



## Digitale Zwillinge für ressourceneffizienten Produktionsprozess

# Fusion der biologischen und industriellen Transformation

T. Riedelsheimer, L. Faßbender, K. Lindow

**ZUSAMMENFASSUNG** Globale Themen wie die Klimakrise und Ressourcenknappheit sowie verstärkte regulatorische Anforderungen fordern die industrielle Wertschöpfung heraus. Digitale Lösungen ermöglichen eine nachhaltigere und zirkuläre Produktion. Die Idee der Biologischen Transformation überträgt biologische Prinzipien auf Prozesse im Produktlebenszyklus und kombiniert sie mit Industrie 4.0-Technologien. Ein Ansatz sind Digitale Zwillinge, die Transparenz und Optimierung von Produkten, beispielsweise aus biobasierten Materialien, fördern.

**STICHWÖRTER**

Digitalisierung, Nachhaltigkeit, Biologie und Technik

## Digital Twins as enabler of biological principles in the resource efficient production environment

**ABSTRACT** Global issues such as the climate crisis and resource scarcity, along with increased regulatory requirements, challenge industrial value creation. Digital solutions enable more sustainable and circular production. The idea of Biological Transformation transfers biological principles to processes in the product lifecycle and combines them with Industry 4.0 technologies. One approach is Digital Twins, which promote transparency and optimization of products, for example, those made from bio-based materials.

## 1 Einleitung

Die Herausforderungen der aktuellen Zeit, wie der demografische Wandel, Individualisierung, Digitalisierung, zunehmende Verknappung natürlicher Ressourcen und die steigende Nachfrage nach Nachhaltigkeit zwingen die fertigende Industrie zu einem Umdenken [1]. Als Antwort auf viele dieser Anforderungen setzen Unternehmen auf neue technologische Ansätze aus dem Kontext Industrie 4.0 und digitale Transformation [2]. Im Hinblick auf die vierte industrielle Revolution stehen Produktivitätssteigerungen, Flexibilitätsverbesserungen und Kostensenkungen im Vordergrund, während Nachhaltigkeit oft eine untergeordnete Rolle spielt [3]. Gleichzeitig steigen die regulatorischen Anforderungen der Europäischen Union im Rahmen des Green Deals [4] und der mittlerweile verabschiedeten Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (deutsch für Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)) [5].

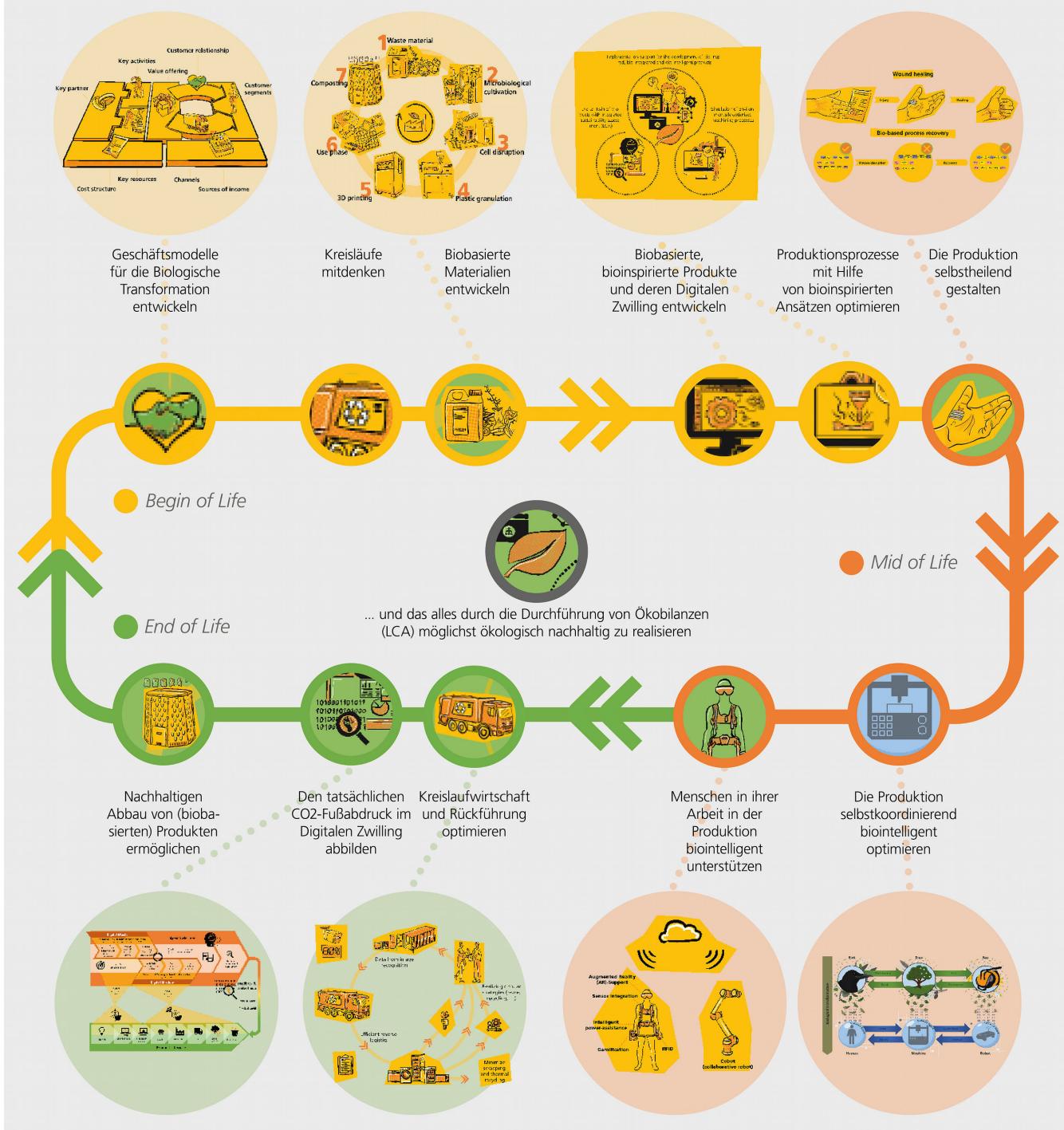
Hier kommt die Biologische Transformation (BT) ins Spiel – ein ganzheitlicher Ansatz zur Veränderung der industriellen Wertschöpfung hin zu nachhaltig optimierten Produktionssystemen durch eine beschleunigte Konvergenz technischer, digitaler und biologischer Systeme in der Fertigungsumgebung [6]. Unter der Biologischen Transformation wird ganz generell die Übertragung von Prinzipien natürlicher Systeme auf technische

Materialien, Strukturen und Prozesse verstanden. Ziel ist es, eine nachhaltige Wertschöpfung zu erreichen [7]. Wesentliche Konzepte der Biologischen Transformation sind

- Inspiration: Lernen von der Beobachtung der Natur für die Anpassung von Technik,
  - Integration: Symbiose technischer Systeme nach biologischem Vorbild
  - und Interaktion: Verflechtung der Natur mit der Technik [8].
- Die Studie „Biotrain“ definiert aus produktionstechnischer Perspektive unter „Biointelligenz“ die biologische Transformation als das Zusammenwirken von technischen, informationstechnischen und biologischen Systemen [9]. Auf internationaler Ebene wurde das White Paper „Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing“ veröffentlicht, welches die zuvor genannten Ansätze der Biologischen Transformation in selber Weise aus produktionstechnischer Sicht beschreibt [10]. Die Übernahme von Prinzipien der Natur durch die Übertragung von Materialien, Strukturen und Prozessen aus natürlichen in digitale Ökosysteme birgt großes Potenzial für eine nachhaltige und ressourceneffiziente Fertigung [11].

Vor diesem Hintergrund erforschte das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) zusammen mit weiteren 12 Partnern im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes

## Product Life Cycle



**Bild 1.** Projekt BioFusion 4.0: Die verschiedenen Ansätze entlang des Lebenszyklus. *Grafik: Fraunhofer IPK*

„BioFusion 4.0“ [14] verschiedene Technologien und Lösungen für die Produktion von Morgen. In diesem Beitrag wird insbesondere das Konzept Digitaler Zwillinge von Produkten in den Vordergrund gestellt. Das Konzept des Digitalen Zwillings (DZ) stellt einen vielversprechenden Ansatz dar, um ein vernetztes, selbstregulierendes Ökosystem zu schaffen, dessen Stabilität und

Widerstandsfähigkeit im Hinblick auf ökologische Parameter überwacht und gesteuert werden sollen [12, 13]. Insbesondere für die Steigerung der Transparenz über Informationen zu einzelnen Produktinstanzen können Digitale Zwillinge ein wichtiger Enabler sein. Es wurde unter anderem ein vernetzter Produktionsdemonstrator am Beispiel des biobasierten 3D-Drucks umge-

setzt. Teil davon ist ein Digitaler Zwilling zur Vernetzung von Produktionsprozessen und Produktdaten mit dem Ziel, deren Umweltwirkungen transparent zu machen.

## 2 Das Projekt BioFusion 4.0

Das Projekt BioFusion 4.0 ist im Mai 2024 geendet und hat mit insgesamt neun Industriepartnern für Technologie und Anwendung sowie zwei Forschungspartnern und zwei assoziier-ten Partnern über drei Jahre Lösungen zur Integration biologischer Prinzipien in die Industrie 4.0 entwickelt. Die Vernetzung der verschiedenen Lösungen und Ansätze war von entscheidender Bedeutung, um eine Optimierung der Wertschöpfung entlang des gesamten Lebenszyklus zu ermöglichen. Für die Integration biologischer Prinzipien wurde dementsprechend der gesamte Produktlebenszyklus betrachtet (siehe **Bild 1**).

Die erste Phase des Produktlebenszyklus, Begin of Life (BoL), wird auf strategischer Unternehmensebene geprägt. Hierfür wurden Optimierungsmöglichkeiten für Geschäftsmodelle ausgearbeitet, um die Biologische Transformation in die Strategie von Unternehmen zu integrieren. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Kreislaufwirtschaft. Auch in der Produktentwicklung und insbesondere der Materialentscheidung greift die Biologische Transformation. Um Produkte so zirkulär und ressourcenschonend wie möglich auszulegen, wurden biogene Materialien entwickelt, welche biologisch abbaubar sind und sich somit am Ende des Lebenszyklus vollständig zersetzen. Darüber hinaus wurden zur Transformierung des Engineering Ansätze zur Entwicklung bio-inspirierter, biointegrierter und biointelligenter Produkte sowie deren digitalen Zwillinge erforscht. Digitale Zwillinge werden während der frühen Phase der Produktentwicklung erstellt und während des Lebenszyklus des Produktes mit Daten angereichert, welche laufend ausgewertet werden können.

Für die Produktions- und Nutzungsphase, Mid of Life (MoL), wurden biologische Prinzipien zum einen durch das Prinzip der Selbstheilung in Produktionsprozesse integriert. Die entwickelte Lösung ermöglicht es, Abweichungen im Prozess automatisch zu erkennen und eigenständig zu reagieren. Eine zweite Lösung realisiert eine selbstkoordinierte und biointelligente, optimierte Produktion. Dabei wurde mithilfe von einem agentenbasierten Software-Ansatz (Multi-Agenten-System) ein dezentrales Kommunikationsnetzwerk zwischen Menschen, Maschinen und IT-Systemen in der Produktion geschaffen. Zur Unterstützung manueller Tätigkeiten in der Produktion, beispielsweise der Montage, wurde ein biointelligentes Worker-Assistenzsystem entwickelt.

Wenn die betrachteten Produkte ihr Lebensende, das so genannte End of Life (EoL), erreichen, gilt es einerseits die Rückführung der Produkte zur weiteren Verwertung aus logistischer Sicht und den Verwertungsprozess selbst zu optimieren. Dafür wurde ein System mit kamera- und KI-basierter Bilderkennung eingesetzt, um die Reverse Logistic umweltschonender zu gestalten. Zusätzlich können nun durch die im digitalen Zwilling des Produktes gesammelten Daten die tatsächlichen Umweltwirkungen, zum Beispiel anhand des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks, ermittelt werden. Diese Daten werden ebenso verwendet, um die Entscheidung über mögliche und umweltfreundliche Kreislaufstrategien, wie Wiederverwendung oder Recycling der Materialien, zu unterstützen.

Um die Umweltfreundlichkeit der entwickelten Lösungen sowie deren Einfluss auf die Nachhaltigkeit im jeweiligen Anwen-

dungsfall sicherzustellen, wurde begleitend durch eines der Konsortialunternehmen mit LCA-Kompetenz eine Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) der jeweiligen Anwendungsfälle und entwickelten Technologien durchgeführt.

## 3 Stand der Technik zu Digitalen Zwillingen im Kontext Biologische Transformation

Digitale Zwillinge wurden mit einem Fokus auf das Thema Simulation von der NASA geprägt (vgl. [15]). Sie werden seit über zwei Jahrzehnten in der Literatur diskutiert und haben mittlerweile den Stand der industriellen Anwendung erreicht. Es gibt verschiedene Perspektiven auf Digitale Zwillinge (siehe [16]) in Bezug auf das dargestellte System, wie beispielsweise Produktionslinien, Produkte im Einsatz, Produkte in der Entwicklung, und den Anwendungsschwerpunkt. Hierzu zählen die Simulation, Wertschöpfung, Überwachung, Rückmeldung zum Design und viele mehr. Auch die Standardisierung technologischer Enabler hat sich weiterentwickelt. Wichtige Konzepte sind die Asset Administration Shell (AAS) [17], standardisierte Datenmodelle, wie sie von der Industrial Digital Twin Association (IDTA) veröffentlicht wurden, sowie Open-Source-Anwendungen und Schnittstellen in der Produktionsumgebung, wie beispielsweise Eclipse BaSyx [18]. Eine Literaturanalyse von Seegrün *et al.* [12] im des Rahmens Projektes kommt zu dem Schluss, dass es bisher nur vereinzelt Literatur zu Digitalen Zwillingen im Kontext der Biologischen Transformation gibt. Neuere Veröffentlichungen in diesem Bereich schreiben Digitalen Zwillingen ein erhebliches Potenzial für biologisch transformierte Wertschöpfung zu, zum Beispiel durch verbesserte Prozesstransparenz und -planung oder optimierte Produktionssysteme. Die **Tabelle** gibt einen Überblick über relevante Literatur, die den Stand der Technik bilden.

## 4 Digitale Zwillinge im Kontext der biologischen Transformation

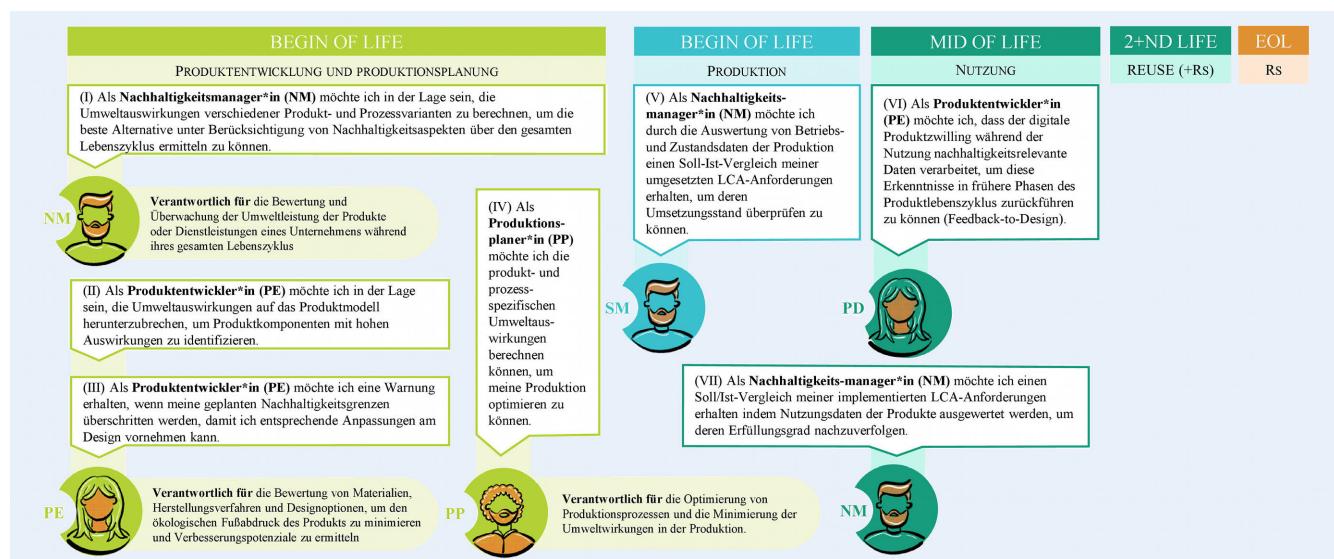
Im Rahmen von BioFusion 4.0 wurde eine Taxonomie zur Verortung biologischer Prinzipien und Technologien [6] erarbeitet. Dabei können Digitale Zwillinge als Teil der Bioinspiration gesehen werden, da sie die Anwendung natürlicher Wirkungsweisen in technischen Systemen und Informationstechnologie durch Selbstabbildung und Selbstkontrolle (so genanntes „Self-X“) umsetzen. Gleichzeitig verflechten sie natürliche und technische Systeme mittels Informationstechnologie und sind somit auch unter der Bio-Interaktion mit der biologischen Repräsentation als digitale Biomarker zu verorten.

Digitale Zwillinge sind in ihrer Ausprägung stark abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall und anvisiertem Nutzen. Zur Entwicklung wurden zunächst Personas identifiziert, die die letztendlichen Endnutzer\*innen im industriellen Kontext entlang des Produkt-Lebenszyklus des Digitalen Zwilling repräsentieren [15]. Im Rahmen des Projektes wurden dafür folgende Personas in den Fokus gestellt: Nachhaltigkeitsmanager\*in (NM), Produktionsplaner\*in (PP) und Produktentwickler\*in (PE) (**Bild 2**). Die Kernanforderungen, die mithilfe von Interviews und Workshops mit den beteiligten Unternehmenspartnern erarbeitet wurden, sind in User Stories dargestellt:

1. CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für einzelne Komponenten beziehungsweise gesamtes Produkt zur Verfügung gestellt bekommen,

**Tabelle.** Übersicht über existierende Literatur im Bereich Digitale Zwillinge und Biologische Transformation.

Titel	Autor*in (et al.)	Jahr	Kurzzusammenfassung
A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems	Negri et al. [16]	2017	Präsentiert eine Übersicht verschiedener Definitionen Digitaler Zwillinge und deren Einsatzszenarien.
Digital Twin	Stark et al. [19]	2019	Präsentiert eine Definition für den Digitalen Zwilling mit Fokus auf erweiterte Services und den Produktlebenszyklus.
The biological transformation of industrial manufacturing – technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry	Miehe et al. [8]	2020	Nennt Digitale Zwillinge als Teil vieler robusten Technologien, die signifikante Zustände von Produkten, Prozessen und Produktionssystemen ständig überwachen und damit eine Voraussetzung für resiliente Fertigungssysteme sind.
Application cases of biological transformation in manufacturing technology	Bergs et al. [2]	2020	Bergs et al. stellen Projekte vor, die BT in der Fertigung anwenden, wie beispielsweise Optimierung selbst-anpassender Produktionssysteme mithilfe von DZ.
Basic consideration for a digital twin of biointelligent systems: Applying technical design patterns to biological systems	Miehe et al. [13]	2020	Entwicklung eines skalierbaren Modells, das strukturelle und funktionale Merkmale biologischer Systeme für die Interoperabilität zwischen Prozessschritten über Unternehmensgrenzen hinweg sowohl für technische als auch für biologische Assets integriert.
Digital Twins for Circular Economy	Mügge et al. [20]	2022	Beschreibt, wie DZ eingesetzt werden können, um die Umweltauswirkungen eines einzelnen Produkts transparent zu machen und die ökologischen Auswirkungen über alle Lebenszyklusphasen hinweg positiv zu beeinflussen.
Digital Twins for real-time Life Cycle Assessment of Products	Riedelsheimer et al. [15]	2023	Anwendung und Validierung des Konzepts der digitalen Produktzwillinge, um eine Darstellung der Umweltauswirkungen eines einzelnen Produkts während seines Lebenszyklus darzustellen.
Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review	Seegrün et al. [21]	2023	Ausführliche Literaturrecherche zu den verschiedenen Perspektiven auf DZ im Kontext Produktlebenszyklus Management.
Digital Twins for Sustainability in the Context of Biological Transformation	Seegrün et al. [12]	2023	DZ als Ansatz, um ein vernetztes, sich selbst regulierendes digitales Ökosystem zu etablieren mit Verortung biologischer Prinzipien im DZ.

**Bild 2.** Relevante Personas der Technologie „Digitale Zwillinge mit integrierter Ökobilanz“ [15]. Grafik: Fraunhofer IPK

2. Umweltwirkungen für verschiedene Materialien entlang des Lebenszyklus vergleichen,
3. verschiedene Varianten von Produkten und/oder Prozessen berechnen, um diejenige mit den geringsten Umweltwirkungen zu identifizieren,
4. gezielt benötigten Input in Form von Energie, Materialien und Ressourcen reduzieren,
5. Soll- / Ist-Vergleich ermöglichen und
6. Feedback to Design: Daten zurückführen und für neue Produkt(alternativen) nutzen.

Auf dieser Basis wurde durch das Team der Forscher\*innen und beteiligten Technologieunternehmen ein Konzept für einen Digitalen Zwilling mit integrierter Ökobilanz (deutsch für Life Cycle Assessment, LCA [22, 23]) entwickelt. Im Kern ist dies eine virtuelle Abbildung eines physischen Produkts oder Systems, das nachhaltigkeitsrelevante Daten während des Lebenszyklus sammelt und analysiert, um die Umweltauswirkungen zu bewerten. Dadurch sollen langfristig Umweltauswirkungen minimiert werden, indem verschiedene Entscheidungen im Lebenszyklus, von der Produktion über die Nutzung bis zur Entsorgung durch den DZ unterstützt werden. Die resultierende Lösung wurde anhand mehrerer Anwendungsfälle im Kontext der Produktion evaluiert. [15]

## 5 Integrierter Technologiedemonstrator zur Biologischen Transformation

Zur Darstellung der entwickelten Technologien wurde ein digital vernetzter integrierter Demonstrator geschaffen. Der integrierte Technologiedemonstrator für eine bioinspirierte, biointegrierte und biointelligente Wertschöpfung wurde unter einem

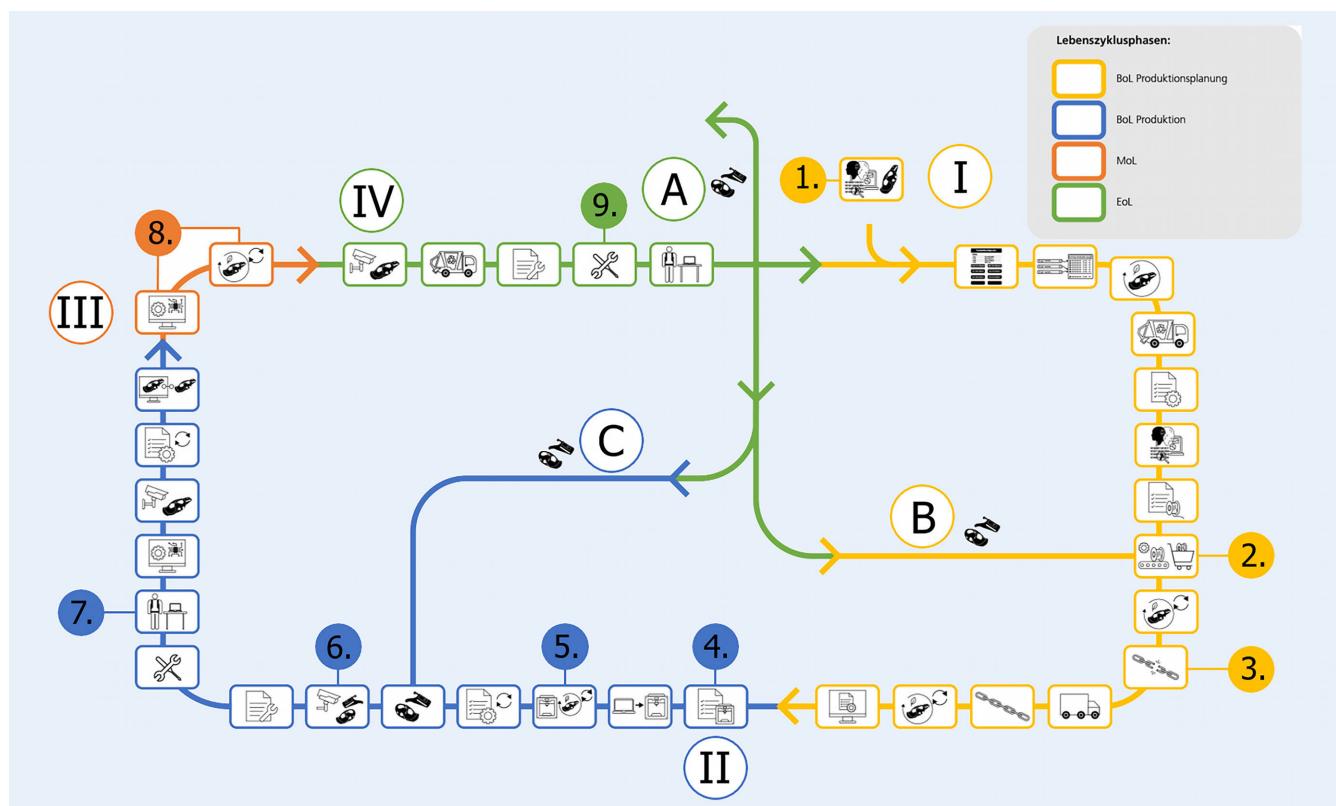


**Bild 3.** Integrierter Demonstrator am Fraunhofer IPK. Foto: Fraunhofer IPK

nutzerzentrierten Ansatz entwickelt und befindet sich in den Räumlichkeiten des Virtual Engineering Labs (VEL) am Fraunhofer IPK in Berlin (Bild 3).

Im Demonstrator werden verschiedene Aktivitäten beziehungsweise Prozesse entlang eines exemplarischen Produktlebenszyklus abgebildet. Dies umfasst die Phasen der Produktentwicklung, der Materialherstellung über die Fertigung, Nutzung und Instandhaltung bis hin zur Rückführung durch Konzepte einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft. Bild 4 stellt die entsprechenden Prozessschritte des Demonstrators schematisch im Überblick dar.

Die Storyline startet mit der Begin of Life-Planungsphase des Geschäftsmodells, des Produktes und der eingesetzten Materialien sowie der Kreislaufwirtschaftsstrategie (I). Begonnen wird



**Bild 4.** Überblick der Prozessschritte in der digital vernetzten Prozesskette am Beispiel biobasierter 3D-Druck. Grafik: Fraunhofer IPK



**Bild 5.** Dashboard des Digitalen Zwilling mit integrierter LCA (in der Demonstration). Foto: Fraunhofer IPK

mit der Produktentwicklung. Im Demonstrator wurde eine Fингерортезе aus biogenem und biologisch abbaubarem Polymer (PHB Polyhydroxybutyrat) entwickelt. Neben dem eigentlichen Produkt wird zu Beginn bereits der Digitale Zwilling des Produkts entwickelt (1.). Dieser begleitet das Produkt während seines gesamten Lebenszyklus und sammelt Daten, welche im Anschluss ausgewertet werden können. Danach folgt die Materialherstellung und -beschaffung (2.). Zum einen kann das benötigte Material vor Ort hergestellt werden, dafür wird durch ein spezielles Verfahren PHB aus Abfallfetten produziert. Die zweite Möglichkeit ist, dass das Material zugekauft wird. Dafür ist im Demonstrator ein interaktives Lagebild ergänzt (3.). Hierbei handelt es sich um ein System mit einem maschinellen Lernalgorithmus, der relevante Informationen für das Unternehmen und die Produktionsprozesse identifiziert. Im Demonstrator liegt der Fokus auf der frühzeitigen Detektion eines Lieferantenausfalls auf Basis von Veränderungen im Unternehmensumfeld und der anschließenden Suche nach einem alternativen Lieferanten.

Im Anschluss folgt die Produktionsphase (II). Dabei werden alle am Demonstrator beteiligten Menschen, Maschinen und IT-Systeme durch Softwareagenten digital repräsentiert (4.). Dadurch haben sie die Möglichkeit, miteinander zu interagieren, indem sie untereinander Informationen austauschen, kooperieren, Aufgaben verhandeln und koordinieren. Der Produktionsprozess wird so selbstständig optimiert und unter Berücksichtigung von Störungen und Defekten geplant. Nach der Auswahl der Bearbeitungsstationen werden die Bauteile vor Ort durch einen 3D-Drucker gefertigt (5.). Im nächsten Schritt werden die produzierten und zugekauften Bauteile montiert. Bei der Montage und Demontage arbeiten die Mitarbeitenden zusammen mit einer kamerabasierten Objekterkennung (6.). Diese identifiziert die spezifischen Bauteile, gibt automatisch die Montage- und Demontageanleitung aus und führt eine Qualitätskontrolle durch. Die Mitarbeitenden werden bei der Montage zusätzlich durch das Tragen einer Sensorweste ergonomisch unterstützt (7.). Dafür wird die Körperhaltung in Echtzeit analysiert. Auf dieser Basis kriegen die Arbeitenden eine Empfehlung für ihre optimale Tischhöhe, um eine unergonomische Haltung zu vermeiden und die Gesundheit der Mitarbeitenden zu fördern.

Die orange eingefärbten Prozessschritte stellen das Mid of Life dar (III). Während der Nutzungsphase können Nutzungsdaten wie die Nutzungszyklen erfasst werden (8.).

Am Ende des (ersten) Produktlebens (End of Life) (IV), wird das Produkt demontiert und durch die Auswahl von verschiedenen Kreislaufwirtschafts-Strategien wird festgelegt, wie mit den einzelnen Bauteilen weiter verfahren wird (9.). Grundsätzlich bildet der Demonstrator drei verschiedene theoretische R-Strategien ab: Das Zurückgewinnen von Energie beziehungsweise das Zersetzen (Recover) (A). Bei den anderen beiden Möglichkeiten werden einzelne Bauteile wieder zurück in den Lebenszyklus geführt, dafür werden sie entweder wiederverwendet (B) oder recycelt und das Material wiedereingesetzt (C).

## 6 Der Digitale Zwilling mit integrierter Ökobilanz im Demonstrator

Ein elementarer Bestandteil des Demonstrators ist das entwickelte Konzept des Digitalen Zwilling mit integrierter Ökobilanzierung, der insbesondere die Daten aus dem berücksichtigen Produktionsprozess erfasst (**Bild 5**).

Das Dashboard bildet dabei das nutzerzentrierte Frontend zur Unterstützung von Entscheidungen entlang des Lebenszyklus für die fokussierten Personas. Im Hintergrund wird eine Kombination verschiedener IT-Systeme und Schnittstellen eingesetzt, um die Daten zu erfassen, zu vernetzen, abzuspeichern und auszuwerten. Das Frontend lässt sich in vier Perspektiven unterteilen: die Planungsphase, die Produktion und die Nutzungsphase sowie das Lebensende (**Bild 6**).

Das Dashboard bildet den lebenszyklusübergreifenden Digitalen Zwilling ab. Drei spezifische Materialien (PLA, PC-ABS, PHB) können ausgewählt werden, um verschiedene Produktvarianten mit unterschiedlichen Materialien zu vergleichen. Für den Druckprozess stehen zwei verschiedene 3D-Drucker („Ultimaker S3“, „Arburg Freeformer“) zur Verfügung, die eine flexible und optimierte Herstellung der Orthese ermöglichen. Zusätzlich enthält das Dashboard End-of-Life-Szenarien (Wiederverwendung, Rückgewinnung, Recycling, Entsorgung). Die verschiedenen Lebenszyklusentscheidungen, einschließlich des individuellen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks (Product Carbon Footprint PCF in Kilogramm CO<sub>2</sub>-Äquivalenten) des Produkts, werden im Dashboard visualisiert.

Während der Planungsphase werden Plandaten verwendet. Der Digitale Master gibt den geplanten ökologischen Fußabdruck (Product Carbon Footprint, PCF) („PCF as planned“) basierend auf den getroffenen Lebenszyklusentscheidungen an, während der Digitale Schatten Echtzeitdaten (im Beispiel Temperatur und Stromverbrauch) erfasst, aus denen der aktuelle ökologische Fußabdruck („PCF as built“) berechnet wird. Die Daten im Dashboard stammen aus berechneten LCA-Modellen auf Basis von Daten aus der Datenbank Ecoinvent sowie aus geometrischen Daten der Orthese und Materialinformationen. Alle Werte werden im Dashboard dargestellt, sodass sie direkt nebeneinander betrachtet und verglichen werden können.

Ein Szenario für den geplanten PCF ist, dass Vorder- sowie Hinterteil der Orthese in Berlin und der Chip sowie Klettverschluss in Shenzhen, China, gefertigt werden. Hierbei wird die Systemgrenze cradle-to-gate angenommen. So entsteht ein gesamter PCF in Höhe von 11,42 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente, welcher zum Großteil durch das Vorderteil der Orthese entsteht. Der ökologische Fußabdruck für den Klettverschluss und Chip ist deutlich geringer, da die Herstellung der beiden Produkte in industrialisierten Prozessen entsteht. Dagegen wird die Orthese aus PHB

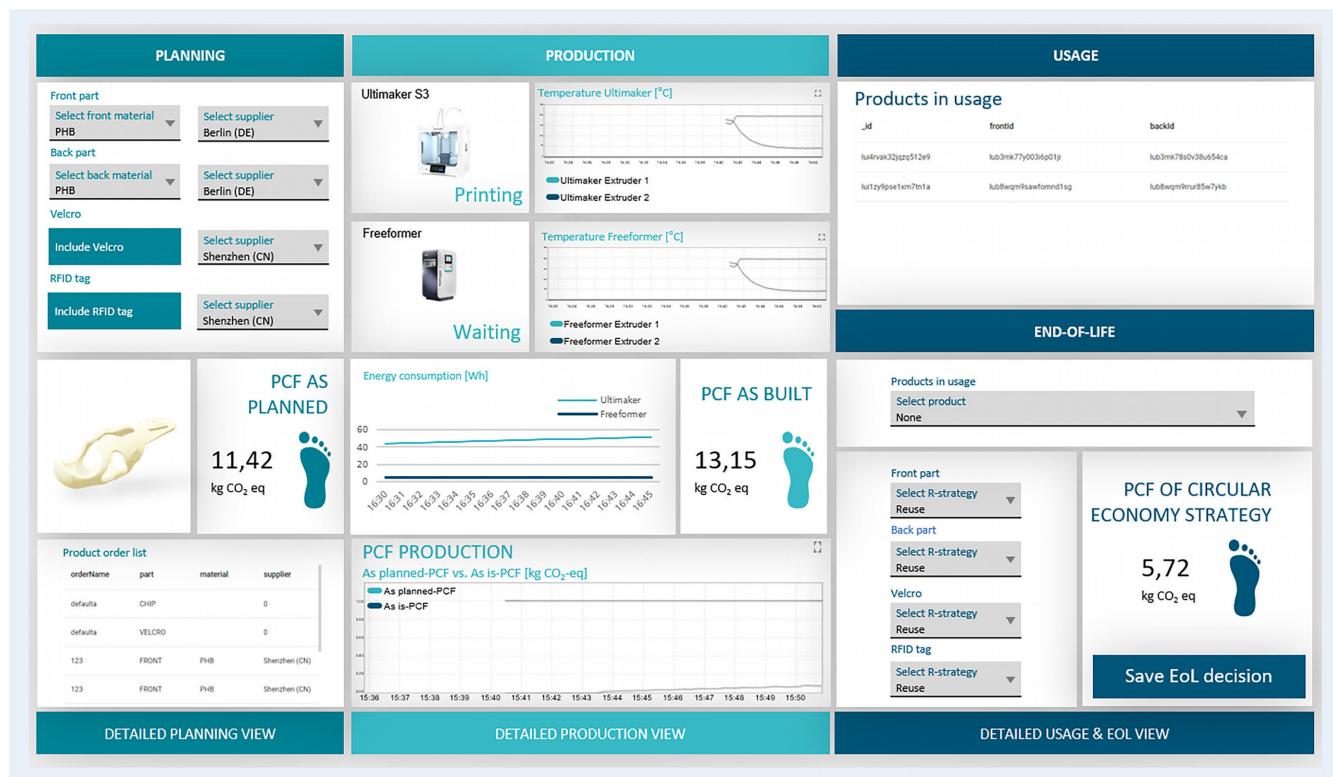


Bild 6. Dashboard des Digitalen Zwilling mit integrierter LCA (Screenshot). Grafik: Fraunhofer IPK

aufwendiger im kleinen Labormaßstab produziert, da die Gewinnung des PHBs aus Frittierzett am Fraunhofer IPK selbst im Labor hergestellt wurde.

Das End-of-Life Szenario der Orthese kann mit Wiederverwendung (Reuse) als Kreislaufwirtschafts-Strategie dargestellt werden. Dafür wird die Systemgrenze cradle-to-grave verwendet. Nun entsteht ein reduzierter Gesamt-PCF in Höhe von 5,71 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die geringeren PCF-Werte entstehen, da bei der Reuse-Strategie angenommen wird, dass alle Komponenten nach dem ersten Lebenszyklus mit Wasser abgewaschen werden und in einen zweiten Lebenszyklus kommen bevor sie endgültig entsorgt werden.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Das Projekt BioFusion 4.0 leistet einen Beitrag zur Gestaltung zukünftiger Produktionsprozesse im Kontext Industrie 4.0 und zeigt auf, wie innovative Ansätze auf Basis biologischer Prinzipien dabei helfen können. Digitale Zwillinge sind hierbei insbesondere zur Umsetzung der neuen regulatorischen Anforderungen für Nachhaltigkeitsbetrachtung einsetzbar. Die aufgebauten Demonstratoren bilden die Basis für weitere Forschung im Bereich Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Ein besonderer Fokus liegt auf der Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaftsstrategien, der Berücksichtigung weiterer Produktgruppen und dem unternehmensübergreifenden Datenaustausch. Auch das Thema der Bewertung von Umweltwirkungen über mehrere Produktleben hinweg wird die Forschung zukünftig beschäftigen.

## GLOSSAR

- AAS - Asset Administration Shell
- BoL - Begin of Life
- BT - Biologische Transformation
- DZ - Digitaler Zwilling
- EoL - End of Life
- ESPR - Ecodesign for Sustainable Products Regulation
- IDTA - Industrial Digital Twin Association
- LCA - Life Cycle Assessment
- MoL - Mid of Life

## FÖRDERHINWEIS

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

## Literatur

- [1] Miehe, R. et al.: Enabling bidirectional real time interaction between biological and technical systems: Structural basics of a control oriented modeling of biology-technology-interfaces. Procedia CIRP Vol. 81, 2019, pp. 63–68
- [2] Bergs, T. et al.: Application cases of biological transformation in manufacturing technology. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 31, 2020, pp. 68–77
- [3] Hellmich, A. et al.: Bio-inspired factories of the future. Hannover, Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2020, 2020
- [4] European Commission, The European Green Deal," Communication, European Commission, Brussels COM(2019) 640 final, 2019. Internet: [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_en](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en). Zugriff am 9. Juli 2021

- [5] European Commission, Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR): Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC. Internet: <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj>. Zugriff am 11. Juli 2023
- [6] Berkahn, M. et al.: Taxonomy for Biological Transformation Principles in the Manufacturing Industry. In: Lecture Notes in Mechanical Engineering, Manufacturing Driving Circular Economy, Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 981–989
- [7] Neugebauer, R.: Biologische Transformation. Berlin, Heidelberg: Springer 2019
- [8] Miehe, R. et al.: The biological transformation of industrial manufacturing: Technologies, status and scenarios for a sustainable future of the German manufacturing industry. Journal of Manufacturing Systems, vol. 54, 2020, pp. 50–61
- [9] Bauernhansl, T.; Brecher, C.; Drossel, W.: Biointelligenz: eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung: Ergebnisse der Voruntersuchung zur biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (Biotrain). Vol. 2019, [http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn\\_nbn\\_de\\_0011-n-5412052.pdf](http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn_nbn_de_0011-n-5412052.pdf), 2019
- [10] Byrne, G. et al.: Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing, 2018, pp. 1–43
- [11] Drossel, W.; Dani, I.; and Wertheim, R.: Biological transformation and technologies used for manufacturing of multifunctional metal-based parts. Procedia Manufacturing, vol. 33, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919304937>, 2019, pp. 115–122
- [12] Seegmüller, A.; Mügge, J.; Riedelsheimer, T.; and Lindow, K.: Digital Twins for Sustainability in the Context of Biological Transformation. In: Manufacturing Driving Circular Economy: Proceedings of the 18th Global Conference on Sustainable Manufacturing, October 5–7, 2022, Berlin, 2023, pp. 576–584
- [13] Miehe, R.; Horbelt, J.; Baumgarten, Y.; and Bauernhansl, T.: Basic considerations for a digital twin of biointelligent systems: Applying technical design patterns to biological systems, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 31, 2020, pp. 548–560
- [14] Fraunhofer IPK, BioFusion 4.0: Integration biologischer Prinzipien in die Industrie 4.0. [Online] <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/zusammenarbeit/referenzen/biofusion40.html>. Zugriff am 13. Aug. 2024
- [15] Riedelsheimer, T.; Seegmüller, A.; Lindow, K.: Digital Twins for real-time Life Cycle Assessment of Products, Proceedings of the 13th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing, to be published 2025
- [16] Negri, E.; Fumagalli, L.; Macchi, M.: A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems," Procedia Manufacturing, vol. 11, 2017, pp. 939–948
- [17] Plattform Industrie 4.0, Details on the Asset Administration Shell (AAS): Specification. Internet: [https://www.plattform-i40.de/DE/Downloads/Publikation/Details\\_of\\_the\\_Asset\\_Administration\\_Shell\\_Part1\\_V2.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.plattform-i40.de/DE/Downloads/Publikation/Details_of_the_Asset_Administration_Shell_Part1_V2.pdf?__blob=publicationFile&v=6).
- [18] Eclipse Foundation, BaSyx. Internet: <https://wiki.eclipse.org/BaSyx>. Zugriff am 11. Juli 2023
- [19] Stark, R.; Damerau, T.: Digital Twin. In: CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Berlin, Heidelberg: Springer, 2019, pp. 1–8
- [20] Mügge, J.; Hahn, I. R.; Riedelsheimer, T.; and Chatzis, J.: Digital Twins for Circular Economy - Enabling Decision Support for R-Strategies, I40M, No. 6, 2022, pp. 42–46
- [21] Seegmüller, A. et al.: Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review, Procedia CIRP, vol. 119, 2023, pp. 776–781
- [22] DIN ISO, DIN EN ISO 14040:2006 Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen," DIN-Norm, Berlin DIN EN ISO 14040:2009-11, 2006
- [23] DIN EN ISO 14044:2006, 14044, 2006



Theresa Riedelsheimer

Tel. +49 303 / 39006-219  
[theresa.riedelsheimer@ipk.fraunhofer.de](mailto:theresa.riedelsheimer@ipk.fraunhofer.de)  
 Foto: Fraunhofer IPK

Lynn Faßbender

Dr.-Ing. Kai Lindow

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK   
 Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin  
[www.ipk.fraunhofer.de](http://www.ipk.fraunhofer.de)

## LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)