

Kurzbericht des Abschlussberichts zum Förderprojekt im BMBF Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ und im BMBF-Dachkonzept Batterieforschung Teil I – Kurzbericht

Vorhabenbezeichnung: BatterI4.0 – Qualitätsmanagement im Digitalisierungsleitfaden für die Batteriezellproduktion	
Zuwendungsempfänger: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (<i>iwb</i>), Technische Universität München	Förderkennzeichen 03XP0300A
Projektleiter & -mitarbeiter Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub (Projektleiter) Frau Anna Kollenda (Wissenschaftlerin)	Berichtszeitraum 01.09.2020 – 30.04.2024

1. Arbeitsziel und Stand der Wissenschaft und Technik

Weltweit sind derzeit zwei Megatrends zu beobachten, die sich maßgeblich auf die in Europa angesiedelte Industrie auswirken: die Einführung von Digitalisierung und Industrie 4.0 in Fabriken sowie der weltweit steigende Bedarf an Batteriezellen. Die Sicherung der globalen Wettbewerbsfähigkeit Europas erfordert eine systematische Methodik zur Einführung von Digitalisierung und Industrie 4.0 in die Batteriezellproduktion. Bislang fehlen allerdings Konzepte zur ganzheitlichen und schnellen Umsetzung dieser Aspekte. Ebenso ist ein Hilfsmittel zur Bewertung und Verortung bereits bestehender Technologien im Hinblick auf Digitalisierung und Industrie 4.0 nicht verfügbar. Selbiges gilt für Ansätze zur Generierung neuer Ideen und Lösungen in diesem Kontext.

Jedoch existierte keine methodische Vorgehensweise, welche die Ist-Situation von Industrie-4.0-Anwendungen in der Batteriezellfertigung einordnete. Darüber hinaus bestand ebenfalls kein vom Anwendungsfall losgelöstes Werkzeug, um Aspekte von Industrie 4.0 aus Anwendersicht systematisch weiterentwickeln sowie die entwickelten Lösungen im Sinne von Industrie 4.0 bewerten zu können. Weiterhin fehlte eine gesamtheitliche Betrachtung der Batteriezellfertigung in den Aspekten Prozesstechnik, Maschinen- und Anlagentechnik, Qualitätsmanagement sowie Produktionsplanung, -steuerung und -logistik sowie deren inhaltliche Zusammenführung in einem gemeinsamen Leitfaden.

Ziel des Projekts *BatterI4.0* war die Erforschung und Ausarbeitung eines Leitfadens zur systematischen Umsetzung von Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion. Dieser Leitfaden deckt mit vier Methodensammlungen – sogenannten Werkzeugkästen – in den vier Bereichen Maschinen- und Anlagentechnik, Qualitätsmanagement, Prozesstechnologie sowie Planung, Steuerung und Logistik alle produktionstechnischen Bereiche der Batteriezellproduktion ab. Anhand der Werkzeugkästen sollten Technologien in bestehenden Produktionen ganzheitlich verortet und bewertet werden können, um Digitalisierung und Industrie 4.0 schnell und systematisch in Anlagen und Prozessketten einzuführen. Neben einer erhöhten Wettbewerbsfähigkeit resultiert daraus die Verbesserung des Prozess- und Anlagen-Monitorings, wodurch unter anderem eine Vermeidung von Ausschuss und damit einhergehend eine Steigerung der Ressourceneffizienz erreicht wird.

Innerhalb der Projektzusammenarbeit des Konsortiums lag die inhaltliche Verantwortung und gleichzeitiger Themenschwerpunkt des *iwb* auf der Erarbeitung und Implementierung des Werkzeugkastens zum Qualitätsmanagement. Neben der Erstellung des Leitfadens übernahm das Vorhaben *Batter14.0* außerdem das Management des Kompetenzclusters *InZePro*.

2. Ablauf des Vorhabens

Zunächst wurden in einer Grundlagenanalyse literaturbasiert bestehende Methoden der im Projekt adressierten Themenbereiche analysiert. Anschließend wurden geeignete Referenzprozessketten der Batteriezellproduktion aufbereitet und Unternehmen identifiziert, welche zur Erprobung der später entwickelten Werkzeugkästen kontaktiert werden könnten. Aufbauend auf industriellen Anwendungsfällen („Use Cases“), wurden zur Entwicklung der Methodik des Digitalisierungsleitfadens zunächst die identifizierten Digitalisierungsansätze in den jeweiligen Themengebieten kategorisiert und zu abstrakten Anwendungsebenen zusammengefasst. Zur Vervollständigung der Werkzeugkästen wurden mithilfe von Literatur und Expertengesprächen anschließend die Entwicklungsstufen innerhalb jeder Anwendungsstufe ausdetailliert. Hierbei wurden jeder Entwicklungsstufe konkrete Digitalisierungsbausteine zugeordnet. Die Anwendbarkeit der Werkzeugkästen wurde in Workshops mit Forschungs- und Industriepartnern erprobt.

3. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Projekt zeichnete sich durch eine gleichzeitige und gemeinsame Bearbeitung der Arbeitspakete erfolgte. Innerhalb der Arbeitspakete übernahm jeder der vier Projektpartner die Hauptverantwortung für einen Werkzeugkasten des Digitalisierungsleitfadens. Der Schwerpunkt des *iwb* lag auf dem Qualitätsmanagement.

Als Grundlage wurde von allen Projektpartnern eine einheitliche Referenzprozesskette mit relevanten Produkt- und Prozessparametern für die Fertigung von prismatischen Zellen, Rundzellen und Pouch-Zellen festgelegt. Aufbauend auf einer umfassenden Analyse von Qualitätsmanagementmethoden und deren Eignung für eine digitalisierte Umsetzung und Unterstützung mittels Industrie 4.0 wurden mithilfe von Use-Cases sogenannte Anwendungsebenen und Entwicklungsstufen erarbeitet. Diese Anwendungsebenen und Entwicklungsstufen wurden für die einzelnen Werkzeugkästen entwickelt. Mithilfe von Workshops konnte die Anwendbarkeit der entstandenen Werkzeugkästen sowohl im industriellen als auch im Forschungskontext erfolgreich gezeigt werden. Weiterhin wurden Best-Practices aus den Forschungsprojekten des *InZePro*-Clusters ermittelt.

Die Projektergebnisse wurden als „Digitalisierungsleitfaden für die Batteriezellproduktion“ in Kooperation mit dem wbk des KIT, dem IWF der TU Braunschweig sowie dem PEM der RWTH Aachen veröffentlicht. Dieser enthält neben den Werkzeugkästen ein Workshop-Konzept zur Anwendung in Unternehmen sowie Best-Practices, um dem Anwender praxisnahe Beispiele zur Verfügung zu stellen.

Abschlussbericht zum Förderprojekt im BMBF Rahmenprogramm „Vom Material zur Innovation“ und im BMBF-Dachkonzept Batterieforschung Teil II – Eingehende Darstellung der wesentlichen Inhalte

Vorhabenbezeichnung: BatterI4.0 – Qualitätsmanagement im Digitalisierungslifaden für die Batteriezellproduktion	
Zuwendungsempfänger: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (<i>iwb</i>), Technische Universität München	Förderkennzeichen 03XP0300A
Projektleiter & -mitarbeiter Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub (Projektleiter) Frau Anna Kollenda (Wissenschaftlerin)	Berichtszeitraum 01.09.2020 – 30.04.2024

1. Grundlagenanalyse

Das erste Arbeitspaket (AP1) des Vorhabens diente der Erarbeitung der grundlegenden Aspekte des Qualitätsmanagements (QM) und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion.

1.1 Benchmarkanalyse in der Batteriezellproduktion

Identifikation und Bewertung von Qualitätsmanagementmethoden

Basierend auf einer branchenübergreifenden Literaturrecherche wurden 145 QM-Methoden identifiziert. Für die in folgenden APs durchzuführende Integration dieser in den Leitfaden wurden sie in die Kategorien „Analytische Methoden“, „Konstruktive Methoden“, „Kreativitätsmethoden“, „Organisatorische Methoden“ und „Statistische Methoden“ eingeteilt. Die Methoden wurden basierend auf Szenarien hinsichtlich ihrer Eignung für die Batteriezellproduktion, ihrer Unterstützung durch Industrie 4.0-Ansätze von Prozessexperten am *iwb* sowie basierend auf Ergebnissen aus der Literatur bewertet. Die geeignetsten Methoden, welche in allen Kategorien als vielversprechend eingestuft wurden, sind in nachfolgend:

- Codeanalyse
- Design Review
- Deskriptive Statistik
- Induktive Statistik
- Methoden der künstlichen Intelligenz
- Programmierrichtlinien
- Q-Berichterstattung
- Statistische Prozesskontrolle
- Statistische Versuchsmethodik
- User Story / User Journey
- Verfahrensaudit

Industrie 4.0-Technologien

Weiterhin wurde untersucht, durch welche Industrie 4.0-Technologien die Anwendung der QM-Methoden unterstützt werden kann. Hierbei wurden insbesondere cyber-physische Systeme, sensitive Roboter, Big Data, Cloud-Computing, IT-Security, Real Time Enterprise, mobile Lösungen, vertikale Integration, horizontale Integration, Assistenzsysteme, Embedded Software, digitale Fabrik, Virtual Reality, Augmented Reality und Simulation identifiziert. Eine Einordnung der identifizierten Technologien zu den Stufen des Reifegradmodells nach Schuh et al. (2020)¹ ist in Abbildung 2 dargestellt.

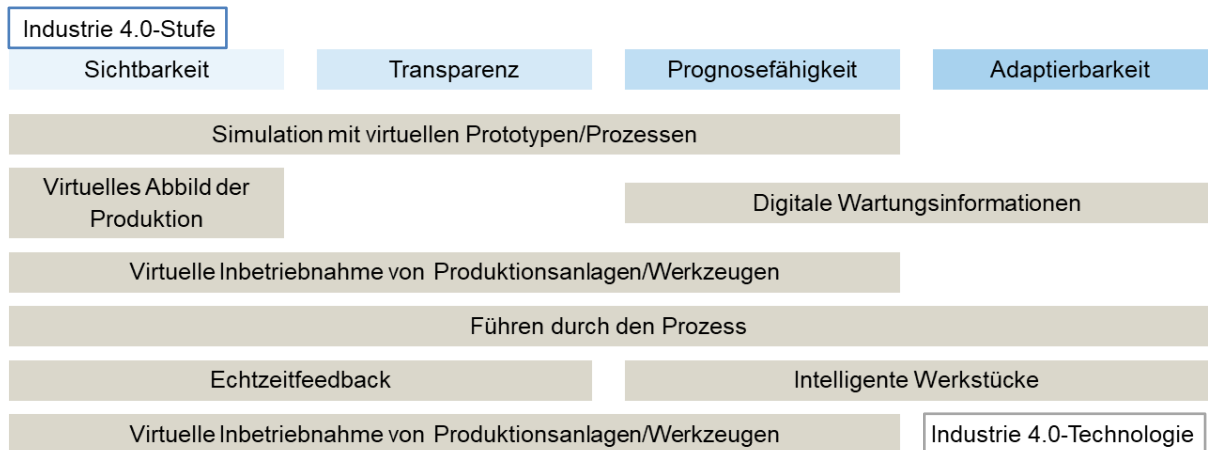


Abbildung 2: Zuordnung von Industrie 4.0-Technologien (braun) zu den Industrie 4.0-Reifegraden (blau) nach dem Reifegradmodell (Auszug)

1.2 Analyse von Standards für eine gemeinsame Datengrundlage

Als Grundlage für die Verarbeitung von Daten und Informationen wurde in Abstimmung mit dem gesamten Projektkonsortium eine einheitliche Referenzprozesskette zur Herstellung von Lithium-Ionen-Batteriezellen definiert. Dabei wurde auf die typischerweise in der Literatur beschriebenen Schritte zurückgegriffen, ohne auf teils durchgeführte, aber wenig verbreitete Prozesse, wie beispielsweise ein Zwischentrocknen einzugehen. Für jeden Herstellungsschritt wurde ausgehend vom Mischen der Elektrodenpasten bis einschließlich des End-of-Line-Tests sämtliche relevanten Prozess- und Produktparameter basierend auf einer Literaturrecherche identifiziert. Dazu wurde Google Scholar verwendet und nach typischen Schlagworten, wie beispielsweise „lithium-ion battery production“ oder „mixing of battery slurries“, gesucht. Insgesamt konnten so 124 Veröffentlichungen ausgewertet werden. In Tabelle 1 ist beispielhaft ein Auszug der identifizierten Parameter für den Trocknungs- und Kalandrierprozess angegeben. Für jeden der genannten Parameter wurden zudem industrierelevante Wertebereiche ermittelt, um die Auswahl geeigneter Sensorik für die Digitalisierung zu erleichtern.

¹ Schuh, Günther; Anderl, Reiner; Dumitrescu, Roman; Krüger, Antonio; Hompel, Michael ten (Hg.) (2020a): Industrie 4.0 Maturity Index. Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten.

Tabelle 1: Identifizierte Prozess- und Produktparameter als Grundlage für die Digitalisierung und Verarbeitung von Daten am Beispiel von zwei Prozessschritten entlang der Prozesskette.

	Trocknungsprozess	Kalandrierprozess
Prozessparameter	Trocknungstemperatur	Linienlast
	Trocknungsdauer	Walzenspalt
	Trocknungsrate	Walzentemperatur
	Bahngeschwindigkeit	Bahngeschwindigkeit
	Bahnspannung	Bahnspannung
Produktparameter	Schichtdicke	Dichte
	Dichte	Porenspektrum
	Oberflächentemperatur	Schichtdicke
	Elektrische Leitfähigkeit	Adhäsionskraft

Die Auflistung der zentralen Produkt- und Prozessparameter diente als Grundlage für die Anwendung des Leitfadens im Bereich des QM. Von einer klaren Trennung gegenüber den anderen Themenbereichen des Leitfadens musste jedoch aus Gründen der ganzheitlichen Anwendbarkeit abgesehen werden. Dies liegt darin begründet, dass jeder Werkzeugkasten auf eine gewisse Teilmenge der Parameter zurückgreift. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde daher die Zugehörigkeit der Parameter zu den verschiedenen Aspekten in Abhängigkeit des Industrie-4.0-Reifegrads ermittelt. Beispielhaft ist ein Auszug der Zuordnung für den Input und Output des Beschichtungsprozesses für die erste und sechste Industrie-4.0-Reifegradstufe in Abbildung 4 dargestellt. Die Zugehörigkeit eines Parameters zu einem der vier produktionstechnischen Bereiche des Leitfadens ist farblich markiert. Besteht kein Zusammenhang, ist der Parameter für den jeweiligen Bereich irrelevant und entsprechend grau eingefärbt.

	Input		Output	
Stufe 1	• Geometrische Daten	● ● ● ●	• Händische Klassifizierung	● ● ● ●
	• Soll-Stückzahl	● ● ● ●	• Fertigungsprogramm	● ● ● ●
	• ...		• ...	
Stufe 6	• Geometrische Daten	● ● ● ●	• Schichtdicke	● ● ● ●
	• Soll-Stückzahl	● ● ● ●	• Restfeuchtigkeit	● ● ● ●
	• Anlagenprogramm	● ● ● ●	• Ausschuss	● ● ● ●
	• Viskosität	● ● ● ●	• Beschichtungsfehler	● ● ● ●
	• Temperatur	● ● ● ●	• Massenbeladung	● ● ● ●
	• Taktzeit	● ● ● ●	• Folienspannung	● ● ● ●
	• ...		• ...	

Abbildung 3: Auszug aus der Zuordnung der Parameter zu den Bereichen des Digitalisierungsleitfadens. Farbliche Kodierung der Zuordnung: grau: kein Zusammenhang, blau: Qualitätsmanagement, gelb: Planung, Steuerung und Logistik, grün: Anlagentechnik, rot: Prozesstechnik.

Eine Bewertung der Parameter hinsichtlich ihrer Signifikanz bezogen auf die Qualität einer Batteriezelle konnte durch die nicht hinreichend in der Literatur beschriebene Wechselwirkung

zwischen dem Herstellungsprozess und der Zellperformance nicht durchgeführt werden. Für die Anwendung des Digitalisierungsleitfadens bedeutet dies, dass zwar zentrale Parameter genannt werden können, jedoch keine Priorisierung dieser vorgenommen werden kann.

Identifikation von Informationsflüssen

Die Produkt- und Prozessparameter in einer Prozesskette sollen digital erfasst werden, um durch digitale Industrie 4.0-Anwendungen unterstützt werden zu können. Bei diesen handelt es sich beispielsweise für den mit einer Schlitzdüse durchgeführten Beschichtungsprozess um Beschichtungsgeschwindigkeit, Abstand der Düse zu Substrat, Druckbalance, Beschichtungsbreite, Temperatur, Bahnspannung und Bahngeschwindigkeit. Mit der Identifikation der Prozess- und Produktparameter soll die prozesseseitige Anknüpfung der Sensorik geschaffen werden. Auf konkrete Digitalisierungskonzepte oder eine Auswahl geeigneter Sensorik wurde in der Forschungsarbeit jedoch nicht eingegangen. Diese sollen bei der Anwendung des Leitfadens vom Anwender selbst identifiziert und an die entsprechenden Randbedingungen, wie beispielsweise Preis und Messgenauigkeit angepasst werden.

Bewertung von Informationsflüssen

Um die erfassten Prozess- und Produktdaten effizient für das QM zur Verfügung zu stellen, müssen diese so priorisiert werden, dass sie von den als am geeignetsten bewerteten QM-Methoden genutzt werden können. Dazu wurden die wichtigsten Parameter der Prozesse, wie beispielsweise Beschichtungsbreite und Flächenbelastung des Beschichtungsprozesses, ausgewählt und den QM-Methoden, beispielsweise der statistischen Prozesskontrolle, zugeordnet. Dadurch wurde, ausgehend von den Prozess- und Produktparametern der Produktionsschritte, eine durchgängige Verbindung zu den QM-Methoden und deren Unterstützung durch die Industrie 4.0-Technologien geschaffen.

2. Methodik des Digitalisierungsleitfadens

In diesem AP wurde die grundlegende Struktur des Digitalisierungsleitfadens erarbeitet und in einer systematischen Befragung ausgewählter Industriepartner bewertet. Die Erkenntnisse aus der Befragung dienen der weiteren Entwicklung der Anwendungsebenen und Entwicklungsstufen und stellen die konsequente Ausrichtung auf den Bedarf der Industrie sicher.

2.1 Bewertung von Digitalisierungsansätzen und Anwendungsfällen

Aus den Projekten des Clusters *InZePro* wurden gezielte Anwendungsfälle innerhalb von Prozessen, sogenannte „Use Cases“, abgeleitet. Die Forschungsprojekte des Kompetenzclusters wurden basierend auf den jeweiligen Projektinhalten hinsichtlich ihres Industrie-4.0-Reifegrads im Bereich des QM bewertet. Dies wurde basierend auf einer systematischen Befragung aller Projekte des Clusters durchgeführt.

Die Befragung ergab, dass elf InZePro-Projekte Themen des QM adressierten und sämtliche Prozessschritte der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion sowie ein breites Spektrum an Industrie-4.0-Reifegraden abdecken. Die meisten der identifizierten Projekte befanden sich dabei zwischen den mittleren Reifegradstufen Transparenz und Prognosefähigkeit. Zudem

konnten durch das Teilvorhaben einige Projekte höheren und niedrigeren Stufen zugeordnet werden.

2.2 Ableitung von Anwendungsebenen der Digitalisierung und Werkzeugkästen

Aus den Use-Cases und weiteren Ergebnissen des AP 2.1 wurden im Folgenden die Anwendungsebenen, also Unterkategorien, der einzelnen Werkzeugkästen bzw. produktionstechnischen Bereiche abstrahiert.

Es konnte gezeigt werden, dass in den Werkzeugkästen zwischen zwei Arten von Anwendungsebenen unterschieden werden musste. Die erste bezieht sich jeweils auf einen spezifischen produktionstechnischen Bereich in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion. Zu diesen zählen Planung, Steuerung und Logistik, Maschinen- und Anlagentechnik, Prozesstechnik und QM und entsprechen den jeweiligen Schwerpunktbereichen der Partner des Forschungsvorhabens. Da diese Bereiche teils große Schnittmengen (vgl. Abbildung 4) besitzen, wurden sogenannte allgemeine Anwendungsebenen definiert. Zu diesen zählen beispielsweise Daten, Produkt und Unternehmensnetzwerk. Zugrunde liegt dieser Unterteilung der Umstand, dass eine Erhöhung des Industrie-4.0-Reifegrads in einem produktionstechnischen Bereich durch die Implementierung von Sensorik automatisch mit der Erhöhung des Reifegrads in einem anderen produktionstechnischen Bereich verknüpft ist. Beispielsweise kann eine Verbesserung der Prozesstechnik in einem Bereich automatisch mit der Verbesserung des QM verbunden sein. Diese Abhängigkeit wird durch die allgemeinen Werkzeugkästen abgebildet und ermöglicht eine allgemeine Anwendbarkeit des Leitfadens unter Berücksichtigung dieser. Schematisch dargestellt sind die spezifischen und allgemeinen Anwendungsebenen in Abbildung 5. Ebenfalls in der Abbildung enthalten sind die Entwicklungsstufen. Deren Anzahl sowie technologische Grundlage ist identisch für jede Anwendungsebene (vgl. Abschnitt zu AP 3).

		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 4: Anwendungsebenen des Digitalisierungslleitfadens

2.3 Erarbeitung einer Methodik für den Digitalisierungslleitfadens

Es wurde eine Methodik zur Anwendung des Digitalisierungslleitfadens entwickelt. Diese besteht aus sechs aufeinanderfolgenden Phasen (s. Abbildung 6) und dient dem systematischen Durchlaufen einzelner Abschnitte, die eine intuitive und zielgerichtete Anwendung der erarbeiteten Inhalte sicherstellen sollen. Die einzelnen Phasen werden nachfolgend am Beispiel des QM beschrieben.

In der ersten Phase soll ein grundlegendes Verständnis im Hinblick auf den Einsatz von Digitalisierung und Industrie 4.0 im QM geschaffen werden. Durch eine gemeinsame Definition von Zielen, Erwartungen und der verfolgten Philosophie im QM soll die Grundlage für das weitere Vorgehen geschaffen werden. Unabhängig vom Kenntnisstand des jeweiligen Anwenders sollen im Anschluss daran sämtliche erforderliche Begriffe bekannt sein. In der zweiten Phase wird der Ist-Zustand des betrachteten Bereichs der Produktion analysiert. Dazu werden zunächst die Aspekte, die im Bereich des QM adressiert werden sollen, identifiziert. Hierzu zählen beispielsweise die Erfassung qualitätsrelevanter Daten oder angewendeter QM-Methoden. Basierend auf den Beschreibungen der allgemeinen sowie spezifischen



Abbildung 5: Methodik zur Anwendung des Digitalisierungsleitfadens

Anwendungsebenen und deren Entwicklungsstufen wird für diese eine systematische Einordnung hinsichtlich des Industrie-4.0-Reifegrads vorgenommen. In der dritten Phase wird der Soll-Zustand des QM definiert. Das bedeutet, dass für jede betrachtete Anwendungsebene die angestrebte Entwicklungsstufe festgelegt wird. Gestützt wird dies durch eine zugängliche und systematische Beschreibung der Inhalte jeder Entwicklungsstufe. Die vierte Phase zielt auf die Erarbeitung möglicher Lösungen für das Erreichen der angestrebten Entwicklungsstufen ab. Mithilfe von Kreativitätstechniken soll ein breites Spektrum an Lösungen erarbeitet werden. Durch die eindeutige Definition der einzelnen Entwicklungsstufen sollen mögliche Ansätze schnell identifiziert werden können. In der vorletzten Phase der Methodik werden die erarbeiteten Lösungen bewertet. Dazu einbezogen werden der finanzielle Aufwand, und die Unternehmenskultur sowie weitere vom jeweiligen Anwender definierte Kriterien. Ziel ist es dabei für jede angestrebte Verbesserung die optimale Vorgehensweise zu identifizieren. In der letzten Phase werden die erarbeiteten Lösungen im QM umgesetzt. Das jeweilige Unternehmen muss dazu die erforderlichen Ressourcen bereitstellen und den mit der Erhöhung des Reifegrads verbundenen Aufbau von Infrastruktur umsetzen. Ist dies geschehen, sollen die Lösungen zur nachhaltigen Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit im QM beitragen.

Zusätzlich zur Methodik wurde ein Workshop-Konzept zu deren Umsetzung strukturiert. Hierbei finden am ersten Halbtage eine Einführung, Impulsvorträge des Unternehmens sowie eine Ist-Analyse statt. Zudem wird das Ziel definiert. Am folgenden Halbtage, z.B. an einem Nachmittag, werden in der Kreativphase Lösungskonzepte zur Zielerreichung erarbeitet. Im abschließenden Halbtage des Workshops werden die Ideen priorisiert, konkretisiert und präsentiert sowie diskutiert.

Dieses Workshop-Konzept basiert darauf, dass der Workshop vor Ort durchgeführt werden kann. Mithilfe eines kollaborativen Whiteboards (z.B. „Conceptboard“) kann auch eine digitale Durchführung der Ist-Analyse und Zieldefinition ermöglicht werden.

3. Entwicklung der Werkzeugkästen

Das dritte AP des Gesamtvorhabens diente der Erarbeitung der einzelnen Werkzeugkästen, mithilfe derer Unternehmen die gezielte Einführung von Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion umsetzen können. Erprobt wurde die Methodik in Workshops mit ausgewählten Forschungs- und Industriepartnern.

3.1 Ableitung der Entwicklungsstufen für die Anwendungsebenen

Für die systematische und einheitliche Einordnung des Industrie-4.0-Reifegrades wurden in Anlehnung an das Industrie-4.0-Reifegradmodell insgesamt sieben Entwicklungsstufen definiert, die für alle produktionstechnischen Bereiche des Digitalisierungslaufpfades gleichermaßen gelten (vgl. Abbildung 5). Durch diese können alle Zustände einer Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion von einer nicht vorhandenen Digitalisierung bis hin zur höchsten Industrie-4.0-Stufe abgebildet werden. Die für das QM relevanten Entwicklungsstufen sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Entwicklungsstufen des QM in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion. Beispielhaft ist die Beschreibung der jeweiligen Stufe sowie die Bedeutung für das QM angegeben.

	Beschreibung	Bedeutung für QM
Stufe 0 Keine Digitalisierung	<ul style="list-style-type: none"> Keine digitale Erfassung oder Verarbeitung von Daten 	<ul style="list-style-type: none"> Manuelle Durchführung ohne Unterstützung Festhalten von Daten auf Papier
Stufe 1 Computerisierung	<ul style="list-style-type: none"> Isolierter Einsatz von Informationstechnologien Effizienzsteigerung sich wiederholender Arbeitsschritte 	<ul style="list-style-type: none"> Manuelle Durchführung unterstützt von einzelnen PCs Lokale Speicherung von Daten
Stufe 2 Konnektivität	<ul style="list-style-type: none"> Verbund von isolierten Informationstechnologien Vernetzung von Fertigungsanlagen Automatische Rückmeldung der Fertigung in Echtzeit 	<ul style="list-style-type: none"> Ganzheitliche Integration in IT-Netz Durchführung ausschließlich auf PCs Systematischer Einsatz von QM-Methoden
Stufe 3 Sichtbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Erfassung sämtlicher Prozesse mittels Sensorik Erfassung von Ereignissen und Zuständen in Echtzeit Digitaler Schatten jederzeit abrufbar 	<ul style="list-style-type: none"> Unterstützung durch echtzeitfähige Systeme Treffen von datenbasierten Entscheidungen Verstärkung der Einbindung der Mitarbeitenden in Digitalisierung

<p><i>Stufe 4</i> Transparenz</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Durchgehende Analyse und Interpretation der Daten • Verknüpfung, Aggregation und Kontextualisierung von Daten • Schnelles Treffen komplexer Entscheidungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Auswirkung auf Prozesse und Produkte werden datenbasiert analysiert • Echtzeitfähige Unterstützung bei Entscheidungsfindung
<p><i>Stufe 5</i> Prognosefähigkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Projektion des digitalen Schattens in die Zukunft • Simulation von Zukunftsszenarien • Verbindung des digitalen Schattens mit Kenntnis relevanter Produkt-Prozess-Wechselwirkungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Automatisiertes Lernen basierend auf Daten • Prognose von Entscheidungen • Abnahme der Einbindung von Mitarbeitenden in Entscheidungsprozesse
<p><i>Stufe 6</i> Adaptierbarkeit</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Echtzeitfähige Anpassung der Parameter der Produktionsprozesse • Vollkommen digitale Fertigung • Autonomes Treffen von Entscheidungen basierend auf Daten und Simulationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Autonome Durchführung sämtlicher Prozesse • Minimale Einbindung von Mitarbeitenden in Entscheidungsfindungen

3.2 Erarbeitung von Werkzeugkästen für die Digitalisierung

Zur Ausarbeitung der einzelnen Werkzeugkästen und Vervollständigung des Leitfadens wurden die Bausteine strukturiert und die Anwendungsebenen mit den Entwicklungsstufen kombiniert. Der Fokus des *iwb* lag hierbei wiederum auf den spezifischen Digitalisierungsbausteinen für die Anwendungsebenen des QMs. Die detailliertere Zuordnung des Digitalisierungsgrads des QM und entsprechende Zuordnung zur Entwicklungsstufe entsprechend des Reifegradmodells ist exemplarisch in Abbildung 6 für das QM bei der Rohmaterial-Eingangsprüfung zu sehen.








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

Abbildung 6: Entwicklungsstufen der Anwendungsebene "Rohmaterial (Eingangsprüfung)" im Werkzeugkasten „Qualitätsmanagement“

4. Erprobung und Implementierung der Werkzeugkästen

Ziel dieses APs war es, die Werkzeugkästen über die Anwendungsebenen und Entwicklungsstufen in einer bestehenden Batteriezellproduktion ausgewählter Partner umzusetzen, um die Ergebnisse zu validieren und das Potential der Werkzeugkästen in den adressierten Bereichen aufzuzeigen.

4.1 Identifikation der Workshopteilnehmer und Vorbereitung

Zur Bewertung der Anwendbarkeit und Strukturierung der erarbeiteten Inhalte wurde ein Fragebogen entworfen und an ausgewählte Industriepartner sowie an die InZePro-Projektpartner versendet. Thematisiert wurden in diesem der geplante Leitfaden und Reifegradmodell im Allgemeinen sowie konkrete Aspekte bezüglich des QM. Beispielhaft sind einige der gestellten Fragen im Folgenden aufgelistet. Darunter ist die Bedeutung für das weitere Vorgehen des Teilvorhabens kursiv angegeben.

- Ist Ihnen der VDMA-Leitfaden für Industrie 4.0 bekannt?
Kann auf eine bekannte Leitfadenstruktur zurückgegriffen werden?
- Wie würden Sie Ihr Unternehmen gemäß Maturity-Index einordnen?
Auf welcher Stufe stehen Unternehmen aktuell und wo besteht der größte Handlungsbedarf?
- Was verstehen Sie unter Digitalisierung und Industrie 4.0?
Ist eine grundlegende Einführung der Begriffe erforderlich?
- Welche generellen Erwartungen haben Sie an einen Digitalisierungsleitfaden?
Kann die Erwartungshaltung durch die Struktur erfüllt werden?
- Wo liegen für Sie die Herausforderungen oder Hürden bei der Digitalisierung Ihrer QM-Methoden?
Gibt es spezifische Aspekte im Bereich des QM, die durch den Werkzeugkasten adressiert werden müssen?

Die Auswertung der Rückmeldungen ergab, dass die befragten Unternehmen großes Interesse an einem Digitalisierungsleitfaden haben, da jede Rückmeldung den expliziten

Wunsch nach einer systematischen Unterstützung enthielt. Dabei stand eine durch die Umsetzung von Digitalisierung und Industrie 4.0 ermöglichte Qualitätssteigerung in der Lithium-Ionen-Batteriezellproduktion im Vordergrund. Die folgenden Punkte stellen einen Auszug der zentralen Anforderungen an den Leitfaden und seine Elemente dar.

- Der Anwender erwartet eine klare Definition der verwendeten Begriffe und Vorgehensweisen sowie Reifegradstufen.
- Der Anwender wünscht sich Fallbeispiele, um die Einführung von Digitalisierung und Industrie 4.0 in Unternehmen zu vereinfachen.
- Die Anwendung des Leitfadens soll die schnelle und kostengünstige Einführung von Digitalisierung und Industrie 4.0 ermöglichen.
- Durch die Einführung von Digitalisierung und Industrie 4.0 soll die Etablierung von automatisierten und autonomen Abläufen in der Produktion ermöglicht werden.
- Die Einführung von Digitalisierung soll die prädiktive Instandhaltung der Anlagen und Qualitätskontrolle ermöglichen.
- Die Einführung von Digitalisierung soll Organisation im gesamten Unternehmen schaffen, die zur Verbesserung von Qualität beiträgt.
- Die Einführung der Digitalisierung im Bereich des QM wird nicht mit der höchsten Priorität bewertet.
- Insgesamt soll eine Steigerung der Affinität zu Digitalisierung unter den Mitarbeitenden geschaffen werden.
- Bezogen auf Daten wird eine einheitliche Definition von Standards bei Schnittstellen erwartet.

Durch den allgemeinen Charakter vieler der genannten Punkte, wurden diese im weiteren Verlauf des Vorhabens bei allen Projektpartnern gleichermaßen bei der Entwicklung der individuellen Aspekte berücksichtigt.

4.2 Erprobung der Werkzeugkästen

Zur Erprobung der Werkzeugkästen fand eine Analyse der Anwendungsmöglichkeiten in den Pilotproduktionsanlagen der Forschungspartner (Aachen, Braunschweig, Karlsruhe und München) sowie der Forschungsfabrik Batteriezzelle (FFB) statt. Hierzu wurden Workshops mit ausgewählten InZePro-Projekten (z. B. DataBatt, TrackBatt oder InteKal), ausgewählten ProZell-Projekten (z. B. HoLiB oder Cell-Fill) und auch Projekten des AQua-Clusters (z. B. QuaLiZell) durchgeführt. Es wurden konkrete Fragestellungen gemeinsam mit den Forschungspartnern untersucht und zur Erprobung der Werkzeugkästen bearbeitet. Ziel war es, möglichst viele Anwendungsebenen des QM, aber auch der weiteren produktionstechnischen Bereiche abzubilden. Mithilfe der Workshops wurde die Anwendbarkeit der entwickelten Werkzeugkästen evaluiert und als positiv eingestuft.

4.3 Implementierung der Werkzeugkästen

Die Erkenntnisse aus den Workshops mit ausgewählten Forschungsprojekten wurden ausgewertet und die Werkzeugkästen entsprechend verbessert. Anschließend fand eine Übertragung auf die Produktionsanlagen bzw. Konzepte der Industriepartner statt. Hierzu wurden mit ausgewählten Industriepartnern aus UAP 4.1 gemeinsame Workshops zur

Implementierung der Toolboxen an bestehenden Batteriezellen-Produktionslinien durchgeführt. Mit den gesammelten Rückmeldungen aus der Industrie, aber auch aus den InZePro-Projekten, wurde anschließend in AP 5 weitergearbeitet.

Beispielhaft sind nachfolgend die Ergebnisse des Workshops einem deutschen Zellhersteller für die Werkzeugkästen *Allgemein* (s. Abbildung 7) und *Qualitätsmanagement* (s. Abbildung 8) dargestellt. In Gelb ist der Ist-Zustand und in Schwarz der Soll-Zustand eingefärbt. In der Anwendungsebene *Qualitätssicherung* wurde keine Bewertung durchgeführt, da auf diesem Gebiet aktuell vom Industriepartner keine Aktivitäten zur Verbesserung fokussiert werden.

Im Rahmen der Workshops konnten die entwickelten Werkzeugkästen präsentiert und notwendige vorbereitende Maßnahmen für die industrielle Umsetzung identifiziert werden. Die Anwendbarkeit der entwickelten Werkzeugkästen in der Industrie wurde evaluiert und als positiv eingestuft. Die gesammelten Rückmeldungen aus der Industrie, aber auch aus den *InZePro*-Projekten wurden anschließend an AP 5 übergeben.

Allgemein						
Daten						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> Kein Einsatz von Technologien zur digitalen Datenerfassung und -verarbeitung 	<ul style="list-style-type: none"> Digitale Erfassung und Speicherung von Daten auf Unternehmensebene ohne IT-System 	<ul style="list-style-type: none"> Integration von IT-Systemen (ERP, MES, CAD etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> Aktive Aufnahme und lokale Speicherung von Betriebsdaten auf allen Ebenen (Feldebene bis Unternehmensebene) durch Nutzung von Sensoren, IoT-Devices etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Daten werden in einer Cloud verarbeitet und gespeichert (Cloud Computing) Identifikation von semantischen Verknüpfungen der Daten und Herausfiltern von Wissen (Big Data Analytics) 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von KI zur Modellierung des DT Antizipation zukünftiger Daten durch KI 	<ul style="list-style-type: none"> Synchronisation des DT mit realen physikalischen Welt Autonome Entscheidungsfindung auf Grundlage der antizipierten Daten
Produkt						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> Keine Funktionalität zur Datenspeicherung und dem Informationsaustausch am Produkt Produkt-/Materialeigenschaften werden gar nicht oder nur händisch auf Papier protokolliert 	<ul style="list-style-type: none"> Produkteigenschaften werden manuell in lokaler, digitaler Datenbank eingetragen 	<ul style="list-style-type: none"> Datenbanken zur Dokumentation der Produkteigenschaften sind in einem IT-System gebettet, Eintrag ist über eine Benutzeroberfläche gewährleistet (manuell) 	<ul style="list-style-type: none"> Möglichkeit zur automatisierten Identifikation von Produkten und Rohstoffen (Barcode, QR-Code, RFID) Automatisiertes Befüllen der Datenbank 	<ul style="list-style-type: none"> Produkt besitzt passiven Datenspeicher (RFID) Produkt sendet / empfängt Signale Semantische Verknüpfung der Produkt- und Prozessdaten Erfassung des Produktzustands 	<ul style="list-style-type: none"> Einsatz von KI zur Modellierung eines DT des Produkts Prognose der Funktionsfähigkeit des Produkts Autonomer Informationsaustausch zwischen Produkt und Anlage 	<ul style="list-style-type: none"> Produkt hat Zugriff zum Internet und Cloud-Diensten Produkt reagiert auf Prognose und fordert selbstständig Anpassungsmaßnahmen der Prozessparameter bei Anlage ein
Unternehmensnetzwerk						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> Informationsaustausch über Telekommunikation/Fax Keine Vernetzung der Produktion mit anderen Unternehmensbereichen 	<ul style="list-style-type: none"> Informationsaustausch über Mail Kommunikation über Produktion hinweg mit anderen Unternehmensbereichen Digitaler Kommunikationskanal mit Lieferanten/Kunde 	<ul style="list-style-type: none"> Zentrale standortgebundene Datenserver mit begrenzten Zugriffsrechten Kommunikation über internetbasiertes Instant Messaging Einbindung von Lieferanten/Kunde in IT-System 	<ul style="list-style-type: none"> Dezentrale standortunabhängige Datenserver mit abteilungsabhängigen Zugriffsrechten Vollständige Digitalisierung von Dokumenten und Wissen Einsatz von Videotelefonie 	<ul style="list-style-type: none"> Datenspeicherung und Datenzugriff über globale Cloud Einheitliche Datenformate und Regeln zum Datenaustausch Automatisierter Informationsaustausch mit Kunden/ Lieferant 	<ul style="list-style-type: none"> Internetbasierte Verknüpfung aller Produktionsstätten Prognose der Auslastung aller Produktionsstätten Nutzung der Lieferanten-/Kundenschnittstelle zur Antizipation der Rohstoffverfügbarkeit/Produktnachfrage 	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuierlicher Datenaustausch aller Produktionsstätten (Prozessparameter, Ausfälle etc.) Autonome Auftragsverteilung und Anlagenanpassung im globalen Produktionsnetzwerk in Echtzeit
Umgebung						
Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5	Stufe 6
<ul style="list-style-type: none"> Die Atmosphäre wird hinsichtlich weniger Kriterien händisch und stichprobenartig geprüft Kennzahlen werden auf Papier festgehalten 	<ul style="list-style-type: none"> Produktionsumgebung wird auf PCs dokumentiert Messen der Umgebungsbedingungen wird manuell und stichprobenartig durchgeführt Zeitlicher Verlauf kann lokal eingesehen werden 	<ul style="list-style-type: none"> Kennzahlen der Produktionsumgebung werden automatisiert erfasst Zeitlicher Verlauf wird in unternehmensweitem IT-Netz gespeichert 	<ul style="list-style-type: none"> Kontinuierliche Erfassung der Produktionsumgebung entlang der gesamten Prozesskette Speicherung und Darstellung der Kennzahlen in Echtzeit 	<ul style="list-style-type: none"> Automatisierte datenbasierte Vorhersage der Produktionsumgebung Übergreifende Verknüpfung der Kennzahlen entlang der Prozesskette Frühzeitige Information des Personals 	<ul style="list-style-type: none"> Vorhersage des Einflusses der Produktionsumgebung auf die Produktqualität Datenbasierte Unterstützung der Regelung zentraler Parameter Vollständige Vernetzung sämtlicher Daten 	<ul style="list-style-type: none"> Autonome Regelung der Produktionsumgebung basierend auf Umgebungsprodukt-Zusammenhängen

Abbildung 7: Werkzeugkasten "Allgemein" mit Bewertung des Ist-Zustands (gelb) und Soll-Zustands (schwarz) durch deutschen Zellhersteller

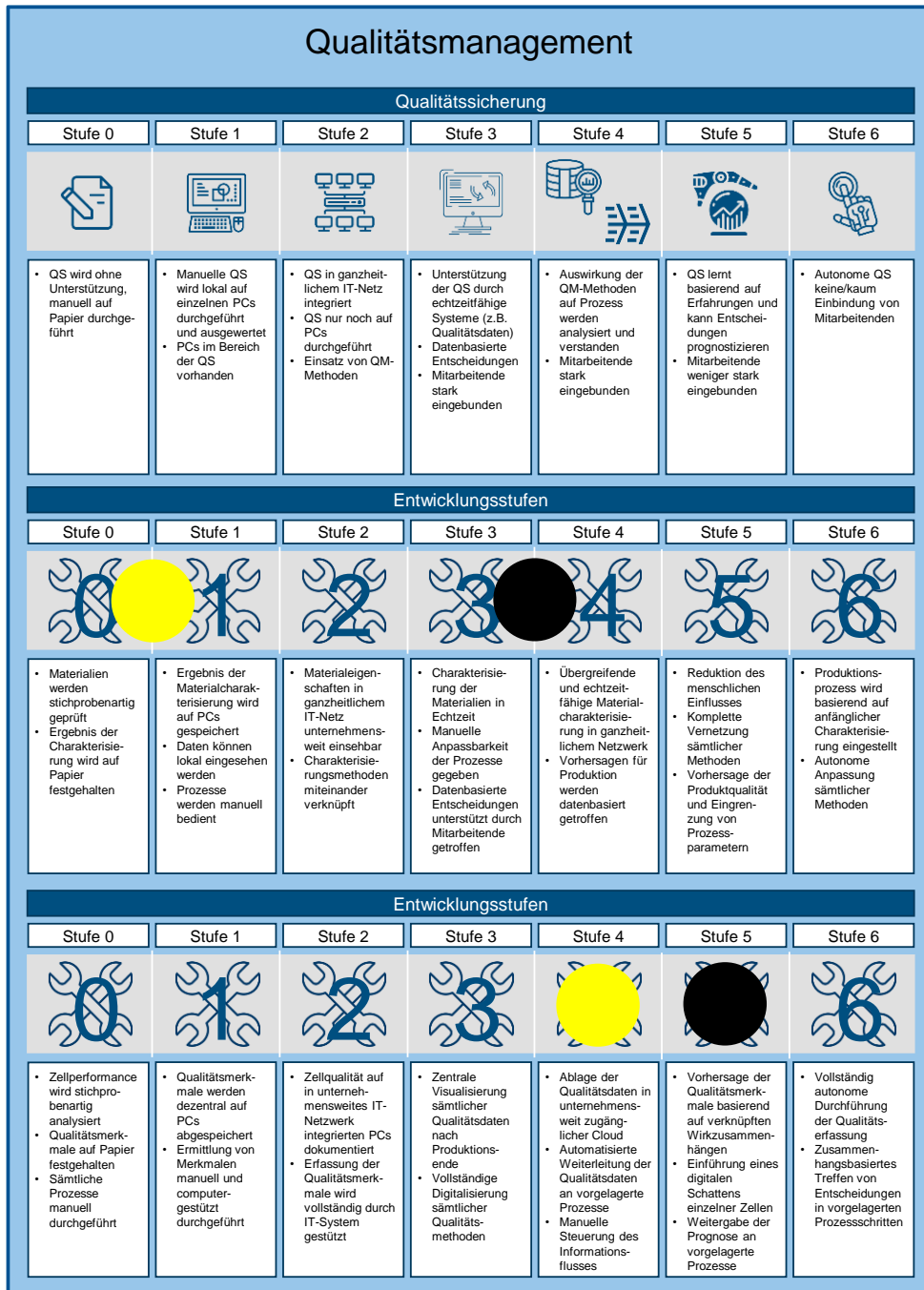


Abbildung 8: Werkzeugkasten „Qualitätsmanagement“ mit Bewertungen des Ist-Zustands (gelb) und Soll-Zustands (schwarz) eines deutschen Zellherstellers

5. Ergebniskonsolidierung der InZePro-Projekte als Best-Practice-Anwendungen und Aufnahme in den Leitfaden

In diesem AP wurden die in den Projekten gewonnenen Erkenntnisse charakterisiert, kondensiert und allen Projekten standardisiert zur Verfügung gestellt. Weiterhin wurden deckungsgleiche Beispiele miteinander verschmolzen und Schnittstellen aufeinander angepasst, um eine widerspruchsfreie Darstellung im Leitfaden zu ermöglichen. Abschließend wurden Implementierungsergebnisse der Projektpartner aufbereitet und als sogenannte „Best Practices“ für die Entwicklungsstufen festgehalten.

5.1 Evaluation der projektspezifischen Digitalisierungsansätze

Zur Evaluation der Digitalisierungsansätze wurde ein Use-Case-Projektsteckbrief als Vorlage erarbeitet (s. Abbildung 9). Dieser Steckbrief ermöglicht die vollumfängliche Einordnung sowie Definition des entsprechenden Anwendungsfalls und unterstützt ein stringentes Vorgehen. Da die Rückmeldungen aus der Industrie insbesondere den Wunsch nach Definitionen und Fallbeispielen bzw. Best-Practices aufwiesen, wurden hinsichtlich des Leitfadens auch erste Use-Cases der einzelnen Projekte abgefragt.

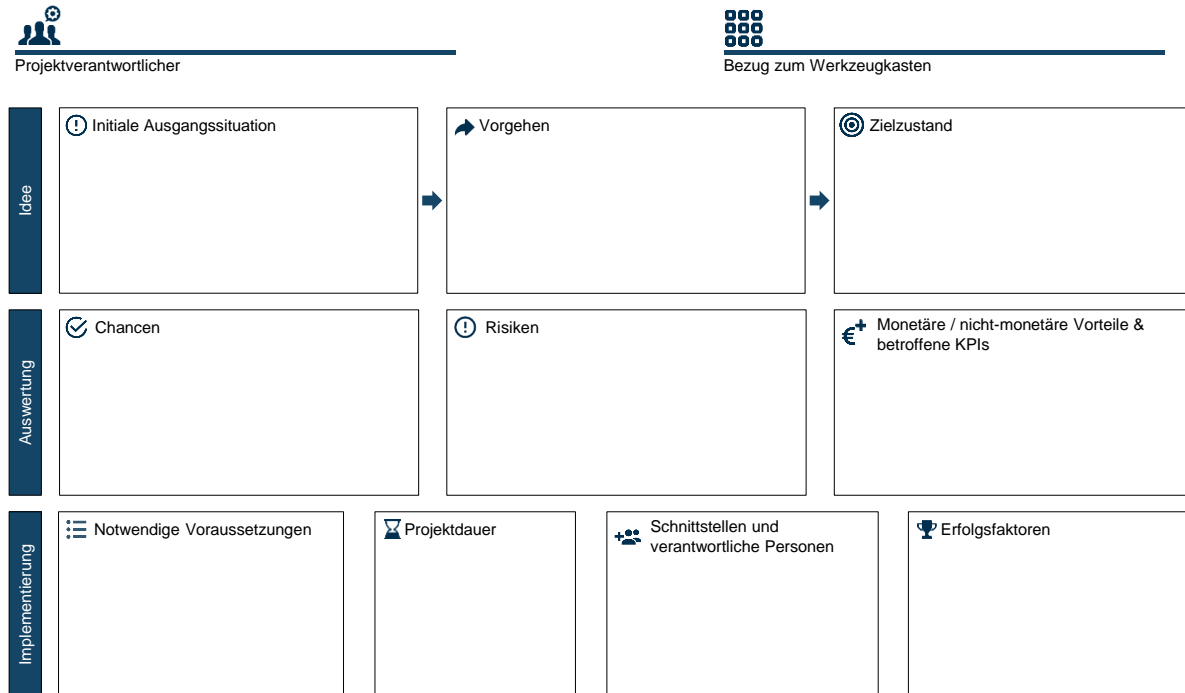


Abbildung 9: Projektsteckbrief zur einheitlichen Beschreibung der Konzepte

5.2 Integration der Ergebnisse und Erweiterung der Werkzeugkästen

Im Anschluss an die Auswertung, wurden die Workshops mit den Projekten des InZePro-Clusters durchgeführt, um die bisherigen Best-Practices in den Leitfaden zu integrieren und die Werkzeugkästen weiter zu verbessern. Ergebnisse bezüglich der Einsortierung beispielsweise des Projektes „InMiTro“ in die Werkzeugkästen sind in der nachfolgenden Abbildung 11 dargestellt. Die Ergebnisse der Use-Cases wurden anschließend gemäß dem Vorgehen in UAP 2.2 abstrahiert. Dieser Ansatz unterstützt die Skalierbarkeit und Flexibilität der Digitalisierungsstrategien und fördert die Identifikation und Umsetzung neuer innovativer Lösungen.

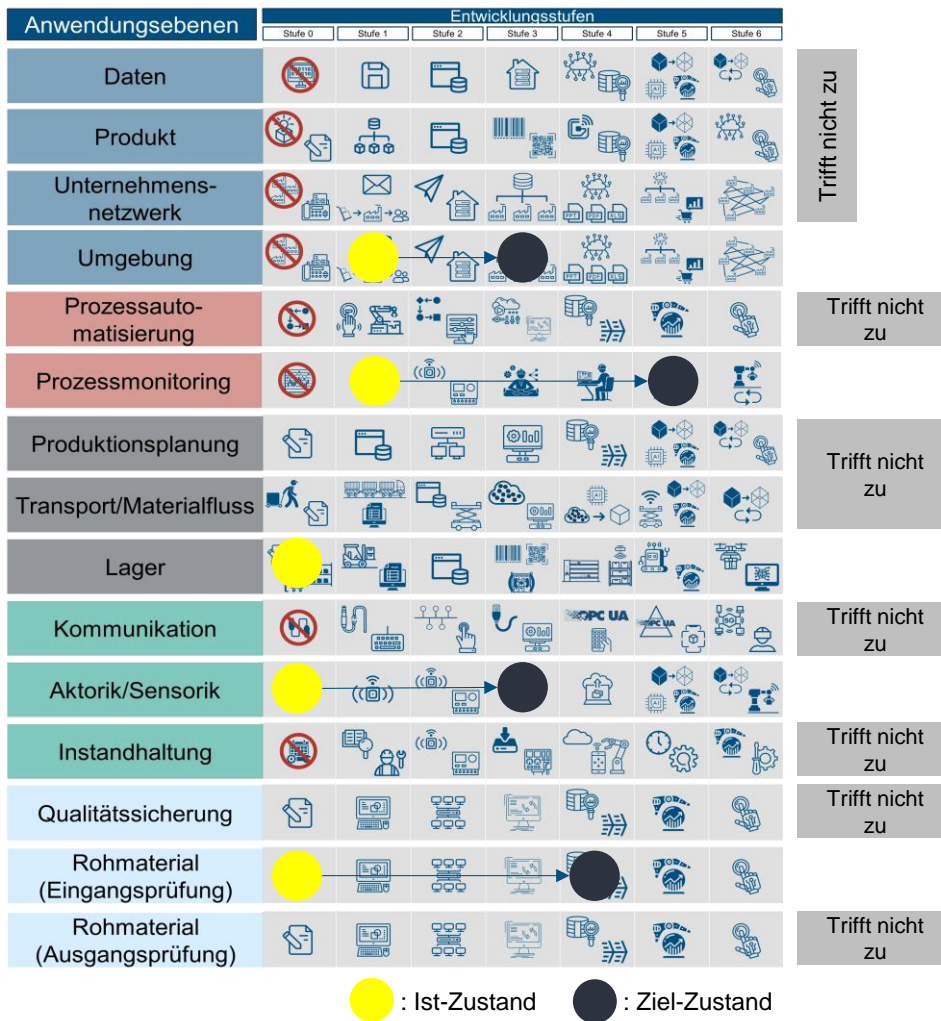


Abbildung 10: Workshop-Ergebnisse zum Projekt „InMiTro“

5.3 Bewertung und Iteration von Best Practices zur Digitalisierung

Zur Aufbereitung der Ergebnisse aus UAP 4.3 und 5.2 sowie zur Erarbeitung der Best Practices fanden zusätzliche Workshops beim 6. Forschungskolloquium in Karlsruhe statt. Hierbei wurden die Projektpartner des InZePro-Clusters durch das BatterI4.0-Projektteam angeleitet. Mithilfe des Projektsteckbriefs wurden die einzelnen Best Practices definiert und detailliert. Exemplarisch sind Best Practices aus dem Projekt „InMiTro“ in Abbildung 11 dargestellt.

Hierzu wurden als Basis zuerst die Kerninhalte des Projektes sowie damit zusammenpassende Anwendungsebenen ermittelt. Diese Best Practices wurden anschließend nochmals detailliert ausgearbeitet, um von der initialen Ausgangssituation über ein methodisches Vorgehen zum entsprechenden Zielzustand zu kommen. Das gleiche Vorgehen wurde für alle weiteren Projekte durchgeführt.

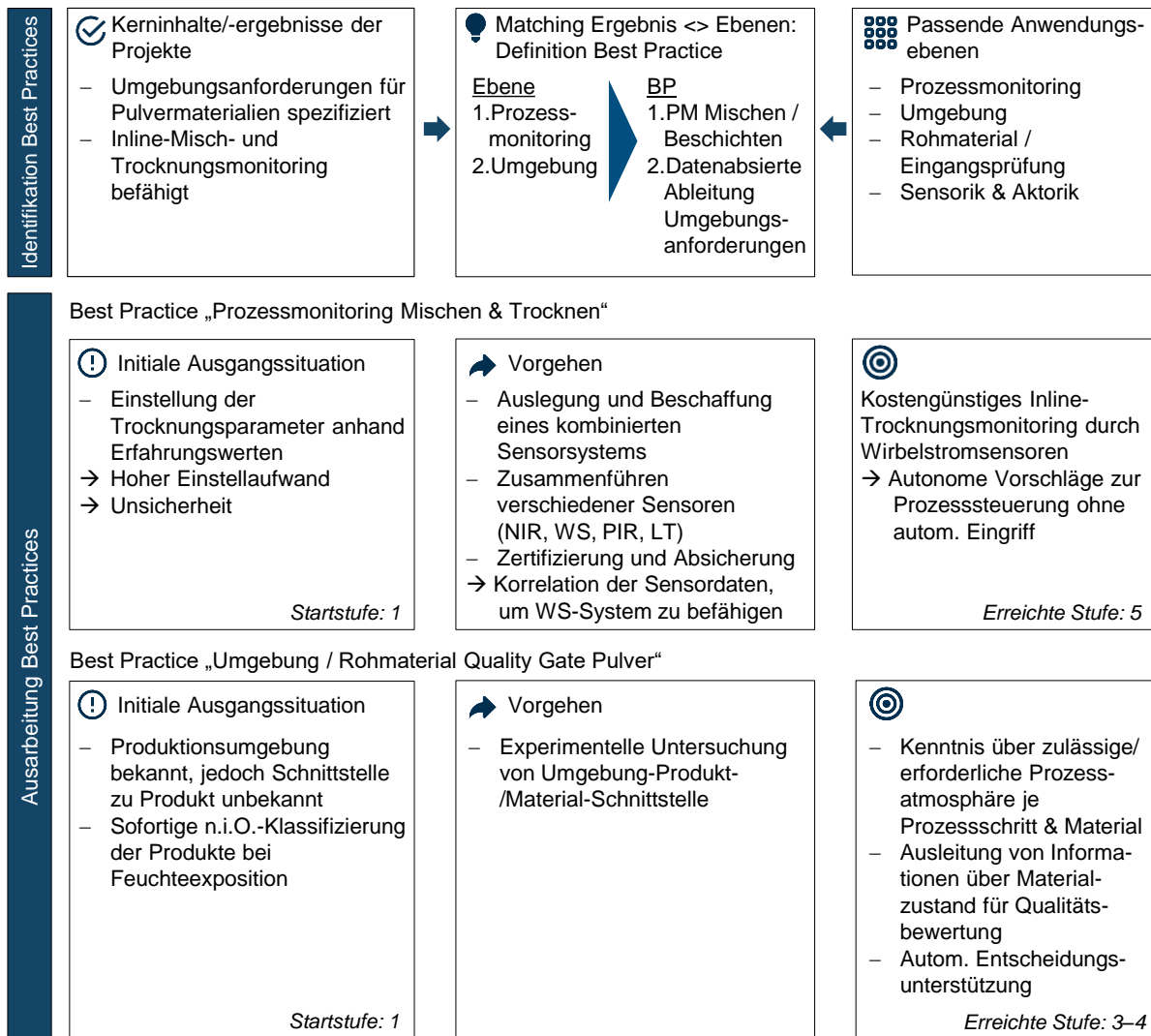


Abbildung 11: Best Practices des Projekts „InMiTro“

6. Zusammenführung in einem Leitfaden

Abschließend wurde die erarbeitete Methodik inklusive der erstellten Werkzeugkästen in einem Leitfaden ausformuliert. Dieser soll fachlich dazu dienen, die Forschungsergebnisse transparent an interessierte Unternehmen zu übermitteln und dort als methodische Unterstützung in der Weiterentwicklung der Batteriezellfertigung in Deutschland im Sinne von Industrie 4.0 genutzt werden.

6.1 Strukturierung und Ausarbeitung der Werkzeugkästen

In diesem AP wurde die Grobstruktur für den Digitalisierungsleitfaden entworfen: In der Einführung werden Themen wie das InZePro-Cluster und das Einsatzgebiet des Leitfadens kurz beschrieben. Anschließend werden zentrale Begriffe definiert, beispielsweise die Zellformate, die Prozesskette zur Produktion von Lithium-Ionen-Zellen und eine Abgrenzung von Digitalisierung und Industrie 4.0. Im nächsten Kapitel werden das Reifegradmodell sowie der Aufbau der Werkzeugkästen mit den Anwendungsebenen und Entwicklungsstufen

definiert und anhand einzelner Werkzeugkästen exemplarisch erläutert. Daran anknüpfend werden das Konzept sowie der Aufbau des Leitfadens mit seinen unterschiedlichen Phasen definiert, sodass der Anwender eine Art Bedienungsanleitung für zur Nutzung des Leitfadens erhält. Die final dargestellten Best Practices aus den InZePro-Projekten runden den Leitfaden ab und geben dem Anwender mögliche Lösungsvorschläge für spezifische Digitalisierungsaufgaben an die Hand.

6.2 Überführung der Ergebnisse in einen Leitfaden zur Digitalisierung

Die Ergebnisse wurden in einen Leitfaden zur Digitalisierung der Batteriezellproduktion überführt und am 08.10.2024 der Öffentlichkeit vorgestellt. Der Leitfaden ist über folgenden Link abrufbar: <https://batteri40.de/>

7. Veröffentlichungen

1. Vom Hemdt, A.; von Boeselager, C.; Scharmann, T.; **Töpper, H.-C.**; Puchta, A.; Kampker, A.; Dröder, K.; **Reinhart, G.**; Fleischer, J.: Messbarkeit von Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion. Konferenzposter Batterieforum 2021.
2. Haghi, S.; **Töpper, H.-C.**; Günter, F.; Reinhart, G.: A Conceptual Framework towards Data-Driven Models in Electrode Production of Lithium-Ion Battery Cells. Procedia CIRP, Volume 104, 2021, S. 1155-1160, ISSN 2212-8271, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.194>.
3. Puchta, A.; Schmied, J.; Scharmann, T.; **Töpper, H.-C.**; Fleischer, J.; Kampker, A.; Dröder, K.; **Daub, R.**: Use Cases and Application Levels for a Guide to Digitalization of Battery Cell Production. Konferenzposter IBPC 2021.
4. Scharmann, T.; Puchta, A.; Schmied, J.; **Töpper, H.-C.**; Fleischer, J.; Kampker, A.; Dröder, K.; **Daub, R.**: Application levels and development stages for Industry 4.0 in battery production. Konferenzposter Batterieforum 2022.
5. Scharmann, T.; Puchta, A.; Schmied, J.; **Töpper, H.-C.**; Dröder, K.; Fleischer, J.; Kampker, A.; **Daub, R.**: Toolboxes for the Digitalization of Lithium-Ion Battery Production. Konferenzposter AABC US 2022.
6. Schmied, J.; Puchta, A.; Scharmann, T.; **Töpper, H.-C.**; Kampker, A.; Fleischer, J.; Dröder, K.; **Daub, R.**: Framework for the Application of Industry 4.0 in Lithium-Ion Battery Cell Production. Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2022; Institutionelles Repositorium der Leibniz Universität Hannover: Hannover, 2022; pp 151–160. DOI: <https://doi.org/10.5445/ir/1000149270>.
7. Puchta, A.; Fleischer, J.; Schmied, J.; Kampker, A.; Scharmann, T.; Dröder, K.; **Töpper, H.-C.**; **Daub, R.**: Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion. WT - Z. Ind. Fertigung 2022, 112 (07-08), 496–500. DOI: <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2022-07-08-50>.
8. Fleischer, J.; **Daub, R.**; Kampker, A.; Dröder, K.: Leitfaden für Digitalisierung und Industrie 4.0 in der Batteriezellproduktion (2024). <https://batteri40.de/>.