

# Szenariogenerierung im Kontext Digitaler Zwillinge in der Industrie 4.0

Masterarbeit zur Erlangung des Grades M. Sc

Vorgelegt von: Luca Kruppa  
Matrikelnummer: 193741  
Studiengang: Wirtschaftsingenieurwesen

Ausgabedatum: 03.02.2025  
Abgabedatum: 21.07.2025

Erstprüfer:  
Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Anne-Antonia Scheidler  
Zweitprüfer:  
Dr.-Ing. Joachim Hunker  
Betreuer:  
M.Sc. Adrian Freiter (Fraunhofer ISST)

Technische Universität Dortmund  
Fakultät Maschinenbau  
Fachgebiet IT in Produktion und Logistik



# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	I
Tabellenverzeichnis.....	II
Abkürzungsverzeichnis.....	III
1 Einleitung .....	1
2 Technische Grundlagen der Simulation und des Digitalen Zwillings .....	4
2.1 Grundlagen der Simulation .....	4
2.1.1 Systeme, Modelle und Modellierungen.....	4
2.1.2 Simulationen und experimentierbare Modelle .....	6
2.1.3 Simulatoren.....	7
2.2 Begrifflichkeiten des Digitalen Zwillings .....	9
2.2.1 Cyberphysische Systeme.....	9
2.2.2 Begriffliche Abgrenzung Cyber Physisches System und Digitaler Zwilling	14
2.2.3 Eingrenzung des Begriffs Digitaler Zwilling .....	16
2.2.4 Simulationsbasierter Digitaler Zwilling .....	20
2.2.5 Szenariogenerierung und -analyse.....	22
3 Industrieller Kontext.....	25
3.1 Industrie 4.0 .....	25
3.2 Smart Factory.....	26
3.3 Product und System Life Cycle Management .....	29
4 Methoden zur Anforderungserhebung an die Szenariogenerierung .....	33
4.1 Systematische Literaturanalyse .....	33
4.2 Qualitative Inhaltsanalyse von Experteninterviews .....	38
5 Ableitung von Anforderungen an die Szenariogenerierung .....	42
5.1 Use Cases des Digitalen Zwillings im Produktionskontext .....	42
5.2 Einflüsse der Industrie 4.0 auf die Nutzung Digitaler Zwillinge .....	54
5.3 Ermittlung relevanter Parameter für die Szenariogenerierung .....	62
5.4 Anforderung an die Gestaltung eines Workflows zur Szenariogenerierung.....	67
6 Entwicklung eines Workflows zur Szenariogenerierung .....	72
6.1 Auswertungsgestützte Entwicklung des Workflows .....	72
6.2 Validierung des Workflows mit Industrievertretern .....	81
6.3 Diskussion und Fazit .....	83
7 Zusammenfassung und Ausblick .....	86
Literaturverzeichnis .....	88
Anhang.....	102
Anhang A: Transkriptionen der Experteninterviews .....	102
Anhang B: Begleitbogen zur Interviewanfrage (Kontaktdaten geschwärzt) .....	120



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 – Begriffsmodell des experimentierbaren Modells nach Lei et al. (2007).....	8
Abbildung 2 - Schichtübergreifendes CSP-Design angelehnt an Zhu & Xu (2020) .....	11
Abbildung 3 - Interaktion Mensch und CPS angelehnt an Liu et al. (2017) .....	12
Abbildung 4 - Schlüsselkomponenten CPPS angelehnt an (Park et al., 2019).....	13
Abbildung 5 - Semantisches Netz des Digitalen Zwillings angelehnt an Roßmann and Schluse (2020).....	15
Abbildung 6 - Zeitstrahl Digitaler Zwilling angelehnt an Tao, Zhang, and Nee (2019) .....	17
Abbildung 7 – Komponentenaufbau Simulationsbasierter Digitaler Zwilling angelehnt an Korth et al. (2018).....	21
Abbildung 8 - Hierarchisierung der Szenariogenerierung im Entscheidungsfindungsprozess angelehnt an Golfarelli & Rizzi (2009) .....	23
Abbildung 9 - Szenariogenerierung im Kontext Digitaler Zwillinge (Fraunhofer ISST).....	24
Abbildung 10 - Abgrenzung Smart Factory angelehnt an J. Lee et al. (2023) .....	28
Abbildung 11 - Phasen des PLMs nach Eigner (2009).....	29
Abbildung 12 - Entwicklung des PLMs nach Terzi et al. (2010) .....	31
Abbildung 13 - Durchführungsschema der SLA nach Fink (2014) .....	34
Abbildung 14 - Zweistufiges Filtrierungsverfahren angelehnt an Fink (2020) .....	37
Abbildung 15 - Symbole der eEPK nach Nüttgens & Rump (2002).....	72
Abbildung 16 - Entwickelter Workflow zur Szenariogenerierung .....	78

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Definitionen des Digitalen Zwillings.....	18
Tabelle 2 - Übersicht über die interviewten Experten.....	42
Tabelle 3 - Use Cases der Szenariogenerierung in der Literatur .....	45
Tabelle 4 - Von den Experten genannte Use Cases .....	52
Tabelle 5 - Erhebung über Nutzungskonzepte der Szenariogenerierung und Nachteilsempfindung gegenüber großen Unternehmen.....	54
Tabelle 6 - Technologien der Industrie 4.0 im Kontext Digitaler Zwillinge in der Literatur.....	58
Tabelle 7 - Technologien der Industrie 4.0 im Kontext Digitaler Zwillinge in den Unternehmen der Experten.....	61
Tabelle 8 - Parameter zur Szenariogenerierung in der Literatur .....	64
Tabelle 9 - Parameter zur Szenariogenerierung laut den Experten.....	66
Tabelle 10 - Anforderungen an einen Workflow zur Szenariogenerierung .....	71

## Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided-Design
CPPS	Cyperphisches Produktionssystem
CPS	Cyberphisches System
DZ	Digitaler Zwilling
EDZ	Experimentierbarer Digitaler Zwilling
FEM	Finite-Elemente-Methode
GenAI	Generative Artificial Intelligence
HMI	Human-Machine Interface
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
MSC	Manufacturing Supply Chain
PDM	Produkt Daten Management
PLM	Product Lifecycle Management
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SLA	Systematische Literaturanalyse
SoS	System of Systems
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerungen
SysLM	System Lifecycle Management
UI	User Interface
V&V	Verifikation & Validierung
VAR	Virtual Augmented Reality
VR-Elemente	Virtual-Reality-Elemente

# 1 Einleitung

Produzierende Unternehmen müssen unter den simultanen Einflüssen von komplexen Lieferketten, kurzen Innovationszyklen und volatilen Märkten kurzfristig Entscheidungen treffen, um am Markt bestehen zu können (Jeglinsky & Winkler, 2020). Dafür müssen Entscheidungsträger auch in kürzester Zeit auf unvorhersehbare Einflüsse, z.B. Ausfällen in der Lieferkette oder das Aufkommen von Trends, angemessen reagieren (Rudberg & Martin West, 2008). Zudem gewinnen gesellschaftliche Einflüsse im Kontext der industriellen Produktion, wie verpflichtende Anstrengungen zur Nachhaltigkeit, an Bedeutung (Gebhardt, 2024). Diese erhöhen die Komplexität für Entscheidungsträger zusätzlich (Bernhard et al., 2023). Um diese multidimensionalen Einflüsse im Sinne des Produktionserfolgs verarbeiten zu können, ist die Nutzung von digitalen Technologien notwendig (Westkämper et al., 2013).

Der Digitale Zwilling ist eine Technologie, um die hohen Komplexitäten in produzierenden Unternehmen abzubilden und zu verarbeiten (vgl. Schluse, 2024). Als Digitaler Zwilling wird ein virtuelles Abbild einer Entität verstanden (Grieves, 2015). Im industriellen Kontext, in dem diese Arbeit steht, ist dies meist eine physische Entität, so ein Produkt oder ein Produktionssystem (Negri et al., 2017; Söderberg et al., 2017). Physische Entität und Abbild stehen dabei über Datenverarbeitung im wechselseitigen Einfluss zueinander (Grieves, 2015; Hu et al., 2021). Die Folgen von äußeren Einflüssen auf physische Produkte und Produktionsanlagen können über den Digitalen Zwilling in digitalen Simulationen abgeschätzt werden (Miedler et al., 2024; Schluse, 2024). Dazu werden unterschiedliche Simulationsszenarien analysiert, welche mit Hilfe von Szenariogenerierungen erstellt wurden (Massonet, Kiesel & Schmitt, 2020). Die Szenariogenerierung bietet Unternehmen den Vorteil, die Folgen eines negativen Ereignisses bereits vor dem Eintreffen in digitalen Szenarien (what-if Szenarien) abschätzen zu können (Miedler et al., 2024). Diese Szenarien werden aus den Parametern des Digitalen Zwillings und Simulationsparametern generiert (Roßmann & Schluse, 2020). Dies erhöht Qualität, Effizienz und Geschwindigkeit von Steuerungsmaßnahmen (Krauß et al., 2023).

Die durch die Beschleunigung in Datenverarbeitung und -auswertung im Zuge der Entwicklung von Industrie 4.0 und Generative Artificial Intelligence (GenAI) sich bietenden Möglichkeiten öffnen den Digitalen Zwilling und die Szenariogenerierung zunehmend für einen großen Anwenderkreis in der industriellen Fertigung (Gartner, 2019). Jedoch stehen aus Sicht von

kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) dem großen Potenzial des Digitalen Zwillings, und insbesondere der Szenariogenerierung, Hürden gegenüber (Hoppe & Kockrow, 2024). Eine Hürde sind fehlende personelle Ressourcen, welche für die Industrie ein Hauptgrund für ausbleibende umfassendere Erfassung und Nutzung von Produktionsdaten sind (Jeglinsky & Winkler, 2020). Diese Erfassung und Nutzung der Daten sind essenziell für den Digitalen Zwilling. Die technische Komplexität und mangelnde Beherrschbarkeit sind weitere Hürden (Fulterer et al., 2023). Daher werden passgenaue Lösungen gebraucht, welche mit geringem Einführungs- und Anpassungsbedarf auskommen. Denn passgenaue Lösungen in Individualsoftware umzusetzen ist insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen teuer (Hoppe & Kockrow, 2024).

Als wirtschaftlich vertretbares Angebot wird vom Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik im Rahmen der Arbeitsgruppe *OpenFactoryTwin*, in dem auch diese Arbeit eingegliedert ist, eine Standardsoftware für Digitale Zwillinge und eine parametrierbare Szenariogenerierung angestrebt. Diese bietet den Vorteil, die Implementierungskosten auf mehrere Projekte verteilen zu können (Hoppe & Kockrow, 2024). Die Literatur bietet für die Entwicklung einer anwenderorientierten Softwarelösung nur eine geringe Datenbasis darüber, welche Parameter für die Anwender relevant sind, für welche Use Cases KMUs die Szenariogenerierung priorisiert nutzen würden, oder wie sich unterschiedliche Parametrierungen in einem standardisierten Workflow abbilden lassen (vgl. Javaid et al., 2023). Ohne diese Erhebung besteht die Gefahr, dass die Forschung Systeme zum Digitalen Zwillingen an den Interessen der potenziellen Anwender vorbei entwickelt, da sie die Interessen vorab nicht identifiziert hat. Diese Systeme könnten daher nicht den notwendigen Mehrwert zur Problemlösung für die Industrie bieten (Klostermeier et al., 2020). Daraus folgen kostensteigernde Anpassungen oder Unzufriedenheit. Ebenfalls stellt sich die Frage, ob Synergieeffekte zwischen verschiedenen Use Cases und Szenariogenerierungen bestehen, die bei frühzeitiger Berücksichtigung genutzt werden können.

Im Kontext der Implementierung von Digitalen Zwillingen ist zusätzlich die Berücksichtigung von Industrie 4.0 und GenAI notwendig. Technologien der Industrie 4.0 sind durch eine hohe Komplexität der Datenverarbeitung gekennzeichnet und stellen somit sowohl einen Use Case von Digitalen Zwillingen selbst, als auch eine Grundlage zur Erstellung und Nutzung von Digitalen Zwillingen dar (Frenz, 2020). GenAI und verwandte Technologien bergen große Potenziale die anfallenden Modellierungs-, Szenariogenerierungs- und Szenarioevaluierungsaufgaben bezogen auf die Datenverarbeitung effizient zu bewältigen

und über die Einbindung von Funktionen den Prozess zu optimieren, zum Beispiel über die Beisteuerung von initialen Parametern in der Szenariogenerierung (Keil & Bleisinger, 2024).

Diese Ausführungen im Kontext der Szenariogenerierung stehen unter einer übergeordneten Forschungsfrage, deren Beantwortung Unternehmen ein kostenadäquates Softwaretool auf der Höhe der Zeit ermöglichen soll: Wie sieht ein Workflow zur Szenariogenerierung aus, der auf den Umständen möglichst vieler unterschiedlicher Use Cases von Unternehmen fundiert? Zur Untersuchung dieser Frage müssen untergeordnete Forschungsfragen untersucht werden. Welche spezifischen Use Cases des Digitalen Zwillings bestehen? Welche Veränderungen bedingt dabei die Industrie 4.0? Welche relevanten Parameter für die Szenariogenerierung bestehen für die Industrie? Wie sieht ein Workflow zur Szenariogenerierung aus, der sowohl methodische als auch praxisrelevante Anforderungen einbezieht?

Um diese Fragen zu beantworten, erforscht diese Arbeit spezifische Einsatzmöglichkeiten des Digitalen Zwillings in der Industrie 4.0 entlang seines Lebenszyklus. Unterschiede und Gemeinsamkeiten der identifizierten Use Cases sollen systematisch aufgearbeitet werden, um Schnittmengen und typische Eigenschaften und Anforderungen darzustellen. Für die Industrie wesentliche Parameter für die Szenariogenerierung sollen bestimmt werden, um zu analysieren, welche davon besonders kritisch für eine erfolgreiche Implementierung sind. Anschließend erfolgt die Entwicklung eines Workflows für die Generierung von Szenarien, der sowohl Anforderungen, zum Beispiel Aktualisierungsfrequenzen und -tiefen, als auch methodische Anforderungen berücksichtigt, und so besonders KMUs die Implementierung von Technologien Digitaler Zwillinge erleichtert.

Die Arbeit soll diese Ziele erreichen, indem zunächst die Untersuchung bereits veröffentlichter Forschungsarbeit über die Methodik der systematischen Literaturanalyse durchgeführt wird. Anschließend erfolgt die Erhebung praxisnaher Erfahrungsdaten zu Anwendungsfällen, Herausforderungen und Best Practices bei der Implementierung des Digitalen Zwillings über halbstrukturierte Interviews mit Experten aus Industrieunternehmen im KMU-Umfeld. Die aus diesen Schritten gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend analysiert und fließen in die Erstellung und Validierung eines Workflows zur Szenariogenerierung, der Anforderungen aus der Praxis und der Literatur kombiniert, ein.

## 2 Technische Grundlagen der Simulation und des Digitalen Zwillings

Beginnend mit der Einführung relevanter grundlegender Begriffe in Abschnitt 2.1 eröffnet Abschnitt 2.2 die Begriffswelt Digitaler Zwillinge. Zur Bearbeitung der Forschungsfrage ist die Abgrenzung des Digitalen Zwillings von verwandten Konstrukten notwendig. Zuletzt wird die Szenariogenerierung als Anwendungsfall des Digitalen Zwillings eingeführt, welche den Kern der anschließenden empirischen Untersuchung bildet.

### 2.1 Grundlagen der Simulation

Die in dieser Arbeit folgend eingeführten Technologiekonzepte sind in der Domäne der Simulationstechnik, bzw. des Systems Engineerings zu verorten. Dort werden die Begriffe *System*, *Modell* und *Simulation* oft inhaltlich vermischt, wodurch die Verständlichkeit von Arbeiten erschwert wird (Schluse, 2024). Daher folgen zunächst eine Definition und Abgrenzung der Begriffe.

#### 2.1.1 Systeme, Modelle und Modellierungen

Als Zentrum technischer Konzepte treten ein oder mehrere Systeme auf. Der Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) VDI 3633 Blatt 1 definiert ein System als eine „*von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen*“ (VDI 3633 Blatt 1). In der gleichen Richtlinie werden die Merkmale eines Systems durch den VDI festgelegt. Demnach ist ein System gekennzeichnet durch

1. *„die Festlegung seiner Grenze gegenüber der Umwelt (Systemgrenze), mit der es über Schnittstellen Materie, Energie und Informationen austauschen kann (Systemein- und -ausgangsgrößen),*
2. *die Elemente, die bei der Erhöhung der Auflösung selbst wiederum Systeme darstellen (Subsysteme) oder aber als nicht weiter zerlegbar angesehen werden (Systemelemente),*
3. *die Ablaufstruktur in den Elementen, die durch spezifische Regeln und konstante oder variable Attribute charakterisiert wird,*

4. die Relationen, die die Systemelemente miteinander verbinden (Aufbaustruktur), so dass ein Prozess ablaufen kann,
5. die Zustände der Elemente, die jeweils durch Angabe der Werte aller konstanten und variablen Attribute (Zustandsgrößen) beschrieben werden, von denen im Allgemeinen nur ein kleiner Teil untersuchungsrelevant ist,
6. die Zustandsübergänge der Elemente als kontinuierliche oder diskrete Änderungen mindestens einer Zustandsgröße auf Grund des in dem System ablaufenden Prozesses.“

Das System dient dabei als katalytischer Raum, in dem die Systemelemente bestrebt sind ein gemeinsames Ziel zu erreichen (Weilkiens, 2006). Wie in VDI 3633 Blatt 1 angedeutet, können Systeme selbst als Systemelemente in übergeordneten Systemen in Erscheinung treten. Diese übergeordneten Systeme aus Systemen (engl. System of Systems, SoS) definiert Weilkiens als Systeme, dessen Elemente wiederum eigenständige Systeme sein können (Weilkiens, 2006). Auch hier bringt das SoS die Elemente, hier Systeme, in einem katalytischen Raum zusammen, um ein gemeinsames Ziel zu erreichen. Nach ISO 15288:2023 verfügen die untergeordneten Systeme zwar über eigene Aufgaben, Ressourcen und Ziele. Durch die koordinierte Integration der Subsysteme in das übergeordnete System werden diese Eigenständigkeiten jedoch zur Erreichung des übergeordneten Systemziels gelenkt (ISO 15288:2023).

Im Zusammenhang, aber auch in Abgrenzung zum System definiert der VDI ein Modell als *„vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System. Das Modell unterscheidet sich hinsichtlich der untersuchungsrelevanten Eigenschaften nur innerhalb eines vom Untersuchungsziel abhängigen Toleranzrahmens vom Vorbild“* (VDI 3633). Diese vereinfachte Nachbildung ermöglicht die Auseinandersetzung mit einem System unter Berücksichtigung spezifischer Perspektiven und Detaillierungsgraden (Schluse, 2024). Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. evaluiert diesen utilitaristischen Ansatz eines Modells in ihrer Beschreibung eines Modells als *„eine vereinfachte, auf ein bestimmtes Ziel hin ausgerichtete Darstellung der Merkmale eines Betrachtungsgegenstands, die eine Untersuchung oder eine Erforschung erleichtert oder erst möglich macht.“* (acatech, 2013). In der modernen Anwendungstechnik werden zahlreiche Softwares zur Modellbildung angeboten, je nach Detaillierungsgrad und Anwendungsgebiet. FEM-Modelle zerlegen Systeme in endlich viele Teilkörper und bedienen entsprechend einen hohen Detaillierungsgrad (Stommel et al., 2018), während klassische CAD-Modelle Elemente und Systeme mit einem größeren Detaillierungsgrad abdecken (Vajna et al., 2018).

Ein Modell ist Ergebnis eines Modellierungsprozesses. Modellierung beschreibt ein Vorgehen, bei dem ein System im Hinblick auf seine Struktur, Verhalten und Eigenschaften beschrieben wird und in dessen Durchführung ein Modell konstruiert wird (Lei et al., 2007). Zentral für diese Arbeit sind Simulationen. Bei einer Simulation werden über Simulationsverfahren verschiedene Simulationsmodelle modelliert und anschließend im Kontext von prädikativen Fragestellungen evaluiert (Liebl, 1995). Schluse definiert ein Simulationsmodell als ein „*formales, simulationsspezifisches Modell eines geplanten oder existierenden Systems*“ (Schluse, 2024). Entsprechend des flexiblen Detaillierungsgrades von Modellen, ist für die Durchführung von Simulationen über das Simulationsmodell das Maß an struktureller und verhaltenstechnischer Übereinstimmung mit dem modellierten System von Bedeutung (D'Angelo et al., 2016). Dieses variiert je nach Ziel der Simulation.

### **2.1.2 Simulationen und experimentierbare Modelle**

Simulationsmodelle dienen als Basis zur Systemsimulation (Liebl, 1995; Schluse, 2024). Das System muss zur Durchführung einer Simulation in experimentierbare Modelle überführt werden. Der VDI definiert den Begriff Simulation in Zusammenhang zum experimentierbaren Modell in der Richtlinie VDI 3633 als „*Verfahren zur Nachbildung eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem Experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. [...] Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden. [...] Mithilfe der Simulation kann das zeitliche Ablaufverhalten komplexer Systeme untersucht werden [...]*“. Zum näheren Verständnis des Simulationsvorgangs kann eine mathematische Betrachtungsweise helfen. Eine Simulation berechnet den zeitlichen Verlauf eines Zustandsvektors für ein zugrundeliegendes Simulationsmodell, welches den Systemzustand zu einem Zeitpunkt  $t$  repräsentiert. Dabei wird das Simulationsmodell von seinen Parametern und Algorithmen charakterisiert (Schluse, 2024). Da dynamische Prozesse innerhalb des Modells vorliegen, ist das gesamte Simulationsmodell und seine Parameter und Algorithmen als zeitabhängig zu betrachten (Klemmt et al., 2009). Zusätzlich können Parameter des einen Simulationsverfahrens für ein anderes ein Systemzustand sein und umgekehrt. Um diesem Missverständnis auszuweichen, wird an Stelle des Systemzustands der Begriff des Simulationszustands eingeführt. Dieser wird definiert als Zustand, welcher „*neben dem Systemzustand  $x$  zum Zeitpunkt  $t$  auch die Parameter  $a$  und Algorithmen  $A$  eines Simulationsmodells für diesen Zeitpunkt*“ enthält (Schluse, 2024), und verbindet damit den Zustandsvektor mit den Parametern und Algorithmen des Simulationsmodells. Über einen definierten initialen Simulationszustand kann mit Hilfe von Simulationsfunktionen, welche die mathematische Darstellung eines

experimentierbaren Modells sind, und bekanntem Verlauf der Systemeingangsgrößen der zeitliche Verlauf des Simulationszustands, sowie die Ausgangsgrößen des Systems berechnet werden (Schluse, 2024). Dies geschieht über die Einbettung der Simulationsfunktionen in einen Simulator.

### **2.1.3 Simulatoren**

Der Simulator (oft auch Simulationsprogramm) ermöglicht zum einen die Erstellung des Simulationsmodells, also ein Modell zur Abbildung des dynamischen Systemverhaltens, zum anderen die Überführung des Simulationsmodells in ein experimentierbares Modell. Der VDI definiert ein Simulator als *„Softwareprogramm, mit dem ein Modell mithilfe einer Programmiersprache zur Nachbildung des dynamischen Verhaltens eines Systems und seiner Prozesse erstellt und ausführbar gemacht werden kann. Ein Simulator beinhaltet einen Simulatorkern, eine Datenverwaltung, eine Bedienoberfläche und gegebenenfalls weitere Schnittstellen.“* (VDI 3633). Somit ist der Simulator kein reines mathematisches Werkzeug, sondern stellt auch eine Anwendungsplattform zur vollumfänglichen Durchführung von Simulationen, von Erstellung bis Auswertung, bereit.

Eine Zusammenfassung der Begriffe und deren Abgrenzungen kann Abbildung 1 entnommen werden.

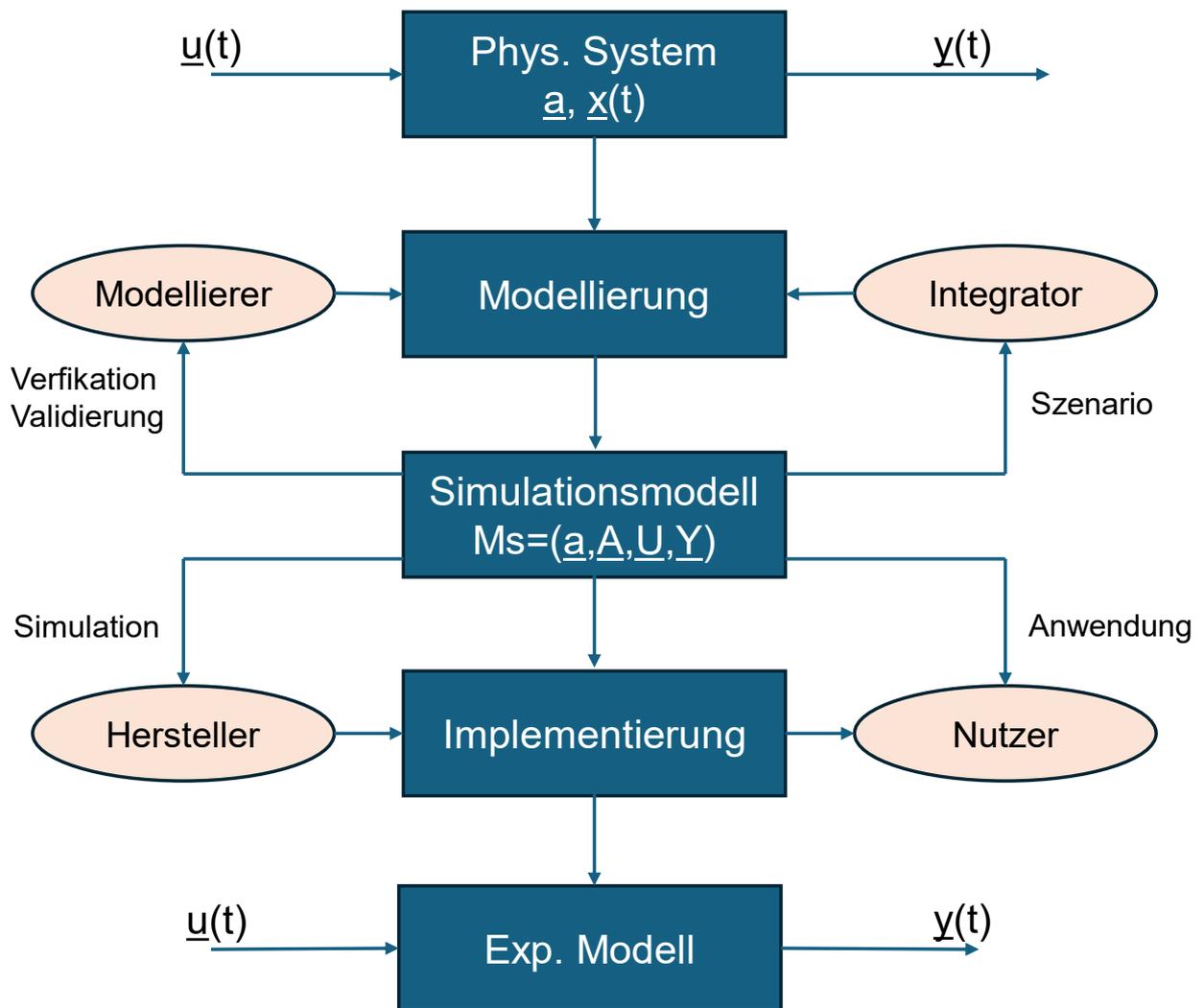


Abbildung 1 – Begriffsmodell des experimentierbaren Modells nach Lei et al. (2007)

Am Anfang der Simulation steht immer ein System, welches durch seine Elemente, den Systemparametern und Zuständen gekennzeichnet ist. Über Anwendung von Modellierung wird das System in ein Simulationsmodell übersetzt. Aus diesem Simulationsmodell erzeugt der Simulator über die implementierten Simulationsfunktionen ein experimentierbares Modell mit seinen zeitabhängigen Simulationszuständen.

Neben dieser auf das digitale Werkzeug fokussierten Betrachtung auf Simulationen existieren für den Anwender von Simulationstechniken menschliche Kontrollmethoden, um die Glaubwürdigkeit der aus der Simulation abgeleiteten Ergebnisse zu prüfen. Eine Methode zur strukturierten menschlichen Kontrolle von Simulationsvorgängen ist die Verifikation & Validierung (V&V) (Rabe et al., 2008). Die V&V bietet eine strukturierte, alle Phasen der

Simulationsstudie begleitende Methodik, um das Simulationsmodell oder deren Ergebnisse auf ein subjektiv ausreichendes Maß an Glaubwürdigkeit hinzuprüfen. Dieser subjektive Aspekt soll dadurch objektiviert werden, dass der Anwender seine Ergebnisse und die durchgeführten Schritte der V&V systematisch durchführt und dokumentiert (Rabe et al., 2008). Typisches Durchführungsinstrument ist dabei die Beantwortung von simulationsbezogenen Fragestellungen (J. Hofmann, 2020; Rabe et al., 2008). Beispiele für solche Fragestellungen sind:

- Ist das Modell geeignet, um meine Problemstellung zu lösen?
- Sind die Grenzen des Simulationssystems im Hinblick auf die Generierung von in die Realität umsetzbaren Lösungen schlüssig?
- Wurden Annahmen getroffen, die für alle beteiligten Personen nachvollziehbar sind?

## **2.2 Begrifflichkeiten des Digitalen Zwillings**

Als essenzielle Begrifflichkeit der Forschungsfragen wird im Folgenden der Digitale Zwilling als Bestandteil des übergeordneten Konstrukts der Cyberphysischen Systeme eingeführt. Es folgt der Ansatz einer Begriffsdefinition des Digitalen Zwillings im Rahmen wissenschaftlicher Untersuchungen mit einer begrifflichen Rahmensetzung. Ergänzend wird der Digitale Zwilling von ähnlichen Konstrukten abgegrenzt, um ein für diese Arbeit klares Verständnis des Begriffs zu schaffen. Zum Schluss des Kapitels wird der Simulationsbasierte Digitale Zwilling als zentraler Begriff für die Szenariogenerierung eingeführt, um die Szenariogenerierung auf Basis Digitaler Zwillinge zu verstehen.

### **2.2.1 Cyberphysische Systeme**

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von Datenverarbeitungstechnologien eröffnet zunehmend Anwendungsmöglichkeiten, die physische und digitale Welt miteinander zu vernetzen (Mockenhaupt & Schlagenhaut, 2024). Der technologische Fortschritt, katalysiert von steigender Rechenleistung und zielgerichteten Softwareanwendungen, begegnet den wachsenden Herausforderungen an Produkten und Prozessen mit Ansätzen zur Verbindung dieser beiden Welten (Peschke & Eckardt, 2019). Als kostenmoderate Methode Produkte in Bezug auf spezifische Eigenschaften zu entwickeln und die Interaktion desselben mit anderen Produkten, bzw. dem Produktionssystem vor kostenintensiven Realversuchen analysieren zu können, bietet sich die Nutzung von Cyberphysischen Systemen an (Baheti & Gill, 2011). Cyberphysische Systeme (CPSs) verbinden Computerhard- und software mit qualitativ neuen

Aktoren, die in eine aufgabenspezifische Umgebung eingebettet sind, Umweltveränderungen wahrnehmen, darauf reagieren sowie lernen und sich adaptieren können (Alguliyev et al., 2018). Frühe Definitionsansätze aus der eng verknüpften Informatik beschreiben CPSs als Integrationen von berechnenden und physischen Prozessen. Dabei werden physikalische Prozesse von eingebetteten Computern und Netzwerke überwacht und gesteuert und unterliegen dabei Rückkopplungsschleifen, in denen die physikalischen Prozesse die Berechnungen beeinflussen und umgekehrt (Lee, 2008). Durch die aus der Rückkopplungsschleife resultierende wechselseitige Beeinflussung zwischen den digitalen und physischen Prozessen wird eine umfassende Integration und Echtzeitinteraktion ermöglicht. Die Funktionalität von Netzwerken und physikalischen Systemen wird dadurch erweitert. Physische Entitäten können so sicher und effizient in Echtzeit überwacht und gesteuert werden (Wan, 2011). In ihren Ressourcen limitierte physische Entitäten können so über die Netzwerkanbindung, z.B. über Cloud-Computing, erheblich effizienter arbeiten (Zhu & Xu, 2020). Die United States National Science Foundation definiert CPSs als „engineered systems that are built from, and depend upon, the seamless integration of computational algorithms and physical components.“ (U.S. National Science Foundation, 2024). Das Zusammenspiel der verschiedenen Elemente und Ebenen eines CPS fasste Xu in seinem schichtübergreifenden CSP-Design zusammen. Abbildung 2 ist diesem Design nachempfunden.

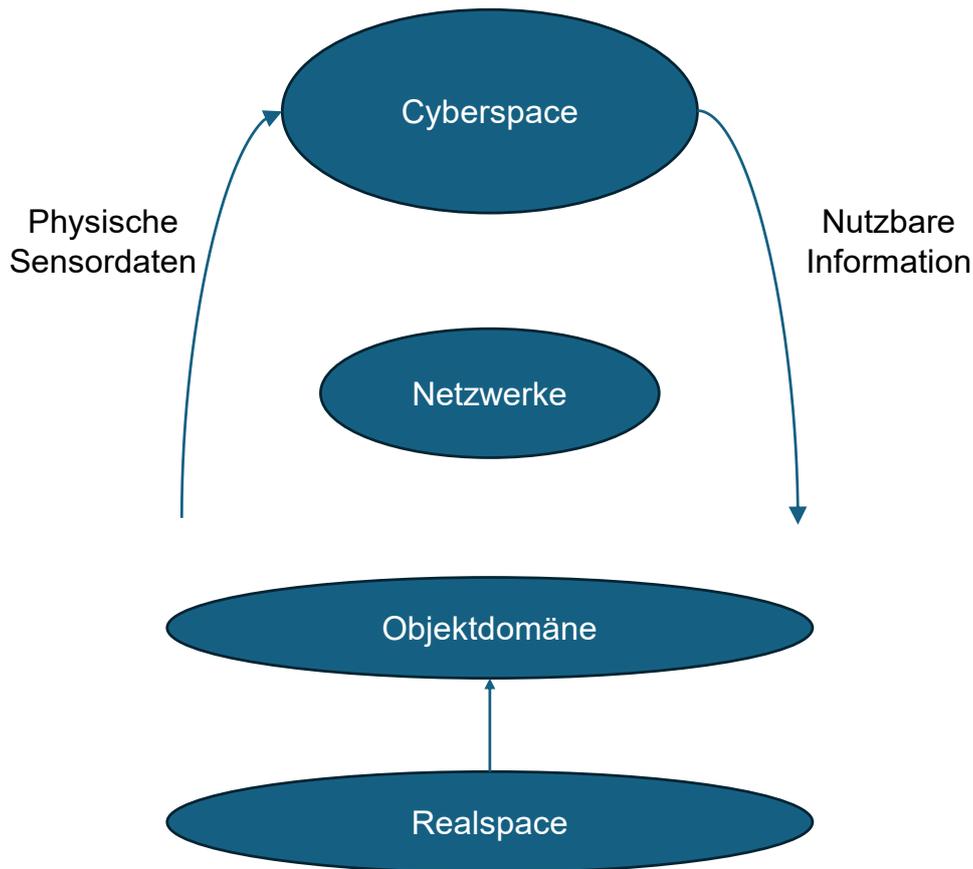


Abbildung 2 - Schichtübergreifendes CSP-Design angelehnt an Zhu & Xu (2020)

Entlang der verschiedenen Definitionen und dem übergreifenden Designmodell werden charakteristische Merkmale von CPSs deutlich (vgl. Wang and Wang (2018), Sobhrajn and Nikam (2014)). CPSs verfügen über eingebettete und mobile Sensorik, welche sensorübergreifenden Datenquellen und Datenflüssen unterliegen. Dabei wird eine Interaktion von digitalen und physischen Systemen über eine Netzwerkinteroperabilität ermöglicht, die die Fähigkeit des Systems zum Lernen und Anpassen ermöglicht. Es liegt somit ein gemeinsamer Cyberspace vor, der neben dem systeminternen auch einen externen Informationsaustausch des CPS, z.B. über das Internet of Things, bietet. Je nach physischer Entität muss dabei ein verlässlicher Betrieb gewährleistet sein. Auf der Anwenderseite ist der Mensch dabei in die Systematik von CPSs miteinzubinden. Der Mensch interagiert mit dem CPS über die Steuerungs- und Kontrollapplikationen (Liu et al., 2017). Schematisch wird die Interaktion des Menschen mit dem CPS in der serviceorientierten CPS-Architektur nach Abbildung 3 dargestellt.

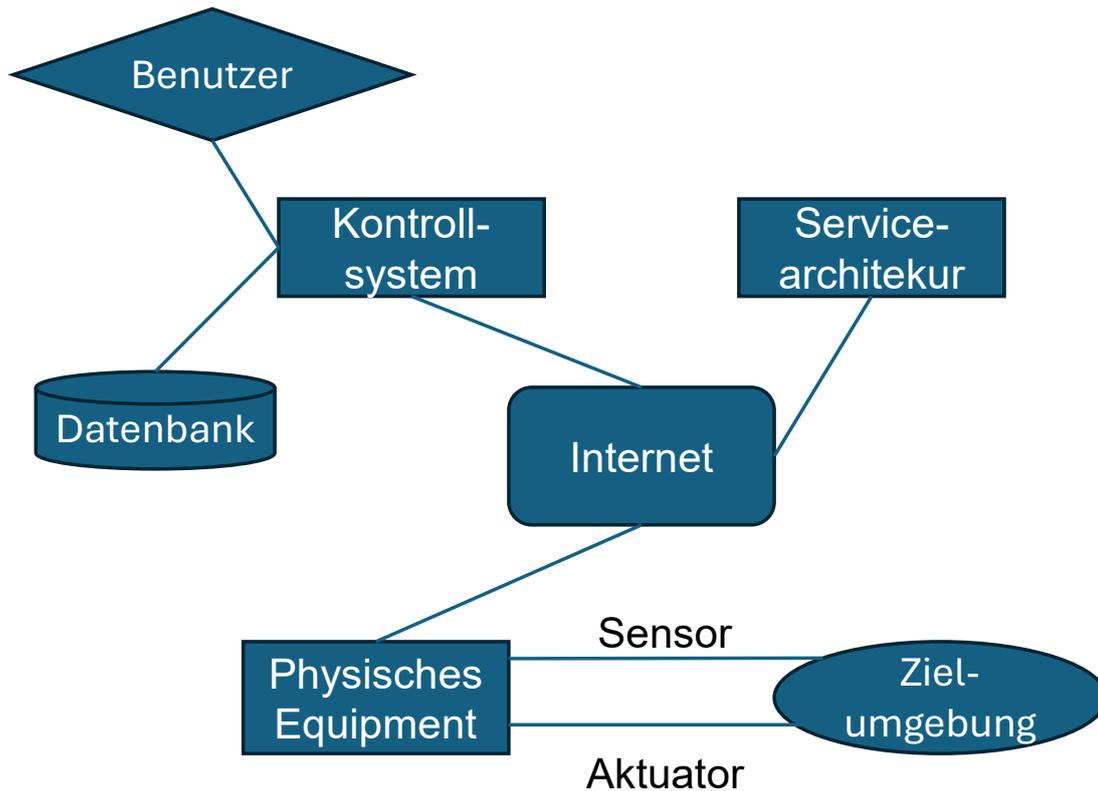


Abbildung 3 - Interaktion Mensch und CPS angelehnt an Liu et al. (2017)

Dem digitalen Abbild der physischen Entität kommt innerhalb der Forschung zum Konstrukt des CPS eine immer größere Bedeutung zu. Von der Detailtiefe und Abbildgüte der digitalen Abbildung hängt der erzielte Nutzen des CPS im Wesentlichen ab. Diesem digitalen Abbild, auch Digitaler Zwilling genannt, wird daher eine Schlüsselrolle in der Weiterentwicklung von CPS attestiert, mit großen Marktpotentialen innerhalb industrieller Anwendungskreise (Groombridge, 2023). Wird der Digitale Zwilling als digitales Abbild einer physischen Entität im Produktionskontext eingesetzt, wird das CPS auch als Cyber-Physical Production System (CPPS) verstanden. Die Verbindung des Digitalen Zwillings und der physischen Entität (z.B. die Fabrik) innerhalb des CPPS wird dabei von Werkzeugen, Echtzeitdatenverarbeitung, Analysetools und Modellierungen moderiert, wie Abbildung 4 zu entnehmen ist.

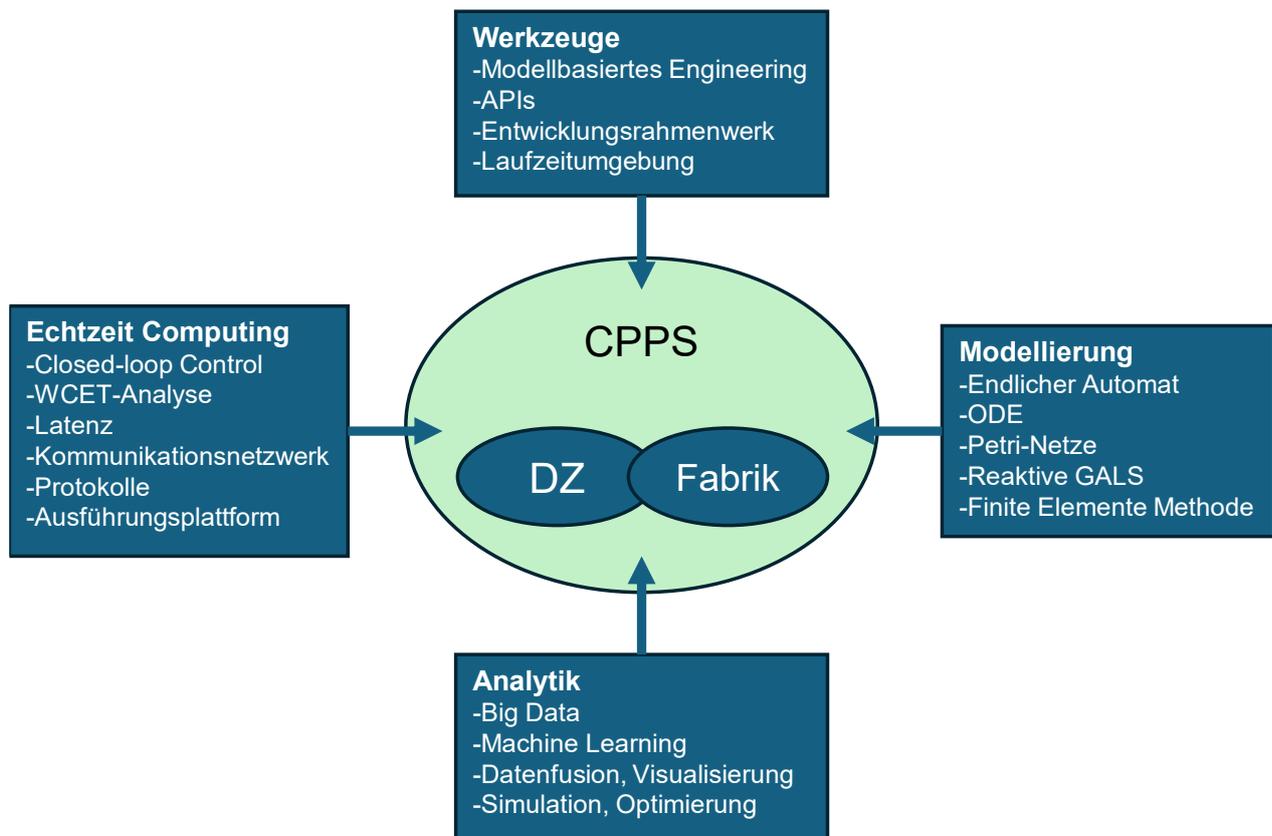


Abbildung 4 - Schlüsselkomponenten CPPS angelehnt an (Park et al., 2019)

Die Verbindung zwischen dem realen Asset und seinem digitalen Abbild stehen dabei im Zentrum des CPPSs. Die moderierenden Schlüsselkomponenten bestimmen dabei die Abbildungsgüte und -tiefe zwischen dem realen Asset und seinem Digitalen Zwilling. Für ein ressourceneffizientes Anwenden von CPPSs Systemen bieten sich Umsetzungen mit variablen Abstraktionsebenen an, da für unterschiedliche Simulationszwecke nicht immer ein vollumfängliches Modell benötigt wird (VanDerHorn & Mahadevan, 2021). Durch die Fähigkeit des CPPS Reaktionen auf Störungen ausgeben zu können, ist die Echtzeitdatenverarbeitung zwischen physischer und digitaler Wert Voraussetzung für die qualitative Implementation von CPPSs. Verzögerungen in der Datenverarbeitung, etwa durch Systemlatenzen oder der Systemarchitektur, resultieren in Totzeiten des Systems. Diese können erheblichen wirtschaftlichen Schaden anrichten (Alveš & Putnik, 2019; Kim et al., 2019). Zudem ist neben der Verarbeitungsgeschwindigkeit die Qualität der Datenverarbeitung ausschlaggebend für die Fähigkeiten eines CPPS. Technologien Künstlicher Intelligenzen bieten im Kontext der Industrie 4.0 große Potenziale zur Steigerung der Datenverarbeitungsqualität und können den

Nutzen von CPPSs im Vergleich zu klassischen Algorithmen oder menschlichen Bedienern steigern (Cruz Salazar & Vogel-Heuser, 2022). Da die Kommunikation des realen Assets mit dem Digitalen Zwilling im CPPS datenseitig von verschiedenen Akteuren, etwa einer Vielzahl von Sensoren, beeinflusst wird und extern über übergeordnete Systeme wie Smart Factorys in Verbindung mit anderen CPPSs stehen kann, sind kompatible Datenformate für die Datenverarbeitung erfolgsrelevant (Biffel et al., 2019).

### **2.2.2 Begriffliche Abgrenzung Cyber Physisches System und Digitaler Zwilling**

Der im vorherigen Kapitel beschriebene Zusammenhang zwischen CPPS und einem Digitalen Zwilling soll in diesem Kapitel erläutert werden. Die kontextuale Nähe der Begriffe lässt die Grenzen zueinander aufweichen, jedoch müssen diese als eigenständige Konzepte verstanden werden. Die Eigenständigkeit und Vernetzung der Begriffe werden von Roßmann and Schluse (2020) als semantisches Netz in Abbildung 5 verdeutlicht.

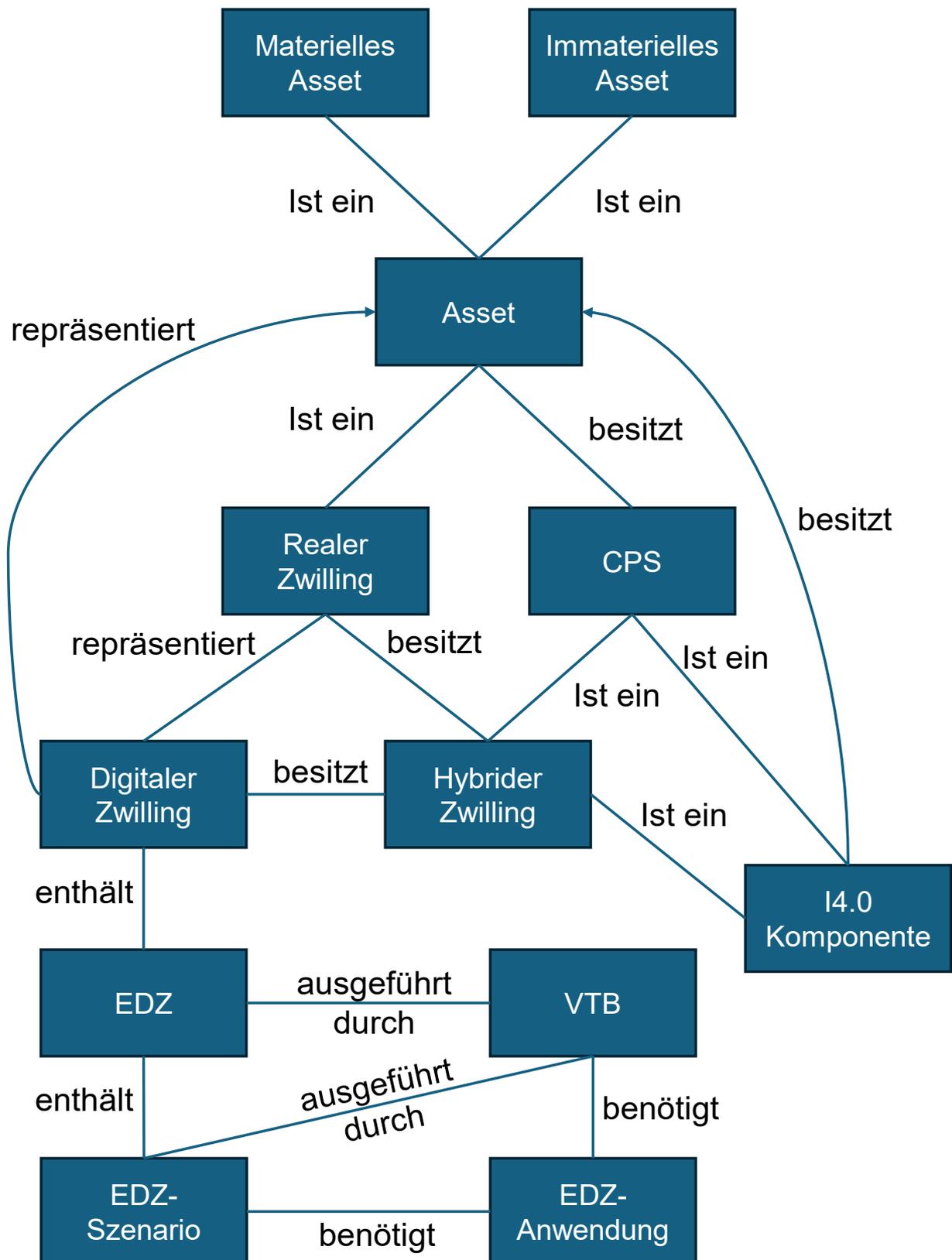


Abbildung 5 - Semantisches Netz des Digitalen Zwillings angelehnt an Roßmann and Schluse (2020)

Im Zentrum des semantischen Netzes steht der Zusammenhang zwischen dem Realen, Digitalen und Hybriden Zwilling. Der Reale Zwilling ist im Kontext der CPPSs meist ein diskretes Asset, welcher durch den Digitalen Zwilling in der digitalen Abbildung repräsentiert wird. Durch die Vereinigung von Realem und Digitalem Zwilling bilden CPPSs den hybriden Zwilling. Während der Hybride Zwilling als übergeordnete Struktur funktioniert, ist der Digitale Zwilling ein zwar im Rahmen des CPS interagierendes Konstrukt, kann für sich aber als eigenständiges System verstanden werden. Der Digitale Zwilling ist stets an seinen Realen Zwilling gekoppelt, während ein CPS Korrespondenzen mit unendlich vielen weiteren Assets innerhalb eines Netzwerks unterhalten kann (Tao, Qi, et al., 2019). Durch die 1-zu-1 Beziehung zwischen dem Digitalen Zwilling und dem Asset gegenüber der 1-zu-vielen Beziehung eines CPS, sind Digitale Zwillinge einfacher und schneller in neue IT-Anwendungen integrierbar. Diese Abgrenzung ist besonders dann relevant, wenn experimentierbare Digitale Zwillinge (EDZ) untersucht werden. EDZs bezeichnet dabei die Abbildung einer physischen Entität mit allen ihren relevanten Eigenschaften und dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell (Roßmann & Schluse, 2020). Dieses wird in Simulationen, bzw. Szenariogenerierungen entlang des Anwendungsfalls weiterentwickelt. Durch die relative Eigenständigkeit des Digitalen Zwillings, in dessen Hierarchie sich der EDZ unterordnet, können neue Simulationstechniken und -ansätze in einem vom CPS unabhängigen Subsystem schnell und effizient erprobt werden.

### **2.2.3 Eingrenzung des Begriffs Digitaler Zwilling**

Da dem Begriff des Digitalen Zwillings in dieser Arbeit eine Schlüsselrolle zukommt, soll dieser im Folgenden für die weitere Verwendung definiert und abgegrenzt werden. Die Forschung bietet keine gänzlich einheitliche Definition. Daher erfolgt die Bildung eines für die Arbeit verwendbaren Definitionsrahmens.

#### **2.2.3.1 Kurzhistorie des Digitalen Zwillings**

Erste Formulierungen des Begriffs Digitaler Zwillinge beruhen auf der theoretischen Pionierarbeit von Michael Grieves. Im Rahmen der Einführung seines Product Lifecycle Managements (PLM) beschreibt er 2003 ein virtuelles, digitales Repräsentationsäquivalent von einem physischen Produkt (Grieves, 2015), den Digitalen Zwilling. Wesentliche Pionierarbeit in der praktischen Entwicklung Digitaler Zwillinge leistete die NASA bis 2012. Über in Flugkörper eingebaute Flugschreiber, der Wartungshistorie und historischen

Flugdaten wurde ein Digitaler Zwilling von real fliegenden Flugkörpern erstellt. Im Rahmen der Möglichkeiten digitaler Systeme konnten so erstmals im großen Umfang hochgenaue Simulationen mit Hilfe des Digitalen Zwillings durchgeführt werden, um mit den Ergebnissen den realen Zwilling zu optimieren und so Antworten auf die steigende Komplexität in der Entwicklung technischer Geräte zu entwickeln (Glaessgen & Stargel, 2012). Die Pionierrollen von Grieves und der NASA spiegeln sich deutlich im Entwicklungszeitstrahl nach Tao, Zhang, and Nee (2019) wider, der in seinen Grundzügen in Abbildung 6 nachgebildet wurde.

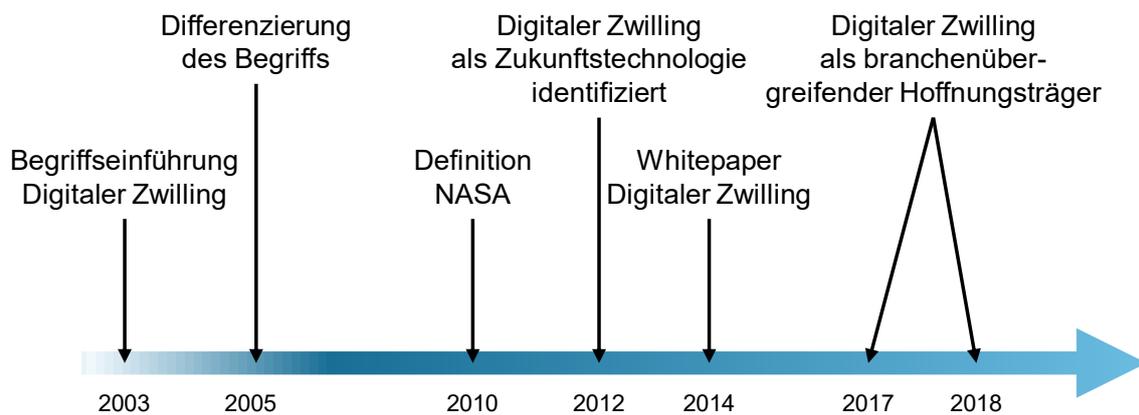


Abbildung 6 - Zeitstrahl Digitaler Zwilling angelehnt an Tao, Zhang, and Nee (2019)

Seitdem stieg das Interesse der Forschung und der Industrie am Konzept Digitaler Zwillinge stetig an und erreichte neben der Luft- und Raumfahrttechnik innerhalb weniger Jahre auch den Bereich industrieller Fertigung im Kontext von Internet of Things (IoT) und Smart Factorys (Hu et al., 2021). Theoretische Vorreiter des Smart Manufacturings entwickelten 2017 Rahmenkonzepte zur Implementierung Digitaler Zwillinge im Kontext von Industrie 4.0 Technologien und öffneten so gegenüber industriellen Anwendern neue theoretische Nutzungspotenziale (Tao & Zhang, 2017). Nachdem das Konzept Digitaler Zwillinge von Gartner zwischen 2016-2018 als einer der größten digitalen technologischen Trends gehandelt wurde (Panetta, 2016, 2017, 2018), setzte ein signifikanter Zuwachs an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zum Digitalen Zwilling ein und manifestierte das Konzept in der Forschung (Hu et al., 2021). Aktuell wird der Digitale Zwilling in unterschiedlichen Forschungs- und Anwendungsbereichen behandelt und bietet ein geschätztes Marktvolumen im Jahr 2024 von 20,07 Milliarden US-Dollar (Research Nester, 2025).

### 2.2.3.2 Definitionen des Digitalen Zwillings

Während frühe Publikationen versuchen eine grundlegende, anwendungs- und branchenunspezifische Definition des Digitalen Zwillings zu formulieren, wird der Digitale Zwilling in jüngeren Publikationen zunehmend im Kontext bestimmter Anwendungsfelder (z.B. diskrete Fertigung) oder als Anwendung selbst definiert. Da eine einheitliche Definition innerhalb der Forschung nicht vorliegt, folgt eine Übersicht von relevanten Definitionen. Die Relevanz wird dabei in der Anzahl von Zitierungen und der Bedeutung der publizierenden Institution für den Forschungsbereich Digitaler Zwilling begründet. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur Definitionen aus der industriellen Forschung hinzugezogen. Die ausgewählten Definitionen sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

*Tabelle 1 - Definitionen des Digitalen Zwillings*

<b>Institution</b>	<b>Definition</b>
Fraunhofer-Chalmers Centre	Der Digitale Zwilling ist eine digitale Kopie eines Produktes oder Produktionssystems. Er bildet die Entität im Design-, Vorproduktions- und Produktionsprozess ab und ermöglicht phasenübergreifende Möglichkeiten zur Echtzeitoptimierung (vgl. Söderberg et al. (2017)).
Polytechnikum Mailand	Der Digitale Zwilling ist ein virtuelles und computerbasiertes Abbild einer physischen Entität, welches über Echtzeitdatenverarbeitung mit der Entität synchronisiert wird und eng mit Technologien von Industrie 4.0 verknüpft ist (vgl. Negri et al. (2017)).
Technische Universität Peking	Der Digitale Zwilling ist ein voll übereinstimmendes virtuelles Abbild einer physischen Entität. Es kann die physische Entität in seinen Eigenschaften und Verhalten in Echtzeit simulieren (vgl. Zhuang et al. (2018))
FAU Erlangen-Nürnberg University Paris-Sud	Der Digitale Zwilling ist eine bidirektionale Verbindung zwischen einem realen Artefakt und seinen virtuellen Abbildungen. Über die bidirektionale Datenverarbeitung ermöglicht der Digitale Zwilling die effiziente Durchführung von Prozessen entlang des Produktlebenszyklus (vgl. Schleich et al. (2017)).

Technische Universität Berlin Fraunhofer Institute Production Systems and Design Technology	Ein Digitaler Zwilling ist ein digitales Abbild eines realen Assets, welches die Eigenschaften, Zustände und Verhalten über Modelle, Informationen und Daten verarbeitet (vgl. Stark et al. (2017)).
Universität Stuttgart	Der Digitale Zwilling ist eine software- und datengestützte digitale Repräsentation von allen Zuständen und Funktionen eines physischen Assets. (vgl. Weber et al. (2017))
Ruhr Universität Bochum	Der Digitale Zwilling besteht aus einem virtuellen Produktmodell und einem physischen Produkt. Das physische Produkt und das virtuelle Modell stehen dabei entlang des Produktlebenszyklus über Feedbackdaten im Austausch (vgl. Abramovici et al. (2016)).

Auch wenn die Literatur keine einheitliche Definition bietet, sind über die verschiedenen Institutionen Gemeinsamkeiten zu erkennen. Im Kern beschreiben alle Definitionen den Digitalen Zwilling als ein virtuelles Abbild einer physischen Entität. Dabei stehen Abbild und Entität über einen wechselseitigen Datenaustausch in Kontakt und können sich gegenseitig beeinflussen. Dieser bidirektionale Fluss an Daten differenziert den Digitalen Zwilling von anderen Technologien, etwa dem Digitalen Schatten, in dem nur ein unidirektionaler Datenaustausch zwischen virtuellem Modell und physischer Entität besteht (Sepasgozar, 2021). Im Produktionskontext wird der Datenaustausch zwischen virtuellem Abbild und realer Entität (Produkt oder Produktionssystem), sowie die Nutzung des Digitalen Zwillings von Technologien der Industrie 4.0 moderiert. Auf Basis dieser Auswertung wird folgende Definition des Begriffs für die weitere Nutzung in dieser Untersuchung vorgeschlagen, die den Gedanken des Three- Dimensional Frameworks nach Grieves (2015) entsprechen:

*Der Digitale Zwilling ist ein virtuelles Abbild einer physischen Entität. Über von Technologien der Industrie 4.0 gestützte bidirektionale Echtzeitdatenverarbeitung wird ein hochgenaues Abbild erschaffen, welches Rückschlüsse auf die physische Entität im digitalen Raum ermöglicht und so verschiedene Prozesse entlang des Produktlebenszyklus simulierbar macht.*

Integriert der Digitale Zwilling Produkt- und Betriebsdaten über Simulationsmodelle, so spricht man von einem simulationsbasierten Digitalen Zwilling (Korth et al., 2018). Ein

simulationsbasierter Digitaler Zwilling erweitert die Anwendungsfelder Digitaler Zwillinge über Konstruktion und Produktion hinaus auf eine Betriebs- und Serviceebene mit prognostizierenden Eigenschaften (Hehenberger & Bradley, 2016). Basierend auf dem Simulationsmodell lassen sich What-if-Szenarien simulieren und damit Entscheidungen evaluieren, wobei virtuelle Einflüsse oder Entscheidungen als auslösende Simulationsbasis dienen (Schluse & Rossmann, 2016). Dieser Prozess im Kontext simulationsbasierter Digitaler Zwillinge wird Szenariogenerierung genannt.

#### **2.2.4 Simulationsbasierter Digitaler Zwilling**

In der diskreten Fertigung besteht das Hauptziel bei der Durchführung von Simulationen darin, die Komplexität eines Systemverhaltens so abzubilden, dass die Folgen äußerer Einflüsse abgebildet werden können (Gabor et al., 2016). Ein geeignetes Konzept zur Lösung dieses Problems bieten Simulationsbasierte Digitale Zwillinge, in der Literatur auch Experimentierbare Digitale Zwillinge (EDZ) genannt (Schluse, 2024). Trotz der in der Forschung nicht einheitlichen Benennung des Begriffs, beschreiben die Begriffe Simulationsbasierter Digitaler Zwilling und Experimentierbarer Digitaler Zwilling ähnliche Ansätze, die für den Anwendungsfall dieser Arbeit, der Szenariogenerierung, gleiche Charakteristika aufweisen (Korth et al., 2018; Schluse, 2024). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird aus Gründen der Homogenität der Begriff Simulationsbasierter Digitaler Zwilling verwendet. Diese werden definiert als eine DZ-Abbildung eines Realen Zwillinges, die eine Interaktion dieser auf Basis experimentierbarer Modelle (s.o.) erlaubt (Schluse, 2024). Über die Nutzung dieser experimentierbaren Modelle kann das zeitliche Verhalten der DZ, und somit auch der Realen Zwillinge, im Hinblick auf verschiedene Einflüsse prognostiziert werden (Dahmen & Rossmann, 2018).

Simulationsbasierte Digitale Zwillinge bestehen nach Korth et. al (2014) aus

- Dem Digitalen Zwilling als Abbild einer physischen Entität
- Einem Event Controller, welcher die Zustände des Digitalen Zwillinges aktualisieren kann
- Reportingprozeduren, welche ursprüngliche Zustände und deren Veränderungen im Rahmen der Simulationsdurchführung aufzeigen
- Einem Simulation-Controller zur Durchführung der Simulationen (Simulator)
- Einem Logbook, welches alle Ereignisse, die dem Modellzustand betreffen, datenmäßig reproduzierbar archiviert
- Persistence, um die Daten aus dem Logbook aufarbeiten zu können

Der Komponentenaufbau eines Simulationsbasierten Digitalen Zwillings und die Datenflussrichtung der Komponenten untereinander ist Abbildung 7 zu entnehmen.

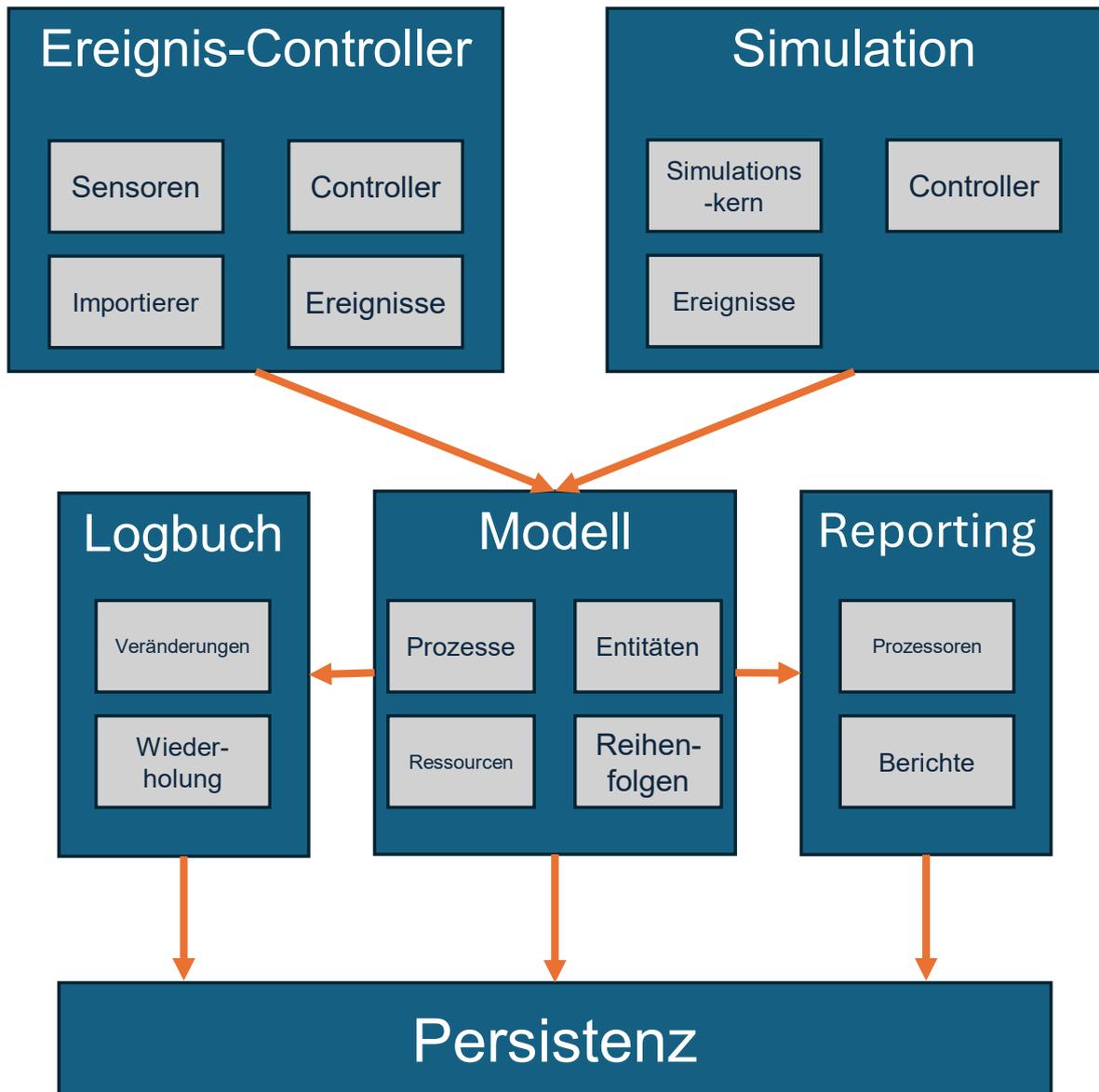


Abbildung 7 – Komponentenaufbau Simulationsbasierter Digitaler Zwilling angelehnt an Korth et al. (2018)

Rahmenwerke aus der Forschung sehen die Stärken von Simulationsbasierten Digitalen Zwillingen, indem die Daten des Realen Zwillings in Simulationsmodelle einfließen und so reale Daten als aussagekräftige Basis für die Simulationsdurchführung genutzt werden (Rosen et al., 2015). Im Kontext der digitalen Fertigung dienen Sensoren, smarte Geräte, Informationssysteme und Datenbanken als Datenversorger zur Erstellung und Aktualisierung

des Digitalen Zwillings und können so die Datengrundlage der Simulation beeinflussen (Santos et al., 2022). Über die Erhebung von Zustands, Ereignis und Kontrolldaten des Realen Zwillings wird der Simulationsbasierte Digitale Zwilling nicht nur generiert, sondern auch fortlaufend aktualisiert (Friederich et al., 2022). Der eingesetzte DZ wird über einen Simulator mit den Simulationsparametern und -funktionen in einer Laufzeitumgebung zusammengeführt (Schluse, 2024). Zur Wahrung einer flexiblen Anpassung an zu lösenden Aufgaben sollten der Simulationsbasierte Digitale Zwilling als Modell und der Simulator als Werkzeug entsprechend konfigurierbar sein. Ergebnis der Nutzung von Simulatoren und Simulationsbasierter Digitaler Zwillinge ist die Erstellung von virtuellen Szenarios über das Simulationsmodell (Saini et al., 2022). Dieses Vorgehen wird folgend Szenariogenerierung genannt.

### **2.2.5 Szenariogenerierung und -analyse**

An den heutigen hochvolatilen Märkten müssen Akteure auf Veränderungen entlang des Produktionssystems schnell antworten können, um am Markt bestehen zu können. Entscheidungen sind bestenfalls noch vor Eintritt der Störung oder Imperfektionen vorbereitet, um eine möglichst kurze Reaktionszeit zu erreichen. Dies kann mit einer virtuellen Vorabanalyse von denkbaren Veränderungen auf das Produktionssystem erfolgen, kurz Szenarioanalyse genannt. Grundlage dieser ist die Generierung von virtuellen Szenarien über Eingangsparameter, kurz Szenariogenerierung. Die steigende Komplexität einzelner Produkte, aber auch von Produktionssystemen mit immer weiter steigenden Abhängigkeiten zu anderen Entitäten, verringert kontinuierlich die Aussagekraft von analogen Szenariogenerierungen und -analysen und erfordert die Nutzung digitaler Systeme (Saini et al., 2022). Allgemein beschreibt die Szenariogenerierung, wie in Abbildung 8 zu sehen, eine umfangreiche datengestützte Analyse mit dem Ziel, das Verhalten eines komplexen Systems unter bestimmten Einflüssen (Szenarien) zu untersuchen (Golfarelli & Rizzi, 2009).



Abbildung 8 - Hierarchisierung der Szenariogenerierung im Entscheidungsfindungsprozess angelehnt an Golfarelli & Rizzi (2009)

Dabei wird gemessen, wie Veränderungen in einer Reihe unabhängiger Variablen auf eine Reihe abhängiger Variablen wirken. Dazu wird ein Simulationsmodell genutzt, welches die Merkmale der zu untersuchenden Entität enthält (Pires et al., 2021a). Mit der Szenariogenerierung (what-if Simulation Modeling) innerhalb des Modells Digitaler Zwillinge können Anwender die Flexibilität und Effizienz von digitalen Simulationsrechnungen nutzen, um Rückschlüsse darauf zu gewinnen, wie ein bestimmter Einfluss auf die physische Entität wirken würde (Boschert & Rosen, 2016). Die Szenariogenerierung nutzt dabei das detailgetreue virtuelle Abbild Digitaler Zwilling als Basis für eine Simulationsdurchführung, und generiert ein szenariogesteuertes Update des Digitalen Zwilling (Korth et al., 2018). Die aus der Szenariogenerierung entstandenen Digitalen Zwillinge und deren Daten können für jede Parametrisierung gespeichert und so konsekutiv analysiert werden, und so eine für die Entscheidungsunterstützung umfassende Datengrundlage bilden. Als Anwendungsformat Digitaler Zwillinge ist die Szenariogenerierung Teil der Serviceebene im Modell Digitaler Zwillinge und steht in direktem Austausch mit dem Abbildungsmodell und dem Anwender. Die Einbettung der Szenariogenerierung in das Servicemodell wird in Abbildung 9 verdeutlicht.

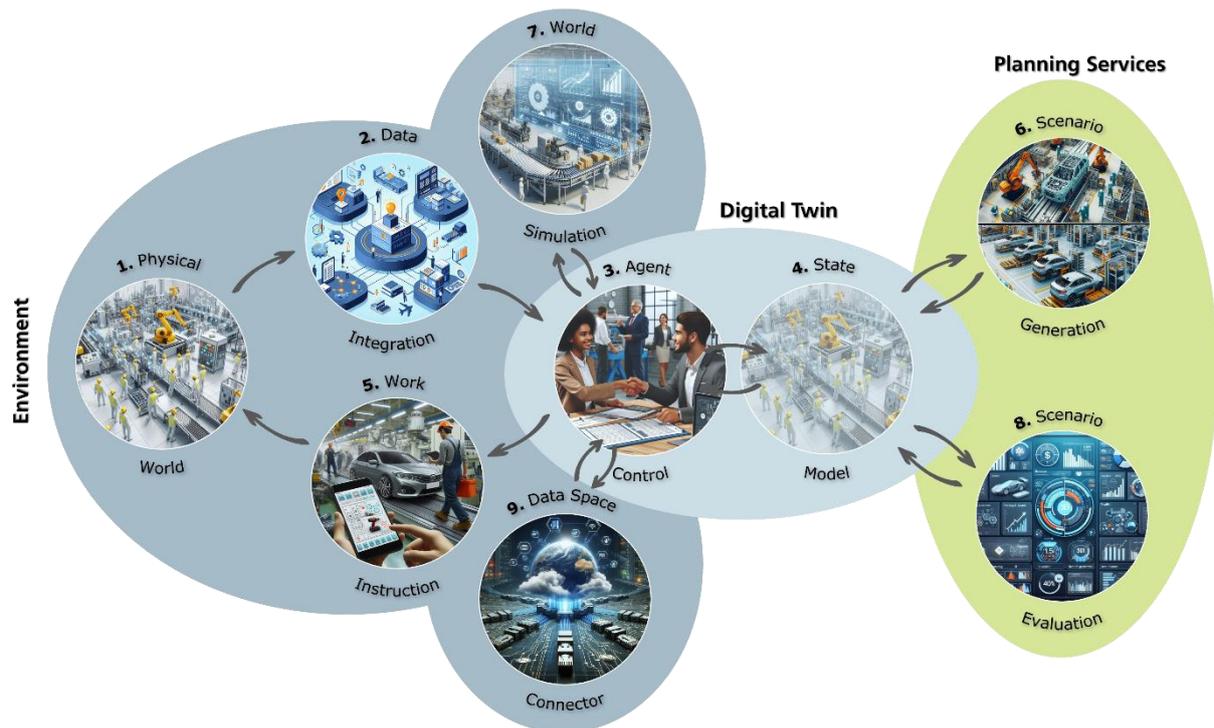


Abbildung 9 - Szenariogenerierung im Kontext Digitaler Zwillinge (Fraunhofer ISST)

Durch die steigenden Kapazitäten in der Datenverarbeitung digitaler Systeme können so die Auswirkungen wesentlich mehr Szenarien am Digitalen Zwilling simuliert werden, verglichen mit einer analogen Durchführung von Tests (Singh et al., 2021). Gleichzeitig erlaubt die Szenariogenerierung eine gezielte Auswahl sowohl von Veränderungen bestimmter Simulationsparameter als auch die Eingrenzung des untersuchenden Systemausschnitts (Jia et al., 2022), und sind in der Anwendung somit nicht nur wesentlich aufwandsärmer als konventionelle Methoden, sondern sind über die Einbettung in einen Simulator in Bezug auf das angesetzte Detaillierungslevel nicht limitiert (Korth et al., 2018). Die Aussagekraft der Szenariogenerierung für die physische Entität hängt dabei im Wesentlichen von der Datenqualität und -menge ab, welche im Rahmen der Simulation durch den Digitalen Zwilling verarbeitet wird, und somit auch von den Daten, die von dem Realen Zwilling erhoben und in den Digitalen Zwilling übertragen werden (Jeglinsky & Winkler, 2020). Zur Sicherstellung einer aussagekräftigen Datenbasis sind Technologien der Industrie 4.0, wie Big Data und GenAI, bei der Erstellung eines Digitalen Zwillinges ein qualitätssteigernder Faktor, da Umfang und Geschwindigkeit der Datenerfassung und -verarbeitung im Vergleich zu herkömmlichen Technologien erheblich gesteigert werden (Correia et al., 2023). Somit können Reaktionen auf die physischen Entität (z.B. Produktionssystem) betreffende Einflüsse noch vor deren Eintritt vorbereitet, und die Entscheidungsfindung im Allgemeinen verbessert werden. Bei der Szenariogenerierung ist auf der Anwenderseite auf eine Begrenzung des Parameterraumes

und der Größe des zu untersuchenden Systemausschnitts zu achten (Schluse, 2024). Denn Szenariogenerierungen mit Berücksichtigung großer und komplexer Untersuchungsräume begünstigen Ineffizienz und den Output von Ergebnissen, die nicht ausreichend mit dem gewünschten Untersuchungsrahmen übereinstimmen (Boschert & Rosen, 2016). Neben der Größe der Datenbasis spielt der Zeitpunkt der Datenverfügbarkeit eine Rolle. Da der DZ selbst über Daten des physischen Systems aktualisiert wird, müssen diese Daten, die in die Szenariogenerierung einfließen, rechtzeitig übertragen werden (Zhuang et al., 2018). Ein Workflow zur Szenariogenerierung, welcher Routinen zur Datenaktualisierung bei Veränderungen im Realen Zwilling, Integration und Synchronisierung zwischen dem Simulationsmodell und Daten des Realen Zwillings, und Anwenderfreundlichkeit in Bezug auf Entscheidungsoptimierung festlegt, ist für eine lösungsorientierte Verwendung der Szenariogenerierung unerlässlich (Santos et al., 2022).

### **3 Industrieller Kontext**

Dieses Kapitel führt in den technischen Kontext der Arbeit ein. Als Katalysator und Moderator von Modellen Digitaler Zwillinge wird im folgenden Kapitel der Begriff Industrie 4.0 eingeführt und definiert. Anschließend wird die Bedeutung der Industrie 4.0 für den Digitalen Zwilling erläutert. Abschließend leitet das Kapitel in das Konzept Smart Factory über, welches eng mit der Industrie 4.0 verbunden ist.

#### **3.1 Industrie 4.0**

Im Zuge eines komplexer werdenden globalen Handels, gekennzeichnet durch immer kürzere Time-to-Market und den Wunsch nach Nachfrageindividualisierung, soll das Konzept der Industrie 4.0 helfen, den Produktionsstandort Deutschland wettbewerbsfähig zu halten (Lasi et al., 2014). Der Begriff Industrie 4.0 steht für den erwarteten, und in Teilen begonnenen Paradigmenwechsel innerhalb der industriellen Fertigung nach den historischen drei industriellen Revolutionen (Mechanisierung, elektrische Energie, Digitalisierung) (Lasi et al., 2014). Eingeführt wurde der Begriff im gleichnamigen Strategiepapier des deutschen Bildungsministeriums 2011, welches eine Strategie zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie im digitalen Zeitalter forderte (Kagermann et al., 2013). Umfasste die Digitalisierung im Rahmen der dritten industriellen Revolution im Wesentlichen die Entwicklung digitaler Produktions- und Automatisierungstechniken, strebt die Industrie 4.0 nach einer Kombination dieser mit aktuellen Informations- und Kommunikationstechnologien (Roth, 2016). Damit einhergehend soll die Wertschöpfung den sich schnell ändernden

Marktbedingungen flexibler antworten können und Leistungen der Unternehmen besser auf Kundenwünsche anpassbar sein (J. Lee et al., 2023; Roth, 2016). Zusätzlich beschreibt Industrie 4.0 dabei nicht einzelne Technologien, sondern ist ein Sammelbegriff von Anwendungskonzepten der modernen Informations- und Kommunikationstechnik, welche innerhalb der Wertschöpfungskette kombiniert werden. Die Zusammensetzung des Sammelbegriffs ist in der Literatur nicht gänzlich einheitlich, jedoch lassen sich bestimmte Technologien und Konzepte übergreifend als wichtige Bestandteile evaluieren (E. Hofmann & Rüscher, 2017). Darunter die Technologien CPPs, Internet of Things (IoT), Internet of Services (IoS) und das Konzept Smart Factory. Das Internet of Things bezeichnet dabei die Vernetzung von physischen Objekten, darunter Sensoren und Smart Objects, über ein Netzwerk, so dass diese miteinander kommunizieren und in Echtzeit Daten austauschen können. Ziel ist es, die physische Welt mit virtuellen Umgebungen zu verbinden, um intelligente, automatisierte und ortsunabhängige Interaktionen zu ermöglichen. (vgl. (Khodadadi et al., 2017; Kopetz & Steiner, 2022; Li et al., 2015). IoS wird definiert als globales Netzwerk von Services. In Bezug auf Industrie 4.0 ermöglicht das IoS die Entwicklung intelligenter Services, die auf vernetzten Geräten basieren (Kunz et al., 2012).

### **3.2 Smart Factory**

Eine praktische Ausbildung des Konzeptrahmens Industrie 4.0 ist die Smart Factory. Hier erfolgt die Integration moderner digitaler Tools in den realen Produktionsablauf (Sawangsi et al., 2018). Das Konzept Smart Factory beschreibt eine hochmoderne, vernetzte und digitalisierte Produktionsumgebung, die durch den Einsatz intelligenter Technologien eine flexible, effiziente und adaptive Fertigung ermöglicht. Dabei sollen Kommunikations-, Berechnungs- und Kontrollprozesse gebündelt zur Befriedigung industrieller Bedürfnisse betrieben werden (Chen et al., 2018). Sie basiert auf der Integration von Automatisierung, Datenverarbeitung, künstlicher Intelligenz (KI) und dem Internet der Dinge (IoT), um Produktionsprozesse in Echtzeit zu optimieren und eine hohe Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Bedingungen zu gewährleisten (Hozdic, 2015). Ein zentrales Merkmal der Smart Factory ist ihre Fähigkeit zur Selbstorganisation und kontinuierlichen Verbesserung. Durch den Einsatz intelligenter Sensoren, vernetzter Maschinen und datengetriebener Entscheidungsfindung können Produktionsabläufe autonom gesteuert und angepasst werden. Diese Sensoren erfassen in Echtzeit relevante Daten zu Maschinenzuständen, Produktionsgeschwindigkeit, Materialverfügbarkeit oder Qualitätskontrolle und ermöglichen so eine sofortige Reaktion auf Veränderungen. Dadurch werden Stillstandzeiten minimiert,

Ressourcen effizient genutzt und Produktionsfehler reduziert (Soori et al., 2023). Ein weiteres wesentliches Konzept der Smart Factory ist die Modularität und Flexibilität. Während traditionelle Fertigungsanlagen oft starr und auf bestimmte Produktionsprozesse ausgerichtet sind, setzt die Smart Factory auf rekonfigurierbare Systeme, die schnell an neue Anforderungen angepasst werden können (J. Lee et al., 2023). Dies geschieht beispielsweise durch die Implementierung intelligenter Aktoren, die präzise Bewegungen und Produktionsabläufe steuern. Die Unterschiede zu traditionellen Designs von Produktionssystemen sind in Abbildung 10 nachzuvollziehen.

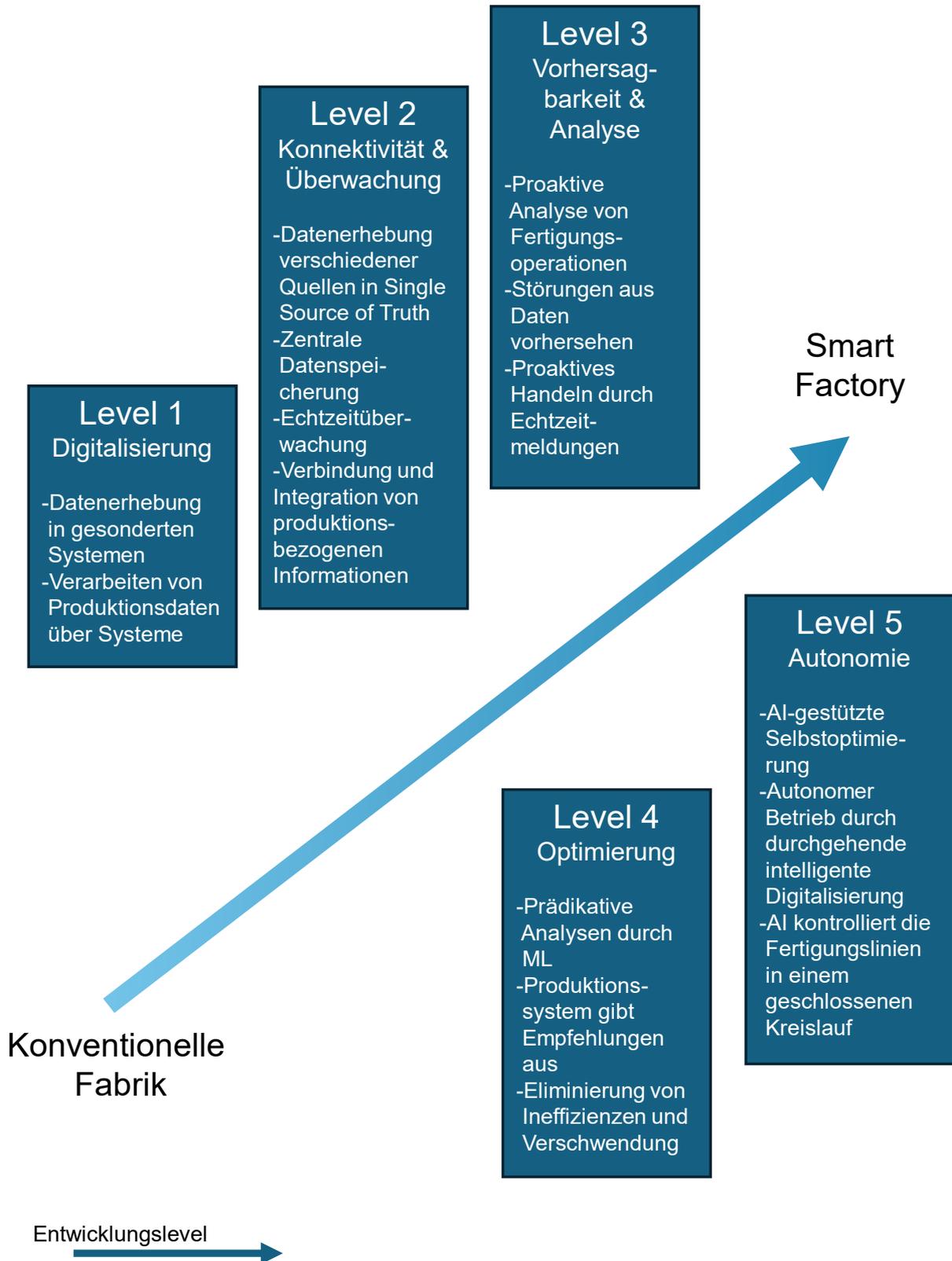


Abbildung 10 - Abgrenzung Smart Factory angelehnt an J. Lee et al. (2023)

Neben der technologischen Optimierung bietet die Smart Factory auch wirtschaftliche Vorteile. Durch eine intelligente Ressourcennutzung, den Einsatz energiesparender Technologien und eine präzisere Steuerung von Materialflüssen kann der Ressourcenverbrauch gesenkt werden (Shi et al., 2020). Dies trägt zu einer nachhaltigeren Produktion und zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit bei (Matt et al., 2016).

### 3.3 Product und System Life Cycle Management

Der Begriff Product Life Cycle Management (PLM) beschreibt einen Prozess, bei dem alle Phasen des Lebenszyklus eines Produktes, also von der Entwicklung bis Herstellung, Service und Entsorgung, vom Unternehmen gesteuert und verwaltet werden (Cheung & Schaefer, 2010). Dabei fallen für ein Unternehmen in jeder Phase unterschiedliche Tätigkeiten an, welche in Abbildung 11 dargestellt sind:

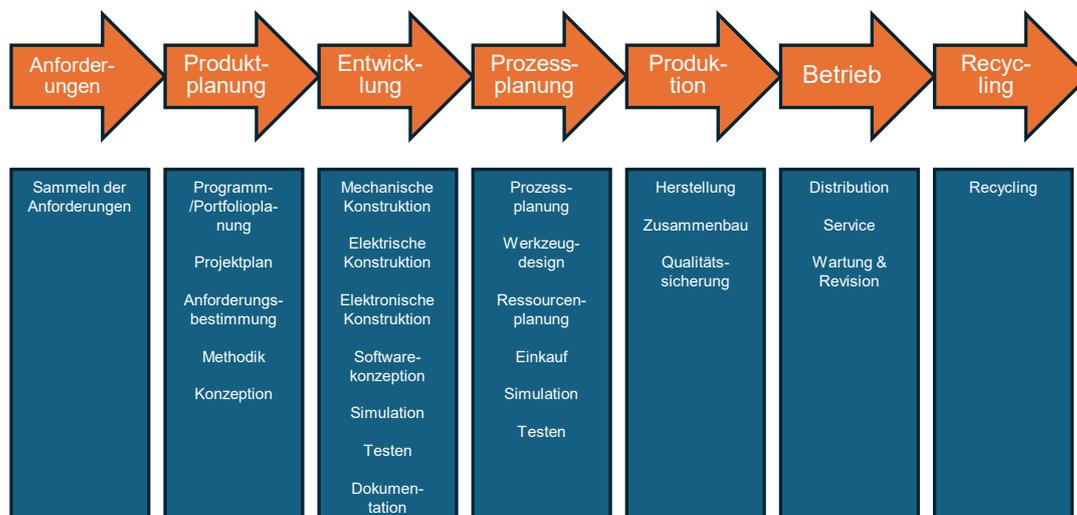


Abbildung 11 - Phasen des PLMs nach Eigner (2009)

Durch die Nutzung von datengestützten Technologien ermöglicht es PLM ein Produkt und auf ein Produkt bezogene Services entlang des Produktlebenszyklus kontinuierlich zu verbessern (J. Stark, 2020). Die Technologie Digitaler Zwillinge kann dabei entlang des gesamten Produktlebenszyklus den Verbesserungsprozess unterstützen, indem Digitale Zwillinge in der Entwicklungsphase Iterationen beschleunigen (Donoghue et al., 2018; Golder & Mitra, 2018) und in der Entsorgungsphase als datengestütztes Modell des Produktes Informationen über

die verwendeten Rohstoffe bereithält (Sudarsan et al., 2005). Schließlich kann auch der Produktlebenszyklus selbst von einem Digitalen Zwilling repräsentiert werden, wenn dieser alle Lebenszyklen gleichzeitig integriert (Lo et al., 2021). Zwar hat sich keine einheitliche Definition des Begriffs PLM durchgesetzt, jedoch gelten die fünf Kernkomponenten eines PLMs nach AMR (Burkett et al., 2002) als Konsens in der Wissenschaft (vgl. (Cheung & Schaefer, 2010; Eigner, 2009). Demnach besteht ein PLM aus:

1. Einem Produkt Daten Management (PDM), welches Funktionen zur Verwaltung und Kompatibilität von Produktdaten bietet
2. Collaborative Product Design, welches Funktionen zum kollaborativen Designen und Herstellen von Produkten bietet
3. Einem Supply Chain Prozessmanagement, welches die notwendigen Produktdaten an Zulieferer und Händler weiterleitet
4. Einem Customer Needs Management, welches Funktionen zur Verwaltung der kundenbezogenen Daten des Produkts bietet und dabei sowohl im Produktentwicklungsprozess als auch im After Sale den Kunden einbindet
5. Einem Product Portfolio Management, welches eine generelle Aufarbeitung der Produktdaten bietet, die für einen Nutzer von Interesse sein könnten

Durch diese Zusammensetzung wird deutlich, dass ein PLM mehrere IT-Systeme und Managementfunktionen integriert und nicht als singuläre Anwendung verstanden werden kann (Teresko, 2004). Ähnlich wie Technologien Digitaler Zwillinge ist eine Implementierung von PLM gerade für KMUs durch den hohen Koordinierungsaufwand der einzelnen Systeme relativ teuer (Cheung & Schaefer, 2010), birgt jedoch auch wirtschaftliche Potenziale über offene Kommunikationswege und Kundenbindung (Eigner, 2009).

Der Umfang und die Komplexität von PLM-Anwendungen haben sich parallel zur fortschreitenden Digitalisierung der Fertigung gesteigert, wie in Abbildung 12 ersichtlich ist.

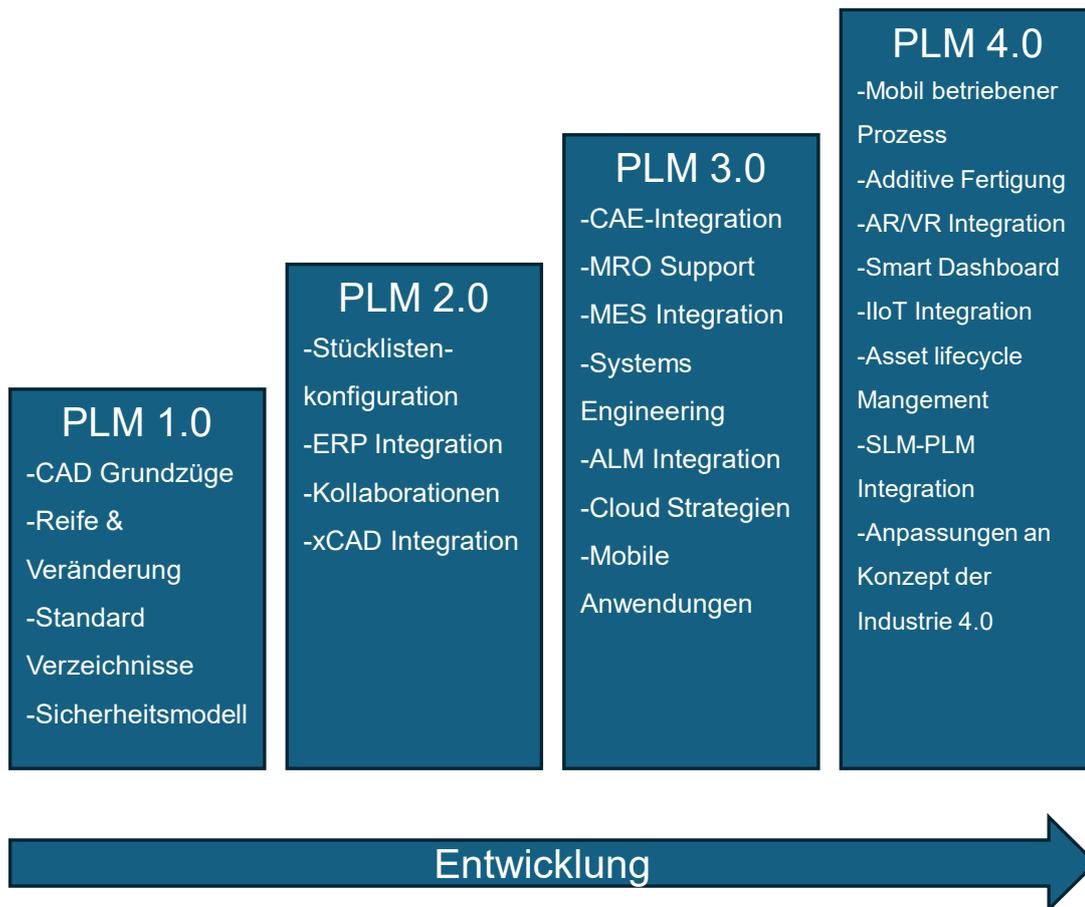


Abbildung 12 - Entwicklung des PLMs nach Terzi et al. (2010)

Mit dem Auftreten steigender Komplexitäten in den Lebensphasen von Produkten und der Integration von digitalen Ansätzen in der Fertigung, welche mit dem Wachstum an anfallenden Daten einhergehen, die über den Produktlebenszyklus verwaltet werden müssen, wurde das Konzept System Lifecycle Management (SysLM) entwickelt (Eigner et al., 2016). Produkte sind im Zuge der digitalen Fertigung in Systemen eingebunden, wodurch die alleinige Berücksichtigung des Produktes losgelöst von einbettenden Systemen für ein valides Lifecycle Management nicht ausreicht (Eigner et al., 2017). Mit dem SysLM soll eine Systematik geschaffen werden, mit der eine Rückverfolgbarkeit von Veränderungen und Konfigurationen von Produkten im Kontext von digitalen Systemen, sowie ein valides Qualitätsmanagement über den gesamten Produktlebenszyklus garantiert werden kann.

SysLM wird definiert als interdisziplinäres und ganzheitliches Informations- und Prozessmanagement, das das PLM um die frühen Phasen der Systemmodellierung erweitert. Dabei werden alle Disziplinen und Services integriert, welche die Produktionsplanung unterstützen, um Brücken zur Fertigung zu schlagen sowie die Betriebsphase des Produkts

zu verlängern. (Eigner, 2021). Durch die ganzheitliche Betrachtung des Produktes als Teil eines digitalen Systems ist SysLM als Grundlage für modellbasiertes Systems Engineering, die Digitalisierung des Engineering Process und als Unterstützung für serviceorientierte Geschäftsmodelle auf Basis Digitaler Zwillinge zu verstehen.

In den beschriebenen Konzepten des PLM und SysLM ist die Simulation als reines produktbezogenes Tool zu verstehen. Es ist ein Werkzeug unter vielen, welches auf das betrachtete Produkt zugeschnitten ist (Hayat & Winkler, 2022). Bei Betrachtung eines anderen Produkts ist die bestehende Simulation meist zu verwerfen, und eine neue Simulation muss gebildet werden. Diesem Tool-Centric Approach begegnet der simulationsbasierte Digitale Zwilling, indem er basierend auf der Simulation auch für andere Anwendungen entlang des PLM und SysLM Use Cases bedient (Schluse & Rossmann, 2016). So kann das DZ-Modell eines Produkts oder Systems zum einen vor dem physischen Asset entstehen und ab der Designphase Funktionen im LM bieten (Korth et al., 2018). Zum anderen kann die Verwendung eines simulationsbasierten Digitalen Zwillings auch bei der Modellbildung zu einem späteren Zeitpunkt im Produktlebenszyklus für vor- und nachgelagerte Phasen einen Mehrwert bieten, so bei der Optimierung von existierenden Produkten und Systemen (Golovatchev et al., 2021). Dieser lebensphasenübergreifende Charakter trennt den simulationsbasierten Digitalen Zwilling von einer konventionellen Simulationssoftware und unterstreicht die Systemeigenschaft. Statt wie ein bloßes Werkzeug tritt der SDZ als eigenes, nutzbares System in Erscheinung und steht für den Wandel des Tool-Centric Approach der Simulation zu einem System-Centric Approach im PLM und SysLM (Schluse & Rossmann, 2016).

## **4 Methoden zur Anforderungserhebung an die Szenariogenerierung**

In diesem Kapitel werden die wissenschaftlichen Arbeitsweisen beschrieben, mit denen die Forschungsfragen bearbeitet werden. Startend mit der Systematischen Literaturanalyse, wird anschließend die Vorgehensweise des Experteninterviews detailliert dargestellt.

### **4.1 Systematische Literaturanalyse**

Die systematische Literaturanalyse (SLA) hat ihren Ursprung in den Sozial- und Geisteswissenschaften. Sie wurde als Instrument entwickelt, um literarische Forschungsbeiträge eines übergeordneten Themenbereichs zur Beantwortung von themenbezogenen spezifischen Forschungsfragen zusammenzufassen (Stamm & Schwarb, 1995). Durch die steigende Verfügbarkeit von Forschungsliteratur im Rahmen von digitalen Publikationsplattformen, übernahmen andere Domänen die Methodik (Eisend, 2020). Inzwischen gilt diese domänenübergreifend als bewährtes Instrument zur Analyse einer großen Anzahl von Primärliteratur (Becker et al., 2018). Kern der SLA ist die systematische und reproduzierbare Sichtung und Analyse einer möglichst großen Anzahl an Quellen, wodurch die SLA selbst als Methodik der Sekundärforschung zu klassifizieren ist (Stamm & Schwarb, 1995).

Die SLA bietet als Methode die Möglichkeit zu Forschungsfragen den literaturbasierten Forschungsstand unter festgelegten Kriterien Suchkriterien reproduzierbar zu identifizieren und zu selektieren (Fink, 2020). Durch die hohe Anzahl an Veröffentlichungen gilt die Identifizierung zur Forschungsfrage beitragender Quellen als herausfordernd (Easterby-Smith et al., 2012). Um eine wissenschaftlich qualitative Durchsicht der Literatur sicherzustellen, muss der Anwender einer Systematik in der Auswahlphase folgen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die SLA-Systematik nach Fink angewendet (Fink, 2014). Der Abbildung 13 ist das Durchführungsschema der SLA nach Fink zu entnehmen.

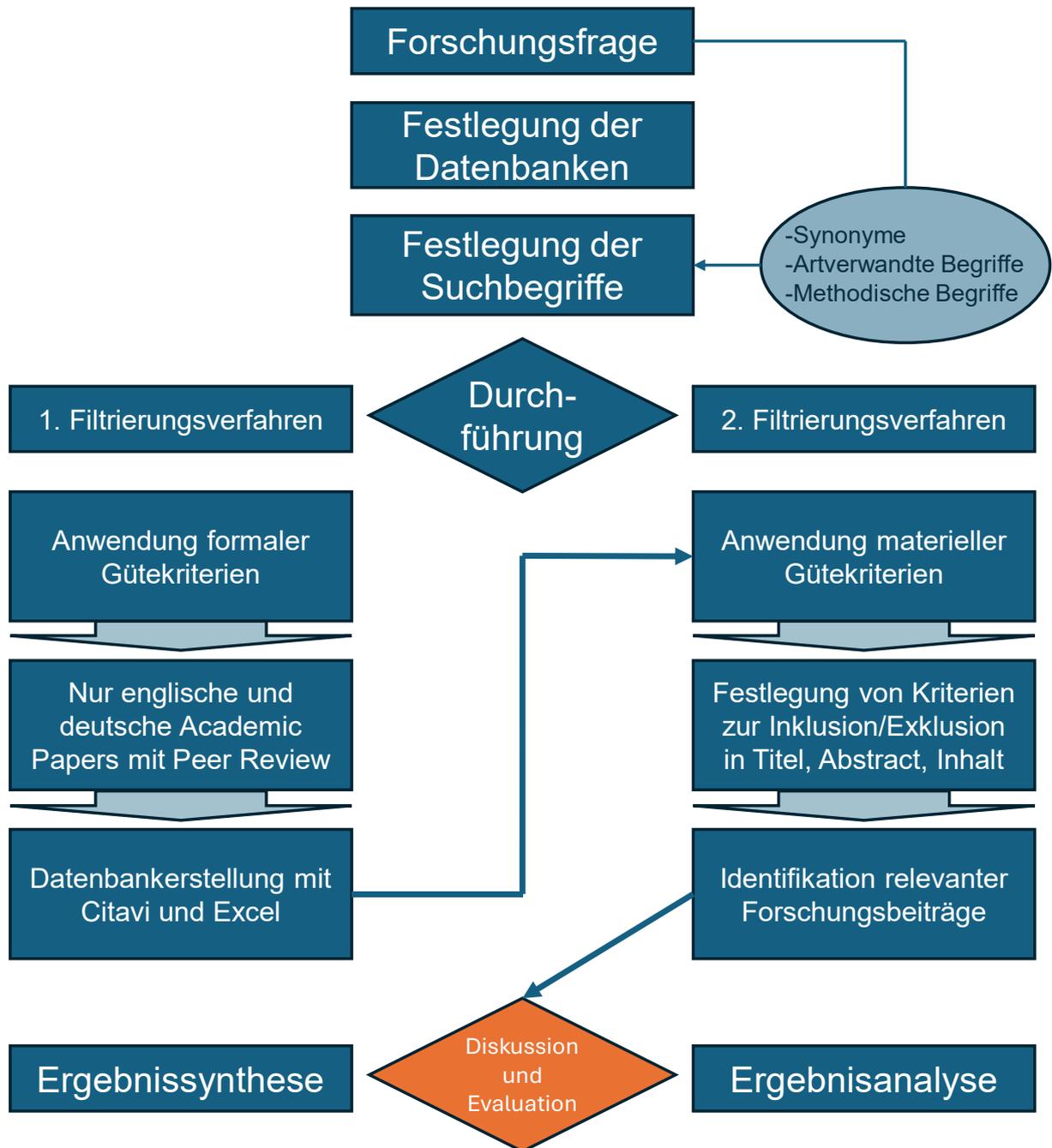


Abbildung 13 - Durchführungsschema der SLA nach Fink (2014)

Die Durchführung der SLA integriert Quellen zur Beantwortung der Forschungsfrage miteinander, welche den Forschungsgegenstand aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachten. Dadurch können Gemeinsamkeiten und Konflikte erkannt, und letztlich generalisierende Lösungsansätze zu Forschungsfragen formuliert werden (Cooper, 2009). Dabei bildet die Identifikation von interliterarischen Zusammenhängen, die ohne die Analyse

eines großen Pools an Quellen unerkannt bleiben, einen qualitativen Mehrwert zur Beantwortung der Forschungsfragen (Becker et al., 2018).

Zunächst erfolgt die Zielsetzung im Kontext der Forschungsfragen. In Bezug auf die in der Einleitung ausgeführten Forschungsfragen soll die in dieser Arbeit durchgeführte SLA relevante Forschungsbeiträge identifizieren und analysieren, um aus denen anwendungsbezogene Erkenntnisse zu den Use Cases von KMUs im Kontext Digitaler Zwillinge gewinnen zu können. Kern der Betrachtung sind spezifische Use Cases Digitaler Zwillinge, Einflüsse der Industrie 4.0 auf diese Use Cases, sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen diesen. Zusätzlich wird ein Fokus auf relevante Parameter für die Nutzung von Szenariogenerierung im Kontext Digitaler Zwilling gesetzt, und welche Anforderungen an einen Workflow zur Szenariogenerierung bestehen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Gestaltung eines Workflows zur Szenariogenerierung integriert und anschließend validiert werden.

Es folgt die Auswahl der zu verwendenden Datenbanken. Durch restriktive Lizenzmodelle und einem allgemeinen Wettbewerb unter Publikationsplattformen berücksichtigt diese Arbeit mehrere Datenbanken. So wird eine umfassendere literarische Abdeckung der Domäne gewährleistet (Eisend, 2020). Für die der SLA zugrundeliegende Reproduzierbarkeit sind dazu Datenbanken zu verwenden, welche im Allgemein öffentlich zugänglich sind und deren Betreiber wissenschaftliche Träger sind (Easterby-Smith et al., 2012). Die TU Dortmund bietet die domänenspezifischen Datenbanken IEEE, DBLP, ACM und Scopus. Diese Datenbanken bilden die Durchsichtgrundlage der hier durchgeführten SLA.

Um passende Publikationen zu ermitteln, folgt anschließend die Auswahl geeigneter Suchbegriffe, welche mit den Titeln, Tags oder Volltexten verglichen werden (Eisend, 2020; Fink, 2020). Die Suchbegriffe müssen die Forschungsfrage für passende Publikationen inhaltlich öffnen, und gleichzeitig die Forschungsdomäne in der Breite abdecken. Die Generierung eines hohen Outputs an Publikationen über die Suchbegriffe ermöglichend, sollten die Begriffe in verschiedenen Sprachen (hier Deutsch und Englisch) abgefragt werden. Die Hinzufügung verwandter Begriffe zu dem ursprünglichen Suchbegriff unterstützt dabei (Easterby-Smith et al., 2012). Simultan erweitert die Verwendung boolescher Suchoperatoren, wie AND, OR und NOT, die Suchabfrage gattungsmäßig. Wildcards decken abweichende Schreibweisen ab (Eisend, 2020). Diese dienen als Platzhalter für einen möglichen abweichenden Buchstaben im Suchbegriff. Für die Suche von englischer Literatur werden die

Begriffe Digital Twin AND use case AND what if AND simulation AND (industry OR production) gewählt. Die Identifikation von relevanter deutscher Literatur bedient sich der Begriffe Digitaler Zwilling AND Szenario AND Simulation AND (Produktion OR Fertigung OR Industrie). Durch den wesentlichen geringeren Umfang an deutschsprachiger Literatur fiel die Entscheidung für einen allgemeineren Suchbegriffsrahmen, um vor Beginn der Filtrierungsverfahren eine größere Werkesammlung zu erhalten. Für alle Publikationen, ob in Englisch oder Deutsch, gilt die Eingrenzung für den Publikationszeitraum 2018 bis 2025, um eine technische Aktualität der sich im stetigen Fortschritt und Wandel befindlichen Domäne der Szenariogenerierung unterstellen zu können.

Ein Filtrierungsverfahren ordnet nach Auswahl der Datenbanken und Suchbegriffe qualitativ die recherchierten Publikationen. Das Filtrierungsverfahren folgt dabei Gütekriterien, mit denen die Publikationen auf ihre wissenschaftliche Relevanz geprüft werden (Easterby-Smith et al., 2012). Eisend (2020) und Fink (2020) unterscheiden dabei formale und materielle Gütekriterien. Sie nennen als formelle Gütekriterien etwa die Sprache, Typ und Zeitpunkt der Publikation. Je nach Suchfunktionsumfang können Datenbanken diese formellen Gütekriterien bereits in der Suchanfrage berücksichtigen, so IEEE. Die Untersuchung der Ergebnisse aus den Suchanfragen sollte mit intelligenten Literaturverwaltungssystemen erfolgen (Lipsey & Wilson, 2006). Diese Rolle kommt in dieser Arbeit Citavi in der 6. Version zu. Nach dieser formellen Filtrierung werden die Publikationen auf die materiellen Gütekriterien hin geprüft (Becker et al., 2018). Dazu erfolgt eine inhaltliche Bewertung der Publikationen im Hinblick auf den Mehrwert für die Forschungsfrage nach transparenten und nachvollziehbaren Kriterien, so dass nach erfolgter materieller Filtrierung Publikationen mit inhaltlichen Überschneidungen zur Forschungsfrage in die Beantwortung der Forschungsfrage einfließen (Fink, 2020). Das zweistufige Filtrierungsverfahren ist in Abbildung 14 dargestellt.

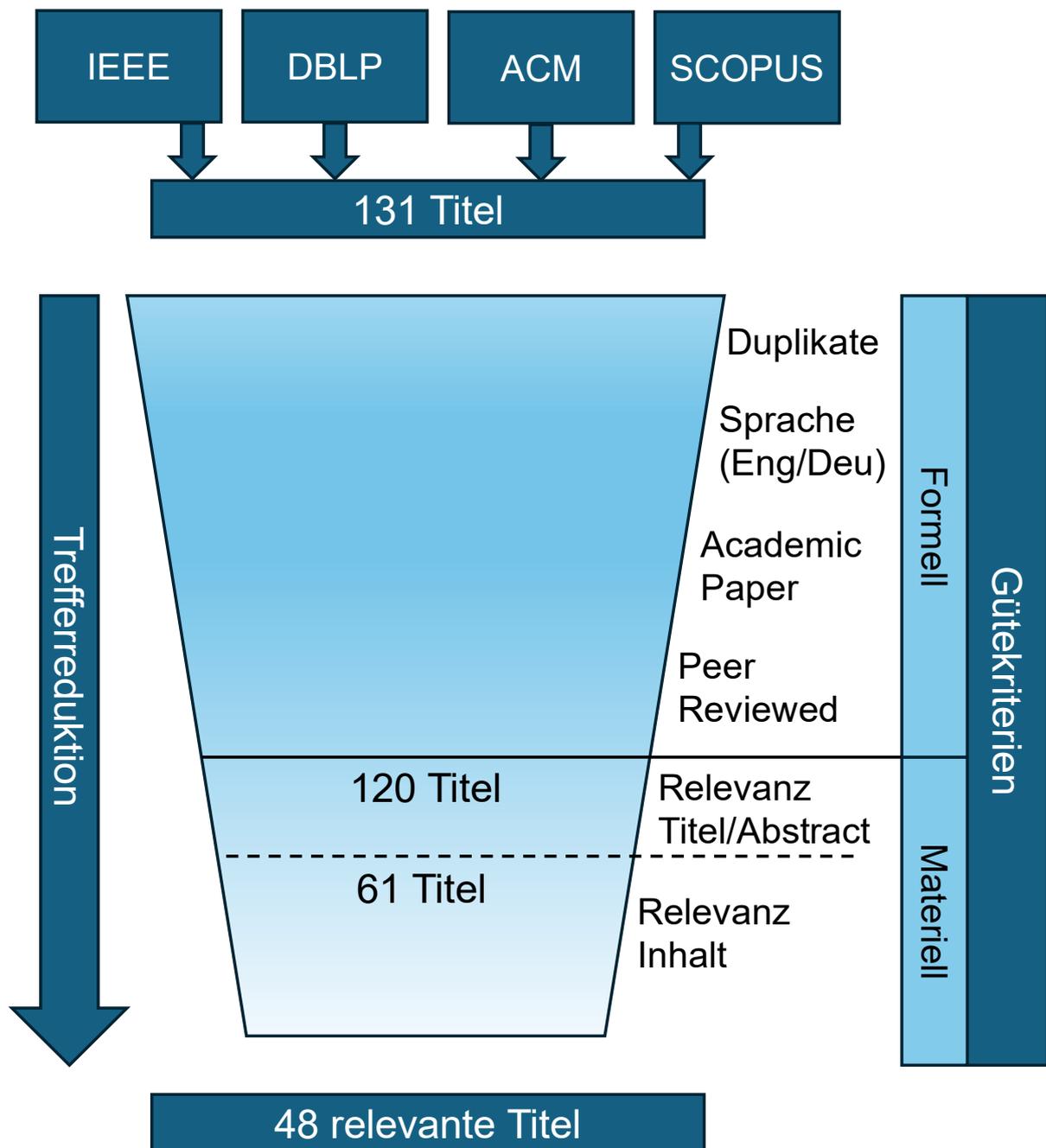


Abbildung 14 - Zweistufiges Filtrierungsverfahren angelehnt an Fink (2020)

Der Anwender sortiert dem Verfahren folgend zunächst Duplikate aus, wie diese bei datenbankübergreifender Veröffentlichung entstehen können (Becker et al., 2018). Anschließend erfolgt die exklusive Berücksichtigung von deutsch- oder englischsprachiger Forschungsliteratur. Um wissenschaftlich konsistente Beiträge zu identifizieren, werden nur

Beiträge in Academic Journals berücksichtigt, wenn diese als peer reviewed gelten (James Wilsdon et al., 2015), oder Veröffentlichungen in Journals aufweisen, die in Sammlungen der Master Journal List von Clarivate Analytics aufgenommen sind. Wegen des thematischen Praxisbezugs der Forschungsfragen untersucht der Anwender die vorfiltrierten Publikationen inhaltlich und methodisch nacheinander im Titel, Abstract und im Volltext auf empirische Forschungsweise, und schließt diese bei Negativbefund aus dem weiteren Prozess aus.

Zuletzt müssen die verbliebenden Werke auf die inhaltliche Relevanz hin untersucht werden. Zahlreiche Arbeiten weisen im Titel oder den von den Autoren hinterlegten Tags vermeintliche Überschneidungen auf. Bei Durchsicht der Arbeiten offenbaren sich jedoch starke Abweichungen der behandelten Forschungsfragen zu denen aus dieser Arbeit. So berücksichtigt diese Arbeit nur Forschungsarbeiten, die sich mit der Nutzung von Szenariogenerierung im Kontext Digitaler Zwillinge auseinandersetzen, und dies in einem Anwendungsfeld erforschen, welches entweder selbst Teil der diskreten Fertigung ist oder so stark mit der diskreten Fertigung vergleichbar ist, dass eine Übertragung der Forschungsergebnisse auf diese unterstellt werden kann.

## **4.2 Qualitative Inhaltsanalyse von Experteninterviews**

Der Begriff des Experten ist in der Forschung nicht einheitlich definiert. Eine gemeinsame Grundlage bildet jedoch der Ansatz von Schütz, nach dem ein Experte über detailliertes und spezialisiertes Wissen in einem klar abgestecktem Wissensbereich verfügt (Schütz, 1972). Im Rahmen einer Begriffsbildung für diese Arbeit werden die Ausführungen von Liebold und Trinczek ergänzt. Demnach tätigt ein Experte seine Aussagen in einem Wissensgebiet in bestimmten Realitätsausschnitten und ist sich diesem begrenzten Bezugsrahmen seiner Expertenrolle bewusst (Liebold & Trinczek, 2009). Zwar kritisieren Teile der Forschung den aus manchen Definitionen stammenden Bindungszwang zwischen Expertenwissen und beruflicher Position des Experten (Michael Meuser & Nagel, 2009). Da im Rahmen dieser Arbeit jedoch eine Wissenserhebung im Umfeld produzierender Unternehmen erfolgen soll, wird hier explizit das Expertenwissen von Menschen in einschlägigen beruflichen Positionen mit Anwendungsbezug erhoben. Daher wird für den weiteren Verlauf dieser Arbeit folgende Definition des Expertenbegriffs eingeführt:

Ein Experte ist ein im Produktionsumfeld einschlägig tätiger Mensch, welcher Aussagen im Wissensgebiet der digitalen Fertigung tätigt, und sich dabei seiner Expertenrolle in ansetzenden Realitätsausschnitten bewusst ist. Seine Aussagen fundieren auf detailliertes und spezialisiertes Wissen innerhalb der Domänengrenze.

Meuser and Nagel (2009) ordnen das zu erhebende Expertenwissen grundsätzlich in zwei Kategorien (Michael Meuser & Nagel, 2009). Auf der einen Seite steht das erhobene Kontextwissen. Kontextwissen beschreibt objektives Wissen von Experten über ein Themengebiet, in welchem diese nicht oder nur eingeschränkt selbst aktiv sind, jedoch über kontextuelle Zugehörigkeiten explizites Wissen gesammelt haben. Auf der anderen Seite steht das Betriebswissen. Die Erhebung des Betriebswissens basiert auf der Befragung von im Themengebiet aktiv agierende Experten, so über deren Insides, Routinen und subjektiven Erfahrungen mit Veränderungen (Wassermann, 2015). Im Rahmen dieser Arbeit wird primär Betriebswissen abgefragt, jedoch ist durch die domänenübergreifende Stellung von Technologien Digitaler Zwillinge eine Erhebung von Kontextwissen über die Dynamik der Interviewsituation nicht vorab auszuschließen.

Zur Erhebung des Expertenwissens nutzt diese Arbeit das qualitative Experteninterview. Dieses kann je nach Art des Erkenntnisinteresses in verschiedenen Stufen eines Forschungsprozesses und für unterschiedliche Zielsetzungen verwendet werden (Wassermann, 2015). Das in dieser Arbeit zugrundeliegende Erkenntnisinteresse ist vorrangig induktiv, da es gilt neues Wissen zu erheben, zu analysieren und den Forschungsprozess anzutreiben. Somit dient es explorativen Zwecken. Für diese explorative Zielsetzung sind qualitative Experteninterviews methodisch gut geeignet (Wengraf, 2001). Denn über die Befragung von Experten erfolgt die Erhebung von domänenspezifischem implizitem Wissen, welches im beruflichen Handeln erworben wurde, und besonders für die übergeordnete Forschungsfrage dieser Arbeit von Relevanz ist (Bogner & Menz, 2002). Dies wird sichergestellt, indem der Interviewte Arbeitsabläufe, Methoden und Erfahrungen im Zusammenspiel mit der Domäne typischen Merkmale rekonstruieren muss (Bergmann, 1985). Immer mit zu berücksichtigender Teil dieses Prozesses ist das Einfließen von subjektiven Empfindungen des Interviewten (Bryman & Burgess, 1999). Demzufolge können sich Forschende zwar bemühen möglichst objektives Expertenwissen zu erheben. Jedoch ist es letztlich als systematische Aufarbeitung subjektiven Erfahrungswissens zu verstehen (Paget, 1983).

Vor der eigentlichen Durchführung des qualitativen Experteninterviews steht die Grundlage einer themenbezogenen Literaturrecherche, um ausreichend eigenes Wissen als Interviewer einbringen zu können und den wissenschaftlichen Kontext selbst zu erfassen (Wassermann, 2015). Dies erfolgte in dieser Arbeit über die SLA, aus Abschnitt 4.1. Anschließend folgt die Identifikation der Experten. Entsprechend der eingeführten Definition des Expertenbegriffs (s.o.) identifiziert diese Arbeit Geschäftsführer, leitende Angestellte der Produktion und (potenzielle) Anwender von Technologien Digitaler Zwillinge in diskret fertigenden Unternehmen als Experten. Um zusätzlich Kontextwissen erheben zu können, werden auch Geschäftsführer und Anwender von Unternehmen berücksichtigt, die ihrerseits KMUs bei der Implementierung von etwaigen Softwarelösungen beraten. Um eine Systematisierung des Forschungsfelds der Szenariogenerierung über das Expertenwissen zu erreichen, werden entsprechend Wassermann fünf bis zehn Experteninterviews als ausreichend bewertet und angestrebt (Wassermann, 2015). Konkretes Erhebungsinstrument ist hierbei das offene und leitfadengestützte Interview. Die vorstrukturierende Funktion eines Leitfadens erleichtert ein Interview auf Augenhöhe und begünstigt eine thematische Fokussierung des Interviews auf die Erhebung des Sonderwissens des Experten (M. Meuser & Nagel). Dafür behandelt der Leitfaden Erkenntnisse aus der SLA und berücksichtigt die Ergebnisse vorangegangener Interviews. Dies steht im Einklang mit der zu berücksichtigenden Dynamik einer Interviewsituation, in der Raum für narrative Anteile seitens des Interviewten gelassen werden sollte (Michael Meuser & Nagel, 2009). Nur so kann ein umfassender explorativer Erkenntnisgewinn gelingen, der auch die persönlichen Interessenschwerpunkte des Interviewten berücksichtigt (Bryman & Burgess, 1999). Um diese explorativen Potenziale sehen und steuern zu können, wird genau hier die Bedeutung von thematischer Vorbereitung und Kompetenz des Interviewers deutlich, die essentiell für einen produktiven Verlauf des Interviews ist (Trinczek, 1995).

Das Interview startet mit der Vorstellung des Interviewers. Hier ist Raum für eine direkte Vorstellung der beteiligten Institution und des Zusammenhangs zur Forschungsfrage (Wassermann, 2015). Es folgt die Skizzierung der Interviewstruktur und die Einbettung des Interviews in die bezogene Domäne, und anschließend die Darstellung des Verwertungszusammenhangs. Dadurch soll sich der Interviewte als Lösungsgeber fühlen, dessen Expertise zur Nutzung eines Problems gebraucht wird, und dessen Lösung ihm selbst einen Mehrwert bringt (Trinczek, 1995). Dies steigert zu Anfang die Motivation des Interviewten (Pfadenhauer, 2002). Aus Gründen der Transparenz und für eine offene Kommunikationsatmosphäre werden noch die Möglichkeiten zur Aufzeichnung, den Zugriff auf die Aufzeichnungen und der Teilnehmeranonymisierung abgestimmt (Wassermann, 2015). Bei der anschließenden Führung des Interviews ist einerseits darauf zu achten, dem

Interviewten Raum für ausführliche Antworten zu geben, andererseits muss der Interviewte bei explorativen Potenzialen einschreiten und in der Lage sein die Ausführungen über Nachfragen weiter vertiefen zu können (Liebold & Trinczek, 2009). Moderierend für ausführliche explorative Antworten wirkt dabei eine für den Interviewten alltagsnahe Interviewatmosphäre, die beim Interviewten weder Assoziationen mit Verhörsituationen weckt, noch Irritation durch eine zu offene und narrative Gesprächsführung entstehen lässt (Pfadenhauer, 2002).

Zur Auswertung von Experteninterviews liegen verschiedene Methoden aus der Forschung vor. In dieser Arbeit wird die qualitative Auswertung nach Meuser und Nagel gewählt. Quantitative Methoden finden keine Verwendung, da es auf die Feststellung inhaltlicher Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Interviews ankommt, und nicht um die singuläre Interpretation einzelner Interviews (Michael Meuser & Nagel, 2009).

Zunächst erfolgt eine Kodierung der Interviewinhalte mit anschließender thematischer Ordnung. Dabei hilft es, den Interviewleitfaden thematisch und konzeptuell zu strukturieren, und so die Antworten des Interviewten in die Abschnitte des Leitfadens einordnen zu können (Wassermann, 2015). Anschließend können die einzelnen Themenabschnitte über die Auswertungsbögen verglichen werden, um so Unterschiede, Gemeinsamkeiten, und herausstechende Einzelpositionen zu identifizieren.

Die Kontaktaufnahme zu geeigneten Experten erfolgte über E-Mail-Akquise nach einer Onlinerecherche von KMUs aus Deutschland mit Begleitung eines Handzettels (s. Anhang B). Von 117 angefragten Experten gaben zwölf eine schriftliche Rückmeldung. Dies entspricht einer allgemeinen Rückmeldungsquote von 10,3 %. Vier der Experten erklärten eine Absage mit der Begründung keine Informationen teilen zu wollen, die die Geschäftstätigkeit betreffen. Ein anderer Experte legte auf Nachfrage offen, dass er entgegen dem Webauftritt nicht in Deutschland fertigt, sondern nur entwickelt. Diese fünf Unternehmen wurden daher aus dem Interviewpool entfernt. Es verblieben sieben Experten, die zu einem Interview bereit waren. Die E-Mail-Akquise erreichte somit eine positive Rückmeldungsquote von 6 %. Angesichts des Pioniercharakters der im Interview zu behandelnden Forschungsfragen ist dies eine zufriedenstellende Quote.

## 5 Ableitung von Anforderungen an die Szenariogenerierung

Aus der Durchführung der in Kapitel 4 beschriebenen Methodiken werden im Folgenden Anteile der in Kapitel 1 eingeführten Forschungsfragen beantwortet und die Anforderungen an einen Workflow für die Szenariogenerierung abgeleitet. Dies geschieht über die Auswertung der Ergebnisse der systematischen Literaturrecherche und der Experteninterviews entsprechend Kapitel 4.

Zur Ableitung werden dabei die Ergebnisse aus 7 Experteninterviews herangezogen. Die befragten KMUs und die Experten werden in Tabelle 3 eingeführt.

*Tabelle 2 - Übersicht über die interviewten Experten*

<b>Nr.</b>	<b>Tätigkeitsfeld</b>	<b>Region</b>	<b>Mitarbeiter</b>	<b>Experte</b>
1	Stanztechnik	Ruhrgebiet	85	Produktionsleiter
2	Gießerei	Münsterland	200	Geschäftsführer
3	Fertigung von Schläuchen	Ruhrgebiet	150	Prozessmanager
4	Fertigung von Schalldämpfern	Ruhrgebiet	60	Konstruktionsingenieur
5	Maschinenbau	Ruhrgebiet	200	Entwicklungsingenieur
6	Baustahlfertigung	Sauerland	80	Produktionsleiter
7	Elektronikhardware	Ruhrgebiet	10	Geschäftsführer

### 5.1 Use Cases des Digitalen Zwillings im Produktionskontext

Um einen Workflow zur Szenariogenerierung anwendergerecht zu gestalten, müssen zunächst die von den Anwendern denkbaren Use Cases ermittelt werden. Da die Use Cases des Digitalen Zwillings im Kontext der diskreten Fertigung innerhalb der Forschung zu vielfältig für eine sinnvolle Darstellung sind, beschränkt sich diese Arbeit auch im Sinne der Forschungsfragen auf Use Cases in der Literatur mit Bezug zur Szenariogenerierung. Dort ließen sich über die systematische Literaturanalyse zahlreiche Use Cases in den drei Unterbereichen Produktionslogistik, Produktionstechnik und Prozesstechnik identifizieren.

Die Literatur im Bereich der Produktionslogistik schreibt Technologien der Szenariogenerierung mit Hilfe Digitaler Zwillinge vielversprechende Use Cases zu. Forscher bereiteten die Supply Chain auf Störungen noch vor deren Eintritt vor, simulierten die Eintaktung von Eilaufträgen und ermittelten die effizienteste Abfolge von Logistikvorgängen über das Durchlaufen von iterativen Simulationsschleifen (Cimino et al., 2024; Flores-Garcia et al., 2021). Zusätzlich unterstützt die Szenariogenerierung die Auswahl der Fertigungsstrategie bezüglich der Optimierung der Manufacturing Supply Chain (MSC). So haben Ghasemi et al. (2023) durch das Erzeugen und Vergleichen von verschiedenen Fertigungsszenarien, welche über die die Supply Chain beschreibenden Parameter generiert werden (z.B. Produktverfügbarkeiten), die optimale Fertigungsstrategie anhand der gewünschten Zielgröße (z.B. maximaler Fertigungsoutput) gewählt. Im Hinblick auf die in der Industrie auftretenden Komplexitäten von Logistiksystemen ist die Anwendung von Szenariogenerierungen bei deren Layout-Planung ein hilfreiches Werkzeug. Durch verschiedene Szenarien, in denen die Variation der Strukturen der Layouts erfolgte, erhöhten Mallah et al. (2020) die Umschlagskapazität des Logistiksystems. Auch auf einer untergeordneten logistischen Prozessebene, dem Container Handling, können über die Variation von prozessrelevanten Parametern unterschiedliche Szenarien generiert und verglichen werden, um das Container Dispatching, welches Bestandteil jeder Produktionslogistik ist, im Hinblick auf die benötigte Handlingzeit unter Berücksichtigung der Kosten zu optimieren (Compagnucci et al., 2025; Muller-Zhang & Kuhn, 2022; Pires et al., 2021b). Das Handling von temperaturkritischen Erzeugnissen erfordert eine Umgebungstemperatur, die sich in gewissen Grenzwerten bewegt. Die für diesen Zweck eingesetzten temperierten Lagerhäuser lassen sich mit Hilfe von Szenariogenerierungen sicherer in Bezug auf die Einhaltung der Temperaturgrenzwerte und dabei kostengünstiger betreiben, indem die Möglichkeit besteht, Einflüsse von Störfaktoren (z.B. kurzzeitiger Ausfall der Kühlaggregate, öffnen der Hallentore) auf den Temperierungskreislauf analysieren zu können, ohne das Produkt in einer realen Testumgebung zu gefährden (Montes et al., 2024).

Im Bereich der Produktionstechnik findet die über die Digitale Zwillinge gestützte Szenariogenerierung Anwendung in verschiedenen Branchen. Die Anwendungscharakteristik mit ihren Voraussetzungen und Zielen ist jedoch über die Branchen hinweg als Merkmal des Einsatzes der Szenariogenerierung im Kontext Digitaler Zwillinge zu betrachten. Die Szenariogenerierung ist dabei ein Werkzeug, um Entwicklungszeiten von Fertigungssystemen zu reduzieren, Veränderungen von bestehenden Systemen zu beschleunigen und das Produktionssystem effizienter in Bezug zu festgelegten Kriterien zu gestalten (Cavone et al., 2020; Malik, 2023; Stöckermann et al., 2023) . Ebenfalls sollen Stillstandszeiten im Kontext des Veränderungsmanagements und der Produktionskontrolle minimiert werden (Deenen et

al., 2022). Nicht zuletzt kommt die Szenariogenerierung zum Einsatz, um die reinen Fertigungszeiten des Produktionssystems zu reduzieren (Cimino et al., 2023; Ghasemi et al., 2023). Dazu führten Kumbhar et al. (2023) auch Bottleneck Analysen des bestehenden Ist-Systems, und der umgestalteten Soll-Systeme über die Szenariogenerierung durch. Diese Use Cases sind um interaktive Virtual-Reality-Elemente (VR-Elemente), wie der Einbettung der Simulationsumgebung in einen digital erlebbaren Versuchsraum, erweiterbar um die Einflüsse eines menschlichen Anwenders in der Produktionsumgebung realitätsnah abzubilden (Erdal et al., 2024). In Bezug auf die steigende Komplexität von diskreten Produktionssystemen und die hieraus resultierende steigende Störanfälligkeit, setzen Cainelli and Rauchhaupt (2021) die Szenariogenerierung zur Steigerung der Systemresilienz ein.

Auch in der Prozesstechnik ließen sich Use Cases der Szenariogenerierung identifizieren. So können Produkte und Produktionsverfahren im Hinblick auf prozessbezogene Zielgrößen, wie geringer Energieverbrauch, geringes Produktgewicht oder Produkthaltbarkeit, optimiert werden, ohne physische Testdurchgänge durchführen zu müssen (Hasidi et al., 2023; Merkle, 2019; Pareja-Corcho et al., 2023). Im Hinblick auf steigende Anforderungen an die Nachhaltigkeit trägt die Szenariogenerierung auch zur Reduzierung von Produktionsausschuss, Abfallmengen und der Verwendung von Gefahrenstoffen in der Produktionskette bei (Cimino et al., 2023; Resman et al., 2025). Weitere Use Cases der Szenariogenerierung bilden Predictive Maintenance Maßnahmen, etwa die Verschleißprädikation, Vorhersage von wartungsbedingten Fertigungsabnormalitäten und die Analyse von Einflüssen von Wartungsmaßnahmen auf die Produktionskette (Júnior et al., 2023; Stojanovic & Milenovic, 2018). Zusätzlich sind die Einflüsse von äußeren und inneren Prozessparametern auf den Fertigungsprozess prognostizierbar, um so die günstigsten Fertigungsbedingungen in Bezug auf die Produktqualität und die Produktionskosten zu identifizieren (Assani & Matić, 2025; Goharoodi et al., 2023).

Die in der Literatur identifizierten Use Cases entfallen zusammenfassend auf die Optimierung und Resilienzsteigerung der Supply Chain, Verkürzung von Makespans und Stillstandszeiten in der Fertigung, Predictive Maintenance in den Produktionsanlagen sowie Kostenreduzierung und Effizienzsteigerungen in den Produktionsprozessen. Eine Übersicht bietet Tabelle 3.

**Tabelle 3 - Use Cases der Szenariogenerierung in der Literatur**

<b>Use Cases der Szenariogenerierung in der Literatur</b>		
<b>Quelle</b>	<b>Use Case</b>	<b>Anwendungsbereich</b>
Cimino et al., 2024	Supply-Chain Planung	Produktionslogistik
Flores-Garcia et al., 2021	Supply-Chain Planung	Produktionslogistik
Ghasemi et al., 2024	Supply-Chain Planung	Produktionslogistik
Mallah et al., 2020	Layout-Planung	Produktionslogistik
Compagnucci et al., 2025	Handlingzeiten optimieren	Produktionslogistik
Muller-Zhang & Kuhn, 2022	Handlingzeiten optimieren	Produktionslogistik
Pires et al., 2021b	Handlingzeiten optimieren	Produktionslogistik
Montes et al., 2024	Logistikbedingungen optimieren	Produktionslogistik
Cavone et al., 2020	Entwicklungszeiten reduzieren	Produktionstechnik
Malik, 2023	Layoutänderungen des Produktionssystems beschleunigen	Produktionstechnik
Stöckermann et al., 2023	Effizienzsteigerung des Produktionssystems	Produktionstechnik
Deenen et al., 2022	Minimierung von Stillstandszeiten	Produktionstechnik
Cimino et al., 2023	Reduzierung der Fertigungszeiten	Produktionstechnik
Ghasemi et al., 2023	Reduzierung der Fertigungszeiten	Produktionstechnik
Kumbhar et al., 2023	Bottleneck Analysen	Produktionstechnik
Erdal et al., 2024	Analyse menschlicher Einflüsse auf das Produktionssystem	Produktionstechnik
Cainelli & Rauchhaupt, 2021	Steigerung der Systemresilienz	Produktionstechnik
Hasidi et al., 2023	Produktoptimierung	Prozesstechnik
Merkle, 2019	Produktoptimierung	Prozesstechnik
Pareja-Corcho et al., 2023	Produktoptimierung	Prozesstechnik
Cimino et al., 2023	Reduzierung von Ausschuss	Prozesstechnik
Resman et al., 2025	Reduzierung von Gefahrstoffen	Prozesstechnik
Junior et al., 2023	Predictive Maintenance	Prozesstechnik
Stojanovic & Milenovic, 2018	Predictive Maintenance	Prozesstechnik
Assani & Matic, 2025	Steigerung der Produktqualität	Prozesstechnik
Goharoodi et al., 2023	Reduzierung der Produktionskosten	Prozesstechnik

Diesen Erkenntnissen aus der Literatur stehen die Aussagen der sieben Interviewexperten gegenüber, welche sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede zur Literatur aufweisen. Alle Experten äußerten die Überzeugung, dass Technologien Digitaler Zwillinge und insbesondere die Szenariogenerierung bei der Bewältigung aktueller Herausforderungen helfen können. Insgesamt wurden die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und der Pioniergedanke einer relativ neuen Domäne hervorgehoben. Die spezifischen Herausforderungen, denen die KMUs begegnen, und die geplanten Use Cases unterscheiden sich stark voneinander und sind von der individuellen Unternehmensstruktur und dem Geschäftsmodell abhängig. Um ein aussagekräftiges Profil der Unternehmen zu gewinnen, sind die Use Cases der Experten um weitere Aspekte, wie die aktuell empfundenen Herausforderungen in der Fertigung, zu ergänzen.

Das mittelständische Unternehmen mit Schwerpunkt Stanztechnik steht vor der Herausforderung der ausländischen Konkurrenz und der Produktionsstruktur im Allgemeinen. Innerhalb der Produktion liegen keine dauerhaften Fertigungsaufträge in hoher Stückzahl vor. Vorwiegend werden Teile in Klein- und Mittelserie auf Abruf produziert, welche mit geringer Fertigungszeit dem Kunden auszuliefern sind. Zusätzlich herrscht ein großer Anteil analoger Vorgänge, ein nur moderates Maß an Automatisierung und Unsicherheit bezüglich der IT-Sicherheit. Bislang liegen weder Konzepte zur Nutzung Digitaler Zwillinge im Allgemeinen noch Konzepte zur Einführung von Szenariogenerierungen vor. Unter dem Einfluss der aktuellen Preisschwankungen, Lieferengpässe und Wirtschaftssanktionen am Weltmarkt plant das Unternehmen jedoch die umfassende Einführung von Technologien Digitaler Zwillinge im Kontext der Produktion. Das Unternehmen verspricht sich mit Hilfe von Technologien Digitaler Zwillinge eine bessere Produktionsplanung, sowie Fertigungsoptimierung der Produktion und der einzelnen Produkte. Gerade im Hinblick auf die Vielzahl der gelagerten Werkzeuge und die daraus resultierende hohe Artikelvielfalt verspricht sich das Unternehmen bessere Datenverarbeitungsmöglichkeiten bei Integration eines Digitalen Zwillings im Fabrikmaßstab. Mit Hilfe der Szenariogenerierung will das Unternehmen Störungsanalysen und -vorhersagen am Endprodukt durchführen und die Fertigung auf Abruf von Kleinserien besser in die Produktion eintakten. Bezüglich der Umsetzung empfindet man Nachteile gegenüber großen Konzernen. Zum einen sei man als mittelständisches Unternehmen, u.a. wegen geringerer Aufstiegsmöglichkeiten, teilweise unattraktiver und verliere so das Rennen um Jungakademiker in digitalen Disziplinen. Der Bestandsbelegschaft fehlen in diesen Disziplinen innovative Inputs, die man eher bei jungen Akademikern vermutet. Zum anderen erkenne man in der aktuellen Belegschaft ein nur geringes Maß an Veränderungsbereitschaft. Diese zwei personellen Aspekte sind im Hinblick auf die Produktionsstruktur nicht zu vernachlässigen. Die Verkettung der Vielzahl an heterogenen Anlagen zu einem Digitalen Zwilling im

Produktionsmaßstab würde für das Unternehmen einen erheblichen Aufwand bedeuten, der für die Produktionsleitung nur als gemeinschaftliche Anstrengung zu leisten ist.

Die mittelständische Gießerei steht unter dem Druck geringer Lieferzeiten, Personalmangel in der Vor-Ort-Montage beim Kunden, sowie noch fehlendem Know-How in der Szenariogenerierung. Bislang findet die Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge in Prozessmaßstäben, z.B. als Digitaler Zwilling eines Roboterarms, statt. Dazu wurden Anlagen umfassend zur Datenerfassung und -verarbeitung nachgerüstet und teils selbstständig Software entwickelt. Für die Szenariogenerierung befanden sich ebenfalls bereits Konzepte auf Prozessmaßstab in Erprobungsphasen. Eine Roboterzelle verfügte nach der Aufrüstung über eine Vielzahl digitaler Sensoren, welche über ein halbintelligentes Steuerungsmodul in Verknüpfung zueinanderstanden. Dadurch konnten die Folgen etwa von Druckschwankungen innerhalb der Maschinenkinematik simuliert werden, um die Folgen auf das Endprodukt abzuschätzen. Nach diesem Experiment kam es jedoch wieder zu einer Entpriorisierung der Szenariogenerierung, da eine Fokussierung auf eigenständige digitale Lösungen folgte. Man sah sich über die Nutzung des extern produzierten Steuerungsmoduls in einer ungewünschten Abhängigkeit bezüglich der Zukunft der Produktion. Das Unternehmen verspricht sich von der Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge eine (in eigenen Worten) Durchdigitalisierung der Anlagen, die Unterstützung der 3D-Konstruktion mit weitergehenden Simulationsmöglichkeiten, geringere Lieferzeiten durch optimierte Produktionsplanung und die Möglichkeit die Vor-Ort-Montage der verkauften Roboterzellen beim Kunden zu optimieren. Durch die Simulation des Montagevorgangs soll eine Problemerkennung und -lösung noch vor dem realen Auftreten möglich sein. Dies würde die benötigte Zeit senken sowie das Kundenerlebnis generell verbessern. Mit Hilfe der Szenariogenerierung möchte der Experte Störungen im Prozessmaßstab analysieren, sowie deren Auswirkungen auf den übergeordneten Produktionsmaßstab einschätzen können. Wichtige Themen sind hier aus der Vergangenheit Fehlbedienungen von Anlagen mit Folgen für das Zwischenprodukt und den weiteren Produktionsablauf, sowie physische und nicht-physische äußere Störeinflüsse. Im Vergleich zu großen Konzernen empfindet man keine Nachteile in Bezug auf die Nutzung oder Einführung von Technologien Digitaler Zwillinge. Zwar seien große Konzerne thematisch tiefer in der Materie, allerdings seien große Körperschaften auch schwerfälliger und langwieriger in Bezug auf Veränderungen. Auch das kleinere Budget im Vergleich zu Konzernen sei nicht hindernd. So werde viel Forschungsinput über die Ausschreibung von einschlägigen Abschlussarbeiten geliefert und nach Möglichkeit mit Forschungsprojekten gearbeitet, die eine finanzielle Förderung der öffentlichen Hand anbieten. Die vorwärtsgewandte und innovative Atmosphäre des Unternehmens sei letztlich auch daran zu erkennen, dass in den Bereichen Digitalisierung und Programmierung kein Mangel an jungen Fachkräften in dem Unternehmen

herrsche. Trotz dieser Voraussetzungen empfindet das Unternehmen fehlendes Know-How als Herausforderung, wenn es um die Implementierung von Technologien Digitaler Zwillinge geht. Man sei unsicher, wie hoch die Qualität der Datenerfassung ausfallen müsse, um sowohl Digitale Zwillinge anwendungsgerecht zu erstellen als auch Szenariogenerierungen auf Grundlage dieser durchzuführen.

Das mittelständische Schlauchproduktionsunternehmen hat besonders mit der enormen Artikelvielfalt und dem internationalen Kundennetz zu kämpfen. Bei kurzfristigen Bestellungen im Auslandsgeschäft ist es für die Vertriebler nicht möglich kurzfristig abschätzen zu können, welche Optionen in der Produktionsprogrammplanung zur Eintaktung des Auftrags bestehen, welche Priorisierung er benötigt und wie insgesamt die Auswirkungen auch auf die Logistik ausfallen. Bislang liegen keine Konzepte zur Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge vor. Ansätze zur Nutzung von Szenariogenerierungen gibt es nur vereinzelt ohne eine übergeordnete Datenvernetzung. Durch die zuverlässige konventionelle Fertigung verspricht man sich eher auf der übergeordneten Produktionsebene eine offene Datenbasis im Zuge der Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge, die für alle Abteilungen des Unternehmens transparent ist. Auf der Produktebene sollen Technologien Digitaler Zwilling die Innovationszyklen reduzieren und dabei helfen fremdbezogene Produkte schneller in Eigenfertigung umzusetzen. Für den Außendienst sollen Digitale Zwillinge auf Produkt- und Produktionsebene helfen, dem Kunden passgenaue Beratung liefern zu können. Denn im Ausland gäbe es kein Backup. Wenn man im direkten Verkaufsgespräch nicht überzeuge, würde man keine Kunden gewinnen. Je mehr zuverlässige Daten und Prognosen schnell zur Verfügung stehen, desto wahrscheinlicher wäre ein Kauf. Im Zuge der Nutzung von Szenariogenerierungen möchte man die Abbildung von Ausfällen innerhalb der vielschrittigen Produktionsketten innerhalb des Standorts erreichen. Zusätzlich soll die Möglichkeit geschaffen werden, kurzfristige Aufträge aus dem Ausland in die Produktion testweise eintakten zu können und so verlässliche Angaben zum Lieferdatum geben zu können. Bei der Umsetzung von etwaigen Technologien empfindet der Experte keine Nachteile gegenüber großen Konzernen. Man sieht sich in einem fairen Wettbewerb, den man durch flachere Hierarchien und größerer Flexibilität auszugleichen weiß. Die größte Herausforderung bezüglich der Umsetzung sieht das Unternehmen in der Datenerfassung, welche eine Großbaustelle sei. Digitalisierungsansätze von Prozessen sei besonders bei älteren Dauerläufern ein Problem. Gleichzeitig fehlt es an Schnittstellen über die Phasen des PLMs, sowie zu den Unterfirmen und den Zulieferern, um eine ganzheitliche Datenvernetzung zu erreichen.

Der mittelständische Produzent von Schalldämpfern kämpft mit der kundenseitigen Forderung nach schnell gefertigten individuellen Lösungen. Da das Unternehmen viele Produkte im Sinne einer Baukastenentwicklung herstellt, sind zumindest die nötigen Ressourcen und Werkzeuge in der Vielfalt begrenzt. Trotzdem sei die Individualisierung der Produkte eine Herausforderung im Hinblick auf unterschiedliche Fertigungszeiten, Produktionsabläufe und Montagezeiten. Komplexitätssteigernd wirkt die Produktionsstruktur. Die Fertigung erfolgt an unterschiedlichen Produktionsstandorten, welche teilweise nacheinander im Fertigungsprozess durchlaufen werden müssen. Aktuell gibt es keine Konzepte zur Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge. Ebenfalls bestehen keine Ansätze zur Nutzung von Szenariogenerierungen. Von der Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge verspricht man sich eine Vernetzung der Produktionsstandorte untereinander zur ganzheitlichen digitalen Abbildung der mehrstufigen Fertigung und eine realistische Taktplanung der Fabrikabläufe. Insgesamt sollen sich die auch die Ingenieure mit direktem Kundenkontakt nicht mehr wie Micromanager fühlen. Bislang war für fast alle die Fertigung betreffenden Kundenfragen eine Anfrage zwischen Kundenbetreuer/Planer und Produktion notwendig. Mit einer geeigneten Softwarelösung könnten die Kundenbetreuer/Planer Sachverhalte, die die Produktion betreffen, eigenständig und damit schneller einschätzen. Mit Hilfe der Szenariogenerierung sollen Lieferschwierigkeiten abgebildet und beantwortet werden. Dies betrifft sowohl Lieferungen von außerhalb (Zulieferer), als auch die Lieferbeziehungen innerhalb des Unternehmens, wenn unfertige Erzeugnisse zur weiteren Bearbeitung an andere Standorte geliefert werden müssen. In der Umsetzung dieser Ziele sieht man sich in Konkurrenz zu großen Konzernen im Nachteil. Speziell junge Ingenieure, gerade mit Kompetenzen im digitalen Fertigungsbereich, würden gezielt mit hohen Gehaltspaketen zu Konzernen gelockt. Entsprechende offene Stellen in dem Unternehmen seien teilweise über ein Jahr unbesetzt geblieben. Dementsprechend besteht intern die Sorge, keine Person zu finden, die sich dediziert um die Einführung von Technologien Digitaler Zwillinge oder der Szenariogenerierung kümmert. Zusätzlich sei in der vorhandenen Belegschaft keine eindeutige Innovations- oder Aufbruchstimmung zu verzeichnen. Die gemeinschaftliche Kraftanstrengung zur Digitalisierung der Fertigung leide unter dem Mindset „das haben wir schon immer so gemacht“. Als Herausforderung in Bezug auf die Umsetzung der Technologieeinführung brachte der Experte verschiedene Aspekte ein. Man habe zunächst kein standort- oder stationsübergreifendes Produktdatenmanagementsystem, die Standorte seien untereinander nicht digital vernetzt, die Datenpflege in der Produktion im Generellen sei unzureichend zur Implementierung etwaiger Technologien Digitaler Zwillinge und es liege kein digitales Lager- und Logistiksystem vor, welches die Abbildung von Ressourcenengpässen bieten könne.

Der mittelständische Produzent von Baustahlprodukten, vorwiegend Bewehrungsstahl, steht unter großem Wettbewerbsdruck, welcher den Deckungsbeitrag der produzierten Stahlerzeugnisse auf drei bis fünf Prozent drückt und somit die Notwendigkeit von effizienten Abläufen und geringen Fehlerquoten fordert. Zusätzlich besteht die Existenzberichtigung auf dem umkämpften Markt daraus, dass zwischen Auftragsannahme und Auslieferung in 95 Prozent der Fälle unter 48 Stunden vergehen, was eine enorme Herausforderung für die Produktionsprogrammplanung darstellt. Zwar bestehen aktuell noch keine Konzepte zur Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge oder zur darauf aufbauenden Szenariogenerierung, allerdings sieht man die Notwendigkeit zur Implementierung dieser Technologien, um auch in Zukunft am Markt bestehen zu können. Speziell im Hinblick auf die Materialeigenschaften der gelieferten Chargen verspricht man sich Nutzen von der Anwendung von Szenariogenerierungen. So könnten die Folgen von Fehlauslieferungen, etwa bei Produkten, die auf mangelhaften Chargen basieren, abgeschätzt werden. Allerdings sieht man in der Szenariogenerierung auch eine Hilfe in der Produktionsprogrammplanung, indem der Anwender die Auswirkungen von kurzfristigen Aufträgen von unterschiedlich hoch priorisierten Kunden auf das Produktionsprogramm abschätzen, und so die Eintaktung dieser effizienter durchführen kann. Über den Digitalen Zwilling sollen dabei auch die Tochterfirma in Polen und die Relationen zu den Zulieferern miteinfließen können. Gegenüber großen Konzernen empfindet der Experte im Kontext der Einführung von Technologien Digitaler Zwillinge und im Allgemeinen von Digitalisierungswerkzeugen massive Nachteile. So seien die notwendigen Investments angesichts des niedrigen Deckungsbeitrags ein fast untragbares Risiko, zumal die Schaffung der dafür notwendigen Stellen mittelfristig ohne einen greifbaren physischen Gegenwert bleibe. Betriebsintern seien fehlende, für den Bereich Digitalisierung abgestellte Fachkräfte und der generell geringe Digitalisierungsgrad der Fertigung Hindernisse, die einer Implementierung von Technologien Digitaler Zwillinge, so auch die Szenariogenerierung, im Wege stehen.

Die mittelständische Maschinenbaufabrik hat mit den Kundenanforderungen von geringen Stillstandszeiten der Maschinen und hohem Automatisierungsgrad der Maschinen im Einsatz, sowie schwierigen Einsatzbedingungen der Maschinen unter Tage zu kämpfen. Relevante Einsatzdaten erheben die Maschinen bislang erst nach der physischen Einsatzleistung ermittelt und erlauben so eine Verbesserung erst nach der physischen Abnutzung. Ebenfalls empfindet man Sorgen bezüglich der Verfügbarkeit von elektronischen Kleinstkomponenten, die mit Komponentenpreisen unter zehn Cent bei fehlender Verfügbarkeit die Produktion von Maschinen im Wert von mehreren Millionen Euro unterbrechen. Noch findet keine Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge oder der Szenariogenerierung statt. In Zukunft möchte der Experte diese nutzen, um mit dem virtuellen Modell Daten zur Produktverbesserung

erzeugen zu können, auch ohne die Maschine real in Betrieb nehmen zu müssen. Zusätzlich sollen Störungen und Stillstände an den Maschinen auch anhand des Digitalen Zwillings auf Remotebasis analysiert werden können. Die Szenariogenerierung im Speziellen soll den Einsatz von Predictive Maintenance ermöglichen, etwa durch die parametergestützte Simulation von Einsatzbedingungen unter Tage und auch die Eintaktung von Reparaturaufträgen in die Serviceprogrammplanung erleichtern. Letztlich sei auch die Reduzierung von Lieferzeiten denkbar, etwa durch die Vernetzung des Digitalen Zwillings der Produktion mit Datenmodellen der zuarbeitenden Tochterfirma oder den Lieferanten, sowie die Resilienzsteigerung der Produktion gegenüber äußeren Faktoren, etwa der fehlenden Verfügbarkeit von produktionskritischer Kleinstelektronik. Das Unternehmen sieht sowohl Vor-, als auch Nachteile im Vergleich zu großen Konzernen, wenn es um die Digitalisierung der Fertigung geht. So wird eine höhere Flexibilität im Hause empfunden, da die Volumina bei Veränderungen in der Produktionsstruktur geringer seien. Man müsse nicht „einen riesigen Tanker neu auf Kurs bringen“. Allerdings sei auch hier ein Spannungsverhältnis zwischen dem Tagesgeschäft und der Implementierung von Veränderungen wahrzunehmen, welches bei großen Konzernen durch extra geschaffene Forschungsabteilungen und Veränderungsmanagements so nicht auftreten würde. Gleichzeitig seien die Ressourcen, die für eine Veränderung, darunter auch die Digitalisierung, aufwendbar seien, stärker begrenzt. Zumindest müsse sich das eingesetzte Kapital mehr lohnen, da „versunkenes Kapital“ im Millionenbereich für eine KMU eine reelle Existenzgefährdung darstelle, während große Konzerne auch Fehlschläge finanziell wegstecken könnten. Unabhängig davon nimmt das Unternehmen Herausforderungen wahr, wenn es um die Implementierung von Technologien Digitaler Zwillinge geht. So sei die Komplexität des Wertschöpfungsprozesses nur mit erheblichem technischem und finanziellem Aufwand abbildbar. Das Unternehmen sei ein Gesamtfertiger, welcher die notwendigen Maschinenteile selbst gießt und die Maschine bis zum Produktlebensende servicemäßig begleitet. Zusätzlich herrscht keine betriebsinterne Datendurchgängigkeit. So werden für die Fertigung der Maschinenteile und die Modellierung der Maschinen in CAD-Umgebungen unterschiedliche, auf Datenebene nicht miteinander kommunizierende Softwarelösungen im Einsatz. Auch eine Verbindung der Produktionsdaten mit den späteren Betriebsdaten „unter einem Softwaredach“ ist nicht gegeben.

Die Experteninterviews für diesen Abschnitt abschließend kommen die Ausführungen eines Kleinunternehmens zum Tragen. Im Fokus seiner Geschäftstätigkeit steht die Fertigung von Stromschienen und die Galvanisierung von elektrotechnischen Bauteilen. Zwar nimmt das Unternehmen aktuell selbst keine Herausforderungen in Bezug zur Geschäftstätigkeit wahr. Allerdings ist die aktuelle Absatzstruktur, in der ein einzelner Abnehmer über 90 Prozent des Umsatzes generiert, als großes Risiko zu werten. In der Fertigung kommen keine

Technologien der Industrie 4.0, Digitaler Zwillinge oder der Szenariogenerierung zum Einsatz. Die Produktion findet überwiegend über analoge Fertigungsmaschinen statt, die nur zur Steuerung geringe Softwareanteile aufweisen. Der Experte kann für sich keinen geeigneten Use Case von Digitalen Zwillingen oder der Szenariogenerierung identifizieren. Einerseits sei die Fertigung nicht komplex genug, um die im Rahmen der Implementierung derartiger Technologien auftretende Komplexität zu rechtfertigen. Sowohl die analogen Fertigungsprozesse als auch die übersichtlichen Kapazitäten in Bezug auf Personal und Maschinen würden dem Management keinen Bedarf für digitale Tools geben. Andererseits sei man auf der Absatzseite keinen großen Schwankungen ausgesetzt. Man hätte feste Lieferverträge über lange Laufzeiten mit einem Großabnehmer, die eine Planungssicherheit gewährleisten. Man sei demnach nicht einem volatilen Markt ausgesetzt. Demnach empfinde man auch keinen direkten Nachteil gegenüber großen Konzernen, wenn es um die Implementierung von digitalen Technologien in der Fertigung geht, da eine Implementierung mittelfristig nicht geplant sei. Sollte man sich für die Implementierung etwaiger Technologien entscheiden, sehe man große Hürden in den auftretenden Kosten und der Verfügbarkeit von fähigem Personal.

Die von den Experten genannten Use Cases sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

**Tabelle 4 - Von den Experten genannte Use Cases**

<b>Unternehmen</b>	<b>Use Cases</b>
Stanztechnik	Produktionsprogrammplanung, Fertigungsoptimierung (Produktion und Produkte), bessere Datenverwertbarkeit, Störungsanalysen- und vorhersagen
Gießerei	Produktionsprogrammplanung, Digitalisierung der Produktion, Bereicherung der Konstruktion über Simulationstechniken, Simulation der Vor-Ort Montage, Störungsanalyse im Prozessmaßstab
Schlauchproduzent	Produktionsprogrammplanung, Reduzierung der Innovationszyklen, Unterstützung des Vertriebs, prädikative Analyse von Ausfällen
Schalldämpfer	Produktionsprogrammplanung, Vernetzung der einzelnen Standorte in einem Datenmodell, Analyse von Störungen in der Supply Chain
Baustahl	Produktionsprogrammplanung, Qualitätssicherung, Analyse von fehlerhaften Auslieferungen

Maschinenbau	Produktoptimierung, Remote-Support für Produkte, Predictive Maintenance, Resilienzsteigerung der Produktion, Verkürzung der Lieferzeiten
Hartware Elektrotechnik	Keine Use Cases erfassbar

Unternehmensübergreifend bildet die Produktionsprogrammplanung bei fünf von sieben interviewten Experten den am häufigsten genannten Use Case der Szenariogenerierung. Vier von sieben Experten erachten die Verwendung der Szenariogenerierung im Zusammenhang mit Aspekten von Predictive Maintenance als nützlich. Weitere gemeinsame Use Cases sind die Produktoptimierung und die Verkürzung der Makespan mit jeweils zwei Nennungen. Alle diese überschneidenden Use Cases und die Einzelnennungen der Resilienzsteigerung im Produktionssystem sowie der Unterstützung der Konstruktion über Simulationstechniken sind auch in der Literatur zu finden.

Im Gegensatz dazu sind bei Vergleich von Tabelle 3 mit Tabelle 4 auch Use Cases der Experten zu erwähnen, die nicht in der hinzugezogenen Literatur enthalten sind. So sind die Use Cases Vertriebsunterstützung, Remote-Support, die Analyse von fehlerhaften Auslieferungen und standortübergreifende Vernetzungsaspekte neue über die Interviews identifizierte Use Cases der Szenariogenerierung im Kontext Digitaler Zwillinge.

Es ist zu betonen, dass die von den Experten genannten Use Cases theoretischer Natur sind. Während die Forschung bereits Use Cases in der Praxis erforscht hat, ließ sich im Tagesgeschäft der interviewten KMUs kein praktischer Einsatz von Technologien Digitaler Zwillinge oder der Szenariogenerierung feststellen. Einen Grund dafür sehen Teile der Experten in der Konkurrenz zu großen Unternehmen. Die in Tabelle 5 zusammengefassten Erhebungen über die Verwendung von Technologien Digitaler Zwillinge und der Szenariogenerierung, sowie durch die Experten empfundenen Nachteilen bei Implementierung dieser gegenüber großen Unternehmen manifestieren den Bedarf an eine Softwarelösung für KMUs.

**Tabelle 5 - Erhebung über Nutzungskonzepte der Szenariogenerierung und  
Nachteilsempfindung gegenüber großen Unternehmen**

<b>Unternehmen</b>	<b>Konzepte zur Szenariogenerierung</b>	<b>Nachteile gegenüber großen Unternehmen</b>
Stanztechnik	Nein	Mangelnde Attraktivität für Nachwuchskräfte, fehlende Veränderungsbereitschaft in der Belegschaft
Gießerei	Nein	Nein
Schlauchproduzent	Nur Ansätze	Nein
Schalldämpfer	Nein	Mangelnde Attraktivität für Nachwuchskräfte, fehlende Veränderungsbereitschaft in der Belegschaft
Baustahl	Nein	Mangelnde Attraktivität für Fachkräfte, finanzielle Risiken sind überproportional groß
Maschinenbau	Nein	Dedizierte Fachkräfte finanziell herausfordernd, finanzielle Risiken sind überproportional groß
Hartware Elektrotechnik	Nein	Nein

Keines der befragten Unternehmen nutzt ganzheitliche Konzepte zur Szenariogenerierung im Produktionskontext. Vier von sieben Experten gaben an, Nachteile gegenüber großen Unternehmen zu empfinden, wenn es um die Implementierung von Technologien Digitaler Zwillinge und der darauf aufbauenden Szenariogenerierung geht. Dieser technologische Rückstand der KMUs im Zusammenhang mit KMU-spezifischen Herausforderungen, wie fehlende Attraktivität für Fachkräfte und die hohen investitionsbedingten finanziellen Risiken sind auch in der Literatur bestätigt (Cimino et al., 2023; Schuh et al., 2021; Stojanovic & Milenovic, 2018; Taylor et al., 2021). Der Bedarf für eine kostenmoderate Softwarelösung zur Implementierung Digitaler Zwillinge und Szenariogenerierung für den Anwenderkreis von KMUs kann somit bestätigt werden.

## **5.2 Einflüsse der Industrie 4.0 auf die Nutzung Digitaler Zwillinge**

In allen berücksichtigten Use Cases aus der Literatur bilden Technologien der Industrie 4.0 die Grundlage für die Implementierung von Technologien Digitaler Zwillinge im Allgemeinen, und für die Verwendung von Szenariogenerierungen im Speziellen. Der Einfluss von Technologien der Industrie 4.0 reicht jedoch bis in die Auswertung der What-If-Simulationen.

Zur Erstellung von Digitalen Zwillingen, die einen ausreichenden Detaillierungsgrad zum realen Asset haben, ist die Erhebung und Verarbeitung großer Datenmengen notwendig. Dabei spielen in der Literatur Technologien der Industrie 4.0 eine wesentliche Rolle.

Bei komplexen Prozessen mit zahlreichen nachgelagerten Unterprozessen, etwa in der Produktionslogistik oder der langkettigen Fertigung, ist die Erhebung von Position und Zustand des Produkts zu jeder Zeit eine Voraussetzung, um den Digitalen Zwilling konsequent aktuell zu halten. Hierzu erfolgt die Bündelung von Technologien der Industrie 4.0 zu Real Time Location Systems, die Ankunft, Dauer und Verlassen von physischen Einheiten an bestimmten Orten erfassen (Huchard et al., 2012). Im industriellen Kontext geschieht dies über die Benutzung von RFID-Tags (Compagnucci et al., 2025) und Blockchaintechnologien (Davis et al., 2023). Dabei besteht die Option zusätzliche Daten über den Zustand des Produkts, wie Temperatur- und Feuchtigkeitswerte zu sammeln. Eine Weiterentwicklung dieser Technologie bildet die Anwendung von Ultra-Wideband Tags in Materialhandlingprozessen innerhalb der Produktionslogistik. Entsprechend ausgestattete Aktuatoren (z.B. Gabelstapler) erheben Geräteinformationen wie Geschwindigkeit, Distanz zu Referenzpunkten, GPS-Koordinaten, Vibration und die vom Gerätesystem abhängige Zeit und leiten diese über ein Raster an Sensorpunkten in die Datencloud weiter (Flores-Garcia et al., 2021). Diese Erhebung erschafft eine virtuelle Umgebung, die die Position und den Zustand der Aktuatoren abbildet und weitere Analysen zulässt, etwa die Erzeugung von Heatmaps. Neben der Überwachung der Position ist auch die des Zustands des Produktes während des Durchlaufens der Produktionsanlage entscheidend. Dies geschieht in der industriellen Massenfertigung über Qualitätsüberwachungsmechanismen, welche Technologien der Industrie 4.0 nutzen. So werden Softwaretools eingesetzt, um über 3D-Scans von Werkstücken deren Zustand in einer Datenbank zu speichern und mit einem Soll-Modell zu vergleichen (Simões et al., 2022). Bei der Durchführung von Szenariogenerierungen, welche auf Technologien Digitaler Zwillinge aufbauen, und deren Digitale Zwillinge unterschiedliche, miteinander in Beziehung stehende Produktionsanlagen abbilden, haben Cimino et al. (2024) die Unabdingbarkeit von Technologien der Industrie 4.0 herausgestellt. So besteht Bedarf sowohl an einer von Technologien der Industrie 4.0 gestützten Datenerhebung des physischen Modells als auch im weiteren Verlauf an der Verfügbarkeit einer offenen Datenbank, welche das Simulationsmodell mit Daten versorgen und gleichzeitig mit den Daten aus der Realität Vergleiche erbringen können. Um auch die Kommunikation zwischen Anwenderseite und Simulationsmodell zu ermöglichen, werden wiederum offene Protokollformen, so http, benötigt, um die Datendurchgängigkeit in allen Verarbeitungsebenen zu gewährleisten. Ähnliche Einflüsse, oder gar Notwendigkeiten, von Technologien der Industrie 4.0 zur Implementierung und Nutzung von Digitalen Zwillingen zeigten Erdal et al. (2024). Die

Modellbildung ihres Digitalen Zwillings erfolgt über die Nutzung von Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), I/O Einheiten, Sensor-RFID-Interaktionen an den einzelnen Stationen der Produktionskette, Sensoren zum Bewegungsmonitoring des Produktes und zur Erkennung von Stillständen.

Auf einer reinen Prozessebene unterstützen Technologien der Industrie 4.0 Prozessdaten zu erheben und in die Datenverarbeitung weiterzuleiten. Es kommen dabei hochspezialisierte digitale Messinstrumente zum Einsatz, die eine Datenverarbeitung der erhobenen Messwerte im digitalen Softwareumfeld ermöglichen (Assani & Matic, 2025; Deenen et al., 2022; Hasidi et al., 2023; Júnior et al., 2023; Pareja-Corcho et al., 2023; Resman et al., 2025). Zur Verarbeitung dieser Daten wiederum Cloudtechnologien und durchgängige Kommunikationsprotokolle gängige Tools, um eine fertigungsübergreifende Datennutzung zu gewährleisten (Cainelli & Rauchhaupt, 2021; Merkle, 2019). Die Forschung zeigt auch, dass die Verwendung von modernen leistungsstarken Cloudlösungen zur Datenverarbeitung im Kontext der Verwendung von Technologien Digitaler Zwillinge auf Grund der anfallenden Datenmengen keine Möglichkeit, sondern eine Notwendigkeit ist (Stojanovic & Milenovic, 2018).

Im nächsten Schritt folgt die Zusammenführung der erhobenen Daten in einer Modellumgebung zum Digitalen Zwillings. Hierbei werden in der diskreten Fertigung Softwareprogramme genutzt, welche umfassende CAD- und optionale VAR-Funktionalitäten bieten, um ein visualisierbares Modell zu generieren (Erdal et al., 2024; McGinnis et al., 2021; Stöckermann et al., 2023). Dabei kommen auch Modelle auf Grundlage zielgerichteter Frameworks zum Einsatz (Cainelli & Rauchhaupt, 2021; Compagnucci et al., 2025). Neben industriellen Software UIs sind auch Lösungen mit vereinfachtem Frontend in Benutzung. Kennzeichnend für diese ist die Bereitstellung von Formen eines Human-Machine Interfaces (HMI), das die wechselseitige Interaktion und Einflussnahme von Mensch und Maschine ermöglicht, und dafür Technologien wie zum Beispiel Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) nutzt (Assani & Matic, 2025; Cimino et al., 2023; Hasidi et al., 2023; Kumbhar et al., 2023; Malik, 2023; Merkle, 2019; Montes et al., 2024; Pareja-Corcho et al., 2023; Tsinarakis et al., 2022). Neben der technisch moderat anspruchsvollen Nutzung von SCADA können als Kopplungselement zwischen Mensch und Maschine auch komplexe Technologien, wie etwa neuronale Netzwerke Anwendung finden (Assani & Matic, 2025). Im industriellen Forschungskontext sind außerdem an Einsatzbereich angepasste Softwaretools, wie EGGEDI, speziell zum Simulieren von Störungen in der Produktionskette, und DENOK, zur Abbildung von industriellen Produktionsanlagen, zu erwähnen (Simões et al., 2022). Eine

andere Form der Modellbildung ist der Einsatz von Petri-Netzen, welche eine mathematische Darstellungsform der realen Gegebenheiten aus quantifizierbaren Daten bietet und offen für die Unterstützung von intelligenten Werkzeugen, wie Künstliche Intelligenzen, ist (Cavone et al., 2020; Júnior et al., 2023; Tsinarakis et al., 2022). Vergleichbare Ansätze zur Modellbildung erfolgen über die Verkettung einzelner Prozesselemente zu einem Logikmodell, welches mit der Nutzung von Petri-Netzen vergleichbar ist (Resman et al., 2025).

Bei der Durchführung und Auswertung der Szenariogenerierungen kommen fremdbezogene und selbstentwickelte Softwarewerkzeuge und, besonders bei der Auswertungen auf Grundlage rein mathematischer Modellierungen, stochastische und numerische Methoden zum Einsatz (Assani & Matic, 2025; Cimino et al., 2023; McGinnis et al., 2021). Daneben finden cloud- und plattformbasierte Lösungen Anwendung, um sowohl eine Beschleunigung der Datenverarbeitung, als auch die simultane Analyse des Modellverhaltens von mehreren Anwendern zu ermöglichen (Erdal et al., 2024; Merkle, 2019; Pareja-Corcho et al., 2023). Grundlage der Durchführung und Auswertung sind hochentwickelte Algorithmen, die die Simulationen entlang der vordefinierten Key Performance Indicators (KPI) optimieren sollen (Resman et al., 2025; Stöckermann et al., 2023). Die Ergebnisse der Simulationsdurchläufe können dabei mit Hilfe eines neuronalen Netzes gespeichert und miteinander verglichen werden (Hasidi et al., 2023; Stöckermann et al., 2023). Die Erweiterung der verwendeten Algorithmen um Data Mining oder Machine Learning Aspekte erzielte bereits Ergebnisse, in denen die generierten Szenarien schrittweise vom Auswertungstool parameterseitig erweitert und verglichen wurden (Compagnucci et al., 2025; Stojanovic & Milenovic, 2018). Innerhalb dieser algorithmusbasierten Auswertung unterstützen weitere Technologien Künstlicher Intelligenz bei der Parameterauswahl und -initialisierung, um mögliche Optima zu ermitteln und die Ausgabe von Handlungsempfehlungen zu ermöglichen und qualitativ zu verbessern (Goharoodi et al., 2023; Júnior et al., 2023; Pires et al., 2021b). Speziell in der Automatisierungstechnik bietet sich die Szenariogenerierung und -analyse von Störungen, die durch Fehlverhalten von physischen Komponenten in der Produktion verursacht werden, über Einbeziehung von virtuellen Programmable Logic Controllers, oder anderen virtuellen Controllern an (Malik, 2023).

Auch wenn nicht über alle Phasen in allen Ebenen der recherchierten Use Cases Technologien der Industrie 4.0 explizit einen Einfluss auf die Implementierung und Verwendung von DZ-Modellen hatten, so kommen Technologien der Industrie 4.0 in jedem beschriebenen Use Case mindestens einmal zum Einsatz. Kennzeichnend sind hierbei Technologien zur Datendurchgängigkeit, wie Protokolle, Technologien zur offenen Massenverarbeitung von

Daten, wie Cloud-Lösungen, Interfaces zur Interaktionsmöglichkeit zwischen Benutzer und DZ-Modell, hier oft HMIs, und Datenauswertungstechnologien mit Anteilen von künstlichen Intelligenzen, wie smarte Algorithmen und neuronale Netze. Ohne die Verwendung von Technologien der Industrie 4.0 ist kein ermittelter Use Case von DZ-Modellen aus der Literaturrecherche effizient implementierbar, nutzbar oder auswertbar.

**Tabelle 6 - Technologien der Industrie 4.0 im Kontext Digitaler Zwillinge in der Literatur**

<b>Technologien der Industrie 4.0 im Kontext Digitaler Zwillinge</b>			
<b>Quelle</b>	<b>Datenerhebung</b>	<b>Modellierung</b>	<b>Auswertung</b>
Assani & Matic, 2025	Sensoren	HMI, neuronales Netz	Automatisierte Berechnungsschleifen
Cainelli & Rauchhaupt, 2021	Sensoren, Protokolle	RAMI 4.0	
Cavone et al., 2020		Petri-Netze	
Cimino et al., 2024	Protokolle		
Cimino et al., 2023		HMI	Auswertungssoftware
Compagnucci et al., 2025	RFID	MERODE	Data Mining Algorithmus
Davis et al., 2023	Blockchain		
Deenen et al., 2022	Sensoren		
Erdal et al., 2024	SPS, RFID, Sensoren	CAD, VAR	Cloud
Flores-Garcia et al., 2021	UWB-Tag, Cloud		Cloud
Goharoodi et al., 2023			KI
Hasidi et al., 2023	Sensoren	HMI, SCADA	Neuronales Netz
Huchard et al., 2012	RTLS		
Júnior et al., 2023	Sensoren	Petri-Netze	KI
Kumbhar et al., 2023		HMI, SCADA	
Malik, 2023		HMI	PLC, Auswertungssoftware
McGinnis et al., 2021		Simulationssoftware	Auswertungssoftware
Merkle, 2019	Cloud	Simulationssoftware	Cloud
Montes et al., 2024	Sensoren	HMI, SCADA	Cloud
Pareja-Corcho et al., 2023	Sensoren	CAD, HMI	Cloud
Pires et al., 2021			Reinforcement Learning Algorithmus
Resman et al., 2025	Sensoren	Digitales Logikmodell	Algorithmen
Simões et al., 2022	3D-Scans	Simulationssoftware	
Stöckermann et al., 2023		Simulationssoftware	Neuronales Netz
Stojanovic & Milenovic, 2018	DMS		Machine Learning
Tsinarakis et al., 2022		HMI, Petri-Netze	

Die in der Literatur beschriebenen Einflüsse von Komponenten der Industrie 4.0 auf die Verwendung von Technologien Digitaler Zwillinge, insbesondere die Szenariogenerierung, sind in Tabelle 6 zusammengefasst.

Durch die teils erheblich abweichenden Automatisierungsgrade innerhalb der Fertigung zwischen den befragten KMUs haben auch Technologien der Industrie 4.0 stark unterschiedliche Anteile und Bedeutungen für deren Fertigung. Insgesamt sind sich die Experten einig, dass die umfängliche Integration von Technologien der Industrie 4.0 in die Fertigung die Einführung von Technologien Digitaler Zwillinge erleichtert.

Das mittelständische Stanzunternehmen versteht Technologien der Industrie 4.0 als Enabler von weiterführenden Technologien Digitaler Zwillinge. Einzelne Maschinen befinden sich aktuell in Vorbereitung zur Ausstattung mit Sensoren und Optiken, die die für die Produktion relevanten Daten erheben sollen. Auch Ansätze zur Datenauswertung, etwa ein Machine-Learning Skript zur automatischen Erkennung von Ausschussware, sind in der Erprobungsphase. Nachdem alle Anlagen in der Art modernisiert sind, dass alle für die Produktion relevanten Daten erhoben werden können, soll die Vernetzung dieser untereinander erfolgen, um mittelfristig die Nutzung eines Digitalen Zwillings im Fabrikmaßstab zu ermöglichen.

Für die mittelständische Gießerei sind Technologien der Industrie 4.0 unabdingbar, um eine Analgenübergreifende Vernetzung herzustellen und so zu einem Digitalen Zwilling im Gesamtfertigungsmaßstab hinzuarbeiten. Die Anlagen des Unternehmens sind zu einem großen Teil mit Sensoriken, Optiken, Skripten und Steuerungen ausgestattet, die bereits die Erstellung von Digitalen Zwillingen im Prozessmaßstab unterstützen können. Um die Vernetzung der einzelnen Anlagen zu ermöglichen, arbeitet die hauseigene IT an Softwaremodulen, die einzelne Aspekte der Fertigung abbilden, z.B. die Logistik und die Produktionssteuerung. Diese einzelnen Module funktionieren laut eigener Aussage bereits gut im Kontext der Industrie 4.0, allerdings besteht aktuell die Herausforderung der Vernetzung unter den Modulen zu einem Gesamtprodukt. Das Unternehmen verwendet die zuvor implementierten Technologien der Industrie 4.0 dabei als Grundlage zur Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge.

Technologien der Industrie 4.0 sind für den Schlauchproduzenten von erheblicher Bedeutung. Angesichts der im internationalen Vergleich hohen Personalkosten in Deutschland möchte

man möglichst viele Bereiche der Produktion automatisieren. Dafür installiere man aktuell viele Sensoriken und andere Automatisierungselemente entlang der Fertigung. Allerdings stößt man bei der Schlauchfertigung auch an Grenzen der Automatisierbarkeit. Speziell das Handling von Schläuchen, mit spezifischen Flexibilitäten und Reibwerten, sei bislang nur schwierig automatisierbar. Nach der umfänglichen Ausstattung der Fertigung mit Datenerfassungswerkzeugen und -verarbeitungsmöglichkeiten soll in der nächsten Stufe die Aggregation der Datennutzung zu Digitalen Zwillingen erfolgen. Auch hier treten Technologien der Industrie 4.0 im Verständnis des Unternehmens als Enabler für Technologien Digitaler Zwillinge auf.

In der Fertigung des Schalldämpferproduzenten nehmen Technologien der Industrie 4.0 bislang nur eine untergeordnete Rolle wahr. So kommen nur Sensoriken zum Einsatz, die für die Aktuatoren der Maschinen notwendig sind, jedoch keine zur weitergehenden Datenerfassung. Folglich sind keine Automatisierungsansätze oder Nutzungen von KI-Tools vorhanden. Die Fertigung läuft zum Großteil mit analogen Vorgängen ab. Technologien der Industrie 4.0 sieht man dementsprechend als reine Notwendigkeit, um Technologien Digitaler Zwillinge nutzen können.

Im konkreten Produktionsgeschehen der Losfertigung finden Technologien der Industrie 4.0 bei dem Hersteller für Baustahlprodukte noch keine Anwendung. Der grundlegende Prozess, nämlich die Umformung von Stahl, sei bereits so gut manuell erforscht, dass es auf der Prozessebene des Umformens speziell für die eingesetzten Maschinen keine Probleme gäbe, die den Einsatz etwaiger Technologien erfordern würden. Dass man die Problematik der Qualitätsschwankungen innerhalb des Metallgefüges, also auf Werkstoffebene, mit Technologien der Industrie 4.0 begegnen könnte, ist ein Ansatz, der erst vor ein paar Monaten aufkam. Jedoch findet in der Prototypenfertigung für neue Befestigungselemente der Einsatz von 3D-Scans und additiver, CAD-gestützter Fertigung statt.

Auf der Maschineneinsatzebene sind Technologien der Industrie 4.0 für die mittelständische Maschinenbaufabrik bereits standardmäßig im Einsatz. So wird der Betrieb großflächig mit Sensoren und optischen Systemen überwacht. Allerdings hänge man im Kontext der Produktionsebene hinterher. Momentan arbeite man an der Einführung eines einheitlichen PLM-Systems und einer datendurchgängigen CAD-Lösung. Diese beiden Systeme sollen dann als Grundlage zum Aufbau eines Produktions-DZ dienen. Auch die Nutzung von Technologien Künstlicher Intelligenzen sei im Moment ein „heißes Thema“. Zwar seien diese

zur Datenauswertung noch nicht großflächig im Einsatz, jedoch sei dies geplant und aktuell werde auch ein KI-Chat-Bot erprobt, welcher die Maschinendaten als Grundlage nutzt, um den Kunden Erstsupport liefern zu können.

Für das Kleinunternehmen der elektrotechnischen Fabrik seien Technologien der Industrie 4.0 kein notwendiges Werkzeug, um am Markt bestehen zu können. Sogar die Qualitätssicherung wird über den Einsatz von Handgeräten abgewickelt. Sensoriken oder andere Komponenten der Industrie 4.0 finden in der Produktion keine Anwendung.

Die Einflüsse von Komponenten der Industrie 4.0 auf die Verwendung von Technologien Digitaler Zwillinge im Kontext der industriellen Fertigung der Experten sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

**Tabelle 7 - Technologien der Industrie 4.0 im Kontext Digitaler Zwillinge in den Unternehmen der Experten**

<b>Technologien der Industrie 4.0 im Kontext Digitaler Zwillinge</b>			
<b>Unternehmen</b>	<b>Datenerhebung</b>	<b>Modellierung</b>	<b>Auswertung</b>
Stanztechnik	Sensoren	-	-
Gießerei	Sensoren	-	-
Schlauchproduzent	Sensoren	-	-
Schalldämpfer	-	-	-
Baustahl	3D-Scans, CAD	-	-
Maschinenbau	Sensoren, PLM, CAD	-	-
Hardware Elektrotechnik	-	-	-

Bei einem Vergleich der Tabellen 6 und 7 zwischen Literatur und Experten zeigt sich, dass die in der Literatur erforschten Use Cases wesentlich umfangreicher Technologien der Industrie 4.0 im Kontext Digitaler Zwillinge nutzen. Auch wenn hier der Pioniercharakter der Forschung zu beachten ist, belegt die umfangreichere Nutzung von Technologien der Industrie 4.0 innerhalb der hinzugezogenen Forschungsarbeiten einen Rückstand der interviewten KMUs in Bezug auf die Digitalisierung der Fertigung und unterstreicht den Aufholbedarf der KMU-Landschaft. Während im Bereich der Datenerhebung noch Überschneidungen bestehen, etwa der Verwendung von Sensoren, Daten Management Systemen und 3D-Scans, zeigen sich in den Bereichen Modellierung und Auswertung Defizite auf Seiten der KMUs. Da sowohl die Forschungsarbeiten als auch die Experten die unverzichtbare Rolle von Technologien der Industrie 4.0 als Enabler weitreichenderer Technologien Digitaler Zwillinge betonen, ist dem hier interviewten Teil der deutschen KMU-Landschaft ein großer Aufholbedarf an der

Implementierung von Industrie 4.0 Komponenten in der Fertigung zu attestieren, um mittelfristig die Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge und insbesondere der Szenariogenerierung zu ermöglichen.

### **5.3 Ermittlung relevanter Parameter für die Szenariogenerierung**

Die aus der Literatur ermittelten Parameter lassen sich aufteilen in prozessübergeordnete Parameter (Materialflussebene), für Use Cases im Kontext ganzer Produktionssysteme und prozessspezifische Parameter, für rein prozessbezogene Use Cases.

Für die Szenariogenerierung im Use Case der Batterieselbstentladung dienten die Umgebungstemperatur und die Zeit zwischen Produkt und Kunde als wesentliche Parameter (Merkle, 2019). Im Kontext der Produktionsablaufoptimierung in der Halbleiterfertigung kamen Technologien des Hyperparameter-Tunings zum Einsatz. Wichtigster Parameter war hier das Losfreigabeintervall in den Produktgruppen (Seok et al., 2022; Seok et al., 2025). Einstellbare Parameter für die Geratorpumpenentwicklung waren die Ausprägungen der geometrischen Daten (Pareja-Corcho et al., 2023). Um Bottlenecks in der Lagerproduktion bei äußeren Ereignissen vorhersagen zu können, nutzten (Kumbhar et al., 2023) die Prozesszeiten der Unterprozesse, inklusive Wartezeiten, als Parameter. Die Resilienzsteigerung der Supply Chain zur Turbinenfertigung erfolgte über die Szenariogenerierung anhand der Fertigungsparameter Supply Chain Konfiguration, Terminplanungsregeln, Prozesszeitvariabilität, Tag der Auftragsannahme, Tag der Auftragserfüllung, Arbeitsschichtmodulation und Wartungstermine für zu nutzende Maschinen in der Produktion (Cimino et al., 2024). Ähnliche Parameter wählten (Tsinarakis et al., 2022), um die Resilienz in der Bewehrungsherstellung zu steigern. Hier wurden die Prozesszeiten an den einzelnen Maschinen, Ausfallzeiten und Wartungszeiten parametrisiert. In einer Forschungsarbeit zur Nutzung von Technologien Digitaler Zwillinge durch KMUs stellten Cimino et al. (2023) Standardparameter für die Szenariogenerierung vor, um Produktionssysteme grundlegend parametrierbar zu bearbeiten. Dazu zählen die Anzahl an Arbeitern, die Effizienz der Arbeiter, die Anzahl der Maschinen, die Effizienz der Maschinen, die Losgröße, die Anzahl an Schichten pro Tag, die Anzahl an Arbeitsstationen und die Rangfolgeregelungen innerhalb der Auftragsbearbeitung. Bei der Ermittlung der Fertigungszeiten für Aufträge mit bestimmten Losgrößen in der Isolierstoffherstellung dienten die Prozesszeiten der Einzelprozesse mit Unterscheidung nach in der Fertigung auftretenden Ausschüssen und die Quoten an fehlerhaften Produkten als Parameter (Resman et al., 2025). Zur Parametrisierung der

Szenariogenerierung im Prozess des Laserstrahlschneidens wurden die realen Prozessparameter verwendet, darunter die Laserleistung, Gasflussvariationen, Wassertemperatur, Gastemperatur und die Leistung des CNC-Steuermoduls (Stojanovic & Milenovic, 2018). Im Use Case der fügenden Polyphenylsulfidverarbeitung variierten (Goharoodi et al., 2023) die Prozessparameter des Vorbehandlungsprozesses. Dies umfasste den Status der gereinigten Oberfläche (gereinigt/nicht gereinigt), die Plasmaleistung, den Abstand zwischen der Plasmadüse und dem Substrat, die Plasmageschwindigkeit, die Anzahl an Plasmitationen und die Zeit zwischen der Plasmabehandlung und dem Fügeprozess. Simultan parametrisierten Goharoodi et al., (2023) die Kosten des Gesamtprozesses, indem sie für alle notwendigen Unterprozesse die akkumulierten Kosten pro gefügtem Werkstück ermittelten. Die szenarienrelevanten Parameter für die Szenariogenerierung des Digitalen Zwilling des Kühlhauses sind der Energieverbrauch und die Temperatur in den einzelnen Segmenten, ergänzt um eine Hilfsvariable, welche ein Verhältnis aus den Temperaturdifferenzen zwischen den Segmenten und dem Gesamtenergieverbrauch des Kühlsystems beschreibt (Montes et al., 2024). Im Kontext des Containerhubs wurden die Kosten für die Arbeiter, die Laufzeiten für das Containerhandling und die Systemregistrierungen, die Anzahl der Container, die Ankunftszeiten der Ladungen und die Schichten pro Tag parametrisiert (Compagnucci et al., 2025). Um die Innovationszyklen in der Textilfertigung zu reduzieren, parametrisierten Cavone et al., (2020) Szenariogenerierungen mit unterschiedlichen Zeitwerten für die notwendigen Zwischenprozesse. Als Parameter zur Ermittlung der optimalen Anzahl autonom fahrender Logistikfahrzeuge in einer experimentellen Batteriefertigung dienten der Durchsatz, die Anzahl der Fahrzeuge in den einzelnen Fertigungsstationen, die Energiekosten für die Fahrzeuge und die Zufriedenheitsquote der Mitarbeiter (Pires et al., 2021b).

Es ließen sich in der Literatur keine Restriktion oder Spezifizierung des Parameterraumes identifizieren.

Die für die Szenariogenerierung relevanten Parameter in der Literatur sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

*Tabelle 8 - Parameter zur Szenariogenerierung in der Literatur*

<b>Parameter zur Szenariogenerierung</b>		
<b>Quelle</b>	<b>Materialflussebene</b>	<b>Prozessebene</b>
Cavone et al., 2020	Prozesszeiten	
Cimino et al. (2024)	Supply Chain Konfiguration, Terminplanung, Arbeitsschichtmodulation, Wartungstermine	
Cimino et al., 2023	Anzahl Arbeiter, Effizienzgrad Arbeiter, Anzahl Maschinen, Effizienzgrad Maschinen, Losgröße, Schichtanzahl pro Tag, Anzahl Arbeitsstationen, Rangfolgeregelungen	
Compagnucci et al., 2025)	Kosten, Laufzeiten, Anzahl Container, Ankunftszeiten, Schichten pro Tag	
Goharoodi et al., 2023	Kosten	Plasmaleistung, Reinigungszustand, Maschinenabstände, Plasmageschwindigkeit, Anzahl Plasmaiterationen, Zeit zwischen Plasma und Fügen
Kumbhar et al., 2023	Wartezeiten	
Merkle, 2019	Umgebungstemperatur, Ruhezeit	
Montes et al., 2024		Energieverbrauch, Temperaturen
Pareja-Corcho et al., 2023	Geometrien	
Pires et al., 2021)	Anzahl autonom fahrender Fahrzeuge, Energiekosten, Zufriedenheitsquote der Mitarbeiter	
Resman et al., 2025	Prozesszeiten, Ausschussquote	
Seok et al., 2022	Losfreigabeintervall	
Seok et al., 2025	Losfreigabeintervall	
Stojanovic & Milenovic, 2018		Laserleistung, Gasflussvariation, Wassertemperatur, Gastemperatur, CNC- Leistung
Tsinarakis et al., 2022	Prozesszeiten, Ausfallzeiten	

Die interviewten Experten beziehen ihre Parameterauswahl größtenteils aus aktuellen Herausforderungen im Kontext ihrer Geschäftstätigkeit. Ein Großteil der Unternehmen sah sich in der jüngeren Vergangenheit mit den Folgen aus internationalen Krisen konfrontiert. Häufige genannte Herausforderungen sind die Erfahrungen mit den Preissteigerungen für Stahl im Zuge des russischen Überfalls auf die Ukraine, Nachschubprobleme im Bereich Mikrochips und Steuerungsmodule durch die Coronapolitik Chinas und weggefallene Absatzmärkte im Zuge politischer Sanktionen, etwa Russland oder Iran. Diese Einflüsse spiegeln sich in den von den Experten anvisierten Parametern für die Szenariogenerierung wider, die sich im Gegensatz zu den Use Cases stärker ähneln.

Für das Stanzunternehmen ist es wichtig, dass sich die Parameterräume am Unternehmensprofil entlang bewegen. Parameterwerte, die nicht dem Produktionsgeschehen entsprechen, würden keinen Mehrwert bieten. Die für das Unternehmen wichtigsten Parameter sind die Menge an einsetzbaren Ressourcen innerhalb des Szenarios, Preise für diese Ressourcen und auch spezifische Eigenschaften von Standardressourcen, etwa der Erfahrungsgrad der Belegschaft. Auch die Intensität von externen Störungen sollte grob von leicht bis schwer einstellbar sein.

Abseits der konventionellen Parameter Preise, Störungsintensität und Ressourcenausfall hat die Gießerei noch keine Vorstellung von gewünschten Parametern. Wichtig sei, dass die Parameterräume so begrenzt sind, dass Restriktionen sinnvolle Szenariogenerierungen garantieren. Im Optimalfall sollte die Software auch Zusammenhänge zwischen den Parametern erkennen, so dass ein Ressourcenausfall zu teuren Ersatzbeschaffungen führen können.

Dem Schlauchproduzent fehlt es wegen der unzureichenden Vorerfahrung zu Konzepten der Szenariogenerierung an konkreten Vorstellungen von Parametern. Wichtig sei es, Parameter, die nicht zur Zielerreichung beitragen, bestenfalls automatisch auszusortieren. Alle Parameter müssen logisch quantifizierbar sein und einen veränderlichen Impact auf die Szenariogenerierung haben, um die Unterschiede der verschiedenen Parameter sichtbar zu machen.

Durch die Produktionsstruktur des Schalldämpferproduzenten hat dieser eine umfangreiche Vorstellung an Parametern für die Szenariogenerierung. So sollten Schwankungen in den Lieferprozessen, Stillständen von einzelnen Unternehmensteilen, Krankheitsstände,

Kompetenzgrad des Personals, Preisschwankungen und Handelssanktionen über Parameter abbildbar sein. Im Zuge des Interviews wurde deutlich, dass diese Parameter auf Erfahrungen der Vergangenheit aufbauen, so etwa die gestiegenen Preise für Stahl im Zuge des russischen Überfalls auf die Ukraine.

Um die zuvor beschriebenen zwei Haupteinsatzmöglichkeiten für den Baustahlverarbeiter verarbeiten zu können, wünscht sich dieser einerseits die Parametrisierung von kurzfristig bestellten Mengen, der Anzahl an Mitarbeiter und der Maschinenleistung für die Produktionsprogrammplanung. Andererseits sollen Ausschussquoten und Stahlgefügeeigenschaften für die Qualitätssicherung als Parameter dienen.

Akut wichtigster Parameter sind für den Maschinenbauer Verfügbarkeiten, speziell von Produkten der Kleinstelektronik. Eng daran anknüpfend sollen Alternativprodukte parametrierbar sein können, etwa mit einem Übertragungskoeffizienten. Dadurch soll ermittelt werden können, welche Auswirkungen die veränderten Produktparameter, etwa von einem zugekauften Motor eines alternativen Lieferanten, auf die Funktion der Maschine haben.

Da der elektrotechnischen Fabrik keine Use Cases der Szenariogenerierung vorstellbar seien, konnte der Experte zunächst keine Angaben zu relevanten Parametern machen. Im Rahmen der Nachfassung könne man sich bei Berücksichtigung von typischen Use Cases aus Literatur und den übrigen Interviews, z.B. die Produktionsprogrammplanung, Parameter vorstellen. So seien Preise für Produkte, Personal und Maschinen, Erfahrungsgrad der Belegschaft und Stillstandszeiten vorstellbare Parameter.

Eine Zusammenfassung der von den Experten genannten Parameter ist in Tabelle 9 gegeben.

***Tabelle 9 - Parameter zur Szenariogenerierung laut den Experten***

<b>Unternehmen</b>	<b>Parameter</b>	<b>Scope</b>
Stanztechnik	Ressourcen, Preise, Erfahrungsgrad der Belegschaft, Störungsintensität	Materialflussebene
Gießerei	Preise, Störungsintensität, Ressourcenausfall	Materialflussebene
Schlauchproduzent	Keine speziellen Parameter erfassbar	Materialflussebene
Schalldämpfer	Supply Chain Schwankungen, Stillstände, Personalausfall, Effizienzlevel der Belegschaft, Preise	Materialflussebene

Baustahl	Auftragsmengen, Belegschaft, Maschinenleistung, Ausschussquote, Stahlgefüge	Materialfluss- und Prozessebene
Maschinenbau	Verfügbarkeiten, Alternativprodukte, Preise, Maschinenleistung	Materialfluss- und Prozessebene
Hartware Elektrotechnik	Preise, Erfahrungsgrad der Belegschaft, Stillstandszeiten	Materialflussebene

Bei Vergleich von Tabelle 8 mit Tabelle 9 ist festzustellen, dass sowohl in der Forschung als auch bei den Experten die beiden Scopes der Materialfluss- und der Prozessebene bei der Auswahl von Parametern relevant ist. Darüber hinaus lassen sich belegschaftsbezogene Parameter, wie der Erfahrungsgrad, Ausfallzeiten, Preise, Maschinenleistungen und Ausschussquoten als (vorstellbare) Parameter in beiden Bereichen wiederfinden. Insgesamt bestehen große Schnittmengen mit den geäußerten Parametervorstellungen der Experten und den in der Forschung beschriebenen verwendeten Parameter in der Szenariogenerierung. Diese Erkenntnis empfiehlt die Anfertigung von vorgefertigten Parameterkatalogen, die Standards oder Inspirationen im Hinblick auf auswählbare Parameter bieten und so gerade unerfahrenen Anwendern Orientierung geben können. Da die Parameter auf der Prozessebene mitunter nur für individuelle Fertigungsprozesse relevant sind, etwa Stahlgefügeeigenschaften im Umformprozess der Baustahlfertigung, sollten diese Individualitäten zur Verhinderung eines ausufernden Musterkatalogs und hoher Anwendungskomplexität nicht berücksichtigt werden. Stattdessen empfiehlt es sich Parameter auf Prozessebene, welche sich über mehrere individuelle Prozesse mehren, etwa Prozessteilzeiten oder Stromverbrauch, in den Musterkatalog aufzunehmen, um so den Forderungen der Experten und dem Stand der Forschung zu entsprechen. Weder die Experten noch die Literatur gaben konkrete Anforderungen an Restriktionen oder Spezifizierungen des Parameterraums an.

#### **5.4 Anforderung an die Gestaltung eines Workflows zur Szenariogenerierung**

In der Literatur liegen nur wenige Arbeiten vor, die sich zu Anforderungen von Workflows zur Szenariogenerierung bzw. der Durchführung von What-If-Simulationen äußern. Pires et al. (2021b) sehen als Startsignal zur Szenariogenerierung drei Auslöser. Entweder startet der Workflow manuell durch den Anwender oder automatisch nach vorher eingestellten Intervallen. Gleichzeitig soll aber die Möglichkeit bestehen, dass das System des Digitalen Zwillings bei Detektion von signifikanten Datenabweichungen automatisch den Workflow startet. Zusätzlich sollte der Workflow ein Empfehlungssystem beinhalten. Dieses Empfehlungssystem soll dem Anwender ein Setup des Systems vorschlagen, welches der

Störung am besten begegnet. Aufbauend auf den Empfehlungen trifft der Anwender Entscheidungen. Schließlich bewertet der Anwender die Empfehlungen, so dass sich das Empfehlungssystem über einen Lernalgorithmus kontinuierlich weiterentwickelt und mit steigender Anzahl von Workflowzyklen die Empfehlungen verbessert. In Grundzügen stimmen diese Anforderungen mit der Forschung von Cimino et al. (2023) überein. Diese ergänzen die Anforderungen um einen Musterkatalog von KPIs für KMUs, welche im Rahmen der Szenariogenerierung optimiert werden sollen. Der Workflow soll für den Anwender einfach wiederholbar sein, bis die KPIs vollends optimiert sind. Letztlich muss der Workflow die Herausforderungen von KMUs im Kontext der Digitalisierung der Fertigung berücksichtigen. So soll der Workflow einfach implementierbar, intuitiv bedienbar und finanziell tragbar sein.

Zusammenfassend lassen sich die Berücksichtigung mehrerer Trigger für den Start des Workflows, die Einbindung von Lernalgorithmen, Hilfestellungen über Musterkataloge und eine einfache Bedienung als Anforderungen in der Literatur identifizieren.

Je nach Erfahrung mit der Arbeit mit Workflows unterschieden sich die geäußerten Anforderungen an die Gestaltung eines Workflows zur Szenariogenerierung durch die interviewten Experten in Qualität und Quantität.

Der mittelständische Stanzbetrieb wünscht sich zu Beginn des Workflows eine grobe Anpassung der Software an das Unternehmen, etwa durch einen Fragenkatalog mit darunterliegendem Einordnungsskript. Bei dem Unternehmen besteht geringes Know-How, welche Szenarien einen ausreichenden Wert zur Simulation besitzen und wie eine Reaktion auf die Ergebnisse aussehen kann. Deshalb soll der Workflow eine Art Musterkatalog an denkbaren Szenarien bieten. Nach erfolgter Generierung wünscht sich der Experte ein Ranking durch die Software, welche Lösungsmöglichkeiten sich am ehesten anhand vorher eingestellter Kriterien (z.B. Preis) anbieten. Dazu wäre ein Antwortkatalog denkbar. Zusätzlich wünscht man sich die Möglichkeit der menschlichen Kontrolle über die generierten Szenarien.

Für die Gießerei kann es nur hilfreich sein, den KMUs einen Workflow mitzugeben. Gerade im Bereich der KMUs bestünden Engpässe im Bereich der IT-Ressourcen. Ein Workflow kann dabei das notwendige Know-How zur erfolgreichen Szenariogenerierung herabsetzen. Insgesamt müsse der Workflow auch die Eintrittsschwelle zur Nutzung der Szenariogenerierung über die Sicherstellung einer intuitiven Bedienung der Software senken. Denn bei KMUs sei es denkbar, dass nicht nur Ingenieure die Software anwenden, sondern

auch Personal ohne akademischen Hintergrund. Es bestünde die Gefahr, dass Anwender je nach Ausbildungsgrad Zusammenhänge nicht sofort erkennen. Bei Durchlauf des Workflows sollte dieser sicherstellen, dass der Anwender sich in einem Rahmen bewegt, der eine sinnvolle Szenariogenerierung garantiert. Gleichzeitig sollte es für den Benutzer möglich sein, die Validität von Szenarien zu überfliegen. Insgesamt sollte der Workflow einem modularen Aufbau folgen, um einen szenariogerechten Ablauf zu bieten und bei entsprechender Expertise Möglichkeiten zur Nutzung eines höheren Detaillierungsgrads bietet.

Die wichtigste Anforderung an einen Workflow zur Szenariogenerierung besteht für den Schlauchproduzenten in der Einfachheit für den Anwender. Der Workflow vieler Anwender sei durch die steigende Interdisziplinarität, in der man sich bewege, erheblich. Im Rahmen der Durchführung von Szenariogenerierungen müsse der Workflow gewährleisten, dass eine intuitive und schnelle Abwicklung möglich ist. Dazu müsse in der Erstellung des Workflows viel prognostizierende Nutzererfahrung einfließen. So sollten vorgefertigte Optionen zu Beginn und am Ende geboten werden, also welche Eingaben und Reaktionen sinnvoll sind. Im Optimalfall lernt der Workflow aus vorangegangenen Durchläufen, welche Parameter, Reaktionen und generelle Einstellungen zielorientierte Ergebnisse liefern.

Für den Schalldämpferproduzenten steht die Einfachheit des Workflows an oberster Stelle. So sollte man für den Durchlauf eines Workflows keine komplexe Anleitung benötigen. Dabei würden Bildelemente helfen, die dem Anwender die Bedienung erleichtern. Zu Beginn des Workflows sollte eine kurze Übersicht stehen, was man im Zuge der Durchführung an Ergebnissen erwarten kann. Bei Fehlern im Zuge des Durchlaufs sollte ein Fallback möglich sein, der im besten Fall Vorschläge mitliefert, welche Fehler der Anwender beispielsweise bei der Parametereingabe gemacht haben könnte. Auch in diesem Interview wurde der Wunsch geäußert, dass der Workflow auch für Menschen außerhalb des direkten Produktionskontexts (Kundenbetreuer) intuitiv zu durchlaufen ist. Im Optimalfall ist für den Experten im Workflow ein lernendes Bewertungssystem vorhanden, welches auf Grundlage der Bewertung von vorgeschlagenen Lösungen die Eignung und Qualität von zukünftigen Empfehlungen verbessert.

Da für den Baustahlverarbeiter mittelfristig keine Budgetierung in der Produktion für eine abgestellte Fachkraft im Bereich der Digitalen Zwillinge, bzw. der Szenariogenerierung vorgesehen ist, muss der Workflow in erster Linie intuitiv und einfach anzuwenden für Benutzer sein, welche sich nicht konsequent mit der Thematik dieser fortgeschrittenen Form der

Produktionsdigitalisierung beschäftigen. So solle es auch für den Menschen mit der „Tagesgeschäftsbrille“ möglich sein, den Workflow zu einem sinnvollen Ergebnis zu führen. Weitere Anforderungen seien für den Experten zunächst nicht zu nennen, da das Konzept der Szenariogenerierung angesichts des Digitalisierungsstandes der Produktion wie ein „Konzept aus Star Trek“ erscheint.

Ähnlich äußerte sich der Experte der Maschinenbaufabrik. Ein Workflow zur Szenariogenerierung sei für ihn ein noch sehr abstraktes Thema. Neben der Intuitivität nannte er als Anforderung einen Beispielskatalog an Use Cases. Dieser soll dem Anwender aufzeigen, welche typischen Probleme man mit der Szenariogenerierung lösen kann.

Da man im Alltagsgeschäft keine Berührungspunkte mit Workflows zu digitalen Anwendungen im Allgemeinen oder der Szenariogenerierung im Speziellen habe, sei die Ableitung von Herausforderungen an einen Workflow zur Szenariogenerierung für die elektrotechnische Fabrik nur abstrakt leistbar. Durch die fehlende Expertise innerhalb der Belegschaft sei es im Falle einer Verwendung eines entsprechenden Workflows wichtig, ein hohes Maß an Hilfestellungen zu erhalten. Zusätzlich sollte die Benutzeroberfläche ein Maximum an möglicher Intuitivität aufweisen.

Zusammenfassend lassen sich aus den Interviews wesentliche Anforderungen an einen Workflow zur Szenariogenerierung ableiten. Häufigste Anforderungen sind die Einfachheit und die Intuitivität, sowie die Möglichkeit zeiteffiziente Durchläufe neben umfangreicheren, also detaillierteren, Durchläufen zu absolvieren. Oft wurden sich Hilfestellungen in Form von Musterkatalogen gewünscht, was im Zusammenhang mit der Unerfahrenheit mit dem Konzepten Digitaler Zwilling und Szenariogenerierung steht. Diese Hilfestellungen würden den thematischen Einstieg in die Szenariogenerierung erleichtern. Um sich vor den Folgen fehlerhafter Inputs zu schützen, soll der Workflow die Möglichkeit einfacher Fallbacks bieten. So könne der Anwender das Szenario unkompliziert neu parametrisieren. Im Sinne der Vertrauensschaffung wünschten sich zwei Experten zumindest die Möglichkeit einer menschlichen Kontrolle über das generierte Szenario, bevor die Weiterleitung in die Szenarioanalyse erfolgt. Dies soll als eine Art Sichtprüfung erfolgen und ist in dem Misstrauen der Experten gegenüber Technologien Künstlicher Intelligenz begründet. So habe man selbst schon fehlerhafte Ausgaben von Chat-Bots miterlebt, die eine menschliche Kontrolle rechtfertigen würden. Prägnant ist auch die Forderung nach einem Lernmechanismus

innerhalb des Workflows, der mit steigender Anzahl der Workflowzyklen auf Basis von Anwenderfeedbacks die Qualität von vorgeschlagenen Maßnahmen verbessert.

Die abgeleiteten Anforderungen an einen Workflow zur Szenariogenerierung aus der Literatur und den Experteninterviews sind in Tabelle 10 aufgelistet.

**Tabelle 10 - Anforderungen an einen Workflow zur Szenariogenerierung**

<b>Literatur</b>	
<b>Quelle</b>	<b>Anforderungen</b>
Pires et al. (2021)	Automatische und manuelle Workflowinitiierungen, Empfehlungssystem zur Störungsbehandlung,
Cimino et al. (2023)	Musterkatalog für KPIs, einfache Iterationen, einfache Implementierbarkeit, intuitive Bedienung, finanziell tragbar
<b>Experteninterviews</b>	
<b>Unternehmen</b>	<b>Anforderungen</b>
Stanztechnik	Anpassungsoptionen an Unternehmen, Musterkatalog für Szenarien und Umsetzungsstrategien, menschliche Kontrolle im Durchlauf des Workflows
Gießerei	Intuitive Bedienung, Selbstkontrolle des Workflows gegen unsachlichen Durchlauf, menschliche Kontrolle im Durchlauf des Workflows, modularer Detailgrad
Schlauchproduzent	Intuitive Bedienung, Möglichkeit eines schnellen Durchlaufs, vorgefertigte Eingabeoptionen, Lernmechanismus des Workflows zur automatischen Qualitätssteigerung
Schalldämpfer	Intuitive Bedienung, Bildelemente, Einleitung über Möglichkeiten des Workflows, Implementierung von Fallbacks, menschliche Kontrolle im Durchlauf des Workflows, Lernmechanismus des Workflows zur automatischen Qualitätssteigerung
Baustahl	Intuitive Bedienung
Maschinenbau	Intuitive Bedienung, Beispielkatalog an Use Cases
Hardware Elektrotechnik	Intuitive Bedienung, Hilfestellung für den Benutzer im Rahmen des Durchlaufens des Workflows

## 6 Entwicklung eines Workflows zur Szenariogenerierung

Aufbauend auf den ermittelten Anforderungen an den Workflow und den weiteren Erkenntnissen aus dem Austausch mit den Industrievertretern und den aktuellen Forschungsarbeiten ist nun ein Workflow zur Szenariogenerierung zu entwickeln. Anschließend wird dieser im Austausch mit den zuvor interviewten Experten evaluiert, um einen Deckungsabgleich zwischen den gewünschten Anforderungen und dem aufgestellten Workflow zu vollziehen. Das Kapitel schließt mit der Diskussion der Ergebnisse aus der Aufstellung und der Evaluation.

### 6.1 Auswertungsgestützte Entwicklung des Workflows

Zur Einbindung der ermittelten Anforderungen aus Abschnitt 5.4 wurde sich für einen fünfphasigen Workflow entschieden, welcher den Anwender und Technologien der Künstlichen Intelligenz als eingreifende Instanzen integriert. Die Notation der erweiterten ereignisgesteuerten Prozesskette (eEPK) ist eine bewährte Form der Workflowerstellung (Gadatsch, 2015; Staud, 2001) und bildet die grafische Grundlage für die folgende Entwicklung. Über Symbole mit verschiedenen Bedeutungen entstehen innerhalb der eEPK Zusammenhänge von Entitäten. Abbildung 15 zeigt die im Workflow eingesetzten Symbole.

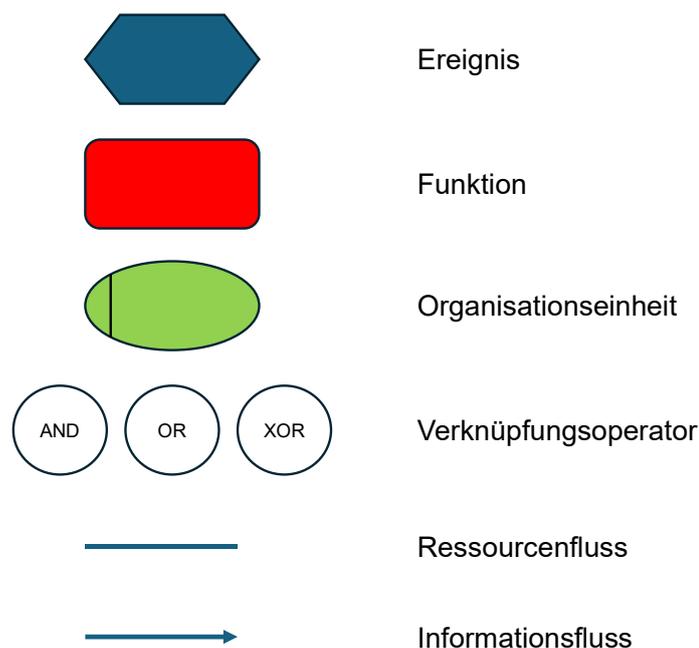


Abbildung 15 - Symbole der eEPK nach Nüttgens & Rump (2002)

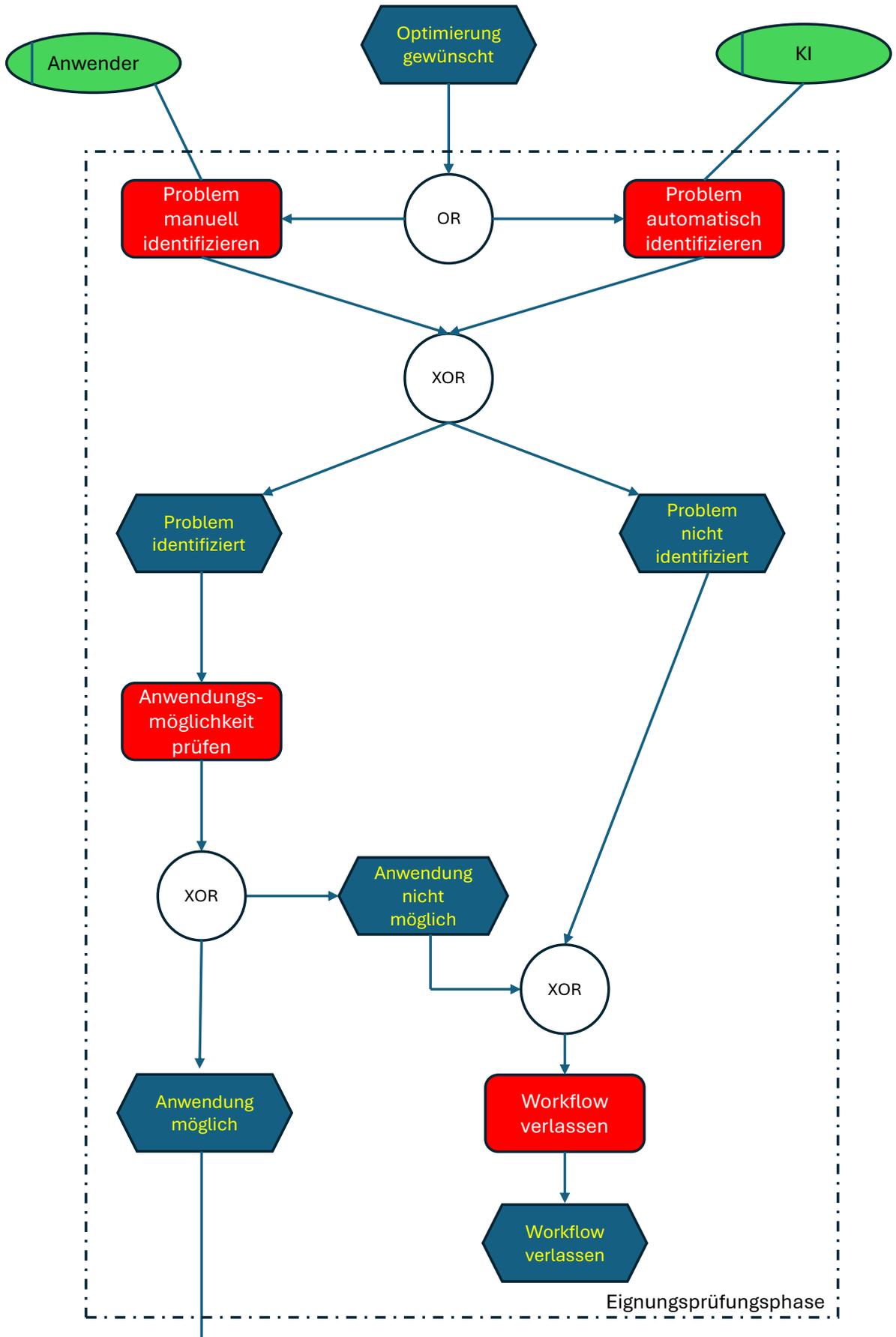
Diese Elemente indizieren nach Staud (2001) unterschiedliche Konsequenzen:

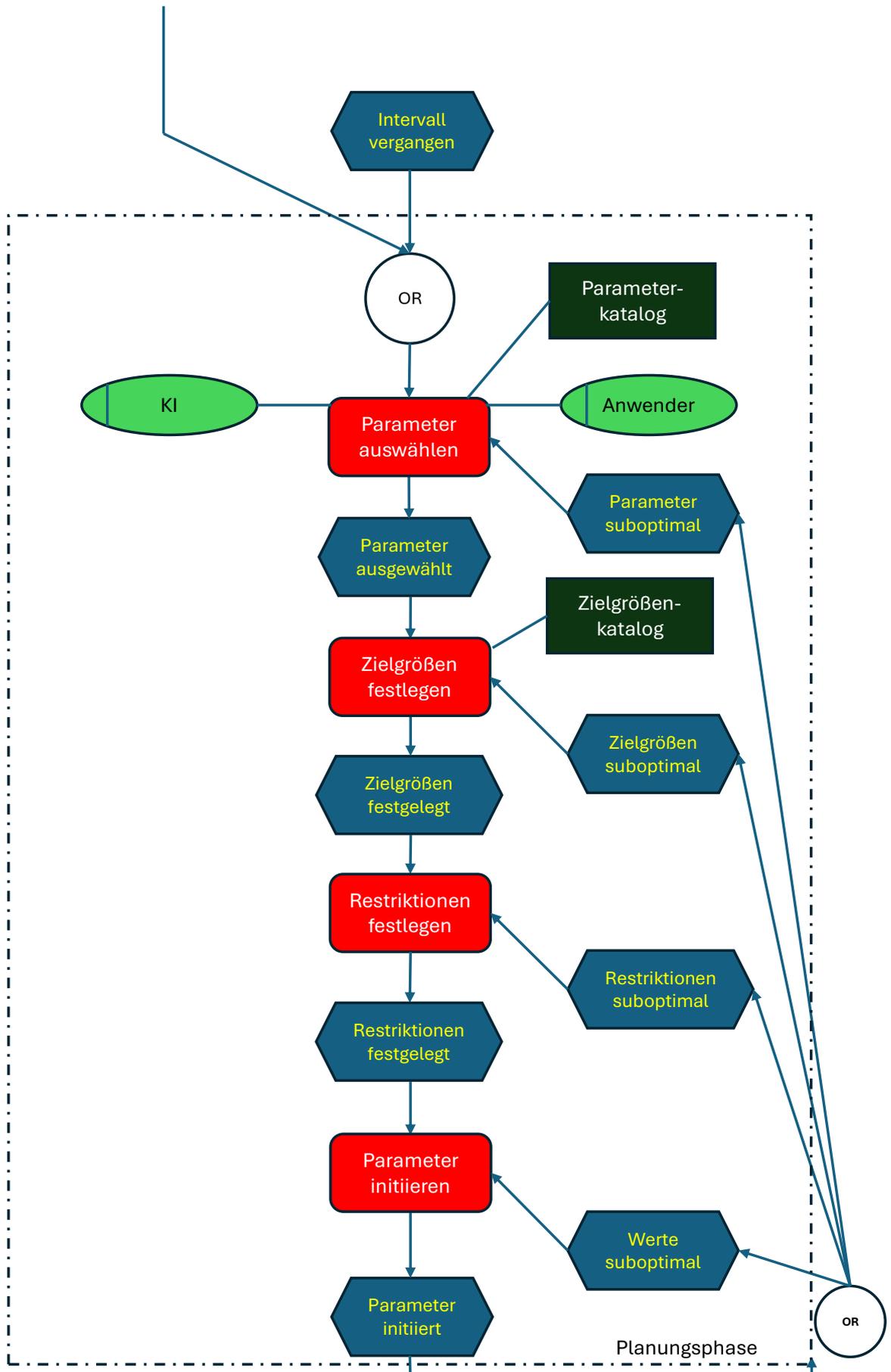
- Ein Ereignis beschreibt einen Zustand oder eine Bedingung in dem Prozess. Es löst Funktionen aus oder stellt das Ergebnis einer Funktion dar.
- Eine Funktion stellt einen auszuführenden Prozess dar. Dabei verändert eine Funktion Zustände von Prozessen.
- Eine Organisationseinheit gibt an, welche Entität im Prozess eine Funktion ausführt. Sie ist eine Möglichkeit die organisatorische Struktur einer übergeordneten Entität mit dem Prozess zu verbinden.
- Verknüpfungsoperatoren stellen logische Verknüpfungen zwischen Ereignissen und Funktionen her. Alle Verknüpfungsoperatoren stehen für unterschiedliche Verknüpfungen:
  - UND: Alle Pfade sind zu durchlaufen
  - ODER: Mindestens einer der Pfade ist zu durchlaufen
  - XOR: Genau einer der Pfade ist zu durchlaufen
- Der Ressourcenfluss stellt dar, welche materiellen oder immateriellen Ressourcen bei einer Funktion benötigt oder erzeugt werden
- Der Informationsfluss zeigt den Austausch von Informationen zwischen Funktionen, Ereignissen oder Organisationseinheiten

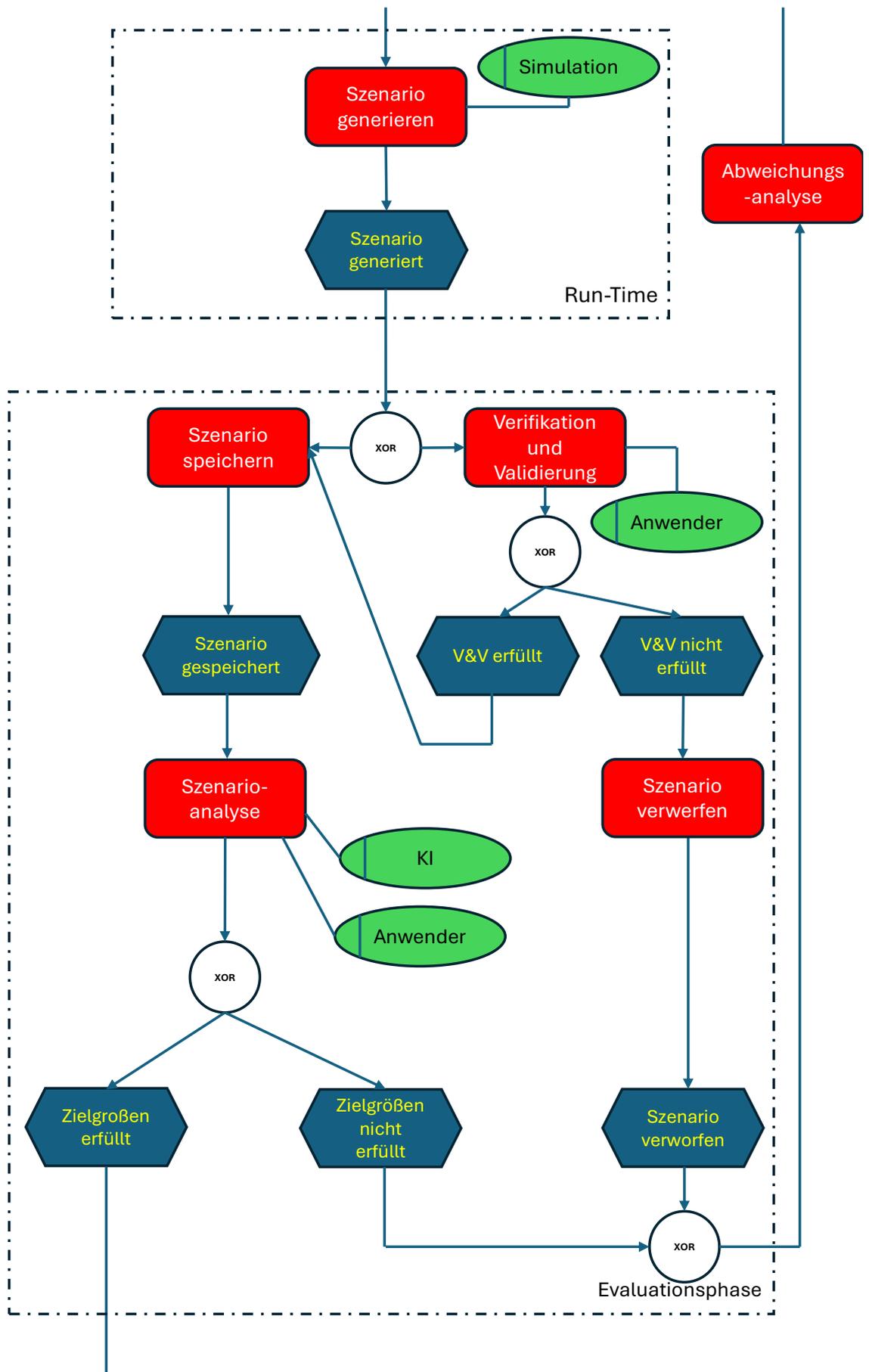
Startpunkt des Workflows ist die Intention des Prozessbeteiligten einen Prozess hinsichtlich aktueller oder prädikativer Einflüsse zu optimieren. Vorstellbare Einflüsse bilden etwa die identifizierten Herausforderungen in der Geschäftstätigkeit der KMUs aus Abschnitt 5.1, so Personal- oder Absatzschwankungen. Dazu erfolgt in der Eignungsprüfungsphase zunächst die Identifikation von Problemen und Herausforderungen, denen man im Rahmen der Szenariogenerierung mit Lösungsstrategien begegnen kann. Dies kann entweder durch eine manuelle Identifikation durch den Anwender, aber auch durch eine automatische KI-gestützte Modellanalyse, etwa Detektion von Datenanomalien, erfolgen. Grundlage hierfür kann die tatsächliche oder befürchtete Abweichung von Soll-Werten der KPIs sein. Aufbauend auf die Problemidentifikation gilt es für den Anwender und der KI zu entscheiden, ob die Probleme überhaupt mit der Szenariogenerierung abbildbar oder behandelbar sind. Bei einem Negativbefund ist es ratsam den Workflow bereits an dieser Stelle zu beenden und die Benutzung einer anderen, passenden Lösungsstrategie zu erwägen. Je nach Art und Komplexität der identifizierten Probleme und betrachteten Systeme ist die Szenariogenerierung kein geeignetes Werkzeug für Optimierungsfragen. Die in Abschnitt 5.1

identifizierten Use Cases können hier als Orientierung dienen, für welche Optimierungsfragen die Anwendung der Szenariogenerierung sinnvoll ist.

Neben der manuellen und systemgestützten Einleitung in den Workflow als Trigger, ist eine systemgestützte automatisierte Durchführung nach bestimmten Zeitintervallen als Option integriert. Dies stellt eine kontinuierliche Prozessüberwachung und -optimierung anhand aktueller veränderter Daten bei Bedarf sicher. Der Workflow ist der Abbildung 16 zu entnehmen.







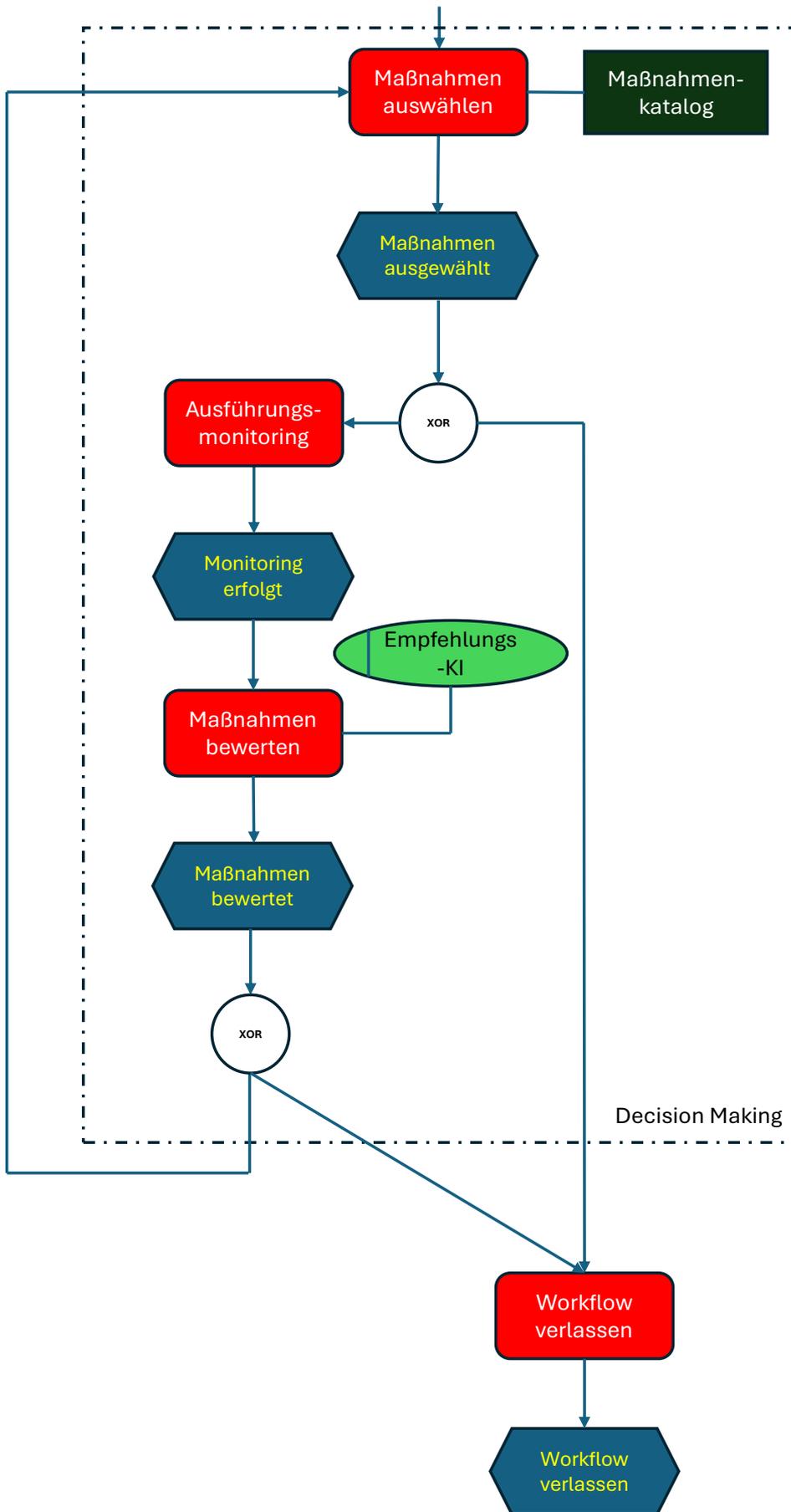


Abbildung 16 - Entwickelter Workflow zur Szenariogenerierung

Nach Einsetzen eines Triggers tritt der Workflow in die Planungsphase ein. Hier werden die Parameter ausgewählt, die für die Szenariogenerierung relevant sind. Dies kann entweder durch den Anwender selbst erfolgen, wobei ihn ein Beispielkatalog an Parametern, die die in Abschnitt 5.3 identifizierten Standardparameter wie Kosten oder Maschinenleistung beinhalten, unterstützt, oder von Komponenten der Industrien 4.0 aus Abschnitt 5.2, etwa Technologien Künstlicher Intelligenz, welche die Parameter eigenständig auswählen. In beiden Fällen erlebt der Anwender die in Abschnitt 5.4 geforderten Hilfestellungen. Anschließend erfolgt die Festlegung der Zielgrößen. Der Anwender muss dabei die lösungsrelevanten, bzw. zu optimierenden KPIs festlegen. Auch hier soll ein Musterkatalog an typischen Zielgrößen, wie die in Abschnitt 5.1 herausgestellten KPIs Kosten und Ausschussquote, bei der Orientierung unterstützen. Nach der Auswahl von Input und Output Variablen werden diese Restriktionen unterzogen. Dies ist wichtig, um die Parameterräume und somit auch die Datenräume der Szenarios zu begrenzen. Denkbare Restriktionen sind die Leistungskennzahlen einer Maschine oder die maximale Anzahl von verfügbaren Arbeitskräften auf Basis von Budgets. Dies schafft einen Werterahmen im realistischen Bereich. Als Abschluss der Planungsphase erfolgt die Initialisierung der Parameter. Hier werden die Parameter mit Werten versehen, auf Grundlage derer ein Simulator das Szenario generiert. Diese Werte müssen innerhalb der restriktiven Parameterräume liegen. Die Quantifizierung der Werte für das jeweilige Szenario hängt von der initialisierenden Instanz ab. Eine algorithmusgesteuerte Instanz, etwa im Kontext Künstlicher Intelligenzen, erzielt geringe Durchlaufzeiten und kann so den gesamten zulässigen Parameterraum eher durchspielen. Ein menschlicher Anwender hingegen initiiert die Parameterwerte des konkreten Szenarios vorrangig auf Basis seiner auf Erfahrung basierenden Intuition. Die Durchlaufzeiten fallen durch die Vermittlung der Parameterinitialisierung über ein HMI mit entsprechenden Bedienungszeiten höher aus. Hier empfiehlt es sich, eine Form der automatisierten Iteration zu verwenden, um möglichst viele Szenarien in kurzer Zeit generieren zu können, und so die Wahrscheinlichkeit für die Generierung des Optimums zu steigern.

In der dritten Phase, der Run Time, generiert die Software das Szenario auf Grundlage der getroffenen Einstellungen aus der Planungsphase. Hier ist das Tool ein geeigneter Simulator.

Das in der Run Time generierte Szenario wird anschließend in der vierten Phase, der Evaluationsphase, analysiert und bewertet. Hier entspricht der Workflow dem Wunsch der Experten nach einer menschlichen Kontrollinstanz. Das generierte Szenario kann hier entweder sofort gespeichert und mit den Zielgrößen abgeglichen, oder in einer menschlichen Überprüfung der Verifikation und Validierung (V&V), ähnlich einer Sichtprüfung, auf

Schlüssigkeit geprüft werden (s. Abschnitt 2.1.3). Bei Positivbefund, also der Bestätigung der V&V, geht das Szenario in den Speicherprozess ein, bei Negativbefund, also bei Ablehnung der V&V, startet der Workflow die Verwerfung des Szenarios. Der Anwender muss dann in der Planungsphase veränderte Einstellungen vornehmen, um ein nach seinem Empfinden zulässiges Szenario zu generieren. Im Allgemeinen widerspricht die Aussortierung von Szenarien wegen vom Anwender empfundener Unschlüssigkeit Ansätzen des Machine Learnings, da die dafür eingesetzten Algorithmen auch unzureichende Ergebnisse zur Weiterentwicklung brauchen. Jedoch fördert die Implementation zumindest der Möglichkeit von menschlicher Kontrolle über den Auswertungsprozess die Akzeptanz der Technologie im Anwenderkreis der interviewten KMUs. Bei Verwendung von smarten Algorithmen in der Szenarioanalyse oder anderen Auswertungstechnologien auf Grundlage von Technologien Künstlicher Intelligenz sollte allerdings eine Empfehlung ausgesprochen werden, auf die menschliche Ad-hoc Analyse zu verzichten. Generell ist durch die Anforderung an Einfachheit und Geschwindigkeit der Szenariogenerierung eine digitale Auswertungsstrategie zu empfehlen, um die Kosten und Fehleranfälligkeit von menschlichen Ressourcen zu vermeiden. Der Abgleich der generierten Szenariogrößen mit den Zielgrößen ermöglicht zwei Ergebnisse. Entweder die generierten Größen stimmen noch nicht in einem ausreichenden Maß mit den Zielgrößen überein. Dann ist eine Anpassung der Parametereinstellungen notwendig. Die geänderten Parametereinstellungen erlauben dann die Generierung von weiteren Szenarien. Fallbacks, eine Anforderung der Experten, sind somit im Workflow enthalten. Der Fallback folgt dabei einer Priorisierung, die die Reihenfolge der zu verändernden Inputs determiniert. Zuerst verändert der Anwender die Parameterwerte, um die generierten Szenarien dem Aufbau nach vergleichbar zu halten. Bei ausbleibendem Optimierungserfolg folgen als ebenfalls quantifizierbare Inputs die Restriktionen, ehe er qualitativ die Zielgrößen und Parameter anpasst. Oder die generierten Szenariogrößen stimmen mit den Zielgrößen in ausreichendem Maße überein. In diesem Falle schreitet der Workflow in die fünfte Phase.

Die fünfte Phase, das Decision Making, gibt dem Anwender Raum Entscheidungen auf Grundlage der Szenariogenerierung zu treffen, mit denen er das reale System so verändern kann, dass dieses die Zielgrößen erreicht. Dazu muss er eine oder mehrere Maßnahmen auswählen, die er für passend hält. Ein Musterkatalog von Maßnahmen unterstützt den Anwender in diesem Prozess. Bei der Auswahl der Maßnahme können Technologien Künstlicher Intelligenz dem Anwender ebenfalls mit Empfehlungen assistieren, etwa durch Machine Learning gestützte Empfehlungsalgorithmen aus Abschnitt 5.2. Dies gewährleistet die geforderten Hilfestellungen in der Phase des Decision Makings. Grundlage des Decision Makings ist die Antwort auf die Frage, wie die in der Szenariogenerierung identifizierten Parameterwerte, welche zur Optimierung der KPIs geführt haben, im realen

Produktionssystem umsetzbar sind. Neben grundlegenden Strategien, etwa der Anpassung der Belegschaftszahlen, sind auch nachgelagerte Strategien zu berücksichtigen. Konkrete Vorschläge, wie im Beispiel einem Personalmangel begegnet werden kann, etwa durch Mitarbeiterkampagnen oder Marketingmaßnahmen, sind durch die Software zu liefern. Nach Auswahl der Maßnahme ist es für die Weiterentwicklung des dem Workflow zugrundeliegenden Systems von Bedeutung, dass es Feedback über die getroffenen Maßnahmen erhält. Nur so kann die Software mit Bewertungsalgorithmen selbst bessere Empfehlungen für geeignete Maßnahmen ausgeben. Zwar kann der Anwender diese Pflege des Systems überspringen, um der Forderung nach einem optionalen schnellen Workflowdurchlauf nachzukommen. Zur Sicherstellung einer stetigen Qualitätsverbesserung der Maßnahmenempfehlung sollte er die getroffenen Maßnahmen jedoch einem Monitoring mit anschließender Bewertung unterziehen. Eine implementierte Empfehlungs-KI kann diese Bewertungen dann nutzen, um mit steigender Anzahl der durchlaufenden Workflowzyklen qualitativere Maßnahmen vorzuschlagen. Abschließend ist das obligatorische Verlassen des Workflows als Endpunkt abgebildet.

## **6.2 Validierung des Workflows mit Industrievertretern**

Um den Workflow auf seine Anwendungstauglichkeit hin zu validieren, wurden Folgeinterviews mit den Experten geführt, die über die Abgabe ihrer Anforderungen in Abschnitt 5.4 selbst Einfluss auf diesen genommen haben. Die Experten sind der Geschäftsführer der Gießerei und der Produktionsleiter des Baustahlproduzenten. Zur Anwendung kam hier erneut die Methodik des Experteninterviews aus Abschnitt 4.2. Ziel des Folgeinterviews ist es festzustellen, ob der Workflow die Anforderungen der Experten erfüllt, welche Verbesserungsmöglichkeiten diese sehen, und wie realistisch die Verwendung eines Softwaretools ist, welches auf dem entwickelten Workflow beruht.

Der Produktionsleiter des Baustahlproduzenten lobt zunächst die über den Workflow ermöglichte Vorstellung darüber, was im Rahmen der Szenariogenerierung durch den Anwender zu leisten ist, und welchen Mehrwert er dafür in Bezug auf Problemstellungen generieren kann. Er sieht seine Forderung nach intuitiver Bedienung oberflächlich erfüllt. Zwar ist über die standardisierte EPK-Darstellungsweise der vorder- und hintergründige Ablauf einfach nachvollziehbar und auch für ihn, als Menschen ohne nennenswerte themenbezogene Vorerfahrung verständlich, jedoch sei für die intuitive Bedienung auch die

Anwendungsoberfläche entscheidend. Die finale Anwendungssoftware müsse über die gebotene Benutzeroberfläche einen Weg finden, den erarbeiteten Workflow in seiner technischen Abfolge über das Frontend genauso nachvollziehbar und intuitiv durchlaufen zu können, wie es im EPK-Diagramm dargestellt wird. Der Experte attestiert den Hilfestellungen in der Anwendung, über die Beispielkataloge und computergestützte Abläufe, hilfreichen und sinnvollen Charakter. Er lobte zunächst die Einbindung einer menschlichen Kontrollinstanz im Rahmen der Verifikation und Validierung. Man vertraue zwar grundsätzlich automatisierten Datenverarbeitungsmechanismen, jedoch messe man den Erfahrungen der Belegschaft einen mindestens gleich großen Stellenwert zu, wenn es um die Verarbeitung von Baustahl oder der Einteilung von Maschinenleistung und Arbeitskräften geht. Von dieser Ansicht wich der Experte auch dann nicht ab, als er auf die Vorteile von automatisierten Durchläufen durch Technologien Künstlicher Intelligenz hingewiesen wurde (vgl. Abschnitt 5.4). Unter Vorbehalt einer geeigneten Benutzeroberfläche kann sich der Experte den Einsatz des Workflows in der Fertigung vorstellen. Ergänzend dazu wünscht sich der Experte eine permanente Ergänzung der Kataloge, sowohl um aktuelle Trendparameter als auch in Bezug zu den Erfahrungen anderer Anwender. Laufende Umfeldanalysen seien neben dem Tagesgeschäft nicht eigenständig zur Pflege des Workflows erfüllbar. Auf einer Serviceebene sei auch das Angebot an Beratung zu berücksichtigen. Zwar sei dies nicht direkt Teil des Workflows. Allerdings sei es für den Experten wichtig, einen über den Nutzungszeitraum zugewiesenen Berater durch den Softwareanbieter an seiner Seite zu wissen. Auch unter der Berücksichtigung einer Maximierung der Intuitivität würde der menschliche Austausch mit einem Anwendungsexperten Einstiegshürden senken und die Anwendungssicherheit der Benutzer steigern. Dieser Berater könne den Anwender auch regelmäßig über Trends aufklären und neue Impulse in die Szenariogenerierung geben.

Dem Geschäftsführer der mittelständischen Gießerei fallen nach der Vorstellung des Workflows die Einflüsse der Literatur und der anderen Experten positiv auf. Besonders sinnvoll erscheinen ihm die Mechanismen von Lernkurven des Workflows, welche die Empfehlungen über einen Empfehlungsalgorithmus laufend verbessern können. So sehe er auch die Möglichkeit einer schrittweisen Individualisierung der Software an das eigene Unternehmen. Der Workflow in der jetzigen Gestalt habe noch einen ausgeprägten theoretischen Charakter, der für gänzlich fachfremde Anwender eine Erörterung zum Einstieg nötig mache. Auch wenn der Geschäftsführer bereits mit einem mit den anderen Experten verglichenen hohen Vorwissen, oder Vorstellungskraft, in der Domäne Szenariogenerierung aufgefallen ist, sei der Workflow zur Imagination des Ablaufs für ihn eine weitere Hilfe. Der Workflow bietet eine klarere Orientierung, wofür sich die Durchführung der Szenariogenerierung lohnen würde, welchen Input der Anwender einbringen muss und welchen Output er darauf aufbauend

erwarten kann. Seine Anforderungen aus Abschnitt 5.4 (s. Tabelle 10) sieht er in ausreichendem Maße umgesetzt und sinnvoll ergänzt. Gerade die Option eines wählbaren Detaillierungsgrads über die Ausprägungen der Variablenauswahl seien gut umgesetzt, um je nach Bedarf eine schnelle und gröbere Szenariogenerierung durchzuführen, oder einen relativ langen und detaillierten Ablauf zu wählen. Der Experte kann sich eine Anwendung des Workflows unter Vorbehalt vorstellen. Viel hänge an der finalen Anwendungsoberfläche, welche den intuitiven Charakter des EPK-Diagramms in eine für den Anwender intuitive grafische Sprache übersetzen müsse. Ebenfalls sei für ihn zu klären, wie Technologien Künstlicher Intelligenz konkret die Nutzung der Szenariogenerierung über den Workflow beeinflussen. Grundsätzlich sei er sich der höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit von KI-gestützten Prozessen gegenüber menschlichen Anwendern bewusst. Jedoch sei für ihn eine komplett autonome Durchführung der Szenariogenerierung unter Berücksichtigung der Tragweite von potenziellen Entscheidungen nicht vorstellbar. Die Rolle von KI-Technologien sieht er im Workflow eher als Unterstützer. Neben diesen Aspekten fehlt der Ausblick auf ein genaues Geschäftsmodell zur Nutzung des Workflows. Kosten, Serviceumfang und Supportunterstützung seien zu klären, bevor er ein vorbehaltloses Nutzungsversprechen für die spätere Software auf Basis des Workflows geben kann. In die Zukunft schauend seien für ihn die Möglichkeiten sinnvoll, bei Benutzung des Workflows die Musterkataloge selbst pflegen zu können, Pflege der Daten vom Anbieter zu erhalten und Logs bei Veränderungen innerhalb dieser Datenbanken zu erhalten, um den Einfluss dieser auf die Szenariogenerierung evaluieren zu können.

### **6.3 Diskussion und Fazit**

Der in Abbildung 16 dargestellte Workflow wurde auf Grundlage der Anforderungen von Experten und der Literatur aus Abschnitt 5.4 entwickelt. Aus den geführten Folgeinterviews mit zwei Experten, deren Anforderungen zuvor in die Entwicklung des Workflows miteingeflossen sind, konnte festgestellt werden, dass eine Berücksichtigung derer Anforderungen im ausreichenden Maße erfolgte, und die Anforderungen von anderen Experten und der Literatur diese sinnvoll ergänzten. Beide Experten können sich unter Vorbehalt die Anwendung des Workflows im Kontext der eigenen Produktion vorstellen. Dieses Urteil spricht für eine ausreichende Qualität und Realitätsnähe des Workflows unter Berücksichtigung der spezifischen Herausforderungen von KMUs, wie diese in Tabelle 5 angeklungen sind. Neben diesen positiven Aspekten sind auch kritische Worte der Experten zu berücksichtigen. Beide Experten mahnen an, dass eine lückenlose Übertragung der intuitiven Art des Workflows in die Stufe der konkreten Softwareanwendung stattfinden muss. Diese mahnenden Worte

verdeutlichen, dass der Qualität der zwischen einem Workflow, welcher im Backend einer späteren Software zur Szenariogenerierung anzusiedeln ist, und der Benutzeroberfläche, welche dem Frontend zuzuordnen ist, liegenden Übergangsschicht für die Erhaltung der intuitiven Bedienung eine große Bedeutung zuzumessen ist. Ein Entwickler des Frontends muss die erhobenen Anforderungen ebenfalls in ausreichendem Maße berücksichtigen, um eine Übersetzung dieser in die Benutzeroberfläche zu gewährleisten.

Insgesamt sei ein reiner Workflow für die Experten nicht genug, um eine vorbehaltlose Zusage zur Nutzung von Technologien der Szenariogenerierung geben zu können. Wesentlicher Kritikpunkt ist die fehlende Vorstellung über ein begleitendes Serviceprogramm. Ohne Aussagen darüber, wie die Betreuung der Anwender gestaltet ist, welche Wartungsintervalle zu erwarten sind und wie die Pflege der zugrundeliegenden Datenbanken ausfällt, könne man nur eine Tendenz abgeben. Ebenso sei der Preis für eine derartige Anwendung eine wichtige Entscheidungsdeterminante.

Auch nach den geführten Folgeinterviews ist die Frage zu klären, ob die KMU-Landschaft in der breiten Masse zur Verwendung von Technologien der Szenariogenerierung auf Grundlage Digitaler Zwillinge von der Vertrautheit mit modernen Verarbeitungstechnologien her bereit ist, um das volle Potenzial dieser Programme über die Verwendung von Verarbeitungsmechanismen künstlicher Intelligenzen auszuschöpfen. Von der Erhebung der Anforderungen bis in die Evaluierung des Workflows äußerten Experten den expliziten Wunsch der humangestützten Verifikation und Validierung der erzeugten Szenarien, oder sonstige menschliche Eingreifmöglichkeiten in die Szenariogenerierung. Auch nach der Aufklärung darüber, dass die Iterationszeiten bei automatischer Datenverarbeitung erheblich geringer ausfallen, und so die Erreichung der KPIs in den Szenarien schneller stattfinden kann, räumten die Experten der menschlichen Kontrolle einen so großen Stellenwert ein, dass die Auslassung dieser im Workflow eine Einstiegshürde darstellt. Der Umstand, dass von den potenziellen von der KI generierten Maßnahmenempfehlungen ein wesentlicher Teil des Geschäftserfolgs abhängt, verstärkt die Skepsis gegenüber KI. Je wichtiger eine Entscheidung ist, desto mehr Skepsis bringen Menschen der KI bei der Entscheidungsfindung entgegen (Tschopp et al., 2022). Um das volle Potenzial des Workflows entfalten zu können und damit die Nutzung von Technologien Künstlicher Intelligenz zu forcieren, muss eine umfassende Aufklärung der KMUs zu dieser Technologie erfolgen, um die Vorbehalte abzulegen (Schafheitle et al., 2020).

Die Interviews sichern die Annahme, dass diese Anstrengungen zur Aufklärung über den Stand von Technologien Künstlicher Intelligenzen lohnend sind. Sechs der sieben Experten verstehen Technologien der Industrie 4.0 als Enabler von weiterführenden Technologien und ordnen die Relevanz von modernen digitalen Technologien in der Fertigung als eine zukünftige Existenzfrage des eigenen Unternehmens ein. Zwar überschneiden sich hier die Meinungen der Experten mit den Erkenntnissen aus der Forschung (vgl. Abschnitt 5.2). Jedoch liegen bei den interviewten Experten der Wissensstand und die Implementierungsrate von konkreten Anwendungen von Technologien der Industrie 4.0 oder Digitalen Zwillingen weit auseinander. Zwei Folgeinterviews bestätigten diesen Schluss. Beide Experten äußerten dort, dass die persönliche Erörterung des Workflows einen erheblichen Verständniskern erzeugt. In Verbindung mit der bestätigten Erfüllung der Anforderung nach einem intuitiven Aufbau des Workflows ist dies ein Zeichen dafür, dass die Szenariogenerierung als Werkzeug einer Fertigungseinheit einer breiteren unternehmerischen Öffentlichkeit im KMU-Umfeld bekannt gemacht werden muss. Nur wenn KMUs das System und den Ablauf der Szenariogenerierung in der breiten Masse kennen und verstehen, besteht die Möglichkeit eine breite Akzeptanz und Anwenderbasis aufzubauen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Beruhend auf Use Cases der Literatur und ausgewählter Experten stellte diese Arbeit die Entwicklung eines Workflows zur Szenariogenerierung vor (s. Abb. 16). Dazu wurden spezifische Use Cases des Digitalen Zwillings, vorwiegend im Kontext der Szenariogenerierung, über die systematische Literaturanalyse von 48 relevanten Titeln und der qualitativen Inhaltsanalyse von sieben Experteninterviews ermittelt (vgl. Abschnitt 5.1). Die von den Experten vorstellbaren Use Cases belegen den Bedarf von KMUs an einer geeigneten Softwarelösung zur Szenariogenerierung. Gleichzeitig offenbarten sich defizitäre Wissensstände der Experten in Bezug zum Stand der Technik der digitalen Fertigung. Das Konzept des Digitalen Zwillings oder der Szenariogenerierung war den Experten in Teilen unbekannt. Es ließen sich Gemeinsamkeiten, wie die Produktionsprogrammplanung und Unterschiede, wie die Vertriebsunterstützung in den identifizierten Use Cases der Literatur und der Experten feststellen. Der Workflow beinhaltet über die Einbindung von Technologien Künstlicher Intelligenz die zuvor erhobenen Einflüsse von Technologien der Industrie 4.0 bei der Verwendung von weiterführenden Technologien Digitaler Zwillinge (vgl. Abschnitt 5.2). Die Interviewanalysen attestierten den KMUs in diesem Kontext der digitalen Fertigung ein Aufholbedarf zum aktuellen Forschungsstand, und eruierten in Übereinstimmung mit der Literatur spezifische Herausforderungen für KMUs bei der Implementierung von Technologien Digitaler Zwillinge. Um die KMUs bei diesen Herausforderungen zu unterstützen, bietet der Workflow mit Musterkatalogen Hilfestellungen. Aus der Literatur und den Interviews wurden relevante Parameter, wie die Maschinenleistung und Zielgrößen für die Szenariogenerierung, wie Produktionszeiten bestimmt (vgl. Tabelle 8 & Tabelle 9). Neben diesen inhaltlichen Determinanten flossen erforschte Anforderungen aus der Literatur und von den Experten an einen Workflow zur Szenariogenerierung mit ein, so die häufig thematisierte Intuitivität (vgl. Tabelle 10). Es stellte sich unter anderem heraus, dass in Teilen der Experten eine Skepsis gegenüber Technologien Künstlicher Intelligenz besteht, welche sowohl eine Einstiegshürde zur Verwendung des Workflows bildet als auch die optimale Nutzung eines späteren Softwaretools erschweren kann. Die Entwicklung des Workflows baute sukzessive auf Grundlage dieser formellen und materiellen Anforderungen, unter Berücksichtigung der inhaltlichen Komponenten, wie die Parameter und die Zielgrößen, auf. Eine anschließende Validierung des Workflows über die Auswertung von zwei Folgeinterviews bestätigte, dass der Workflow die wesentlichen Anforderungen der Experten ausreichend erfüllt. Neben diesen positiven Validierungsergebnissen fehlten den Experten für eine verbindliche Anwendungszusage eine Vorstellung über die finale Benutzeroberfläche des Softwaretools, des dahinterliegenden Geschäftsmodells des Anbieters und des Serviceumfangs.

Da ein Bedarf nach einer geeigneten Softwarelösung zur Szenariogenerierung für die Industrie besteht und die Industrie die Notwendigkeit der Implementierung von modernen Technologien innerhalb der Fertigung in großen Teilen befürwortet, sollte weitere Forschung im Bereich der Szenariogenerierung auf Grundlage Digitaler Zwillinge durchgeführt werden. So kann untersucht werden, wie die Benutzeroberfläche einer Software zur Szenariogenerierung aussehen kann, die die Anforderungen der Experten aus dem Workflow umsetzt. Daneben kann die Erforschung von Strategien, Ausgestaltung und Implementierung von KI-Anwendungen innerhalb des Workflows einen Mehrwert bieten. Weiterhin kann betrachtet werden, wie ein Geschäftsmodell zur Vermarktung einer derartigen Software aussehen kann, welches auf die Anforderungen und Herausforderungen von KMUs Rücksicht nimmt. Im Rahmen der Entwicklung eines umfassenden Softwareprogramms, welches weitere Werkzeuge auf Grundlage des Digitalen Zwillings einer Fertigungsentität bietet, kann erforscht werden, welche Interaktionen mit der Szenariogenerierung bestehen können und welchen Mehrwert diese leisten können. Übergeordnet kann der gesellschaftlichen Fragestellung nachgegangen werden, ob und wie die Skepsis gegenüber KI-Anwendungen KMUs beeinflusst, ob ein gesundes Maß an Skepsis existiert und wie die Forschung diesem begegnen kann.

## Literaturverzeichnis

- Abramovici, M., Göbel, J. C., & Dang, H. B. (2016). Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems. *CIRP Annals*, 65(1), 185–188. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.051>
- acatech. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*.
- Alguliyev, R., Imamverdiyev, Y., & Sukhostat, L. (2018). Cyber-physical systems and their security issues. *Computers in Industry*, 100, 212–223. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.017>
- Alveš, K., & Putnik, G. (2019). Cyber-Physical Production System (CPPS) decision making duration time impact on manufacturing system performance. *FME Transactions*, 47(4), 675–682. <https://doi.org/10.5937/fmet1904675A>
- Assani, N., & Matić, P. (2025). Evaluating the ANN Model Performance for PID Controller Tuning in Flow Process Control: A Comparative Study. *IEEE Access*, 13, 88499–88508. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3571222>
- Baheti, R., & Gill, H. (2011). Cyber-physical Systems. *The Impact of Control Technology*(12), 161–166.
- Becker, W., Ulrich, P., & Stradtman, M. (Eds.). (2018). *Geschäftsmodellinnovationen als Wettbewerbsvorteil mittelständischer Unternehmen*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-13041-1>
- Becker, W., Ulrich, P., & Stradtman, M. (2018). Systematische Literaturanalyse. In W. Becker, P. Ulrich, & M. Stradtman (Eds.), *Geschäftsmodellinnovationen als Wettbewerbsvorteil mittelständischer Unternehmen* (pp. 75–97). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-13041-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-658-13041-1_4)
- Bergmann, J. (1985). *Flüchtigkeit und methodische Fixierung sozialer Wirklichkeit: Aufzeichnungen als Daten der interpretativen Soziologie*.
- Biffi, S., Luder, A., Rinker, F., Waltersdorfer, L., & Winkler, D. (2019). Quality Risks in the Data Exchange Process for Collaborative CPPS Engineering. In *2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 1217–1224). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INDIN41052.2019.8972322>
- Bogner, A., Littig, B., & Menz, W. (Eds.). (2002). *Das Experteninterview*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-322-93270-9>
- Bogner, A., & Menz, W. (2002). Das theoriegenerierende Experteninterview. In A. Bogner, B. Littig, & W. Menz (Eds.), *Das Experteninterview* (pp. 33–70). VS Verlag für Sozialwissenschaften. [https://doi.org/10.1007/978-3-322-93270-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-322-93270-9_2)
- Boschert, S., & Rosen, R. (2016). Digital Twin—The Simulation Aspect. In P. Hehenberger & D. Bradley (Eds.), *Mechatronic Futures* (pp. 59–74). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5)

- Brinkmann, C., Deeke, A., & Völkel, B. (Eds.). (1995). *Experteninterviews in der Arbeitsmarktforschung: Diskussionsbeiträge zu methodischen Fragen und praktischen Erfahrungen*.
- Bryman, A., & Burgess, R. G. (Eds.). (1999). *Qualitative research*. SAGE.
- Burkett, M., O'Marah, K., & Kemmeter, J. (2002). *Productlifecycle management: What's real now?* AMR Research Inc.
- Cainelli, G., & Rauchhaupt, L. (2021). Introducing resilience in industrial 5G systems using a digital twin approach. In *2021 17th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)* (pp. 33–36). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WFCS46889.2021.9483618>
- Cavone, G., Epicoco, N., & Dotoli, M. (2020). Process Re-engineering Based on Colored Petri Nets: the Case of an Italian Textile Company. In *2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)* (pp. 856–861). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MED48518.2020.9182937>
- Chamberlain, R., Taha, W., & Törngren, M. (Eds.). (2019). *Lecture Notes in Computer Science. Cyber Physical Systems. Model-Based Design*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23703-5>
- Chen, B., Wan, J., Shu, L., Li, P., Mukherjee, M., & Yin, B. (2018). Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges. *IEEE Access*, 6, 6505–6519. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2783682>
- Cheung, W. M., & Schaefer, D. (2010). Product Lifecycle Management. In M. Tavana & M. M. Cruz-Cunha (Eds.), *Advances in Business Information Systems and Analytics. Enterprise Information Systems for Business Integration in SMEs* (pp. 37–55). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-892-5.ch004>
- Chiabert, P., Bouras, A., Noël, F., & Ríos, J. (Eds.). (2018). *IFIP Advances in Information and Communication Technology. Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-01614-2>
- Cimino, A., Grazia Gnoni, M., Longo, F., & Solina, V. (2023). Integrating multiple industry 4.0 approaches and tools in an interoperable platform for manufacturing SMEs. *Computers & Industrial Engineering*, 186, 109732. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109732>
- Cimino, A., Longo, F., Mirabelli, G., Solina, V., & Veltri, P. (2024). Enhancing internal supply chain management in manufacturing through a simulation-based digital twin platform. *Computers & Industrial Engineering*, 198, 110670. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2024.110670>
- Compagnucci, I., Re, B., Asensio, E. S., & Snoeck, M. (2025). A Digital Process Twin Conceptual Architecture for What-If Process Analysis. In M. Kaczmarek-Heß, K. Rosenthal, M. Suchánek, M. M. Da Silva, H. A. Proper, & M. Schnellmann (Eds.), *Lecture Notes in Business Information Processing. Enterprise Design, Operations, and Computing. EDOC 2024 Workshops* (Vol. 537, pp. 373–388). Springer Nature Switzerland. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-79059-1\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-031-79059-1_23)
- Cooper, H. M. (Ed.). (2009). *The handbook of research synthesis and meta-analysis* (2. ed.). Russell Sage Foundation. <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy1602/2008046477-b.html>

- Correia, J. B., Abel, M., & Becker, K. (2023). Data management in digital twins: a systematic literature review. *Knowledge and Information Systems*, 65(8), 3165–3196.  
<https://doi.org/10.1007/s10115-023-01870-1>
- Cruz Salazar, L. A., & Vogel-Heuser, B. (2022). A CPPS-architecture and workflow for bringing agent-based technologies as a form of artificial intelligence into practice. *At - Automatisierungstechnik*, 70(6), 580–598. <https://doi.org/10.1515/auto-2022-0008>
- Dahmen, U., & Rossmann, J. (2018). Experimentable Digital Twins for a Modeling and Simulation-based Engineering Approach. In *2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE)* (pp. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2018.8544383>
- D'Angelo, G., Ferretti, S., & Ghini, V. (2016). Simulation of the Internet of Things. In *2016 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)* (pp. 1–8). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/HPCSim.2016.7568309>
- Daria Wilke, Walter Koch, Rüdiger Kaffenberger, Stefan Dreiseitel (Ed.) (2024). *Tag des Systems Engineering 2024: Tagungsband Leipzig, 13.-15. November 2024.* : Vol. 22. Gesellschaft für Systems Engineering.
- Davis, W., Yaqoob, M., Bennett, L., Mihai, S., Hung, D. V., Trestian, R., Karamanoglu, M., Barn, B., & Nguyen, H. (2023). An Innovative Blockchain-Based Traceability Framework for Industry 4.0 Cyber-Physical Factory. In *Proceedings of the 2023 5th Asia Pacific Information Technology Conference* (pp. 118–122). ACM. <https://doi.org/10.1145/3588155.3588174>
- Deenen, P. C., Adriaensen, R. A., & Fowler, J. W. (2022). Building a Digital Twin of the Photolithography Area of A Real-World Wafer FAB To Validate Improved Production Control. In *2022 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 3394–3405). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/WSC57314.2022.10015307>
- Dima, I., Khan, M. A., & Ansari, A. Q. (Eds.). (2012). *Advances in Civil and Industrial Engineering. Handbook of Research on Industrial Informatics and Manufacturing Intelligence*. IGI Global.  
<https://doi.org/10.4018/ACIE>
- Donoghue, I., Hannola, L., Papinniemi, J., & Mikkola, A. (2018). The Benefits and Impact of Digital Twins in Product Development Phase of PLM. In P. Chiabert, A. Bouras, F. Noël, & J. Ríos (Eds.), *IFIP Advances in Information and Communication Technology. Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0* (Vol. 540, pp. 432–441). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01614-2\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01614-2_40)
- Easterby-Smith, M., Thorpe, R., & Jackson, P. R. (2012). *Management research* (4. ed.). Sage Publ.
- Eigner, M. (2009). *Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management* (2., neu bearb. Aufl.). VDI-Buch. Springer.
- Eigner, M. (2021). *System Lifecycle Management: Engineering digitalization (Engineering 4.0)*. Springer Vieweg.
- Eigner, M., Koch, W., & Muggeo, C. (2017). *Modellbasierter Entwicklungsprozess cybertronischer Systeme*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55124-0>
- Eigner, M., Muggeo, C., Apostolov, H., & Schäfer, P. (2016). Kern des System Lifecycle Management. *Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(1-2), 63–68.  
<https://doi.org/10.3139/104.111473>

- Eisend, M. (2020). *Metaanalyse (2., überarbeitete Auflage). Sozialwissenschaftliche Forschungsmethoden: Band 8*. Rainer Hampp Verlag.
- Erdal, L., Gubartalla, A., Lopes, P. V., Cao, H., Shao, G., Lonnehed, P., Putto, H., Ahmed, A., Ekered, S., & Johansson, B [Björn] (2024). Integrating Dynamic Digital Twins: Enabling Real-Time Connectivity for IoT and Virtual Reality. In *2024 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 2987–2998). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC63780.2024.10838921>
- Fink, A. (2014). *Conducting research literature reviews: From the internet to paper* (Fourth edition). SAGE.
- Fink, A. (2020). *Conducting research literature reviews: From the internet to paper* (Fifth edition). SAGE.
- Flores-Garcia, E., Jeong, Y., Wiktorsson, M., Liu, S., Wang, L., & Kim, G. (2021). Digital Twin-Based Services for Smart Production Logistics. In *2021 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1–12). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715526>
- Frenz, W. (Ed.). (2020). *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58474-3>
- Friederich, J., Francis, D. P., Lazarova-Molnar, S., & Mohamed, N. (2022). A framework for data-driven digital twins of smart manufacturing systems. *Computers in Industry*, 136, 103586. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103586>
- Gabor, T., Belzner, L., Kiermeier, M., Beck, M. T., & Neitz, A. (2016). A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems. In *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)* (pp. 374–379). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAC.2016.29>
- Gadatsch, A. (2015). Dokumentation und Modellierung von Prozessen. In A. Gadatsch (Ed.), *essentials. Geschäftsprozesse analysieren und optimieren* (pp. 15–26). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-09110-1\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-658-09110-1_4)
- Gadatsch, A. (Ed.). (2015). *essentials. Geschäftsprozesse analysieren und optimieren*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-09110-1>
- Gebhardt, B. (2024). CSR-Kommunikation und Nachhaltigkeitswettbewerbe. In P. Heinrich (Ed.), *Management-Reihe Corporate Social Responsibility. CSR und Kommunikation* (pp. 199–212). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-69026-0\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-662-69026-0_12)
- Ghasemi, A., Yeganeh, Y. T., Matta, A., Kabak, K. E., & Heavey, C. (2023). Deep Learning Enabling Digital Twin Applications in Production Scheduling: Case of Flexible Job Shop Manufacturing Environment. In *2023 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 2148–2159). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407811>
- Glaessgen, E., & Stargel, D. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference & 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference & 14th AIAA*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>
- Goharoodi, S. K., Jordens, J., van Doninck, B., & Crevecoeur, G. (2023). Hybrid Modeling of an Adhesive Bonding Process, Case Study: Polyphenylene Sulfide. In *2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (pp. 1786–1791). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CODIT58514.2023.10284411>

- Golder, P. N., & Mitra, D. (Eds.). (2018). *Handbook of research on new product development*. Edward Elgar Publishing.
- Golfarelli, M., & Rizzi, S. (2009). What-if Simulation Modeling in Business Intelligence. *International Journal of Data Warehousing and Mining*, 5(4), 24–43.  
<https://doi.org/10.4018/jdwm.2009080702>
- Golovatchev, J., Kirchgebsner, G., Bezlakovskii, A., & Bezalkovskii, E. (2021). Digital Twins for the Basalt Fiber Production 4.0: Smart Digitalization in the Fiber Industry through Industrial IoT (IIoT). In *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)* (pp. 1–6). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/EMCTECH53459.2021.9619180>
- Grieves, M. (2015). Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication.
- Groombridge, D. (2023). *Top Strategic Technology Trends 2023*.
- Hasidi, O., Abdelwahed, E. H., Qazdar, A., El Alaoui-Chrifi, M. A., Benzakour, I., Chahid, R., Bendaouia, A., & Bourzeix, F. (2023). Generic and scalable multi-layered architecture for Digital Twin implementation in industrial processes: Mineral Processing case study. In *Proceedings of the 2023 7th International Conference on Advances in Artificial Intelligence* (pp. 54–61). ACM. <https://doi.org/10.1145/3633598.3633622>
- Hayat, M., & Winkler, H [H.] (2022). Exploring the Basic Features and Challenges of Traditional Product Lifecycle Management Systems. In *2022 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)* (pp. 762–766). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/IEEM55944.2022.9989978>
- Hehenberger, P., & Bradley, D. (2016). *Mechatronic Futures*. Springer International Publishing.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1>
- Hehenberger, P., & Bradley, D. (Eds.). (2016). *Mechatronic Futures*. Springer International Publishing.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1>
- Heinrich, P. (Ed.). (2024). *Management-Reihe Corporate Social Responsibility. CSR und Kommunikation*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-69026-0>
- Hofmann, E., & Rüschi, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Hofmann, J. (Ed.). (2020). *Ein Physiologiemodell für Tactical Combat Casualty Care Training in mobilen Serious Games*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30202-3>
- Hofmann, J. (2020). Verifikation und Validierung. In J. Hofmann (Ed.), *Ein Physiologiemodell für Tactical Combat Casualty Care Training in mobilen Serious Games* (pp. 235–252). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-30202-3\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-658-30202-3_14)
- Hoppe, A., & Kockrow, R. (2024). *Herausforderungen und Lösungsansätze bei der Digitalisierung von KMU* („Arbeitswissenschaft in-the-loop: Mensch-Technologie-Integration und ihre Auswirkung auf Mensch, Arbeit und Arbeitsgestaltung“, 70. GfA-Frühjahrstagung, Stuttgart 06.03.-08.03.2024). GfA-Press. <https://opus4.kobv.de/opus4-UBICO/frontdoor/index/index/docId/33010>

- Hozdic, E. (2015). Smart Factory For Industry 4.0: A Review. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*(1), 28–35. <https://ijmmt.ro/international-journal-ijmmt/vol7no12015>
- Hu, W., Zhang, T., Deng, X., Liu, Z [Zhenyu], & Tan, J. (2021). Digital twin: a state-of-the-art review of its enabling technologies, applications and challenges. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 2(1), 1–34. <https://doi.org/10.1108/JIMSE-12-2020-010>
- Huchard, M., Paquier, V., Loeillet, A., Marangozov, V., & Nicolai, J.-M. (2012). Indoor deployment of a wireless sensor network for inventory and localization of mobile assets. In *2012 IEEE International Conference on RFID-Technologies and Applications (RFID-TA)* (pp. 369–372). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RFID-TA.2012.6404548>
- James Wilsdon, Liz Allen, Eleonora Belfiore, Philip Campbell, Stephen Curry, Steven Hill, Richard Jones, Roger Kain, Simon Kerridge, Mike Thelwall, Jane Tinkler, Ian Viney, Paul Wouters, Jude Hill, & Ben Johnson. (2015). *The Metric Tide: Report of the Independent Review of the Role of Metrics in Research Assessment and Management*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4929.1363>
- Jeglinsky, V., & Winkler, H [Herwig]. (2020). *Untersuchung von Hindernissen zur Digitalisierung in der industriellen Produktion*. <https://doi.org/10.26127/BTUOpen-5158>
- Jia, W., Wang, W [Wei], & Zhang, Z. (2022). From simple digital twin to complex digital twin Part I: A novel modeling method for multi-scale and multi-scenario digital twin. *Advanced Engineering Informatics*, 53, 101706. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101706>
- Júnior, A. O., Calvo-Rolle, J.-L., & Leitão, P. (2023). Artificial Intelligence Data-Driven Petri nets Approach for Virtualizing Digital Twins. In *2023 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICIT58465.2023.10143087>
- Kaczmarek-Heß, M., Rosenthal, K., Suchánek, M., Da Silva, M. M., Proper, H. A., & Schnellmann, M. (Eds.). (2025). *Lecture Notes in Business Information Processing. Enterprise Design, Operations, and Computing. EDOC 2024 Workshops*. Springer Nature Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-79059-1>
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J [Johannes] (Eds.). (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*.
- Keil, M. V., & Bleisinger, O. (2024). KI-intensive Systeme: Herausforderungen und Perspektiven für das Systems Engineering. In Daria Wilke, Walter Koch, Rüdiger Kaffenberger, Stefan Dreiseitel (Ed.), *Tag des Systems Engineering 2024: Tagungsband Leipzig, 13.-15. November 2024* (pp. 84–92). Gesellschaft für Systems Engineering.
- Khodadadi, F., Dastjerdi, A. V., & Buyya, R. (2017). *Internet of Things: An Overview*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.06409>
- Kim, J., Jo, G., & Jeong, J. (2019). A Novel CPPS Architecture Integrated with Centralized OPC UA server for 5G-based Smart Manufacturing. *Procedia Computer Science*, 155, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.08.019>
- Klemmt, A., Horn, S., Weigert, G., & Wolter, K.-J. (2009). Simulation-based optimization vs. mathematical programming: A hybrid approach for optimizing scheduling problems. *Robotics*

- and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(6), 917–925.  
<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.012>
- Klostermeier, R., Haag, S., & Benlian, A. (2020). *Geschäftsmodelle digitaler Zwillinge*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-28353-7>
- Kopetz, H., & Steiner, W. (2022). *Real-Time Systems*. Springer International Publishing.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-031-11992-7>
- Korth, B., Schwede, C., & Zajac, M. (2018). Simulation-ready digital twin for realtime management of logistics systems. In *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 4194–4201). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622160>
- Kühl, S., Strodtholz, P., & Taffertshofer, A. (Eds.). (2009). *Handbuch Methoden der Organisationsforschung*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-91570-8>
- Kumbhar, M., Ng, A. H., & Bandaru, S. (2023). A digital twin based framework for detection, diagnosis, and improvement of throughput bottlenecks. *Journal of Manufacturing Systems*, 66, 92–106.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2022.11.016>
- Kunz, S., Fabian, B., Aleksy, M., Wauer, M., & Schuster, D. (2012). Improving Industrial Product Lifecycle Management by Semantic Data Federations. In I. Dima, M. A. Khan, & A. Q. Ansari (Eds.), *Advances in Civil and Industrial Engineering. Handbook of Research on Industrial Informatics and Manufacturing Intelligence* (pp. 415–439). IGI Global.  
<https://doi.org/10.4018/978-1-4666-0294-6.ch018>
- Landes, M., Steiner, E., & Utz, T. (Eds.). (2022). *Kreativität und Innovation in Organisationen*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-63117-1>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industrie 4.0. *WIRTSCHAFTSINFORMATIK*, 56(4), 261–264. <https://doi.org/10.1007/s11576-014-0424-4>
- Lee, E. A. (2008). Cyber Physical Systems: Design Challenges. In *2008 11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)* (pp. 363–369). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISORC.2008.25>
- Lee, J., Chua, P. C., Chen, L., Ng, P. H. N., Kim, Y., Wu, Q., Jeon, S., Jung, J., Chang, S., & Moon, S. K. (2023). Key Enabling Technologies for Smart Factory in Automotive Industry: Status and Applications. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Smart Technology*, 1(1), 93–105. <https://doi.org/10.57062/ijpem-st.2022.0017>
- Lei, Y., Song, L., Wang, W [Weiping], & Jiang, C. (2007). A Metamodel-based representation method for reusable simulation model. In *2007 Winter Simulation Conference* (pp. 851–858). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/WSC.2007.4419681>
- Li, S., Da Xu, L., & Zhao, S. (2015). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 243–259. <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>
- Liebl, F. (1995). *Simulation: Problemorientierte Einführung* (2., überarb. Aufl.). Oldenbourg.
- Liebold, R., & Trinczek, R [Rainer]. (2009). Experteninterview. In S. Kühl, P. Strodtholz, & A. Taffertshofer (Eds.), *Handbuch Methoden der Organisationsforschung* (pp. 32–56). VS Verlag für Sozialwissenschaften. [https://doi.org/10.1007/978-3-531-91570-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-531-91570-8_3)

- Lipsey, M. W., & Wilson, D. B. (2006). *Practical meta-analysis* [Nachdr.]. *Applied social research methods series: Vol. 49*. Sage Publications.
- Liu, Y., Peng, Y., Wang, B., Yao, S., & Liu, Z [Zihe] (2017). Review on cyber-physical systems. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 4(1), 27–40.  
<https://doi.org/10.1109/JAS.2017.7510349>
- Lo, C. K., Chen, C. H., & Zhong, R. Y. (2021). A review of digital twin in product design and development. *Advanced Engineering Informatics*, 48, 101297.  
<https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101297>
- Malik, A. A. (2023). Simulation Based High Fidelity Digital Twins of Manufacturing Systems: An Application Model and Industrial Use Case. In *2023 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 3262–3271). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10407270>
- Mallah, S., Aloullal, A., Kamach, O., Kouiss, K., Najid, N., & Deshayes, L. (2020). A novel integration approach for a complex supply chain optimization problem in an export bulk port. In *2020 7th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)* (pp. 751–756). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CoDIT49905.2020.9263911>
- Matt, D. T., Rauch, E., & Fraccaroli, D. (2016). Smart Factory für den Mittelstand. *Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 111(1-2), 52–55. <https://doi.org/10.3139/104.111471>
- McGinnis, L., Buckley, S., & Barenji, A. V. (2021). Designing and Implementing Operational Controllers for a Robotic Tote Consolidation Cell Simulation. In *2021 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1–12). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715521>
- Merkle, L. (2019). Cloud-Based Battery Digital Twin Middleware Using Model-Based Development. In *Proceedings of the 2019 3rd International Symposium on Computer Science and Intelligent Control* (pp. 1–7). ACM. <https://doi.org/10.1145/3386164.3387296>
- Meuser, M [M.], & Nagel, U [U.]. Experteninterview und der Wandel der Wissensproduktion. In *Experteninterviews. Theorien, Methoden, Anwendungsfelder* (3. Auflage, pp. 35–60).
- Meuser, M [Michael], & Nagel, U [Ulrike]. (2009). Das Experteninterview — konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage. In S. Pickel, G. Pickel, H.-J. Lauth, & D. Jahn (Eds.), *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft* (pp. 465–479). VS Verlag für Sozialwissenschaften. [https://doi.org/10.1007/978-3-531-91826-6\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-531-91826-6_23)
- Miedler, P., Kalkan, Y., Neumüller, G., & Leitner, M. (2024). Simulationsgestützte Optimierung globaler Produktionsnetzwerke. *Zeitschrift Für Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 119(1-2), 92–96.  
<https://doi.org/10.1515/zwf-2024-1020>
- Mockenhaupt, A., & Schlagenhauf, T. (2024). *Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in der Produktion: Grundlagen und Anwendung* (2. Aufl.). Springer Vieweg.
- Montes, J. B., Fernández, S. Z., & Casas, V. D. (2024). Internet of Things in Energy-Sensitive Processes: Application in a Refrigerated Warehouse. *IEEE Access*, 12, 76257–76276.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3406992>
- Mouton, C., Preda, M., & Thouvenin, I. (Eds.) (2022). *The 27th International Conference on 3D Web Technology*. ACM.
- Muller-Zhang, Z., & Kuhn, T. (2022). A Digital Twin-based Approach Performing Integrated Process Planning and Scheduling for Service-based Production. In *2022 IEEE 27th International*

- Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETF A)* (pp. 1–8). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/ETF A52439.2022.9921643>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing*, 11, 939–948.  
<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Niederberger, M., & Wassermann, S. (Eds.). (2015). *Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-01687-6>
- Nüttgens, M., & Rump, F. (2002). *Prozessorientierte Methoden und Werkzeuge für die Entwicklung von Informationssystemen.: Syntax und Semantik Ereignisgesteuerter Prozessketten (EPK)*. Gesellschaft für Informatik e.V., pp. 64–77.
- Paget, M. A. (1983). Experience and Knowledge. *HUMAN STUDIES*, 1983(6), 67–90.
- Panetta, K. (2016). *Gartners Top 10 Technology Trends 2017*.  
<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017>
- Panetta, K. (2017). *Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2018*.  
<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>
- Panetta, K. (2018). *Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2019*.  
<https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019>
- Pareja-Corcho, J. C., Pedrera-Busselo, A., Ciarrusta, J., Moreno, A., Ruiz-Salguero, O., & Posada, J. (2023). On Web Digital Twins: an use case for a Gerotor pump. In J. Posada, A. Moreno, A. Jaspe, I. Muñoz-Pandiella, D. Stricker, C. Mouton, A. Mohammed, & A. Elizalde (Eds.), *The 28th International ACM Conference on 3D Web Technology* (pp. 1–8). ACM.  
<https://doi.org/10.1145/3611314.3615905>
- Park, H., Easwaran, A., & Andalarn, S. (2019). Challenges in Digital Twin Development for Cyber-Physical Production Systems. In R. Chamberlain, W. Taha, & M. Törngren (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science. Cyber Physical Systems. Model-Based Design* (Vol. 11615, pp. 28–48). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-23703-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-23703-5_2)
- Perumalla, K., Loper, M., Jin, D., & Carothers, C. D. (Eds.) (2022). *Proceedings of the 2022 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation*. ACM.
- Peschke, F., & Eckardt, C. (2019). *Flexible Produktion durch Digitalisierung: Entwicklung von Use Cases. Praxisreihe Qualität*. Hanser.
- Pfadenhauer, M. (2002). Auf gleicher Augenhöhe. Das Experteninterview.: Ein Gespräch zwischen Experte und Quasi-Experte. In A. Bogner, B. Littig, & W. Menz (Eds.), *Das Experteninterview* (pp. 99–116). VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Pickel, S., Pickel, G., Lauth, H.-J., & Jahn, D. (Eds.). (2009). *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft*. VS Verlag für Sozialwissenschaften. <https://doi.org/10.1007/978-3-531-91826-6>

- Pires, F., Ahmad, B., Moreira, A. P., & Leitao, P. (2021). Digital Twin based What-if Simulation for Energy Management. In *2021 4th IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)* (pp. 309–314). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPS49255.2021.9468224>
- Pires, F., Ahmad, B., Moreira, A. P., & Leitao, P. (2021). Recommendation System using Reinforcement Learning for What-If Simulation in Digital Twin. In *2021 IEEE 19th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INDIN45523.2021.9557372>
- Posada, J., Moreno, A., Jaspe, A., Muñoz-Pandiella, I., Stricker, D., Mouton, C., Mohammed, A., & Elizalde, A. (Eds.) (2023). *The 28th International ACM Conference on 3D Web Technology*. ACM.
- Rabe, M., Spieckermann, S., & Wenzel, S. (2008). *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken* (1. Aufl.). Springer. [http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=2841628&custom\\_att\\_2=simple\\_viewer](http://digitale-objekte.hbz-nrw.de/webclient/DeliveryManager?pid=2841628&custom_att_2=simple_viewer)
- Research Nester. (2025). *Markt für digitale Zwillinge - Historische Daten (2019-2024), globale Trends 2025, Wachstumsprognosen 2037* (No. 4226). <https://www.researchnester.com/de/reports/digital-twin-market/4226>
- Resman, M., Heraković, N., & Debevec, M. (2025). Integrating Digital Twin Technology to Achieve Higher Operational Efficiency and Sustainability in Manufacturing Systems. *Systems*, *13*(3), 180. <https://doi.org/10.3390/systems13030180>
- Rosen, R., Wichert, G. von, Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing. *IFAC-PapersOnLine*, *48*(3), 567–572. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>
- Roßmann, J., & Schluse, M. (2020). Experimentierbare Digitale Zwillinge im Lebenszyklus technischer Systeme. In W. Frenz (Ed.), *Handbuch Industrie 4.0: Recht, Technik, Gesellschaft* (pp. 837–859). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-58474-3\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-662-58474-3_43)
- Roth, A. (2016). *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48505-7>
- Rudberg, M., & Martin West, B. (2008). Global operations strategy: Coordinating manufacturing networks. *Omega*, *36*(1), 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2005.10.008>
- Saini, G. S., Fallah, A., Ashok, P., & van Oort, E. (2022). Digital Twins for Real-Time Scenario Analysis during Well Construction Operations. *Energies*, *15*(18), 6584. <https://doi.org/10.3390/en15186584>
- Santos, C. H. d., Queiroz, J. A. de, Leal, F., & Montevechi, J. A. B. (2022). Use of simulation in the industry 4.0 context: Creation of a Digital Twin to optimise decision making on non-automated process. *Journal of Simulation*, *16*(3), 284–297. <https://doi.org/10.1080/17477778.2020.1811172>
- Sawangstri, W., Suppasawat, P., Thamphanchark, V., & Pandey, S. (2018). Novel Approach of an Intelligent and Flexible Manufacturing System: A Contribution to the Concept and Development of Smart Factory. In *2018 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSE.2018.8520029>

- Schafheitle, S. D., Weibel, A., Ebert, I. L., Kasper, G., Schank, C., & Leicht-Deobald, U. (2020). No stone left unturned? Towards a framework for the impact of datafication technologies on organizational control. *Academy of Management Discoveries*. Advance online publication. <https://doi.org/10.5465/amd.2019.0002>
- Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. (2017). Shaping the digital twin for design and production engineering. *CIRP Annals*, 66(1), 141–144. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>
- Schluse, M. (2024). *Experimentierbare Digitale Zwillinge*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-44445-7>
- Schluse, M., & Rossmann, J. (2016). From simulation to experimentable digital twins: Simulation-based development and operation of complex technical systems. In *2016 IEEE International Symposium on Systems Engineering (ISSE)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2016.7753162>
- Schuh, G., Kelzenberg, C., Helbig, J [Jens], & Frey, C. (2021). Operational Implementation of Digital Production Twins in Single and Small Batch Production. In *2021 The 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications(Europe)* (pp. 72–79). ACM. <https://doi.org/10.1145/3463858.3463859>
- Schütz, A. (1972). Der Gut Informierte Bürger. In A. Schütz & A. Brodersen (Eds.), *Gesammelte Aufsätze* (pp. 85–101). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-010-2849-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-94-010-2849-3_5)
- Schütz, A., & Brodersen, A. (Eds.). (1972). *Gesammelte Aufsätze*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-2849-3>
- Seok, M. G., Tan, W. J., Su, B., & Cai, W. (2022). Hyperparameter Tunning in Simulation-based Optimization for Adaptive Digital-Twin Abstraction Control of Smart Manufacturing System. In K. Perumalla, M. Loper, D. Jin, & C. D. Carothers (Eds.), *Proceedings of the 2022 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation* (pp. 61–68). ACM. <https://doi.org/10.1145/3518997.3531024>
- Seok, M. G., Tan, W. J., Su, B., Cai, W., Kwon, J., & Choi, S. H. (2025). Hyperparameter Tuning with Gaussian Processes for Optimal Abstraction Control in Simulation-based Optimization of Smart Semiconductor Manufacturing Systems. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 35(1), 1–21. <https://doi.org/10.1145/3646549>
- Sepasgozar, S. M. E. (2021). Differentiating Digital Twin from Digital Shadow: Elucidating a Paradigm Shift to Expedite a Smart, Sustainable Built Environment. *Buildings*, 11(4), 151. <https://doi.org/10.3390/buildings11040151>
- Shi, Z., Xie, Y., Xue, W., Chen, Y., Fu, L., & Xu, X. (2020). Smart factory in Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science*, 37(4), 607–617. <https://doi.org/10.1002/sres.2704>
- Simões, B., Del Puy Carretero, M., Sanchez, J., Toro, C., & Posada, J. (2022). Digital Twin and 3D Web-based Use Cases in Industry. In C. Mouton, M. Preda, & I. Thouvenin (Eds.), *The 27th International Conference on 3D Web Technology* (pp. 1–5). ACM. <https://doi.org/10.1145/3564533.3565808>

- Singh, S., Weeber, M., & Birke, K.-P. (2021). Advancing digital twin implementation: a toolbox for modelling and simulation. *Procedia CIRP*, 99, 567–572.  
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.03.078>
- Sobhrajn, P., & Nikam, S. (2014). Comparative Study of Abstraction in Cyber Physical System. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*(5), 466–469.
- Söderberg, R., Wärmefjord, K., Carlson, J. S., & Lindkvist, L. (2017). Toward a Digital Twin for real-time geometry assurance in individualized production. *CIRP Annals*, 66(1), 137–140.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.038>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 192–204.  
<https://doi.org/10.1016/j.iotcps.2023.04.006>
- Stamm, H., & Schwarb, T. M. (1995). Metaanalyse. Eine Einführung. *German Journal of Human Resource Management: Zeitschrift Für Personalforschung*, 9(1), 5–27.  
<https://doi.org/10.1177/239700229500900101>
- Stark, J. (2020). *Product Lifecycle Management (Volume 1)*. Springer International Publishing.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-28864-8>
- Stark, R., Kind, S., & Neumeyer, S. (2017). Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals*, 66(1), 169–172.  
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>
- Staud, J. (2001). *Geschäftsprozessanalyse: Ereignisgesteuerte Prozessketten und objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für Betriebswirtschaftliche Standardsoftware* (Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage). Springer eBook Collection Business and Economics. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-07468-8>
- Stöckermann, P., Immordino, A., Altenmüller, T., Seidel, G., Gebser, M., Tassel, P., Chan, C. W., & Zhang, F. (2023). Dispatching in Real Frontend Fabs With Industrial Grade Discrete-Event Simulations by Deep Reinforcement Learning with Evolution Strategies. In *2023 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 3047–3058). IEEE.  
<https://doi.org/10.1109/WSC60868.2023.10408625>
- Stojanovic, N., & Milenovic, D. (2018). Data-driven Digital Twin approach for process optimization: an industry use case. In *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)* (pp. 4202–4211). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622412>
- Stommel, M., Stojek, M., & Korte, W. (2018). *FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen* (2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Hanser eLibrary. Hanser.  
<https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446452831>  
<https://doi.org/10.3139/9783446452831?locatt=mode:legacy>
- Sudarsan, R., Fenves, S. J., Sriram, R. D., & Wang, F. (2005). A product information modeling framework for product lifecycle management. *Computer-Aided Design*, 37(13), 1399–1411.  
<https://doi.org/10.1016/j.cad.2005.02.010>
- Tao, F., Qi, Q., Wang, L., & Nee, A. (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, 5(4), 653–661.  
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>

- Tao, F., & Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing. *IEEE Access*, 5, 20418–20427.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2756069>
- Tao, F., Zhang, M., & Nee, A. (2019). Background and Concept of Digital Twin. In *Digital Twin Driven Smart Manufacturing* (pp. 3–28). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817630-6.00001-1>
- Tavana, M., & Cruz-Cunha, M. M. (Eds.). (2010). *Advances in Business Information Systems and Analytics. Enterprise Information Systems for Business Integration in SMEs*. IGI Global.  
<https://doi.org/10.4018/ABISA>
- Taylor, S. J. E., Johansson, B [Bjorn], Jeon, S., Lee, L. H., Lendermann, P., & Shao, G. (2021). Using Simulation and Digital Twins to Innovate: Are we Getting Smarter? In *2021 Winter Simulation Conference (WSC)* (pp. 1–13). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WSC52266.2021.9715535>
- Teresko, J. (2004, January 2). The PLM revolution. *Industry Week*, 2004(253), pp. 32–37.
- Terzi, S., Bouras, A., Dutta, D., Garetti, M., & Kiritsis, D. (2010). Product lifecycle management – from its history to its new role. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 4(4), Article 36489, 360. <https://doi.org/10.1504/IJPLM.2010.036489>
- Trinczek, R [R.]. (1995). Experteninterviews mit Managern. In C. Brinkmann, A. Deeke, & B. Völkel (Eds.), *Experteninterviews in der Arbeitsmarktforschung: Diskussionsbeiträge zu methodischen Fragen und praktischen Erfahrungen*.
- Tschopp, M., Ruef, M., & Monett, D. (2022). Vertrauen Sie KI? Einblicke in das Thema Künstliche Intelligenz und warum Vertrauen eine Schlüsselrolle im Umgang mit neuen Technologien spielt. In M. Landes, E. Steiner, & T. Utz (Eds.), *Kreativität und Innovation in Organisationen* (pp. 319–346). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-63117-1\\_16#citeas](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63117-1_16#citeas)
- Tsinarakis, G., Sarantinoudis, N., & Arampatzis, G. (2022). A Discrete Process Modelling and Simulation Methodology for Industrial Systems within the Concept of Digital Twins. *Applied Sciences*, 12(2), 870. <https://doi.org/10.3390/app12020870>
- U.S. National Science Foundation (2024, June 4). *Cyber-Physical Systems (CPS)* (NSF 24-581).  
<https://www.nsf.gov/funding/opportunities/cps-cyber-physical-systems/nsf24-581/solicitation>
- Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D., & Wartzack, S. (2018). CAD-Modellierung und Anwendungen. In S. Vajna, C. Weber, K. Zeman, P. Hehenberger, D. Gerhard, & S. Wartzack (Eds.), *CAX für Ingenieure* (pp. 205–297). Springer Berlin Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-54624-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-662-54624-6_5)
- Vajna, S., Weber, C., Zeman, K., Hehenberger, P., Gerhard, D., & Wartzack, S. (Eds.). (2018). *CAX für Ingenieure*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54624-6>
- VanDerHorn, E., & Mahadevan, S. (2021). Digital Twin: Generalization, characterization and implementation. *Decision Support Systems*, 145, 113524.  
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524>
- Wan, J. (2011). Advances in Cyber-Physical Systems Research. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 5(11). <https://doi.org/10.3837/tiis.2011.11.001>

- Wang, L., & Wang, X. V. (2018). *Cloud-Based Cyber-Physical Systems in Manufacturing*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-67693-7>
- Wassermann, S. (2015). Das qualitative Experteninterview. In M. Niederberger & S. Wassermann (Eds.), *Methoden der Experten- und Stakeholdereinbindung in der sozialwissenschaftlichen Forschung* (pp. 51–67). Springer Fachmedien Wiesbaden. [https://doi.org/10.1007/978-3-658-01687-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-658-01687-6_4)
- Weber, C., Königsberger, J., Kassner, L., & Mitschang, B. (2017). M2DDM – A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing. *Procedia CIRP*, 63, 173–178. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.309>
- Weilkiens, T. (2006). *Systems engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design* (1. Aufl.). dpunkt.verl.
- Wengraf, T. (2001). *Qualitative research interviewing: Biographic narrative and semi-structured methods*. SAGE. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1039495>
- Westkämper, E., Spath, D., Constantinescu, C., & Lentjes, J. (2013). *Digitale Produktion*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20259-9>
- Zhu, Q., & Xu, Z. (2020). *Cross-Layer Design for Secure and Resilient Cyber-Physical Systems* (Vol. 81). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-60251-2>
- Zhuang, C., Liu, J., & Xiong, H. (2018). Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(1-4), 1149–1163. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1617-6>

# Anhang

## Anhang A: Transkriptionen der Experteninterviews

### TRANSKRIPTION EXPERTENINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 1

**Interviewer:** Was ist für Sie das Spannende am Konzept des Digitalen Zwillings und welche Herausforderungen bestehen für Sie gegenwärtig?

**Experte:** Unsere Fertigung ist eher auf Abruf ausgelegt. Wir haben keine richtigen Dauerläufer, sondern fertigen in Klein- bis Mittelserien. In diesem Kontext bietet der Digitale Zwilling große Potenziale zur Optimierung der Fertigungsprozesse und eine Vielzahl weiterer Einsatzmöglichkeiten. Gleichzeitig müssen wir aber sagen, dass mit der zunehmenden Digitalisierung auch der Bedarf an IT-Sicherheitsmaßnahmen stark steigt. Das stellt uns vor Herausforderungen.

**Interviewer:** Große Produzenten können die Einführungskosten von Modellen Digitaler Zwillinge besser über die Gemeinkosten verteilen als KMUs. Empfinden Sie Nachteile gegenüber großen Fertigern, wenn es darum geht, Aspekte der Industrie 4.0 umzusetzen?

**Experte:** Ja, das merken wir schon. Allerdings eher auf indirekte Weise. Große Konzerne wirken auf viele potenzielle Fachkräfte attraktiver, allein durch die Aufstiegsmöglichkeiten und die Vielfalt an Berufsbildern. Für uns als kleineres Unternehmen ist es da schwer, mitzuhalten.

**Interviewer:** Das Konzept des Digitalen Zwillings kann über seinen Lebenszyklus für eine Vielzahl von Use Cases eingesetzt werden. Welche Use Cases empfinden Sie als besonders attraktiv in Bezug auf Ihre Fertigung?

**Experte:** Für uns ist das besonders relevant bei der Störungsanalyse und -vorhersage, insbesondere am Endprodukt. Kunden fordern zunehmend kürzere Lieferzeiten auch für Kleinserien. Wir müssen also schneller und flexibler planen können. Da spielt die Produktionsprogrammplanung, gerade bei hoher Artikelvielfalt, eine zentrale Rolle.

**Interviewer:** Die Szenariogenerierung im Kontext des Digitalen Zwillings bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich am Wettbewerb in der Produktion zu behaupten. Bestehen in Ihrem Unternehmen bereits Konzepte zur Szenariogenerierung?

**Experte:** Nein.

**Interviewer:** Welche Vorteile würden Sie von der Implementierung einer Anwendung zur Szenariogenerierung erwarten?

**Experte:** Die Anforderung nach Systemen der Szenariogenerierung kommt teilweise direkt von unseren Kunden. Sie wollen eine höhere Sicherheit bei der Auftragserfüllung. Wir selbst sehen ebenfalls Vorteile insbesondere darin, die Folgen von Werkzeugausfällen besser abschätzen zu können. Das hilft uns, die Produktion robuster zu machen.

**Interviewer:** Sehen Sie sich Herausforderungen gegenübergestellt, die eine befriedigende Anwendung von Szenariogenerierungen erschweren?

**Experte:** Absolut. Es fehlt in der Belegschaft oft an Veränderungsbereitschaft. Dazu kommt, dass unsere Fertigungsanlagen sehr heterogen sind. Das macht die Modellierung und Simulation komplex. Gleichzeitig ist wenig Know-how vorhanden, um zu erkennen, welche Szenarien überhaupt kritisch sind und wie daraus sinnvolle Simulationen abzuleiten sind. Hier könnte ein guter Workflow enorm helfen, um überhaupt erstmal sinnvolle Simulationsgrundlagen zu schaffen.

**Interviewer:** In der Literatur werden verschiedene Parameter beschrieben, die für den Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung relevant sind. Welche sind das bei Ihnen?

**Experte:** Wir sehen vor allem die Störungsintensität als zentralen Faktor. Aber auch die Parameterräume müssen realistisch auf unsere Fertigung zugeschnitten sein. Dabei denken wir an Ressourcen, Preise, und natürlich die Verfügbarkeit unserer Belegschaft.

**Interviewer:** Technologien der Industrie 4.0 können die Geschwindigkeit und Qualität von Szenariogenerierungen erheblich steigern. Welche Bedeutung haben Technologien der Industrie 4.0 für Ihre Fertigung, und welche Synergien sind für Sie in Bezug auf das Konzept des Digitalen Zwillings denkbar?

**Experte:** Besonders spannend finden wir den Einsatz von Machine Learning zur Ausschusserkennung, und zwar ohne produktspezifische Aktuatoren, sondern über Sensorik und bildbasierte Verfahren. Das wäre eine große Hilfe in der Qualitätssicherung und vielleicht eine Schnittstelle zu einem Digitalen Zwilling.

**Interviewer:** Ein gegebener Workflow kann bei der Umsetzung von Szenariogenerierungen helfen, auch ohne Expertenwissen ein qualitatives Ergebnis zu erzielen. Welche Anforderungen sollte ein Workflow zur Szenariogenerierung erfüllen? Welchen Mehrwert kann ein solcher Workflow für Sie liefern?

**Experte:** Die Intensität der Störungen sollte softwareseitig skalierbar sein, also von leicht bis schwer durchspielbar. Es wäre hilfreich, einen Musterkatalog an typischen Szenarien zu haben, inklusive Reaktionsvorgaben. Diese könnten etwa als Antwortkatalog oder in Form eines Rankings aufbereitet werden. Und ganz wichtig: Am Anfang des Workflows sollte eine Art Fragenkatalog stehen, der sicherstellt, dass die Software auf die Bedürfnisse von KMUs abgestimmt ist. Das könnte eine bessere Abstimmung der Handlungsempfehlungen ermöglichen.

## TRANSKRIPTION EXPERTENINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 2

**Interviewer:** Was ist für Sie das Spannende am Konzept des Digitalen Zwillings und welche Herausforderungen bestehen für Sie gegenwärtig?

**Experte:** Besonders spannend finde ich die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten des Digitalen Zwillings und, dass einen gewissen Pionieraspekt bietet. Die Breite an Anwendungen bietet enormes Potenzial. Herausforderungen sehen wir aktuell vor allem in der Umsetzung und konkreten Integration in bestehende Prozesse.

**Interviewer:** Große Produzenten können die Einführungskosten von Modellen Digitaler Zwillinge besser über die Gemeinkosten verteilen als KMUs. Empfinden Sie Nachteile gegenüber großen Fertignern, wenn es darum geht, Aspekte der Industrie 4.0 umzusetzen?

**Experte:** Das empfinden wir nicht direkt als Nachteil. Uns ist bewusst, dass größere Firmen in diesem Themenfeld oft schon weiter sind. Allerdings erleben wir sie gleichzeitig als eher träge bei Veränderungen. Wir arbeiten aktiv mit Absolventen zusammen, die in Kooperation mit uns Abschlussarbeiten erarbeiten, um Know-how aufzubauen und die Einführungskosten zu senken. Zudem bemühen wir uns gezielt um Förderungen. Der Mangel liegt weniger in der Programmierung. Da haben wir eigentlich keine Engpässe.

**Interviewer:** Das Konzept des Digitalen Zwillings kann über seinen Lebenszyklus für eine Vielzahl von Use Cases eingesetzt werden. Welche Use Cases empfinden Sie als besonders attraktiv in Bezug auf Ihre Fertigung?

**Experte:** Die Digitalisierung unserer Anlagen ist ein zentrales Ziel, insbesondere in der 3D-Konstruktion. Unsere Kunden erwarten kürzere Einfahrtszeiten und schnellere Lieferungen. Vor allem soll die Vor-Ort-Montage reduziert werden, da es an qualifizierten Montagemitarbeitern mangelt. Ein konkreter Anwendungsfall war die Abbildung einer Fräsmaschine als Digitaler Zwilling. Das sollte Vorteile für Produktqualität und Fertigungsablauf bringen. Besonders relevant ist das Thema für uns bei der vollständigen Digitalisierung unserer Roboterzellen.

**Interviewer:** Die Szenariogenerierung im Kontext des Digitalen Zwillings bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich am Wettbewerb in der Produktion zu behaupten. Bestehen in Ihrem Unternehmen bereits Konzepte zur Szenariogenerierung?

**Experte:** Ja, wir hatten bereits Ansätze in dem Bereich. Vor ein paar Jahren haben wir eine Roboterzelle mit digitalen Sensoren und einem halbintelligenten Steuerungsmodul eines externen Lieferanten ausgestattet. Damit konnten wir zum Beispiel Druckschwankungen in der Maschinenkinematik simulieren. Allerdings haben wir uns anschließend eher auf Eigenlösungen konzentriert. Wir wollten uns bewusst nicht abhängig von externen Firmen machen.

**Interviewer:** Welche Vorteile würden Sie von der Implementierung einer Anwendung zur Szenariogenerierung erwarten?

**Experte:** Wir denken da sehr prozessorientiert. Wenn man es schafft, Szenarien in realistischen Prozessmaßstäben zu modellieren etwa bei Fehlbedienung oder Störungen von außen, können wir einen praktischen Nutzen erkennen. Es ließen sich so wichtige Rückschlüsse für die Produktionssicherheit und -stabilität ziehen.

**Interviewer:** Sehen Sie sich Herausforderungen gegenübergestellt, die eine befriedigende Anwendung von Szenariogenerierungen erschweren?

**Experte:** Die Qualität der Datenerfassung ist für uns ein großes Thema. Es ist uns schlichtweg unklar, wie genau und wie umfangreich die Daten sein müssen, damit die Szenarien belastbar sind. Das erschwert aktuell die konkrete Umsetzung solcher Anwendungen.

**Interviewer:** In der Literatur werden verschiedene Parameter beschrieben, die für den Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung relevant sind. Welche sind das bei Ihnen?

**Experte:** Mir fallen vorerst keine spezifischen Parameter ein. Wichtig ist aus unserer Sicht, dass Parameterräume gesetzt werden, aber eben nicht zu weit. Es braucht eine sinnvolle Begrenzung, um überhaupt zu belastbaren Szenarien zu kommen. Idealerweise erkennt die Software Zusammenhänge zwischen Parametern automatisch.

**Interviewer:** Technologien der Industrie 4.0 können die Geschwindigkeit und Qualität von Szenariogenerierungen erheblich steigern. Welche Bedeutung haben Technologien der Industrie 4.0 für Ihre Fertigung, und welche Synergien sind für Sie in Bezug auf das Konzept des Digitalen Zwillings denkbar?

**Experte:** Wir arbeiten aktuell mit einzelnen Modulen, die unsere Fertigung abbilden. Diese funktionieren an sich gut, aber es fehlt die Durchgängigkeit. Die Herausforderung liegt in der Vernetzung. Das Potenzial von Industrie 4.0 ist da: Gerade auch im Zusammenspiel mit dem Digitalen Zwilling. Aber wir sind noch dabei, das Ganze technisch und organisatorisch zusammenzubringen.

**Interviewer:** Ein gegebener Workflow kann bei der Umsetzung von Szenariogenerierungen helfen, auch ohne Expertenwissen ein qualitatives Ergebnis zu erzielen. Welche Anforderungen sollte ein Workflow zur Szenariogenerierung erfüllen? Welchen Mehrwert kann ein solcher Workflow für Sie liefern?

**Experte:** Ein guter Workflow kann definitiv helfen, vor allem KMUs wie uns, die nicht über ausgeprägte IT-Abteilungen verfügen. Bei uns kam die fertigungsbezogene IT-Kompetenz ursprünglich zufällig durch einen Studenten ins Haus. Der Workflow sollte niedrighschwellig sein, also auch für Leute ohne tiefes technisches Know-how verständlich. Gleichzeitig sollte er modular aufgebaut sein, sodass erfahrenere Anwender auch in die Tiefe gehen können. Das würde Fehlanwendungen reduzieren.

### TRANSKRIPTION EXPERTENINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 3

**Interviewer:** Was ist für Sie das Spannende am Konzept des Digitalen Zwillings und welche Herausforderungen bestehen für Sie gegenwärtig?

**Experte:** Der Digitale Zwilling kann uns in der Praxis enorm helfen, wenn man im Ausland direkt beim Kunden steht. In solchen Situationen gibt es kein Backup. Dann müssen alle notwendigen Informationen sofort verfügbar sein. Der Digitale Zwilling kann hier als zentrale Informationsquelle dienen, um die Fertigung nachvollziehbar zu machen und Abläufe vor Ort besser zu steuern.

**Interviewer:** Große Produzenten können die Einführungskosten von Modellen Digitaler Zwillinge besser über die Gemeinkosten verteilen als KMUs. Empfinden Sie Nachteile gegenüber großen Fertignern, wenn es darum geht, Aspekte der Industrie 4.0 umzusetzen?

**Experte:** Nein, das sehen wir so nicht.

**Interviewer:** Das Konzept des Digitalen Zwillings kann über seinen Lebenszyklus für eine Vielzahl von Use Cases eingesetzt werden. Welche Use Cases empfinden Sie als besonders attraktiv in Bezug auf Ihre Fertigung?

**Experte:** Sehr interessant ist für uns die Abbildung von Ausfällen innerhalb der Produktionskette. Das würde uns helfen, schneller auf Probleme zu reagieren, etwa bei Ausfällen von Zulieferern. Auch der Zukauf von Produkten könnte dann flexibler in Eigenfertigung überführt werden. Außerdem könnten wir unsere heimische Fertigung durch eine offenere Datenbasis besser mit Auslandsaufträgen abstimmen. Auf diese Datenbasis sollten alle Firmenbereiche zugreifen können. So weiß auch der Vertrieb, was in der Fertigung tatsächlich möglich ist.

**Interviewer:** Die Szenariogenerierung im Kontext des Digitalen Zwillings bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich am Wettbewerb in der Produktion zu behaupten. Bestehen in Ihrem Unternehmen bereits Konzepte zur Szenariogenerierung?

**Experte:** Nur erste Ansätze. Bisher fehlt es uns aber an einer übergeordneten Datenvernetzung, um das systematisch und durchgängig umzusetzen.

**Interviewer:** Welche Vorteile würden Sie von der Implementierung einer Anwendung zur Szenariogenerierung erwarten?

**Experte:** Ganz klar: Eine bessere Vorbereitung der Fertigung auf mögliche Störungen etwa, wenn bestimmte Lieferanten ausfallen oder alternative Werkstoffe verwendet werden müssen. So könnten wir viel gezielter auf unerwartete Ereignisse reagieren.

**Interviewer:** Sehen Sie sich Herausforderungen gegenübergestellt, die eine befriedigende Anwendung von Szenariogenerierungen erschweren?

**Experte:** Definitiv. Die Datenerfassung ist eine Großbaustelle bei uns. Gerade bei älteren Maschinen – unseren Dauerläufern – gestaltet sich die Digitalisierung schwierig. Auch die Schnittstellen zwischen den Phasen des Product-Lifecycle-Managements und zwischen unseren Unterfirmen sowie den Zulieferern sind oft nicht durchgängig genug.

**Interviewer:** In der Literatur werden verschiedene Parameter beschrieben, die für den Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung relevant sind. Welche sind das bei Ihnen?

**Experte:** Wichtig ist für uns vor allem, dass unsinnige Parameter bereits zu Beginn eines Workflows aussortiert werden. Der Fokus sollte auf den relevanten Stellgrößen liegen. Sonst verliert man schnell die Übersicht oder generiert unbrauchbare Szenarien.

**Interviewer:** Technologien der Industrie 4.0 können die Geschwindigkeit und Qualität von Szenariogenerierungen erheblich steigern. Welche Bedeutung haben Technologien der Industrie 4.0 für Ihre Fertigung, und welche Synergien sind für Sie in Bezug auf das Konzept des Digitalen Zwillings denkbar?

**Experte:** Sie haben eine große Bedeutung. Der Kostendruck, insbesondere durch die Personalkosten hierzulande, zwingt uns zu einem hohen Automatisierungsgrad. Dafür brauchen wir Sensorik und digitale Überwachung. Allerdings ist das bei uns auch produktspezifisch schwierig. Unsere Produktlogistik etwa mit Schläuchen lässt sich nicht ohne Weiteres vollständig automatisieren.

**Interviewer:** Ein gegebener Workflow kann bei der Umsetzung von Szenariogenerierungen helfen, auch ohne Expertenwissen ein qualitatives Ergebnis zu erzielen. Welche Anforderungen sollte ein Workflow zur Szenariogenerierung erfüllen? Welchen Mehrwert kann ein solcher Workflow für Sie liefern?

**Experte:** Das gesamte System muss einfach bedienbar sein. Die Anwender stehen meist unter hohem Zeitdruck. Da bleibt keine Zeit für eine lange Einarbeitung. Im Hintergrund muss daher bereits viel durchdacht sein, damit die Nutzerführung intuitiv bleibt. Vorgefertigte Optionen sollten sowohl am Anfang als auch am Ende zur Verfügung stehen. Und ganz wichtig: Die Software sollte aus bisherigen Durchläufen gelernt haben, was in welchen Szenarien sinnvoll ist. Nur so entsteht über die Anwendungsdauer wirklicher Mehrwert.

## TRANSKRIPTION EXPERTENINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 4

**Interviewer:** Was ist für Sie das Spannende am Konzept des Digitalen Zwillings – und welche Herausforderungen bestehen für Sie gegenwärtig?

**Experte:** Man könnte viele Prozesse transparenter gestalten und deutlich schneller auf Störungen reagieren. Aber wir stoßen an ganz praktische Grenzen: Wir haben zum Beispiel kein PDM-System, die Datenpflege ist eher lückenhaft und die Datenbasis generell zu schmal. Auch unsere Standorte sind digital kaum miteinander vernetzt. Und ohne ein digitales Lager- oder Logistiksystem bleiben viele Potenziale ungenutzt.

**Interviewer:** Große Produzenten können die Einführungskosten von Digitalen Zwillingen besser über die Gemeinkosten verteilen als kleine und mittlere Unternehmen. Empfinden Sie hier einen Nachteil gegenüber großen Fertigern, wenn es darum geht Aspekte der Industrie 4.0 umzusetzen?

**Experte:** Definitiv. Großbetriebe haben oft eine andere Innovationskultur. In unserer Belegschaft gibt es wenig Veränderungsbereitschaft. Vieles wird nach dem Motto "Das haben wir schon immer so gemacht" betrachtet. Dazu kommt der Fachkräftemangel, besonders im technischen Bereich. Uns fehlen junge, digital affine Leute in der Produktion.

**Interviewer:** Das Konzept des Digitalen Zwillings kann über seinen Lebenszyklus für eine Vielzahl von Use Cases eingesetzt werden. Welche Use Cases empfinden Sie als besonders attraktiv in Bezug auf ihre Fertigung?

**Experte:** Am spannendsten finde ich die Möglichkeit, unsere Produktionsstandorte in Echtzeit zu vernetzen und besser auf Störungen oder Lieferengpässe reagieren zu können. Auch für die Taktplanung und Priorisierung von Aufträgen sehe ich großes Potenzial. Der größte Vorteil wäre für mich persönlich, nicht ständig wie ein "Micromanager" agieren zu müssen, also nicht andauernd den aktuellen Stand in der Produktion abfragen zu müssen. Mit einem digitalen Zwilling könnten diese Informationen transparent und zentral abrufbar sein.

**Interviewer:** Die Szenariogenerierung im Kontext des Digitalen Zwillings bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich am Wettbewerb in der Produktion zu behaupten. Bestehen in Ihrem Unternehmen bereits Konzepte zur Szenariogenerierung?

**Experte:** Nein, bisher leider nicht.

**Interviewer:** Welche Vorteile würden Sie von der Implementierung einer Anwendung zur Szenariogenerierung erwarten?

**Experte:** Ich denke, damit könnten wir sehr gezielt auf unvorhergesehene Situationen reagieren, zum Beispiel auf Lieferverzögerungen oder Maschinenausfälle. Auch eine bessere Abstimmung zwischen den Abteilungen wäre denkbar. Aber das setzt natürlich voraus, dass wir überhaupt erstmal die nötige Datenbasis schaffen.

**Interviewer:** Sehen Sie sich Herausforderungen gegenübergestellt, die eine befriedigende Anwendung von Szenariogenerierungen erschweren?

**Experte:** Ja, auf mehreren Ebenen. Uns fehlt, wie gesagt, ein PDM-System, und die Datenerfassung in der Produktion ist allgemein unzureichend. Szenarien können nur so gut sein wie die Daten, auf denen sie beruhen. Außerdem müsste eigentlich eine Person komplett dafür abgestellt werden, das Ganze aufzusetzen und zu pflegen. Und dann ist da noch die bereits erwähnte Skepsis in der Belegschaft.

**Interviewer:** In der Literatur werden verschiedene Parameter genannt, die für die Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung relevant sind. Welche sind das bei Ihnen?

**Experte:** Schwankungen in der Lieferkette, etwa durch saisonale Effekte oder Handelssanktionen. Dies müsste sowohl auf einem Verfügbarkeits-, als auch auf einem Preislevel einstellbar sein. Dann Stillstände, etwa durch IT-Probleme oder Anlagenstörungen.

Auch die Krankheitsstände besonders in unserer älteren Belegschaft spielen eine Rolle. Und nicht zuletzt der Kompetenzgrad des Personals, wenn es darum geht, Ersatzeffekte realistisch bewerten zu können.

**Interviewer:** Technologien der Industrie 4.0 können die Geschwindigkeit und Qualität von Szenariogenerierungen erheblich steigern. Welche Bedeutung haben Technologien der Industrie 4.0 für Ihre Fertigung, und welche Synergien sind für Sie in Bezug auf das Konzept des Digitalen Zwillings denkbar?

**Experte:** Bisher nutzen wir nur ganz einfache Aspekte wie Maschinensensorik. Automatisierung oder KI sind bei uns noch kein Thema, die Prozesse laufen weitgehend analog.

**Interviewer:** Ein gegebener Workflow kann bei der Umsetzung von Szenariogenerierungen helfen, auch ohne Expertenwissen ein qualitatives Ergebnis zu erzielen. Welche Anforderungen sollte ein Workflow zur Szenariogenerierung erfüllen? Welchen Mehrwert kann ein solcher Workflow für Sie liefern?

**Experte:** Für uns wäre es wichtig, dass man keine umfangreiche Anleitung braucht. Eine visuelle Oberfläche mit Bildelementen würde sehr helfen. Am Anfang sollte es eine Art Überblick geben, also was einen erwartet und welche Schritte nötig sind. Wenn etwas schief läuft, sollte das System automatisch Hinweise geben, was bei der Parametereingabe möglicherweise falsch war, damit man nicht selbst stundenlang suchen muss. In diesem Zusammenhang ist auch die Möglichkeit von Fallbacks sehr interessant.

## TRANSKRIPTION EXPERTENINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 5

**Interviewer:** Was ist für Sie das Spannende am Konzept des Digitalen Zwillings und welche Herausforderungen bestehen für Sie gegenwärtig?

**Experte:** Das Konzept ist mir nicht umfangreich bekannt. *Anmerkung: Es folgte eine kurze Einführung in das Konzept Digitaler Zwillinge durch den Interviewer*

**Interviewer:** Große Produzenten können die Einführungskosten von Modellen Digitaler Zwillinge besser über die Gemeinkosten verteilen als KMUs. Empfinden Sie Nachteile gegenüber großen Fertigern, wenn es darum geht Aspekte der Industrie 4.0 umzusetzen?

**Experte:** Absolut. Große Unternehmen können die Investitionen deutlich besser abfedern. Bei uns geht das nur sehr begrenzt. Für kleinere Unternehmen wie uns ist angesichts eines Deckungsbeitrages der verkauften Produkte von 3-5% jeder Euro kritisch. Vor allem, wenn ein Programmierer nicht unmittelbar einen Gegenwert in der Produktion liefert. Das bringt uns in eine schwierige Lage, weil wir zwar erkennen, dass wir digitaler werden müssen, aber gleichzeitig kaum Spielraum haben.

**Interviewer:** Das Konzept des Digitalen Zwillings kann über seinen Lebenszyklus für eine Vielzahl von Use Cases eingesetzt werden. Welche Use Cases empfinden Sie als besonders attraktiv in Bezug auf ihre Fertigung?

**Experte:** In den direkten Umformungsprozessen sehen wir momentan keinen konkreten Use Case, da diese manuell so gut erforscht sind, dass ein Digitaler Zwilling wenig Mehrwert liefern würde. Aber für die Qualitätssicherung wäre es ein riesiger Fortschritt, wenn auch aktuell noch eher „Science-Fiction“. Stellen Sie sich vor, wir könnten beim Wareneingang mithilfe eines Screeningverfahrens und metallurgischer Daten aus den Stahllieferungen ein digitales Abbild des Stahlgefüges erzeugen. Damit könnten wir dann Auswirkungen auf weitere Verarbeitungsschritte simulieren. Das wäre für uns eine enorme Erleichterung. Aktuell sind wir gezwungen, zerstörende Prüfverfahren anzuwenden, die viel Material kosten. Die Chargenschwankungen sind enorm. Je nachdem, an welcher Stelle in der Rangfolge der Stahlschmelze die Charge gewalzt wurde, variiert die Qualität extrem.

**Interviewer:** Die Szenariogenerierung im Kontext des Digitalen Zwillings bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich am Wettbewerb in der Produktion zu behaupten. Bestehen in Ihrem Unternehmen bereits Konzepte zur Szenariogenerierung?

**Experte:** Nein, bisher haben wir uns mit Szenariogenerierung noch nicht befasst.

**Interviewer:** Welche Vorteile würden Sie von der Implementierung einer Anwendung zur Szenariogenerierung erwarten?

**Experte:** Ich glaube, die größte Stärke wäre, dass wir auf Chargenqualitätsprobleme schnell reagieren könnten. Es kam in der Vergangenheit bereits vor, dass wir 25 Baustellen mit Stahl beliefert haben, der extreme Schwankungen in der Zugfestigkeit um teils 300 % aufwies. So etwas bringt uns in ernsthafte Schwierigkeiten. Dazu kommt, dass wir extrem kurzfristig arbeiten. Über 95 % unserer Aufträge werden innerhalb von 48 Stunden zwischen Auftragseingang und Produktionsende abgewickelt. Das ist unser Alleinstellungsmerkmal. Wenn wir diese Schnelligkeit nicht liefern könnten, wären wir längst unter dem Druck chinesischer Wettbewerber zusammengebrochen. Wir brauchen also ein System, das uns bei

der flexiblen Auftragsplanung unterstützt, auch im Hinblick auf die Zusammenarbeit mit unserer polnischen Tochterfirma und diversen Zulieferern.

**Interviewer:** Sehen Sie sich Herausforderungen gegenübergestellt, die eine befriedigende Anwendung von Szenariogenerierungen erschweren?

**Experte:** Ja, ganz klar. Wir haben keine dedizierte Fachkraft für so etwas. Die Fertigung ist insgesamt nur sehr wenig digitalisiert. Das ist die größte Hürde überhaupt: Ohne Daten, keine Szenarien.

**Interviewer:** In der Literatur werden verschiedene Parameter beschrieben, die für den Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung relevant sind. Welche sind das bei Ihnen?

**Experte:** Für uns sind das vor allem: die kurzfristig bestellten Mengen, die Auslastung der Mitarbeiter, die Maschinenleistung, der Ausschuss und die Qualität des eingesetzten Stahls.

**Interviewer:** Technologien der Industrie 4.0 können die Geschwindigkeit und Qualität von Szenariogenerierungen erheblich steigern. Welche Bedeutung haben Technologien der Industrie 4.0 für Ihre Fertigung, und welche Synergien sind für Sie in Bezug auf das Konzept des Digitalen Zwillings denkbar?

**Experte:** Momentan nutzen wir vorwiegend in der Prototypenfertigung einzelne Elemente, etwa 3D-Scans und additive Fertigung. Industrie 4.0 ist für uns grundsätzlich interessant, aber in der breiten Produktion noch kein Thema.

**Interviewer:** Ein gegebener Workflow kann bei der Umsetzung von Szenariogenerierungen helfen, auch ohne Expertenwissen ein qualitatives Ergebnis zu erzielen. Welche Anforderungen sollte ein Workflow zur Szenariogenerierung erfüllen? Welchen Mehrwert kann ein solcher Workflow für Sie liefern?

**Experte:** Er sollte gerade für Leute einfach anwendbar sein, die sich nicht den ganzen Tag mit dieser Thematik beschäftigen. Es muss intuitiv funktionieren und darf keinen großen Einarbeitungsaufwand mit sich bringen. Sonst bleibt das in der Praxis liegen.

## TRANSKRIPTION EXPERTENINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 6

**Interviewer:** Was ist für Sie das Spannende am Konzept des Digitalen Zwillings und welche Herausforderungen bestehen für Sie gegenwärtig?

**Experte:** Für uns ist besonders spannend, dass man Daten auch unabhängig vom physischen Maschineneinsatz analysieren kann. Bisher erheben und analysieren wir Daten erst nach der tatsächlichen Nutzung der Maschinen. Wenn wir das schon vorab virtuell tun könnten, ließen sich ungünstige Einsatzszenarien vermeiden, die sonst zu teurer Abnutzung führen.

**Interviewer:** Große Produzenten können die Einführungskosten von Modellen Digitaler Zwillinge besser über die Gemeinkosten verteilen als KMUs. Empfinden Sie Nachteile gegenüber großen Fertignern, wenn es darum geht Aspekte der Industrie 4.0 umzusetzen?

**Experte:** Ja und nein. Die Flexibilität von KMUs ist auf jeden Fall ein Vorteil. Wir müssen keine riesigen Systeme umstellen, wenn sich etwas ändert. Aber das Tagesgeschäft blockiert oft strukturelle Veränderungen. Wir haben kein eigenes Entwicklungsteam für solche Prozesse und müssen alles mit bestehendem Personal stemmen. Die Ressourcen sind begrenzt und der Aufwand muss sich unbedingt lohnen. Ein Fehlinvestment im Millionenbereich kann für ein mittelständisches Unternehmen existenzbedrohend sein.

**Interviewer:** Das Konzept des Digitalen Zwillings kann über seinen Lebenszyklus für eine Vielzahl von Use Cases eingesetzt werden. Welche Use Cases empfinden Sie als besonders attraktiv in Bezug auf ihre Fertigung?

**Experte:** Besonders interessant ist für uns die Förderung hochautomatisierter Prozesse unter Tage. Wir könnten Störungen an Maschinen remote analysieren. Das wäre ein enormer Vorteil, der sich mit der Tiefe der Modellierung durch Digitale Zwillinge verbessert. Auch Predictive Maintenance ist hier ein wichtiges Thema. Zusätzlich versprechen wir uns viel von der besseren Datenvernetzung mit unserer Tochterfirma und anderen Stakeholdern. So könnten wir Lieferzeiten und Ausfälle reduzieren, indem Reparaturen schneller geplant und mit Hilfe digitaler Modelle unterstützt werden.

**Interviewer:** Die Szenariogenerierung im Kontext des Digitalen Zwillings bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich am Wettbewerb in der Produktion zu behaupten. Bestehen in Ihrem Unternehmen bereits Konzepte zur Szenariogenerierung?

**Experte:** Nein.

**Interviewer:** Welche Vorteile würden Sie von der Implementierung einer Anwendung zur Szenariogenerierung erwarten?

**Experte:** Ein klarer Vorteil wäre eine bessere Eintaktung von Reparaturaufträgen. Aber der Nutzen muss in einem realistischen Verhältnis zum Implementierungsaufwand stehen.

**Interviewer:** Sehen Sie sich Herausforderungen gegenübergestellt, die eine befriedigende Anwendung von Szenariogenerierungen erschweren?

**Experte:** Ja, die größte Herausforderung ist die hohe Komplexität unseres gesamten Wertschöpfungsprozesses von der Gießerei bis zur fertigen Maschine. Zusätzlich fehlt uns die durchgängige Datenbasis. Wir haben unterschiedliche Softwarelösungen für 2D- und 3D-

Konstruktionen, was zu Brüchen zwischen Fertigungsanweisungen und digitalen Modellen führt.

**Interviewer:** In der Literatur werden verschiedene Parameter beschrieben, die für den Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung relevant sind. Welche sind das bei Ihnen?

**Experte:** Für uns sind das die Verfügbarkeiten, vor allem von kleinen, aber kritischen Komponenten wie elektronische Kleinteile im Cent-Bereich. Fehlt so ein Teil, steht die komplette Produktion still. Wir müssen uns dann fragen: Gibt es Alternativen? Welchen Einfluss hat ein Alternativbauteil auf die Produktparameter? Zum Beispiel, wenn ein anderer Motor eingesetzt wird. Was bedeutet das für die restliche Maschinenkonstruktion?

**Interviewer:** Technologien der Industrie 4.0 können die Geschwindigkeit und Qualität von Szenariogenerierungen erheblich steigern. Welche Bedeutung haben Technologien der Industrie 4.0 für Ihre Fertigung, und welche Synergien sind für Sie in Bezug auf das Konzept des Digitalen Zwillings denkbar?

**Experte:** Aktuell führen wir ein einheitliches PLM- und CAD-System ein. Das ist für uns die Grundlage für die spätere Umsetzung eines Digitalen Zwillings. Ziel ist es, alle fertigungsrelevanten Daten in einem zentralen Modell zu vereinen und bei Bedarf flexibel ändern zu können. Parallel testen wir gerade einen KI-gestützten Chatbot im Kundensupport, der mit Maschinendaten arbeitet. Künstliche Intelligenz ist bei uns ein sehr aktuelles Thema, auch wenn sie noch nicht breitflächig eingesetzt wird.

**Interviewer:** Ein gegebener Workflow kann bei der Umsetzung von Szenariogenerierungen helfen, auch ohne Expertenwissen ein qualitatives Ergebnis zu erzielen. Welche Anforderungen sollte ein Workflow zur Szenariogenerierung erfüllen? Welchen Mehrwert kann ein solcher Workflow für Sie liefern?

**Experte:** Die Thematik Szenariogenerierung ist für mich noch sehr abstrakt und weit weg vom Tagesgeschäft. Ich kann hier nur Tendenzen angeben. Der Workflow darf nicht zu abstrakt sein. Im Alltag ist dafür kaum Zeit. Wichtig ist eine intuitive Bedienung und gute Beispiele wie vordefinierte Use Cases, mit denen man direkt arbeiten kann. Das würde die Einstiegshürde deutlich senken.

## TRANSKRIPTION EXPERTENINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 7

**Interviewer:** Was ist für Sie das Spannende am Konzept des Digitalen Zwillings und welche Herausforderungen bestehen für Sie gegenwärtig?

**Experte:** Für unser Unternehmen ehrlich gesagt wenig. Wir sehen aktuell keine konkreten Herausforderungen in unserer Geschäftstätigkeit, die einen Digitalen Zwilling notwendig machen würden. Unsere Fertigung ist einfach strukturiert. Wir produzieren Stromschienen und galvanisieren elektrotechnische Bauteile. Die Maschinen sind analog, mit nur geringen Softwareanteilen zur Steuerung. Die Komplexität, die mit der Einführung eines Digitalen Zwillings einhergehen würde, steht für uns in keinem Verhältnis zum Nutzen.

**Interviewer:** Große Produzenten können die Einführungskosten von Modellen Digitaler Zwillinge besser über die Gemeinkosten verteilen als KMUs. Empfinden Sie Nachteile gegenüber großen Fertigern, wenn es darum geht Aspekte der Industrie 4.0 umzusetzen?

**Experte:** Nein, eigentlich nicht. Da wir eine sehr stabile Auftragslage haben. Über 90 Prozent unseres Umsatzes läuft über einen festen Abnehmer mit langfristigen Verträgen. Deshalb sind wir nicht gezwungen, auf Marktschwankungen zu reagieren. Wir spüren daher keinen Druck, mit digitalen Technologien nachzuziehen. Das Thema Digitalisierung spielt für uns aktuell keine Rolle, deshalb sehen wir darin auch keinen Nachteil gegenüber größeren Unternehmen.

**Interviewer:** Das Konzept des Digitalen Zwillings kann über seinen Lebenszyklus für eine Vielzahl von Use Cases eingesetzt werden. Welche Use Cases empfinden Sie als besonders attraktiv in Bezug auf ihre Fertigung?

**Experte:** Für uns aktuell keinen. Die Prozesse sind einfach, überschaubar und eingespielt. Es gibt keine komplexen Maschinen oder wechselnde Anforderungen, bei denen ein Digitaler Zwilling Vorteile bringen würde. Auch die Qualitätssicherung erfolgt mit Handmessgeräten. Das reicht in unserem Kontext völlig aus.

**Interviewer:** Die Szenariogenerierung im Kontext des Digitalen Zwillings bietet Unternehmen die Möglichkeit, sich am Wettbewerb in der Produktion zu behaupten. Bestehen in Ihrem Unternehmen bereits Konzepte zur Szenariogenerierung?

**Experte:** Nein.

**Interviewer:** Welche Vorteile würden Sie von der Implementierung einer Anwendung zur Szenariogenerierung erwarten?

**Experte:** Auch hier fällt es uns schwer, direkt einen Vorteil zu erkennen. Wir sehen aktuell keinen Anwendungsbereich, der eine solche Technologie bei uns rechtfertigen würde. Das Produktionsumfeld ist einfach, stabil und nicht besonders volatil.

**Interviewer:** Sehen Sie sich Herausforderungen gegenübergestellt, die eine befriedigende Anwendung von Szenariogenerierungen erschweren?

**Experte:** Wenn überhaupt, dann wären es für uns die Kosten und der Fachkräftemangel. Wir haben keine personellen Kapazitäten, um solche Technologien einzuführen oder zu betreuen.

Und ohne die bestehende digitale Infrastruktur würde der Aufwand sehr groß werden. Dazu fehlt in der Belegschaft das nötige Know-how, um so etwas umzusetzen.

**Interviewer:** In der Literatur werden verschiedene Parameter beschrieben, die für den Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung relevant sind. Welche sind das bei Ihnen?

**Experte:** Zunächst ist es für mich schwierig Parameter zu nennen, weil das Thema zu weit vom Tagesgeschäft entfernt scheint. Im Nachgang, mit Blick auf typische Anwendungsfälle wie die Produktionsprogrammplanung, wären vielleicht Parameter wie Produktpreise, Maschinen- und Personalkosten, Erfahrungsgrad der Belegschaft oder Stillstandzeiten denkbar.

**Interviewer:** Technologien der Industrie 4.0 können die Geschwindigkeit und Qualität von Szenariogenerierungen erheblich steigern. Welche Bedeutung haben Technologien der Industrie 4.0 für Ihre Fertigung, und welche Synergien sind für Sie in Bezug auf das Konzept des Digitalen Zwillings denkbar?

**Experte:** Für unsere Fertigung haben Technologien der Industrie 4.0 derzeit keine Bedeutung. Unsere Prozesse sind analog, Sensoriken oder KI kommen nicht zum Einsatz. Wir sehen hier auch keinen akuten Handlungsbedarf, um unsere Marktposition zu sichern. Das ist in unserer Nische mit wenigen, aber festen Kunden aktuell nicht notwendig.

**Interviewer:** Ein gegebener Workflow kann bei der Umsetzung von Szenariogenerierungen helfen, auch ohne Expertenwissen ein qualitatives Ergebnis zu erzielen. Welche Anforderungen sollte ein Workflow zur Szenariogenerierung erfüllen? Welchen Mehrwert kann ein solcher Workflow für Sie liefern?

**Experte:** Die Ableitungen von Herausforderungen an einen solchen Workflow sind für mich nur abstrakt leistbar. Sollte es jemals für uns relevant werden, wäre es wichtig, dass der Workflow extrem intuitiv ist. Unsere Belegschaft hat keine Erfahrung mit digitalen Tools in diesem Bereich. Es müsste also sehr viele Hilfestellungen geben, idealerweise mit klaren Beispielen oder vordefinierten Abläufen. Nur dann könnten wir daran denken, so etwas sinnvoll einzusetzen.

## TRANSKRIPTION FOLGEINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 2

**Interviewer:** Was sind Ihre ersten Gedanken zu dem Workflow?

**Experte:** Mir ist vor allem positiv aufgefallen, dass der Workflow stark von Erkenntnissen aus der Literatur und dem Input anderer Experten geprägt ist. Besonders sinnvoll finde ich die Lernkurvenmechanismen, also die Möglichkeit, dass sich Empfehlungen durch algorithmisches Lernen laufend verbessern. Das eröffnet Perspektiven für eine schrittweise Individualisierung der Software an die Gegebenheiten des eigenen Unternehmens. Gleichzeitig wirkt der Workflow in seiner aktuellen Form noch ziemlich theoretisch. Gerade für fachfremde Anwender wäre ein erläuternder Einstieg notwendig. Gleichzeitig profitiere ich nach der Einführung von der Struktur des Workflows, um mir den Ablauf noch klarer vorstellen zu können.

**Interviewer:** Bietet der Workflow Ihnen eine Orientierung, wofür die Szenariogenerierung angewendet werden kann, welchen Input Sie einbringen müssen und welchen Output Sie darauf aufbauend erwarten können?

**Experte:** Ja, definitiv. Der Workflow hilft mir zu verstehen, in welchen Situationen die Szenariogenerierung sinnvoll ist, was genau ich als Input einbringen muss und welcher Output dann zu erwarten ist. Die Visualisierung über das EPK-Diagramm unterstützt das zusätzlich, auch wenn eine gewisse theoretische Einstiegshürde bleibt.

**Interviewer:** Sehen Sie Ihre Anforderungen ausreichend umgesetzt?

**Experte:** Ja, insgesamt schon. Die Anforderungen, die ich im Gespräch genannt hatte, sehe ich im Workflow gut abgebildet und sogar sinnvoll erweitert. Besonders gelungen finde ich die Möglichkeit, den Detaillierungsgrad flexibel zu wählen, je nachdem, ob man nur eine grobe, schnelle Szenariogenerierung möchte oder einen längeren, tiefgehenden Analyseprozess.

**Interviewer:** Können Sie sich eine Anwendung des Workflows vorstellen?

**Experte:** Grundsätzlich ja, allerdings unter Vorbehalt. Viel hängt davon ab, wie die finale Benutzeroberfläche aussieht. Sie muss die Logik und Verständlichkeit des EPK-Diagramms in eine intuitive, grafische Sprache übersetzen. Außerdem ist für mich noch nicht ganz klar, welche Rolle Künstliche Intelligenz konkret in der Anwendung spielt. Ich erkenne den Effizienzgewinn durch KI, aber ich halte eine komplett autonome Durchführung der Szenariogenerierung angesichts der Tragweite mancher Entscheidungen für nicht vertretbar. Ich sehe die KI eher als unterstützendes Werkzeug.

**Interviewer:** Gibt es Aspekte, die Ihnen im Workflow noch fehlen?

**Experte:** Ja, es fehlt für mich noch ein klarer Ausblick auf das Geschäftsmodell. Bevor ich eine Software auf Basis dieses Workflows vorbehaltlos einsetzen würde, müsste ich mehr über Kosten, Serviceumfang und Supportangebote wissen. Darüber hinaus fände ich es gut, wenn wir langfristig auch selbst Einfluss auf die Pflege der Musterkataloge nehmen könnten, gleichzeitig aber auch die Option hätten, diese Pflege vom Anbieter übernehmen zu lassen. Wichtig wäre mir dabei auch ein Protokollsystem. Wenn sich etwas in den Datenbanken ändert, sollte nachvollziehbar sein, wie sich das auf die Ergebnisse der Szenariogenerierung ausgewirkt hat.

**Interviewer:** Welche Anforderungen können Sie sich auf der Serviceebene der Szenariogenerierung vorstellen?

**Experte:** Auf der Serviceebene denke ich vor allem an Transparenz und Unterstützung. Es braucht klare Informationen zu Kosten und Leistungen, aber auch verlässlichen Support. In der Nutzung sollte man nicht allein gelassen werden, weder beim Einstieg noch im laufenden Betrieb. Wichtig wäre für mich zudem, dass der Anbieter nicht nur technische Hilfe leistet, sondern auch Impulse zur Weiterentwicklung gibt, etwa durch Hinweise auf neue Trends oder Funktionen.

## TRANSKRIPTION FOLGEINTERVIEW MIT EXPERTE NR. 5

**Interviewer:** Was sind Ihre ersten Gedanken zu dem Workflow?

**Experte:** Zunächst einmal finde ich es sehr positiv, dass der Workflow eine klare Vorstellung davon vermittelt, was der Anwender im Rahmen der Szenariogenerierung leisten muss. Gleichzeitig wird auch deutlich, welchen Mehrwert man daraus ziehen kann – gerade in Bezug auf spezifische Problemstellungen. Das schafft auf jeden Fall Orientierung.

**Interviewer:** Bietet der Workflow Ihnen eine Orientierung, wofür die Szenariogenerierung angewendet werden kann, welchen Input Sie einbringen müssen und welchen Output Sie darauf aufbauend erwarten können?

**Experte:** Ja, auf jeden Fall. Der Workflow macht transparent, wie der Prozess abläuft und was an welcher Stelle erforderlich ist. Gerade durch die standardisierte EPK-Darstellung wird der Ablauf vorder- und hintergründig gut nachvollziehbar. Das hilft mir, obwohl ich keine tiefgehenden Vorkenntnisse im Bereich der Szenariogenerierung habe, sehr beim Verständnis. Was aber für mich ebenso entscheidend ist: Die finale Anwendung muss diesen verständlichen Ablauf auch technisch in der Benutzeroberfläche widerspiegeln. Nur dann ist die Bedienung intuitiv. Die Oberfläche muss genauso klar strukturiert und nachvollziehbar sein wie das EPK-Diagramm.

**Interviewer:** Sehen Sie Ihre Anforderungen ausreichend umgesetzt?

**Experte:** Teilweise. Meine zentrale Forderung war eine intuitive Bedienung. Die EPK hilft hier auf einer konzeptionellen Ebene gut weiter. Aber Intuitivität ergibt sich nicht nur durch die Darstellung, sondern auch durch die Benutzeroberfläche der Software. Nur wenn der Workflow dort genauso verständlich umgesetzt wird, ist die Anwendung für mich wirklich intuitiv.

**Interviewer:** Können Sie sich eine Anwendung des Workflows vorstellen?

**Experte:** Ja, grundsätzlich schon, aber unter dem Vorbehalt, dass die Benutzeroberfläche entsprechend gestaltet wird. Wenn die Software die Logik des Workflows technisch sauber abbildet, sehe ich durchaus eine Möglichkeit, den Workflow in der Fertigung einzusetzen.

**Interviewer:** Gibt es Aspekte, die Ihnen im Workflow noch fehlen?

**Experte:** Ja, dass die Anwendung kontinuierlich weiterentwickelt wird, insbesondere was die Kataloge betrifft. Diese sollten laufend um aktuelle Trendparameter ergänzt werden, aber auch um Erfahrungswerte anderer Anwender. Das ist für uns im Tagesgeschäft allein nicht leistbar, dafür fehlt schlicht die Zeit für eigenständige Umfeldanalysen. Außerdem begrüße ich die Einbindung einer menschlichen Kontrollinstanz in Form der Verifikation und Validierung. Automatisierung ist gut und sinnvoll, aber wir vertrauen bei Entscheidungen zur Verarbeitung von Baustahl oder zur Einteilung von Maschinen und Personal stark auf die Erfahrung unserer Mitarbeitenden. Das kann für mich keine KI vollständig ersetzen.

**Interviewer:** Welche Anforderungen können Sie sich auf der Serviceebene der Szenariogenerierung vorstellen?

**Experte:** Auf Serviceebene fände ich es wichtig, dass ein persönlicher Ansprechpartner zur Verfügung steht. Idealerweise ist das jemand, der über den gesamten Nutzungszeitraum hinweg begleitet. Dieser Berater könnte nicht nur beim Einstieg helfen, sondern auch regelmäßig über neue Trends informieren und zusätzliche Impulse für die Szenariogenerierung geben. Auch in Hinblick auf die Intuitivität ist der Austausch mit einem Experten hilfreich. Er kann Hemmschwellen abbauen und gibt den Nutzern Sicherheit bei der Anwendung.



## Anhang B: Begleitbogen zur Interviewanfrage (Kontaktdaten geschwärzt)

### Die Herausforderung

Fehlt auch Ihnen der einheitliche Blick auf Ihre Daten, um Zusammenhänge zwischen verschiedenen Prozessen zu erkennen - idealerweise mit einem **Blick in die Zukunft?**

Typische Fragestellungen sind:

- Welche Fertigstellungstermine sind realistisch und **welche möglichen Engpässe entstehen**, wenn Störungen in einem bestimmten Produktionsprogramm auftreten?
- Welchen Einfluss haben **Störungen in der Lieferkette** auf meine Produktion?

Die Beantwortung dieser und weiterer Fragen wird unter den aktuellen Marktbedingungen immer komplexer. Eine in der Forschung aussichtsreiche **Antwortmöglichkeit bildet die Nutzung Digitaler Zwillinge**.

### Die Vision

#### Digitaler Zwilling - Zukunftssichere Fertigung durch intelligente Szenarien

**Was ist ein digitaler Zwilling?** Ein digitaler Zwilling ist das virtuelle Abbild einer Maschine, eines Produkts oder eines gesamten Produktionsprozesses. Durch die Verknüpfung mit Echtzeitdaten und Simulationen ermöglicht er die Generierung von Szenarien für verschiedene äußere Einflüsse.

**"Was-wäre-wenn?"-Analysen für maximale Planungssicherheit** Testen Sie verschiedene Szenarien und bereiten Sie sich optimal auf Marktveränderungen, Lieferkettenstörungen oder Produktionsengpässe vor.

**Krisenfest durch Simulationen** Simulieren Sie die Auswirkungen von Materialknappheit, Maschinenausfällen oder geänderten Kundenanforderungen und treffen Sie proaktive Entscheidungen.

**Optimale Ressourcennutzung** Erkennen Sie in virtuellen Tests, wie sich alternative Materialien, neue Produktionsmethoden oder geänderte Energieverfügbarkeiten auf Ihre Fertigung auswirken.

### Ihre Expertise ist gefragt!

Das Fraunhofer ISST entwickelt im Rahmen des Projekts OpenFactoryTwin (OFacT) ein Datenmodell für einen digitalen Zwilling, welches KMUs als Basis zur Einführung von Digitalen Zwillingen und der Szenariogenerierung dienen soll. Um eine möglichst anwenderorientierte Entwicklung dieses Modells sicherzustellen, benötigen wir ihre Expertise! Mit Ihrer Unterstützung sollen wichtige Forschungsfragen untersucht werden.

#### Interview

ca. 30 Minuten  
April 2025

#### Bedingungen

diskrete Fertigung  
umgesetzte oder  
angestrebte DZ-Nutzung