

Ein geschäftsmodellorientierter Entwicklungsansatz für Digitale Zwillinge in der Industrie

Nachhaltige Geschäftsmodelle durch digitale Zwillinge

A. Werner, F. Schuseil, N. Zimmermann, M. Hämmerle, O. Riedel

ZUSAMMENFASSUNG Produzierende Unternehmen werden seit jeher mit einer steigenden Anzahl an und Komplexität von Anforderungen konfrontiert, was durch Nachhaltigkeitsanforderungen seitens Legislative, Kunden und Investoren verstärkt wird. Diese neuartigen Anforderungen sollten nicht als Bürde betrachtet werden. Stattdessen lassen sich ökologisch nachhaltige Geschäftsmodelle erschließen. In diesem Beitrag wird ein geschäftsmodellorientierter Entwicklungsansatz für digitale Zwillinge in der Industrie präsentiert.

STICHWÖRTER

Digitalisierung, Advanced Systems Engineering, Nachhaltigkeit

Sustainable Business Models through Digital Twins

ABSTRACT Manufacturing companies have always been confronted with an increasing number and complexity of requirements, which is reinforced by sustainability requirements from legislators, customers, and investors. It is important to consider these new requirements not as a burden, but as an opportunity to develop sustainable business models. This article presents a business model-oriented development approach for digital twins in industry.

1 Motivation und Handlungsbedarf

Unternehmen sehen sich schon immer mit einer steigenden Anzahl und einer zunehmenden Komplexität von Anforderungen an ihre Produkte konfrontiert [1]. Nachhaltigkeitsanforderungen seitens des Gesetzgebers, der Kunden, der Investoren sowie der Gesellschaft erhöhen die Komplexität und die Gesamtzahl der Anforderungen zusätzlich. Die neuartigen Anforderungen sollten von Unternehmen jedoch nicht als reine Belastung empfunden werden. Stattdessen bieten sie die Chance, Produkte ressourceneffizienter und kreislauffähiger zu gestalten und neue Wertschöpfungspotenziale auf der Basis nachhaltiger Geschäftsmodelle zu erschließen, wodurch sich in Zukunft Erlöse steigern lassen.

Digitale Zwillinge bilden dabei die elementare Basis für Geschäftsmodelle zur Steigerung der Ressourceneffizienz und der Kreislauffähigkeit sowie zur Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit [2]. Sie ebnet den Weg vom Internet-of-Things (IoT) hin zum Internet-of-Services (IoS) [3]. Digitale Zwillinge erlauben die Beherrschung vielfältiger und komplexer Anforderungen und schaffen Transparenz innerhalb definierter Systemgrenzen [4]. Da Daten aus der Nutzungs- oder End-of-Life-Phase häufig fehlen, können mithilfe von Simulationen im Zuge des virtuellen Produktentwicklungsprozesses synthetische Daten über den gesamten Produktlebenszyklus generiert werden, um Informationslücken zu schließen und valide Optimierungspotenziale für bestimmte Nachhaltigkeitsindikatoren im Vorfeld zu identifizieren [5]. Durch eine Hybridisierung physikbasierter Simulationsmodelle aus dem Engineering mit datengetriebenen Modellen aus dem Feld können die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden,

um das Verhalten über den Produktlebenszyklus nachhaltig zu beeinflussen, zu überwachen und zu steuern sowie mindestens die nächste Produktgeneration ressourceneffizienter und kreislauffähiger zu gestalten [6, 7]. Dies ermöglicht eine Reduktion des Ressourcenverbrauchs sowie von Treibhausgasemissionen [8].

Neben den vielversprechenden Potenzialen entstehen durch die Einführung digitaler Zwillinge völlig neue Herausforderungen für produzierende Unternehmen. Zum einen müssen die Anforderungen an digitale Zwillinge frühzeitig in den Entwicklungsprozess des digitalen Zwillings integriert werden [7]. Zum anderen stellen digitale Zwillinge eine auftragsspezifische Instanziierung dar [3] und müssen je nach Kundenanforderungen und -wünschen unterschiedlich und damit möglichst, wie schon das Produkt selbst, modular aufgebaut werden. Die Art und Anzahl der integrierten Daten und Partialmodelle sowie deren modulare Vernetzung über den gesamten Produktlebenszyklus lassen sich nur schwer verallgemeinernd bestimmen. Dies ist aber nötig, um als produzierendes Unternehmen Mitarbeiterkapazitäten einzusetzen, Prozesse anzupassen und geeignete IT-Systeme zu nutzen und letztlich die Kundenanfrage in Form eines Geschäftsmodells begeisternd erfüllen zu können. Aktuell werden digitale Zwillinge in erster Linie für interne Prozessverbesserungen eingesetzt, statt einen Nutzen beziehungsweise Mehrwert für den Kunden in Form von nachhaltigen Geschäftsmodellen zu monetarisieren.

Ziel dieses Beitrags ist es, einen innovativen geschäftsmodellorientierten Entwicklungsansatz für digitale Zwillinge vorzustellen. Der Ansatz soll es produzierenden Unternehmen erlauben, skalierbar und flexibel verschiedene Anwendungsfälle zu realisieren, die das Potenzial bieten, Nachhaltigkeitsindikatoren im Sinne

nachhaltiger Geschäftsmodelle wirtschaftlich zu verwerten. Nachhaltigkeit und damit verbundene Indikatoren beschränken sich in diesem Artikel vorrangig auf ökologische Aspekte (wie Material, Energie, Emissionen).

Im Folgenden stellt Kapitel 2 den aktuellen Stand und Defizite zum digitalen Zwilling im Kontext nachhaltiger Geschäftsmodelle in der Literatur prägnant dar. In Kapitel 3 werden Anwendungsfälle als Grundlage für potenzielle Geschäftsmodelle systematisch in der Literatur recherchiert und die jeweiligen Nachhaltigkeitsindikatoren extrahiert. Zudem wird in Kapitel 3 das Geschäftsmodellpotenzial am Beispiel der vorausschauenden Instandhaltung skizziert. Kapitel 4 präsentiert den geschäftsmodellorientierten Entwicklungsansatz für digitale Zwillinge in der Industrie. Kapitel 5 fasst den Beitrag zusammen und gibt einen Ausblick.

2 Aktueller Stand und Defizite

Stark *et al.* [2] unterstützen die in Kapitel 1 aufgeführte These, dass digitale Zwillinge neue Geschäftsmodelle für Produkte, Systeme und Produkt-Service-Systeme (PSS) ermöglichen. Sie schlagen beispielsweise vor, am Ende der Nutzungsphase eine faktenbasierte Entscheidung darüber zu treffen, ob das Produkt wiederverwendet oder recycelt werden soll. Der digitale Zwilling kann genutzt werden, um auf Basis von Verhaltenssimulationen nach umweltfreundlichen und nachhaltigeren Betriebsstrategien für die reale Produktinstanz zu suchen [2]. So können beispielsweise onlinefähige digitale Zwillinge zur virtuellen Absicherung von Steuereinheiten in einem kinematischen Verhaltensmodell des betrachteten Systems eingesetzt werden (Hardware-in-the-Loop) [9–13]. Dabei werden echtzeitkritische Abläufe, Antriebsfunktionalitäten, Energieverbräuche sowie die Gesamtleistung des Systems inklusive Safety untersucht.

Bestehende Ansätze von digitalen Zwillingen – auch solche, die sich auf eine nachhaltige Perspektive konzentrieren – vernachlässigen wichtige Phasen des Produktlebenszyklus, wie Design, Nutzung oder End-of-Life. Die Betrachtung auf eine nachhaltige Produktion zu beschränken, greift zu kurz, vielmehr sollte die Bereitstellung von Nachhaltigkeitsindikatoren den gesamten Produktlebenszyklus abdecken. Bisher konzentrieren sich einige Ansätze [14, 15] auf die Simulation und Produktion, ohne die End-of-Life-Phase explizit zu berücksichtigen. In einigen Fällen ist eine anwendungsspezifische beziehungsweise geschäftsmodellorientierte Konfiguration möglich, jedoch beschränkt sich dies oft auf Anwendungsfälle mit Fertigungsrobotern, wie in [14] beschrieben. Zudem werden Nachhaltigkeitsaspekte nur teilweise berücksichtigt und Dienstleistungen sowie abgeleitete Geschäftsmodelle nicht vollständig einbezogen. Es wird auf weiteren Forschungsbedarf im Zusammenhang mit Modellen für digitale Zwillinge hingewiesen [2].

Als Bausteine des digitalen Zwillings existieren im Kontext mechatronischer Produkte und Systeme verschiedene Modelltypen. Nach [16–18] werden Prozess-, System-, Anforderungs-, Funktions-, Struktur-, Gestalt- und Verhaltensmodelle unterschieden. Für viele Anwendungsfälle digitaler Zwillinge sind vor allem Verhaltensmodelle relevant [11]. Es besteht ein Bedarf zur Etablierung kompatibler Modellqualitätsstufen [2]. Zudem werden zugehörige Transformationsmethoden benötigt, welche die Vergrößerung und Verfeinerung von digitalen Zwillingen und deren Anpassung an spezifische Anwendungskontexte unterstützen. Aspekte der Skalierbarkeit und Wiederverwendbarkeit

von Modellen werden in bestehenden Ansätzen nicht ausreichend berücksichtigt, um eine Vielzahl von Anwendungsfällen umzusetzen [19]. Unternehmen stehen vor der Herausforderung, flexibel auf volatile Kundenanforderungen zu reagieren und ihren digitalen Zwilling entsprechend zu modularisieren oder weiterzuentwickeln. Ein digitaler Zwilling kann durch Konfiguration oder Parametrisierung an spezifische Anwendungsszenarien angepasst werden [2]. Darüber hinaus beeinflussen die Anwendungsdomäne und das mit dem Produkt verbundene Geschäftsmodell die Eigenschaften des digitalen Zwillings.

3 Nachhaltige Geschäftsmodelle auf Basis digitaler Zwillinge

Da ein klares Bild über mögliche industrielle Anwendungsfälle mit dem Potenzial für damit verbundene Geschäftsmodelle derzeit nicht vorhanden ist, wurde eine systematische Literaturrecherche nach Dekkers *et al.* [20] zur Identifikation von Anwendungsfällen auf Basis digitaler Zwillinge durchgeführt und mit Blick auf die verwendeten ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren analysiert und überblicksmäßig dargestellt.

3.1 Anwendungsfälle als Grundlage für potenzielle Geschäftsmodelle

Der Kontext der Literaturübersicht (Stand März 2024) ist die Zuordnung von Nachhaltigkeitsindikatoren zu entsprechenden Anwendungsfällen des digitalen Zwillings (siehe Tabelle unten).

Die Literaturübersicht dient dazu, einen Überblick über die relevanten Anwendungsfälle und deren Indikatoren zu geben. Die Forschungsfrage lautet: »Welche Nachhaltigkeitsindikatoren werden für industrielle Anwendungsfälle digitaler Zwillinge als Basis für potenzielle nachhaltige Geschäftsmodelle in der Literatur genannt?« In den Bibliotheken Scopus und Web of Science wurde der folgende Suchstring verwendet: »TITLE-ABS-KEY („digital twin“ AND („sustainability“ OR „ecology“ OR „environment“ OR „circular economy“ OR „eco-efficiency“) AND („use case“ OR „business case“ OR „application“)) AND (LIMIT-TO (OA , „all“))«. Wie **Bild 1** zeigt, ergab diese Suche 121 Arbeiten aus Scopus und 49 Arbeiten aus Web of Science. 37 Duplikate wurden entfernt, sodass 133 Veröffentlichungen für die weitere Überprüfung in Betracht kamen.

Im nächsten Schritt wurden die verbleibenden Veröffentlichungen nach mehreren Ausschlusskriterien gefiltert beziehungsweise ausgeschlossen, hierzu zählen Artikel, die

- keinen nachhaltigkeitsbezogenen Anwendungsfall beschreiben,
- den digitalen Zwilling als eine von vielen Grundlagentechnologien darstellen,
- nicht-industrielle Anwendungsbereiche abbilden (zum Beispiel Landwirtschaft, Smart City oder Bauwesen) sowie
- nur auf unternehmensinterne Verbesserungen abzielen und somit kein potenzielles Geschäftsmodell darstellen.

Nach diesem Schritt wurden 34 Artikel für das Volltextscreening berücksichtigt. Für drei der verbleibenden Artikel konnten im Volltext keine kontextrelevanten Informationen erfasst werden, sodass sie ausgeschlossen wurden. Durch Rückwärtsintegration innerhalb der Literatur wurden 17 Publikationen hinzugefügt.

Aus den insgesamt 48 Publikationen wurden folgende Informationen extrahiert und in einer Datenbank erfasst: Titel, Haupt-

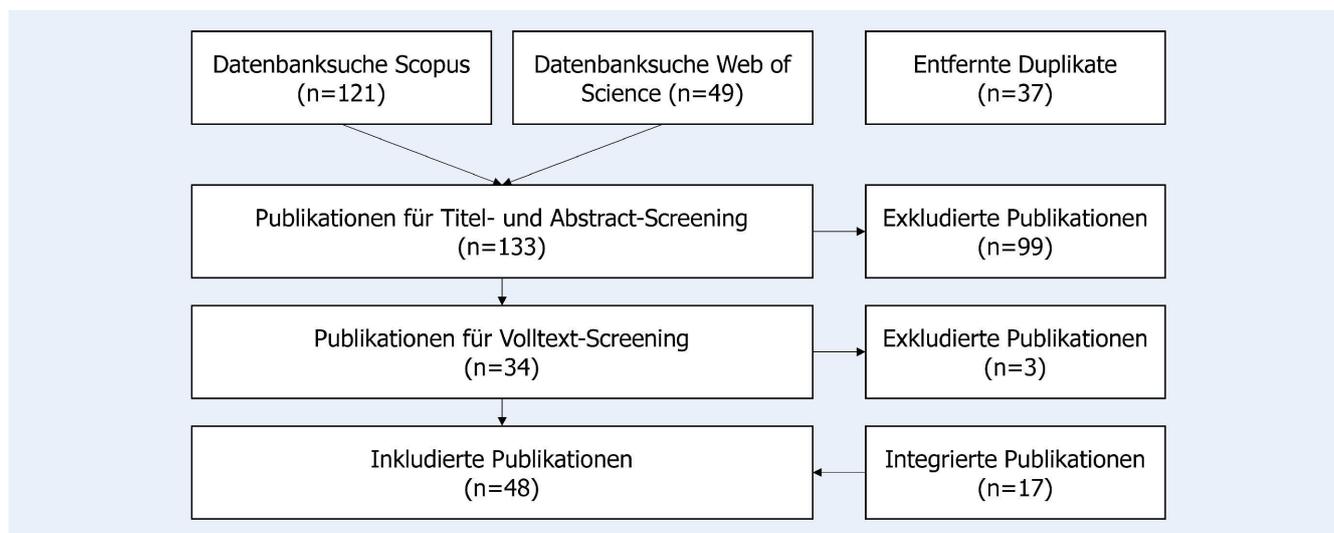


Bild 1. Flussdiagramm der systematischen Literaturrecherche. Grafik: Fraunhofer IAO

autor, Jahr der Veröffentlichung, Anwendungsfälle und Nachhaltigkeitsindikatoren.

Durch Datenextraktion konnten in der Folge 13 industrielle Anwendungsfälle des digitalen Zwillings im Kontext der Nachhaltigkeit mit zugehörigen Nachhaltigkeitsindikatoren erfasst werden. Die Tabelle fasst die Anwendungsfälle mit entsprechenden Indikatoren zusammen [21–48].

3.2 Geschäftsmodellpotenzial am Beispiel der vorausschauenden Instandhaltung

Wie im vorigen Kapitel erläutert, existieren in der Literatur viele Anwendungsfälle auf Basis digitaler Zwillinge. Diese bieten das Potenzial, einerseits die ökologische Nachhaltigkeit von Produkten zu verbessern und andererseits Erlöse in Form von Geschäftsmodellen zu steigern. Am Beispiel der vorausschauenden Instandhaltung soll das Geschäftsmodellpotenzial kurz skizziert werden.

Die meisten Industrieunternehmen reagieren derzeit auf auftretende Ausfälle erst, wenn Systeme bereits stillstehen (reaktive Instandhaltung), oder führen die Instandhaltung in geplanten Zeitintervallen, bestenfalls auf Basis statistischer Daten, durch (präventive Instandhaltung) [49]. Diese Vorgehensweise führt entweder zu kurzfristigen Produktionsausfällen oder zu einer Verschwendung von Material und Fertigungszeit, weil Komponenten vorzeitig ausgetauscht werden. Insgesamt stellt dies einen ineffizienten Umgang mit Ressourcen dar.

Um die Ressourceneffizienz zu steigern, empfiehlt sich ein proaktiver Ansatz mit bedarfsgerechter Instandhaltung. Die Bestimmung des optimalen Zeitpunkts für die Instandhaltung bleibt eine große Herausforderung in der Produktion. In der Praxis werden Versuche zur vorausschauenden Instandhaltung meist von Unternehmen angestoßen, die verschiedene Anlagen in Betrieb haben und Qualität und Effizienz steigern wollen. Ansatzpunkt ist dabei die interne Instandhaltung, die auf Empfehlung des Anlagenherstellers hin handelt, beispielsweise zur Durchführung eines Werkzeugwechsels, um die geforderte Qualität in der Produktion sicherstellen zu können.

So wurde bei einem Industriepartner in einem EU-geförderten Forschungsprojekt an einer Stanzstraße zur Herstellung von

Schermessern präventive Instandhaltung betrieben und es wurden im Turnus von drei Wochen die Stanzwerkzeuge getauscht. Bei Empfehlungen für Wechselintervalle werden häufig große Sicherheitsfaktoren eingerechnet, damit der Anlagenhersteller vom Anlagenbetreiber nicht für reduzierte Qualität oder gar einen Produktionsstillstand zur Verantwortung gezogen werden kann. Viele Initiativen zur vorausschauenden Instandhaltung scheitern in der Durchführung an fehlenden Daten, die nur der Anlagenhersteller zur Verfügung stellen kann. Dies geschieht aber aufgrund von schützenswertem Know-how seitens des Herstellers nur in Ausnahmefällen. Zudem sind aktuell Instandhaltungsdienstleistungen ein wichtiger Bestandteil des Umsatzes von Anlagenherstellern. So scheint ein Bestreben nach vorausschauender Instandhaltung aus der Sicht der Hersteller gegenläufig zu ihren wirtschaftlichen Interessen.

An dieser Stelle muss ein Umdenken und damit ein Wandel im Geschäftsmodell der Anlagenhersteller stattfinden. Anlagenbetreiber sind durchaus bereit, höhere initiale Kosten zu akzeptieren, wenn während der Betriebszeit eine Effizienzsteigerung sowie ein verminderter Ressourceneinsatz zu einem klar erkennbaren Return on Investment führt. Dies lässt sich darstellen, indem die Anlagenhersteller in Zukunft eine verlässliche Aussage zur verbleibenden Restnutzungsdauer ihrer Maschinenkomponenten treffen können. Am Beispiel des oben genannten Werkzeugs lassen sich damit erhöhte Nutzungszeiten, längere Instandhaltungsintervalle und daraus resultierend eine höhere Auslastung der Anlagen erzielen. Für den Anlagenhersteller bedeutet dies eine Reduktion notwendiger Instandhaltungsdienstleistungen, die auch aufgrund des Fachkräftemangels bei Servicetechnikern immer schwerer zu gewährleisten war. Nach der beschriebenen Logik gilt es zukünftig, die in der Tabelle dargestellten Anwendungsfälle des digitalen Zwillings weiter zu denken sowie unternehmensindividuell Geschäftsmodellpotenziale zu erschließen und erfolgversprechende Erlösmodelle zu entwickeln.

4 Geschäftsmodellorientierte Entwicklung digitaler Zwillinge

In diesem Kapitel wird ein neuartiger Ansatz zur geschäftsmodellorientierten Entwicklung digitaler Zwillinge in der Industrie

Tabelle. Aus der Literatur extrahierte Anwendungsfälle auf Basis Digitaler Zwillinge mit Nachhaltigkeitsindikatoren.

| Anwendungsfall | Nachhaltigkeitsindikatoren | Quellen |
|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Vorausschauende Instandhaltung | Produktausfallrate; Ausfallzeit; Wartungszeit; Ausfallkosten; Wartungskosten; Nutzungsdauer (Useful Life); Restnutzungsdauer (Remaining Useful Life, RUL); Voraussichtliche Ausfallzeit; Nutzungsdauer pro Nutzer; Gesamtlebenszykluskosten; Ökologischer Fußabdruck; Stromverbrauch; OEE; Betriebslebensdauer; Gesundheitszustand; Gesundheitsklasse; Gesamtemissionen | [21–32] |
| Nachhaltiges Design | (Simulierte) CO ₂ -Emissionen; CO ₂ -Fußabdruck; Gesamte Produktionsausfallzeit; Kosten für die Aufbereitung; Materialverbrauch; Energieverbrauch; Demontagezeit; Produktlebenserwartung; Ökologischer Fußabdruck; Andere LCA-Indikatoren (nicht spezifiziert); Materialverlust in der Fertigung; Bearbeitungszeit; Druckluftbedarf; Kühlwasserbedarf; Kreislauffähigkeit | [22, 24, 25, 33, 34] |
| Zirkularität (R-Strategien) | CO ₂ -Fußabdruck des Produkts; CO ₂ -Fußabdruck der End-of-Life-Tätigkeiten; Vermiedene kg CO ₂ -Äquivalente durch Wiederaufbereitung oder Recycling; Vermiedene kg CO ₂ -Äquivalente während der Rohstoffgewinnung; Restnutzungsdauer (Remaining Useful Life, RUL); Exposition mit gefährlichen Stoffen (Compliance mit der Gesetzgebung); Erhaltungszustand (z. B. Alter oder Laufleistung); Kritische Materialien innerhalb des Produkts; gesamte Lebenszykluskosten; Ökologischer Fußabdruck; Stromverbrauch | [25, 26, 35, 36] |
| Optimierung des Energieverbrauchs | Energieeffizienz; Energiekosten; Energieverbrauch nach Quelle (erneuerbar/fossil); Energieverbrauch pro Einheit; Täglicher/gesamter Stromverbrauch; Energieverbrauch in der Produktion; Maschinenspezifischer Energieverbrauch; OEE; Embodied Product Energy (EPE); Remaining Energy-Efficient Lifetime (REEL); Indirekter Energieverbrauch; Geplanter /tatsächlicher Energieverbrauch in der Nutzungsphase; CO ₂ -Emissionen; Energierückgewinnung; Zykluszeit; Ökobilanz-Indikatoren (kumulativer Energiebedarf, Treibhauspotenzial, Ozonabbau, photochemische Oxidation, Versauerung, Eutrophierung, Humantoxizität, aquatische Ökotoxizität, terrestrische Ökotoxizität, abiotischer Ressourcenverbrauch) | [27, 34, 37–41] |
| Multikriterielle Nachhaltigkeitsbewertung | Wiederverwendungsquote; Geschlechtergerechtigkeit; Arbeitsbedingungen in der Wertschöpfungskette (z. B. Menschenrechte, Lohn, Gesundheit, Sicherheit); Umsatzerlöse; Wertschöpfung pro Mitarbeiter; Ökoeffizienz; Produktlebensdauer; Energieverbrauch; Materialverbrauch; Materialeffizienz; Energieeffizienz; CO ₂ -Emissionen (Scope 1, 2, 3); Ökologischer Fußabdruck; Indikatoren nach Ökobilanz und Sachbilanz (nicht weiter spezifiziert); Herkunft des Produkts; Wasserverbrauch; Emissionen in der Entwicklungs-, Produktions-, Nutzungs- und Recyclingphase; Umweltverschmutzung; Ressourcenerschöpfung; Kreislaufwirtschaftspotenzial; Treibhausgasemissionen; Im Produkt gebundener Kohlenstoff | [23, 34, 36, 42, 43] |
| CO ₂ -Bilanzierung | CO ₂ -Emissionen; Gebundener Kohlenstoff für Rohstoffe und Komponenten; Logistikemissionen; Emissionen des gesamten Herstellungsprozesses; Emissionen aus Wiederaufarbeitung und Reparatur; (Indirekter, direkter) CO ₂ -Fußabdruck | [22, 43] |
| Materialauswahl | Grüne Materialien im Produkt; Score der Umweltauswirkungen (nicht spezifiziert) | [29] |
| Virtuelle Demontage | Energiebasierte OEE (e-OEE); Gesamtenergieverbrauch; Operativer Energieverbrauch; Arbeitsenergieverbrauch; Materialverbrauch; Ökoeffizienz-Indizes; Demontagezeit | [44] |
| Virtuelle Inbetriebnahme | (Simulierter) Energieverbrauch; Energieeffizienz; Reibungs- und Wärmeverluste | [9–13] |
| Optimierung erneuerbarer Energieerzeugung | Energieerzeugung; Energieeffizienz; Anlagenlebensdauer; Anlagenverfügbarkeit; Treibhauspotenzial; Versauerungspotenzial; Bodenluftqualität; Ozonabbaupotenzial; Eutrophierung; Ökotoxizität; Wasserverbrauch; Primärenergieverbrauch (fossil/erneuerbar); Stromverbrauch; Kohlenstoffnutzungsfaktor; Erschöpfung abiotischer Ressourcen; Abwassermenge; Abfallmenge; Landnutzung | [29, 45] |
| Logistikoptimierung | Energieverbrauch; Kraftstoffverbrauch; Abfallmenge | [21, 29, 46] |
| Optimierung des Materialverbrauchs | Materialverbrauch; Ausschussquote; Materialstärke | [36, 47] |
| Reduktion von CO ₂ -Emissionen | CO ₂ -Emissionen; Stromverbrauch; Rohstoffverbrauch; (voraussichtliche) Lebensdauer der Werkzeuge; Voraussichtliche Ausfallzeiten; Bearbeitungszeit | [48] |

vorgestellt, der die Nachhaltigkeit über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg berücksichtigt. Dieser Ansatz bietet die Möglichkeit, skalierbar und flexibel verschiedene Anwendungsfälle umzusetzen, die wiederum das Potenzial bieten, Nachhaltigkeitsindikatoren im Sinne nachhaltiger Geschäftsmodelle wirtschaftlich zu verwerten. Das Vorgehen in **Bild 2** lässt sich auf oberster Ebene in drei Phasen unterteilen, wobei insbesondere die zweite Phase von mehreren Subphasen und Teilschritten geprägt ist.

Die Subphasen sollten nicht sequenziell ablaufen, vielmehr empfiehlt sich ein simultaner Ablauf bei der Durchführung im

Unternehmen. Während festgelegt wird, welche Partialmodelle für die jeweilige Ausprägung des digitalen Zwillinges zur Erfüllung der Kundenanfrage benötigt werden und wie diese miteinander verknüpft sein sollen, kann bereits mit der Systemmodellierung, bezogen sowohl auf das Engineering als auch auf den gesamten Produktlebenszyklus, begonnen werden. Parallel werden von Beginn an virtuelle und hybride Tests unter Verwendung von Modellierungs- und Simulationswerkzeugen durchgeführt. Um zu gewährleisten, dass Akteure während des gesamten Produktlebenszyklus von den Indikatoren profitieren können, wird der

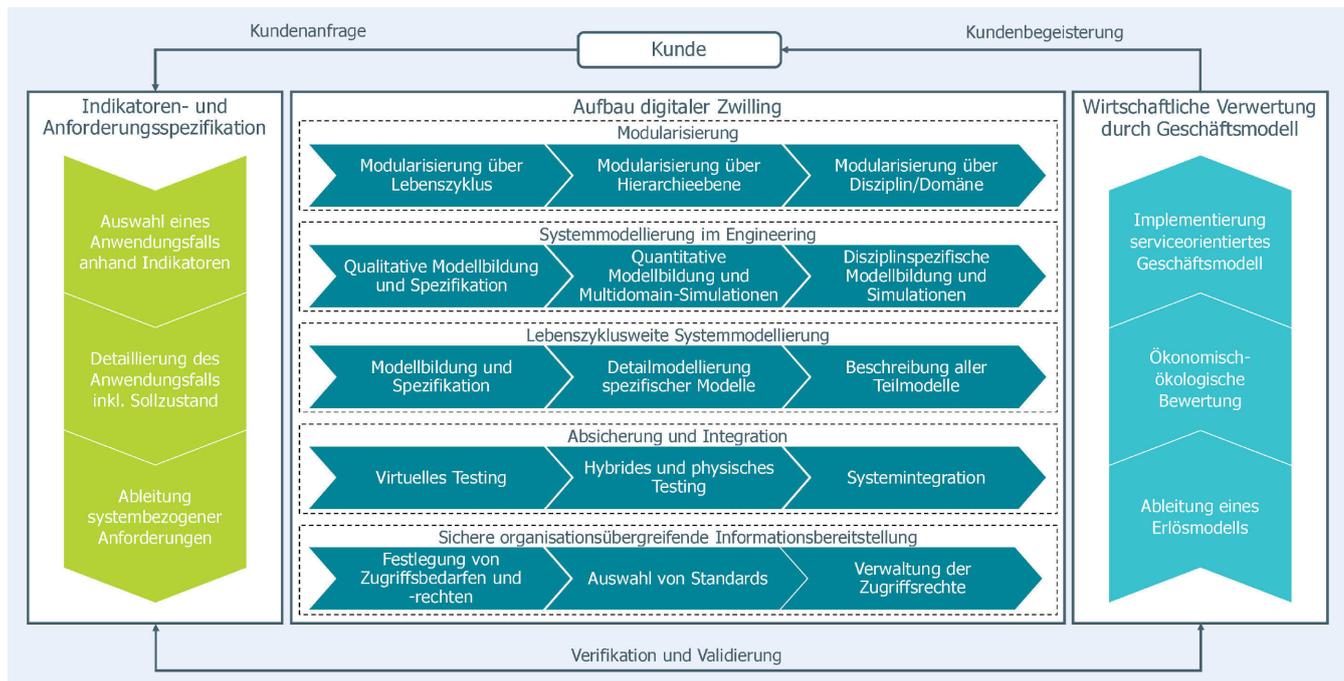


Bild 2. Geschäftsmodellorientierter Ansatz zur Entwicklung digitaler Zwillinge. Grafik: Fraunhofer IAO

Prozess der Informationsbereitstellung sicher und organisationsübergreifend gestaltet. Die einzelnen Phasen und Schritte aus Bild 2 werden in den folgenden Sektionen erläutert.

4.1 Indikatoren- und Anforderungsspezifikation

Für eine effektive und effiziente Entwicklung digitaler Zwillinge empfiehlt es sich, diese für bestimmte Anwendungsfälle zu konfigurieren beziehungsweise auszuprägen. Dabei sollten vorzugsweise bestehende Ansätze aus der Literatur berücksichtigt werden, um wichtige Erkenntnisse für das eigene Entwicklungsprojekt zu gewinnen. Die Tabelle in Kapitel 3 kann dabei als Entscheidungsunterstützung zur Auswahl eines passenden Anwendungsfalls anhand von Indikatoren herangezogen werden. Nach Auswahl gilt es den Anwendungsfall unternehmensspezifisch zu detaillieren und einen Sollzustand, bestenfalls anhand der festgelegten Indikatoren zu skizzieren. Aus diesem Sollzustand werden anschließend systembezogene Anforderungen abgeleitet, welche im Sinne des Model Based Systems Engineering (MBSE) digital verwaltet werden können, um den jeweiligen digitalen Zwillings in der Folge aufbauen zu können.

4.2 Aufbau digitaler Zwillings

Der geschäftsmodellorientierte Ansatz für die Entwicklung digitaler Zwillinge ist von der Integration aller über den Produktlebenszyklus generierten Datensätze und Partialmodelle gekennzeichnet, welche in einem lebenszyklusweiten Systemmodell beschrieben beziehungsweise verwaltet werden können. Dieses lebenszyklusweite Systemmodell sollte im Idealfall das integrierte Systemmodell, also das Systemmodell mit disziplinspezifischen Produktmodellen, aus dem Engineering umfassen und über den Produktlebenszyklus mit weiteren Partialmodellen wie Wartungshistorie, Prozess- und Betriebsdaten sowie Daten und Modellen aus der End-of-Life-Phase angereichert werden. Zudem ist auf

die Auslegung eines Ökosystems für den sicheren und organisationsübergreifenden Informationsaustausch zu achten.

4.2.1 Modularisierung

Ein Konzept zur Modularisierung digitaler Zwillinge über drei Dimensionen wird in Bild 3 skizziert. Um die Module zu systematisieren, eignet es sich besonders, die Partialmodelle und Daten entlang des Produktlebenszyklus nach ihrer Herkunft zu klassifizieren. Durch die Kombination von Daten und Modellen aus der Engineering-Phase mit meist datengetriebenen Modellen aus der Produktions-, Nutzungs- und End-of-Life (EoL)-Phase können Daten- und Informationslücken geschlossen werden. Hybride Ansätze kombinieren datengetriebene und physikbasierte Methoden, um konzeptspezifische Limitationen zu kompensieren.

Neben der zeitlichen Dimension, also der Datenherkunft entlang des Produktlebenszyklus, ist die Modularität des digitalen Zwillinges durch die Interdisziplinarität komplexer Systeme gekennzeichnet. Diese erfordert die Integration verschiedener Fachdisziplinen in den Produktentwicklungsprozess, insbesondere der Mechanik, Elektrik/Elektronik (E/E) und Software bei mechatronischen Systemen. Zusätzlich ist es nötig, Benutzerrollen über den gesamten Produktlebenszyklus zu integrieren, um sicherzustellen, dass alle Benutzerrollen, Disziplinen und Abteilungen über das Systemmodell als Single-Source-of-Truth mit aktuellen Informationen versorgt werden und diese gleichzeitig aktualisieren können.

Eine weitere Modularisierungsdimension berücksichtigt die Gliederung der Partialmodelle in Hierarchieebenen, um den Umfang des Produkts zu definieren. Bestehende Hierarchieebenen in der Literatur sind stark auf die Produktion bezogen und konzentrieren sich daher auf Aspekte wie Maschinen und Fabriken. Bei diesem Modularisierungsansatz liegt der Fokus auf dem Produkt selbst. Dieser Ansatz umfasst die folgenden Hierarchieebenen: Komponente, Baugruppe und Produkt.

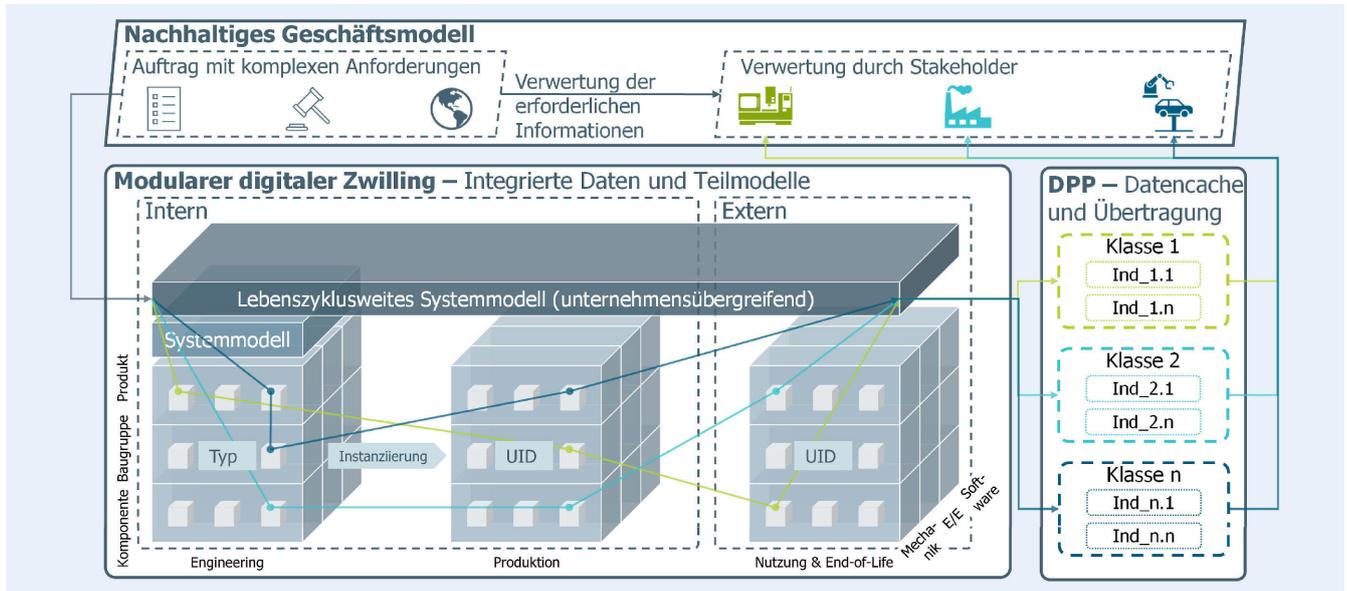


Bild 3. Modularisierungskonzept für digitale Zwillinge. Grafik: Fraunhofer IAO

4.2.2 Systemmodellierung im Engineering

Die Systemmodellierung im Engineering verfolgt im Kern das Paradigma des MBSE als multidisziplinären Ansatz, mit dem Ziel, eine harmonische Systemlösung unter Berücksichtigung diverser Bedarfe beteiligter Stakeholder zu entwickeln [50]. Dabei empfiehlt sich eine erweiterte Perspektive des V-Modells [51, 52] nach VDI 2206 [53], um die Systemmodellierung im Engineering zu unterteilen. Zunächst wird das System mittels qualitativer Modelle beschrieben. Diese enthalten Anforderungen, Funktionen und Strukturen des Systems, wobei noch kein Verhalten des Systems simuliert werden kann. Für die qualitative Modellbildung und Spezifikation eignen sich Modellierungssprachen, die eine formalisierte, maschinenlesbare Modellierung ermöglichen. Eine relativ weit verbreitete Sprache mit grafischer Notation für einen intuitiven Zugang zum Systemmodell ist die von der Object Management Group standardisierte „Systems Modeling Language“ (SysML), die auf der „Unified Modeling Language“ (UML) aufsetzt [50].

Im Anschluss an die qualitative Modellbildung und Spezifikation mit Fokus auf logischen oder funktionalen Modellen werden auf der Ebene darunter quantitative Modelle entwickelt, mit welchen auch erste Verhaltenssimulationen durchgeführt werden können. Meist kommen hier Multidomain-Simulationen zur Integration mehrerer Fachdisziplinen zum Einsatz, die auf der signalfluss- sowie objektorientierten Modellierung basieren [54, 55]. Geeignete Modellierungs- und Simulationswerkzeuge sind etwa „Matlab/Simulink“ (signalflussorientiert) oder „Simscape“ (objektorientiert), das Simulink um Bibliotheken mit vordefinierten Komponenten erweitert. Eine Open-Source Alternative stellt „OpenModelica“ dar, die auf der objektorientierten, deklarativen, domänenübergreifenden Modellierungssprache „Modelica“ basiert [54, 55].

Zwischen der quantitativen Modellbildung mit Multidomain-Simulationen und der disziplinspezifischen Modellbildung muss das logische beziehungsweise funktionale System physischen Komponenten zugeordnet werden, welche dann an das klassische

Engineering für die disziplinspezifische Modellierung und Simulation übergeben werden. Auf dieser Ebene werden unter Verwendung von mechanischen und elektrisch/elektronischen CAD-Systemen, Anwendungen der Software-Entwicklung sowie disziplinspezifischer Simulationssoftware Mechanik-CAD-, Elektrik/Elektronik-CAD-, CAE-Modelle sowie Softwarecode entwickelt und detailliert ausgelegt, wobei der integrative Blick auf das Gesamtsystem erhalten bleibt. Aktualisierungen in einer Disziplin werden über das Systemmodell an alle anderen Disziplinen übergeben.

4.2.3 Lebenszyklusweite Systemmodellierung

Die lebenszyklusweite Systemmodellierung hat die Aufgabe, den Daten- und Informationskreislauf zu schließen und damit den digitalen Zwilling über den Produktlebenszyklus vollständig auszulegen. Das Ziel ist die Integration und Interoperabilität von Systemen sowie die Integration und Wiederverwendung von Daten und Modellen entlang des gesamten Produktlebenszyklus. Das lebenszyklusweite Systemmodell verknüpft organisationsübergreifend alle Partialmodelle und Datensätze über den Produktlebenszyklus.

Die Verwaltungsschale (Asset Administration Shell – AAS) liefert hierfür einen standardisierten Lösungsansatz. Sie ist die standardisierte digitale Repräsentation eines Assets nach IEC 63278-1 ED1 [56] und deckt den gesamten Lebenszyklus eines Assets von der Konzeption bis zum End-of-Life ab.

Sobald auf übergeordneter Ebene das lebenszyklusweite Systemmodell gebildet wurde, gilt es auch in dieser Phase spezifische Modelle detailliert zu entwickeln. Dazu zählen vor allem Modelle auf Basis erfasster und verarbeiteter Prozess- oder Nutzungs- und Betriebsdaten, welche unter Verwendung von Algorithmen des maschinellen Lernens analysiert werden. Die resultierenden KI-basierten Modelle wie Klassifikations-, Regressions- sowie Clustering-Modelle dienen beispielsweise zu Vorhersagezwecken. Für die Datenerfassung und -verarbeitung muss die informations- und kommunikationstechnische Daten-Pipeline ausgelegt werden.

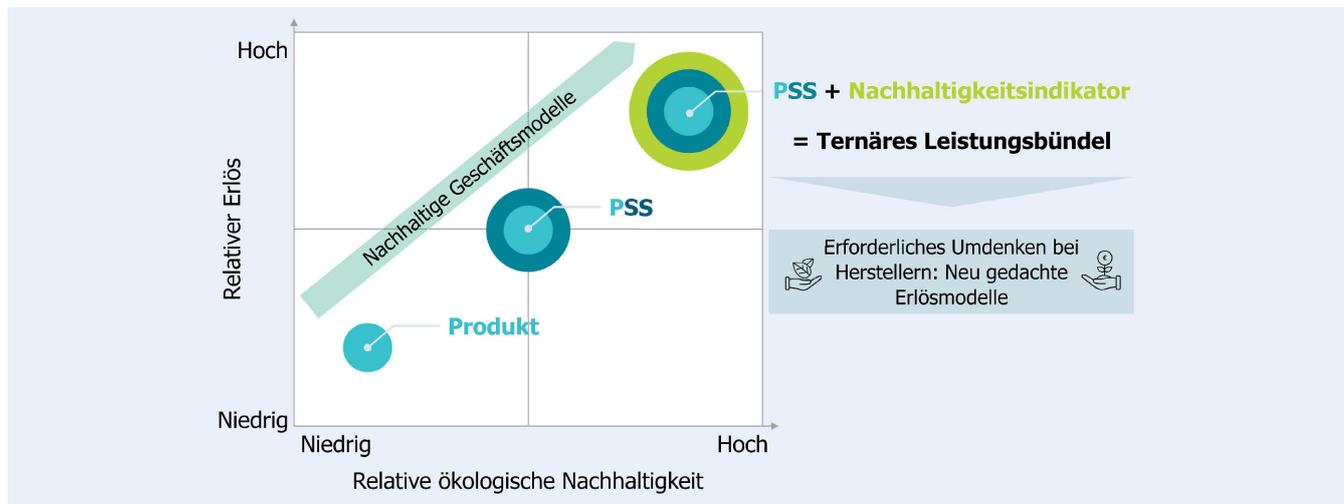


Bild 4. Portfolio Erlös zu ökologischer Nachhaltigkeit. Grafik: Fraunhofer IAO

Dies beginnt je nach Reifegrad bei der Auswahl der notwendigen Messprinzipien beziehungsweise der mechanischen Integration der dazugehörigen Sensorik. Weiterhin müssen die Daten aggregiert werden, beispielsweise unter Verwendung eines Gateways. Auf dieser aggregierten Datengrundlage können sodann Datenanalysen durchgeführt werden.

Die detailmodellierten Partialmodelle – vorrangig KI-basierte Modelle – aus Produktion, Nutzung beziehungsweise Betrieb und End-of-Life müssen in einer für das lebenszyklusweite Systemmodell kompatiblen Form beschrieben werden. Ebenso gilt es, das integrierte Systemmodell aus dem Engineering mit den disziplinspezifischen Produktmodellen in das lebenszyklusweite Systemmodell zu integrieren beziehungsweise es für dieses zu beschreiben. Hierfür existieren Empfehlungen seitens der Industrial Digital Twin Association e.V. (IDTA) [56], jedes Partialmodell nach bestimmten Kriterien zu beschreiben, um eine effektive und effiziente Verwaltung sicherzustellen.

4.2.4 Absicherung und Integration

Am Ende jeder Modellbildung müssen die Komponenteneigenschaften durch virtuelle und hybride Tests gezielt abgesichert werden [52]. Für echtzeitfähige Simulationen auf Basis des digitalen Zwillings werden beispielsweise kinematische Verhaltensmodellierungen zur Absicherung der realen Steuereinheit im Simulationsmodell durchgeführt [10]. Nach Zusammenführung aller Komponenten und Teilsysteme muss sichergestellt werden, dass diese anforderungsgerecht miteinander interagieren und funktionieren. Hierfür werden nach der Systemintegration das vollständige System als Ganzes getestet, um sicherzustellen, dass Anforderungen und Spezifikationen erfüllt werden. Gesammelte Erkenntnisse aus dem Feld vorheriger Systemgenerationen gilt es dabei explizit zu berücksichtigen.

4.2.5 Sichere organisationsübergreifende Informationsbereitstellung

Der geschäftsmodellorientierte Entwicklungsansatz sieht vor, die generierten Nachhaltigkeitsindikatoren in einen modellbezogenen und übertragbaren Datensatz zu integrieren, von dem

verschiedene Akteure des Wertschöpfungsnetzwerks profitieren können. Hierbei empfiehlt es sich, diesen Datensatz mit verschiedenen Nachhaltigkeitsklassen, zum Beispiel Emissionsverhalten, Demontierbarkeit, Reparierbarkeit und Energieeffizienz, vorab zu definieren. Dabei müssen die im Engineering simulierten oder prognostizierten Nachhaltigkeitsindikatoren über den Lebenszyklus laufend überschrieben werden, wenn es zu Änderungen während der Produktion sowie des Betriebs kommt.

Der Nutzen eines übertragbaren Datensatzes für Unternehmen liegt in der konsistenten, weniger komplexen und fehleranfälligen Übertragung von lebenszyklusweiten Daten. Zudem werden wettbewerbsrelevante Informationen ausgeschlossen und eine klare Kommunikation über datenbezogene Anforderungen gewährleistet. Dafür gilt es, Zugriffsbedarfe und -rechte über das gesamte Wertschöpfungsnetzwerk klar vorab zu definieren. Um dies digital und ohne Daten- und Informationsverlust über Organisations- und Systemgrenzen hinweg zu ermöglichen, müssen die Prozesse der Zusammenarbeit unter größtmöglicher Berücksichtigung von Standards gestaltet werden. Beispielsweise könnten neutrale Datenformate für die system- oder organisationsübergreifende Bereitstellung von digitalen Produktmodellen in Verbindung mit Nachhaltigkeitsindikatoren etabliert werden. Die anfangs festgelegten Zugriffsrechte müssen über die gesamte Produktlaufzeit von einer Instanz verwaltet werden.

4.3 Wirtschaftliche Verwertung

Der digitale Zwilling erleichtert die Verwertung von Nachhaltigkeitsindikatoren, indem er dem in Bild 4 dargestellten Konzept folgt. Die über den digitalen Zwilling generierten Nachhaltigkeitsindikatoren können anschließend an verwertende Akteure innerhalb des Wertschöpfungsnetzes verkauft werden, was zu neuen innovativen Möglichkeiten für nachhaltige Geschäftsmodelle führt. Das Fortschreiten in Richtung Dienstleistungsorientierung, von reinen Sachgütern zu PSS und ternären Leistungsbündeln, das heißt PSS plus Nachhaltigkeitsindikator, trägt wesentlich zur Erlössteigerung der angebotenen Lösung bei. Bild 4 veranschaulicht diese These anhand eines Portfolios, in dem das Verhältnis von relativer ökologischer Nachhaltigkeit und relativem Erlös dargestellt ist.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ökologisch nachhaltige Geschäftsmodelle werden zu einem wichtigen Wettbewerbsfaktor für produzierende Unternehmen. Digitale Zwillinge mit ihren vielfältigen Anwendungsfällen dienen hierbei als Befähiger, indem sie die Generation und Nutzung von Nachhaltigkeitsindikatoren datenbasiert unterstützen. Die daraus resultierenden sogenannten ternären Leistungsbündel als Summe aus Produkt-Service-Systemen plus Nachhaltigkeitsindikatoren bieten viele Chancen, die Erlöse von Unternehmen zu steigern und gleichzeitig die Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit ihrer Produkte zu verbessern.

In diesem Beitrag wurde ein geschäftsmodellorientierter Entwicklungsansatz für digitale Zwillinge in der Industrie vorgestellt, der es erlaubt, skalierbar und flexibel verschiedene Anwendungsfälle im Nachhaltigkeitskontext zu realisieren. Die Anwendungsfälle wiederum bieten das Potenzial, Nachhaltigkeitsindikatoren im Sinne nachhaltiger Geschäftsmodelle wirtschaftlich zu verwerten. Hierfür müssen zukünftige Forschungsaktivitäten den Fokus auf die Geschäftsmodellimplementierung auf Grundlage der beschriebenen Anwendungsfälle legen, damit Unternehmen die Erkenntnisse zur Entwicklung unternehmensindividueller Erlösmodelle nutzen können. Weiterhin soll in Folgeaktivitäten der geschäftsmodellorientierte Entwicklungsansatz anhand verschiedener Geschäftsmodelle validiert und evaluiert werden.

FÖRDERHINWEIS UND DANKSAGUNG

Der Inhalt dieses Beitrags ist Teil der Arbeit im Projekt „Eco-Pass3D“. Dieses Projekt wird vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg im Innovationsförderprogramm Invest BW „GreenTech“ gefördert. Die Autoren möchten sich bei den Fördermittelgebern bedanken, ohne die diese Publikation nicht möglich gewesen wäre.

Literatur

- [1] Lindemann, U.; Maurer, M.: Facing Multi-Domain Complexity in Product Development. In: Krause, FL. (eds) *The Future of Product Development*. Heidelberg: Springer-Verlag 2007, S. 351–361
- [2] Stark, R.; Anderl, R.; Thoben, K.-D. et al.: WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020) s1, S. 47–50
- [3] Eigner, M.; Detzner, A.; Schmidt, P. H. et al.: Definition des Digital Twin im Produktlebenszyklus. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019) 6, S. 345–350
- [4] Barni, A.; Fontana, A.; Menato, S. et al.: Exploiting the digital twin in the assessment and optimization of sustainability performances. 2018 International Conference on Intelligent Systems (IS), Funchal, Portugal, 2018, pp. 706–713
- [5] Werner, A.; Zimmermann, N.; Lentjes, J.: Approach for a holistic predictive maintenance strategy by incorporating a digital twin. *Procedia Manufacturing* 39 (2019), pp. 1743–1751
- [6] Werner, A.; Angadi, V. C.; Lentjes, J. et al.: Vorausschauende Instandhaltung – Wenn der Digitale Schatten an seine Grenzen stößt. Harmonisierung datengetriebener und physikbasierter Modelle für die vorausschauende Instandhaltung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 115 (2020) 5, S. 335–339
- [7] Werner, A.; Lentjes, J.; Zimmermann, N.: Digitaler Zwilling zur vorausschauenden Instandhaltung in der Produktion – Physikbasierte Modellierung und Simulation zur Optimierung datengetriebener Modelle. *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung, SSP 2021*, S. 139–150
- [8] Bergs, T.; Gierlings, S.; Augspurger, T. et al.: Enabling Sustainable Production with the Digital Twin. 30. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2021, S. 106–175
- [9] Scheifele, C.: *Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2019
- [10] Scheifele, C.; Verl, A.; Riedel, O.: *Echtzeit-Co-Simulation für die Virtuelle Inbetriebnahme*. *atp magazin* 60 (2018) 11–12, S. 44–55
- [11] Scheifele, C.; Verl, A.; Riedel, O.: Real-time co-simulation for the virtual commissioning of production systems. *Procedia CIRP* 79 (2019), pp. 397–402
- [12] Hollas, L.; Schenke, C.-C.; Hellmich, A.: Approach of Model Extension for Virtual Commissioning to Predict Energy Consumption of Production Systems. *Journal of Machine Engineering* 23 (2023) 4, doi.org/10.36897/jme/174867
- [13] Brovkina, D.; Riedel, O.: Automatisierte Planung von Montagelinien. *WT Werkstattstechnik* 110 (2020) 9, S. 591–596
- [14] Mo, F.; Rehman, H. U.; Monetti, F. M. et al.: A framework for manufacturing system reconfiguration and optimisation utilising digital twins and modular artificial intelligence. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 82 (2023) #102524, pp. 1–19
- [15] Panarotto, M.; Isaksson, O.; Vial, V.: Cost-efficient digital twins for design space exploration: A modular platform approach. *Computers in Industry* 145 (2023) #103813, pp. 1–13
- [16] Oestersötebier, F.: *Modellbasierter Entwurf intelligenter mechatronischer Systeme mithilfe semantischer Technologien*. Dissertation, Universität Paderborn, 2018
- [17] Vajna, S.; Weber, C.; Zeman, K. et al.: *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. Heidelberg: Springer-Verlag 2018
- [18] Lindemann, U.: *Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden*. Heidelberg: Springer-Verlag 2009
- [19] Qamsane, Y.; Moyne, J.; Toothman, M. et al.: A Methodology to Develop and Implement Digital Twin Solutions for Manufacturing Systems. *IEEE Access* 9 (2021), pp. 44247–44265
- [20] Dekkers, R.; Carey, L.; Langhorne, P.: *Making Literature Reviews Work: A Multidisciplinary Guide to Systematic Approaches*. Cham: Springer International Publishing 2022
- [21] Akhail, S.: Navigating the Potential Applications and Challenges of Intelligent and Sustainable Manufacturing for a Greener Future. *Evergreen* 10 (2023) 4, pp. 2237–2243
- [22] He, B.; Bai, K. J.: Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: a review. *Advances in Manufacturing* 9 (2021) 1, pp. 1–21
- [23] Huang, Z.; Shen, Y.; Li, J. et al.: A survey on AI-driven digital twins in industry 4.0: Smart manufacturing and advanced robotics. *Sensors* 21 (2021) 19, #6340
- [24] Oettl, F.; Schoeler, J.; Schilp, J. (Hrsg.): *Development of a method for evaluating the benefits of using a digital twin*. International Conference on Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering, ICECCME 2022, pp. 1–7
- [25] Preut, A.; Kopka, J.-P.; Clausen, U.: Digital twins for the circular economy. *Sustainability (Switzerland)* 13 (2021) 18, # 10467
- [26] Zacharakis, A.; Vafeiadis, T.; Kolokas, N. et al.: RECLAIM: Toward a New Era of Refurbishment and Remanufacturing of Industrial Equipment. *Frontiers in Artificial Intelligence* 3 (2021), doi.org/10.3389/frai.2020.570562
- [27] Yu, W.; Patros, P.; Young, B. et al.: Energy digital twin technology for industrial energy management: Classification, challenges and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 161 (2022) #112407
- [28] Pohlkötter, F. J.; Straubinger, D.; Kuhn, A. M. et al.: Unlocking the Potential of Digital Twins. In: Kiefl, N.; Wulle, F.; Ackermann, C. et al. (Hrsg.): *Advances in Automotive Production Technology – Towards Software-Defined Manufacturing and Resilient Supply Chains*. Cham: Springer International Publishing 2023, pp. 190–199
- [29] Singh, M.; Srivastava, R.; Fuenmayor, E. et al.: Applications of Digital Twin across Industries: A Review. *Applied Sciences (Switzerland)* 12 (2022) 11, #5727
- [30] Fett, M.; Wilking, F.; Goetz, S. et al.: A Literature Review on the Development and Creation of Digital Twins, Cyber-Physical Systems, and Product-Service Systems. *Sensors* 23 (2023) 24, #9786
- [31] Helen, A.; Zhang, X.; Fink, O. et al.: A comprehensive review of digital twin – part 1: modeling and twinning enabling technologies. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 65 (2022) 12, # 354
- [32] Xie, Y.; Lian, K.; Liu, Q. et al.: Digital twin for cutting tool: Modeling, application and service strategy. *Journal of Manufacturing Systems* 58 (2021), pp. 305–312
- [33] Ke, C.; Pan, X. Y.; Wan, P. et al.: An Intelligent Redesign Method for Used Products Based on Digital Twin. *Sustainability (Switzerland)* 15 (2023) 12, #9702

- [34] Riedelsheimer, T.; Dorfhuber, L.; Stark, R.: User centered development of a digital twin concept with focus on sustainability in the clothing industry. *Procedia CIRP* 90 (2020), pp. 660–665
- [35] Mügge, J.; Erdmann, J. G.; Riedelsheimer, T. et al.: Empowering End-of-Life Vehicle Decision Making with Cross-Company Data Exchange and Data Sovereignty via Catena-X. *Sustainability (Switzerland)* 15 (2023) 9, #7187
- [36] Seegrün, A.; Kruschke, T.; Mügge, J. et al.: Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review. *Procedia CIRP* 119 (2022), pp. 776–781
- [37] Hehenberger, P.; Leherbauer, D.; Penas, O. et al.: Holistic System Modelling and Analysis for Energy-Aware Production: An Integrated Framework. *Systems* 11 (2023) 2, doi.org/10.3390/systems11020100
- [38] Ma, S. Y.; Zhang, Y. F.; Liu, Y. et al.: Data-driven sustainable intelligent manufacturing based on demand response for energy-intensive industries. *Journal of Cleaner Production* 274 (2020) #123155
- [39] Matsunaga, F.; Zytowski, V.; Valle, P. et al.: Optimization of Energy Efficiency in Smart Manufacturing Through the Application of Cyber-Physical Systems and Industry 4.0 Technologies. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME* 144 (2022) 10, #102104
- [40] Matta, A.; Lugaresi, G.: Digital Twins: Features, Models, And Services. *Proceedings of the 2023 Winter Simulation Conference, San Antonio, TX, USA, 2023*, pp. 46–60
- [41] Cimino, C.; Negri, E.; Fumagalli, L.: Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry* 113 (2019) #103130
- [42] Lürken, C.; Grünert, G.; Stauder, L. et al.: Concept for life cycle oriented ecological assessment in tooling. *Procedia CIRP* 120 (2022), pp. 362–367
- [43] Turner, C.; Oyekan, J.: Manufacturing in the Age of Human-Centric and Sustainable Industry 5.0: Application to Holonic, Flexible, Reconfigurable and Smart Manufacturing Systems. *Sustainability (Switzerland)* 15 (2023) 13, #10169
- [44] Rocca, R.; Rosa, P.; Sassanelli, C. et al.: Integrating virtual reality and digital twin in circular economy practices: A laboratory application case. *Sustainability (Switzerland)* 12 (2020) 6, #2286
- [45] Hammerschmid, M.; Rosenfeld, D. C.; Bartik, A. et al.: Methodology for the Development of Virtual Representations within the Process Development Framework of Energy Plants: From Digital Model to Digital Predictive Twin—A Review. *Energies* 16 (2023) 6, #2641
- [46] Kies, A. D.; Krauß, J.; Schmetz, A. et al.: Interaction of Digital Twins in a Sustainable Battery Cell Production. *Procedia CIRP* 107 (2022), pp. 1216–1220
- [47] Turan, E.; Konuşkan, Y.; Yıldırım, N. et al.: Digital twin modelling for optimizing the material consumption: A case study on sustainability improvement of thermoforming process. *Sustainable Computing: Informatics and Systems* 35 (2022) #100655
- [48] Zhao, L.; Fang, Y.; Lou, P. et al.: Cutting Parameter Optimization for Reducing Carbon Emissions Using Digital Twin. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 22 (2021) 5, pp. 933–949
- [49] Werner, A.; Mendez-Rial, R.; Salvo, P. et al.: Architecture for Predictive Maintenance Based on Integrated Models, Methods and Technologies. In: Huang, C. Y., Dekkers, R., Chiu, S. F. et al. (eds): *Intelligent and Transformative Production in Pandemic Times*. *Lecture Notes in Production Engineering*. Cham: Springer 2023, pp. 259–274
- [50] Friedenthal, S.: *A Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*. Burlington/MS.: Morgan Kaufmann 2008
- [51] Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R.: *Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung*. Heidelberg: Springer Vieweg 2014
- [52] Eigner, M.: *Modellbasierter Entwicklungsprozess Cybertronischer Systeme*. Der PLM-Unterstützte Referenzentwicklungsprozess Für Produkte und Produktionssysteme. Heidelberg: Springer 2017
- [53] VDI/VDE 2206: *Entwicklung mechatronischer und cyber-physischer Systeme*. Ausgabe November 2021
- [54] Schröder, D.: *Regelung von Antriebssystemen*. Heidelberg: Springer Vieweg 2015
- [55] Schmitt, T. L.; Andres, M.: *Methoden zur Modellbildung und Simulation mechatronischer Systeme*. Bondgraphen, objektorientierte Modellierungstechniken und numerische Integrationsverfahren. Wiesbaden: Springer Vieweg 2019
- [56] Industrial Digital Twin Association e.V.: IDTA – Der Standard für den Digitalen Zwilling. Internet: industrialdigitaltwin.org/. Zugriff am 29.05.2024



Andreas Werner, M.Sc. 

Foto: Fraunhofer IAO
andreas.werner@iao.fraunhofer.de
Tel. +49 711 / 970-2289

Frauke Schuseil, M.Sc. 

Dipl.-Ing. Nikolas Zimmermann 

Dr.-Ing. Moritz Hämmerle 

Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel 

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft
und Organisation IAO 
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.iao.fraunhofer.de

