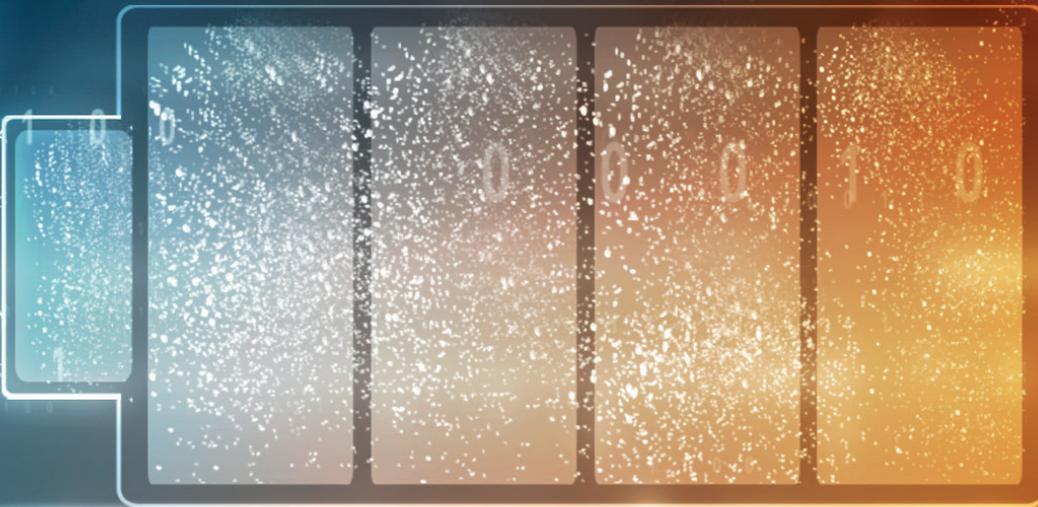




Fraunhofer



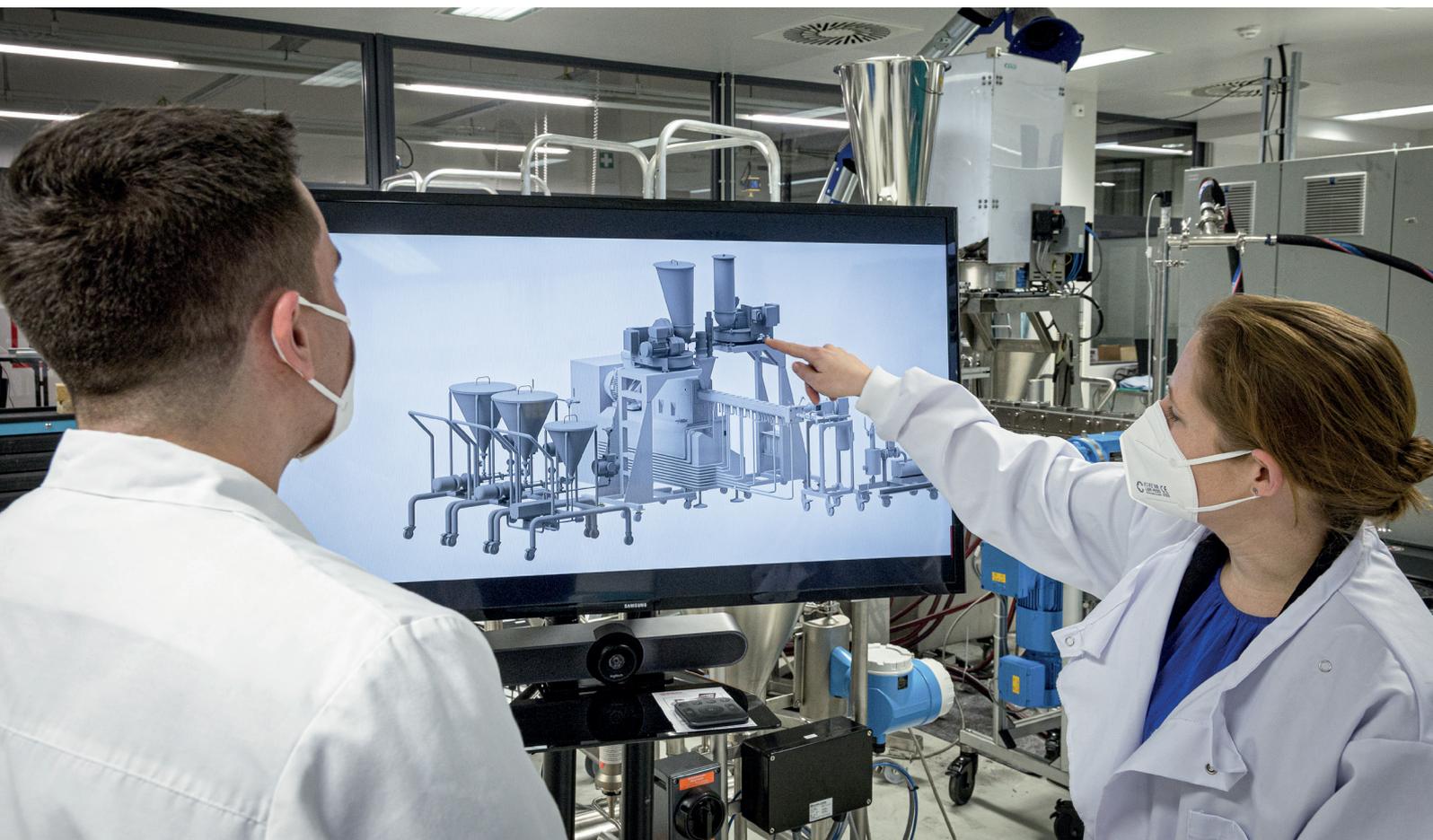
Der Digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung

Potenziale für eine effiziente und nachhaltige Produktion



Inhalt

Der Einsatz Digitaler Zwillinge bietet vielfältige Potenziale in der Batteriezellfertigung	5
Definitionen und Anwendungen Digitaler Zwillinge in der Produktion	6
Verständnis und Entwicklung eines Digitalen Zwillings in der Batteriezellfertigung	9
Ausprägungen des Digitalen Zwillings für die Batteriezellfertigung	13
Der Digitale Anlagenzwilling	14
Der Digitale Produktzwilling	17
Der Digitale Gebäudezwilling	21
Der Digitale Zwilling der Batteriezellfertigung	26
Die Umsetzung des Digitalen Zwillings in der Fraunhofer FFB	29
Literatur	30
Impressum	35



Das Konzept des Digitalen Zwillings als Abbild eines physischen Gegenstücks befindet sich zurzeit in der Entwicklung und liefert erste vielversprechende Ergebnisse. Gleichzeitig unterscheiden sich die Ziele und die Definition Digitaler Zwillinge abhängig von Anwendungsbereich und Anwendungsfall teils deutlich voneinander. Die Beschreibungen und Konzepte Digitaler Zwillinge einer konkreten Anwendung lassen sich deshalb nicht einfach auf neue Anwendungsfelder übertragen.

Unterdessen ist die Batteriezellfertigung eine Schlüsseltechnologie der Energie- und Mobilitätswende, die noch immer von hohen Kosten sowie Ausschussraten geprägt ist und enorm vom Einsatz Digitaler Zwillinge profitieren wird. Um eine Grundlage für die Entwicklung Digitaler Zwillinge in der Batteriezellfertigung zu schaffen, zeigt

dieses Whitepaper, basierend auf bestehenden Arbeiten, eine einheitliche Definition für den Digitalen Zwilling in der Batteriezellfertigung auf. Dafür wurden drei Ausprägungen des Digitalen Zwillings identifiziert: der Gebäudewilling, der Anlagenwilling und der Produktwilling. Jede dieser Ausprägungen gilt es im Detail zu betrachten, sodass Bestandteile der jeweiligen Ausprägungsformen identifiziert, exemplarische Anwendungsfälle aufgezeigt und konkrete Ziele und Herausforderungen definiert werden können. Basierend auf den in diesem Whitepaper beschriebenen Konzepten dient der Digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung zukünftig zur Nachverfolgung, Optimierung und Steuerung von Produkten und Prozessen. Dies kann perspektivisch die Energie-, Rohstoff- und Kosteneffizienz in diesem wichtigen Zukunftsbereich deutlich verbessern.

Der Einsatz Digitaler Zwillinge bietet vielfältige Potenziale in der Batteriezellfertigung

Aktuelle Schätzungen prognostizieren, dass die weltweite Nachfrage nach Lithium-Ionen-Batteriezellen in den kommenden Jahren von 200 Gigawattstunden pro Jahr auf 1,5 bis 3 Terawattstunden im Jahr 2030 steigen wird [1]. Einer der Gründe dafür ist der wachsende Bedarf an Batteriezellen in der Automobilindustrie. Es wird erwartet, dass der Wandel hin zur Elektromobilität im Jahr 2030 für 80 Prozent des gesamten Batteriebedarfs verantwortlich sein wird [2]. Um diesen wachsenden Bedarf zu decken, entstehen zurzeit zahlreiche Batteriezellfertigungen: Allein bis 2030 sollen in Europa rund 40 Batteriefabriken entstehen, die circa ein Drittel des Weltmarktbedarfs abdecken können [3, 4]. Allerdings ist die Herstellung von Batteriezellen hochkomplex und mit einigen Herausforderungen verbunden, wie zum Beispiel der Gewährleistung einer hohen Zellqualität bei gleichzeitig hoher Prozessstabilität und -effizienz. Vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels ist es erforderlich, den Ausstoß von Treibhausgasen und der Einsatz von kritischen Materialien während der Batteriezellproduktion möglichst zu vermeiden [5-7].

In diesem Rahmen hat die Europäische Kommission innerhalb des Green Deals einen Vorschlag für eine Verordnung zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit vorgelegt. Diese enthält unter anderem den verpflichtenden »Battery Passport« für alle ab 2026 in der EU in Verkehr gebrachten Batterien mit einer Kapazität von mehr als 2 Kilowattstunden [8]. Wie bei anderen Initiativen, beispielsweise dem Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz [9], ist das Ziel die Transparenz der Lieferkette zu verbessern.

Ein Ansatz dieses Ziel zu erreichen, besteht in der Verwendung Digitaler Zwillinge als eng verknüpfte, virtuelle Kopien physischer Objekte. Digitale Zwillinge ermöglichen beispielsweise eine Prozessoptimierung während der Produktion und die Rückverfolgung der Produkte aus den Daten, die während des Herstellungsprozesses gewonnen wurden [10]. Neben der Prozessoptimierung befähigen Digitale Zwillinge auch datengetriebene Optimierungen zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks und des Ressourcenverbrauchs.

Dabei ist wichtig, dass die positiven Effekte durch den Einsatz Digitaler Zwillinge, wie eine effizientere und nachhaltigere Produktion, gegenüber ihren ökologischen Kosten überwiegen und die gesamte Ökobilanz der Batteriezellfertigung nicht im Sinne eines sogenannten Rebound-Effekts verschlechtern [11].

Digitale Zwillinge eröffnen vielfältige Potenziale – beispielsweise, die Eigenschaften von Batteriezellen während des Produktionsprozesses zurückzuverfolgen, die Effizienz der Produktionsanlagen zu optimieren oder im Hinblick auf den Ressourceneinsatz. Allerdings befindet sich das Konzept des Digitalen Zwillings noch in seinen Anfängen: Eine klare Definition, Ziele eines Digitalen Zwillings und seine Komponenten sind in der Batteriezellenproduktion noch nicht vorhanden. Zentrale Aufgaben sind hier noch die Identifikation geeigneter Anwendungsfälle, die einen unternehmerischen Mehrwert bieten, und die Gestaltung und technische Implementierung des Digitalen Zwillings.

Dieses Whitepaper beschreibt, wie der Digitale Zwilling einer Batteriezellfertigung gestaltet werden kann. Es bietet einen Überblick über den Status Quo des Digitalen Zwillings in der Produktion und erläutert das Konzept für einen Digitalen Zwilling in der Batteriezellfertigung. Daraus ergeben sich verschiedene Ausprägungsformen des Digitalen Zwillings, deren Bestandteile, Herausforderungen und Strukturen hier vorgestellt werden. Anhand von Anwendungsbeispielen zeigt das Whitepaper den Mehrwert von Digitalen Zwillingen auf, stellt das Zusammenspiel der Ausprägungsformen dar und ordnet den Digitalen Zwilling in die Batteriezellfertigung ein.

Definitionen und Anwendungen Digitaler Zwillinge in der Produktion

Bereits in den 1970er Jahren arbeitete die NASA mit der Idee eines auf der Erde verbleibenden physischen Zwillings eines Raumfahrzeuges, um so Probleme und ihre Lösungen nachstellen und testen zu können [12]. Diese realen Zwillinge wurden nach und nach mit digitalen Abbildern und Simulationen erweitert und ersetzt, um Schlüsse in Bezug auf das reale Verhalten des Originals zu ziehen. Der Begriff »Digitaler Zwilling« wurde erstmals im Jahr 2010 von der NASA verwendet [13]. Seitdem wird das Konzept in Industrie und Forschung diskutiert und weiterentwickelt. Dennoch hat sich bisher kein allgemeines Konzept über Aufbau und Inhalt eines Digitalen Zwillings durchgesetzt – so fehlt dieses Konzept ebenfalls noch für die Batteriezellfertigung.

Vielfältige theoretische Definitionen des Digitalen Zwillings

Der digitale Zwilling ist eine Repräsentation eines Objektes aus der realen Welt in der digitalen Welt. Ein Objekt kann dabei physischer Natur sein, wie bspw. eine Maschine oder ein Gebäude, als auch virtueller Natur, wie ein Plan oder ein Prozess.

In den letzten Jahren sind in der globalen Gemeinschaft viele Definitionen des Digitalen Zwillings erschienen (siehe Tabelle 1). Die Autoren legen ihren Fokus auf teils unterschiedliche Aspekte wie den Einsatz physikalischer Modelle [13] im Gegensatz zu rein datengetriebenen Aggregationen [14].

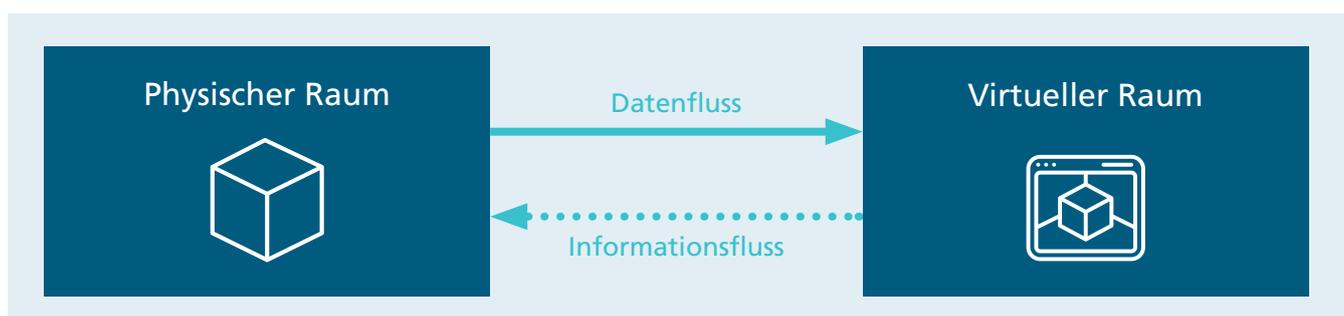
In weiteren Definitionen werden sowohl datengetriebene Aggregationen als auch Modelle ausdrücklich benannt. Darüber hinaus beschreiben die jeweiligen Autoren den Zweck des Digitalen Zwillings als Zusammenführung

der Informationsquellen, die die Eigenschaften und das Verhalten der physischen Entität beschreiben [15-17]. Die Definitionen von Boschert und Rosen [18] sowie Bergs et al. [19] umfassen den gesamten Lebenszyklus der abgebildeten Entität und die damit verbundenen Aggregationen von Informationen.

Eine abgestimmte und standardisierte Definition wird derzeit auf internationaler Ebene von ISO/IEC JTC 1, dem gemeinsamen technischen Komitee der Internationalen Organisation für Normung und der Internationalen Elektrotechnischen Kommission, in der entsprechenden Arbeitsgruppe der SC 41 WG 6 für das Internet der Dinge und den Digitalen Zwilling [20] entwickelt.

Das Internet der Dinge und der Digitale Zwilling werden oft zusammen betrachtet. Beide Konzepte bauen zwar auf den drei zentralen Gestaltungsprinzipien von Industrie 4.0

Abbildung 1: Konzeptionelles Ideal für das Produkt-Lebenszyklus-Management angelehnt an Grieves und Vickers [25]



(Vernetzung, Informationstransparenz und dezentraler Entscheidungsfindung [24]) auf, adressieren aber unabhängig voneinander unterschiedliche Anwendungsbereiche. Während sich das Internet der Dinge auf die Vernetzung und Kommunikation von Assets über das Internet und Beschreibung deren grundlegenden Fähigkeiten in diesem Zusammenhang bezieht, widmet sich der Digitale Zwilling der Informationstransparenz und der Sammlung, Verwaltung, Modellierung sowie Organisation von Daten [24].

Auf der konzeptionellen Ebene stellt der digitale Zwilling eine direkte Verbindung zwischen der realen Welt und dem virtuellen Abbild her, indem er die Objekte so in die virtuelle Welt spiegelt (siehe Abbildung 1), dass der Nutzer auf sie zugreifen und sie entsprechend bedienen kann. Die Interoperabilität, Kommunikation und Integration wird über die Abbildungsregeln realisiert, die den standardisierten Prinzipien der Informations- und Datenmodellierung entsprechen müssen. Nur so kann ein nahtloser Daten- und Informationsfluss zwischen den beiden Räumen gewährleistet werden. Aus diesem Grund wird die Umsetzung des digitalen Zwillings durch zahlreiche Standardisierungsaktivitäten vor allem im internationalen Kontext unterstützt.

Digitaler Zwilling als internationaler Standard

Die erste international abgestimmte normative Beschreibung der wichtigsten Konzepte, der Anwendungsfälle und der Referenzmodelle für den Digitalen Zwilling wird in der Arbeitsgruppe ISO/IEC JTC 1 [20] erarbeitet. Die dort entwickelten Standards bieten eine solide Grundlage für einen strukturierten Ansatz zur Gestaltung von Digitalen Zwillingen.

Auf nationaler Ebene haben sich zahlreiche Organisationen und Verbände unter der Federführung der neu gegründeten Nutzerorganisation »Industrial Digital Twin Association« (IDTA) [26] und in Abstimmung mit der Plattform Industrie 4.0 [27] zusammengeschlossen. Ziel ist es, die Umsetzung des Digitalen Zwillings nach dem Leitbild 2030 für Industrie 4.0 [28] in Deutschland voranzutreiben.

Tabelle 1: Verschiedene Definitionen des Digitalen Zwillings

Autoren	Definition des Digitalen Zwillings
Schafto et al. [13]	»[...] an integrated multiphysics, multiscale, probabilistic simulation of an as-built vehicle or system that uses the best available physical models, sensor updates, fleet history, etc., to mirror the life of its corresponding flying twin. The Digital Twin is ultra-realistic and may consider one or more important and interdependent vehicle systems, [...]«
Boschert and Rosen [18]	»[...] a comprehensive physical and functional description of a component, product or system, which includes more or less all information which could be useful in all – the current and subsequent – life cycle phases.«
Stark et al. [15, 17]	»A Digital Twin is the digital representation of a unique asset (product, machine, service, product service system or other intangible asset), that compromises its properties, condition and behavior by means of models, information and data.«
T. Kuhn [21]	»Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt. Sie beschreiben sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge wie zum Beispiel Dienste, indem sie alle relevanten Informationen und Dienste mittels einer einheitlichen Schnittstelle zur Verfügung stellen. Für den digitalen Zwilling ist es dabei unerheblich, ob das Gegenstück in der realen Welt schon existiert oder erst existieren wird.«
Boschert et al. [22]	»[...] refers to a description of a component, product, system or process by a set of well-aligned, descriptive and executable models: The Digital Twin is the semantically linked collection of the relevant digital artifacts including design and engineering data, operational data and behavioral descriptions. The Digital Twin evolves with the real system along the whole life cycle and integrates the currently available and commonly required data and knowledge.«
Kunath and Winkler [14]	»[...] the Digital Twin of a physical object [is] the sum of all logically related data, i.e. engineering data and operational data, represented by a semantic data model.«
Industrial Internet Consortium [16]	»A digital twin is a formal digital representation of some asset, process or system that captures attributes and behaviors of that entity suitable for communication, storage, interpretation or processing within a certain context. The digital twin information includes, but is not limited to, combinations of the following categories: <ul style="list-style-type: none"> ■ physics-based model and data, ■ analytical models and data, ■ time-series data and historians, ■ transactional data, ■ master data, ■ visual models and computations.«
ISO/IEC JTC1 / SC 41 WG 6 [23]	[A digital twin is a] »digital representation of a target entity with data connections that enable convergence between the physical and digital states at an appropriate rate of synchronization. Digital twin have some or all of the capabilities of connection, integration, analysis, simulation, visualization, optimization, etc. Digital twin may provide an integrated view throughout the lifecycle of the target entity.«

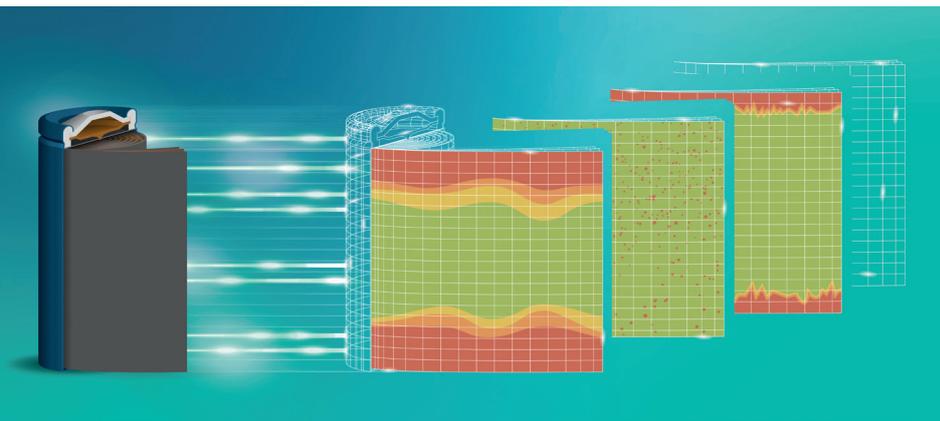


Abbildung 2: Durch Verknüpfen von Prozessparametern und Positionsdaten kann die Qualität der Zelle abgeschätzt und vorhergesagt werden

Eine der wesentlichen Rahmenbedingungen für die Spiegelung eines Objektes in der Informationswelt ist die eindeutige Beschreibung seiner Eigenschaften [29]. Daher ist es eine der zentralen Aufgaben des Digitalen Zwilling, jedes Objekt mit seinen fachlichen Funktionen und spezifischen Eigenschaften so abzubilden, dass es eindeutig beschrieben werden kann. Die Abbildung kann bspw. entlang der Ebenen des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI 4.0) [30] und den damit verbundenen Lebenszyklusphasen erfolgen.

Als branchenübergreifende, technische Umsetzung wird international der Standard für die Asset Administration Shell (dt. Verwaltungsschale) [31] mit der IEC 63278-Serie aktiv in der Arbeitsgruppe IEC/TC 65/WG 24 [32] entwickelt. Neben den wichtigsten grundsätzlichen Informationen zum Objekt beinhaltet die Verwaltungsschale die sogenannten Teilmodelle [31], die für eine definierte Struktur sorgen und eine standardisierte Beschreibung von Eigenschaften, Parametern, Variablen und Fähigkeiten eines Objekts ermöglichen.

Fehlende praktische Umsetzung in der Batteriezellfertigung

In der Praxis wurde bisher noch kein Digitaler Zwilling einer vollständigen Batteriezellproduktion inklusive des Fabrikgebäudes, der Produktionsmaschinen und des Produkts implementiert und veröffentlicht.

In anderen Branchen und im Forschungsbetrieb werden Digitale Zwillinge für einzelne Maschinen, Fertigungslinien und Produkte angewandt, die ein großes Potenzial für einen branchenübergreifenden Wissenstransfer auf die Batteriezellfertigung aufweisen. Beispiele sind das Design und die Implementierung eines Digitalen Zwilling in einer vernetzten Micro Smart Factory [33], die Verwendung von Digitalen Zwillingen zur Anomalie-Detektion [34], zur adaptiven Prozessplanung und -optimierung [35] oder die Implementierung eines Digitalen Zwilling der Batterie für die Optimierung der Nutzung und Evaluierung der Degradierung [36]. Gute Übersichten über weitere Veröffentlichungen zur Verwendung Digitaler Zwillinge bieten Kritzinger et al. [37], Fuller et al. [38] und Liu et al. [39].

Die Annahme, dass wenige fortgeschrittene praktische Umsetzungen von Digitalen Zwillingen bekannt und öffentlich einsehbar sind, deckt sich mit den Umfragen, die von Detecon [40] im Rahmen einer Studie veröffentlicht wurden: Während 92 Prozent der beteiligten Unternehmen in dieser Studie angaben, dass der Digitale Zwilling einen merklich positiven Einfluss auf zukünftige Digitalisierungsprojekte haben wird, waren es 2019 nur zwölf Prozent der befragten Unternehmen, die einen der Definition der jeweiligen Befragten entsprechenden Digitalen Zwilling bereits einsetzen.

Vor dem Hintergrund der unterschiedlichen Definitionen und der fehlenden beispielhaften praktischen Umsetzungen von Digitalen Zwillingen für die Batteriezellfertigung ist es erforderlich, ein einheitliches Verständnis davon zu entwickeln. Nur mit einheitlichem, allgemeingültigem Begriffsverständnis und entsprechender Ausgestaltung der Bestandteile des Digitalen Zwilling für die Batteriezellfertigung kann eine erfolgreiche Umsetzung sichergestellt werden. Wie diese Bestandteile für die Batteriezellfertigung ausgestaltet werden können, ist Teil der Konzeptionierung und Umsetzung des Digitalen Zwilling im Projekt »Forschungsfertigung Batterie zelle (FoFeBat)«.

Verständnis und Entwicklung eines Digitalen Zwillings in der Batteriezellfertigung

Im Großprojekt Forschungsfertigung Batteriezele («FoFeBat» gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom Land Nordrhein-Westfalen) wurde mit acht Projektpartnern das Konzept eines Digitalen Zwillings für die Batteriezellfertigung entwickelt. Dafür erarbeiteten die Partner gemeinsam die Ziele und Bestandteile bis hin zur infrastrukturellen Einbindung.

Die Batteriezellfertigung

Für eine Vielzahl der Anwendungen von Batteriezen hat sich die Lithium-Ionen-Technologie bislang als gängige Lösung herausgestellt [41]. Die Produktion von Batteriezen lässt sich in die Elektrodenfertigung, die Zella-ssemblierung und die Formierung der Zellen unterteilen [42]. Die Elektrodenfertigung bildet einen entscheidenden Prozessschritt der Zellproduktion. Die beiden Elektroden – Kathode und Anode – bestimmen die Kerneigenschaften einer Zelle und sind maßgebend für deren Qualität [42]. Ihre jeweilige Herstellung folgt dabei gleichen Prozessschritten. Die Elektrodenfolien werden jeweils mit einer Paste aus Aktivmaterialien beschichtet, getrocknet, kalandriert, in das benötigte Format geschnitten und abschließend nochmals unter Vakuum getrocknet [43, 44].

In der Assemblierung werden Anode, Kathode und Separator durch Wickeln, Falten oder Stapeln in den funktionalen Zellaufbau überführt und inklusive Isolatoren in das Gehäuse eingeführt. Die Zelle wird anschließend mit Elektrolyt befüllt und verschlossen [44]. Nach der Formierung werden die Funktionalitäten der Zellen getestet [42].

Abbild einer physischen Entität im digitalen Raum

Im ersten Schritt auf dem Weg zum Digitalen Zwilling der Batteriezellfertigung müssen genaue Ziele und Erwartungen definiert werden. Hierzu wurden aus der Literatur, die für die Batteriezellfertigung an der Fraunhofer FFB relevanten Ziele konsolidiert. Der Digitale Zwilling ist das Abbild einer physischen Entität im digitalen Raum und wird unter anderem mit Daten aus dem physischen Raum gespeist. Laut Stark et al. [17] und dem Industrial Internet Consortium [16] schließt der Digitale Zwilling »ausgewählte Merkmale, Zustände und Verhalten« der physischen Entität ein. Ziele können vielfältig sein und sind abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. Daher orientiert sich die Entwicklung des Digitalen Zwillings der Batteriezellfertigung entsprechend direkt an den auftretenden Anwendungsfällen.

Allgemeine Ziele sind [17]:

- Informationsbeschaffung und -analyse [45],
- Informationsbereitstellung,
- Entscheidungsunterstützung [14],
- Steuerung autonomer Systeme [46] und
- Befähigung der Optimierung des physischen Raums.

Hier wird vor allem Wert auf einen übergreifenden Informationsaustausch gelegt [21].

Mehrwert eines Digitalen Zwillings

Für welchen Anwendungsfall ein Digitaler Zwilling entwickelt wird, hängt stark davon ab, welche physische Entität er repräsentiert. Allgemeine Anwendungsfälle finden sich vor allem in der Simulation und Datenanalyse. Die Anwendungsfälle in der Datenanalyse lassen sich in vier Stufen klassifizieren: deskriptiv, diagnostisch, prädiktiv und präskriptiv. Hier gibt es in der Prozess- und Produktoptimierung, Prozessüberwachung und -vorhersage viele verschiedene Anwendungen.

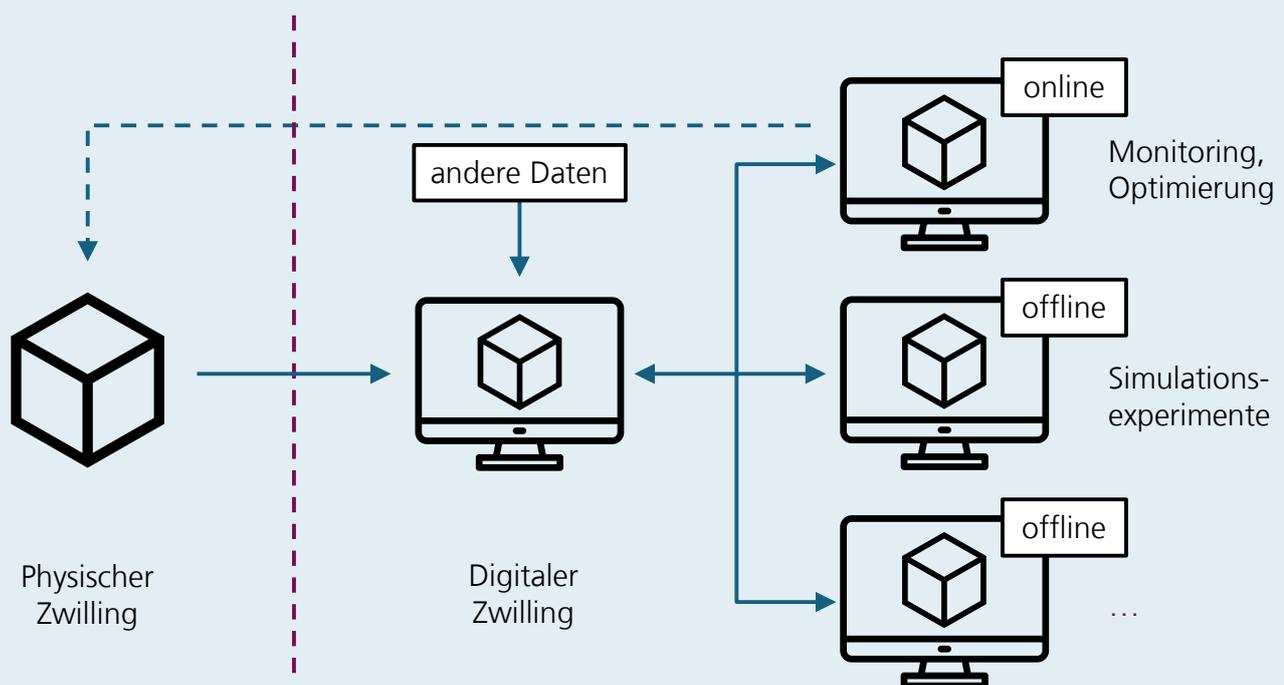
Konkrete Beispiele, die mit einem unmittelbaren oder mittelbaren Mehrwert einhergehen, sind die vorrausschauende Wartung von Anlagen, die Qualitätsvorhersage der Produkte, die Rückverfolgbarkeit von Produkten durch den Prozess (Traceability), die virtuelle Inbetriebnahme von Anlagen und Predictive Environment Control von Gebäuden [47]. Für immaterielle Objekte wie Prozesse, Materialflüsse oder Dienstleistungen können ebenfalls digitale Repräsentationen geschaffen werden. Ein Prozess wird repräsentiert als Aggregation von Digitalen Zwillingen und ihren zeitlichen Änderungen.

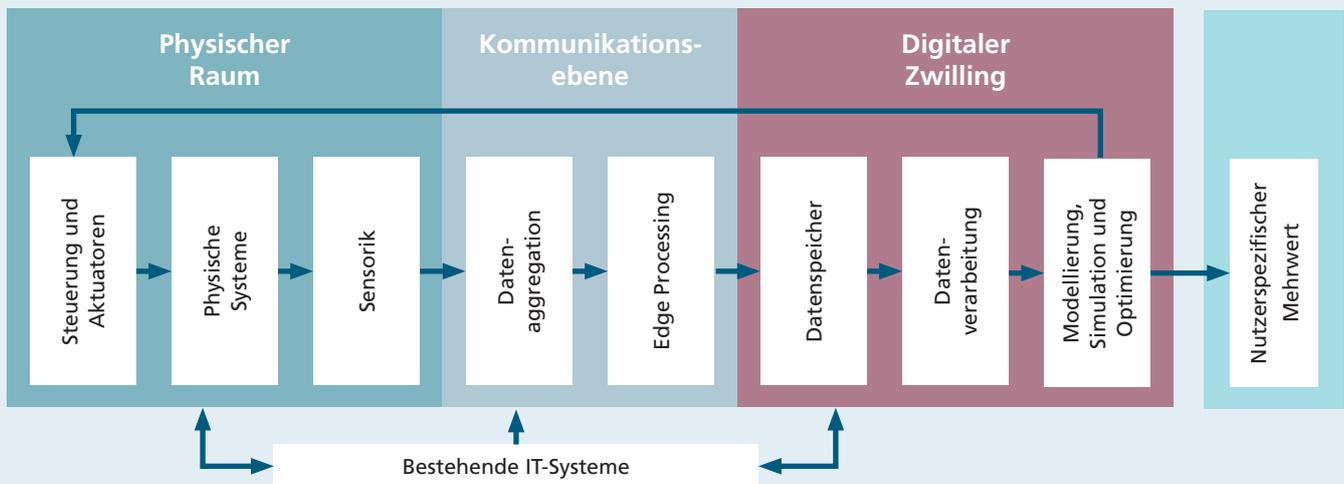
Abbildung 3: Instanzen eines Digitalen Zwillings (angelehnt an [16])

Digitaler Zwilling als Befähiger für Simulationen

Die Literatur zeigt unterschiedliche Konzepte auf, wie Digitale Zwillinge und Simulationen ineinandergreifen können. Daraus lässt sich ableiten, dass Simulationen ein möglicher, wenngleich kein notwendiger Bestandteil Digitaler Zwillinge in der Batteriezellenfertigung sind. Abhängig vom Anwendungsfall kann es sinnvoll sein Simulationen zu integrieren. Anhand von Simulationen kann die Produktion effizienter gestaltet werden. Beispielsweise können bei virtuellen Inbetriebnahmen vor dem Einfahren der Anlage Zeit und Kosten gespart oder Ramp-Up-Zeiten nach Veränderungen im Prozessablauf verkürzt werden. Die Ausführung virtueller Experimente kann die Materialkosten reduzieren und Anlagen können optimal genutzt werden.

Es kann verschiedene Instanzen eines Digitalen Zwillings geben, die abhängig vom Anwendungsfall unterschiedliche Fragen beantworten können und sich auf unterschiedlichen Ebenen befinden können [16]. Abbildung 3 zeigt verschiedene Instanzen eines Digitalen Zwillings, die in Online- und Offline-Instanzen





unterteilt werden. Online-Instanzen haben einen direkten Link zum physischen Zwilling, dem repräsentierten physischen Objekt, und können darüber Befehle und Informationen übermitteln. Offline-Instanzen können auf Basis aktueller Werte ein Verhalten simulieren ohne direkten Einfluss auf das physische Gegenstück auszuüben.

Digitale Zwillinge können Simulationen und Auswertungen ermöglichen. Dabei können entlang des Lebenszyklus eines Produkts Modelle und Simulationen wieder zurück in den Digitalen Zwilling überführt werden. Simulationen können sowohl innerhalb als auch außerhalb des Zwillings ablaufen [17].

Innerhalb des Digitalen Zwillings existiert ein unmittelbarer Informationsaustausch zwischen Simulation und anderen Ausprägungsformen über geeignete Schnittstellen. Aber auch außerhalb des Digitalen Zwillings gelagerte Simulationen können als Informationsquellen für Digitale Zwillinge dienen und wiederum Daten aus dem Digitalen Zwilling nutzen. Hier sollte der Zugriff zwischen Simulationsmodell und Digitalem Zwilling einen bidirektionalen Datenaustausch ermöglichen.

Dies kann in Form eines Feedback-Loops geschehen, der, abhängig vom Anwendungsfall, übergreifend und automatisiert erfolgt. Dafür sind verschiedene Schnittstellen notwendig, um die Anwendungen kompatibel an den Digitalen Zwilling anbinden zu können. Diese Daten werden darüber hinaus für individuelle, nicht automatisierte Auswertungen oder zu bestimmten Zeitpunkten benötigt. Dies bedarf eines flexiblen und manuellen Zugriffs auf Analyse- oder Simulationsergebnisse. Eine solche Herangehensweise ermöglicht es zum einen, Daten und Ergebnisse anderer Analysen und Simulationen aus dem Digitalen Zwilling als Inputparameter zu verwenden. Zum anderen gewinnen Simulationsergebnisse auf Basis aktueller Eingabeparameter an Relevanz für den weiteren Prozess der Batteriezellfertigung. Zudem profitieren die mit dem Digitalen Zwilling verbundenen Anwendungen von den Simulationsergebnissen, indem diese von anderen Digitalen Zwillingen genutzt, ausgewertet und weiter analysiert werden können. So existiert eine umfassendere Daten- und Informationsgrundlage für bessere Verhaltensanalysen und Prognosen.

Abbildung 4: Framework eines Digitalen Zwillings mit Verknüpfung zu anderen IT-Systemen (angelehnt an [48])

Der Digitale
Zwilling
bündelt die
Daten der
Batteriezelle
entlang ihres
Lebenszyklus
und ermöglicht
Analysen sowie
Vorhersagen.

Datenaggregation in einem Zugriffspunkt

Eine zentrale Frage besteht darin, welche technischen Funktionalitäten der Digitale Zwilling umfasst und wie er mit bestehenden Strukturen interagiert und in diese eingebettet ist. Ein Digitaler Zwilling aggregiert Daten in einem Zugriffspunkt und stellt diese für unterschiedliche Zwecke bereit. Zudem kann er Informationen über standardisierte Schnittstellen verfügbar machen. Gleichzeitig soll der Digitale Zwilling keine vorhandenen IT-Systeme ersetzen, sondern greift auf diese zu. Er ist eine Membran, die die benötigten Informationen basierend auf den unterliegenden Systemen und Datenbanken aggregiert und bereitstellt.

Die vorhandenen IT-Systeme, auf die der Digitale Zwilling zugreift, übernehmen beispielsweise die Datenerfassung (Produktionsdaten, Lieferantendaten, Gebäudedaten etc.), produktionsbezogene Funktionalitäten (ISA95¹; Auftragsabwicklung, Produktionssteuerung, Instandhaltung etc.), Schnittstellen (IIoT, ERP, MES etc.²) und weitere Aufgaben je nach betrachtetem Bereich (APS, CRM, BIM, ...³).

Framework eines Digitalen Zwillings

Ein Digitaler Zwilling ist, wie in Abbildung 4 dargestellt, die digitale Nachbildung eines physischen Objekts. Eine Kommunikationsschnittstelle verbindet das physische Objekt mit seinem digitalen Gegenstück. Über diese Schnittstelle können die Daten, Informationen und Modelle unidirektional oder bidirektional

fließen und sowohl Simulationen in der digitalen Ebene als auch die Steuerung der physischen Ebene ermöglichen. Schnittstellen zu bestehenden IT-Systemen, Services und weiteren Digitalen Zwillingen ergänzen die Informationen, die direkt aus dem physischen Zwilling abgeleitet werden. Schließlich ermöglicht der Digitale Zwilling eine anwendungs- und nutzungsabhängige Gewinnung von Mehrwerten. Dies können individuelle Anwendungsfälle sein, die durch den Digitalen Zwilling möglich werden, beispielsweise Visualisierungen.

Aufbauend auf den vorgestellten Definitionen für Digitale Zwillinge ergibt sich für den Digitalen Zwilling in der Batteriezellfertigung folgende Definition:

»Der Digitale Zwilling ist eine digitale Repräsentation eines spezifischen Gegenstands. Der Digitale Zwilling umfasst die

- Eigenschaften,
- Zustände und
- das Verhalten

des Gegenstands über

- Daten,
- Modelle und
- Informationen.« [15]

Die Datenbasis umfasst alle Daten, Modelle und Simulationen aus dem gesamten Lebenszyklus der Batteriezelle, die in jeder der Lebenszyklusphasen nützlich sein können.

1 International Society of Automation

2 Industrial Internet of Things (IIoT); Enterprise-Resource-Planning (ERP); Manufacturing Execution System (MES)

3 Advanced Planning Scheduling (APS); Customer Relationship Management (CRM); Building Information Model (BIM)

Ausprägungen des Digitalen Zwillings für die Batteriezellfertigung

Anlagenzwilling, Produktzwilling und Gebäudezwilling

Digitale Zwillinge können im Rahmen der Batteriezellfertigung für die Produktionsanlage, für die Batteriezelle selbst sowie für das Gebäude entwickelt werden. Diese Formen bieten einen hohen Nutzen, sind repräsentativ für die Batteriezellfertigung und können physisch getrennt betrachtet werden.

Je nach Anwendungsfall spielen sie unterschiedliche Rollen in der Batteriezellfertigung (siehe Abbildung 5):

Digitaler Anlagenzwilling: Dieser umfasst alle produktionsrelevanten Anlagen in der Fabrik.

Digitaler Produktzwilling: Dieser bezieht Informationen, Qualitätsdaten und weitere Merkmale zu Rohstoffen und allen Zwischen- und Endprodukten einschließlich der Parameter verschiedener Verarbeitungsprozesse ein.

Digitaler Gebäudezwilling: Dieser enthält alle für den Aufbau und den Betrieb des Fabrikgebäudes notwendigen Bestandteile und Informationen.

Die Digitalen Zwillinge der Anlage, des Produkts oder des Gebäudes werden im Digitalen Zwilling der Batteriezellfertigung zusammengeführt.

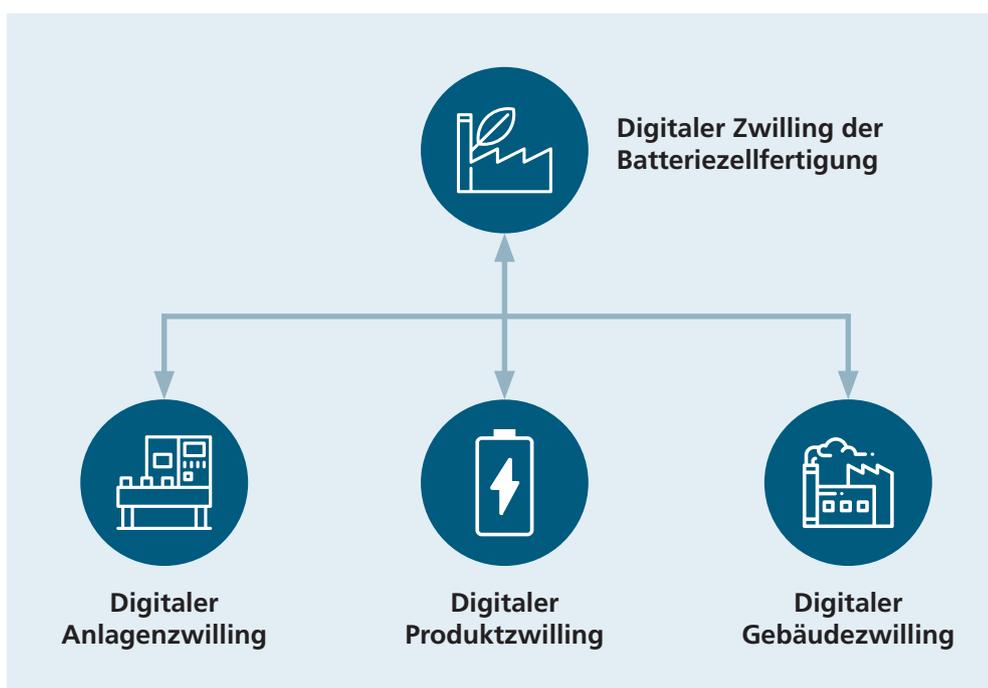


Abbildung 5: Der Digitale Zwilling der Batteriezellfertigung und die drei definierten Ausprägungsformen Digitaler Zwillinge



Der Digitale Anlagenzwilling

Verknüpfung von Produktionsmaschinen und prozessübergreifende Optimierung

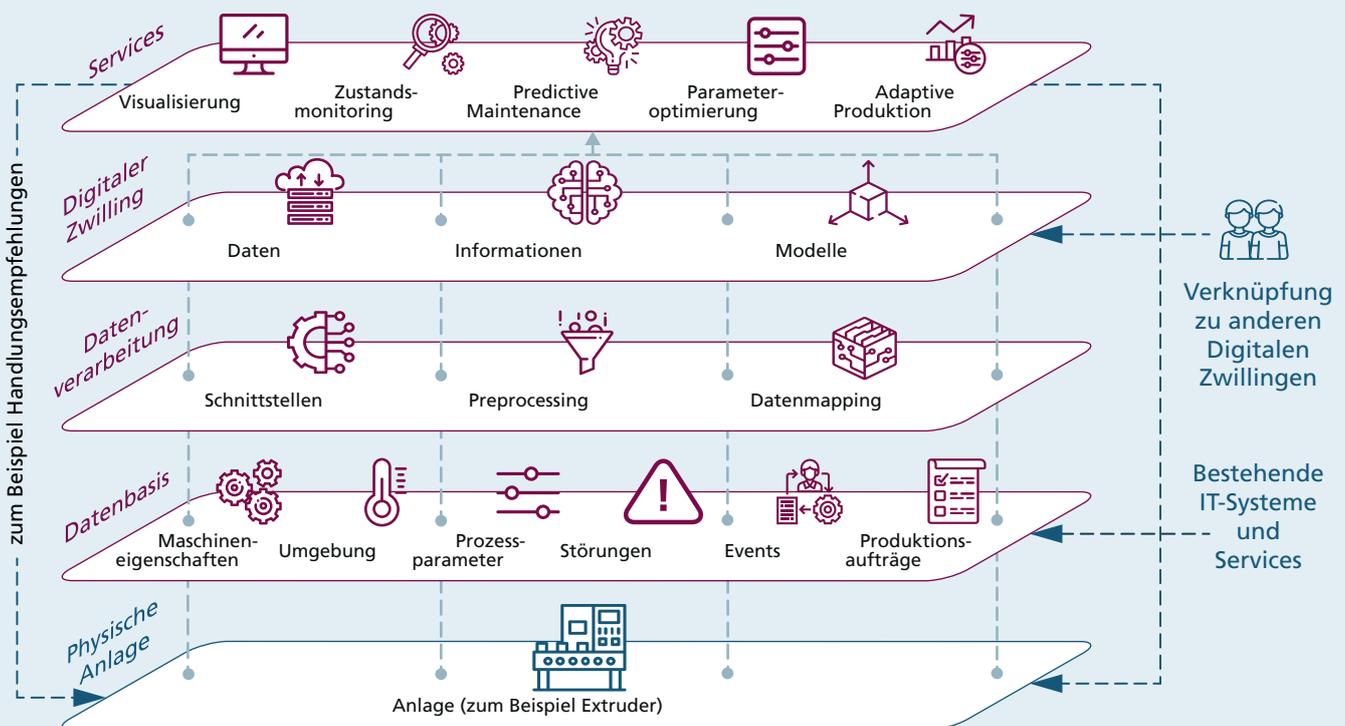
Hauptaugenmerk dieser Ausprägung des Digitalen Zwillings sind die Produktionsanlagen der Batteriezellfertigung. Digitale Anlagenzwillinge sollen es ermöglichen, Maschinenzustände und Prozessdaten zu überwachen. Datenanalysen können für eine bessere Anlageninstandhaltung, zur Verschleißreduktion und zur Verkürzung von Wartezeiten genutzt werden. Der Anlagenzwilling bietet zudem durch Aggregation und Visualisierung der jeweils relevanten Daten beispielsweise für Produktionsmitarbeitende, Maschinenverantwortliche oder für die Produktionsplanung die Möglichkeit einer schnelleren Entscheidungsfindung. Ziel ist es, die Effizienz der Anlagen und des jeweiligen Prozesses zu erhöhen, um eine ökonomische und nachhaltige Produktion zu erreichen. Die einzelnen Anlagenzwillinge bilden dabei ebenfalls eine Grundlage für die digitale Verknüpfung der gesamten

Prozesskette. Deren ganzheitliche Betrachtung und Optimierung bietet in der Batteriezellfertigung aufgrund der vielen Prozessschritte von der Elektrodenfertigung über die Assemblierung bis zur Formierung der fertigen Zelle ein enormes Potenzial.

Datengrundlage aus der realen Anwendung

Sofern erfolgreich konzipiert und implementiert, bietet der Anlagenzwilling ein realistisches Abbild der Anlage. Daher muss eine möglichst umfassende Datengrundlage geschaffen werden, die unter anderem Prozessdaten, Informationen zu Anlagenzuständen sowie Daten zu Events enthält. Besonders die Qualität der Event-Daten, die zum Beispiel Informationen und Zeitpunkte von Wartungen und besonderen Zuständen der Anlage enthalten, sind abhängig von Eingaben der Mitarbeitenden aus der Instandhaltung und Anlagenbedienende. Diese Eingaben sind – neben den

Abbildung 6: Aufbau des Digitalen Anlagenzwillings



Prozess- und Zustandsdaten der Anlage sowie den Angaben des Anlagenherstellers, die aus Fernwartungen resultieren – die Grundlage nachfolgender prädiktiver Modelle der Anlage (vgl. [49]). Um den Zustand der Maschine so realistisch wie möglich abzubilden, ist es erforderlich, Prozessbeteiligte dafür zu sensibilisieren, Event-Daten realitätsgetreu aufzunehmen. Sofern die Daten manuell erzeugt werden, besteht die Herausforderung in der fehlenden Standardisierung der Eingaben. Deshalb müssen verschiedene standardisierte Eingabemethoden in die Konzeption einbezogen werden, um eine möglichst schnelle Verwertung für den Digitalen Anlagenzwilling zu ermöglichen beziehungsweise zu vereinfachen.

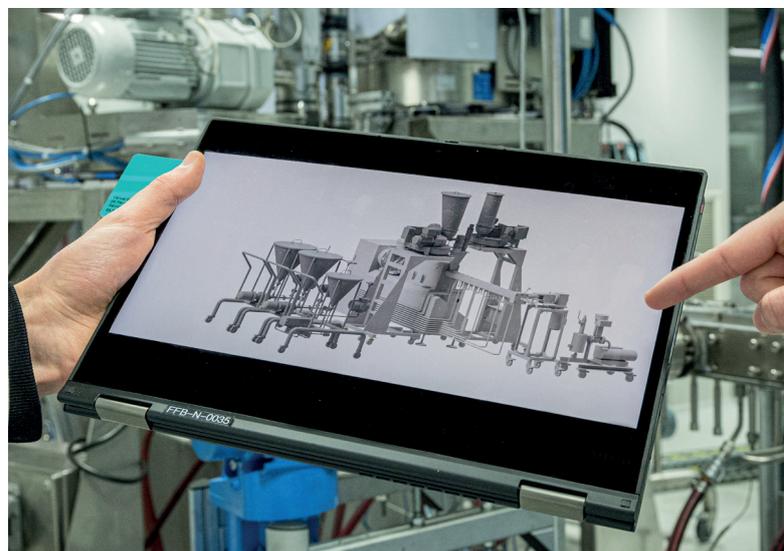
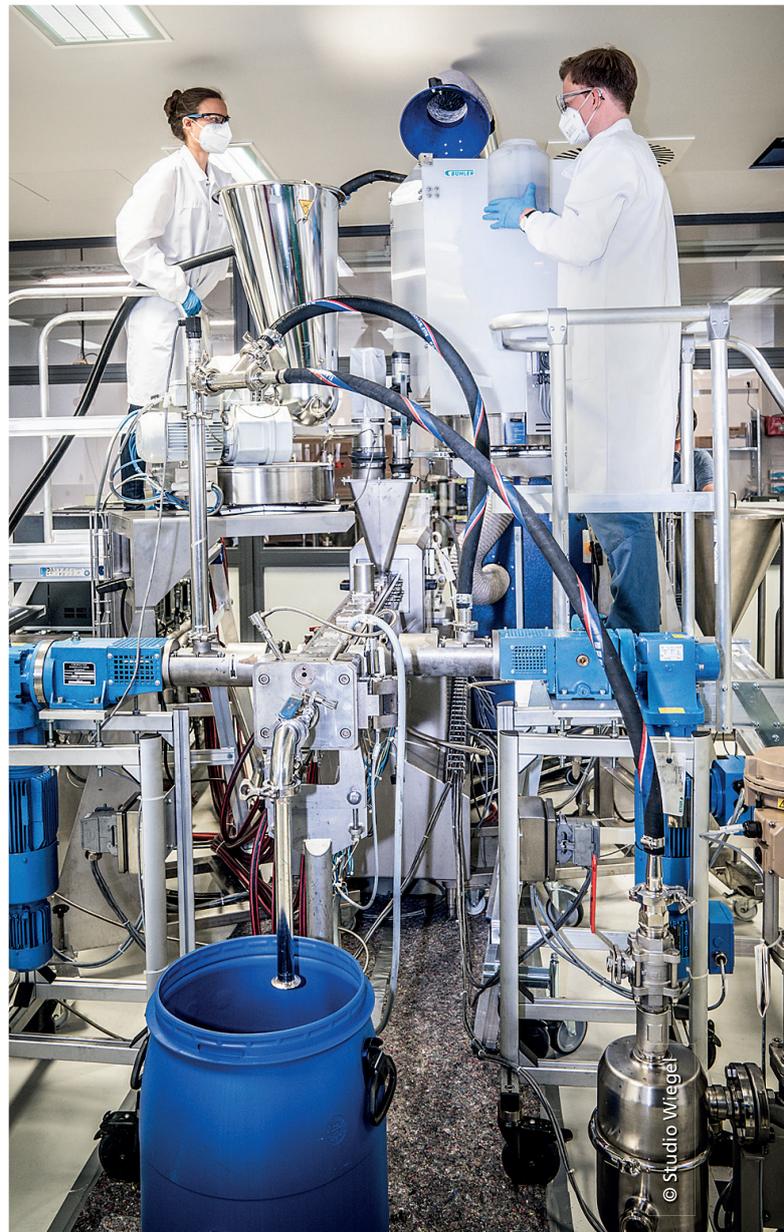
Verschiedene Daten charakterisieren den Digitalen Anlagenzwilling

Auf physischer Seite ist die Anlage zu betrachten. Dabei können Abmessungen, verbaute Materialien und weitere Eigenschaften aber auch Meta-Informationen wie Herstellerangaben und Standort relevant für das Abbild der Anlage sein. Die Anlage kann für die spätere Betrachtung in Module und deren Bauteile untergliedert werden. Dies kann sinnvoll sein, wenn die Subsysteme eigene Sensoren enthalten und als separate Anwendungsfälle zu betrachten sind. Außerdem ist auf physischer Seite eine Bestandsaufnahme der verschiedenen Rollen der handelnden Personen notwendig, um später im Digitalen Zwilling entsprechende Datenzugriffe und Sichten zu gewähren.

Neben Abmessungen und CAD-Modellen sowie Prozessdaten der Anlage, die die Maschineneigenschaften abbilden, sind auch Daten aus IT-Systemen und Modellen für den Anlagenzwilling zu betrachten. Als Beispiel können Lifecycle-Daten dienen, aber auch historische oder geplante Produktionsaufträge der Anlage. Auch die Einbindung von Simulationen ist denkbar.

Produktionsoptimierung durch Vernetzung von Anlagen und Produkt

Die Zustände, Eigenschaften und das Verhalten der Anlage werden im Digitalen Anlagenzwilling mittels der erfassten Datenbasis, ergänzender Informationen und Modellen abgebildet (siehe Abbildung 6). Die Aggregationen, die auch mit Informationen aus weiteren Digitalen Zwillingen angereichert werden können, werden in verschiedenen Anwendungsfällen in Form bereitgestellter Services durch den Digitalen Zwilling ermöglicht und so nutzbar. Daraus leiten sich Handlungsempfehlungen ab, die sich zur Optimierung der Anlage eignen können.

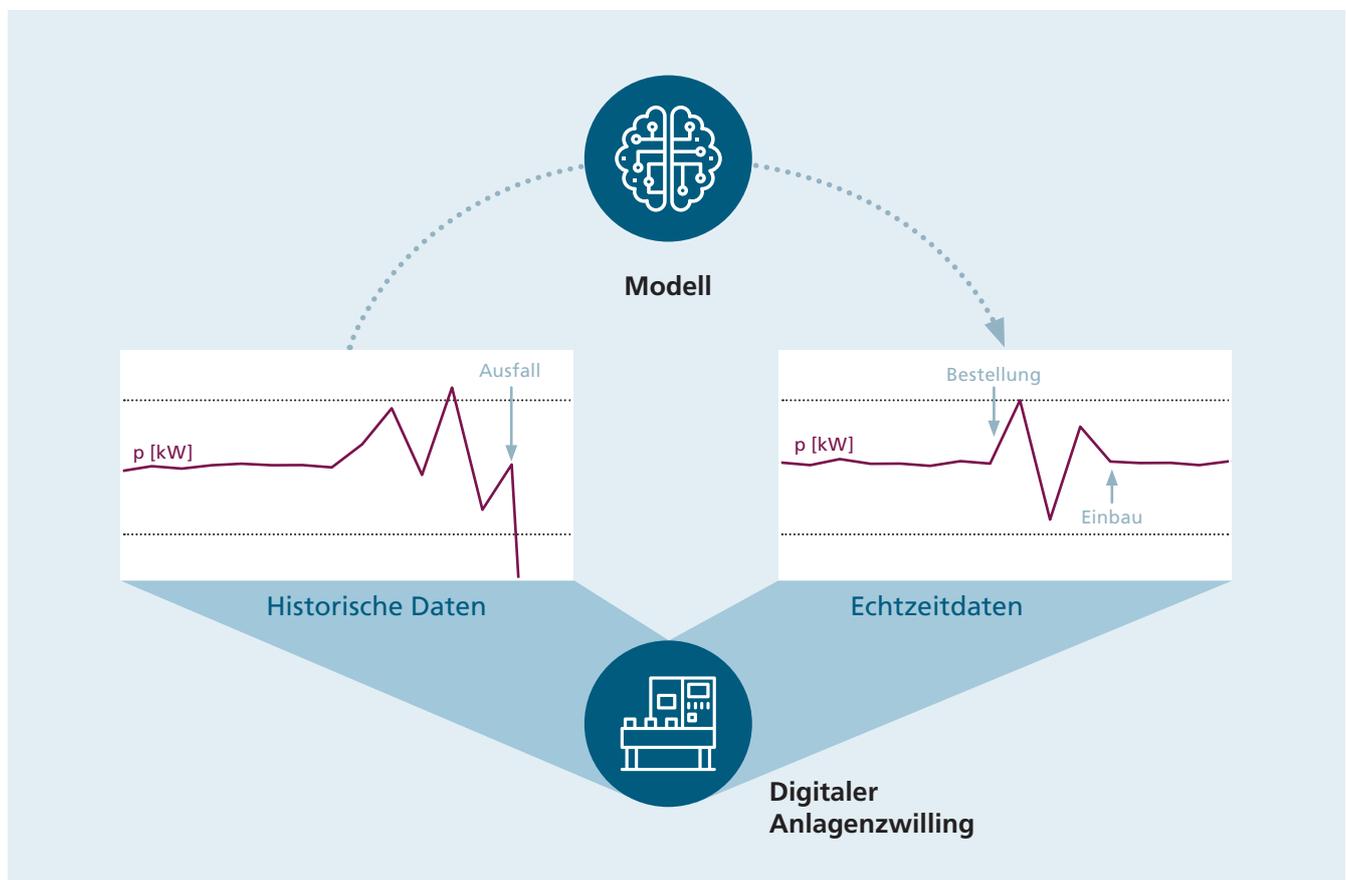


Der Digitale Anlagenzwilling als Befähiger für Anwendungsfälle – Predictive Maintenance

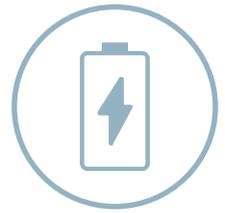
Der Anlagenzwilling ermöglicht Predictive Maintenance: Basierend auf (historischen) Prozessdaten und Event-Daten zu Störungen, Ausfällen und Wartungen kann ein Modell erstellt werden, das den Zustand der Maschine abbildet [49]. So können auf Basis der aktuellen Daten und mit Hilfe eines geeigneten Modells der Zustand sowie die Restnutzungsdauer von Anlagenkomponenten abgeschätzt werden. Daraus ergeben sich intelligentere Intervalle für den Austausch von Anlagenteilen, die teure, ungeplante Ausfallzeiten und hohe Lagerkosten in Zukunft verhindern und so die Produktionseffizienz

steigern können. Gleichzeitig werden – im Gegensatz zum periodischen Austausch von Anlagenteilen – der Nutzungszeitraum der Einzelteile optimiert und dadurch Kosten eingespart sowie Anlagenkomponenten nachhaltiger verwendet. Predictive Maintenance- Modelle können daher auch in den Anlagenzwilling zurückgespeist werden und bilden den Zustand von Anlagen(-teilen) sowie deren Restnutzungsdauer als eine beispielhafte Aggregation der Daten des Anlagenzwillings ab. Der Digitale Anlagenzwilling bietet durch historische Daten und durch die Abbildung aktueller Zustände eine geeignete Datengrundlage für Predictive Maintenance. Ein Anwendungsfall am Beispiel der Motorleistung des Extruders ist schematisch in Abbildung 7 skizziert.

Abbildung 7: Der Digitale Anlagenzwilling ermöglicht es, anhand historischer Daten der Motorleistung vorherzusagen, wann ein neues Bauteil bestellt und eingebaut werden sollte, um so vorausschauend Ausfallzeiten zu verhindern



Der Digitale Produktzwilling



Virtuelle Repräsentanz entlang des gesamten Produktlebenszyklus

Digitale Produktzwillinge in der Batteriezellfertigung ermöglichen eine strukturierte Konsolidierung und Verwaltung von Daten, Informationen und Modellen, die einer konkreten Instanz eines physischen Zwischen- oder Endprodukts, bspw. einer Elektrodenrolle oder einer Batteriezelle, zugeordnet sind. Beschreibende und technische Produktdaten werden in einer globalen Datenstruktur zusammengeführt und semantisch vernetzt. So kann der Aufbau und die Konfiguration eines Produkts digital abgebildet und mit Daten zu externen Umwelteinflüssen und relevanten Prozessdaten angereichert und verknüpft werden. Beispiele sind etwa Maschinenparameter aus einzelnen Prozessen wie Sollwerte für den Kalanderspalt oder Sensorwerte, die während einzelner Fertigungsschritte erfasst werden.

Der Digitale Produktzwilling ermöglicht es, eine virtuelle Repräsentanz der Produkte zu schaffen, die sich über die komplette Prozesskette der Batteriezellfertigung hinweg dynamisch weiterentwickelt. Auf diese Weise soll eine umfassende Traceability der Produkte in Bezug auf die zugehörigen Materialien, Rahmenbedingungen und Produktionsschritte erreicht werden. Neben einer effektiven Qualitätssicherung durch produktbezogene Erkenntnisse ermöglicht es etwa die systematische Rückkopplung von Qualitätsmerkmalen eines Produkts mit bestimmten Produktionsparametern, Verbesserungspotenziale der Produkte und Prozesse zu identifizieren und deren Qualität kontinuierlich zu verbessern. Die Digitalen Produktzwillinge ermöglichen es, die Eigenschaften aller beteiligten Zwischenprodukte sowie Prozessdaten vorgelagerter Fertigungsschritte zu berücksichtigen und durch Verknüpfung kontextsensitiv auf das Produktionsumfeld einzuwirken.

Eine Besonderheit des Digitalen Produktzwillings ist die große Anzahl und Vielfalt der Zwischenprodukte, die untereinander referenziert werden müssen. Dazu zählen die

Elektrodenpasten und Elektrodenrolle für die Anode und Kathode, die im Digitalen Zwilling der Batterie vereint werden.

Digitale Produktzwillinge können auch in weiteren Phasen des Produktlebenszyklus Mehrwerte schaffen: So können Simulationen auf Basis eines Digitalen Produktzwillings die Effizienz der Produktentwicklung verbessern. Weiterhin kann die Auswertung von Nutzungsdaten des Endprodukts in Kombination mit den gespeicherten Produktdaten eine individuelle Entscheidungsunterstützung für die Zweitverwertung und das Recycling am Ende des Lebenszyklus bereitstellen, was eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft begünstigt.

Informationsmodelle und Traceability-Systeme als Voraussetzung für den Digitalen Produktzwilling

Für eine erfolgreiche Umsetzung des Digitalen Produktzwillings wird ein Traceability-System benötigt, das anfallende Daten semantisch und kontextbezogen zuordnet. Hierfür wird ein Informationsmodell benötigt, das auf den Prozess der Batteriezellproduktion angepasst ist, und das sowohl die unterschiedlichen Eigenschaften entlang des Produktionsprozesses als auch den jeweiligen Kontext der Daten berücksichtigt. Zu den benötigten Informationen und Eigenschaften gehören unter anderem Wareneingangskontrollen, Materialeigenschaften, Prozessparameter und Offline- sowie Inline-Qualitätsmessungen. Um dieses Informationsmodell systematisch aufzubauen, bietet es sich an, den gesamten Produktionsprozess in vorab definierte Produktionsabschnitte zu unterteilen. Für diese Schritte sind dann Teilinformationsmodelle aufzubauen, die aggregiert das Gesamtinformationsmodell der Batteriezelle ergeben. Beispiele für Teilinformationsmodelle sind die digitalen Abbilder von Anode, Kathode oder Gehäuse. Mithilfe der Teilinformationsmodelle können darüber hinaus Produkte von Zulieferern in den Produktionsprozess integriert werden, indem neben dem physischen



Das Tracking und Tracing durch den kompletten Fertigungsprozess ist unverzichtbar für die Erstellung und Nutzung eines Produktzwillings.

Zwischenprodukt ebenfalls Daten in Form von Teilinformationsprozessen übertragen werden. Das Traceability-System verknüpft die Daten der Teilinformationsmodelle, sodass alle Daten und Informationen von der Anlieferung der Rohstoffe bis zur fertigen Batterie zelle den einzelnen Zellen zugeordnet und kontextabhängig zur Verfügung gestellt werden können. Dafür müssen sowohl Schnittstellen für den Endanwender als auch für Softwaresysteme definiert werden.

Komplexe Prozessketten als Herausforderung

Die größte Herausforderung in der Umsetzung des Produktzwillings ist die Traceability der Batterie [50]. Eine korrekte Verknüpfung und Aggregation der unterschiedlichen Datenquellen auf verschiedenen Ebenen sind unerlässlich, um belastbare Aussagen zu treffen, realistische Vorhersagen auszusprechen und aussagekräftige Simulationen auszuführen. Durch eine Vielzahl voneinander abhängiger Digitaler Produktzwillinge (Subsysteme), beispielsweise für Zwischenprodukte wie die Elektroden, die finale Batterie zelle oder eine Charge von Batterien, entsteht eine hohe Komplexität. Ein Wechsel von Einzel- und Chargenprozessen sowie kontinuierliche und diskrete Prozesse erschweren die Zuordnung von Daten zu einem Produkt. Das Tracking und Tracing

durch den kompletten Fertigungsprozess ist unverzichtbar für die Erstellung und Nutzung eines Produktzwillings. Beispielsweise spielt es auch für Haftungsfragen und Rückrufe der finalen Zellen oder Chargen eine wichtige Rolle [51]. Aus diesem Grund wird an der Fraunhofer FFB ein übergreifendes Traceability-System entwickelt.

Während der Batterie zellfertigung werden große Datenmengen aus den Prozessen und Qualitätsmessungen der (Zwischen-)Produkte aufgenommen. Diese müssen im Laufe der Fertigung im Produktzwilling verknüpft werden, da bereits durch die Verknüpfung der Daten ein Nutzen, wie die im Digitalen Anlagenzwilling skizzierte adaptive Prozesssteuerung, geschaffen werden kann. Der Produktzwilling greift auf bestehende Datenbanken zu und aggregiert die Informationen je nach Anwendungsfall. Die technische Umsetzung ist dabei eine zentrale Herausforderung, da der Produktzwilling stets aktualisiert werden soll, um einen Mehrwert – beispielsweise durch Vorhersagen – zu stiften. Beim Entwurf der Datenstrukturen werden diese Anforderungen berücksichtigt und notwendige Schnittstellen geschaffen.

Zudem erschwert die fehlende Standardisierung im Aufbau und in der Semantik der Informationsmodelle für einen Produktzwilling bei der Batterie zellfertigung die Weitergabe von Daten über Unternehmensgrenzen hin-

weg. Drittsysteme müssen ohne die Hilfe einheitlicher Standards integriert werden. Dazu wurden bereits erste standardisierte technische Implementierungen entworfen, wie beispielsweise die Asset Administration Shell [52].

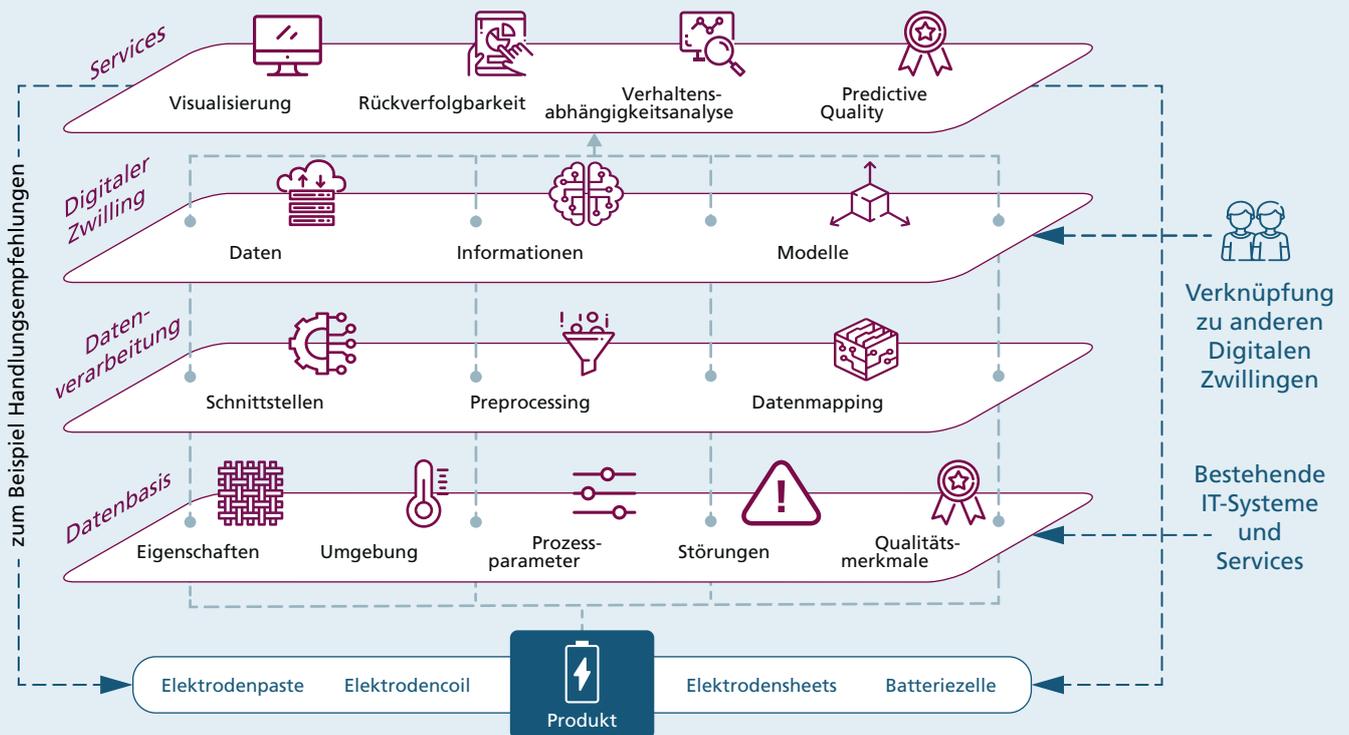
Durch die Speicherung und Verarbeitung der großen Datenmengen entsteht ein nicht vernachlässigbarer Ressourcen- und Energieverbrauch. Der hierdurch gegebene ökologische Fußabdruck muss bei der Umsetzung des Digitalen Zwillings beachtet werden und durch den Mehrwert gerechtfertigt sein. Im besten Fall sind die, durch den Digitalen Zwillings ermöglichten, Emissions- und Ressourceneinsparungen größer als die durch ihn verursachten Ausstöße und ein Rebound-Effekt wird so vermieden. Um dies zu bewerten, müssen Methoden entwickelt werden um die Ausstöße und Reduktionen, die durch die Digitalisierung der Batteriezellfertigung ermöglicht und verursacht werden, zu quantifizieren.

Umfangreicher mit jeder Serie von Prozess-, Betriebs- und Testdaten

Abbildung 8 zeigt den Aufbau des Produktzwillings, der entsprechend dem vorgestellten Verständnis für einen Digitalen Zwillings entwickelt wurde. Der Produktzwilling wird mit jeder Serie von Prozess-, Betriebs- und Testdaten umfangreicher. Er basiert auf der erfassten Datengrundlage und wird mit Informationen und Modellen angereichert. Zu den Produktdaten gehören neben den Daten aus den Prozessschritten auch Materialdaten und Daten zum Verhalten des Zwischenprodukts, sodass eine Datenbasis zur Unterstützung der Entwicklung des Digitalen Zwillings entsteht.

Merkmal des Produktzwillings ist die adaptive Evolution des Modells, basierend auf dem aktuellen Status des Produkts. So erleichtert der Produktzwilling die Ausführung von Diensten, zum Beispiel zur Bewertung des Produktzustands und für das Qualitätsmanagement.

Abbildung 8: Aufbau des Digitalen Produktzwillings



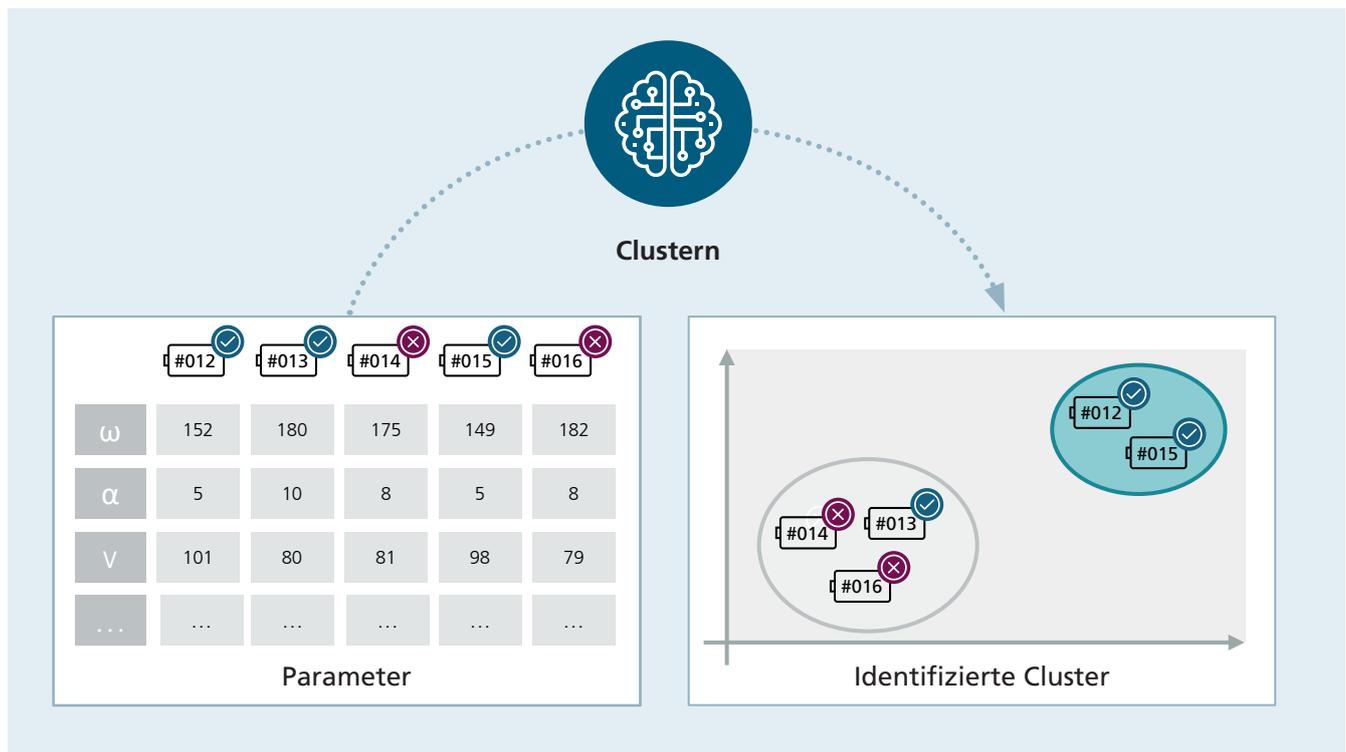


Abbildung 9: Anwendungsfall in der Produktentwicklung mittels Clustering. Ein Vergleich der Qualitätsmessungen der Produkte im Cluster lassen auf gute Parameterkonfigurationen schließen.

Vorteile im Design und in der Produktion – Predictive Quality

Eine der wichtigsten Anwendungen ist die Bestimmung der Produktqualität an entscheidenden Stellen des Herstellungsprozesses. Eine Umsetzung erfolgt durch sogenannte Quality-Gates, welche die datenbasierte Qualitätskontrolle an festen Entscheidungspunkten innerhalb des Produktionsprozesses ermöglichen. Dabei werden qualitätsbezogene Produktdaten erhoben und mit einem Soll-Wert verglichen. Durch die Früherkennung von Qualitätsabweichungen lässt sich die Ausschussrate reduzieren. Weitere Prozessschritte werden dann bei mangelnder Qualität am Produkt nicht mehr ausgeführt und dadurch werden Zeit und Kosten gespart. Neben der Detektion von Ausschuss können Ausschussursachen auch weiter untersucht und kategorisiert werden. Basierend auf der Ursache kann der Prozess dann angepasst und somit Ausschuss reduziert werden.

Produktentwicklung und -optimierung

Das Design von Batteriezellen ist ein weiterer wichtiger Anwendungsfall in der Batteriezellfertigung. Der Digitale Produktzwilling ermöglicht die strukturierte Analyse der Zwischen- und Endprodukte unterschiedlicher Zelldesigns und liefert somit bei der der Produktentwicklung neuer Batteriezellen eine datenbasierte Entscheidungsunterstützung. Beispielsweise können bekannte Parameter wie Messwerte, Prozessparameter und Rezeptur gebündelt werden. Proben neuer Batteriezellen mit ähnlichen Parametern befinden sich im selben Cluster wie in Abbildung 9 skizziert. Die durchschnittliche Qualität der Cluster wird verglichen, um gute Konfigurationen der Produktionsparameter zu identifizieren. Zudem können so neue, bisher unbekannt Konfigurationen entdeckt und getestet werden. Diese Konfigurationen können dann gezielt untersucht und optimiert werden.

Der Digitale Gebäudezwilling



Digitaler Zwilling entlang der Lebensphasen des Gebäudes

Neben der Produktion, die durch den Digitalen Produkt- und Anlagenzwilling abgebildet wird, spielt auch das Fabrikgebäude eine zentrale Rolle für den Digitalen Zwilling der gesamten Batteriezellfertigung. Der Bau- und Gebäudesektor verursachte im Jahr 2020 annähernd 40 Prozent der globalen CO₂-Emissionen [53]. Bau und Betrieb von Produktionsstätten für die Batteriezellfertigung sind mit hohen Emissionen verbunden. So besteht etwa ein großer Bedarf an leistungsstarken Rein- und Trockenräumen, deren Betrieb mit hohem Energieverbrauch verbunden ist. Neben dem Energiebedarf einer Fabrik während des Betriebs entsteht ein Großteil der Emissionen bereits während des Baus, zum Beispiel bei der Herstellung emissionsreicher Baustoffe wie Beton [54]. Frühe Planungsfehler haben häufig schwerwiegende Auswirkungen auf die nachfolgenden Bauabschnitte und erhöhen die Kosten, aber auch den Materialaufwand. Schätzungen der »Get It Right Initiative« aus dem Jahr 2016 ergaben, dass für jeden Euro, der in der Baubranche aufgewendet wird, bis zu 25 Cent aufgrund von Planungs- und Baufehlern verloren gehen [55].

Als Grundlage für die Optimierung der Bauplanung und des Betriebs wird heute bereits oft das so genannte Building Information Modeling (BIM) eingesetzt. Die daraus hervorgehenden 3D-Modelle können teils mit Digitalen Zwillingen gleichgesetzt werden, erfüllen jedoch nicht die Anforderungen an Digitale Zwillinge in der Batteriezellfertigung. Um eine Effizienzsteigerung und damit Kosten- sowie Emissionsreduktionen des Fabrikgebäudes zu ermöglichen, ist es wichtig, die Kommunikation zwischen den beteiligten Gewerken zu vereinfachen sowie Daten und Informationen über die verschiedenen Lebensphasen eines Gebäudes hinweg zu aggregieren und zu bewahren, wie in Abbildung 10 dargestellt. Für die Batteriezellfertigung bedeutet dies, dass sich durch den Einsatz des Digitalen Zwillings in den Lebensphasen des Gebäudes, Möglichkeiten für eine Vielzahl an Optimierungen und Effizienzsteigerungen ergeben können.

Eingeschränkter Zugang zu Daten unterschiedlicher Gewerke

Zusätzlich zu den domänenübergreifenden Herausforderungen, die sich während der Konzipierung und Implementierung jedes

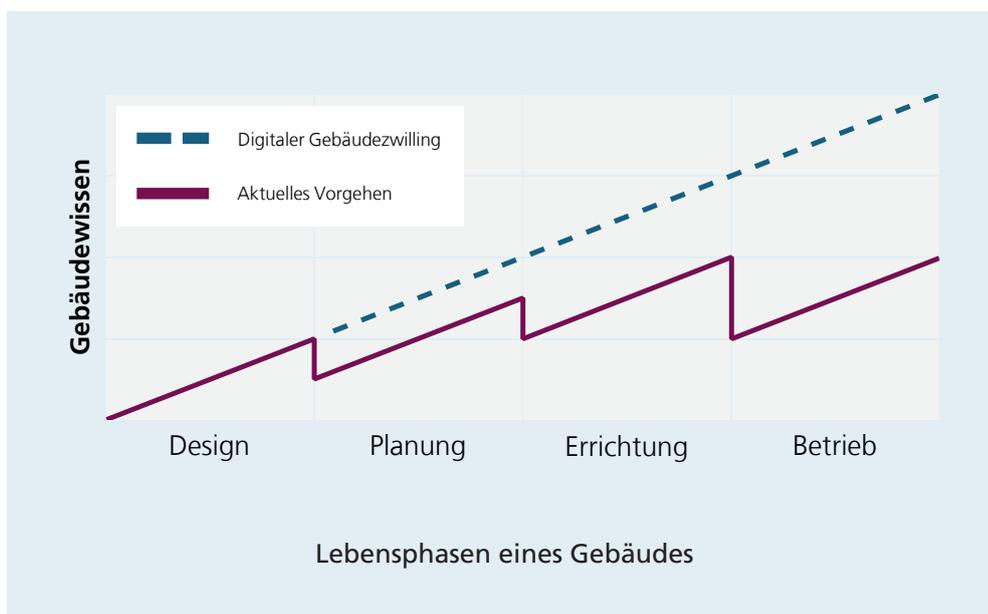


Abbildung 10: Das verfügbare Wissen über das Gebäude in seinen verschiedenen Lebensphasen. Beim Übergang zwischen den verschiedenen Phasen findet im traditionellen Vorgehen ein hoher Informationsverlust statt. (Angelehnt an [56])

Der Digitale Gebäudezwillling ermöglicht Optimierungen und Effizienzsteigerungen in den verschiedenen Lebensphasen des Produktionsgebäudes.

Digitalen Zwillings ergeben, gibt es bezogen auf den Gebäudezwillling eine Reihe von weiteren Eigenschaften, die betrachtet werden müssen. Eine dieser Besonderheiten ergibt sich durch die Vielzahl von Partnern die am Bau und Betrieb komplexer Gebäude wie Fabriken beteiligt sind. Von anfänglichen Bodengutachten über die architektonische Planung bis hin zur Übergabe und Inbetriebnahme des Gebäudes können an einem einzigen Großprojekt leicht dutzende verschiedener Unternehmen beteiligt sein. Nicht immer sind dabei alle relevanten Informationen für alle Partner verfügbar. Während sich an diesem Punkt das große Potenzial des Digitalen Gebäudezwillings als zentrale Anlaufstelle für alle gebäudebezogene Daten zeigt, ist dies jedoch zeitgleich auch eine der größten Herausforderungen.

Während des Betriebs ist der Grad der Vernetzung der verschiedenen Gebäudebestandteile und Systeme von hoher Bedeutung. Nicht jede Anlage ist »smart« und stellt ihre Daten über eine frei zugängliche Schnittstelle bereit. Dies gilt ebenso für Aktuatoren wie Beschattungssysteme oder Lüftungen, die nicht immer zentral angesteuert und durch den Digitalen Zwilling abgebildet werden können. Des Weiteren können nicht alle Arten von Daten automatisiert erfasst werden. Im Vergleich zum Digitalen Produktzwillling, muss eine große Zahl von Informationen bezüglich Defekten, Umbauten, Wartungen oder Reparaturen manuell erfasst und aktualisiert werden. Dies ist fehleranfällig und gefährdet den Anspruch des Digitalen Zwillings, zu jedem Zeitpunkt ein exaktes Abbild des realen Gegenstücks zu sein. Für solche nicht digitalisierten Abläufe werden deshalb klare Vorgehensmodelle benötigt.

Synergien zwischen bestehenden Systemen

Bis heute existiert noch keine einheitliche Definition der verschiedenen Bestandteile eines Digitalen Gebäudezwillings [57]. Nichtsdestotrotz lassen sich in der Gebäudedomäne Funktionalitäten identifizieren, ohne die eine Umsetzung eines Digitalen Zwillings nicht realisierbar ist.

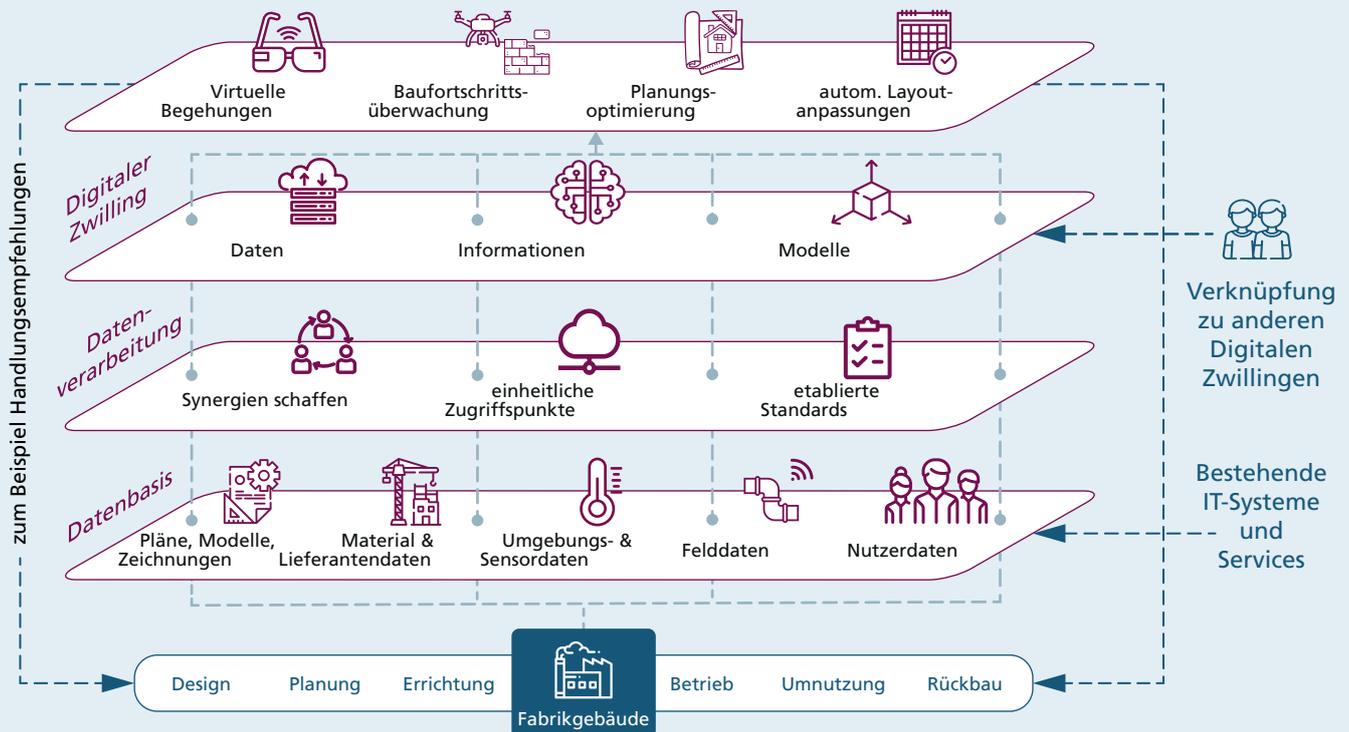
Dazu zählen insbesondere Folgende, die nachstehend beschrieben werden:

- Lebensphasenübergreifende Plattform zum Informationsaustausch
- Strukturierte, aktuelle und konsistente Datenbasis
- Abbildung des tatsächlich umgesetzten Zustands (As-built-Modell)
- Gebäudeautomation
- Kommunikationsschnittstelle zwischen Produktion und Fabrikgebäude

Digitale Plattformen zum Informationsaustausch kommen im BIM-Kontext bereits in Form von gemeinsamen Datenumgebungen, so genannten Common Data Environments, zum Einsatz und erleichtern dadurch die gewerkeübergreifende Zusammenarbeit in den frühen Lebensphasen der Fabrik. Voraussetzung für einen nachhaltigen Fabrikbetrieb ist es allerdings, vergleichbare Austauschplattformen auch für die anderen Lebensphasen zu etablieren, um allen Akteuren im Gebäudekontext Zugriff auf die Informationen zu garantieren.

Ist ein ganzheitlicher Informationsaustausch technisch umgesetzt, ist es die Aufgabe des Digitalen Gebäudezwillings, eine strukturierte, aktuelle und konsistente Datenbasis zu gewährleisten. Neben den laufend aktualisierten Gebäudedaten müssen auch historische Daten wie Grundrisszeichnungen oder Planungsdokumente integriert werden. Um beispielsweise einen Informationsverlust bei der Bauabnahme zu vermeiden, müssen die Planungs- und Bauinformationen handhabbar an den Gebäudenutzer übergeben werden.

Teil der aktuellen Datenbasis muss auch ein As-built-Modell des Fabrikgebäudes sein, also ein 3D-Modell, das den Ist-Zustand des Bauwerks abbildet und dokumentiert. Das verbessert nicht nur das Qualitäts- und Mängelmanagement während der Bauphase, sondern unterstützt auch den Betreiber nach Fertigstellung des Gebäudes durch eine exakte visuelle Verortung.



Um einen effizienten und sicheren Gebäudebetrieb zu gewährleisten, ist auch die Gebäudeautomation ein wichtiger Bestandteil des Digitalen Gebäudezwillings. Die technische Gebäudeausrüstung isoliert zu steuern, zu regeln und zu optimieren reicht allerdings nicht aus, um beispielsweise ein ganzheitliches Energiemanagement in der Batteriezellfertigung zu ermöglichen. Dazu bedarf es der Vernetzung der hochkomplexen Anlagentechnik mit dem Gebäude. Über Standards und Normen müssen daher Kompatibilität und Interoperabilität – also Kommunikation, Datenaustausch und Dokumentation über heterogene Informationsquellen hinweg – zwischen den einzelnen, oftmals proprietären Systemen gewährleistet werden.

Das Ziel des Digitalen Gebäudezwillings ist es, Synergien zwischen den bereits existierenden, aber teilweise alleinstehenden Systemen zu schaffen, durch Standards Komplexität in der heterogenen Systemlandschaft abzubauen, einheitliche Zugriffspunkte und rollenbezogene Benutzeroberflächen bereitzustellen und zusätzliches Wissen mit einem messbaren Mehrwert bereitzustellen.

Vernetzung von Gebäude und Produktion

Abbildung 11 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Fabrikgebäude als physische Repräsentanz und dem Digitalen Gebäudezwillings. Aufbauend auf der Fabrik ergibt sich die Datenbasis, die, angefangen bei Plänen, Zeichnungen und Modellen der frühen Lebenszyklusphasen, Schritt für Schritt um zusätzliche Datenquellen erweitert wird. Im Zusammenspiel mit bestehenden IT-Systemen entwickelt sich so die Grundlage für tiefgehende Analysen und Auswertungen. Um aus den Rohdaten Informationen zu gewinnen und später auch Wissen ableiten zu können, bedarf es allerdings einer Datenverarbeitung. Werden Synergien und einheitliche Zugriffspunkte mit klaren Rollendefinitionen geschaffen und Standards in den Datenverarbeitungsprozess integriert, können darauf aufbauend Services angeboten werden, die eine Vernetzung von Gebäude und Produktion ermöglichen.

Abbildung 11: Aufbau des Digitalen Gebäudezwillings

Mehrwert des Digitalen Gebäudezwillings in Planung, Bau und Betrieb

Der Mehrwert des Digitalen Gebäudezwillings zeigt sich entlang der Lebensphasen des Gebäudes anhand konkreter Anwendungsfälle für die Lebensphasen der Planung, des Baus und des Betriebs:

■ Planung

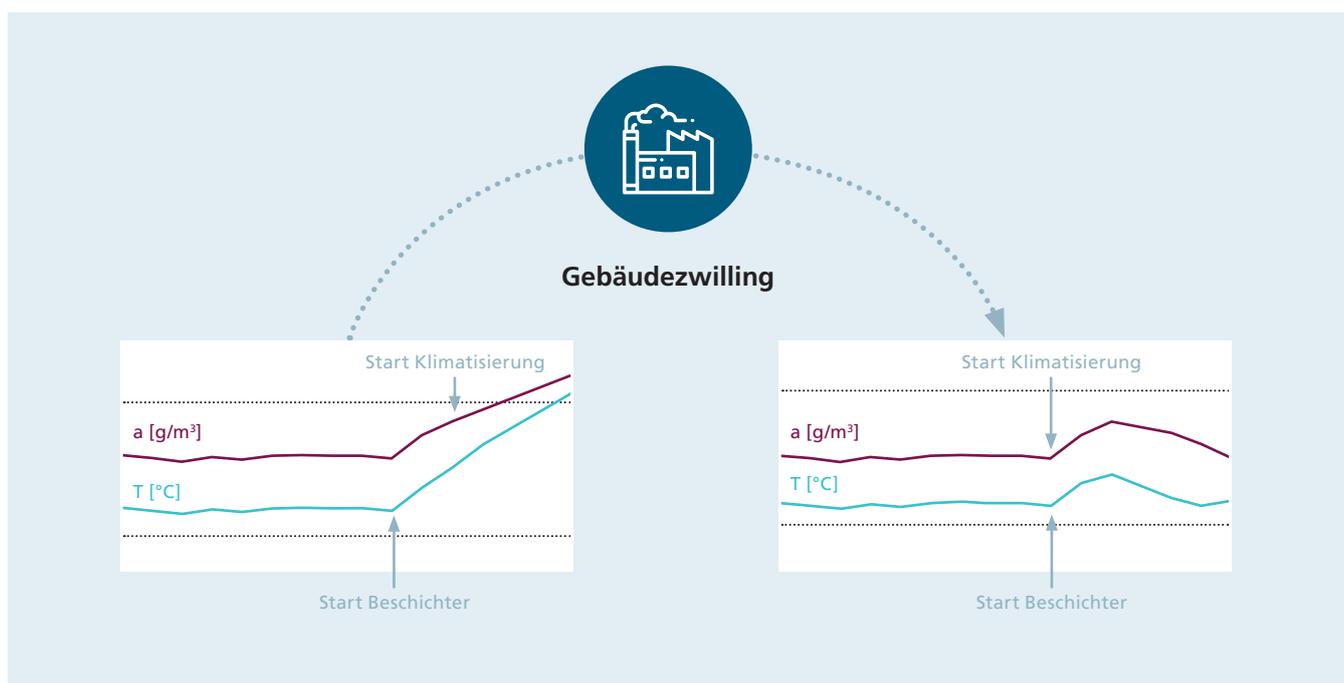
In der Planung kann der Digitale Zwilling als Ausgangspunkt für eine einfachere Abstimmung und den Informationsaustausch zwischen den Projektpartnern dienen. Dadurch kann der Planungsprozess optimiert und die Wahrscheinlichkeit für Fehler, die sich aus dem Zusammenspiel verschiedener Gewerke ergeben, reduziert werden. Auf Grundlage der verfügbaren Daten des Digitalen Zwillings können realitätsnahe Simulationen durchgeführt werden. Das erlaubt es, die Auswirkungen notwendiger Änderungen in der Planung, zum Beispiel durch Kosteneinsparungen, auf das gesamte Gebäude dynamisch zu evaluieren. Außerdem wird es dem Auftraggeber ermöglicht, den aktuellen Stand der Planung jederzeit an einer zentralen Stelle einzusehen. So entsteht Transparenz und späte Änderungswünsche des Auftraggebers können leichter berücksichtigt werden. Zum Beispiel kann der Digitale

Zwilling in der Planung eines Bauvorhabens für das Änderungsmanagement genutzt werden, etwa in der Flächenplanung und Auslegung der Logistik und Produktionsflächen. Während der Planung kann es dazu kommen, dass sich verschiedene Änderungen am Gebäude ergeben. Diese Änderungen wirken sich direkt darauf aus, welche Flächenmaße für die verschiedenen Produktionsbereiche zur Verfügung stehen und wie diese genutzt werden können. Zum Beispiel müssen spezielle Brandschutzregularien zur Lagerung von Batteriezellen und Rohmaterialien berücksichtigt werden. Der Digitale Zwilling kann dabei helfen, die Informationen über neue Änderungen zu verarbeiten und in ein Layoutplanungstool zu übertragen. Dort kann er anschließend optional mittels Simulationen die Auswahl des besten Layouts unterstützen.

■ Bau

Wie bereits während der Planung dient der Digitale Gebäudezwilling in der Bauphase als zentrale Anlaufstelle für alle beteiligten Partner und Gewerke. Abhängigkeiten zwischen den Gewerken können zuverlässig dargestellt und Abläufe optimal geplant werden. Der kontinuierliche Abgleich zwischen der Planung und dem tatsächlichen Baufortschritt ermöglicht es allen Beteiligten, Fehler oder Abweichungen

Abbildung 12: Der Digitale Gebäudezwilling ermöglicht eine vorausschauende Gebäuderegulierung zur Verringerung von Lastspitzen und Abweichungen der Produktqualität



zeitnah zu erkennen, vorherzusagen und flexibel und gezielt eingreifen zu können. Mit Hilfe von 3D-Scans kann dieser Abgleich beispielsweise teilautomatisiert erfolgen.

Während der Bauphase kann der Digitale Zwilling zum Beispiel für die Zustandsüberwachung der eingesetzten Materialien genutzt werden. Er dient der Analyse, ob alle Materialien verfügbar sind und wo sich diese Materialien befinden. Zudem kann er im Bestellprozess dazu genutzt werden, den optimalen Kostenpunkt für eine Bestellung zu berechnen.

■ Betrieb

Die großen Datenmengen, die während der Planung und des Baus im Digitalen Gebäudezwilling aggregiert werden, stehen dem Betreiber des Gebäudes zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme in vollem Umfang zur Verfügung. Dadurch wird eine bisher übliche Wissenslücke geschlossen und eine reibungslose Übergabe und Inbetriebnahme des Gebäudes erleichtert. Der aktuelle Gebäudezustand wird zu jeder Zeit in all seinen Facetten durch den Digitalen Gebäudezwilling abgebildet. Dies vereinfacht beispielsweise die adaptive Steuerung des Gebäudes, die Optimierung von Energiebedarfen und die Koordination von Wartungsarbeiten. Im Gegensatz zu etablierten Systemen wird hier eine Vielzahl verschiedener Datenquellen verknüpft. Bei Erweiterungen oder Umbauten steht eine solide Datengrundlage aus der gesamten Historie des Gebäudes zur Verfügung, die die Planung und Ausführung beschleunigen kann.

Ein konkreter Anwendungsfall aus der Betriebsphase eines Fabrikgebäudes ist die frühzeitige und vorrausschauende Konditionierung von Trocken- und Reinnräumen. Bei planbaren abweichenden Bedingungen, etwa einem zusätzlichen Feuchtigkeitseintrag durch Wartungsarbeiten an den Produktionsanlagen, kann auf Basis historischer Daten und dieser neuen Information die Trockenraumtechnik frühzeitig automatisch eingestellt werden (Abbildung 12). Dadurch kann der Energiebedarf mit Blick auf die Lastspitzen gesenkt und die kontinuierliche Einhaltung der erforderlichen Umgebungsbedingungen gewährleistet werden.



Der Digitale Zwilling der Batteriezellfertigung

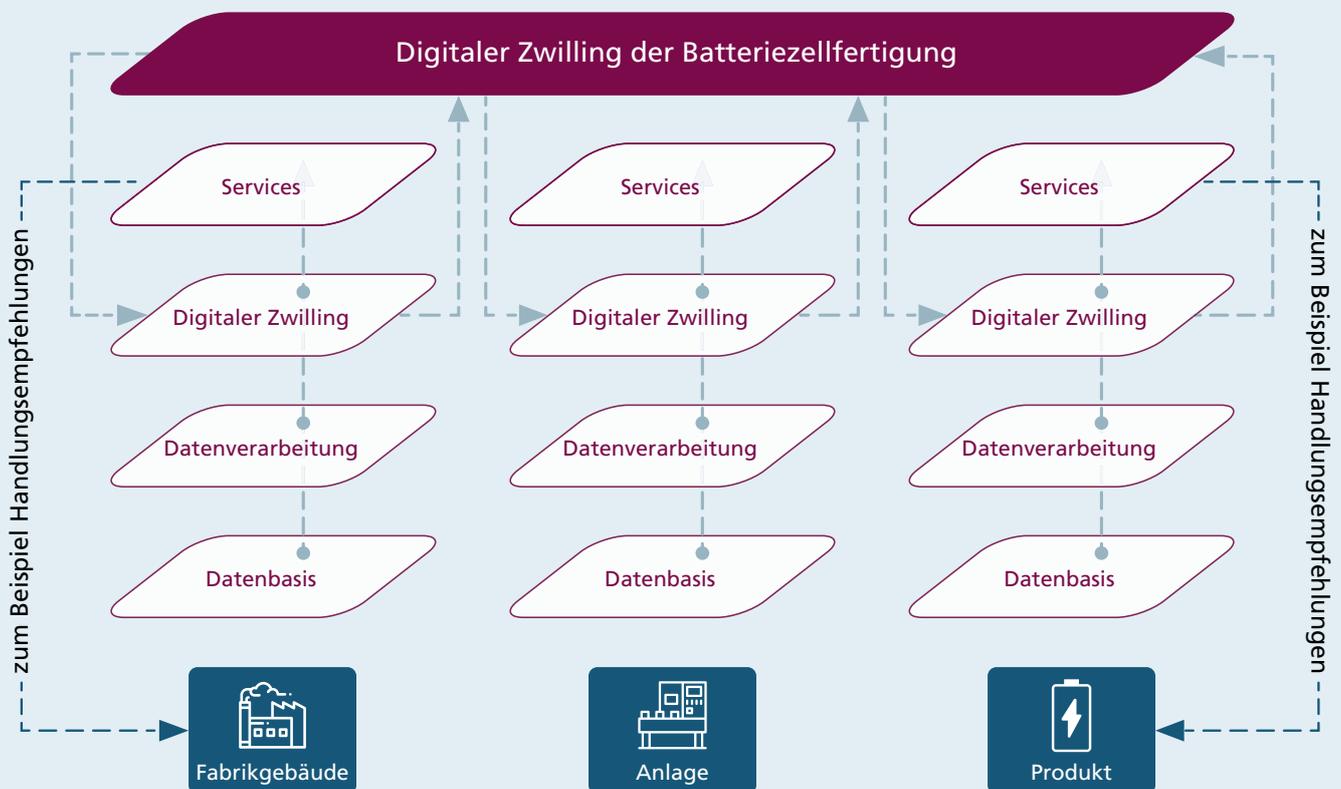
Die Digitalen Zwillinge der Anlage, des Produkts und des Gebäudes bieten unterschiedliche Services und Vorteile. Darüber hinaus gibt es Anwendungsfälle, in denen die verschiedenen Ausprägungsformen des Digitalen Zwillings kombiniert betrachtet werden müssen. Zusammengeführt wird dies im Digitalen Zwilling der Batteriezellfertigung, der mithilfe standardisierter Schnittstellen auf die untergeordneten Digitalen Zwillinge zugreift und einen übergreifenden Daten- und Informationsaustausch schafft.

Der Digitale Zwilling der Batteriezellfertigung entspricht einem übergeordneten Modul von Digitalem Anlagen-, Produkt- und Gebäudezwilling, durch den eine Modularisierung erzielt wird. Der modulare Aufbau reduziert die Komplexität und erleichtert die Handhabbarkeit auf technischer Ebene. Neue

Funktionalitäten, beispielsweise auf Basis neuer Sensortechnik, lassen sich unkompliziert implementieren, sodass alle entstehenden Daten und Informationen anderen Anwendungen zur Verfügung stehen. Weiterhin können unvorhersehbare konzeptionelle Änderungen des Gebäudes, des Produkts oder der Anlage durch einfache Anpassung im entsprechenden Modul auch im Digitalen Zwilling der Batteriezellfertigung berücksichtigt werden. Diese Flexibilität in der Gestaltung erlaubt es, den Digitalen Zwilling auch auf andere Standorte der Batteriezellfertigung zu übertragen und dort zu implementieren.

Die Vernetzung der einzelnen Ausprägungsformen zu einem Digitalen Zwilling der Batteriezellfertigung erschließt weitere Möglichkeiten, sowohl die Nachhaltigkeit als auch die Effizienz zu steigern. Fragen im Hinblick auf

Abbildung 13: Zusammenspiel der verschiedenen Ausprägungsformen der Digitalen Zwillinge



den Energiebedarf lassen sich durch Informationen aus den Anlagen und dem Gebäude beantworten. Vor allem bei der Betrachtung des Betriebs der Trockenräume, die dem Digitalen Gebäudezwilling zugeordnet sind, existiert eine starke Abhängigkeit von der Produktion. Dies stellt eine klare und notwendige Schnittstelle zwischen dem Digitalen Anlagenzwilling und dem Digitalen Gebäudezwilling dar. Weiterhin wird die Produktqualität in starkem Maße von den Anlageneinstellungen und -parametern beeinflusst, wie zum Beispiel die SchlitzdüsenEinstellungen des Beschichters in der Elektrodenfertigung auf die Schichtdicke der Elektrodenfolie. Für eine Analyse der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge müssen also Maschinendaten aus dem Digitalen Anlagenzwilling mit Qualitätsdaten aus dem Digitalen Produktzwilling verbunden werden. Auch für die Erstellung des sogenannten »Battery Passports« (siehe folgender Abschnitt) ist die Verknüpfung aller Ausprägungsformen notwendig. Abbildung 13 zeigt schematisch das Zusammenspiel der Ausprägungsformen. Im übergeordneten Digitalen Zwilling der Batteriezellfertigung wird auf die Digitalen Zwillinge von Anlage, Produkt und Gebäude zugegriffen und Informationen, Daten und Modelle vereint betrachtet werden.

Battery Passport und verbessertes Life Cycle Assessment

Der »Battery Passport« ist eine elektronische Akte für jede individuelle Batterie und enthält dynamische Batteriedaten, die während des Lebenszyklus einer Batterie anfallen. Diese werden zentral gespeichert. Hierzu gehören unter anderem generelle Informationen zum Batterietypen, Daten aus der Batteriezellfertigung, aber auch die CO₂-Bilanz, Nutzungsdaten und Daten zu Lieferanten [8, 58].

Der Digitale Zwilling der Batteriezellfertigung ermöglicht es, einen »Battery Passports« zu erstellen, da die geforderten Daten bereits in einem zentralen Zugriffspunkt zusammengeführt werden. Die Daten des Digitalen Zwillings auf Zellebene können auf Batterieebene

aggregiert und in den »Battery Passport« gemäß der Verordnung übertragen werden. Dies können unter anderem die Produktdaten aus dem Digitalen Produktzwilling, die Herstellungsparameter aus dem Digitalen Anlagenzwilling oder die Verbrauchsdaten aus dem Digitalen Anlagen- und Gebäudezwilling sein. Mit Hilfe des Digitalen Zwillings der Batteriezellfertigung wird ein Life Cycle Assessment ermöglicht. So kann die für den »Battery Passport« notwendige Energiebilanz ausgewiesen werden. Life Cycle Assessments schaffen außerdem Transparenz über den aktuellen Nachhaltigkeitsgrad eines Produkts, beziehungsweise der Produktion durch die Angabe des CO₂-Fußabdrucks.

Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings der Batteriezellfertigung – Adaptive Prozesssteuerung

Die adaptive Steuerung des Prozesses, basierend auf der Qualität des Zwischen- und/oder Endprodukts, ist ein Beispiel dafür, wie verschiedene Digitale Zwillinge in Kombination einen Mehrwert erzeugen können: Adaptive Prozesssteuerung erlaubt die Optimierung von Prozessgrößen, basierend auf der Qualität des Outputs (beispielsweise der Restlösmittelgehalt nach dem Trocknen). Dafür werden aktuelle Parameter der Anlage wie die Temperatur des Heizsystems mit der aktuellen Produktionsqualität der Produkte, basierend auf den Daten des Produktzwillings, in Bezug gesetzt. Hierzu wurden im Verlauf des Projekts »Forschungsfertigung Batterie zelle (FoFe-Bat)« bereits Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einfluss-, Prozess- und Qualitätsparametern ermittelt (vgl. [59]). Aus dieser Verknüpfung kann ein Modell erstellt werden, das Empfehlungen für die einzustellenden Prozessparameter vorschlägt, die die Produktionsqualität verbessern oder zur automatischen Steuerung genutzt werden können.

Durch die Verbindung der verschiedenen Digitalen Zwillinge werden die größten Mehrwerte entlang der gesamten Produktion gehoben.

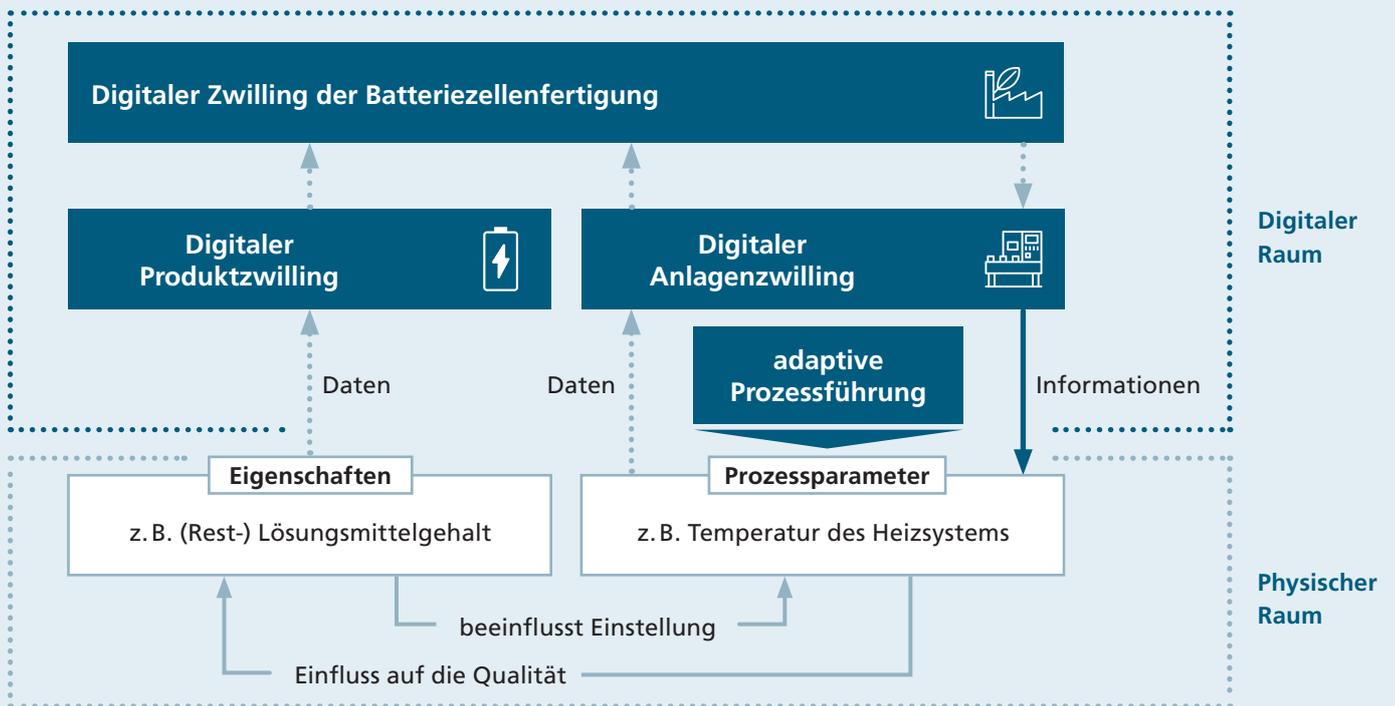


Abbildung 14: Die adaptive Prozesssteuerung ermöglicht die Einstellung der Temperatur des Heizsystems, basierend auf aktuellen Qualitätsmerkmalen der gefertigten Produkte

Die Parameter können auf Basis des Digitalen Produktzwillings und durch externe IT-Systeme, die die Produktionsplanung durchführen, abgeleitet werden. Die Auslastung der Anlage kann so bewusst durch die Anbindung von IT-Systemen aber auch durch die Kommunikation mit anderen Digitalen Zwillingen gesteuert werden. Neben dem Produktzwilling können auch Anlagenzwillinge des jeweils vorherigen und nachfolgenden Prozessschrittes genutzt werden. Die adaptive Prozesssteuerung ermöglicht effizientere Prozesse bei steigender Qualität. Dies wiederum reduziert die Kosten der Produktion.

Abbildung 14 veranschaulicht eine adaptive Prozesssteuerung am Beispiel des Trocknens [51]. Die Temperatur des Heizsystems wird basierend auf aktuellen Qualitätsmerkmalen der gefertigten Produkte, hier repräsentiert durch den Restlösungsmittelgehalt, eingestellt. Es können Daten wie der initiale Lösungsmittelgehalt der Elektrodenpaste aus dem Digitalen Produktzwilling genutzt und die Temperatur des Heizsystems über den Digitalen Anlagenzwilling eingestellt werden, sodass die Qualität optimiert wird.

Die Umsetzung des Digitalen Zwillings an der Fraunhofer FFB

Der Digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung stellt grundlegende Weichen für eine ökonomisch und ökologisch optimierte Fabrik. Zugleich kann der Digitale Zwilling das Fundament weiterer Anwendungen, Forschungs- und Entwicklungsvorhaben entlang des Lebenszyklus der Batterie zelle sein [51].

Im Rahmen des Projekts »Forschungsfertigung Batterie zelle (FoFeBat)« wurde basierend auf dem bisherigen wissenschaftlichen Diskurs eine auf den Anwendungsfall angepasste Definition des Digitalen Zwillings in der Batterie zellfertigung abgeleitet. Da die Batterie zellfertigung ganzheitlich betrachtet interdisziplinäre Aufgaben beinhaltet, muss für die Umsetzung zunächst ein einheitliches Verständnis aller Aspekte – wie bspw. der notwendigen Komponenten, die Zielstellung oder der Nutzen – entwickelt und geschaffen werden. Die Identifikation der beschriebenen Ausprägungsformen erlaubt die Konkretisierung der Maßnahmen in den verschiedenen Anwendungsfällen und mündet in der Zielvorstellung, einen Digitalen Zwilling der gesamten Fabrik zu generieren. Dieser integriert mit den einzelnen Digitalen Zwillingen aus verschiedenen Domänen, um eine nachhaltige Produktion der Batterie zellen zu gewährleisten.

Im Rahmen des Projekts »Forschungsfertigung Batterie zelle (FoFeBat)« wurde mit der Konzeptionierung der einzelnen Digitalen Zwillinge begonnen. Die Implementierung von Prototypen in den jeweiligen Ausprägungsformen wird im zeitnahen Projektverlauf angestrebt.

Die Integration der Zwillinge aus den verschiedenen Domänen in die Forschungsfertigung soll anschließend umgesetzt werden, um die Forschungsfertigung Batterie zelle auf Basis des Digitalen Zwillings zu optimieren. Beim Vorgehen zur Konzeptionierung und Implementierung der Digitalen Zwillinge werden im Projektverlauf Reifegradmodelle entwickelt, um ein möglichst hohes Level an Einheitlichkeit und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten.

Vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels kann der Digitale Zwilling dabei helfen, durch Verringern des Ausschusses, Erhöhen der Produktqualität und Optimieren des Energieverbrauchs eine nachhaltigere Produktion zu ermöglichen. Die Nutzung eines Digitalen Zwillings – vom Rohmaterial über die Zellfertigung und das First Life bis zur Wiederaufarbeitung oder zum Recycling – kann ebenfalls die Ökobilanz von Batterien verbessern. Auch zur Erfüllung des bereits von der Bundesregierung verabschiedeten Lieferkettensorgfaltspflichtengesetzes [9] sowie zur Erstellung eines »Battery Passports« im Rahmen des von der Europäischen Union angestrebten Green Deals [60] kann der Digitale Zwilling in Zukunft einen entscheidenden Beitrag leisten. Der Nutzen wird dabei – abhängig vom betrachteten Anwendungsfall – in jeder Lebenszyklusphase sichtbar. Er erlaubt aufgrund der geschaffenen Transparenz der Produktion eine Kontrolle des durch den erhöhten Einsatz digitaler Technologien verursachten Rebound-Effektes.



Literatur

- [1] A. Jinasena, O. S. Burheim und A. H. Strømman, »A Flexible Model for Benchmarking the Energy Usage of Automotive Lithium-Ion Battery Cell Manufacturing,« Batteries, Jg. 7, Nr. 1, 2021, doi: 10.3390/batteries7010014.
- [2] B. Heid et al. »A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030: Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation.« Insight Report. http://www3.weforum.org/docs/WEF_A_Vision_for_a_Sustainable_Battery_Value_Chain_in_2030_Report.pdf (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. »Batterien „made in Germany“ – ein Beitrag zu nachhaltigem Wachstum und klimafreundlicher Mobilität.« <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/batteriezellfertigung.html> (Zugriff am: 15. Nov. 2022).
- [4] M. Rasch. »Tesla, Volkswagen, Porsche – Deutschland wird zum Zentrum der europäischen Batteriezellen-Produktion.« <https://www.nzz.ch/wirtschaft/deutschland-wird-zum-zentrum-der-batterieproduktion-ld.1631548> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [5] M. Romare und L. Dahllöf. »The Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions from Lithium-Ion Batteries: A Study with Focus on Current Technology and Batteries for light-duty vehicles.« <http://www.energimyndigheten.se/globalassets/forskning--innovation/transporter/c243-the-life-cycle-energy-consumption-and-co2-emissions-from-lithium-ion-batteries-.pdf> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [6] A. Kwade, »Advances in Battery Cell Production,« Energy Technology, Jg. 8, Nr. 2, 2020, Art. Nr. 1900751, doi: 10.1002/ente.201900751.
- [7] S. Michaelis et al. »Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030. Update 2020.« <https://www.vdma.org/documents/34570/35405938/VDMA+Batterieproduktion+Roadmap+2030+%28Update+2020%29.pdf/587fba4e-7de7-f2a0-477b-bccc13154cba?t=1639483139718> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [8] European Commission, Directorate-General for Environment. »Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL concerning batteries and waste batteries, repealing Directive 2006/66/EC and amending Regulation (EU) No 2019/1020: COM/2020/798 final.« https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:4b5d88a6-3ad8-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF (Zugriff am: 15. Nov. 2022).
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. »Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz: Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten.« <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Gesetze/Wirtschaft/lieferkettensorgfaltspflichtengesetz.html> (Zugriff am: 15. Nov. 2022).
- [10] K. Bächle und S. Gregorzik. »Digital Twins in Industrial Applications – Requirements to a Comprehensive Data Model.« <https://www.iiconsortium.org/news-pdf/joi-articles/2019-November-Joi-Digital-Twins-in-Industrial-Applications.pdf> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [11] D. Arenhövel et al. »Digitalisierung nachhaltig gestalten: Ein Impulspapier des Umweltbundesamtes.« https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba_fachbroschuere_digitalisierung_nachhaltig_gestalten_0.pdf (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [12] R. Rosen, G. von Wichert, G. Lo und K. D. Bettenhausen, »About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing,« IFAC-PapersOnLine, Jg. 48, Nr. 3, S. 567–572, 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
- [13] M. Shafto et al. »DRAFT. Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap: Technology Area 11.« https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [14] M. Kunath und H. Winkler, »Integrating the Digital Twin of the manufacturing system into a decision support system for improving the order management process,« Procedia CIRP, Nr. 72, S. 225–231, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.192.

- [15] R. Stark, S. Kind und S. Neumeyer, »Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design,« *CIRP Annals*, Jg. 66, Nr. 1, S. 169–172, 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.045.
- [16] S. Malakuti et al. »Digital Twins for Industrial Applications: Definition, Business Values, Design Aspects, Standards and Use Cases.« An Industrial Internet Consortium White Paper. Version 1.0. https://www.researchgate.net/publication/339460951_Digital_Twins_for_Industrial_Applications_Definition_Business_Values_Design_Aspects_Standards_and_Use_Cases (Zugriff am: 15. Nov. 2022).
- [17] R. Stark, R. Anderl, K.-D. Thoben und S. Wartzack, »WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“,« *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 115, s1, S. 47–50, 2020, doi: 10.3139/104.112311.
- [18] S. Boschert und R. Rosen, »Digital Twin—The Simulation Aspect,« in *Mechatronic Futures: Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*, P. Hehenberger und D. Bradley, Hg., Cham: Springer, 2016, S. 59–74.
- [19] T. Bergs, S. Gierlings, T. Auerbach, A. Klink, D. Schraknepper und T. Augspurger, »The Concept of Digital Twin and Digital Shadow in Manufacturing,« *Procedia CIRP*, Nr. 101, S. 81–84, 2021, doi: 10.1016/j.procir.2021.02.010.
- [20] International Electrochemical Commission. »ISO/IEC JTC 1/SC 41: Internet of Things and Digital Twin.« https://www.iec.ch/ords/f?p=103:7:710237676799282:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:20486,25 (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [21] T. Kuhn. »Digitaler Zwilling.« <https://gi.de/informatik-lexikon/digitaler-zwilling> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [22] S. Boschert, C. Heinrich und R. Rosen, »Next generation digital twin,« in *Tools and Methods of Competitive Engineering: Proceedings of the Twelfth International Symposium on Tools and Methods of Competitive Engineering - TMCE 2018, May 07-11, Las Palmas de Gran Canaria, Spain*, I. Horváth, J. P. Suárez Rivero und P. M. Hernández Castellano, Hg., 2018, S. 209–218.
- [23] ISO/IEC JTC 1. »ISO/IEC JTC1/SC 41 Webinar IoT and Digital Twin Standardization: April 26 & 28, 2022.« https://storage-iecwebsite-prd-iec.ch.s3.eu-west-1.amazonaws.com/2022-05/day-2-2022-04-28--sc41-webinar-iot-and-dtw.pdf?VersionId=tcnIMIUSslutEXJF5Fcx0z6m_fZJNXgj (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [24] M. Jacoby und T. Usländer, »Digital Twin and Internet of Things — Current Standards Landscape,« *Applied Sciences*, Jg. 10, Nr. 18, 2020, Art. Nr. 6519, doi: 10.3390/app10186519.
- [25] M. Grieves und J. Vickers, »Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems,« in *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*, F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt und A. Alves, Hg., Cham: Springer, 2017, S. 85–113.
- [26] Industrial Digital Twin Association e.V. »IDTA – Der Standard für den Digitalen Zwilling.« <https://industrialdigitaltwin.org/> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [27] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. »AG „Referenzarchitekturen, Standards und Normung“.« <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Standardartikel/arbeitsgruppe-01.html> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [28] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. »Leitbild 2030 für Industrie 4.0: Digitale Ökosysteme global gestalten.« <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/Leitbild2030/leitbild-2030.html> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [29] J. Gayko. »RAMI 4.0: Ein Referenzarchitekturmodell als Kommunikationsgrundlage in der Industrie 4.0.« <https://www.dke.de/de/arbeitsfelder/industry/rami40> (Zugriff am: 15. Nov. 2022).
- [30] R. Heidel, M. Hoffmeister, M. Hankel und U. Döbrich, *Basiswissen RAMI 4.0: Referenzarchitekturmodell und Industrie 4.0-Komponente - Industrie 4.0*. Berlin: Beuth, 2017.

- [31] S. Bader et al. »Details of the Asset Administration Shell: Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 (Version 3.0RC02).« https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V3.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [32] International Electrochemical Commission. »TC 65: Industrial-process measurement, control and automation.« https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:7:710237676799282:::FSP_ORG_ID,FSP_LANG_ID:1250,25 (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [33] K. T. Park et al., »Design and implementation of a digital twin application for a connected micro smart factory,« *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Jg. 32, Nr. 6, S. 596–614, 2019, doi: 10.1080/0951192X.2019.1599439.
- [34] S. R. Chhetri, S. Faezi, A. Canedo und M. A. Al Faruque, »QUILT: quality inference from living digital twins in IoT-enabled manufacturing systems,« in *IoTDI*, 19: Proceedings of the International Conference on Internet of Things Design and Implementation: April 15-18, 2019. Montreal, QC, Canada, G. S. Ramachandran und J. Ortiz, Hg., 2019, S. 237–248, doi: 10.1145/3302505.3310085.
- [35] J. Liu et al., »Dynamic Evaluation Method of Machining Process Planning Based on Digital Twin,« *IEEE Access*, Nr. 7, S. 19312–19323, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2893309.
- [36] S. Singh, M. Weeber und K. P. Birke, »Implementation of Battery Digital Twin: Approach, Functionalities and Benefits,« *Batteries*, Jg. 7, Nr. 4, 2021, Art. Nr. 78, doi: 10.3390/batteries7040078.
- [37] W. Kritzinger, M. Karner, G. Traar, J. Henjes und W. Sihn, »Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification,« *IFAC-PapersOnLine*, Jg. 51, Nr. 11, S. 1016–1022, 2018, doi: 10.1016/j.facol.2018.08.474.
- [38] A. Fuller, Z. Fan, C. Day und C. Barlow, »Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research,« *IEEE Access*, Nr. 8, S. 108952–108971, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
- [39] M. Liu, S. Fang, H. Dong und C. Xu, »Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications,« *Journal of Manufacturing Systems*, Jg. 58, Part B, S. 346–361, 2021, doi: 10.1016/j.jmsy.2020.06.017.
- [40] U. Weber und H. Grosser. »Digital: Twins Leading the Way to Tomorrow's Ecosystems.« https://www.detecon.com/drupal/sites/default/files/2021-03/ST_DigitalTwins_V1_EN_251119.pdf (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [41] A. Kampker, D. Vallée und A. Schnettler, *Elektromobilität: Grundlagen einer Zukunftstechnologie*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [42] K.-H. Pettinger, A. Kampker, C.-R. Hohenthanner, C. Deutskens, H. Heimes und A. von Hemdt, »Lithium-ion cell and battery production processes,« in *Lithium-ion batteries: Basics and applications*, R. Korthauer, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer, 2018, S. 211–226.
- [43] A. Kampker, *Elektromobilproduktion*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014.
- [44] R. J. Brodd und K. Tagawa, »Lithium-Ion Cell Production Processes,« in *Advances in Lithium-Ion Batteries*, W. A. Schalkwijk und B. Scrosati, Hg., New York: Springer, 2002, S. 267–288.
- [45] J. Wang, L. Ye, R. X. Gao, C. Li und L. Zhang, »Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing,« *International Journal of Production Research*, Jg. 57, Nr. 12: Special Issue: Sustainable Cybernetic Manufacturing, S. 3920–3934, 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1552032.
- [46] R. Stark, C. Fresemann und K. Lindow, »Development and operation of Digital Twins for technical systems and services,« *CIRP Annals*, Jg. 68, Nr. 1, S. 129–132, 2019, doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.024.

- [47] J. Krauß, J. Dorißen, H. Mende, M. Frye und R. H. Schmitt, »Machine Learning and Artificial Intelligence in Production: Application Areas and Publicly Available Data Sets,« in *Production at the leading edge of technology: Proceedings of the 9th Congress of the German Academic Association for Production Technology (WGP), September 30th - October 2nd, Hamburg 2019*, J. P. Wulfsberg, W. Hintze und B.-A. Behrens, Hg., 2019, S. 493–501, doi: 10.1007/978-3-662-60417-5_49.
- [48] S. Singh, M. Weeber und K.-P. Birke, »Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation,« *Procedia CIRP*, 2021, Art. Nr. 99, doi: 10.1016/j.procir.2021.03.078.
- [49] A. K. Jardine, D. Lin und D. Banjevic, »A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance,« *Mechanical Systems and Signal Processing*, Jg. 20, Nr. 7, S. 1483–1510, 2006, doi: 10.1016/j.ymssp.2005.09.012.
- [50] A. D. Kies, J. Krauß, C. Baum, R. H. Schmitt und C. Brecher, »Traceability ermöglicht den digitalen Zwilling: Digitalisierung in der Batteriezellfertigung,« *IT & Production*, Jg. 22, Nr. 3, S. 36–37, 2021. Zugriff am: 15. November 2022 [Online]. Verfügbar unter: https://www.it-production.com/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/04/ITProduction_3_April_2021.pdf
- [51] A. D. Kies, J. Krauß, A. Schmetz, C. Baum, R. H. Schmitt und C. Brecher, »Der digitale Zwilling in der Batteriezellfertigung/Digital Twin in Battery Cell Production – From Data Management and Traceability System to Target-Oriented Application,« *wt Werkstattstechnik online*, Jg. 111, Nr. 05, S. 286–290, 2021, doi: 10.37544/1436-4980-2021-05-20.
- [52] B. Boss et al. »Digital Twin and Asset Administration Shell Concepts and Application in the Industrial Internet and Industrie 4.0: An Industrial Internet Consortium and Plattform Industrie 4.0 Joint Whitepaper.« https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Digital-Twin-and-Asset-Administration-Shell-Concepts.pdf?__blob=publicationFile&v=11 (Zugriff am: 15. Nov. 2022).
- [53] International Energy Agency. »Global energy-related CO2 emissions by sector, 2020.« <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector-2020> (Zugriff am: 15. Nov. 2022).
- [54] J. Lehne und F. Preston, *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. London: The Royal Institute of International Affairs, 2018. Zugriff am: 16. November 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete-0/3-overcoming-barriers>
- [55] Get It Right Initiative. »A Guide to Improving Value by Reducing Design Error.« <https://getitright.uk.com/live/files/reports/5-giri-design-guide-improving-value-by-reducing-design-error-nov-2018-918.pdf> (Zugriff am: 16. Nov. 2022).
- [56] C. Eastman, P. Teichholz, R. Sacks und K. Liston, *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, designers, Engineers, and Contractors (Second Edition)*. Hoboken: Wiley, 2011.
- [57] S. H. Khajavi, N. H. Motlagh, A. Jaribion, L. C. Werner und J. Holmström, »Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings,« *IEEE Access*, Nr. 7, S. 147406–147419, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946515.
- [58] K. Berger, J.-P. Schöggel und R. J. Baumgartner, »Digital battery passports to enable circular and sustainable value chains: Conceptualization and use cases,« *Journal of Cleaner Production*, Nr. 353, 2022, Art. Nr. 131492, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131492.
- [59] J.-P. Abramowski et al., »Identifikation qualitätskritischer Parameter: Datenbasierte Qualitätssicherung und Prozessoptimierung in der Batteriezellfertigung,« *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 116, Nr. 10, S. 695–700, 2021, doi: 10.1515/zwf-2021-0154.
- [60] European Commission. »Green Deal: Sustainable batteries for a circular and climate neutral economy.« https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/green-deal-sustainable-batteries-circular-and-climate-neutral-economy-2020-12-10_en (Zugriff am: 15. Nov. 2022).

Impressum

Beteiligte Institute im Kontext des Digitalen Zwillings in der Batteriezellfertigung:

- Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezzelle FFB
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT
- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
- Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF
- Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
- Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT
- Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen
- Lehrstuhl für Production Engineering of E-Mobility Components (PEM) der RWTH Aachen

Bildquellen

Titel, Seite 2/3: deepagopi2011 – stock.adobe.com
Seite 15 oben, Seite 18 links: Studio Wiegel
Seite 25, Seite 29: ARTVISU Artur Krause

DOI

10.24406/publica-496

Herausgeber

Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezzelle FFB
Bergiusstraße 8
48165 Münster

© Fraunhofer-Gesellschaft e.V.,
München 2023

Diese Publikation entstand unter Mitwirkung von:

Dr.-Ing. Jonathan Krauß, Arno Schmetz, Dr. Antje Fitzner,
Thomas Ackermann, Kevin Pouls, Tom-Hendrik Hülsmann,
David Roth, Janine Gehring, Nils Hamacher,
Wilhelm Jaspers, Leon Mohring, Natalja Rube
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezzelle FFB

Prof. Dr. rer. nat. Jens Tübke

Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT und
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezzelle FFB

Alexander D. Kies, Alexander Kreppein,
Johann-Philip Abramowski, Prof. Dr.-Ing. Robert H. Schmitt
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Dr.-Ing. Christoph Baum

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT und
Fraunhofer-Einrichtung Forschungsfertigung Batteriezzelle FFB

Alexander Brandstetter, Soumya Singh, Dennis Cziasto,
Olga Meyer

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung IPA

Mia J. K. Kornely, Sander Kraus, Philipp Niemietz,
Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs

Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen

Prof. Dr.-Ing. Achim Kampker

Production Engineering of E-Mobility Components (PEM)
der RWTH Aachen und Fraunhofer-Einrichtung Forschungs-
fertigung Batteriezzelle FFB

Kontakt

Dr.-Ing. Jonathan Krauß
Digitalisierung der Batteriezellfertigung
Tel. +49 241 8904-475
jonathan.krauss@ffb.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Christoph Baum
Digitalisierung der Batteriezellfertigung
Tel. +49 241 8904-400
christoph.baum@ffb.fraunhofer.de

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