale Prüfung der Zellen statt, bevor sie zur Nutzung ausgeliefert werden, z.B. zur Integration in Batteriepacks. Da insbesondere die Elektrodenmaterialien und der Elektrolyt feuchtesensitiv sind, werden die Produktionsprozesse unter speziell konditionierten Atmosphären durchgeführt. In Trockenräumen wird typischerweise die Assemblierung der Zellen bis zu deren endgültigem Verschließen ausgeführt. Teilweise findet auch die Elektrodenfertigung in Trockenräumen statt. (Korthauer 2019; Kwade et al. 2018)

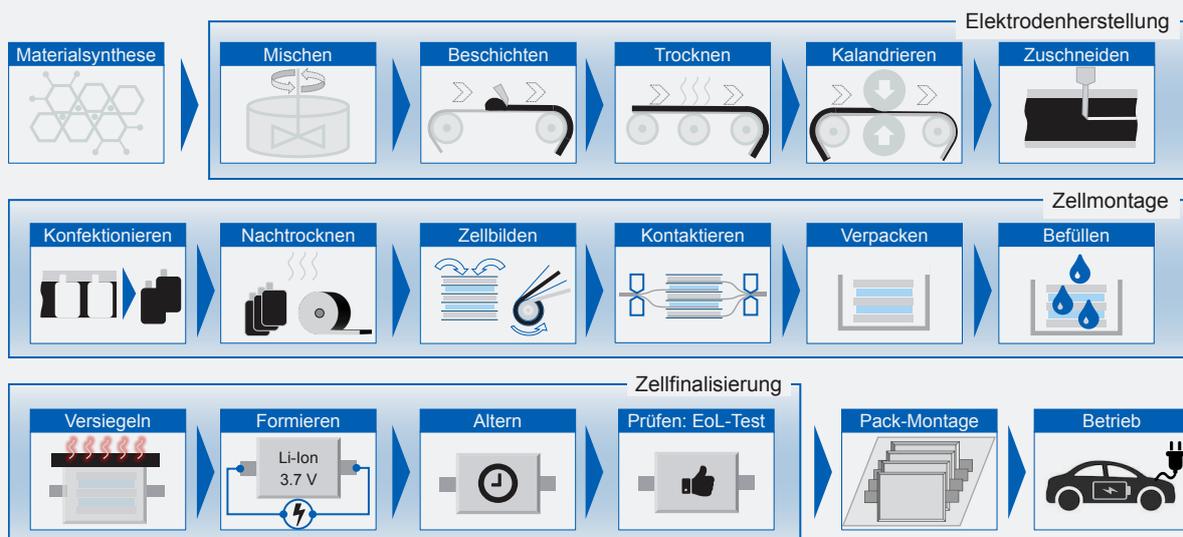


Abbildung 1-3: Schematische Prozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen (Bildquelle: iwb/TUM)

## Digitalisierung

Die Digitalisierung innerhalb von Produktionsunternehmen bezieht sich auf den Einsatz digitaler Technologien, um die Effizienz, die Produktivität und die Flexibilität der Produktionsprozesse zu verbessern (Spath et al. 2007). Sie umfasst die Transformation analoger Abläufe und Informationen in digitale Formate sowie die Integration von digitalen Systemen und Technologien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Besonders im Fokus stehen dabei die Automatisierung manueller Abläufe, die Einführung digitaler Datenformate und die Nutzung grundlegender Technologien wie Computer, Softwarean-

wendungen und elektronischer Kommunikation. Darüber hinaus trägt die Digitalisierung durch automatisierte Abläufe und erhöhte Transparenz zur Verbesserung der Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Abteilungen und Partnern bei, sowohl innerhalb eines Unternehmens als auch entlang der gesamten Lieferkette. Digitale Plattformen und Lösungen ermöglichen eine nahtlose Integration sowie den Austausch von Informationen in Echtzeit, was zu einer verbesserten Planung, Koordination und gesteigerter Effizienz führt. (Arbeitskreis Smart Service Welt / acatech 2015; Roth 2016)

Insgesamt bietet die Digitalisierung in Produktionsunternehmen zahlreiche Vorteile: Sie ermöglicht die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit, die Senkung von Kosten, die Verbesserung der Produktqualität und gleichzeitig die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle und Produkte. (Harlacher et al. 2018)

## Industrie 4.0

Der Begriff Industrie 4.0 wurde 2011 geprägt und bezieht sich auf die vierte industrielle Revolution in der Produktion und Fertigung. Die Industrie 4.0 ist eng mit der Digitalisierung verbunden, konzentriert sich jedoch nicht ausschließlich auf den Einsatz digitaler Technologien und Konzepte in der industriellen Produktion, sondern beschreibt die weitreichende Integration von Informations- und Kommunikationstechnologien im industriellen Umfeld. Der Begriff wird oftmals unterschiedlich interpretiert und fokussiert sich häufig lediglich auf technologische Elemente. Im Folgenden wird dementsprechend eine Definition von Industrie 4.0 vorgestellt, auf die sich im weiteren Verlauf bezogen wird. (Obermaier 2016) Industrie 4.0 umfasst die Integration von Technologien wie dem Internet der Dinge (IoT), Cyber-Physischen Systemen (CPS), künstlicher Intelligenz (KI), Big Data-Analysen und Cloud Computing, um Produktionsprozesse zu optimieren und die Flexibilität und Effizienz zu verbessern. Der Fokus liegt auf der Vernetzung intelligenter Maschinen, Systeme und Menschen entlang der gesamten Wertschöpfungskette, um eine reibungslose Kommunikation, automatisierte Entscheidungsfindung und eine individuelle Fertigung zu ermöglichen. Um Industrie 4.0 ganzheitlich auf Unternehmensebene einzuführen, bedarf es auf organisatorischer und struktureller Ebene einer Transformation. Ziel der Industrie 4.0 ist es, ein lernendes und agiles Ökosystem zu schaffen, welches sich einer ständig ändernden Umwelt flexibel anpassen kann. (Schuh et al. 2020b)

## Reifegradmodell

Bei einem Reifegradmodell handelt es sich um einen Ansatz, der den Reifegrad der digitalen Transformation in Unternehmen bewertet. Der Unterschied zwischen Digitalisierung und Industrie 4.0 liegt in ihrem Reifegrad und der Komplexität der eingesetzten Technologien. Während die Digitalisierung auf den Ersatz analoger Prozesse durch erste digitale Lösungen, wie z. B. die Anbindung der Anlage in ein CAM-System, abzielt, geht Industrie 4.0 einen Schritt weiter und integriert fortschrittliche Technologien, wie beispielsweise die Möglichkeit zur prozessübergreifenden Steuerung, um eine hochgradig vernetzte, intelligente und automatisierte Produktion zu erreichen. Der generelle Aufbau des Reifegradmodells ist in Abbildung 1-4 dargestellt.

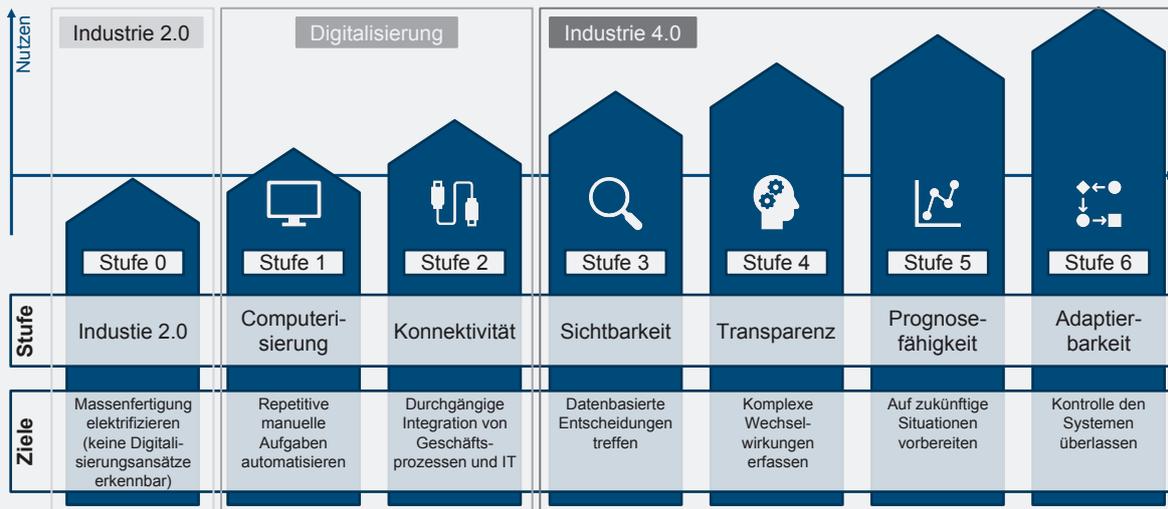


Abbildung 1-4: Reifegradmodell des Projektes BatterI4.0 in Anlehnung an Schuh et al. (2020a)

Da im Reifegradmodell nach Schuh et al. (2020a) bereits von einer grundlegenden Umsetzung von Digitalisierungsmaßnahmen ausgegangen wird, wurde es im Zuge des Projektes BatterI4.0 um eine Stufe 0 erweitert. Diese Stufe beschreibt eine Art Industrie 2.0, in der keinerlei Digitalisierung umgesetzt ist. Die Stufen 1 und 2 bilden die Digitalisierung innerhalb des Reifegradmodells ab. Sie beziehen sich auf den anfänglichen Reifegrad einer Organisation bei der Einführung erster digitaler Technologien. In diesem Stadium werden analoge Prozesse schrittweise durch digitale Lösungen ersetzt. Sie ermöglicht dadurch die Erfassung, Speicherung und Verarbeitung von Daten in digitaler Form, was zu einer verbesserten Effizienz und Genauigkeit führen kann.

Im Reifegradmodell bezieht sich Industrie 4.0 auf einen höheren Reifegrad der digitalen Transformation, der über die reine Digitalisierung hinausgeht. Industrie 4.0 wird durch den Einsatz moderner Technologien wie dem IoT, KI, Big Data-Analysen und der Integration von CPS gekennzeichnet. In diesem Stadium werden Daten in Echtzeit erfasst und analysiert, um automatisierte Entscheidungen zu treffen und den Produktionsprozess zu optimieren. Industrie 4.0 ermöglicht eine höhere Flexibilität und Individualisierung in der Produktion sowie intelligente vernetzte Maschinen, die nahtlos entlang der gesamten Wertschöpfungskette miteinander kommunizieren können.

Es ist hervorzuheben, dass Digitalisierung und Industrie 4.0 aufeinander aufbauen. Eine Organisation kann mit der Digitalisierung beginnen und sich dann schrittweise in Richtung Industrie 4.0 entwickeln, wenn digitale Kompetenzen ausgebaut und weiterentwickelte Technologien implementiert werden. Das erarbeitete Reifegradmodell bietet eine Möglichkeit, den Fortschritt und die Reife der digitalen Transformation eines Unternehmens zu bewerten und zu verstehen.

### 3. Werkzeugkästen Batteriezellproduktion

Das Fehlen einer gesamtheitlichen Betrachtung stellt für Unternehmen häufig eine große Herausforderung bei der Identifikation von Einsatz- und Umsetzungsmöglichkeiten von Industrie-4.0-Anwendungen in ihren Produktionsprozessen und Abläufen dar. Unterstützung kann bspw. durch unternehmensinterne Taskforces oder externe Beratung erfolgen, die sich gezielt mit den eigenen Prozessen und Einsatzmöglichkeiten auseinandersetzen. Als weitere Möglichkeiten, Unternehmen bei der Einführung von Industrie 4.0 zu unterstützen und die dazugehörigen IT-Technologien für eine breite Masse der Anwender zugänglich und greifbar zu machen, wurden verschiedene Digitalisierungsleitfäden mit einem dazugehörigem Workshop-Konzept entwickelt.

Einer der bekanntesten Digitalisierungsleitfäden, der insbesondere im Mittelstand als Orientierungshilfe zur Implementierung von Industrie-4.0-Technologien häufige Anwendung findet, ist der „Leitfaden Industrie 4.0“ des Verbandes Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA). Als Kernelement liegen dem Leitfaden Industrie 4.0 zwei Werkzeugkästen zugrunde, welche jeweils mehrere Anwendungsebenen und Entwicklungsstufen enthalten. Mithilfe dieser Werkzeugkästen kann in Workshops eine unternehmensindividuelle Lösung und Vorgehensweise zur Entwicklung von Industrie 4.0-Geschäftsmodellen erarbeitet werden.

Aufbauend auf dem beschriebenen Werkzeugkastenkonzept des „Leitfadens Industrie 4.0“ wurden fünf Werkzeugkästen für die Umsetzung der Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion erarbeitet (s. Abbildung 1-5): Allgemein (blau), Prozesstechnik (rot), Planung, Steuerung und Logistik (grau), Maschinen- und Anlagentechnik (grün) und Qualitätsmanagement (hellblau). Ihr Aufbau und die möglichen Entwicklungsstufen innerhalb dieser werden nachfolgend erläutert.

#### Anwendungsebenen

Jeder Werkzeugkasten ist in seiner vertikalen Struktur in Anwendungsebenen untergliedert, deren Kategorien jeweils verschiedene thematisch zusammenhängende Aspekte umfassen, die für die Batteriezellproduktion und die Einführung von Industrie 4.0 in den einzelnen Prozessschritten relevant sind (s. Abbildung 1-5). Die Kategorie Allgemein umfasst hierbei bspw. übergreifend die Anwendungsebenen Daten, Produkt, Unternehmensnetzwerk und Umgebung, die Kategorie Maschinen- und Anlagentechnik beinhaltet die themenspezifischen Ebenen Kommunikation, Aktorik/Sensorik sowie Instandhaltung.

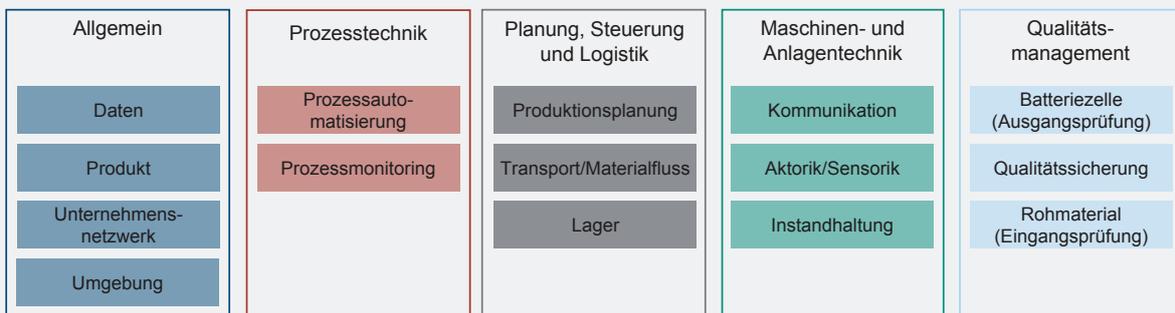


Abbildung 1-5: Anwendungsebenen der Werkzeugkästen Batteriezellfertigung

# Entwicklungsstufen

Jeder vertikalen Anwendungsebene sind horizontale Entwicklungsstufen zur anschaulichen und strukturierten Darstellung technologischer, aufeinanderfolgender Abstufungen zugeordnet (s. Abbildung 1-6). Anhand der Entwicklungsstufen wird der Reifegrad der Digitalisierung und Industrie 4.0 in den einzelnen Anwendungsebenen dargestellt. Die sieben Entwicklungsstufen beschreiben von Stufe 0 (keine Digitalisierung) bis hin zu Stufe 6 (Vision Industrie 4.0) eine schrittweise Umsetzung von Industrie 4.0-Anwendungen in den jeweiligen Prozessebenen. Die Stufen 1 bis 6 orientieren sich an den Inhalten und der Struktur des Reifegradmodells von nach Schuh et al. (2020a).

		Anwendungsebenen	Entwicklungsstufen						
			Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
Werkzeugkästen	Allgemein	Daten							
		Produkt							
		Unternehmensnetzwerk							
		Umgebung							
	Prozesstechnik	Prozessautomatisierung							
		Prozessmonitoring							
	Planung, Steuerung und Logistik	Produktionsplanung							
		Transport/Materialfluss							
		Lager							
	Maschinen- und Anlagentechnik	Kommunikation							
		Aktorik/Sensorik							
		Instandhaltung							
	Qualitätsmanagement	Qualitätssicherung							
		Rohmaterial (Eingangsprüfung)							
		Batteriezelle (Ausgangsprüfung)							

Abbildung 1-6: Werkzeugkästen für die Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion

Für eine erhöhte Anschaulichkeit werden nachfolgend beispielhaft die Anwendungsebenen „Daten“ und „Aktorik/Sensorik“ im Werkzeugkasten „Allgemein“ sowie die dazugehörigen Entwicklungsebenen kurz beschrieben.

## Anwendungsebene „Daten“ im Werkzeugkasten „Allgemein“

Die Entwicklungsstufen dieser Anwendungsebene zeigen den Weg zur vollen Digitalisierung und Nutzung von Daten in einem Unternehmen auf und verdeutlichen die fortschreitende Integration von Technologien zur Optimierung von Prozessen und Unterstützung der Entscheidungsfindung (s. Abbildung 1-7).

Entwicklungsstufen						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein Einsatz von Technologien zur digitalen Datenerfassung und -verarbeitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Digitale Erfassung und Speicherung von Daten auf Unternehmensebene ohne IT-System</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration von IT-Systemen (ERP, MES, CAD etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aktive Aufnahme und lokale Speicherung von Betriebsdaten auf allen Ebenen (Feldebene bis Unternehmensebene) durch Nutzung von Sensoren, IoT-Devices etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daten werden in einer Cloud verarbeitet und gespeichert (Cloud Computing)</li> <li>Identifikation von semantischen Verknüpfungen der Daten und Herausfiltern von Wissen (Big Data Analytics)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von KI zur Modellierung des DT</li> <li>Antizipation zukünftiger Daten durch KI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synchronisation des DT mit realen physikalischen Welt</li> <li>Autonome Entscheidungsfindung auf Grundlage der antizipierten Daten</li> </ul>

Abbildung 1-7: Entwicklungsstufen der Anwendungsebene „Daten“ im Werkzeugkasten „Allgemein“

- **Stufe 0** in der Anwendungsebene „Daten“ markiert den Ausgangspunkt, bei dem keine Technologien zur digitalen Datenerfassung und -verarbeitung eingesetzt werden. Dies bedeutet, dass Daten manuell erfasst und verarbeitet werden.
- **In Stufe 1** stellt eine erste Digitalisierungsebene dar, in der Daten digital erfasst und auf Unternehmensebene gespeichert werden, jedoch ohne den Einsatz von IT-Systemen.
- **In Stufe 2** werden IT-Systeme wie ERP, MES und CAD integriert, um den Datenfluss und die Verarbeitung zu optimieren.
- **In Stufe 3** erfolgt eine aktive Datenerfassung auf allen Ebenen, von der Feldebene bis zur Unternehmensleitung, unter Verwendung von Sensoren, IoT-Geräten und ähnlichen Technologien.
- **In Stufe 4** werden die Daten zentral gesammelt und eine übergreifenden Datenstruktur aufgebaut. Je nach Anforderungen werden die Daten an der Anlage oder extern verarbeitet. Hier werden auch semantische Verknüpfungen der Daten identifiziert und mithilfe von Big Data Analytics Wissen extrahiert.
- **In Stufe 5** können digitale Zwillinge modelliert und zukünftige Daten antizipiert werden. Hierbei besteht die Möglichkeit Methoden der Künstliche Intelligenz (KI) einzusetzen. Dies unterstützt eine proaktive Herangehensweise an die Datenanalyse.
- **Stufe 6** repräsentiert die höchste Entwicklungsstufe, bei der ein digitaler Zwilling mit der realen physikalischen Welt synchronisiert wird. Hier können mithilfe von KI-Methoden autonome Entscheidungen auf Grundlage der antizipierten Daten getroffen werden, um, aufgrund der hohen Reaktionsfähigkeit, beispielsweise Ausschussraten zu reduzieren.

# Anwendungsebene „Aktorik/ Sensorik“ im Werkzeugkasten „Maschinen- und Anlagentechnik“

Diese Anwendungsebene verdeutlicht den Fortschritt in der Anwendung von Aktorik und Sensorik, angefangen bei der grundlegenden Überwachung bis hin zur autonomen Anpassung von Prozessen auf Grundlage von Echtzeitdaten und künstlicher Intelligenz (s. Abbildung 1-8).

Entwicklungsstufen						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Sensorik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensoren sind eingebaut</li> <li>Sensoren überwachen den Prozess und die Aktorik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensoren sind mit der Steuerung über Verkabelung verbunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensordaten werden lokal verarbeitet und gespeichert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensordaten werden verarbeitet und global (Cloud) gespeichert</li> <li>Sensordaten werden mittels KI untersucht und mit Produktqualität in Verbindung gesetzt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensoren haben Internetzugang.</li> <li>Sensordaten zu einem DT der Maschine zusammengesetzt</li> <li>Vorhersage der Produktqualität auf Grundlage von Sensordaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DT der Maschine kommuniziert mit DT des Produkts und sendet optimale Prozessparameter an Aktorik</li> <li>Aktorik wird dementsprechend autonom von Anlage angepasst</li> </ul>

Abbildung 1-8: Entwicklungsstufen der Anwendungsebene „Aktorik/Sensorik“ im Werkzeugkasten „Maschinen- und Anlagentechnik“

- In der Anwendungsebene „Aktorik-/ Sensorik“ beschreibt die **Stufe 0** den Ausgangspunkt, an dem keine Sensorik vorhanden ist und Prozesse ohne automatisierte Überwachung und Steuerung ablaufen.
- **In Stufe 1** zeigt eine erste Ebene der Aktorik-/ Sensorik-Anwendung, bei der Sensoren in den Prozess integriert sind und sowohl den Prozess als auch die Aktorik überwachen.
- **In Stufe 2** sind alle Sensoren über eine Verkabelung mit der Steuerung verbunden.
- **In Stufe 3** werden Sensordaten lokal verarbeitet und gespeichert.
- **In Stufe 4** führt eine Globalisierung der Aktorik-/ Sensorik-Ebene ein, indem Sensordaten zentral gespeichert werden. Zudem werden diese Daten mithilfe von KI-Methoden (WGP 2024) analysiert, um Zusammenhänge mit der Produktqualität herzustellen.
- **In Stufe 5** werden die Sensordaten zu einem digitalen Zwilling der Maschine zusammengesetzt, welche für eine Vorhersage der Produktqualität basierend auf diesen Daten genutzt werden kann.
- **Mit Stufe 6** wird die höchste Entwicklungsstufe erreicht, bei der der digitale Zwilling der Maschine mit dem digitalen Zwilling des Produkts kommuniziert und optimale Prozessparameter an die Aktorik sendet. Die Aktorik passt sich autonom an die Anforderungen der Anlage an, was zu einer effizienten und adaptiven Steuerung führt.

## 4. Workshop für Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion

Im Rahmen dieses Kapitels wird das Workshop-Konzept erläutert, um mithilfe der beschriebenen Werkzeugkästen Lösungen für die Umsetzung von Digitalisierung und Industrie 4.0 (nachfolgend „Projekt“ genannt) in der Batteriezellproduktion zu erarbeiten. Die einzelnen Phasen des Workshops werden im Folgenden beschrieben. Weiterhin werden der erforderliche Input und die Voraussetzungen für einen Workshop definiert. Ein zentrales Element sind hierbei die zuvor beschriebenen Werkzeugkästen.

### Voraussetzungen

Bevor die einzelnen Phasen innerhalb des Leitfadens durchlaufen werden können, müssen die folgenden Voraussetzungen erfüllt sein:

#### ■ Interdisziplinäres Team

Für die Anwendung des Leitfadens ist die Zusammenarbeit eines interdisziplinären Teams aus verschiedenen Bereichen erforderlich, wie z.B. der Produktion, der Technik, der IT, des Qualitätsmanagements und der Forschung. Jedes Teammitglied bringt sein spezifisches Fachwissen und seine Erfahrungen ein, um die verschiedenen Aspekte der Digitalisierung in der Batteriezellproduktion abzudecken.

#### ■ Branchenkenntnisse

Das Team sollte ein grundlegendes Verständnis der Batterieindustrie und ihrer spezifischen Anforderungen haben. Es sollte mit den aktuellen Herausforderungen, Technologien und Best Practices in der Batteriezellproduktion und Digitalisierung vertraut sein.

#### ■ Stakeholder-Einbindung

Es ist wichtig, relevante Stakeholder der Unternehmen in allen Schritten der Umsetzung einzubeziehen, wie z.B. OEMs, Zellhersteller, Maschinen- und Anlagenbauer sowie Vertreter von Forschungseinrichtungen. Ihre Perspektiven und Anforderungen können bei der Anwendung des Leitfadens berücksichtigt werden.

Diese Rahmenbedingungen sind entscheidend für den Projekterfolg und sollten zu Beginn des Projekts geprüft werden. Einen zentralen Aspekt bildet hierbei das Team, welches über ein grundlegendes Know-how (Branchenkenntnisse) verfügen sollte.

### Ablauf

Das Vorgehen gliedert sich in insgesamt sieben Phasen (s. Abbildung 1-9). Hierbei bilden die ersten fünf Phasen den inhaltlichen Hauptteil des Workshops. Die Umsetzung und Kontrollphase finden im Anschluss über einen längeren Zeitraum innerhalb des jeweiligen Unternehmens statt.



Abbildung 1-9: Aufbau des Leitfadens in verschiedenen Phasen

## Initialisierung

**Die Initialisierungsphase** (s. Abbildung 1-10) ist der erste Schritt bei der Anwendung des Leitfadens zur Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion. In dieser Phase steht das Ziel im Vordergrund, ein gemeinsames Verständnis im Team aufzubauen, die Herausforderungen zu identifizieren und die Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung zu schaffen. Einige Schlüsselaspekte, die hierfür besonders im Fokus stehen sollten sind beispielsweise:



Abbildung 1-10: Vier Handlungsschritte der Initialisierungsphase

**a. Einheitliches Verständnis im Team aufbauen:** Es ist entscheidend, dass alle Teammitglieder ein gemeinsames Verständnis von Industrie 4.0 und den Möglichkeiten der digitalen Transformation in der Batteriezellproduktion haben. In dieser Phase werden die Grundlagen von Industrie 4.0 erklärt und die Vorteile von Industrie 4.0-Lösungen für die Batteriezellproduktion erläutert.

**b. Marktanalyse und Überblick bestehender Lösungen:** Eine gründliche Marktanalyse ermöglicht es Unternehmen, sich über die aktuellen Trends und Entwicklungen in der Branche auf dem Laufenden zu halten. Der Leitfaden enthält einen Überblick über bestehende Industrie 4.0-Lösungen und Best Practices in der Batteriezellfertigung. Dies hilft Unternehmen, von den Erfahrungen anderer zu lernen und bewährte Lösungen in ihre eigenen Strategien einzubeziehen.

**c. Erwartungen der Stakeholder klären:** Es ist wichtig, die Erwartungen aller Stakeholder zu klären und ihre Bedürfnisse zu verstehen. Hierbei werden OEMs, Zellhersteller, Maschinen- und Anlagenbauer sowie Forschungseinrichtungen einbezogen. Der Leitfaden unterstützt Unternehmen bei der Identifizierung der Erwartungen und Anforderungen aller Beteiligten, um eine zielgerichtete Umsetzung der Digitalisierung zu ermöglichen.

**d. Verantwortlichkeiten und übergeordnetes Ziel definieren:** Im ersten Schritt werden die Verantwortlichkeiten innerhalb des Teams festgelegt und das übergeordnete Ziel der Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion für das jeweilige Unternehmen definiert. Es werden klare Rollen und Zuständigkeiten festgehalten, um sicherzustellen, dass alle Aspekte der Umsetzung abgedeckt sind und ein reibungsloser Projektablauf gewährleistet ist.

## Ist-Analyse

Um den Ist-Zustand eines Prozesses oder einer Prozesskette zu bestimmen, wird zunächst eine Reifegradbestimmung durchgeführt. Hierbei kommen die neu entwickelten Werkzeugkästen zum Einsatz. Diese ermöglichen es, sowohl den Reifegrad eines einzelnen Prozesses als auch einer gesamten Prozesskette zu untersuchen.

Die Einordnung des Ist-Zustands erfolgt anhand der vorliegenden Beschreibungen der verschiedenen Entwicklungsstufen innerhalb des Werkzeugkastens. Der zu untersuchende Anwendungsfall (Prozess oder Prozesskette) wird dabei mithilfe dieser Definitionen seiner jeweiligen Stufe zugeordnet. Dadurch wird eine grundsätzliche Analyse des aktuellen Zustands ermöglicht. Es ist von hoher Bedeutung, alle relevanten Perspektiven und Sichtweisen zu berücksichtigen, um das gesamte Fachwissen und die vorhandene Expertise einzubeziehen. Abbildung 1-11 veranschaulicht eine exemplarische Einordnung (grüne Kreise). Diese dient als Referenzpunkt für die weiteren Analysen und Maßnahmen, die ergriffen werden müssen, um den gewünschten Soll-Zustand zu erreichen. Sie liefern eine Grundlage für die Identifikation von Schwachstellen, die Planung von Verbesserungsmaßnahmen und die Entwicklung einer zielgerichteten Strategie und Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz und Qualität der Prozesse.

## Zieldefinition

Um klare Ziele zu definieren, ist es von entscheidender Bedeutung, eine definierte Unternehmensstrategie und im Idealfall konkrete Use-Cases zu haben. Eine solide Strategie ermöglicht es einem Unternehmen, jederzeit auf neue Herausforderungen und Gegebenheiten einzugehen. Gleichzeitig ist es hilfreich, zwischen kurz-, mittel- und langfristigen Zielen zu unterscheiden, um die Unternehmensstrategie entsprechend abbilden zu können. In diesem Zusammenhang erfolgt eine Einordnung bezüglich der Entwicklungsstufen innerhalb der einzelnen Anwendungsebenen (s. Abbildung 1-11). Durch die Beschreibungen der verschiedenen Entwicklungsstufen ist es möglich, gezielt die passende Stufe für die spezifischen Unternehmensanforderungen zu definieren und erforderliche Ressourcen einschätzen zu können. Es ist nicht immer erforderlich, alle Anwendungsebenen gleichermaßen zu berücksichtigen oder sich intensiv mit ihnen auseinanderzusetzen. Die einzelnen Anwendungsebenen können also unabhängig voneinander betrachtet werden.

		Anwendungsebenen	Entwicklungsstufen							
			Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6	
Werkzeugkästen	Allgemein	Daten								
		Produkt								
		Unternehmensnetzwerk								
		Umgebung								
	Prozesstechnik	Prozessautomatisierung								
		Prozessmonitoring								
	Planung, Steuerung und Logistik	Produktionsplanung								
		Transport/Materialfluss								
		Lager								
	Maschinen- und Anlagentechnik	Kommunikation								
		Aktorik/Sensorik								
		Instandhaltung								
	Qualitätsmanagement	Qualitätssicherung								
		Rohmaterial (Eingangsprüfung)								
		Batteriezelle (Ausgangsprüfung)								

: Ist-Zustand  
 : Ziel-Zustand

Abbildung 1-11: Analyse des Ist-Zustands (grün) und des Ziel-Zustands (schwarz) in den Werkzeugkästen

Es ist wichtig zu beachten, dass die Stufe 6 nicht immer die anzustrebende Stufe ist. Kosten und Nutzen müssen abgewogen werden, um eine realistische Einschätzung der Ziele zu erhalten. Es muss situationsbedingt abgeschätzt werden, wie eine angemessene Balance zwischen den Zielen und den damit verbundenen Ressourcen gefunden werden kann. Weiterhin ist wichtig zu verstehen, dass Ziele dynamisch sind. Sie können jederzeit angepasst, verändert oder auch mit dem aktuellen Ist-Zustand verglichen werden. Unternehmen sollten ihre Ziele regelmäßig überprüfen und anpassen, um den sich verändernden Anforderungen und Gegebenheiten gerecht zu werden. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung der Unternehmensleistung.

## Kreativitätsphase

Zur Erreichung des jeweiligen Ziel-Zustands wird die sogenannte „Galerie-Methode“ vorgeschlagen. Die Galeriemethode konzentriert sich auf die Förderung von Kreativität. Bei dieser Methode können verschiedene Arten von Ideen ausgestellt werden, um den Teilnehmern eine inspirierende Umgebung zu bieten. Die Galeriemethode schafft eine Atmosphäre, in der die Teilnehmer ihre kreativen Fähigkeiten entfalten können. Statt einfach nur Informationen zu konsumieren, werden sie ermutigt, ihre eigenen Ideen zu entwickeln und auszudrücken. Dies kann durch verschiedene Formen der Präsentation erfolgen, sei es durch visuelle Darstellungen, Texte, Skizzen, Modelle oder andere kreative Ausdrucksformen.

Zusätzlich haben die Teilnehmer die Möglichkeit, Feedback und Anregungen von Anderen zu erhalten, was zu einer weiteren Verbesserung und Entwicklung ihrer kreativen Fähigkeiten führen kann. Dadurch können verschiedene Perspektiven betrachtet und alternative Lösungsansätze gefunden werden.

Der Ablauf der Galeriemethode besteht typischerweise aus mehreren Schritten, die dazu dienen, eine interaktive und kreative Lernerfahrung zu ermöglichen:

**a. Vorbereitung und Einführung** Zunächst wird die Galerieumgebung vorbereitet. Zu Beginn der Galeriemethode erfolgt eine Einführung in das Thema bzw. in die Problemstellung. Der Moderator oder Lehrer erklärt den Zweck der Methode und stellt dabei die Herausforderungen vor. Dabei können Fragen gestellt werden, um das Interesse der Teilnehmer zu wecken und ihre Gedanken anzuregen.

### **b. Individuelle Beobachtung bzw. Ideenbildungsphase 1**

Die Teilnehmer werden aufgefordert, sich Zeit zu nehmen, um die präsentierten Inhalte und Problemstellungen individuell zu betrachten und zu analysieren. Sie können Notizen machen, ihre Gedanken sammeln oder Fragen formulieren. Erste Ideen, Lösungen oder Konzepte sollen skizziert und für die „Galerie“ vorbereitet werden, um diese im nächsten Schritt vorzustellen. Dieser Schritt ermöglicht es den Teilnehmern, zusätzliche Eindrücke zu sammeln und sich auf die Inhalte zu konzentrieren.

### **c. Gruppendiskussion bzw. Assoziationsphase**

Nach der individuellen Beobachtungsphase kommen die Teilnehmer zusammen, um ihre Gedanken, Reaktionen und Fragen in einer Gruppendiskussion auszutauschen. Jeder Teilnehmer hat die Möglichkeit, seine Perspektiven zu teilen und auf die Beiträge anderer zu reagieren. Durch den Austausch von Ideen und Meinungen können verschiedene Standpunkte beleuchtet und ein breiteres Verständnis des Themas erreicht werden.

### **d. Ideenbildungsphase 2**

Die Teilnehmer werden ermutigt, über die diskutierten Inhalte und die Gruppendiskussion nachzudenken. Sie können die eigenen Erkenntnisse und Einsichten reflektieren und mögliche Auswirkungen oder Anwendungen auf die eigenen Ideen analysieren und festhalten.

### **e. Auswertungsphase**

Am Ende der Galeriemethode erfolgt eine Zusammenfassung. Die Teilnehmer haben die Möglichkeit, ihre wichtigsten Erkenntnisse zu teilen, offene Fragen zu diskutieren oder abschließende Gedanken zu äußern. Ein Moderator kann die Diskussion zusammenfassen und die Hauptpunkte nochmals hervorheben.

### **f. Auswahlphase**

Zum Abschluss werden die erfolgversprechendsten Ansätze ausgewählt.

Der genaue Ablauf der Galeriemethode kann je nach Anwendungsbereich und Zielsetzung variieren. Die Methode bietet jedoch stets eine interaktive und engagierte Lernerfahrung.

## Bewertung und Priorisierung

Aus der Kreativitätsphase resultieren zumeist mehrere Konzepte, um die jeweilige Zielstufe zu erreichen. Aufgrund begrenzter Ressourcen der Unternehmen ist zu entscheiden, welche der Konzepte implementiert werden sollen. Zur Entscheidungsfindung wird ein zweistufiges Vorgehen durchgeführt:

### a. Beschreibung und multikriterielle Bewertung der Einzelkonzepte

Als Bewertungsgrundlage und zur besseren Vergleichbarkeit werden alle erarbeiteten Konzepte im einheitlichen Format des Projektsteckbriefs beschrieben (s. Abbildung 1-12): Die Ausgangssituation, die Idee und das angestrebte Ziel werden in knappen Worten formuliert.

Anschließend erfolgt eine multikriterielle Bewertung. Diese umfasst die Chancen, die durch das Digitalisierungskonzept genutzt werden können, und die Risiken, die es birgt. Weiterhin wird eine monetäre Bewertung der notwendigen Ressourcen zur Umsetzung vorgenommen. Auch nicht-monetäre Vorteile und die Auswirkungen auf bestehende unternehmensspezifische Key Performance Indicators (KPIs) werden festgehalten. Abhängig vom konkreten Unternehmenskontext können weitere Bewertungskriterien hinzugefügt werden.

Weiterhin werden die Voraussetzungen zur Implementierung betrachtet, z.B. der notwendige Personalaufwand oder bauliche Gegebenheiten. Eine Abschätzung der jeweiligen Projektdauer sowie die bestehenden Schnittstellen innerhalb und außerhalb des Unternehmens runden die Bewertung der Einzelideen ab. Auch wird festgehalten, welche Faktoren gegeben sein müssen, um das Projekt erfolgreich durchführen zu können.

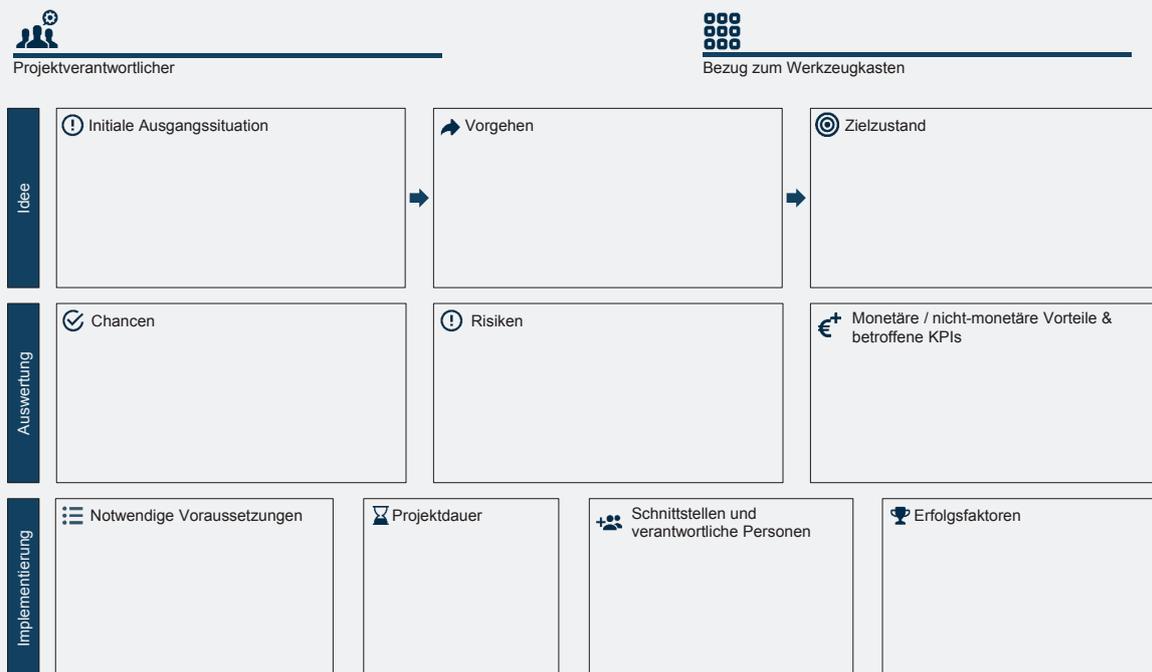


Abbildung 1-12: Projektsteckbrief zur einheitlichen Beschreibung der Konzepte

### b. Priorisierung

Ziel ist es diejenigen Digitalisierungskonzepte umzusetzen, welche ein hohes Marktpotential bzw. hohen Kundennutzen oder Potential zur Kosteneinsparung aufweisen und gleichzeitig einen geringen Ressourceneinsatz zur Umsetzung erfordern. Zur Visualisierung wird ein x-y-Diagramm, ähnlich der sogenannten „BCG-Matrix“ (Boston Consulting Group 2024), eingesetzt (s. Abbildung 1-13).

Auf der y-Achse werden Marktpotential, Kundennutzen oder Kosteneinsparpotential eingetragen, während die x-Achse die einzusetzenden Ressourcen abbildet. Die Bewertung dieser Kriterien kann alternativ zu einer Experten-basierten quantitativen Bewertung beispielsweise mittels Punktebewertung in einem Workshop-Team erfolgen. Diejenigen Konzepte, die sich möglichst weit rechts oben befinden, sollten zur Umsetzung priorisiert werden.

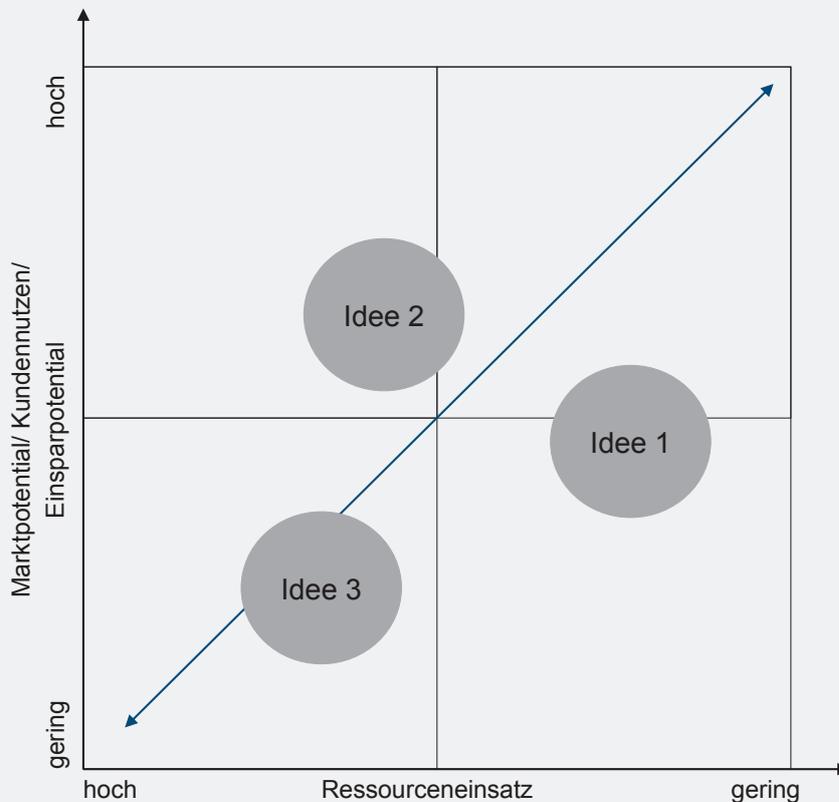


Abbildung 1-13: Bewertungsmatrix zur Priorisierung, angelehnt an BCG-Matrix

## Implementierung

Die erfolgreiche Implementierung von Industrie 4.0 in einem Unternehmen erfordert eine gezielte Umsetzung der entwickelten Ideen, Maßnahmen und Konzepte. Um die Umsetzung effektiv zu unterstützen, ist es notwendig, aus den entwickelten Konzepten gezielte Projekte abzuleiten. Diese Projekte dienen als Fahrplan für die Implementierung und ermöglichen es, die verschiedenen Schritte klar zu definieren und potenzielle Hindernisse frühzeitig zu identifizieren und zu überwinden. Sie bieten somit eine strukturierte Vorgehensweise, um die Ziele der Industrie 4.0-Integration zu erreichen. Hierbei arbeiten Experten aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen zusammen, um die Ideen bereichsübergreifend zu koordinieren, zu planen und zu realisieren.

Beispielsweise werden durch die Einführung von neuen Technologien in Unternehmensprozesse oftmals gesamte Abläufe in der Produktion geändert. Dies beinhaltet häufig auch Änderungen in den Anforderungen an Mitarbeitende in Unternehmen bspw. hinsichtlich neuer Arbeitsformen, neuer Systeme oder der Zunahme von Mensch-Maschinen-Kooperationen. Neben der konkreten Auswahl, Planung und der Implementierung der Industrie 4.0-Lösungen muss daher auch ein passendes Change-Management eingesetzt werden. Dies ist notwendig, um die Akzeptanz für die mit der Implementierung der Industrie 4.0-Technologien einhergehenden Veränderungen zu stärken und sicherzustellen. Besonders hervorzuheben sind hierbei eine entsprechende Mitarbeiterbindung und -kommunikation sowie eine unternehmensweite Strategie, die die Veränderungen beinhaltet.

## Kontrollphase

Die Kontrollphase (s. Abbildung 1-14) bildet den Abschluss des Leitfadens und dient der Überprüfung des Fortschritts und der Qualität der Umsetzung der Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion.

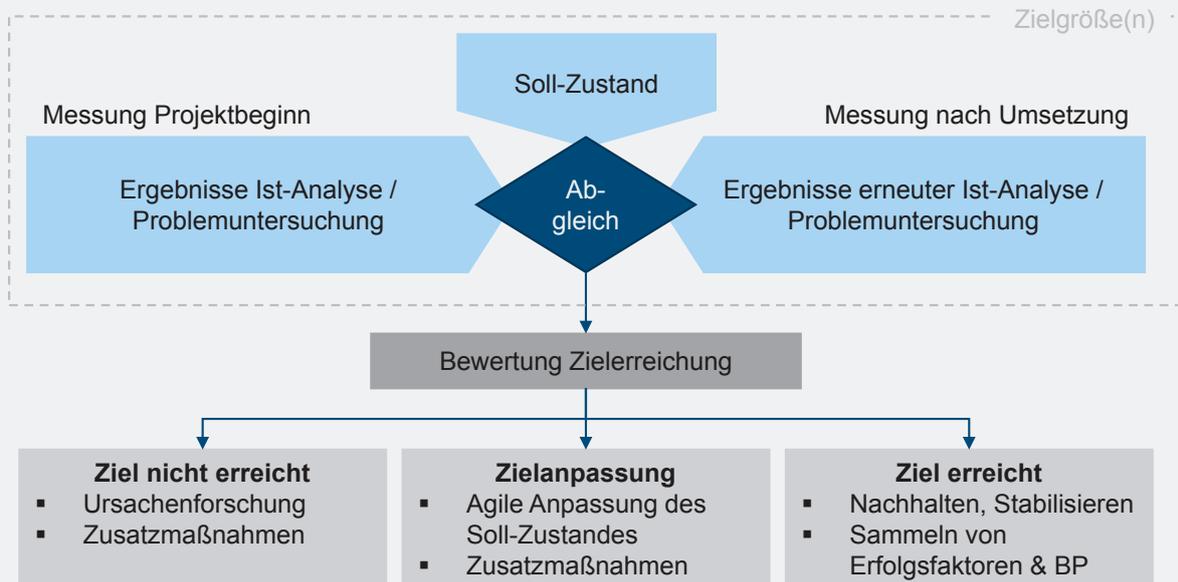


Abbildung 1-14: Ablauf der Kontrollphase

In dieser Phase werden folgende Punkte behandelt:

- **Lessons Learned:** In der Kontrollphase werden die Erfahrungen und Erkenntnisse („Lessons Learned“) aus dem Implementierungsprozess reflektiert. Es werden Verbesserungspotenziale identifiziert und schriftlich dokumentiert, um zukünftige Herausforderungen besser bewältigen zu können.
- **Bewertung der Zielerreichung:** Die festgelegten Ziele und KPIs werden analysiert, um festzustellen, inwieweit sie erreicht wurden. Eventuelle Abweichungen werden identifiziert und Lösungsansätze entwickelt.
- **Abgleich ca. drei Monate nach Implementierung:** Um die langfristige Wirkung der Digitalisierung zu bewerten, wird ein Abgleich etwa drei Monate nach der Implementierung durchgeführt. Es werden die Ergebnisse und Auswirkungen der digitalen Lösungen auf die Batteriezellproduktion überprüft und mögliche Anpassungen oder Optimierungen vorgenommen.

Die Kontrollphase ermöglicht es Unternehmen, den Erfolg der digitalen Transformation zu bewerten und sicherzustellen, dass die gewünschten Ergebnisse erzielt wurden. Durch die regelmäßige Überprüfung und Anpassung können Unternehmen kontinuierlich von den Vorteilen der Industrie 4.0 profitieren und ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern.

## 5. Best Practices

Nach der ausführlichen Vorstellung des Workshop-Konzepts werden im Folgenden beispielhafte Handlungs- und Anwendungsempfehlungen auf Basis der gezeigten Werkzeugkästen abgeleitet. Diese Handlungsempfehlungen dienen dabei als Best Practices zur Digitalisierung in der Batteriezellproduktion und wurden direkt aus den InZePro-Projekten erarbeitet. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass ein Anwendungsbeispiel teilweise mehrere Anwendungsebenen einschließen kann. Zur besseren Übersicht, wird nachfolgend pro Projekt und Beispiel nur eine Anwendungsebene ausgeführt.

### Best-Practice: Pulvermateriallagerung im Projekt „InMiTro“

**Beschreibung des Gesamtprojekts:** Die Qualitätssicherung in den Prozessen der Wareneingangskontrolle der Rohmaterialien, des Mischens und Trocknens basiert aktuell auf empirischem Wissen. Die Einflüsse der Atmosphäre, unter der die Materialien und Zwischenprodukte gelagert werden, sowie des Mischens und Trocknens auf die Produktqualität können erst nach dem Abschluss der gesamten Prozesskette abgeschätzt werden. Dies ist einerseits auf fehlende Analysemethoden, andererseits auf unbekannte Wechselwirkungen zurückzuführen. Die Absicherung dieser Lagerungs-, Misch- und Trocknungsprozesse führt in der Industrie zu einem hohem Kosten- und Energieaufwand.

Im Projekt „Intelligentes Mischen und Trocknen – InMiTro“ wurden Inline-Messmethoden und Anlagentechnik untersucht, um ein vertieftes Verständnis über den Einfluss der Atmosphäre bei der Pulverhandhabung, des Mischens und des Trocknens zu generieren.

#### Best Practice-Beispiel: Quality Gate für Pulver-Rohmaterialien

##### ■ **Initiale Ausgangssituation vor Projektdurchführung:**

Es ist nicht ausreichend quantitativ untersucht, wie sich die Atmosphäre, in der Pulvermaterialien gelagert werden auf die Qualität der Zwischenprodukte in den Produktionsprozessen bzw. der finalen Zelle auswirkt. Exakte Grenzwerte für die zulässige Feuchtigkeit sind materialspezifisch und größtenteils unbekannt. Um sicherzugehen, dass jeglicher Luftfeuchtigkeitseintrag vermieden wird, werden in der Industrie hochkonditionierte Atmosphären vorausgesetzt, z. B. die Lagerung im Trockenraum oder unter Schutzgasatmosphäre. Als Konsequenz werden Pulvermaterialien, die Feuchtigkeit exponiert waren (z.B. an der Schnittstelle „Wareneingang“), pauschal als ungeeignet für die Weiterverarbeitung (Ausschuss) klassifiziert. Expositionen werden bei Stichprobenprüfungen zur Materialcharakterisierung festgestellt, welche manuell bedient und lokal gespeichert werden (s. Abbildung 1-15).

##### ■ **Vorgehen und Zielzustand:**

Im Projekt „InMiTro“ erfolgten experimentelle Untersuchungen der Pulvermaterialien in Form von Lagerversuchen, um Wissen über die Auswirkung der Atmosphäre auf die Zwischenprodukte von Batteriezellen zu generieren („Umgebung – Produkt/Material-Schnittstelle“). Mithilfe dieser Erkenntnisse können gezielt Anforderungen an die tatsächlich erforderliche Prozessatmosphäre für die Pulver abgeleitet und Lagerumgebungen entsprechend ausgelegt werden. Dieses Wissen soll in digitaler Form in einem Softwaretool gebündelt werden, um dem Anwender eine automatisierte datenbasierte Entscheidungsfindung zu ermöglichen. Nur Rohmaterialien, die die festgelegten Anforderungen erfüllen, können diesen Punkt der Qualitätskontrolle, ein sogenanntes „Quality Gate“, passieren und weiterverarbeitet werden (s. Abbildung 1-15).

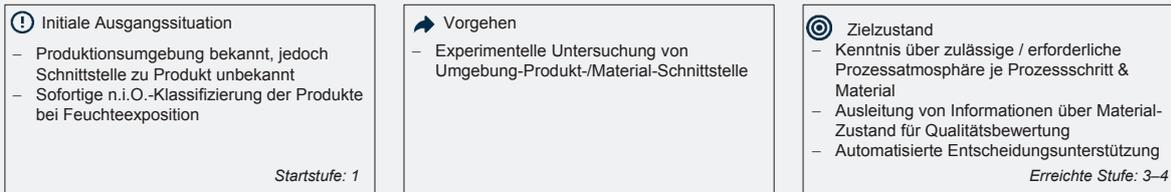


Abbildung 1-15: Beschreibung der Best Practice-Beispiels „Quality Gate für Pulver-Rohmaterialien“ im Projektsteckbrief (Workshop-Ergebnis)

## ■ Einordnung des Best-Practice-Beispiels in den Werkzeugkasten:

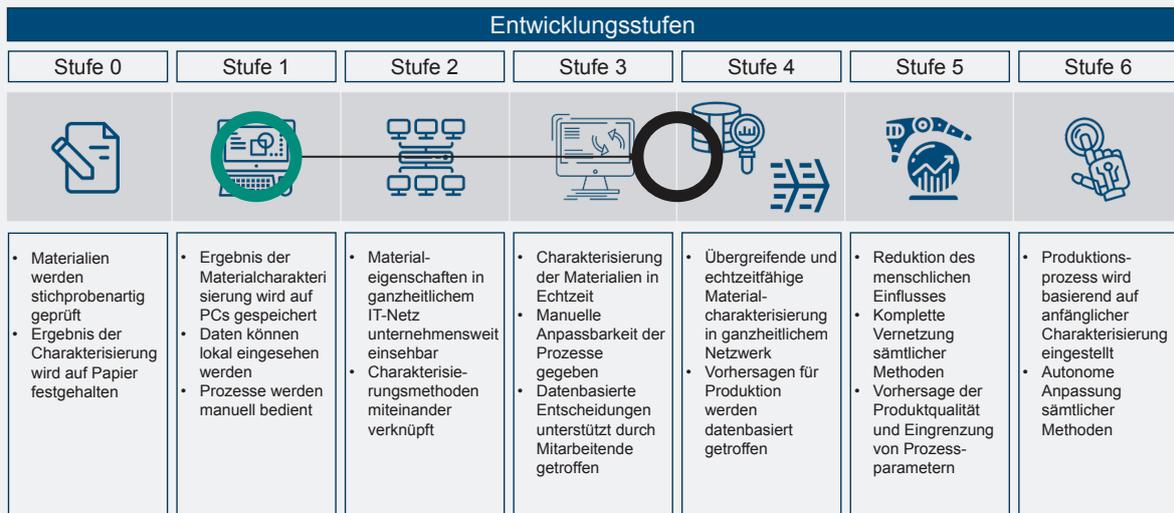


Abbildung 1-16: Einordnung in die Anwendungsebene „Rohmaterial (Eingangsprüfung)“ des Werkzeugkastens „Qualitätsmanagement“. Entwicklung von Stufe 1 zu Stufe 3-4 innerhalb des Projekts angestrebt.

Weitere Projektergebnisse sind in den Publikationen von Lechner et al. (2023), Heckmann et al. (2024) und Lechner et al. (2024) beschrieben.

## Best-Practice: Automatisierte OPC UA-Anbindung im Projekt „GranuProd“

**Beschreibung des Gesamtprojekts:** In der herkömmlichen Produktion von Elektroden weißt die Elektrodenslurry bei der Beschichtung einen hohen Lösemittelanteil auf, welcher im anschließenden Trocknungsprozess wieder ausgetrocknet werden muss. Dies verursacht hohe Energiekosten und kann Inhomogenitäten in der Elektrode durch Bindermigration hervorrufen. Das granulatbasierte Beschichten hingegen integriert die Schritte Beschichten, Trocknen und Verdichten in einer einzigen Anlage, was sowohl Investitions- als auch Betriebskosten erheblich reduziert. Eine Verringerung des Lösemittelanteils auf 10-25 Gew.-% sorgt für niedrigere Trocknungskosten und reduziert gleichzeitig den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, was die Umweltfreundlichkeit der Produktion steigert. Der verbleibende geringe Lösemittelanteil erleichtert die Kaltextrusion und ermöglicht eine präzisere Steuerung der Porenstruktur während der Trocknung. Im Gegensatz zu traditionellen Verfahren werden energieeffizient hergestellte Granulate eingesetzt, die über Wochen lagerfähig bleiben. Diese Entkopplung von Materialherstellung und Produktion schafft größere Flexibilität. So lässt sich die Produktion besser an variable Auftragslagen und unterschiedliche Produkthanforderungen anpassen. Gleichzeitig wird eine vollständige Trennung der Material- und Elektrodenherstellung erreicht.

Im Projekt „Granulatbasierte Einschrittelektrodenproduktion – GranuProd“ wurden die Anlagentechnik sowie intelligente Regelungsstrategien für die „Granulatbasierte Einschrittelektrodenproduktion“ geschaffen.

## Best Practice-Beispiel: Automatisierte OPC UA-Anbindung

### ■ Initiale Ausgangssituation vor Projektdurchführung:

Die Implementierung von Daten in beispielsweise ein Digital Warehouse erfordert oftmals den Einsatz von Standards wie OPC UA (Open Plattform Communications Unified Architecture). Viele Anlagen sind bereits OPC UA-fähig, jedoch fehlen häufig die erforderlichen Schnittstellen, um die Daten über OPC UA abzurufen. Die Überwindung von Schnittstellenproblemen ist entscheidend, um die Effizienz und die Leistungsfähigkeit von Systemen zu gewährleisten, die auf OPC UA zur Datenintegration setzen (s. Abbildung 1-17).

### ■ Vorgehen und Zielzustand:

In diesem Anwendungsfall im GranuProd-Projekt wurde die Schnittstelle erfolgreich mithilfe eines Python-Skripts angesteuert. Dies ermöglichte es, die Parameter der Anlage oder des Produkts automatisch über OPC UA abzurufen. Durch die Anwendung des Skripts wurde eine effiziente Datenschnittstelle mit integrierter Aufbereitung erreicht, die es erlaubt, relevante Informationen über die OPC UA-Schnittstelle zu extrahieren. Dieser Ansatz erleichtert nicht nur den Zugriff auf die Daten, sondern ermöglicht auch eine präzise Steuerung und Überwachung der Anlagen- oder Produktparameter (s. Abbildung 1-17).

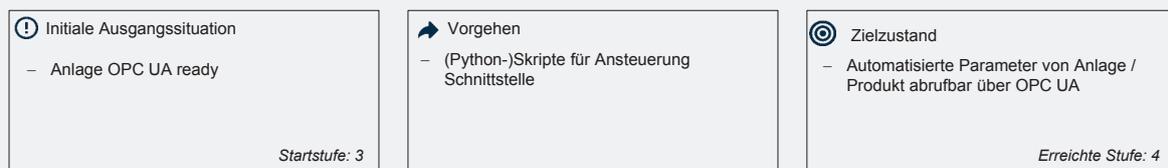


Abbildung 1-17: Beschreibung der Best Practice-Beispiels „Automatisierte OPC UA-Anbindung“ im Projektsteckbrief (Workshop-Ergebnis)

### ■ Einordnung des Best-Practice-Beispiels in den Werkzeugkasten:

		Entwicklungsstufen						
		Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
Maschine-Maschine		• Keine Vernetzung	• Vernetzung über Verdrahtung	• Vernetzung über Feldbus	• Vernetzung über Ethernet	• OPC UA als Kommunikationsstandard auf IT-Ebene / Standard-Ethernet Protokoll auf OT-Ebene	• Ebenübergreifende Vernetzung über TSN	• Ebenübergreifende Vernetzung über wireless 5G
Mensch-Maschine		• Kein Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine	• Kommunikation von I/O-Signalen	• Feldbus-Protokoll als Kommunikationsstandard	• Standard-Ethernet Protokolle als Kommunikationsstandard	• Einsatz mobiler Anzeigeegeräte	• OPC UA als ebenengreifender Kommunikationsstandard	• OPC UA als Kommunikationsstandard in der Cloud
			• Bedienpult mit lokaler Anzeige	• Sprach- und Gestensteuerung	• Zentrale und dezentrale Überwachung- und Steuerung der Maschine		• Individuelle Benutzeroberfläche mit individueller Informationsbereitstellung	• Augmented und Virtual Reality

Abbildung 1-18: Einordnung in die Anwendungsebene „Kommunikation (Maschine-Maschine)“ des Werkzeugkastens „Maschinen- und Anlagentechnik“. Entwicklung von Stufe 3 zu Stufe 4 innerhalb des Projekts angestrebt

Weitere Projektergebnisse sind in den Publikationen Leeb et al. (2023), Wiegmann et al. (2023a) und Wiegmann et al. (2023b) beschrieben.

# Best-Practice: KI-gestütztes Prozessoptimierungssystem im Projekt „ViPro“

**Beschreibung des Gesamtprojekts:** Der Aufbau eines virtuellen Abbilds einer Batteriezellfertigung ist motiviert durch das Ziel, komplexe Ursache-Wirkung-Zusammenhänge zu quantifizieren und über dieses Verständnis eine Steigerung der Produktivität sowie einen effizienteren Maschinen- und Anlagenbetrieb zu erzielen. In einem virtuellen Produktionssystem (VPS) können Optimierungsansätze im virtuellen Raum realitätsnah und risikoarm erprobt werden. Erweisen sich die entwickelten Lösungen als robust, kann anschließend die Umsetzung in den realen Prozessen, Maschinen und Anlagen erfolgen.

Ziel des Projekts „Entwicklung virtueller Produktionssysteme in der Batteriezellfertigung zur prozessübergreifenden Produktionssteuerung – ViPro“ war der Aufbau eines virtuellen Produktionssystems auf Basis standardisierter Modelle und die Erschließung standortübergreifender Datenpools entlang der Prozesskette einer beispielhaften Batteriezellfertigung.

## Best Practice-Beispiel: KI-gestütztes Prozessoptimierungssystem

### ■ Initiale Ausgangssituation vor Projektdurchführung:

Nach aktuellem Stand der Technik sind die Prozesse der Batteriezellfertigung größtenteils unabhängig voneinander. Dies bedeutet, dass die Prozesse zwar automatisiert ihre jeweilige Aufgabe durchführen, hierbei allerdings eine individuelle Bedienung der Prozesse unabdingbar ist. Zusätzlich ist eine übergreifende Steuerung der Prozesse bislang nicht vorhanden. Dies liegt daran, dass die Prozess-Produkt-Wirkbeziehungen entlang der Prozesskette bislang unzureichend bestimmt wurden. Es ist somit nicht möglich, bspw. die Auswirkungen etwaiger Beschichtungsfehler auf die Elektrolytbefüllung vorherzusagen. Stattdessen werden mögliche Fehler zumeist erst in der Formierung bzw. dem EOL-Test erkannt (s. Abbildung 1-19).

### ■ Vorgehen und Zielzustand:

Im Projekt erfolgten experimentelle Untersuchungen der betrachteten Prozesse, um die prozessübergreifenden Parameter zu bestimmen. Mithilfe der Ergebnisse konnten gezielt Datenströme beschrieben und abgestimmte Interfaces aufgebaut werden. Abschließend wurde das Wissen bezüglich der Prozess-Produkt-Wirkbeziehung mit den Datenströmen gekoppelt und in einer digitalen Umgebung zusammengeführt. Dadurch konnte ein KI-basierte prozessübergreifende Steuerung aufgebaut und umgesetzt werden (s. Abbildung 1-19).

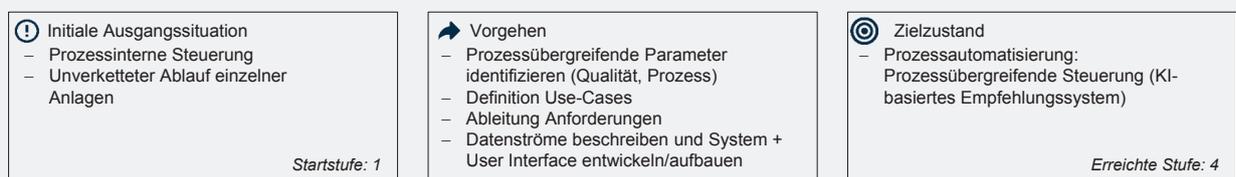


Abbildung 1-19: Beschreibung der Best Practice-Beispiele „KI-gestütztes Prozessoptimierungssystem“ im Projektsteckbrief (Workshop-Ergebnis)

## ■ Einordnung des Best-Practice-Beispiels in den Werkzeugkasten:

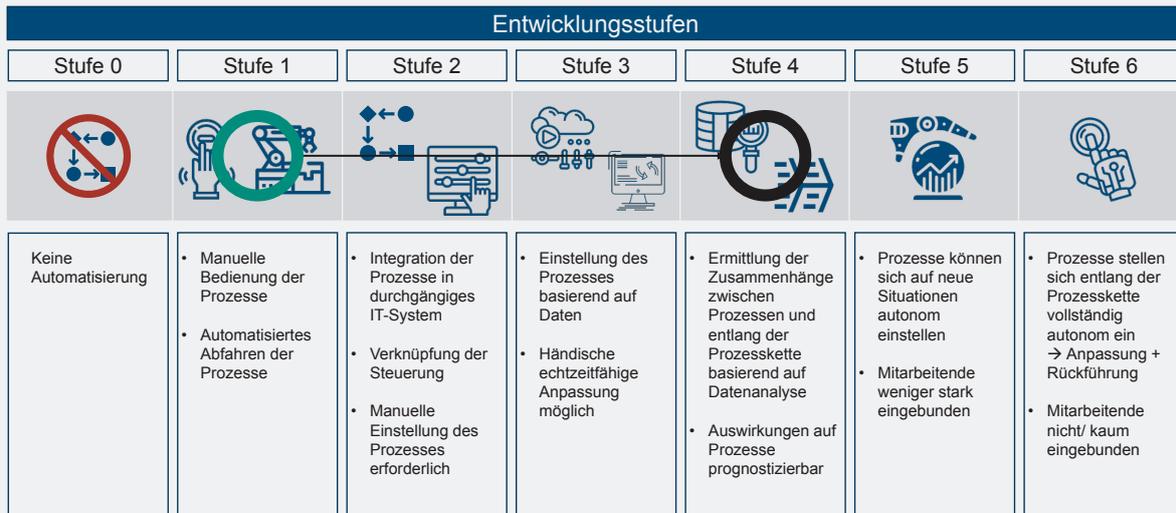


Abbildung 1-20: Einordnung in die Anwendungsebene „Prozessautomatisierung“ des Werkzeugkastens „Prozesstechnik“. Entwicklung von Stufe 1 zu Stufe 4 innerhalb des Projekts angestrebt.

Weitere Projektergebnisse sind in den Publikationen Kaden et al. (2024), Mayr et al. (2022) und Kößler et al. (2024) beschrieben.

## Best-Practice: KI-basierte Qualitätsvorhersage im Projekt „TrackBatt“

Beschreibung des Gesamtprojekts: Ziel des Forschungsprojekts „TrackBatt“ war die Entwicklung und prototypische Umsetzung eines Ansatzes zur lückenlosen Rückverfolgung („Tracking und Tracing“, kurz T&T) der Prozess- und Produktdaten in der Batteriezellproduktion über die Prozesskette hinweg. Hiermit sollte ermöglicht werden, die Performance und potenzielle Schadensbilder hergestellter Batteriezellen eindeutig auf Produktionsprozesse und -parameter zurückzuführen. Die wesentlichen Aspekte bei der Implementierung eines T&T-Systems sind die Auswahl der geeigneten Markierungstechnologie und der markierten Objekte bzw. Zwischenprodukte entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Weiterhin sind die Übertragung der Informationen von kontinuierlichen auf diskrete Fertigungsprozesse und die Bestimmung der optimalen Granularität der rückverfolgbaren Informationen essenziell. Für eine eindeutige Rückverfolgung der Prozess- und Produktdaten wurde im Rahmen des Projekts eine Ontologie-basierte Datenstruktur für den digitalen Zwilling sämtlicher Materialien, Zwischenprodukte und Zwischenstruktureigenschaften bis zur finalen Batteriezelle entwickelt.

Durch die lückenlose Rückverfolgbarkeit ermöglichte das Projekt eine hohe Datengranularität. Im Sinne eines digitalen Zwillings bildete das T&T-System die Grundlage für eine umfassende Datenzuordnung und bot die Möglichkeit, die Transparenz zu erhöhen, Prozessschritte zu optimieren und den Ausschuss unmittelbar am Ort der Entstehung zu reduzieren.

### Best Practice-Beispiel: KI-basierte Qualitätsvorhersage

#### ■ Initiale Ausgangssituation vor Projektdurchführung:

Die Ausgangssituation für das „TrackBatt“ Projekt ist durch den Mangel an digitalen Technologien und einer unzureichenden Quantifizierung der Wechselwirkungen der Produktionsprozesse miteinander gekennzeichnet. Dies führt zu einem Defizit an Wissen bezüglich der prozesskettenübergreifenden Rück-

verfolgbarkeit sowie der Charakterisierung und Identifikation von Zwischenprodukten. Die Abwesenheit von digitalen Lösungen erschwert die Überwachung und Steuerung der Produktionsabläufe erheblich. Das Projekt setzt sich daher das Ziel, diese Defizite zu beheben und eine effiziente, transparente und präzise Rückverfolgbarkeit in der gesamten Prozesskette zu ermöglichen. Durch die Integration digitaler Technologien sollen Zwischenprodukte charakterisiert, identifiziert und Wechselwirkungen innerhalb der Produktion quantifiziert werden, um so eine verbesserte Kontrolle und Optimierung der Abläufe zu ermöglichen (s. Abbildung 1-21).

### ■ Vorgehen und Zielzustand:

Es erfolgte eine umfassende Datengenerierung und -sammlung während des Produktionsprozesses. Ein besonderer Fokus lag auf der Visualisierung der Zusammenhänge auf Elektrodenblattebene, um ein detailliertes Verständnis der Abläufe zu gewährleisten. Hierbei wurden aufbereitete Prozessparameter und Produktparameter sorgfältig mit den Qualitätseigenschaften verknüpft, um eine ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen. Ein weiterer entscheidender Schritt bestand im Aufbau und Training eines KI-Modells zur Qualitätsvorhersage. Durch die Integration von KI konnten nicht nur komplexe Zusammenhänge erkannt, sondern auch präzise Prognosen bezüglich der Qualitätseigenschaften getroffen werden. Dies ermöglicht eine frühzeitige Identifikation potenzieller Qualitätsprobleme und erleichtert somit gezielte Maßnahmen zur Prozessoptimierung. Der Endzielzustand des Projekts besteht in der Prognose der Eigenschaften der Batteriezelle auf Basis der Zwischenprodukt-Eigenschaften (s. Abbildung 1-21). Das Projekt wurde an den Pilotanlagen des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb, TU München) und des Zentrums für Sonnenenergie- und Wasserstoffforschung (ZSW) durchgeführt.

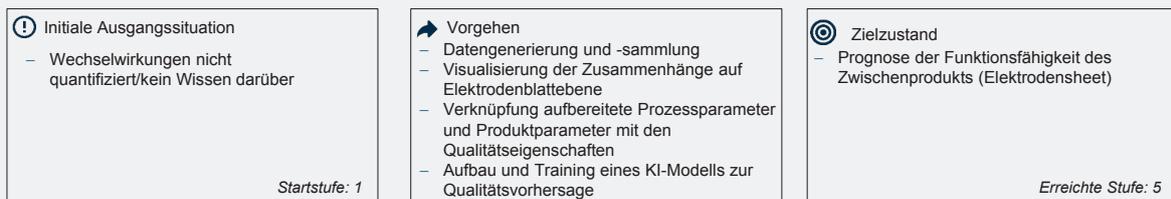


Abbildung 1-21: Beschreibung der Best Practice-Beispiels „KI-basierte Qualitätsvorhersage“ im Projektsteckbrief (Workshop-Ergebnis)

### ■ Einordnung des Best-Practice-Beispiels in den Werkzeugkasten:

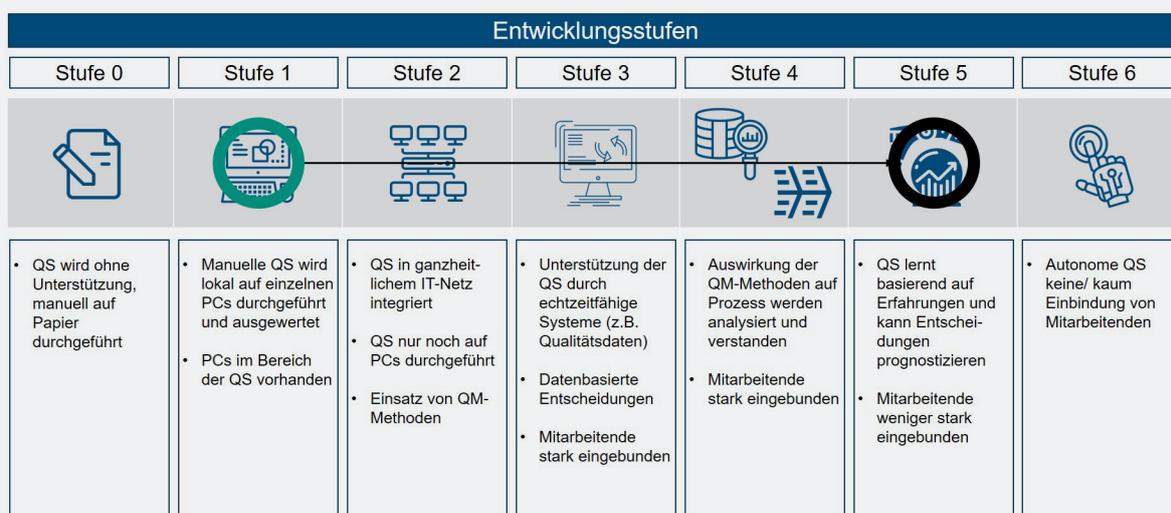


Abbildung 1-22: Einordnung in die Anwendungsebene „Qualitätssicherung“ des Werkzeugkastens „Qualitätsmanagement“. Entwicklung von Stufe 1 zu Stufe 5 innerhalb des Projekts angestrebt.

Weitere Projektergebnisse sind in den Publikationen Sommer et al. (2021), Haghi et al. (2021), Haghi et al. (2022), Grimmel et al. (2022), Schoo et al. (2023), Sommer et al. (2023b), Haghi et al. (2023c), Sommer et al. (2023a), Haghi et al. (2023a), Haghi et al. (2023b), Faraji Niri et al. (2023), Sommer et al. (2024b), Sommer et al. (2024a) und Haghi et al. (2024) beschrieben.

## Best-Practice: Sensorintegration im Projekt „InteKal“

Beschreibung des Gesamtprojekts: Um die volumetrische Energiedichte und damit die elektrische Leitfähigkeit einer LIB zu erhöhen, ist die Verdichtung der Elektroden ein entscheidender Faktor. Der damit verbundene Kalandrierprozess ist aufgrund langer Anfahrzeiten ein zeitintensiver Schritt mit hohen Ausschussraten. Daher erfordert dieser Produktionsschritt umfangreiche Analysen sowohl auf Produkt- als auch auf Maschinenebene. Durch die Vorhersage von Anlagen- und Maschinenparametern mit Hilfe von Simulationen sowie Inline-Messungen der Schichtdicke und Fehlererkennung soll die Maschine intelligent gesteuert werden, um Ausschuss zu reduzieren. #

Ziel des Forschungsprojektes „Intelligente Kalandrierung – InteKal“ war es, eine innovative und kostenoptimierte Inline-Messtechnik zu entwickeln. Dazu wurden Maschinen-/Prozessmodelle (Digitaler Zwilling, DT) eingesetzt, um den Ausschuss durch eine adaptive Prozesskontrolle, -regelung und -steuerung zu verringern.

### Best Practice-Beispiel: Integration von Inline-Messtechnik

#### ■ Initiale Ausgangssituation vor Projektdurchführung:

Der derzeitige Stand des Kalandrierprozesses zeigt, dass die Einstellungen überwiegend manuell vorgenommen werden. Den vorhandenen Systemen fehlt die Messtechnik zur Schichtdickenmessung und zur Erkennung von Fehlerbildern. Daher basieren die Einstellungen auf dem Domänenwissen des Maschinenbedieners, der entsprechende Korrekturen vornimmt. Diese manuellen Anpassungen sind notwendig, da die Parameter regelmäßig geändert werden müssen, wenn Anpassungen der Prozessbedingungen nötig sind (s. Abbildung 1-23).

#### ■ Vorgehen und Zielzustand:

Im Rahmen der Produktionsprozessoptimierung erfolgte eine umfassende Integration von Inline-Sensorik. Mittels Lasertriangulation wurden Fehlerbilder präzise identifiziert. Gleichzeitig wurden chromatische Konfokalsensoren zur Messung der Elektrodendicke eingesetzt. Durch die Definition aussagekräftiger Prozesskennzahlen wurde eine ganzheitliche Bewertung des Produktionsprozesses ermöglicht. Alle erfassten Daten wurden anschließend nahtlos in den digitalen Produktzwilling integriert, dies ermöglichte eine umfassende Analyse und gezielte Optimierung des Prozesses (s. Abbildung 1-23).

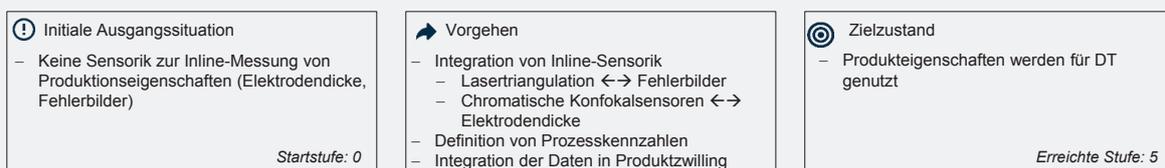


Abbildung 1-23: Beschreibung der Best Practice-Beispiels „Integration von Inline-Messtechnik“ im Projektsteckbrief (Workshop-Ergebnis)

## ■ Einordnung des Best-Practice-Beispiels in den Werkzeugkasten:

Entwicklungsstufen						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
Keine Sensorik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensoren sind eingebaut.</li> <li>• Sensoren überwachen den Prozess und die Aktorik.</li> </ul>	Sensoren sind mit der Steuerung über Verkabelung verbunden.	Sensordaten werden lokal verarbeitet und gespeichert.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensordaten werden verarbeitet und global (Cloud) gespeichert.</li> <li>• Sensordaten werden mittels KI untersucht und mit Produktqualität in Verbindung gesetzt.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sensoren haben Internetzugang.</li> <li>• Sensordaten zu einem DT der Maschine zusammengesetzt</li> <li>• Vorhersage der Produktqualität auf Grundlage von Sensordaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DT der Maschine kommuniziert mit DT des Produkts und sendet optimale Prozessparameter an Aktorik.</li> <li>• Aktorik wird dementsprechend autonom von Anlage angepasst.</li> </ul>

Abbildung 1-24: Einordnung in die Anwendungsebene „Aktorik/ Sensorik“ des Werkzeugkastens „Maschinen und Anlagentechnik“. Entwicklung von Stufe 0 zu Stufe 5 innerhalb des Projekts angestrebt.

Weitere Projektergebnisse sind in den Publikationen Kaden et al. (2024), Mayr et al. (2022) und Kößler et al. (2024) beschrieben.

## 6. Acknowledgement

Dieser Leitfaden basiert auf den Forschungsergebnissen des Projekts „Leitfaden zur Digitalisierung der Batteriezellenproduktion - BatterI4.0“ [03XP0300A-D]. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Kompetenzclusters „Intelligente Batteriezellproduktion – InZePro“ gefördert. Die Autoren dieser Publikation danken dem Ministerium für die Förderung.

# Allgemein

Daten						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein Einsatz von Technologien zur digitalen Datenerfassung und -verarbeitung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Digitale Erfassung und Speicherung von Daten auf Unternehmensebene ohne IT-System</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration von IT-Systemen (ERP, MES, CAD etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aktive Aufnahme und lokale Speicherung von Betriebsdaten auf allen Ebenen (Feldebene bis Unternehmensebene) durch Nutzung von Sensoren, IoT-Devices etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Daten werden in einer Cloud verarbeitet und gespeichert (Cloud Computing)</li> <li>Identifikation von semantischen Verknüpfungen der Daten und Herausfiltern von Wissen (Big Data Analytics)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von KI zur Modellierung des DT</li> <li>Antizipation zukünftiger Daten durch KI</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synchronisation des DT mit realen physikalischen Welt</li> <li>Autonome Entscheidungsfindung auf Grundlage der antizipierten Daten</li> </ul>

Produkt						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Funktionalität zur Datenspeicherung und dem Informationsaustausch am Produkt</li> <li>Produkt-/Materialeigenschaften werden gar nicht oder nur händisch auf Papier protokolliert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produkteigenschaften werden manuell in lokaler, digitaler Datenbank eingetragen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datenbanken zur Dokumentation der Produkteigenschaften sind in einem IT-System gebettet, Eintrag ist über eine Benutzeroberfläche gewährleistet (manuell)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Möglichkeit zur automatisierten Identifikation von Produkten und Rohstoffen (Barcode, QR-Code, RFID)</li> <li>Automatisiertes Befüllen der Datenbank</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produkt besitzt passiven Datenspeicher (RFID)</li> <li>Produkt sendet / empfängt Signale</li> <li>Semantische Verknüpfung der Produkt- und Prozessdaten</li> <li>Erfassung des Produktzustands</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von KI zur Modellierung eines DT des Produkts</li> <li>Prognose der Funktionsfähigkeit des Produkts</li> <li>Autonomer Informationsaustausch zwischen Produkt und Anlage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produkt hat Zugriff zum Internet und Cloud-Diensten</li> <li>Produkt reagiert auf Prognose und fordert selbständig Anpassungsmaßnahmen der Prozessparameter bei Anlage ein</li> </ul>

Unternehmensnetzwerk						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> <li>Informationsaustausch über Telekommunikation/Fax</li> <li>Keine Vernetzung der Produktion mit anderen Unternehmensbereichen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Informationsaustausch über Mail</li> <li>Kommunikation über Produktion hinweg mit anderen Unternehmensbereichen</li> <li>Digitaler Kommunikationskanal mit Lieferanten/Kunde</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zentrale standortgebundene Datenserver mit begrenzten Zugriffsrechten</li> <li>Kommunikation über internetbasiertes Instant Messaging</li> <li>Einbindung von Lieferanten/Kunde in IT-System</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dezentrale standortunabhängige Datenserver mit abteilungsunabhängigen Zugriffsrechten</li> <li>Vollständige Digitalisierung von Dokumenten und Wissen</li> <li>Einsatz von Videotelefonie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Datenspeicherung und Datenzugriff über globale Cloud</li> <li>Einheitliche Datenformate und Regeln zum Datenaustausch</li> <li>Automatisierter Informationsaustausch mit Kunden/Lieferant</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Internetbasierte Verknüpfung aller Produktionsstätten</li> <li>Prognose der Auslastung aller Produktionsstätten</li> <li>Nutzung der Lieferanten-/Kundenschnittstelle zur Antizipation der Rohstoffverfügbarkeit/Produktanfrage</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kontinuierlicher Datenaustausch aller Produktionsstätten (Prozessparameter, Ausfälle etc.)</li> <li>Autonome Auftragsverteilung und Anlagenanpassung im globalen Produktionsnetzwerk in Echtzeit</li> </ul>

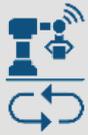
Umgebung						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Atmosphäre wird hinsichtlich weniger Kriterien händisch und stichprobenartig geprüft</li> <li>Kennzahlen werden auf Papier festgehalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Produktionsumgebung wird auf PCs dokumentiert</li> <li>Messen der Umgebungsbedingungen wird manuell und stichprobenartig durchgeführt</li> <li>Zeitlicher Verlauf kann lokal eingesehen werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kennzahlen der Produktionsumgebung werden automatisch erfasst</li> <li>Zeitlicher Verlauf wird in unternehmensweitem IT-Netz gespeichert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kontinuierliche Erfassung der Produktionsumgebung entlang der gesamten Prozesskette</li> <li>Speicherung und Darstellung der Kennzahlen in Echtzeit</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Automatisierte datenbasierte Vorhersage der Produktionsumgebung</li> <li>Übergreifende Verknüpfung der Kennzahlen entlang der Prozesskette</li> <li>Frühzeitige Information des Personals</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorhersage des Einflusses der Produktionsumgebung auf die Produktqualität</li> <li>Datenbasierte Unterstützung der Regelung zentraler Parameter</li> <li>Vollständige Vernetzung sämtlicher Daten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autonome Regelung der Produktionsumgebung basierend auf Umgebungsprodukt-Zusammenhängen</li> </ul>

# Prozesstechnik

## Prozessautomatisierung

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Automatisierung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manuelle Bedienung der Prozesse</li> <li>Automatisiertes Abfahren der Prozesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Integration der Prozesse in durchgängiges IT-System</li> <li>Verknüpfung der Steuerung</li> <li>Manuelle Einstellung des Prozesses erforderlich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einstellung des Prozesses basierend auf Daten</li> <li>Händische echtzeitfähige Anpassung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Prozessen und entlang der Prozesskette basierend auf Datenanalyse</li> <li>Auswirkungen auf Prozesse prognostizierbar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozesse können sich auf neue Situationen autonom einstellen</li> <li>Mitarbeitende weniger stark eingebunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozesse stellen sich entlang der Prozesskette vollständig autonom ein → Anpassung + Rückführung</li> <li>Mitarbeitende nicht/ kaum eingebunden</li> </ul>

## Prozessmonitoring

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein Prozessmonitoring</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Manuelles Prozessmonitoring durch den Bediener und seine Erfahrung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensoren sind mit der Steuerung verbunden</li> <li>Verbesserung des Prozessmonitorings durch Kombination von Sensordaten und Erfahrung des Bedieners</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beurteilung des Prozesses mithilfe von z. B. händisch errechneten Prozessfähigkeitsindizes</li> <li>Mitarbeiter weiter stark eingebunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Beispielsweise Prozessfähigkeitsindizes werden nun von der Maschine selbst errechnet</li> <li>Bewertung in Bezug auf den Prozess erfolgt weiterhin über den Mitarbeiter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gesamtes Prozessmonitoring mit z. B. Fähigkeitsuntersuchung findet autonom statt</li> <li>Prozess gibt selbständig Vorschläge zur Verbesserung aus</li> <li>Händische Einstellung über den Mitarbeiter</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prozessmonitoring etc. findet autonom statt</li> <li>Auch die entsprechende Anpassung innerhalb des Prozesses geschieht anschließend autonom</li> </ul>

# Planung, Steuerung und Logistik

## Produktionsplanung

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> <li>Manuelle Planung basierend auf händischen Methoden / Erfahrungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aktive Aufnahme und digitale Speicherung von Auftragsdaten (lokal)</li> <li>Einführung digitaler Systeme zur Unterstützung der manuellen Planung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verknüpfung mehrerer digitaler Systeme im Produktionsprozess</li> <li>Systeme planen automatisiert nach manuell festgelegten Entscheidungsregeln und Beziehungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufzeigen von relevanten Produktionsvorgängen und –ereignissen im Active Cockpit</li> <li>Einführung von KPI Reports</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Semantische Verknüpfung von Produktionsdaten und Planungsdaten</li> <li>Identifikation von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen von Planungsparametern &amp; Regelmäßigkeiten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modellierung eines DT des Shop Floors</li> <li>Simulation von Produktionsszenarien und bewertung der Eintrittswahrscheinlichkeit</li> <li>Frühzeitige Erkennung von kritischen Aufträgen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kontinuierliche Synchronisation zwischen realem Produktionssystem und DT</li> <li>Autonome, proaktive Anpassung der Produktionsplanung zur Optimierung der KPIs</li> </ul>

## Transport/Materialfluss

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von manuellen Transportsystemen (Handkarren, Hubwagen etc.)</li> <li>Manuelle Planung der Intralogistik auf Basis händischer Methoden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von manuell gesteuerten Milkruns</li> <li>Computergestützte Planung der Materialbedarfe im Produktionssystem ohne IT-System</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von FTS mit induktiver / schienengebundener Führung</li> <li>Routenplanung und Materialbedarfe werden vollständig über ein IT-System abgewickelt (bspw. WMS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>FTS mit optischer Führung senden und empfangen Daten</li> <li>Erzeugung einer 3D-Punktwolke des Produktionssystems via Scan</li> <li>Erhebung und Visualisierung von Daten / KPIs zum Materialfluss</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nutzung eines Smart-FTS-Management-Systems (S-FTS-MS) zur Verknüpfung von MES, WMS, FTS</li> <li>Interpretation der Punktwolke über KI</li> <li>Ursache-Wirkzusammenhänge identifizieren</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frei navigierende FTS (Abfahren einer vorher festgelegten Route) mit Internetzugang</li> <li>Aufbau eines DT des Materialflusses aus Punktwolke des Prod.systems</li> <li>Antizipation zukünftiger Materialflussszenarien</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Synchronisation zwischen DT und S-FTS-MS</li> <li>S-FTS-MS optimiert Materialfluss kontinuierlich</li> <li>FTS greifen in Echtzeit über Internet auf S-FTS MS zu und beliefern autonom das Prod.system</li> </ul>

## Lager

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> <li>Manuelles Befüllen / Entnehmen aus dem Lager (Pick-by-Paper)</li> <li>Händische Dokumentation des Lagerbestands auf Papier</li> <li>Starres Lager (bspw. Regal) ohne jegliche Funktionalität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von motorisierten Hub- und Hilfssystemen zum Befüllen / Entnehmen aus dem Lager (bspw. motorisierter Hubwagen)</li> <li>Lagerbestand wird manuell auf Computer ohne IT-System protokolliert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wareneinlagerung bzw. –auslagerung wird manuell im IT-System (bspw. WMS) eingetragen</li> <li>Warensystem ist auf einen Lagerstandort begrenzt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Digitales Identifizieren der Ware / Behälter (Barcode, QR-Code, RFID) über Scan</li> <li>Sensoren im Regal senden Daten an WMS</li> <li>Digitale Anzeige auf Disponierwagen mit Auftragsinfo (Pick-by-Scan)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verknüpfung des WMS mit ges. IT</li> <li>Einsatz von vollautomatischen Shuttle-Lagersystemen</li> <li>Kontaktloses Erfassen des Lagerbestands durch zentrale Transmitter und elektromagnet. Feld</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Frei navigierende Lagerroboter (vertikal/horizontal) mit Internetzugang</li> <li>Regal mit Internetzugang</li> <li>Smartes WMS antizipiert Lagerengpässe unter Berücksichtigung der Produktionsplanung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz von Drohnen beim Lagervorgang</li> <li>WMS sammelt Daten und überplant Dispositionsplanung in Echtzeit und sendet Aufträge über Internet an Lagerroboter</li> </ul>

# Maschinen und Anlagentechnik

## Kommunikation

	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
							
Maschine-Maschine	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Vernetzung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vernetzung über Verdrahtung</li> <li>Kommunikation von I/O-Signalen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vernetzung über Feldbus</li> <li>Feldbus-Protokoll als Kommunikationsstandard</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vernetzung über Ethernet</li> <li>Standard-Ethernet Protokolle als Kommunikationsstandard</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>OPC UA als Kommunikationsstandard auf IT-Ebene / Standard-Ethernet Protokoll auf OT-Ebene</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ebenenübergreifende Vernetzung über TSN</li> <li>OPC UA als ebenengreifender Kommunikationsstandard</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ebenenübergreifende Vernetzung über wireless 5G</li> <li>OPC UA als Kommunikationsstandard in der Cloud</li> </ul>
Mensch-Maschine	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kein Informationsaustausch zwischen Mensch und Maschine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bedienpult mit lokaler Anzeige</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sprach- und Gestensteuerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zentrale und dezentrale Überwachung- und Steuerung der Maschine</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Einsatz mobiler Anzeigeegeräte</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Individuelle Benutzeroberfläche mit individueller Informationsbereitstellung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Augmented und Virtual Reality</li> </ul>

## Aktorik/Sensorik

	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
							
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Sensorik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensoren sind eingebaut</li> <li>Sensoren überwachen den Prozess und die Aktorik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensoren sind mit der Steuerung über Verkabelung verbunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensordaten werden lokal verarbeitet und gespeichert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensordaten werden verarbeitet und global (Cloud) gespeichert</li> <li>Sensordaten werden mittels KI untersucht und mit Produktqualität in Verbindung gesetzt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensoren haben Internetzugang.</li> <li>Sensordaten zu einem DT der Maschine zusammengesetzt</li> <li>Vorhersage der Produktqualität auf Grundlage von Sensordaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DT der Maschine kommuniziert mit DT des Produkts und sendet optimale Prozessparameter an Aktorik</li> <li>Aktorik wird dementsprechend autonom von Anlage angepasst</li> </ul>

## Instandhaltung

	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
							
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reaktive, manuelle Instandhaltung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfahrungsbedingte, manuelle Instandhaltung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensorintegration an Maschinenkomponenten und Einbindung an die Steuerung</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensordaten werden lokal verarbeitet und gespeichert</li> <li>Zustandsüberwachung an der Maschine möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zustandsüberwachung global (Cloud) möglich</li> <li>Komponenten sind mit dem DT verbunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Lebensdauer von Komponenten wird bestimmt</li> <li>Wartungsaufträge werden automatisch ausgelöst</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wartungsaufträge werden automatisch kosten- und zeiteffizient auf Basis von Predictive Maintenance geplant</li> </ul>

# Qualitätsmanagement

## Qualitätssicherung

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• QS wird ohne Unterstützung, manuell auf Papier durchgeführt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Manuelle QS wird lokal auf einzelnen PCs durchgeführt und ausgewertet</li> <li>• PCs im Bereich der QS vorhanden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QS in ganzheitlichem IT-Netz integriert</li> <li>• QS nur noch auf PCs durchgeführt</li> <li>• Einsatz von QM-Methoden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unterstützung der QS durch echtzeitfähige Systeme (z.B. Qualitätsdaten)</li> <li>• Datenbasierte Entscheidungen</li> <li>• Mitarbeitende stark eingebunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auswirkung der QM-Methoden auf Prozess werden analysiert und verstanden</li> <li>• Mitarbeitende stark eingebunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• QS lernt basierend auf Erfahrungen und kann Entscheidungen prognostizieren</li> <li>• Mitarbeitende weniger stark eingebunden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Autonome QS keine/kaum Einbindung von Mitarbeitenden</li> </ul>

## Rohmaterial (Eingangsprüfung)

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialien werden stichprobenartig geprüft</li> <li>• Ergebnis der Charakterisierung wird auf Papier festgehalten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ergebnis der Materialcharakterisierung wird auf PCs gespeichert</li> <li>• Daten können lokal eingesehen werden</li> <li>• Prozesse werden manuell bedient</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialeigenschaften in ganzheitlichem IT-Netz unternehmensweit einsehbar</li> <li>• Charakterisierungsmethoden miteinander verknüpft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Charakterisierung der Materialien in Echtzeit</li> <li>• Manuelle Anpassbarkeit der Prozesse gegeben</li> <li>• Datenbasierte Entscheidungen unterstützt durch Mitarbeitende getroffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergreifende und echtzeitfähige Materialcharakterisierung in ganzheitlichem Netzwerk</li> <li>• Vorhersagen für Produktion werden datenbasiert getroffen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduktion des menschlichen Einflusses</li> <li>• Komplette Vernetzung sämtlicher Methoden</li> <li>• Vorhersage der Produktqualität und Eingrenzung von Prozessparametern</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produktionsprozess wird basierend auf anfänglicher Charakterisierung eingestellt</li> <li>• Autonome Anpassung sämtlicher Methoden</li> </ul>

## Batteriezelle (Ausgangsprüfung)

Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
						
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zellperformance wird stichprobenartig analysiert</li> <li>• Qualitätsmerkmale auf Papier festgehalten</li> <li>• Sämtliche Prozesse manuell durchgeführt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualitätsmerkmale werden dezentral auf PCs abgespeichert</li> <li>• Ermittlung von Merkmalen manuell und computergestützt durchgeführt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zellqualität auf in unternehmensweites IT-Netzwerk integrierte PCs dokumentiert</li> <li>• Erfassung der Qualitätsmerkmale wird vollständig durch IT-System gestützt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zentrale Visualisierung sämtlicher Qualitätsdaten nach Produktionsende</li> <li>• Vollständige Digitalisierung sämtlicher Qualitätsmethoden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ablage der Qualitätsdaten in unternehmensweit zugänglicher Cloud</li> <li>• Automatisierte Weiterleitung der Qualitätsdaten an vorgelagerte Prozesse</li> <li>• Manuelle Steuerung des Informationsflusses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vorhersage der Qualitätsmerkmale basierend auf verknüpften Wirkzusammenhängen</li> <li>• Einführung eines digitalen Schattens einzelner Zellen</li> <li>• Weitergabe der Prognose an vorgelagerte Prozesse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vollständig autonome Durchführung der Qualitätserfassung</li> <li>• Zusammenhangsbasiertes Treffen von Entscheidungen in vorgelagerten Prozessschritten</li> </ul>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>BEV</b>	Battery Electric Vehicle (dt.: Batterieelektrofahrzeug)
<b>CAD</b>	Computer Aided Design (dt.: Rechnerunterstütztes Konstruieren)
<b>CPS</b>	Cyber-Physische Systeme
<b>DT</b>	Digital Twin (dt.: Digitaler Zwilling)
<b>EOL</b>	End-of-Line (dt.: Ende der Produktionslinie)
<b>ERP</b>	Enterprise Resource Planning (dt.: Unternehmensressourcen-Planung)
<b>HEV</b>	Hybrid Electric Vehicle (dt.: Hybridelektrofahrzeug)
<b>IoT</b>	Internet of Things (dt.: Internet der Dinge)
<b>IT</b>	Informationstechnologie
<b>KI</b>	Künstliche Intelligenz
<b>KPI</b>	Key Performance Indicator (dt.: Schlüsselkennzahl)
<b>LFP</b>	Lithium-Eisenphosphat
<b>LIB</b>	Lithium-Ionen-Batterie
<b>MES</b>	Manufacturing Execution System (dt.: Fertigungssteuerungssystem)
<b>NCA</b>	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Aluminium-Oxid
<b>NMC</b>	Lithium-Nickel-Mangan-Kobalt-Oxid
<b>OEM</b>	Original Equipment Manufacturer (dt.: Erstausrüster)
<b>OPC UA</b>	Open Platform Communications Unified Architecture (Vereinheitlichte Architektur zum Datenaustauschstandard für die industrielle Kommunikation)
<b>PHEV</b>	Hybridelektrofahrzeuge mit Ladestecker
<b>T &amp; T</b>	Tracking und Tracing (dt.: Verfolgung und Rückverfolgung)

# Literaturverzeichnis

Arbeitskreis Smart Service Welt / acatech (Hg.) (2015): Smart Service Welt – Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Internet basierte Dienste für die Wirtschaft. Abschlussbericht. Berlin (Abschlussbericht).

Faraji Niri, Mona; Aslansefat, Koorosh; Haghi, Sajedeh; Hashemian, Mojgan; Daub, Rüdiger; Marco, James (2023): A Review of the Applications of Explainable Machine Learning for Lithium-Ion Batteries: From Production to State and Performance Estimation. In: *Energies* 16 (17), S. 6360. DOI: 10.3390/en16176360.

Grimmel, Philipp; Wessel, Jacob; Mennenga, Mark; Herrmann, Christoph (2022): Potentials of ontology-based knowledge discovery in data bases for Learning Factories.

Haghi, Sajedeh; Chen, Yao; Molzberger, Annika; Daub, Rüdiger (2024): Interdependencies in Electrode Manufacturing: A Comprehensive Study Based on Design Augmentation and Explainable Machine Learning. In: *Batteries & Supercaps* 7 (5), Artikel e202300556. DOI: 10.1002/batt.202300556.

Haghi, Sajedeh; Hidalgo, Marc Francis V.; Niri, Mona Faraji; Daub, Rüdiger; Marco, James (2023a): Machine Learning in Lithium-Ion Battery Cell Production: A Comprehensive Mapping Study. In: *Batteries & Supercaps* 6 (7), Artikel e202300046. DOI: 10.1002/batt.202300046.

Haghi, Sajedeh; Keilhofer, Josef; Schwarz, Nico; He, Pengdan; Daub, Rüdiger (2023b): Efficient Analysis of Interdependencies in Electrode Manufacturing Through Joint Application of Design of Experiments and Explainable Machine Learning. In: *Batteries & Supercaps*, Artikel e202300457. DOI: 10.1002/batt.202300457.

Haghi, Sajedeh; Leeb, Matthias; Molzberger, Annika; Daub, Rüdiger (2023c): Measuring Instruments for Characterization of Intermediate Products in Electrode Manufacturing of Lithium-Ion Batteries. In: *Energy Tech* 11 (9), Artikel 2300364. DOI: 10.1002/ente.202300364.

Haghi, Sajedeh; Summer, Armin; Bauerschmidt, Philipp; Daub, Rüdiger (2022): Tailored Digitalization in Electrode Manufacturing: The Backbone of Smart Lithium-Ion Battery Cell Production. In: *Energy Tech* 10 (10), Artikel 2200657. DOI: 10.1002/ente.202200657.

Haghi, Sajedeh; Töpfer, Hans-Christoph; Günter, Florian J.; Reinhart, Gunther (2021): A Conceptual Framework towards Data-Driven Models in Electrode Production of Lithium-Ion Battery Cells. In: 2212-8271 104, S. 1155–1160. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.194.

Harlacher, Markus; Weber, Marc-André; Latos, Benedikt; Jeske, Tim; Przybysz, Philipp; Lennings, Frank (2018): Einfluss der Digitalisierung auf Produktivität und Komplexität in deutschen Betrieben. In: *awIC* 3. DOI: 10.14464/awic.v3i0.237.

Heckmann, Thilo; Madlindl, Lukas; Scharfer, Philip; Schabel, Wilhelm (2024): Increased Water Uptake of Li[Ni<sub>0.6</sub>Co<sub>0.2</sub>Mn<sub>0.2</sub>]O<sub>2</sub> for Lithium-Ion Batteries in Humid Nitrogen above a Critical Gas Dew Point. In: *ACS Applied Energy Materials* 7 (5). DOI: 10.1021/acsaem.3c02976.

Husseini, Kamal; Boschert, Levin; Schabel, Sebastian; Fleischer, Jürgen (2024): Modeling machine-side influences on the Z-Folding process of battery cells. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* 18 (3-4), S. 615–623. DOI: 10.1007/s11740-023-01248-w.

Kaden, Nicolaj; Nguyen, Do M.; Schlimbach, Ricarda; Ohnimus, Tobias; Kwade, Arno; Dröder, Klaus (2024): Experimental investigation of the multi-layer wetting behavior of electrode-separator-composites in lithium-ion batteries. In: *Journal of Power Sources* 621, S. 235282. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.235282.

- Korthauer, Reiner (Hg.) (2019): Lithium-ion batteries. Basics and applications. Berlin: Springer.
- Kößler, Florian; Hertweck, Raphael; Fleischer, Jürgen (2024): Indentation tests on battery electrodes to estimate the target gap of battery calenders. In: 2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS). 2024 1st International Conference on Production Technologies and Systems for E-Mobility (EPTS). Bamberg, Germany, 05.06.2024 - 06.06.2024: IEEE, S. 1–6.
- Kwade, Arno; Haselrieder, Wolfgang; Leithoff, Ruben; Modlinger, Armin; Dietrich, Franz; Droeder, Klaus (2018): Current status and challenges for automotive battery production technologies. In: Nat Energy 3 (4), S. 290–300. DOI: 10.1038/s41560-018-0130-3.
- Lechner, Maximilian; Mothwurf, Paul; Nohe, Lasse; Daub, Rüdiger (2023): Material Flow Simulation in Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing as a Planning Tool for Cost and Energy Optimization. DOI: 10.15488/15274.
- Lechner, Maximilian; Wölfl, Simon; Putz, Elena; Daub, Rüdiger (2024): Identification of Critical Moisture Exposure for Nickel-Rich Cathode Active Materials in Lithium-Ion Battery Production. DOI: 10.2139/ssrn.4824273.
- Leeb, Matthias; Wiegmann, Eike; Kwade, Arno; Daub, Ruediger (2023): A conceptual framework for data-driven optimization in the semi-dry electrode production for lithium-ion batteries. In: 2212-8271 120, S. 732–737. DOI: 10.1016/j.procir.2023.09.067.
- Mayr, Andreas; Schreiner, David; Stumper, Benedikt; Daub, Rüdiger (2022): In-line Sensor-based Process Control of the Calendering Process for Lithium-Ion Batteries. In: Procedia CIRP 107, S. 295–301. DOI: 10.1016/j.procir.2022.04.048.
- Meiners, Julia; Fröhlich, Arian; Dröder, Klaus (2022): Potential of a machine learning based cross-process control in lithium-ion battery production. In: 2212-8271 112, S. 525–530. DOI: 10.1016/j.procir.2022.09.093.
- Michaelis, Sarah; Schütrumpf, Jörg; Kampker, Achim; Heimes, Heiner; Dorn, Benjamin; Wennemar, Sarah et al. (2023): Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2023: VDMA Verlag. Online verfügbar unter [https://vdma.org/documents/34570/35405938/VDMA+Batterieproduktion\\_Roadmap\\_2023.pdf/ee2452cd-ed44-93bf-4762-6a09ce29b4b7?t=1683038844317](https://vdma.org/documents/34570/35405938/VDMA+Batterieproduktion_Roadmap_2023.pdf/ee2452cd-ed44-93bf-4762-6a09ce29b4b7?t=1683038844317), zuletzt geprüft am 13.12.2023.
- Naumann, Aleksandra; Süß, Sandro; Mennenga, Mark; Herrmann, Christoph (2023): Towards an integrated control system for a scrap-free circular production of lithium-ion batteries. In: 2212-8271 120, S. 297–302. DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.053.
- Obermaier, Robert (2016): Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe: Strategische und operative Handlungsfelder für Industriebetriebe. In: Robert Obermaier (Hg.): Industrie 4.0 als unternehmerische Gestaltungsaufgabe. Betriebswirtschaftliche, technische und rechtliche Herausforderungen. Wiesbaden: Springer Gabler (SpringerLink Bücher), S. 3–34.
- Roth, Armin (2016): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schoo, Alexander; Moschner, Robin; Hülsmann, Jens; Kwade, Arno (2023): Coating Defects of Lithium-Ion Battery Electrodes and Their Inline Detection and Tracking. In: Batteries 9 (2), S. 111. DOI: 10.3390/batteries9020111.
- Schuh, Günther; Anderl, Reiner; Dumitrescu, Roman; Krüger, Antonio; Hompel, Michael ten (Hg.) (2020a): Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten.
- Deutsche Akademie der Technikwissenschaften; Forschungsinstitut für Rationalisierung e.V. an der RWTH Aachen; Technische Universität Darmstadt; Heinz Nixdorf Institut; Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz; Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik. Update 2020. München, Berlin, Brüssel: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (acatech Studie).
- Schuh, Günther; Riesener, Michael; Prote, Jan-Philipp; Dölle, Christian; Molitor, Marco; Schloesser, Sebastian et al.

(2020b): Industrie 4.0: Agile Entwicklung und Produktion im Internet of Production. In: Walter Frenz (Hg.): Handbuch Industrie 4.0. Recht, Technik, Gesellschaft. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 467–488.

Sommer, Alessandro; Bazlen, Steffen; Tran, Hai-Yen; Braunwarth, Wolfgang; Daub, Ruediger (2023a): Development and implementation of in-line segmentation for continuous electrode production in lithium-ion battery cell manufacturing for traceability applications. In: 2212-8271 120, S. 171–176. DOI: 10.1016/j.procir.2023.08.031.

Sommer, Alessandro; Bazlen, Steffen; Tran, Hai-Yen; Leeb, Matthias; Wachter, Jannis; Braunwarth, Wolfgang; Daub, Rüdiger (2024a): Integration of an Electrode-Sheet-Based Traceability System into the Manufacturing Process of Lithium-Ion Battery Cells. In: Energy Tech 12 (6), Artikel 2301221. DOI: 10.1002/ente.202301221.

Sommer, Alessandro; Leeb, Matthias; Haghi, Sajedah; Günter, Florian J.; Reinhart, Gunther (2021): Marking of Electrode Sheets in the Production of Lithium-Ion Cells as an Enabler for Tracking and Tracing. In: 2212-8271 104, S. 1011–1016. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.170.

Sommer, Alessandro; Leeb, Matthias; Weishaeupl, Lukas; Daub, Ruediger (2023b): Integration of Electrode Markings into the Manufacturing Process of Lithium-Ion Battery Cells for Tracking and Tracing Applications. In: Batteries 9 (2), S. 89. DOI: 10.3390/batteries9020089.

Sommer, Alessandro; Wachter, Jannis; Grabmann, Sophie; Daub, Rüdiger (2024b): Determination of Electrode Balancing in Multilayer Pouch Cells Through Tracking and Tracing in Lithium-Ion Battery Production. In: Batteries & Supercaps 7 (8), Artikel e202400127. DOI: 10.1002/batt.202400127.

Spath, Dieter; Lentjes, Joachim; Richter, Michael (2007): Neue Ansätze für die Integration von Konstruktion und Planung im Rahmen der digitalen Produktion. In: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 102 (1-2), S. 73–77. DOI: 10.3139/104.101108.

WGP (Hg.) (2024): Künstliche Intelligenz. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik e.V. – WGP. Online verfügbar unter <https://wgp.de/de/kuenstliche-intelligenz/>, zuletzt geprüft am 25.09.2024.

Wiegmann, Eike; Cavers, Heather; Diener, Alexander; Kwade, Arno (2023a): Semi-Dry Extrusion-Based Processing for Graphite Anodes: Morphological Insights and Electrochemical Performance. In: Energy Tech 11 (9), Artikel 2300341. DOI: 10.1002/ente.202300341.

Wiegmann, Eike; Fischer, Steffen; Leeb, Matthias; Kwade, Arno (2023b): Sustainable Lithium Ferro-Phosphate Cathode Manufacturing: A Semi-Dry Approach with Water-Based Processing and Polytetrafluorethylene Binders. In: Batteries 9 (12), S. 567. DOI: 10.3390/batteries9120567.

**Karlsruher Institut für Technologie**  
Kaiserstraße 12 · 76131 Karlsruhe  
E-Mail: [inzepto@wbk.kit.edu](mailto:inzepto@wbk.kit.edu)



---

Intelligente Batteriezellproduktion