



Fraunhofer
IPK

Biologische Transformation 4.0

Weiterentwicklung von
Industrie 4.0 durch Integration
biologischer Prinzipien

Liebe Leserin, lieber Leser,

wie wollen wir der Zukunft entgegentreten? Wie erreichen wir eine nachhaltige Wirtschaftsweise, die die Ressourcen des Planeten schont und resilient gegenüber äußeren Krisen ist? Welche Anforderungen stellen wir an die kommenden Produkte und Dienstleistungen?

In der Industrie beginnt man dann zu investieren, wenn ein betriebswirtschaftlicher Nutzen zu erkennen ist. Dass sich Unternehmen nur kurzfristig nach Gewinnen ausrichten, reicht heutzutage nicht mehr aus. In Zeiten von Lieferengpässen, Personalmangel und teurer Energie ist es für ein resilientes und nachhaltiges Wirtschaften erforderlich, sich an die jeweilige gegebene Situation anzupassen und zukunftsorientiert aufzustellen.

Die Biointelligenz, als faszinierende Symbiose zwischen biologischen Systemen, technischen Systemen und Informationssystemen, kann für diese und künftige Herausforderungen Lösungen anbieten. Denn die Natur zeigt Lösungen auf, wie Ressourcen effizient genutzt werden können, dass in der Natur vieles aus großen oder kleinen Kreisläufen besteht und was es bedeutet, sich anpassen zu können. Im Rahmen einer biointelligenten Produktion wird angestrebt, sich durch Wissen aus der Natur inspirieren zu lassen, dieses in technische Systeme zu integrieren und untereinander interagieren zu lassen, um so zukünftig biointelligente Fabriken, Anlagen und Produkte zu gestalten.

Im Verbundprojekt „Biologische Transformation 4.0: Weiterentwicklung von Industrie 4.0 durch Integration biologischer Prinzipien – BioFusion 4.0“ wurden in interdisziplinärer Zusammenarbeit von Wissenschaftlern, Technologie- und IT-Entwicklern, sowie industriellen Anwendern über drei Jahre hinweg spezifische Anwendungsbereiche der Biointelligenz analysiert, Lösungen entwickelt und unter führender Beteiligung der Anwenderunternehmen in Pilotanwendungen demonstriert. Dabei wurde der gesamte Produktlebenszyklus betrachtet.

So wurde unter anderem gezeigt, wie betriebliche Prozesse biointelligent gestaltet werden können, um die gesamte Produktionskette eines Bauteils nachhaltig zu gestalten. Für die Implementierung biointelligenter Geschäftsmodelle wurden praxisnahe Vorgehensmodelle entwickelt, und weiterhin ein Verfahren entwickelt, um aus biogenen Reststoffen der Lebensmittelindustrie biologisch abbaubare Produkte herstellen zu können. Für alle im Projekt entwickelten Anwendungsfälle und Technologien wurden begleitend Ökobilanzen erstellt, so dass die Ansätze gegebenenfalls angepasst werden konnten.

Das große Engagement aller Projektpartner und das hervorragende Zusammenwirken unterschiedlichster Fachkompetenzen im Verbundprojekt BioFusion 4.0 ermöglichte die erfolgreiche Erarbeitung der in diesem Buch vorgestellten Lösungen und Vorgehensmodelle, die es insbesondere den Akteuren in Industrieunternehmen des Mittelstands ermöglichen, spezifische biointelligente Lösungen für ein nachhaltiges kreislaforientiertes Wirtschaften einzuführen und quantifizierbaren Mehrwert zu erzeugen.

Ich bedanke mich bei allen Partnern des Verbundprojekts und wünsche einen anhaltenden Erfolg bei der Adaption der entwickelten Konzepte und Lösungen.

Karlsruhe, im Februar 2025

Dr. rer. nat. Christine Ernst

Projekträger Karlsruhe (PTKA)

Editorial

Editorial

Liebe Leserinnen und Leser,

die industrielle Produktion steht vor der großen Herausforderung, nachhaltiger, ressourceneffizienter und resilienter zu werden. Das Forschungsprojekt BioFusion 4.0 verfolgt das Ziel, Prinzipien der biologischen Transformation in die Industrie 4.0 zu integrieren, um eine zukunftsfähige Wertschöpfung der industriellen Produktion zu ermöglichen.

Biologische Transformation bedeutet, Erkenntnisse aus natürlichen Systemen auf technische Lösungen, organisatorische Strukturen und wertschöpfende Prozesse zu übertragen. Dabei stehen drei Konzepte im Fokus: Inspiration (Lernen von der Natur zur Anpassung von Technologien), Integration (Symbiose technischer Systeme basierend auf biologischen Modellen) und Interaktion (Verflechtung von Natur und Technik).

Im Rahmen von BioFusion 4.0 wurden Lösungen für die nachhaltige biologische Transformation der Produktion entwickelt und anhand industrieller Anwendungsfälle deren Praxistauglichkeit demonstriert. Diese umfassen unter anderem Batteriesteuerungsmodule für Elektrofahrzeuge, Fahrzeugkomponenten, Hochtemperatursysteme von Gasturbinen, elektrische Antriebe für industrielle Anwendungen sowie Robotik-Automatisierungslösungen. Zudem wurden Geschäftsmodelle für die biologische Transformation, intelligentes Recycling von Wertstoffen, Engineering biologisch transformierter Produkte, bionische Integration für vernetzte Produktionssysteme, ökologisch intelligente Dienstleistungen für die Produktion, biointelligente Arbeiterassistenzsysteme und additive Fertigung mit biogenen und abbaubaren Polymeren entwickelt.

Die Lösungen wurden großen sowie bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) des Konsortiums als Anwendungspartner implementiert und erprobt. Darüber hinaus wurden geeignete Werkzeuge und Prozesse in acht verschiedenen Anwendungsfällen entwickelt und mündeten in einem integrierten Technologiedemonstrator für bioinspirierte, biointegrierte und biointelligente Wertschöpfung.

Das Projekt BioFusion 4.0 zeigt eindrucksvoll, wie durch die Verbindung von biologischen Prinzipien und industrieller Produktion nachhaltige und zukunftsweisende Lösungen entstehen können. Es leistet einen wichtigen Beitrag zur Transformation der Industrie hin zu mehr Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Resilienz.

Berlin, April 2025

Dr.-Ing. Kai Lindow

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Kurzfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts „BioFusion 4.0“ haben interdisziplinäre Teams aus Wissenschaft und Industrie in einem dreijährigen Zeitraum Lösungen erarbeitet, um die Prinzipien der biologischen Transformation in die industrielle Wertschöpfung zu integrieren. Die Biologische Transformation wird als integrativer Ansatz verstanden, der biologische, technische und informationstechnologische Systeme verknüpft, um neue, nachhaltige Produktionsprozesse zu schaffen. Die Ergebnisse des Projekts umfassen die Entwicklung spezifischer Anwendungsfälle, die in Pilotanwendungen demonstriert wurden. So wurde gezeigt, wie betriebliche Prozesse biologisch transformiert gestaltet werden können, beispielsweise durch die Entwicklung biologisch abbaubarer Produkte aus Reststoffen der Lebensmittelindustrie. Zusätzlich wurden praxisnahe Geschäftsmodelle entwickelt, die nachhaltige Lösungen bieten und dabei helfen, den gesamten Lebenszyklus von Produkten zu berücksichtigen.

Ein weiteres wichtiges Element ist die Erstellung von Ökobilanzen für alle entwickelten Technologien, um deren Umweltauswirkungen zu evaluieren und gegebenenfalls anzupassen. Die Zusammenarbeit der Projektpartner und die interdisziplinäre Herangehensweise haben es ermöglicht, quantifizierbare Mehrwerte für Unternehmen, insbesondere im Mittelstand, zu schaffen.

Es besteht die Notwendigkeit, die entwickelten Konzepte weiterhin zu adaptieren und in der Praxis umzusetzen. Hierbei ist die Digitalisierung für den Erfolg der Transformation von entscheidender Bedeutung. Insbesondere Digitale Zwillinge sind eine wichtige Technologie, um Transparenz über die Umweltauswirkungen biologisch transformierter Produkte und Prozesse zu schaffen und fundierte Entscheidungen im Produktdesign und in der Produktion zu ermöglichen.

Die Biologische Transformation ist nicht nur ein Lösungsansatz für bestehende Herausforderungen, sondern auch ein zentraler Treiber für die nachhaltige Industrie der Zukunft. Durch die Verbindung von biologischen, technischen und digitalen Systemen können Unternehmen ihre Produktionsprozesse optimieren und gleichzeitig ökologische sowie ökonomische Ziele verfolgen. Hierfür ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie essentiell, um die Herausforderungen der biologischen Transformation erfolgreich zu meistern. Die in „BioFusion 4.0“ entwickelten Konzepte und Lösungen sollen nicht nur in der Industrie Anwendung finden, sondern auch als Modell für andere Technologiebereiche dienen, um die nachhaltige Entwicklung voranzutreiben.

Inhalt

1	Motivation.....	10
2	Zielsetzung.....	11
3	Ausgangslage.....	12
4	Übergreifender Stand der Forschung und Technik.....	14
5	Biologische Transformation der Industrie.....	20
6	Standortanalyse des Transformationsraums Berlin.....	26
7	Zukunftsszenarien für die Biologische Transformation der Industrie am Standort Berlin.....	32
8	System Dynamics Modell der Transformation einer Plastikorthese zu einem biologisch inspirierten System.....	39
9	Technologieradar für biologisch transformierte Technologien.....	44
10	Personas und User Stories für biologisch transformierte Technologien und Demonstratoren.....	51
11	Geschäftsmodelle für die Biologische Transformation: Methode und Vorgehen zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle.....	58
12	Intelligente Reststoffbearbeitung.....	65
13	Digitale Zwillinge als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse	76
14	Bionische Integration für vernetzte Produktionssysteme.....	82
15	Selbstorganisierende Produktionssysteme.....	90
16	Integration menschlicher Bewegungsdaten im industriellen Kontext.....	100
17	Additive Fertigung mit biogenen Polymeren.....	108
18	Integrierter Forschungsdemonstrator.....	114
19	Handlungsempfehlungen.....	120
20	Glossar.....	124

Abkürzungsverzeichnis

AE	Advanced Engineering
AGV	Automated Guided Vehicle
ASE	Advanced Systems Engineering
BMC	Business Model Canvas
CAD	Computer Aided Design
CE	Kreislaufwirtschaft (englisch circular economy)
CNN	Convolutional Neural Networks
CPS	Cyber-physisches System
DIN	Deutsches Institut für Normung
EoL	End of Life
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FDM	fused deposition modeling
GMM	Geschäftsmodellmuster
GMMK	Geschäftsmodellmusterkatalog
GPS	ganzheitliche Produktionssysteme
IMU	inertiale Messeinheit (englisch inertial measurement unit)
IoT	Internet of Things
IT	Informationstechnik
IUM	integrierten Unternehmensmodellierung
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KZG	Kurzzeitgedächtnis
LCA	Lebenszyklusanalyse (englisch lifecycle analysis)
LSTM	Long-Short-Term-Memory
LZG	Langzeitgedächtnis
MAS	Multi-Agenten-Systemen
MES	Manufacturing Execution System
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NGO	Nichtregierungsorganisation (englisch non-governmental organization)
NLP	Natural Language Processing
PA	Prozessassistent
PHA	Polyhydroxyalkanoat
PHB	Poly-(R)-Hydroxybutyrat
PLA	Polylactid
PLM	Produktlebenszyklusmanagement
PSS	Produkt-Service System
RFID	Radio Frequency Identification
SE	Systems Engineering
SRL	Nachhaltigkeits-Reifegrad (englisch sustainability readiness level)
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities und Threats
TRL	Technologie-Reifegrad (englisch technology readiness level)
VEL	Virtual Engineering Lab
WVSC	Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5.1	Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation	21
Abb. 5.2	Taxonomie der Biologischen Transformation	22
Abb. 6.1	SWOT-Analyse des Transformationsraums Berlin vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft	27
Abb. 6.2	SWOT-Analyse des Transformationsraums Berlin vor dem Hintergrund der Digitalisierung	28
Abb. 6.3	SWOT-Analyse des Transformationsraums Berlin vor dem Hintergrund der Produktion	29
Abb. 7.1	Gesamtvorgehen der Szenarioanalyse	33
Abb. 7.2	Ergebnis der Szenariobildung	35
Abb. 7.3	Risiken und Chancen des Referenzszenarios für relevante Stakeholdergruppen	36
Abb. 7.4	Handlungsempfehlungen an Industrie, Institutionen und Mensch	37
Abb. 8.1	System Dynamics Modell: Ausgangspunkt - Herkömmliche Orthese	41
Abb. 8.2	System Dynamics Modell: Bio-Substitution - Bio-basierte Orthese und 3D-Druck	42
Abb. 8.3	System Dynamics Modell: Feedback Loop - CO ₂ -Emission und Nachfrage nach nachhaltigen Produkten	42
Abb. 9.1	Technologieradar des Forschungsprojekts BioFusion 4.0	48
Abb. 10.1	Personas des Forschungsprojekts BioFusion 4.0	53
Abb. 10.2	User Stories des Forschungsprojekts BioFusion 4.0	56
Abb. 11.1	Geschäftsmodell eines Unternehmens im Business Model Canvas	59
Abb. 11.2	Beispiel-Roadmap für GMM „Rücknahme-Management“	62
Abb. 12.1	Technischer Aufbau zur Datenaufnahme	68
Abb. 12.2	Beispielbild zur Erfassung des Füllstands	69
Abb. 12.3	Container-Station des Serious Games	70
Abb. 12.4	(De-)Montage-Station für Daumen-Orthese	71
Abb. 12.5	UI der hybriden Datenerfassung für Demontage und Verwertungsentscheidung	72
Abb. 12.6	Montagefläche mit QR-Code-Identifikation und AR-Feedback	73
Abb. 12.7	Kontinuierliche Erfassung zur Bewertung des Montagefortschritts	73
Abb. 13.1	Konzept eines Digitalen Zwillings mit integrierter Ökobilanz	78
Abb. 13.2	Relevante Personas und User Stories für einen Digitalen Zwilling mit integrierter Ökobilanz	79
Abb. 13.3	Dashboard des Digitalen Zwillings mit integrierter Ökobilanz	80
Abb. 14.1	Modellbasierter Ansatz zur Selbstheilung von Prozessen	85
Abb. 14.2	Darstellung des interaktiven Lagebilds	87
Abb. 15.1	Methodisches Vorgehen	93
Abb. 15.2	Demonstrator des Multiagentensystems am Fraunhofer IPK	96
Abb. 15.3	Digital assistierte Verschraubung der Schütze als Teil des Demonstrators im Mercedes-Benz Werk Marienfelde	97
Abb. 16.1	Übersicht Industrie 5.0 – Mensch-Technologie-Integration.	100
Abb. 16.2	ErgoJack-Weste	102
Abb. 16.3	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess zum Erstellen von Modellen zur Erfassung von Aktionen	103
Abb. 16.4	Konfusionsmatrix der reduzierten Klassenkonfiguration	104
Abb. 16.5	ErgoJack zur Überwachung der Ergonomie an Montagearbeitsplatz	105
Abb. 17.1	Prozessdiagramm der 2 L-Kultivierung zur Gewinnung von PHB aus Abfallfett. Der Feed des Abfallfetts wurde nach ca. 10 h gestartet.	110
Abb. 17.2	Aus PHB gedruckte Daumenorthese (A) mit Stützmaterial Armat 12 (B) fertig montiert nach Lösen des Stützmaterials	111

Abb. 17.3 Mittels manometrischem Respirationstest bestimmter Abbau verschiedener PHB-Materialien über einen Zeitraum von vier Wochen in Belebtschlamm	112
Abb. 18.1 Integration biologischer Prinzipien entlang des gesamten Produktlebenszyklus.....	115
Abb. 18.2 Dashboard mit den verfügbaren 3D Druckern und Betriebszuständen	116
Abb. 18.3 CAD-Modell des physischen Demonstratoraufbaus am Fraunhofer IPK.....	118
Abb. 18.4 Fertiger Aufbau des integrierten Forschungsdemonstrators im Virtual Engineering Lab am Fraunhofer IPK.....	119

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Zuordnung biologischer Wirkprinzipien zu den Technologien im Projekt BioFusion 4.0	24
Tab. 7.1	Einfluss- und Schlüsselfaktoren nach Einflussbereichen (EB) und EB-Untergruppen	34
Tab. 9.1	Definitionen der Technologieklassen	46
Tab. 9.2	Einordnung der Technologien im Technologieradar	49
Tab. 11.1	Geschäftsmodellmusterkatalog	61
Tab. 12.1	Quoten richtig klassifizierter Testbilder nach Füllstandsklasse	70

1

Motivation

Motivation

Um Wohlstand, Wachstum und Lebensqualität in Deutschland weiter zu stärken und gleichermaßen einer internationalen Verantwortung gerecht zu werden, müssen die beiden Aspekte der Digitalisierung und Biologische Transformation zukünftig in ihrem Zusammenwirken systemisch betrachtet werden. Aufgrund seiner Bedeutung darf das neue Wirkungsgefüge nicht den einzelnen Entwicklungen und Innovationen seiner Bestandteile überlassen werden. In den Bereichen Produktion, Dienstleistung und Arbeit finden derzeit grundlegende systemische Veränderungen statt. An dieser Stelle wird nur exemplarisch darauf eingegangen:

- (1) Im Bereich Produktion steht die Implementierung der Kreislaufwirtschaft als Kernthema des Aktionsplans der EU im Vordergrund. Sie erfordert ein umfassendes Systemverständnis, um die spezifischen Wertschöpfungsketten miteinander zu verbinden. Darüber hinaus müssen neue Produktionsverfahren in die Wertschöpfungsketten integriert werden.
- (2) In vielen gesellschaftlichen Lebensbereichen und auch in der industriellen Produktion erfolgt eine digitale Transformation auf Basis von verfügbaren und vernetzten Daten. Dies ermöglicht eine Erweiterung von bestehenden oder sogar die Neuentwicklung von Dienstleistungen bis hin zu intelligenten Services.
- (3) Das Erstarken technologischer und sozialer Innovationen sowie die Transformation der Industrie führen zu einem Wandel der Arbeit, indem sie Raum für neue Ansätze in Produktion und Arbeitsteilung öffnen. Die gesellschaftlichen Herausforderungen, Innovations- und Wagniskulturen sowie die Zukunftskompetenzen werden im Rahmen der Bioökonomie (Agenda „Von der Biologie zur Innovation“) gebündelt dargestellt.

Das Wissen über die systemische Wirkung ist der Schlüssel für zukünftige gesellschaftliche, ökologische und technologische Innovationen. Dieses Wissen trägt grundlegend zum langfristigen Schutz der Umwelt, zur Sicherung des gesellschaftlichen Wohlstands und zur Bedeutung der Industrie in Deutschland und seiner Position in der Welt bei. Welche zukünftigen Potentiale in einer solchen Betrachtung liegen, zeigt ein historischer Rückblick: Wurden in den erfolgreichen Feldern der Kybernetik und Bionik noch Prinzipien der Umwelt in Technologien überführt und mit einer nachhaltigen Entwicklung die Zusammenhänge zwischen Gesellschaft und Umwelt erklärt, so werden zukünftig Gesellschaft, Umwelt und Technologie symbiotisch zusammenwirken. Die vierte industrielle Revolution trifft auf eine nachhaltige Entwicklung und erzeugt ein neues Wirkungsgefüge, das als Biologische Transformation 4.0 bezeichnet wird.

Derzeitige singuläre Antworten auf gesellschaftlicher, ökologischer und technologischer Ebene in den Bereichen Produktion, Dienstleistung und Arbeit müssen im Kontext von Biologischer Transformation 4.0 zusammenhängend betrachtet werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, zum jetzigen Zeitpunkt in der angewandten Forschung die Wirkrichtungen und Zusammenhänge von Biologischer Transformation 4.0 zu untersuchen und zu gestalten. Es müssen das benötigte Wissen für zukünftige Innovationen ausgeleitet, die Machbarkeit demonstriert und entsprechende Handlungsräume und Maßnahmen allgemeingültig beschrieben werden.

2 Zielsetzung

Zielsetzung

Ziel des Vorhabens BioFusion 4.0 ist es, die Biologische Transformation als grundlegende systemische Wirkung der nachhaltigen Transformation industrieller Produktion zu etablieren. Damit soll ein wesentlicher Beitrag zur Produktionsforschung von morgen geleistet werden, in der folgende Aspekte miteinander in Einklang gebracht werden müssen:

- Klimaneutralität
- Ressourcen- und CO₂-Reduktion
- Ökologischer Fußabdruck
- Produktivität
- Flexibilität

Zur Erreichung dieser übergeordneten Ziele muss die Biologische Transformation als systemischer Ansatz besser verstanden und erprobt werden. Zum Erreichen des oben beschriebenen Ziels werden folgende Teilziele verfolgt:

- i. Analyse des Berliner Standorts und Entwickeln von Zukunftsszenarien sowie Analyse von allgemeinen Prinzipien der Biologischen Transformation im Kontext industrieller Wertschöpfung.
- ii. Erarbeiten von Methoden, Werkzeugen, Technologien und Modellen für den theoretischen und methodischen Transfer der Prinzipien auf die industrielle Anwendung auf den Ebenen makroökonomisches System Berlin, Produktionsstandort und Produktionsprozess.
- iii. Erproben der Wirkungen im industriellen Kontext und Gestalten der Biologischen Transformation 4.0 anhand von Technologiedemonstratoren. Diese Demonstratoren sollen zusätzlich folgende quantifizierbaren Ziele unter gleichzeitiger Harmonisierung dieser erreichen:
 - a. Verringerung der Emissionen
 - b. Steigerung der Ressourceneffizienz
 - c. Optimierung des ökologischen Fußabdrucks industrieller Wertschöpfung
 - d. Erhöhung der Produktivität
 - e. Steigerung der Flexibilität
- iv. Ableiten und Erstellen von konkreten Umsetzungshilfen für Industrie und Gesellschaft zum Ermöglichen der Biologischen Transformation.

3

Ausgangslage

Ausgangslage

Um die beschriebenen Ziele und insbesondere die Erprobung im industriellen Kontext erreichen zu können, wird das Vorhaben das Werk Berlin der Mercedes-Benz AG und das neu errichtete WvSC als Erkenntnis- und Erprobungsregion für die Biologische Transformation 4.0 nutzen.

Das Mercedes-Benz Werk Berlin existiert seit 1902 und ist ein wichtiger Bestandteil des Powertrain-Produktionsverbundes der Mercedes-Benz AG und einer der großen industriellen Arbeitgeber der Region Berlin-Brandenburg. Das Werk ist Hightech-Standort für die Komponentenfertigung mit Technologien zur Verminderung von CO₂-Emissionen. Dazu gehört unter anderem die innovative Motorsteuerung CAMTRONIC. Für dieses variable Ventilverstellungssystem fungiert der Standort als Kompetenzzentrum im weltweiten Powertrain-Produktionsverbund. Der Standort Berlin ergänzt sein Produktportfolio zudem um die Montage eines elektrischen Antriebsmoduls für Fahrzeuge der Produkt- und Technologiemarke EQ. Im Rahmen seiner Digitalisierungsstrategie treibt das Mercedes-Benz Werk Berlin das Konzept der Smart Factory voran und nutzt vielfältige Technologien aus dem Bereich Industrie 4.0. Es hat sich zum Ziel gesetzt, tiefergehend einen Beitrag zum Unternehmensziel zu leisten und die Produktion energieeffizient und ressourcenoptimiert zu gestalten. Dafür soll zur Standortsicherung die Transformation des Werks in Richtung Nachhaltigkeit und Digitalisierung auch durch die Erprobung biobasierter, bioinspirierter und biointelligenter Ansätze aus dem Kontext der Biologischen Transformation nachdrücklicher vorangetrieben werden. Als Beitragsleister für nachhaltige Mobilitätslösungen des Gesamtunternehmens möchte sich der Standort immer stärker von einem Fertigungs- und Montagebetrieb zu einem modernen „digitalen“ Dienstleister wandeln und bspw. in Pilotprojekten und Anlaufprojekten darstellen, wie Vernetzungen entlang von Lieferketten und eine Optimierung von Nachhaltigkeitsindikatoren, wie beispielsweise CO₂-Emissionen, Ressourceneffizienz und Gesundheit, über die gesamte Wertschöpfung, Nutzung und Nachnutzung erfolgen kann. Dabei gewinnt die zunehmende Anwendung von Materialien, Strukturen und Prinzipien der belebten Natur an Bedeutung. Die grundsätzliche Anwendbarkeit von Biologischen Transformationsansätzen im industriellen Kontext wurde hierfür bisher nicht ausreichend erforscht und bei Mercedes-Benz am Werk Berlin nicht ganzheitlich betrachtet.

Die Identifikation innovativer biobasierter, bioinspirierter und biointelligenter Ansätze für die Entwicklung, Planung und Produktion von Komponenten im Werk Berlin durch das Vorhaben soll im Unternehmensverbund adaptiert werden, sodass die Fahrzeuge eine insgesamt positivere Bilanz im Hinblick auf Ressourcen- und Materialeinsatz und letztlich den CO₂-Fußabdruck erreichen.

Im WvSC werden im Verbund für die produktionstechnischen Innovationen das Fraunhofer IPK, das FOKUS, die TU Berlin, die BAM, die Siemens AG sowie über 20 KMU aus der Region den produktionstechnischen und gesellschaftlichen Strukturwandel durch eine enge Forschungs- und Entwicklungskooperation vorantreiben. Ziel des WvSC ist es, den Wissenstransfer zwischen den beteiligten und weiteren KMU und Start-ups zu verstärken, um Wertschöpfung durch neue Ideen und Produktion vor Ort zu ermöglichen. Im Fokus stehen dabei die Technologiethemen „Digitalisierung“, „Additive Manufacturing“ sowie „Neue Materialien“. Darüber hinaus steht die gesamte Region, in der die oben beschriebenen Projekte durchgeführt werden, für eine Transformation. In den Produktionsstätten wurden bisher elektrische Antriebe und Gasturbinen entwickelt und produziert. Diese Produkte sind über 100 Jahre alt und wurden bisher stetig verbessert und effizienter. Nun erfolgt einerseits ein technologischer Sprung durch z. B. gedruckte anstelle von gewickelten Spulen in elektrischen Antrieben, echtzeitfähige

Diagnose und Simulation von Reparaturprozessen von Gasturbinen sowie Leichtbau und Kühlung von hochtemperaturbelasteten Teilen in Gasturbinen durch additive Fertigung.

Ausgangslage

Dieser Sprung kann aber nur gelingen, wenn die Produktionsstätten als Gesamtsystem der Wertschöpfung verstanden werden, d.h. inklusive der Berücksichtigung der neuen Lebens- und Arbeitswelt. Diese Vernetzung soll über die Biologische Transformation 4.0 eng mit dem Mercedes-Benz Werk Berlin sowie dem weiteren Vorhaben der Siemensstadt 2.0 verzahnt werden. Das Zusammenwirken von Wissenschaft und Wirtschaft in ausgewählten Schlüsseltechnologien und Innovationsfeldern wird somit gestärkt.

Die Erkenntnis- und Erprobungsregion umfasst die folgenden drei Betrachtungsebenen:

- A) Makroökonomisches System am Standort Berlin: Auf makroökonomischer Ebene wird der Standort Berlin als gesamtes System aus Gesellschaft, Arbeit, Produktion, Bildung und benötigter Infrastruktur betrachtet und gestaltet.
- B) Produktionsstandorte: Auf Produktionsstandortebene werden die Standorte der Anwendungspartner als Zusammenspiel aus Ressourcen, Produkten und Prozessen betrachtet und gestaltet.
- C) Eingesetzte Produktionstechnologien und -prozesse am Produktionsstandort: Auf der untersten Systemebene werden Produktionsprozesse und entsprechende Technologien betrachtet und gestaltet.

4 Übergreifender Stand der Forschung und Technik

Übergreifender Stand der
Forschung und Technik

4.1 Biologische Basis

Die Übertragung biologischer Formen und Funktionen auf technische Anwendungsfelder wird im Begriff der Bionik durch J.E. Steele erstmalig definiert [1] und durch Nachtigall um „Aspekte des Zusammenwirkens belebter und unbelebter Systeme sowie die wirtschaftlich-technische Anwendung biologischer Organisationskriterien“ [2] erweitert. Als Wissenschaftsdisziplin verfolgt die Bionik (auch bekannt unter den ähnelnden Begriffen Biomimikry, Biometik, Biomimese) im Allgemeinen zwei unterschiedliche Ansatzrichtungen: Im Kontrast zur Analogiebionik (Top-Down-Ansatz) öffnet die Abstraktionsbionik einen weiten Lösungsraum, in dem durch biologische Grundlagenforschung bestimmte Prinzipien in der Natur entdeckt, und im Anschluss abstrahiert werden (Bottom-Up-Ansatz) [3]. Insbesondere im Produktentwicklungsprozess unterstützen bereits Datenbanken mit biologischen Informationsquellen, wie z.B. askNature des Biomimicry Institutes [4], über kontextsensitive Suche mit zunehmender Bedeutung unter dem Terminus „Biologisch inspiriertes Design“ als Designbewegung für eine umweltbewusste nachhaltige Entwicklung [5]. Die neue Bionik knüpft an die neuen technischen Möglichkeiten der Nano-, Bio-, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie der kognitiven Wissenschaften und Künstlicher Intelligenz, die längerfristig als konvergierende Technologien beschrieben wird, an [6]. Im Zusammenhang mit technischen Innovationen spricht Gleich [7] von evolutionären generalisierbaren Optimierungsprinzipien auf molekularer Ebene bis zum Ökosystem und nennt diesbezüglich Solares Wirtschaften, Opportunismus (Nutzung des Vorhandenen), Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft, Diversität und Modularität, Adaptivität, Selbstorganisation (Emergenz) und Selbstheilung sowie mehrdimensionale Optimierung aber auch Resilienz.

Im Zuge der Biologischen Transformation, die ein zentrales Element der Hightechstrategie 2025 darstellt, etablieren sich auf der wirtschaftlichen Gestaltungsebene die Konzepte der Bioökonomie [8] und maßgeblich der Kreislaufwirtschaft [9] zur Förderung und Stärkung nachhaltiger und innovativer Entwicklungen. Diese haben das gemeinsame Ziel, ökologische, ökonomische und soziale Belange in Einklang zu bringen [10] mit dem Ziel des optimierten Ressourceneinsatzes [11]. Intelligente Produktherstellung und -nutzung [12], innovative Geschäftsmodelle basierend auf Recycling, Wiederverwendung, Rückgewinnung von Materialien [13], ebenso wie das Design von Produkten, Systemen und Geschäftsmodellen [14], dienen dabei in der Kreislaufwirtschaft der erhöhten Wertschöpfung von Ressourcen. Der Handlungsspielraum weitet sich durch die Übertragung biowissenschaftlichen Wissens im Kontext der Bioökonomie auf alle Sektoren, die biologische Ressourcen nutzen und produzieren [15], aus. Ein systematischer Ansatz zur Schließung und Verlangsamung der Stoffkreisläufe basiert auf der wissenschaftlichen Disziplin der industriellen Ökologie [16], deren zugrundeliegenden Wissensnetzwerke und das interorganisationale Stoffstrommanagement in der Industriellen Symbiose [17] fokussiert werden.

4.2

Digitale Basis

4.2.1

Industrie 4.0

Die Verschmelzung der physischen mit der virtuellen Welt sind Merkmale der vierten industriellen Revolution, in der Produktion und Informations- und Kommunikationstechnologien zusammenwachsen. Die Vision von Industrie 4.0 beschreibt eine hochflexible, ressourcenschonende und urbanverträgliche Produktion. Im Zentrum der Industrie 4.0 steht die intelligente Fabrik, in der Mensch und Maschine Hand in Hand arbeiten, wobei Arbeitnehmer aller Generationen durch intelligente Assistenzsysteme unterstützt werden [9].

Seit Verabschiedung der High-Tech-Strategie 2020 wurden zahlreiche Projekte mit Bezug zu Industrie 4.0 bzw. zur digitalen Transformation in Wirtschaft und Gesellschaft initiiert. Diese greifen das Konzept einer vernetzten und digitalen Produktion auf und setzen es in praxisnahe Demonstratoren um. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Konzeption und Realisierung autonomer technischer Systeme [18]. Die Normungsroadmap Industrie 4.0 – initiiert und koordiniert durch das DIN – stellt ein zentrales Kommunikationsmedium der Industrie 4.0 zum nationalen und internationalen Austausch zwischen unterschiedlichen Akteuren dar [19].

Basierend auf dem Status Quo der Umsetzung von Industrie 4.0 hat der Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0 Forschungsbedarfe in vier Themenfeldern abgeleitet. Diese umfassen technische, ökonomische, entwicklungsmethodische und soziale bzw. rechtliche Themen. Sie zeigen Richtungen auf, wo in Zukunft Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten gezielt betrieben und in die Anwendung transferiert werden müssen, um Industrie 4.0-Ansätze erfolgreich in großen wie in kleinen Unternehmen zu implementieren. [20]

4.2.2

Digitalisierung und digitale Transformation

Der technologische Fortschritt und die damit einhergehende Digitalisierung, im Sinne des Prozesses der Einführung und Nutzung digitaler Technologien [21], führt auf wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Ebene zu weitreichenden Transformationsprozessen. Diese beschleunigte Veränderungsdynamik setzt auf Vernetzungsschnittstellen und -mechanismen, datengesteuerte Erkenntnis- und Entscheidungsfindung sowie der IT-gestützten Automatisierung der zu Grunde liegenden Prozesse. Während die Digitalisierung sich in Industrie, Dienstleistungswirtschaft, Arbeit und Gesellschaft bereits merklich materialisiert hat, müssen strukturelle und systemische Veränderungen sowie die Auswirkungen der digitalen Transformation auf die Akteure der verschiedenen Ebenen und resultierende Wechselwirkungen weiter untersucht werden [22, 23, 24, 25]. Die Erforschung der sozioökonomischen Veränderungsprozesse und gesellschaftspolitischen Handlungsfelder muss sich dabei der Dynamik der Digitalisierung anpassen und eine gestaltende Rolle einnehmen. Zugleich sollten die ökologischen und sozialen Realitäten und Herausforderungen einer nachhaltigen Entwicklung die digitale Transformation leiten und instrumentalisieren [26].

Die Einführung neuer regulatorischer Anforderungen, wie beispielsweise der EU-Altfahrzeugverordnung, des Batteriepasses sowie des Digitalen Produktpasses, stellt Unternehmen vor die Herausforderung, ihre Produktionsprozesse und Wertschöpfungsketten nachhaltig zu gestalten und anzupassen. Diese Regularien erfordern eine verstärkte Integration von Umwelt- und Ressourcenschutzaspekten, was neue

Anforderungen an die Nachhaltigkeit, Transparenz und Nachverfolgbarkeit in der Produktion mit sich bringt. In Reaktion auf diese Anforderungen entstanden während der Projektlaufzeit unterschiedliche Initiativen und Vorhaben, die teilweise ähnliche Ansätze wie das vorliegende Projekt verfolgen. Im Bereich der Automobilproduktion werden unter Leitung der BMW Group im Konsortialprojekt „Future Sustainable Car Materials“ beispielsweise neue Vorgehensweisen zur Nutzung nachhaltiger Materialien erarbeitet, um den CO₂-Fußabdruck bei der Gewinnung von Materialien sowie bei deren Verarbeitung und Wiederverwertung zu senken. Die Initiative „Catena-X“ liefert in diesem Zusammenhang einheitliche Datenformate und eine technologische Basis zur kollaborativen Zusammenarbeit [27]. Diese Initiative zur Schaffung einer gemeinsamen Dateninfrastruktur in der automobilen Wertschöpfung verfolgte dabei zum Teil ähnliche Ansätze und Konzepte wie das vorliegende Vorhaben (z.B. Technologieradar, CE-Assistent zur Auswahl von R-Strategien für Altfahrzeuge und -komponenten).

4.2.3

Advanced Systems Engineering

Im abgeschlossenen Forschungsprojekt ADWISE wurde eine erste Definition und Eingrenzung von Systems Engineering (SE), Advanced Engineering (AE) und Advanced Systems Engineering (ASE) vorgenommen. So bietet SE eine auf der Systemtheorie und Systemtechnik beruhende holistische Herangehensweise zur Orchestrierung der Akteure in der interdisziplinären Entwicklung komplexer Systeme. Im Fokus des AE stehen aktuell die Aspekte der kreativen Arbeitsweise und agilen Organisationskultur, die ganzheitliche Betrachtung der Entwicklung und des gesamten Innovationsprozesses, sowie die durchgängige Verwaltung der Entwicklungsmodelle und Künstlicher Intelligenz (KI) im Engineering. ASE bietet hingegen das Potential, die vielfältigen Aspekte des SE und AE im Kontext des soziotechnischen Engineering-Systems einer Organisation zu integrieren. Das ASE-Paradigma umfasst den interdisziplinären Ansatz und die Gesamtheit der Denkprinzipien, Methoden und Verfahrensweisen für die ganzheitliche Planung und Entwicklung von innovativen Sachleistungen, Dienstleistungen und hybrider Leistungsbündel (Produkt-Service Systeme bzw. PSS). Durch seine Anpassbarkeit an verschiedene Organisationsformen und -größen, sowie an die spezifischen Projektumfelder ist das ASE-Paradigma unabhängig von den Rahmenbedingungen des Unternehmens anwendbar und fördert durch Synergien zwischen agilen und systembasierten Vorgehen die Wertschöpfung von Morgen.

4.3

Biologische Transformation

Unter der Biologischen Transformation wird die Übertragung von Prinzipien natürlicher Systeme auf technische Materialien, Strukturen und Prozessen verstanden. Ziel ist es, eine nachhaltige Wertschöpfung zu erreichen [28]. 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) [29]. Die Studie BIO-TRAIN definiert aus produktionstechnischer Perspektive unter „Biointelligenz“ die biologische Transformation als das Zusammenwirken von technischen, informationstechnischen und biologischen Systemen. Ferner werden die Ergebnisse einer Voruntersuchung mit über 100 Expertinnen und Experten zur industriellen Wertschöpfung präsentiert. Es werden u.a. die nötigen Basis- und Befähiger-Technologien identifiziert und bewertet sowie über 200 Forschungs- und über 150 Gestaltungsthemen benannt [30]. 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 [31].

Übergreifender Stand der
Forschung und Technik

Weitere Beispiele für die industrielle Anwendung der biologischen Transformation in einem verwandten Themenbereich während des Projektvorhabens liefert Festo, ein Unternehmen im Bereich der Steuerungs- und Automatisierungstechnik. Im Rahmen seiner Forschungsinitiativen zur Biologisierung von Produktionsprozessen entwickelte Festo den Photobioreaktor „PhotoBionicCell“, der die automatisierte, ressourcenschonende Kultivierung von Algen zur Umwandlung von CO₂ in wertvolle organische Verbindungen ermöglicht. Darüber hinaus veranschaulicht die „BionicCellFactory“, wie solche Bioprozesse im industriellen Maßstab effizient und nachhaltig umgesetzt werden können [32].

4.4 Literatur

- [1] Steele, Jack E. (1960): Living Prototypes – The Key to New Technology. Bionics Symposium. United States. Wright Air Development Division. Directorate of Advanced Systems Technology. Dayton
- [2] Nachtigall, Werner (1998): Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Berlin; Springer-Verlag
- [3] VDI-Richtlinie 6220 Blatt 1 (2019): Bionik - Konzeption und Strategie - Abgrenzung zwischen bionischen und konventionellen Verfahren/Produkten. Berlin; Beuth-Verlag
- [4] Deldin, Jon-Michael; Schuknecht, Megan (2014): The AskNature Database: Enabling Solutions in Biomimetic Design
- [5] Chakrabarti, Amaresh, Supporting Analogical Transfer in Biologically Inspired Design. In: Goel, McAdams et al. (Hg.) 2014 – Biologically Inspired Design, S. 201–220. London; Springer. DOI: 10.1007/978-1-4471-5248-4_8
- [6] Roco, Mihail C.; Bainbridge, William Sims (2002): Converging Technologies for Improving Human Performance; Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science. Arlington
- [7] Gleich, Arnim (2007): Das bionische Versprechen. Ist die Bionik so gut wie ihr Ruf? Ökologisches Wirtschaften – Fachzeitschrift. Jg. 22, Nr. 3. DOI: 10.14512/oew.v22i3.528
- [8] BMBF (2014): Bioökonomie in Deutschland, Chancen für eine biobasierte und nachhaltige Zukunft. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/upload_files-tore/pub/Biooekonomie_in_Deutschland.pdf
- [9] acatech (2019): Industrie 4.0. Zukunft der Industriearbeit. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und Hans Böckler Stiftung. Online verfügbar unter <http://www.zukunft-der-industriearbeit.de>, zuletzt geprüft am 16.05.2019.
- [10] D'Amato D.; Droste, N.; Allen, B.; Kettunen, M.; Lähtinen, K.; Korhonen, J. et al. (2017): Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. In: Journal of Cleaner Production 168, S. 716–734. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.053.
- [11] Sauv , Sébastien; Bernard, Sophie; Sloan, Pamela (2016): Environmental sciences, sustainable development and circular economy: Alternative concepts for trans-disciplinary research. In: Environmental Development 17, S. 48–56. DOI: 10.1016/j.envdev.2015.09.002.
- [12] Potting, José; Hekkert, Marko; Worrell, Ernst; Hanemaaijer, Aldert (2017): Circular economy: Measuring innovation in the product chain. Hg. v. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- [13] Kirchherr, Julian; Reike, Denise; Hekkert, Marko (2017): Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. In: Resources, Conservation and Recycling 127, S. 221–232. DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [14] Ellen MacArthur Foundation (2012): Towards the circular economy. Economic and business rationale for an accelerated transition. Online verfügbar unter

<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>.

- [15] Europäische Kommission (2018): A sustainable bioeconomy for Europe. Strengthening the connection between economy, society and the environment : updated bioeconomy strategy. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- [16] Graedel, T. E.; Allenby, Braden R. (2010): Industrial ecology and sustainable engineering. International ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [17] Li, Xiaohong (2018): Industrial Ecology and Industry Symbiosis for Environmental Sustainability: Springer International Publishing.
- [18] BMWi (2016): AUTONOMIK für Industrie 4.0. Ergebnisse. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin.
- [19] DIN/DKE (2018): Deutsche Normungsroadmap Industrie 4.0. Wohin geht die Reise? Online verfügbar unter <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/industrie4-0/roadmap-industrie40-62178>, zuletzt geprüft am 16.05.2019.
- [20] Plattform Industrie 4.0 (2019), Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0: Themenfelder Industrie 4.0 - Forschungs- und Entwicklungsbedarfe zur erfolgreichen Umsetzung von Industrie 4.0. MKL Druck GmbH & Co. KG, Ostbevern.
- [21] Legner, Christine; Eymann, Torsten; Hess, Thomas; Matt, Christian; Böhmman, Tilo; Drews, Paul et al. (2017): Digitalization: Opportunity and Challenge for the Business and Information Systems Engineering Community. In: Bus Inf Syst Eng 59 (4), S. 301–308. DOI: 10.1007/s12599-017-0484-2.
- [22] Vial, Gregory (2019): Understanding digital transformation: A review and a research agenda. In: The Journal of Strategic Information Systems. DOI: 10.1016/j.jsis.2019.01.003.
- [23] BMWi (2015): Industrie 4.0 und Digitale Wirtschaft. Impulse für Wachstum, Beschäftigung und Innovation. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Berlin.
- [24] Westerman, George, Calmédjane, Claire; Bonnet, Didier; Ferraris, Patrick; McAfee, Andrew (2011): Digital Transformation. A Road-Map for Billion-Dollar Organizations. Hg. v. MIT Center for Digital Business and Capgemini. Cambridge, MA und Paris.
- [25] BMBF (2015): Arbeit in der digitalisierten Welt. Digitalisierung als soziale Innovation. Online verfügbar unter <https://www.produktion-dienstleistung-arbeit.de/de/arbeit-in-der-digitalisierten-welt-1963.html>.
- [26] WBGU - Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2019): Unsere gemeinsame digitale Zukunft. Zusammenfassung. Hg. v. WBGU. Berlin.
- [27] BMW Group (2023): Leuchtturmprojekt: Konsortium entwickelt neue Konzepte zur Nutzung nachhaltiger Materialien. Online verfügbar unter <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0406535DE/leuchtturmprojekt-konsortium-entwickelt-neue-konzepte-zur-nutzung-nachhaltiger-materialien?language=de>, zuletzt geprüft am 26.11.2024.
- [28] Neugebauer, Reimund (Hg.) (2019): Biologische Transformation. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Springer Vieweg.
- [29] Mieke, Robert; Bauernhansl, Thomas; Schwarz, Oliver; Traube, Andrea; Lorenzoni, Anselm; Waltersmann, Lara et al. (2018): The biological transformation of the manufacturing industry – envisioning biointelligent value adding. In: Procedia CIRP 72, S. 739–743. DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.085.
- [30] Bauernhansl, Thomas; Beckett, Marc; Brecher, Christian; Demmer, Axel; Drossel, Welf-Guntram; Elfert, Patrik et al. (2019): Biointelligenz. Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung. Hg. v. Thomas Bauernhansl, Christian Brecher, Welf-Guntram Drossel, Peter Gumbsch, Michael ten Hompel und Markus Wolperdinger. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Stuttgart.

Übergreifender Stand der
Forschung und Technik

- [31] Byrne, Gerald; Dimitrov, Dimitri; Monostori, Laszlo; Teti, Roberto; van Houten, Fred; Wertheim, Rafi (2018): Biologicalisation: Biological transformation in manufacturing. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 21, S. 1–32. DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.03.003.
- [32] Festo (2024): Forschungsfeld Biologisierung: Automatisierung für die biologische Transformation. Online verfügbar unter https://www.festo.com/de/de/e/ueber-festo/forschung-und-entwicklung/forschungsfelder/forschungsfeld-biologisierung-id_1280794/, zuletzt geprüft am 26.11.2024.

Übergreifender Stand der
Forschung und Technik

5 Biologische Transformation der Industrie

Anne Seegrün¹, Lynn Faßbender¹, Sebastian Wehking¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Im Zentrum der Industrie 4.0 stehen technologische Innovationen und eine nachhaltige Transformation. Im Rahmen der Biologischen Transformation der Industrie werden biologische Prinzipien als Inspirationsquelle genutzt. Das Konzept der Biologischen Transformation, strukturiert in die Entwicklungsmodi Bio-Inspiration, Bio-Integration und Bio-Interaktion, zielt darauf ab, traditionelle Wertschöpfungssysteme in nachhaltige und zirkuläre Systeme zu überführen. Im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 wurde die Taxonomie der Biologischen Transformation entwickelt, die biologische Prinzipien systematisch klassifiziert. Ziel ist es, eine Wissensbasis für die Biologische Transformation der Produktion zu schaffen und die Klassifizierung der technologischen Innovationen im Projekt zu ermöglichen.

5.1 Einleitung

Die Industrie 4.0 ist von technologischen Fortschritten geprägt, die Innovationen und neue Produktionsformen vorantreiben. Im Kern werden durch Industrie 4.0 physische und virtuelle Welten miteinander verbunden, wobei Informations- und Kommunikationstechnologien als zentrale Enabler fungieren. Der Einsatz digitaler Lösungen erlaubt eine nachhaltigere und zirkuläre Produktion. Zusätzlich führt die Anwendung von Technologien wie Künstlicher Intelligenz, Internet of Things (IoT), Smart Factory und digitaler Zwillinge zu einer Steigerung der Produktivität und Flexibilität. Allerdings steht die industrielle Wertschöpfung vor erheblichen Herausforderungen: Die Klimakrise, Ressourcenknappheit und zunehmend strengere regulatorische Anforderungen erfordern innovative Ansätze. Vor diesem Hintergrund wird der Biologischen Transformation ein enormes Potenzial zugeschrieben. Sie verspricht, durch naturinspirierte Ansätze nachhaltige Lösungen für gesellschaftliche Probleme und wirtschaftliche Herausforderungen hervorzubringen [1].

5.2 Stand der Technik

Die Biologische Transformation beschreibt den ganzheitlichen Wandel von traditionellen zu nachhaltigen Wertschöpfungssystemen [2]. Dabei dient die Biologie als Inspirationsquelle für die Entwicklung neuer Produkte, Technologien und Materialien im Kontext der Industrie 4.0 [3]. Die aus der Natur gewonnenen Erkenntnisse werden systematisch in der Fertigung angewendet, um Produktionssysteme gezielt an gesellschaftliche und wirtschaftliche Herausforderungen anzupassen [2]. Im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 wurde der Begriff „Biologische Transformation“ wie folgt definiert:

„Biologische Transformation in der Produktion ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Veränderung der industriellen Wertschöpfung hin zu nachhaltig optimierten Produkt- und Produktionssystemen durch eine beschleunigte Konvergenz von technischen, digitalen und biologischen Systemen in der Produktionsumgebung.“ [4]

Unter der Biologischen Transformation wird demnach die Übertragung von Prinzipien natürlicher Systeme auf technische Materialien, Strukturen und Prozesse verstanden. Ziel ist es, eine nachhaltige Wertschöpfung zu erreichen. Wesentliche

Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation sind Bio-Inspiration (Lernen von Beobachtungen der Natur für die Anpassung von Technik), Bio-Integration (Symbiose technischer Systeme nach biologischem Vorbild) und Bio-Interaktion (Verflechtung der Natur mit der Technik).

Biologische Transformation der
Industrie

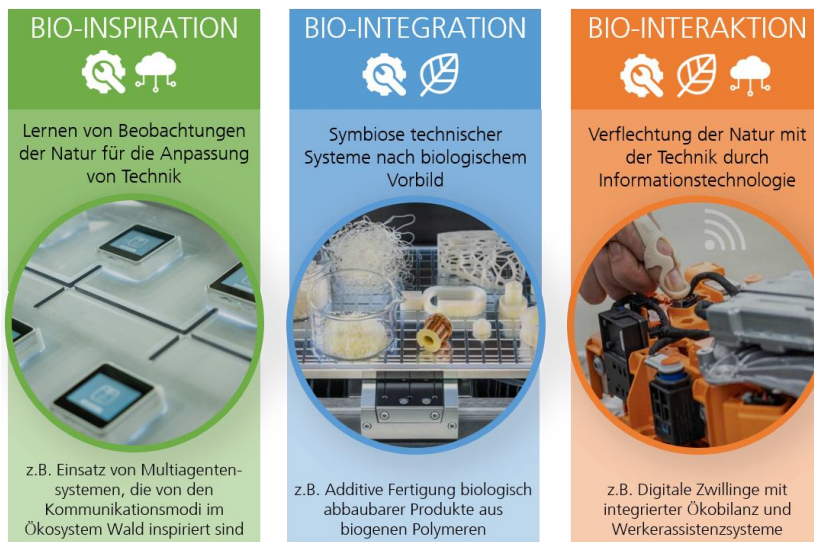


Abb. 5.1 Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation

Zahlreiche technologische Innovationen, wie der Lotuseffekt bei Oberflächenbeschichtungen, Exoskelette inspiriert von Insektenpanzerungen und die Nutzung von Schwarmintelligenz, basierend auf dem Verhalten von Vogelschwärmen, zeigen, wie kreativ und effektiv sich Prinzipien aus der Natur auf technische Anwendungen übertragen [2]. Dieses „Lernen von der Natur“ bildet die Grundlage für die Bio-Inspiration, eines der drei zentralen Entwicklungsmodi der Biologischen Transformation. Hierbei werden evolutionär entstandene biologische Phänomene durch technische Nachahmung auf Anwendungen in der Technik übertragen. So entstehen neue Materialien, Strukturen und Funktionalitäten sowie innovative Organisations- und Kooperationslösungen [1].

Die Bio-Integration beschreibt die Einbindung natürlicher Prinzipien in technische Systeme, wodurch Kreisläufe geschlossen und neuartige Produkte geschaffen werden können [2]. Beispiele hierfür sind die additive Fertigung kompostierbarer Produkte aus biologischen Abfällen, biotechnologisch hergestellte Pharmazeutika oder die Rückgewinnung seltener Erden aus Magneten mithilfe von Mikroorganismen [1].

Bei der Bio-Interaktion wiederum erfolgt eine Verflechtung technischer, informatischer und biologischer Systeme, etwa durch den Einsatz intelligenter Daten- und Informationsverarbeitung. Als Beispiele für die Bio-Interaktion können digitale Zwillinge von Produkten sowie der Einsatz von biointelligenten Arbeiterassistenzsystemen in der Produktion zugeordnet werden [4].

5.3

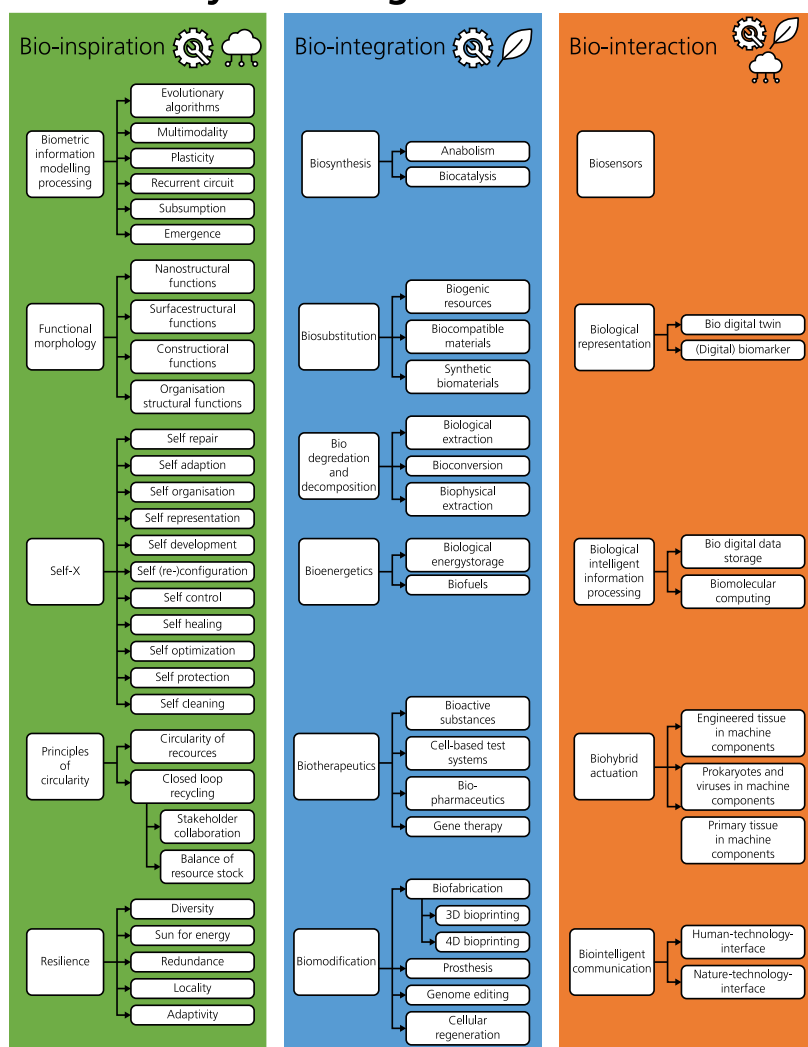
Taxonomie der Biologischen Transformation

Im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 wurde eine Taxonomie entwickelt, die biologische Wirkprinzipien in der Fertigung klar strukturiert und damit eine gemeinsame Grundlage für das Verständnis und die Anwendung der Biologischen Transformation schafft. Die

Klassifizierung ermöglicht es, naturbasierte Ansätze in der Fertigung besser zu beschreiben, einzuordnen und anzuwenden. Diese einheitliche Semantik bietet eine geordnete Klassifizierung von biologischen Prinzipien, wodurch Technologieinnovationen im Kontext der Biologischen Transformation besser erfasst und gezielter für nachhaltige Lösungen eingesetzt werden können.

Die Entwicklung der Taxonomie folgte einer deduktiven Methodik, basierend auf der grundlegenden Unterteilung der Biologischen Transformation in die Entwicklungsmodi Bio-Inspiration, Bio-Integration und Bio-Interaktion. Die im Projekt entstandene Taxonomie als geordnete Klassifizierung biologischer Wirkprinzipien in Gruppen und entsprechende Entwicklungsmodi ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

Taxonomy of biological transformation



Impact dimensions of biological transformation



Technical



Biological



Informative

Abb. 5.2 Taxonomie der Biologischen Transformation [4]

Biologische Transformation der
Industrie

5.4

Anwendung der Taxonomie am Beispiel der Technologien im Projekt

Im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 wurden unterschiedliche Technologien in den jeweiligen Teilprojekten entwickelt und erprobt, um die Biologische Transformation der Industrie entlang der Wertschöpfungskette zu untersuchen. Diese Technologien umfassen verschiedene Produkt- und Fertigungslösungen, darunter die bildbasierte Objekterkennung, die Empfehlung von R-Strategien für eine intelligente Reststoffbearbeitung, digitale Zwillinge mit integrierter Ökobilanz, das interaktive Lagebild für vernetzte Produktionssysteme, das Multiagentensystem für die Selbstorganisation in der Produktion, das Werkerassistenzsystem sowie die Herstellung und additive Fertigung mit biogenen Polymeren. Im Rahmen von Expertinnen- und Expertenworkshops wurden die jeweiligen Wirkprinzipien der entwickelten Taxonomie durch iterative Analyseprozesse und Methoden des Analogiemappings den entsprechenden Technologien zugeordnet. Hierdurch wurde die Anwendbarkeit der Taxonomie in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern aus Industrie und Forschung validiert. Das Ergebnis der Zuordnung ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. [4]

Technologien	Entwicklungs- modus	Gruppe	Wirkungsprinzip
Intelligente Reststoffbearbeitung (Kapitel 12)			
Bildbasierte Objekt- erkennung	Bio-Inspiration	Biomimetic information modelling processing	Multimodality
	Bio-Interaktion	Biointelligent communication	Human-technology- interface
Empfehlung von R-Strategien	Bio-Inspiration	Principles of circularity	Circularity of resources Closed loop recycling Stakeholder collaboration
Digitale Zwillinge als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse (Kapitel 13)			
Digitaler Zwilling mit integrierter Ökobilanz	Bio-Interaktion	Biological representation Self-X	(Digital) biomarker Self representation Self control
Bionische Integration für vernetzte Produktionssysteme (Kapitel 14)			
Interaktives Lagebild	Bio-Inspiration	Self-X	Self repair Self representation Self control
		Resilience	Adaptivity
Selbstorganisierende Produktionssysteme (Kapitel 15)			
Multiagenten- system	Bio-Inspiration	Functional morphology	Organisation structural functions
		Self-X Resilience	Self organisation Redundance

Integration menschlicher Bewegungsdaten im industriellen Kontext (Kapitel 16)			
Werkerassistenzsystem	Bio-Interaktion	Biointelligent communication	Human-technology-interface
	Bio-Inspiration	Self-X	
		Resilience	Self adaption Self optimization Adaptivity
Additive Fertigung mit Fertigung mit biogenen Polymeren (Kapitel 17)			
3D-Druck mit biogenen Polymeren	Bio-Inspiration Bio-Integration	Resilience Biodegradation Biosubstitution	Adaptivity Bioconversion Biogenic resources
Herstellung von biogenen Polymeren	Bio-Inspiration	Principles of circularity	Circularity of resources Closed loop recycling
	Bio-Integration	Resilience Biosynthesis	Stakeholder collaboration Locality Anabolism

Tab. 5.1 Zuordnung biologischer Wirkprinzipien zu den Technologien im Projekt BioFusion 4.0

5.5 Zusammenfassung

Die vorgestellte Taxonomie der Biologischen Transformation in der Fertigung bietet einen systematischen Überblick über relevante Prinzipien an den Schnittstellen von Natur, Technik und Informationstechnologie. Mit der Unterteilung biologischer Wirkprinzipien in die Entwicklungsmodi Bio-Inspiration, Bio-Integration und Bio-Interaktion wurde eine klare Struktur geschaffen, die es ermöglicht, Technologien und Ansätze gezielt einzuordnen und gezielter für nachhaltige Lösungen einzusetzen. Mit dem Fortschreiten der technologischen Entwicklung eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Förderung der Biologischen Transformation in der Fertigung, was eine kontinuierliche Aktualisierung der Taxonomie erfordert, um sie als nützliches Instrument für diesen Fortschritt zu erhalten. Insbesondere die Forschung im Bereich der Künstlichen Intelligenz und der bionischen Informationsverarbeitung entwickelt sich rasant weiter und setzt neue Standards, die in der Taxonomie berücksichtigt werden müssen. Da die Biologische Transformation in der Fertigung insbesondere auf eine gesteigerte Nachhaltigkeit abzielt, besteht die Notwendigkeit, der Industrie geeignete Mittel bereitzustellen, um die Prinzipien der Taxonomie zu erkennen und in nachhaltigen Innovationsprozessen anzuwenden [4].

Die Biologische Transformation eröffnet neue Möglichkeiten, nachhaltige Produktionssysteme zu gestalten, globale Herausforderungen wie Ressourcenknappheit und Klimawandel zu adressieren und gleichzeitig die Produktivität und Innovationsfähigkeit der Industrie zu fördern. Die Kombination von biologischen, technologischen und digitalen Systemen ist dabei der Schlüssel, um eine zirkuläre, effiziente und resiliente Wertschöpfung zu realisieren. Die im Rahmen des Forschungsprojekts entwickelten Konzepte und Erkenntnisse schaffen eine solide Grundlage für zukünftige Innovationen und die Verknüpfung von Wissenschaft und Industrie. Damit ist die Biologische Transformation nicht nur ein Ansatz zur Optimierung bestehender Produktionssysteme, sondern auch ein zentraler Treiber für die nachhaltige Industrie der Zukunft.

Biologische Transformation der
Industrie

5.6

Literatur

- [1] Bauernhansl, Thomas; Brecher, Christian; Drossel, Welf-Guntram; Gumbsch, Peter; Hompel, Michael; Wolperdinger, Markus (Hg.) (2019): Biointelligenz - Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung. Ergebnisse der Voruntersuchung zur Biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (BioTrain). Stuttgart: Fraunhofer-Verlag.
- [2] Miehe, Robert; Bauernhansl, Thomas; Schwarz, Oliver; Traube, Andrea; Lorenzoni, Anselm; Waltersmann, Lara: The Biologicla Transformation of the Manufacturing Industry - envisioning biointelligent value adding. In: Procedia CIRP, Bd. 72, S. 739–743. Online verfügbar unter [10.1016/j.procir.2018.04.085](https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.04.085).
- [3] Neugebauer, Reimund (Hg.) (2019): Biologische Transformation. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1007/978-3-662-58243-5>.
- [4] Berkhahn, Magda; Kremer, Gerald; Riedelsheimer, Theresa; Lindow, Kai; Stark, Rainer: Taxonomy for Biological Transformation Principles in the Manufacturing Industry. In: Manufacturing Driving Circular Economy, S. 981–989.

6

Standortanalyse des Transformationsraums Berlin

Standortanalyse des
Transformationsraums Berlin

Lynn Faßbender¹, Sebastian Wehking¹, Anne Seegrün¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 (Prinzipien der Biologischen Transformation und Zukunftsszenarien für den Berliner Standort) erfolgte eine Erfassung und Analyse der Ausgangssituation am Produktionsstandort Berlin. Die Zielsetzung der Standortanalyse besteht in der Einschätzung des Transformationsraums Berlin im Hinblick auf die biologische Transformation. Zu diesem Zweck wurde die SWOT-Methode herangezogen. In der Analyse wurden die Kategorien Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft, Digitalisierung und Produktion priorisiert. Das Ergebnis sind Aussagen darüber, wie attraktiv Berlin als Standort ist, welche Stärken und Schwächen bereits bestehen, welche Chancen genutzt werden können und welche Risiken berücksichtigt werden müssen.

6.1

Einleitung

Die SWOT-Analyse ist ein bewährtes Instrument zur strategischen Bewertung von Standorten und Organisationen. Sie ermöglicht es, die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken systematisch zu erfassen und darauf basierend strategische Entscheidungen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Standortanalyse Berlin aus dem Jahr 2021 nutzt dieses methodische Vorgehen, um den Produktionsstandort Berlin vor dem Hintergrund der Biologischen Transformation zu bewerten. Im Fokus stehen die drei Kategorien Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft, Digitalisierung und Produktion. Ziel ist es, Berlin als innovativen und zukunftsorientierten Standort zu analysieren, der die Wechselwirkungen zwischen Gesellschaft, Arbeit, Bildung, Infrastruktur und Wirtschaft widerspiegelt. Diese Analyse bietet eine Grundlage, um strategische Maßnahmen für die nachhaltige Weiterentwicklung des Standorts zu entwickeln.

6.2

Stand der Technik

Die SWOT-Analyse ist ein fundamentales Werkzeug zur strategischen Planung, das häufig mit der Definition von Zielen beginnt, die sich aus der Mission einer Organisation oder eines Standortes ableiten. Diese Ziele sind zurückzuführen auf eine kontinuierliche Analyse des externen Umfelds sowie der internen Fähigkeiten. In der SWOT-Analyse werden vier zentrale Bereiche betrachtet [1]:

- **Stärken:** Diese umfassen die Fähigkeiten, die herausragende Leistungen ermöglichen und aktiv genutzt werden sollten.
- **Schwächen:** Hierzu zählen Eigenschaften, die die Leistung beeinträchtigen. Es ist wichtig diese zu identifizieren und zu beheben.
- **Chancen:** Dies sind Trends, Kräfte, Ereignisse und Ideen, die für die Weiterentwicklung genutzt werden können.
- **Risiken:** Diese umfassen Ereignisse oder Kräfte, die außerhalb der Kontrolle liegen. Für solche Risiken müssen Pläne erstellt und Entscheidungen getroffen werden.

Die SWOT-Analyse berücksichtigt sowohl interne Faktoren wie Forschung und Entwicklung sowie Unternehmenskultur, als auch externe Faktoren wie Konkurrenz, Makroökonomie und Unsicherheiten. Die Betrachtung dieser Aspekte ist entscheidend, um ein klares Bild zu erhalten und eine gewünschte Zukunft zu visualisieren.

Die SWOT-Analyse wird häufig in Form einer Matrix dargestellt und dient nicht nur zur Positionsbestimmung, sondern auch als Grundlage für die Strategieentwicklung. Sie ermöglicht die Ableitung von Zielen und Handlungsempfehlungen, um einen Soll-Zustand zu erreichen. Zudem ist die SWOT-Analyse flexibel einsetzbar und bietet die Möglichkeit, verschiedene Perspektiven einzunehmen [2].

6.3 Projektergebnis

Die Standortanalyse Berlin aus dem Jahr 2021 basiert auf der Methode SWOT-Analyse, um die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken des Produktionsstandorts Berlin im Kontext der Biologischen Transformation zu bewerten.

Im Rahmen der Analyse wurde der Standort Berlin zunächst auf makroökonomischer Ebene als ganzheitliches System betrachtet. Dies umfasst die Einflüsse von Gesellschaft, Arbeit, Produktion, Bildung sowie der notwendigen Infrastruktur. Ziel war es, Berlin als Ausgangspunkt für die Untersuchung der Biologischen Transformation in Wechselwirkung mit makroökonomischen und -ökologischen Mechanismen zu bewerten.

Die Analyse der Biologischen Transformation 4.0 für den Standort Berlin erfolgt anhand empirischer Erhebungen des aktuellen Forschungs-, Anwendungs- und Verbreitungsgrads von Biologischer Transformation und Industrie 4.0 sowie bestehender Herausforderungen im politischen, industriellen und gesellschaftlichen Kontext. Dabei stützt sich die Standortanalyse auf die Ergebnisse von Experteninterviews, Literatur- und Medienrecherche sowie auf die Innovationsstrategie innoBB2025 und die Digitalisierungsstrategie Berlin. Bei der Analyse wurden drei wesentliche Kategorien untersucht:

1. Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft
2. Digitalisierung
3. Produktion

6.3.1 Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Als erstes wurde der Transformationsraum Berlin vor dem Hintergrund der Themen Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft untersucht. Dabei wurde zunächst der Status Quo analysiert und im Anschluss untersucht welche Potenziale genutzt werden könnten und welche Risiken auftreten könnten. Das Ergebnis dieser Analyse ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen.

STÄRKEN • Etabliertes Netzwerk an Recycling Anlagen • Förderungen und Strategien der Stadt Berlin begünstigen die Ansiedlung von nachhaltigen Unternehmen • Umweltbewusstsein der Bürger:innen	SCHWÄCHEN • Durchgängige Analyse der Lebenszyklen sind schwer vollständig abzubilden • Viele komplexe und regionale Vorgaben • Gestiegener Energie- und Ressourcenverbrauch durch digitale Technologien
CHANCEN • Kondensiertes Wissen von Unternehmen, Politik und NGO in einer Stadt um ökonomische Potenziale der Kreislaufwirtschaft zu heben • Politisches Rahmenwerk und finanzielle Förderung für Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft	RISIKEN • Reuse und Recycling sind negativ besetzt. Kreislaufwirtschaft wird oft als „greenwashing“ implementiert • Materialbeschaffenheit wird komplexer und überfordert Recycling Kapazitäten • Umwelt- und Bestandsschutz verhindert die Ansiedlung neuer innovativer Unternehmen

Abb. 6.1 SWOT-Analyse des Transformationsraums Berlin vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Zu den Stärken zählt das etablierte Netzwerk an Recycling-Anlagen, welches die Basis für die Realisierung nachhaltiger Prozesse bildet. Zudem unterstützt die Stadt Berlin durch Förderprogramme und Strategien die Ansiedlung von Unternehmen mit einem Fokus auf Nachhaltigkeit. Außerdem wird ein zunehmendes Umweltbewusstsein bei den Bürgern beobachtet, wodurch nachhaltige Maßnahmen von der Gesellschaft akzeptiert und gefördert werden.

Trotz der vielen Stärken lassen sich auch einige Schwächen beobachten, die den Fortschritt und die Akzeptanz der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft behindern können. Aufgrund mangelnder Datenverfügbarkeit und komplexer Zusammenhänge ist eine durchgängige Analyse der Lebenszyklen von Produkten schwierig. Hinzu kommt, dass zahlreiche regionale Vorschriften den Prozess erschweren. Der Einsatz digitaler Technologien, die für die Umsetzung und Optimierung von Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft notwendig sind, führt zu einem erhöhten Energie- und Ressourcenverbrauch.

Im Bereich der Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft werden zahlreiche Chancen gesehen, die zukünftig genutzt werden können. Großes Potenzial wird in der Bündelung von Wissen auf Wirtschaft, Politik und NGOs gesehen. Diese Zusammenarbeit kann genutzt werden, um das wirtschaftliche Potenzial der Kreislaufwirtschaft in Berlin weiter auszuschöpfen. Darüber hinaus kann durch entsprechende politische Rahmenbedingungen und finanzielle Förderung von Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft ein attraktiver Standort für innovative Unternehmen geschaffen werden.

Zu den Risiken, die im Blick gehalten werden müssen zählt zum einen die negative öffentliche Wahrnehmung von Recycling und Reuse, die unter Umständen als „Greenwashing“ interpretiert werden. Zum anderen wird die Materialzusammensetzung von Produkten komplexer, was die Kapazitäten der Recycling-Anlagen überlasten könnte. Außerdem erschweren strenge Auflagen für den Umwelt- und Bestandsschutz die Ansiedlung neuer und innovativer Unternehmen.

6.3.2

Digitalisierung

Die zweite Kategorie, in der der Standort Berlin untersucht wurde, ist die Digitalisierung. Die Vorgehensweise gleicht der zuvor beschriebenen Vorgehensweise. Die nachfolgende Abbildung beleuchtet die Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken im Bereich der Digitalisierung in Berlin.

STÄRKEN • Start-ups, Digitalwirtschaft und Forschungsstandorte sind digitale Vorreiter • Entwicklung und Anwendung innovativer Technologien • Expertise zu Simulation und IT-Tools, KI und Digitalen Zwillingen • Digitale Vernetzung und Automatisierung	SCHWÄCHEN • Fehlende Infrastruktur • Digitale Durchgängigkeit nicht immer gegeben • Verantwortungsvoller Umgang mit KI-Anwendungen • Fehlende Akzeptanz und unzureichende Vermarktung neuer Technologien
CHANCEN • Digitales Berlin (E-Government, Mobilität, Arbeit 4.0, Smart City) • Innovative Geschäftsmodelle und neue Wertschöpfungspotenziale • Vernetzung von Wertschöpfungsketten • Etablierung von innovativen Konzepten zur Mensch-Maschine-Interaktion	RISIKEN • Trägheit der Gesellschaft mit dem Hand zur krisenbasierten Veränderungskultur • Cyberangriffe und IT-Hacks • Datenschutz und -sicherheit • Hohe Investitionskosten

Abb. 6.2 SWOT-Analyse des Transformationsraums Berlin vor dem Hintergrund der Digitalisierung

Berlin gilt als Digitalhauptstadt. Insbesondere Start-ups, die Digitalwirtschaft und zahlreiche Forschungsstandorte treiben die Entwicklung und Anwendung innovativer Technologien voran. Darüber hinaus verfügt Berlin über eine große Expertise in den Bereichen Simulation, IT-Tools, Künstliche Intelligenz und Digitale Zwillinge. Zudem ermöglichen die hohe digitale Vernetzung und Automatisierung die effiziente Umsetzung von Prozessen.

Gleichzeitig können Schwächen ermittelt werden, die die digitale Transformation behindern können. Eine Herausforderung liegt beispielsweise in der unzureichenden digitalen Infrastruktur, wodurch die Umsetzung von Prozessen und Projekten verlangsamt wird. Zudem ist die digitale Durchgängigkeit von Prozessen nicht immer gewährleistet. Für einen verantwortungsvollen Umgang mit KI-Anwendungen werden außerdem Regularien benötigt. Eine weitere Schwäche ist, dass fehlende Akzeptanz und unzureichende Vermarktung neuer Technologien die Digitalisierung verlangsamen und einschränken. Die Digitalisierung bietet jedoch zahlreiche Chancen. Berlin hat das Potenzial, als „digitales Berlin“ sich in Bereichen wie E-Government, Mobilität, Arbeit 4.0 und Smart Cities weiterzuentwickeln. Innovative Geschäftsmodelle und neue Wertschöpfungspotenziale, welche durch die Digitalisierung ermöglicht werden, können die Wirtschaft stärken. Durch die Vernetzung von Wertschöpfungsketten und die Etablierung von Konzepten zur Mensch-Maschine-Interaktion werden neue und innovative Möglichkeiten eröffnet.

In der Analyse wurden außerdem Risiken herausgearbeitet, welche die Etablierung der Digitalisierung verlangsamen könnten. Eine Herausforderung besteht in der Trägheit der Gesellschaft und der zögerlichen Anpassung an Veränderungen. Cyberangriffe und IT-Sicherheitsprobleme stellen eine Bedrohung dar, die das Vertrauen in die Digitalisierung schwächen können. Datenschutz und Datensicherheit stellen bei Verletzung dieser ein enormes Risiko dar. Damit einher gehen hohe Investitionskosten, die eine hohe Belastung darstellen.

6.3.3 Produktion

Das letzte Kriterium stellt die Produktion in Berlin dar.

STÄRKEN • Automatisierung einzelner Produktionsprozesse • Hohe Kompetenz bei Simulation- und Prognose zur Prozessoptimierung und Überwachung • Schnittstelle: Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft • Standardisierung und Arbeitsschutzmaßnahmen	SCHWÄCHEN • Gefährdete Arbeitsplätze durch Automatisierung • Hoher Verwaltungsaufwand • Abhängigkeit von Rohstoffen, Energie und Investition • Mangel an Personal und Fachkräften • Auditprozesse sind ein Hindernis für die Modularität von Produktionslinien
CHANCEN • Integration von Prinzipien der Biologischen Transformation • Etablierung von Menschenzentrierten Arbeitsplätzen • Selbstorganisierte und lernende Produktionstechnologien mit modularen Charakter	RISIKEN • Neue Werkstoffe erfordern neue Produktions- und Herstellungsprozesse, Maschinen und Infrastruktur • Beherrschbarkeit autonomer Systeme • Neue Gefahren am Arbeitsplatz • Jobs können bedingt durch zunehmenden Grad an Automatisierung wegfallen

Abb. 6.3 SWOT-Analyse des Transformationsraums Berlin vor dem Hintergrund der Produktion

Eine Stärke der Produktion in Berlin ist, dass durch den gezielten Einsatz von Automatisierung einzelne Produktionsprozesse effizienter gestaltet werden können. Außerdem lässt sich eine hohe Kompetenz bei der Simulation und Prognose zur Optimierung und Überwachung von Prozessen beobachten. Die enge Zusammenarbeit zwischen der Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft ist eine weitere Stärke der Produktion am

Standort Berlin. Durch Standards und Arbeitsschutzmaßnahmen wird die Sicherheit am Arbeitsplatz gewährleistet.

Eine Herausforderung besteht darin, dass durch den Einsatz von Automatisierungstechnologien Arbeitsplätze wegfallen. Gleichzeitig besteht ein Mangel an Personal und Fachkräften, wodurch Innovationen langsamer umgesetzt werden können. Die Produktion ist stark abhängig von der Verfügbarkeit und den Preisen von Rohstoffen sowie den Energiekosten und den getätigten Investitionen. Durch hohe Verwaltungsaufwände werden Investitionen ausgebremst. Zudem gelten Auditprozesse als Hindernis für die Modularität und Flexibilität von Produktionslinien.

Die Produktion von Berlin kann zahlreiche Chancen nutzen, um sich noch zukunftsfähiger aufzustellen. Ein enormes Potenzial wird in der Integration von Prinzipien der Biologischen Transformation gesehen, welche neue Möglichkeiten für eine nachhaltige und innovative Produktion schafft. Des Weiteren kann durch die Etablierung von menschenzentrierten Arbeitsplätzen bessere Arbeitsbedingungen für den Menschen geschaffen werden, die langfristig der Gesundheit der Menschen zugutekommt. Eine weitere Chance besteht in selbstorganisierenden und lernenden Produktionstechnologien, die Flexibilität und schnelle Anpassbarkeit ermöglichen.

Eine Herausforderung liegt darin, dass die Arbeit mit neuen Werkstoffen angepasste Prozesse erfordert. Die Arbeit mit autonomen Systemen bringt das Risiko, dass diese unter Umständen schwer zu kontrollieren sind. Durch die Arbeit mit neuen Werkstoffen und Technologien entstehen neue Gefahren am Arbeitsplatz, wodurch neue Schutzmaßnahmen erforderlich sind. Zudem besteht die Gefahr, dass die fortschreitende Automatisierung zu Arbeitsplatzverlusten führt.

Im Rahmen der Analyse wurden außerdem besondere Initiativen und Projekte betrachtet, dazu zählen Zukunftsorte in Berlin. Projekte wie Siemensstadt 2 und der Mercedes-Benz Digital Factory Campus transformieren traditionelle Industriegebiete in moderne und nachhaltige Standorte. Des Weiteren wird im Rahmen der Innovationsstrategie innoBB 2025 die Zusammenarbeit zwischen Berlin und Brandenburg gefördert, um die Region zu einem führenden Innovationsstandort Europas zu entwickeln.

Die Analyse hebt das Potenzial der Standort Berlin hervor, eine globale Rolle in der digitalen Wirtschaft und nachhaltigen Transformation einzunehmen. Die Analyse zeigt, dass Berlin ein bedeutender Standort für die Verbindung von Nachhaltigkeit und technologischem Fortschritt ist, jedoch gezielte Innovationen und strategische Anpassungen erforderlich sind, um vorhandene Schwächen zu überwinden und Chancen bestmöglich zu nutzen.

6.4 Zusammenfassung

Die Standortanalyse Berlin zeigt, dass die Hauptstadtregion über erhebliche Potenziale verfügt, um eine führende Rolle in der digitalen Wirtschaft und nachhaltigen Transformation einzunehmen. Die SWOT-Analyse verdeutlicht, dass Berlin insbesondere in den Bereichen Digitalisierung und Nachhaltigkeit eine Vorreiterrolle einnimmt, jedoch Herausforderungen wie den Fachkräftemangel, unzureichende Infrastruktur und rechtliche Unsicherheiten bewältigen muss. Projekte wie die Siemensstadt² und der Mercedes-Benz Digital Factory Campus sowie die Innovationsstrategie innoBB 2025 unterstreichen den Weg Berlins hin zu einem innovativen und nachhaltigen Wirtschaftsstandort. Dennoch bedarf es weiterer gezielter Investitionen und strategischer Anpassungen, um bestehende Schwächen zu überwinden und das volle Potenzial der Region auszuschöpfen.

6.5

Literatur

- [1] Harvard Business School Press: SWOT Analysis: Looking Outside for Threats and Opportunities. Boston, Massachusetts. Online verfügbar unter 978-1-4221-0552-8.
- [2] Bundesministerium des Innern und für Heimat: SWOT-Analyse. Online verfügbar unter https://www.orghandbuch.de/Webs/OHB/DE/Organisationshandbuch-NEU/4_MethodenUndTechniken/Methoden_A_bis_Z/SWOT_Analyse/swot_analyse_node.html.

Standortanalyse des
Transformationsraums Berlin

7

Zukunftsszenarien für die Biologische Transformation der Industrie am Standort Berlin

Anne Seegrün¹, Lynn Faßbender¹, Sebastian Wehking¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 wurden Zukunftsszenarien zur Biologischen Transformation der Industrie am Standort Berlin entwickelt. Die Szenarioanalyse diente dabei als Instrument, um mögliche Entwicklungen unter Berücksichtigung technologischer, makroökonomischer und standortspezifischer Einflussfaktoren zu identifizieren. Das übergeordnete Ziel der Szenarioanalyse bestand darin, potenzielle Entwicklungen der Biologischen Transformation der Industrie für den Standort Berlin in den nächsten zehn Jahren zu erfassen, um letztendlich nachhaltige Innovationen im Kontext der Biologischen Transformation zu fördern und voranzutreiben. Die Methodik umfasste die Analyse von Einflussfaktoren, die Identifikation von Schlüsselfaktoren, die Entwicklung von Zukunftsprojektionen sowie die Bildung konsistenter Szenarien. Auf dieser Basis wurden relevante Chancen und Risiken für relevante Stakeholdergruppen analysiert, um fundierte Handlungsempfehlungen für eben diese Akteure zu formulieren.

7.1

Einleitung

Die Industrie ist einem stetigen Wandel unterworfen und Unternehmen stehen vor der Herausforderung, Chancen frühzeitig zu erkennen, Risiken zu minimieren und ihre Geschäftsmodelle an die Märkte von morgen anzupassen. Eine vorausschauende Auseinandersetzung mit der Zukunft ist daher entscheidend, um unter den heutigen Rahmenbedingungen langfristig erfolgreich zu sein. Die Szenarioanalyse stellt in diesem Kontext eine bewährte Methode dar, um fundierte Vorstellungen von möglichen Zukünften zu entwickeln, frühzeitig Chancen für kommende Geschäftsmöglichkeiten zu identifizieren und potenzielle Bedrohungen für bestehende Strukturen zu erkennen [1,2]. Im Rahmen des Forschungsprojekts BioFusion 4.0 wurde diese Methodik eingesetzt, um Zukunftsszenarien für die biologische Transformation der Industrie am Standort Berlin zu entwickeln. Hierbei wurden technologische, ökonomische und standortspezifische Einflussfaktoren systematisch berücksichtigt, um strategische Handlungsspielräume zu identifizieren und fundierte Empfehlungen für relevante Akteure abzuleiten. Durch die Analyse zentraler Themen aus den Einflussbereichen Produktionsstandort Berlin, Makroökonomie und Technologie wurden mögliche Wege aufgezeigt, wie Berlin seine Position im Kontext einer nachhaltigen Biologischen Transformation der Industrie ausbauen und langfristig stärken kann.

7.2

Stand der Technik

Die Szenarioanalyse ermöglicht eine strukturierte Betrachtung möglicher Zukunftsentwicklungen, um sich auf veränderte Rahmenbedingungen und Entwicklungen vorzubereiten. Sie basiert auf den Prinzipien des vernetzten Denkens und der multiplen Zukunft, die den Fokus auf die Wechselwirkungen von Einflussfaktoren und alternative Entwicklungswege legen. In einer zunehmend dynamischen und komplexen Welt wird die Berücksichtigung mehrerer „Zukünfte“ essenziell, um fundierte Entscheidungen zu treffen. Szenarien sind dabei allgemeinverständliche und nachvollziehbare Beschreibungen möglicher zukünftiger Situationen von Märkten und Umfeldern, die eine fundierte

Zukunftsszenarien für die
Biologische Transformation der
Industrie am Standort Berlin

Grundlage bieten, um sich strategisch darauf auszurichten. So unterstützt die Methodik dabei, Unsicherheiten zu begegnen und zukunftsorientierte Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen. [1,2]

In Abb. 7.1 ist das Gesamtverfahren der Szenarioanalyse in Anlehnung an Gausemeier und Plass [1] als methodische Grundlage für die Ableitung von Zukunftsszenarien für die Biologische Transformation der Industrie am Standort Berlin schematisch dargestellt.

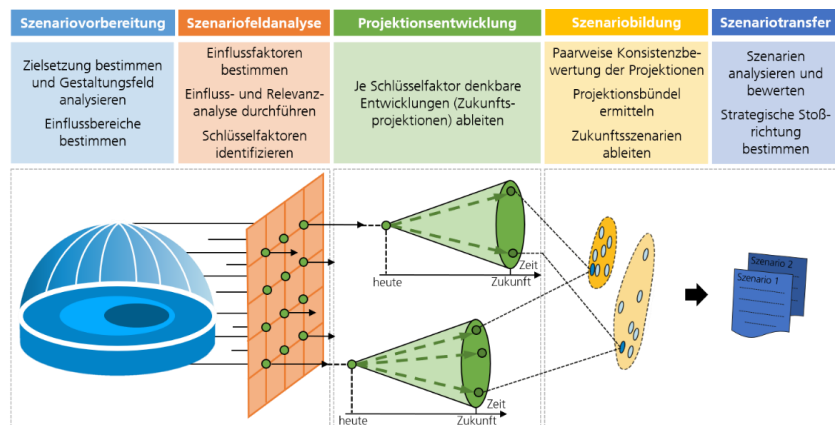


Abb. 7.1 Gesamtverfahren der Szenarioanalyse (in Anlehnung an [1])

In der Phase der Szenariovorbereitung wird das zu untersuchende Szenariofeld zunächst in geeignete Einflussbereiche unterteilt, wie z.B. ökonomisches, gesellschaftliches und technologisches Umfeld. Im Rahmen der Szenariofeldanalyse werden für diese Einflussbereiche relevante Einflussfaktoren definiert. Mithilfe der Einfluss- und Relevanzanalyse, die in Kapitel 7.3 näher erläutert werden, werden sogenannte Schlüsselfaktoren identifiziert, die die Zukunft des Untersuchungsgegenstandes maßgeblich prägen. Für jeden Schlüsselfaktor werden im Rahmen der Projektionsentwicklung alternative, klar voneinander abgrenzbare Entwicklungspfade, sogenannte Zukunftsprojektionen, erstellt. In der Phase der Szenariobildung werden diese Zukunftsprojektionen hinsichtlich ihrer Konsistenz zueinander bewertet, geclustert und zu Szenarien zusammengefasst. Die erstellten Szenarien weiten den Blick auf mögliche zukünftige Entwicklungen und bilden somit die Grundlage für die Entwicklung von Strategien. Im Rahmen des Szenariotransfers werden durch die Analyse der identifizierten Szenarien Chancen und Risiken für den jeweiligen Untersuchungsgegenstand abgeleitet und Strategien formuliert, die einen erfolgreichen Umgang mit künftigen Entwicklungen ermöglichen. [1,2]

Der folgende Abschnitt erläutert die Durchführung der Szenarioanalyse im Forschungsprojekt BioFusion 4.0. Das Ziel der Analyse bestand darin, potenzielle Entwicklungen der Biologischen Transformation der Industrie für den Standort Berlin in den nächsten zehn Jahren zu erfassen und darauf aufbauend entsprechende Handlungsempfehlungen (Kapitel 7.4) für verschiedene Stakeholder abzuleiten.

7.3 Methodisches Vorgehen im Projekt

Zur Ableitung von Zukunftsszenarien für die Biologische Transformation am Industriestandort Berlin wurde das zu untersuchende Szenariofeld im Rahmen der Szenariovorbereitung zunächst in die drei Einflussbereiche (EB) Produktionsstandort Berlin,

Zukunftsszenarien für die
Biologische Transformation der
Industrie am Standort Berlin

Makroökonomie und Technologie eingeteilt. Für diese EB wurden in der Szenariofeldanalyse insgesamt 87 Einflussfaktoren gesammelt, die als externe und interne Variablen Einfluss auf den Untersuchungsgegenstand ausüben. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden diese in Einflussbereichsuntergruppen (siehe dazu Tab. 7.1) eingeordnet.

Zukunftsszenarien für die
Biologische Transformation der
Industrie am Standort Berlin

EB	EB-Untergruppe	Einfluss- und Schlüsselfaktoren (fett und unterstrichen markiert)
Produktionsstandort Berlin	<i>Standortattraktivität Berlin</i>	Investitionen in Infrastruktur Verkehrsanbindung Internet-/ Breitbandanbindung Kultur Digitalisierungsgrad Bildungssystem Standortimage Berlin Standortattraktivität Deutschland
	<i>Nachhaltigkeitsinfrastruktur</i>	Reuse-Netzwerk Recycling-Anlagen <u>Kreislaufwirtschaft</u>
	<i>Wirtschaftslandschaft</i>	Unternehmensdiversität Kooperationsnetzwerk Forschung und Industrie Startup-Attraktivität Startup-Quote <u>Wissenstransfer</u> Venture Capital <u>Innovative Geschäftsmodelle</u> Welthandel Unternehmenskooperationen Regionalisierung von Produktionsprozessen
Makroökonomie	<i>Demographie</i>	Fachkräfte Bildungsstand Arbeitslosenquote Internationalität des Standorts Technologiekompetenz Altersstruktur
	<i>Verhalten</i>	Technologieakzeptanz Verkürzte Produktlebenszyklen Umweltbewusstsein Innovationsfreudlichkeit <u>Interdisziplinäre Zusammenarbeit</u> Neue Arbeitsweisen
	<i>Staatliche Aktivität und Politik</i>	<u>Forschungsgelder</u> <u>Subventionen & Fördermittel</u> <u>Gesetzliche Restriktionen</u> Infrastrukturstrategie für das IT-Netzwerk <u>Standardisierung & Arbeitsschutzmaßnahmen</u> <u>Nachhaltigkeitsstrategie</u> Politische Innovationsbereitschaft Globalisierung Datenschutz
	<i>Umwelt</i>	Externe Umweltfaktoren Ökosysteme Klimawandel
Technologie	<i>Technologietreiber</i>	Open Source-Strategie <u>Digitale Vernetzung</u> <u>Schwarmintelligenz</u> <u>Self-X</u> <u>Digitalisierung</u> Automatisierung Internet of Things Cyber Security <u>Kosteneffizienz der Technologie</u>
	<i>Technologien</i>	Cloud and Data Analytics NFC/ RFID Technology Exoskelett <u>Bionik</u> Mensch-Roboter-Kollaboration CAx <u>KI</u> <u>Digitaler Zwilling</u> VR AR Additive Fertigung 3D-Bioprinting Optische Sensorik Montage-Roboter 5G Quantencomputing Biosensoren und Aktoren CarbonCapture-Technologie Muster- und Emotionserkennungs-Software und Hardware Brain Machine-Interface Programmier- und steuerbare Mikroorganismen
	<i>Materialien</i>	Biomaterialien <u>Biobasierte und biogene Werkstoffe</u> Recyclingmaterialien Biologisch abbaubare Kunststoffe Maßgeschneiderte Naturstoffe
	<i>Energieerzeugung</i>	Photovoltaik Power-to-Gas Biogasanlagen Wasserstofftechnologien Adaptive Bioreaktoren Speichertechnologien Smart Grids

Tab. 7.1 Einfluss- und Schlüsselfaktoren nach Einflussbereichen (EB) und EB-Untergruppen

Um aus diesen Einflussfaktoren diejenigen zu ermitteln, die das Szenariofeld besonders prägen, wurde zunächst eine Einflussanalyse durchgeführt. Hierbei werden in einer Einflussmatrix alle Einflussfaktoren gegenübergestellt und je Einflussfaktoren-Paar

bewertet, wie stark sich diese Faktoren gegenseitig beeinflussen. Dabei geben die Zeilensummen der Einflussmatrix die Aktivsumme und die Spaltensumme die Passivsumme des jeweiligen Einflussfaktors an. Die Aktivsumme ist gleichzusetzen mit dem Grad des Einflusses, den ein Einflussfaktor in Summe auf alle anderen Faktoren ausübt. Die Passivsumme gibt hingegen an, wie stark ein Einflussfaktor in Summe von allen anderen Faktoren beeinflusst wird. Insgesamt bilden diese beiden Summen ein Maß dafür, welche Einflussfaktoren das Szenariofeld besonders prägen und demzufolge als Schlüsselfaktoren in Betracht gezogen werden können. Im Rahmen der Relevanzanalyse wird in einem paarweisen Vergleich der Einflussfaktoren die Frage beantwortet, welcher Einflussfaktor wichtiger für den Untersuchungsgegenstand ist. In einer Relevanzmatrix werden dann je Einflussfaktor die jeweiligen Relevanzsummen ermittelt, die als Maß für die Bedeutung des Einflussfaktors verstanden werden kann. In einem System-Grid-Diagramm wurden die Aktivsummen der Einflussfaktoren über deren Passivsummen aufgetragen und über den Kugeldurchmesser die Relevanzsummen abgebildet. Auf dessen Grundlage wurden aus den 87 Einflussfaktoren insgesamt 18 Schlüsselfaktoren identifiziert, die das Szenariofeld besonders prägen. Die ausgewählten Schlüsselfaktoren wurden für die weitere Verarbeitung aufbereitet. Dies umfasste die Erstellung einer klaren Definition sowie eine präzise Beschreibung der aktuellen Situation jedes Schlüsselfaktors, die auf messbaren Indikatoren basiert.

Mit der Projektionsentwicklung erfolgte der eigentliche „Blick in die Zukunft“. Für jeden Schlüsselfaktor wurden hierbei alternative Entwicklungspfade (Zukunftsprojektionen) für einen Zeithorizont von zehn Jahren beschrieben. Im Rahmen der Szenariobildung wurden diese Zukunftsprojektionen paarweise bezüglich ihrer Konsistenz zueinander bewertet, um zu verhindern, dass gegenläufige Entwicklungen in einem Szenario enthalten sind. Auf Basis dieser Konsistenzanalyse wurden insgesamt 49 hochkonsistente Kombinationen von Zukunftsprojektionen, die so genannten Projektionsbündel, ermittelt. Ein Projektionsbündel ist dabei als eine Kette von Projektionen zu verstehen, wobei genau eine Projektion je Schlüsselfaktor auftritt. Im Prinzip entspricht jedes dieser Bündel einem Szenario. Da sich viele dieser Bündel allerdings sehr ähnlich sind, wurden diese im Rahmen einer Clusteranalyse zu Gruppen (Cluster) zusammengefasst. Die Clusteranalyse der Zukunftsprojektionsbündel hat insgesamt zwei hoch konsistente, sich voneinander abgrenzende Szenarien ergeben (siehe Abb. 7.2):

SZENARIO 1 – Berlin (Deutschland) abgehängt Technologischer Stillstand und fehlende gesellschaftliche Akzeptanz durch institutionelle Handlungsunfähigkeit	SZENARIO 2 – Berlin (Deutschland) als nachhaltiger Ideengeber Kreislauffähige Innovationen und nachhaltige Technologien finden ihren Weg in die Industrie und die breite Gesellschaft
■ Deutschland bleibt im Bereich der Digitalisierung zurück; Datenschutzbedenken, fehlende Kompetenzen und gesetzliche Restriktionen bremsen Innovation und schwächen die Wettbewerbsfähigkeit. ■ Technologische Fortschritte wie digitale Zwillinge und Self-X kommen über einfache Anwendungen nicht hinaus, da Akzeptanz und Investitionsbereitschaft fehlen. ■ Bionik und KI werden aufgrund hoher Kosten, Skepsis und regulatorischer Hürden kaum genutzt oder weiterentwickelt. ■ Staatliche Förderungen, interdisziplinäre Zusammenarbeit und Wissenstransfer sind stark eingeschränkt, was die Umsetzung von Innovationen behindert. ■ Nachhaltigkeitsstrategien und Kreislaufwirtschaft stagnieren, da hohe Kosten, geringe Akzeptanz und fehlende Standards Fortschritt blockieren und Deutschland im internationalen Vergleich zurückfallen lassen.	■ Deutschland wird führend im Bereich der Digitalisierung; digitale Technologien und Vernetzung treiben Effizienz, Innovation und Wettbewerbsfähigkeit voran. ■ Technologische Fortschritte wie digitale Zwillinge, Self-X und KI sind flächendeckend etabliert und verbessern Produktion, Entscheidungsprozesse und den Alltag. ■ Bionik und biogene Werkstoffe erleben einen Durchbruch; neue nachhaltige Geschäftsfelder entstehen und treiben wirtschaftliches Wachstum. ■ Interdisziplinäre Ansätze, umfangreiche Forschungsgelder und ein starker Wissenstransfer fördern Innovation und sichern Marktführerschaft. ■ Nachhaltigkeitsstrategien und Kreislaufwirtschaft sichern Deutschlands internationale Vorreiterrolle und tragen zum wirtschaftlichen Erfolg bei.

Abb. 7.2 Ergebnis der Szenariobildung

Die abgeleiteten Szenarien repräsentieren potenzielle Zukünfte, die als Grundlage für die Entwicklung von Strategien und Handlungsempfehlungen dienen sollen. Eine Möglichkeit, Szenarien in der strategischen Planung zu integrieren, besteht darin, sich auf

Zukunftsszenarien für die
Biologische Transformation der
Industrie am Standort Berlin

das Eintreten eines spezifischen Szenarios auszurichten, da letztlich immer nur eine Zukunft eintreten kann. Im Rahmen des Szenariotransfers wurden daher zunächst die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Stärke der Auswirkungen beider abgeleiteten Szenarien bewertet. Aufgrund der stärkeren Ausprägungen in beiden Dimensionen wurde Szenario 2 als Referenzszenario ausgewählt. Die entsprechenden Ergebnisse des Szenariotransfers sind dem folgenden Kapitel zu entnehmen.

7.4 Handlungsempfehlungen

Szenarien können dazu beitragen, sich gegenüber potenziellen Risiken abzusichern und bisher unbekannte strategische Chancen zu identifizieren [1]. Um für das Eintreten des festgelegten Referenzszenarios (Szenario 2) geeignete Handlungsempfehlungen abzuleiten, wurde dieses zunächst hinsichtlich der Chancen und Risiken für die Stakeholdergruppen Industrie, Institutionen und Mensch analysiert (siehe hierzu Abb. 7.3).

RISIKEN		CHANCEN
➔ Innovations- und Preisdruck in der Zulieferbranche ➔ Notwendigkeit von Schulungskompetenz für Mitarbeitende ➔ Notwendigkeit von Automatisierungskompetenz ➔ Geringe Effizienzsteigerung durch komplexere Prozesse	INDUSTRIE	➔ Erhöhte internationale Wettbewerbsfähigkeit durch nationalen Innovationsdruck ➔ Zeitersparnis durch effizientere Produktentwicklung und neue Arbeitsmethoden ➔ Effizienzsteigerung und Waste-Vermeidung durch Circular Economy und smarte Fabriken
➔ Mangelndes Spezialistenwissen (nur Generalisten verfügbar) ➔ Hohe Kosten durch Normungsaufwand, die Innovationen bremsen ➔ Juristische Lücken in der Gesetzgebung ➔ Benachteiligung von KMU durch Lobbyismus	INSTITUTIONEN	➔ Ganzheitlichere Betrachtung von Problemstellungen und neue Innovationsfelder durch Schnittstellendisziplinen ➔ Verfügbarmachung von technischem Wissen für breitere Bevölkerung und Schaffung von Standards ➔ Verantwortungsvoller Umgang mit sicherheitskritischen Daten
➔ Überforderung der Mitarbeitenden durch neue Technologien ➔ Mangelnde Akzeptanz von Technologien und komplexen Systemen ➔ Gefahren durch Entscheidungsübernahme und Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine	MENSCH	➔ Sicherung der Lebensgrundlage ➔ Gesünderes Leben und bessere Arbeitsqualität durch neue Formen der Zusammenarbeit mit Technik ➔ Förderung von Mitarbeitenden ➔ Lebensqualitätsverbesserung und Wohstandssicherung durch internationale Innovationsführerschaft

Abb. 7.3 Risiken und Chancen des Referenzszenarios für relevante Stakeholdergruppen

Im Referenzszenario ergeben sich für die Industrie Risiken wie ein steigender Innovations- und Preisdruck, zunehmender Bedarf an Automatisierungs- und Schulungskompetenzen sowie mögliche Effizienzverluste durch komplexere Prozesse. Institutionen stehen vor Herausforderungen wie hohen Normierungskosten und juristischen Unsicherheiten. Für den Menschen bestehen Risiken in Form von Überforderung durch neue Technologien, mangelnder Akzeptanz und potenziellen Gefahren bei der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine. Gleichzeitig sind mit dem Eintreten des Referenzszenarios wichtige Chancen zu erwarten: Die Industrie profitiert von Effizienzgewinnen sowie einer gesteigerten internationalen Wettbewerbsfähigkeit durch innovative Konzepte im Kontext der Biologischen Transformation. Institutionen erhalten neue Möglichkeiten zur Erschließung interdisziplinärer Innovationsfelder, zur Verbreitung technischen Wissens und zur Etablierung von Standards. Für den Menschen ergeben sich Potenziale wie eine höhere Lebensqualität, verbesserte Arbeitsbedingungen durch neue Technologien und die langfristige Sicherung von Wohlstand.

Auf Basis der identifizierten Chancen und Risiken beim Eintritt des Referenzszenarios wurden Handlungsempfehlungen für die jeweiligen Stakeholdergruppen formuliert, die

zusammenfassend in Abb. 7.4 dargestellt sind. Unternehmen wird empfohlen, flexible Geschäftsmodelle zu entwickeln, nachhaltige Technologien und Prozesse zu integrieren und Mitarbeitende durch Schulungen auf neue Arbeitsprozesse vorzubereiten. Institutionen wie Universitäten und Normungsinstitute sollten den Wissenstransfer sowie die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Industrie intensivieren und regulatorische Prozesse beschleunigen. Interessenverbände können insbesondere KMU durch Zugang zu Technologien und die Unterstützung bei Standards und Fördermöglichkeiten stärken. Die Gesellschaft sollte Offenheit und Partizipation fördern, um Veränderungen zu unterstützen, während Kunden und Kundinnen eine stärkere Verantwortung für den gesamten Produktlebenszyklus übernehmen sollten.

INDUSTRIE	Geschäftsmodelle Neue Geschäftsmodelle entstehen durch dynamische Gesetzgebung und Fördermöglichkeiten. Unternehmen müssen flexibel reagieren und diese aktiv erschließen.	Technologie Die Biologische Transformation verlangt die Integration neuer Technologien, die wiederum kontinuierliche Prozessanalysen und -anpassungen notwendig macht.	Arbeitgeber Mitarbeitende müssen regelmäßig geschult werden. Neue Arbeitsschutzmaßnahmen und -prozesse stärken die Zusammenarbeit von Mensch und Technologie.
	Zulieferer Transparenz und Vernetzung in der Lieferkette steigern Effizienz und Resilienz. Gesetzliche Vorgaben an die Produkt-nachhaltigkeit müssen erfüllt werden.	Produktentwicklung Entwicklungsmethoden müssen Prinzipien der Nachhaltigkeit, Bionik und Kreislaufwirtschaft stärker integrieren, um Materialien effizient zu nutzen und Ressourcen zu schonen.	End-of-life Hersteller und Entsorger sollten enger kooperieren, um durchgehende Informationsflüsse zu schaffen und die Umsetzung von R-Strategien zu vereinfachen.
INSTITUTIONEN	Forschung Universitäten und Industrie müssen enger kooperieren, um den Wissenstransfer zu fördern. Die Vernetzung von Forschungseinrichtungen sollte intensiviert werden.	Normung Normen und Standards fördern Innovationen, sichern die Qualität und stärken die Produkt-akzeptanz. Sie schaffen neue Geschäftsmodelle zur Steigerung der Ressourceneffizienz.	Interessenverbände Interessenverbände sollten KMU den Zugang zu neuen Technologien, Materialien und Fördermitteln erleichtern und die unternehmensübergreifende Zusammenarbeit fördern.
MENSCH	Mitarbeitende Regelmäßige Technologieanpassungen erfordern Technologieakzeptanz, neue Kompetenzen und klare Regeln für die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine.	Gesellschaft Die Gesellschaft sollte Offenheit und Partizipation fördern, um Akzeptanz für Veränderungen sicherzustellen und alle Bevölkerungsgruppen aktiv einzubeziehen.	Kund*innen Kund*innen sollten Anforderungen an Produkte klar formulieren, sich stärker in den Produktlebenszyklus integrieren und mehr Verantwortung für das End-of-Life übernehmen.

Abb. 7.4 Handlungsempfehlungen an Industrie, Institutionen und Mensch

7.5

Zusammenfassung

Das Kapitel beschreibt die Anwendung der Szenarioanalyse im Rahmen des Projekts BioFusion 4.0, um potenzielle Entwicklungen der Biologischen Transformation der Industrie am Standort Berlin in den nächsten zehn Jahren zu prognostizieren. Dabei wurden Einflussfaktoren aus den Bereichen Produktionsstandort Berlin, Makroökonomie und Technologie berücksichtigt, um fundierte Empfehlungen für verschiedene Akteure zu entwickeln. Die Szenarioanalyse identifizierte ein Referenzszenario, das unterschiedliche Risiken und Chancen für Industrie, Institutionen und den Menschen mit sich bringt. Abgeleitete Handlungsempfehlungen umfassen die Förderung von Flexibilität bei Unternehmen, eine Intensivierung des Wissenstransfers durch Institutionen und eine stärkere gesellschaftliche Partizipation. Durch die stärkere Integration nachhaltiger Technologien, die Förderung interdisziplinärer Zusammenarbeit und die Unterstützung innovativer Geschäftsmodelle kann Berlin seine Wettbewerbsfähigkeit langfristig sichern. Die Analyseergebnisse unterstreichen das Potenzial der Region, durch gezielte Förderung von Innovationen und nachhaltigen Technologien eine Vorreiterrolle einzunehmen. Die Umsetzung dieser Empfehlungen könnte auf andere Technologiebereiche

und Regionen übertragen werden, um die nachhaltige Biologische Transformation der Produktion voranzutreiben.

7.6

Literatur

- [1] Gausemeier, Jürgen; Plass, Christoph: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung. Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen, 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2014
- [2] Gausemeier, Jürgen; Pfänder, Thomas; Lehner, Anne-Christin: Strategische Unternehmensführung mit Szenario-Management. In: Spath, Dieter et al. (Hrsg.): Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation. Berlin: Springer Vieweg, 2017

Zukunftsszenarien für die
Biologische Transformation der
Industrie am Standort Berlin

8

System Dynamics Modell der Transformation einer Plastikorthese zu einem biologisch inspirierten System

Janine Mügge¹, Marvin Manoury¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

System Dynamics Modelle eignen sich, um komplexe Systeme zu analysieren sowie die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren zu untersuchen und zu simulieren. Dabei wird das dynamische Verhalten des Systems über die Zeit betrachtet. Im Rahmen des Projekts BioFusion 4.0 wurde ein System Dynamics Modell entwickelt, das die Funktions- und Wirkmechanismen der Gestaltungsdimensionen der biologischen Transformation und nachhaltigen Produktion am Beispiel einer Orthese veranschaulicht.

In diesem Kontext wurde eine Orthese aus konventionellem Kunststoff zu einer biologisch inspirierten Orthese weiterentwickelt. Dabei wurde die Natur als Inspirationsquelle für die Anpassung von Materialien und Designs genutzt und somit die ökologische Nachhaltigkeit des Produkts verbessert, um Wechselwirkungen mit dem Ökosystem aufzuzeigen. Angesichts des wachsenden Umweltbewusstseins und der steigenden Nachfrage nach nachhaltigen Produktionsmitteln berücksichtigt das Modell die Dynamik von Materialien, Produktionsprozessen und Nutzerbedürfnissen.

Das Modell umfasst verschiedene Einflussfaktoren, darunter die Materialauswahl, die Anzahl der produzierten Orthesen, die Nachfrage nach nachhaltigen Produkten sowie die ökologischen Auswirkungen der Orthese. Die Ergebnisse verdeutlichen, wie Prinzipien der biologischen Transformation die nachhaltige Produktion beeinflussen können und zeigen die systemischen Zusammenhänge auf.

8.1

Einleitung

Moderne Technologien wie IoT-Devices befähigen schon seit längerem die Erweiterung der Funktionalität von Produkten hin zu Smart Products [1]. Diese Erweiterung der Funktionalität erfolgt durch die Integration mit anderen Produkten und Technologien und kann nicht mehr durch singuläre Produkte allein erreicht werden. In diesem Fall spricht man von Systemen [2]. Systeme können durch drei Konzepte charakterisiert werden [3]:

- **Funktionales Konzept:** Ein System kann durch seine Wirkung auf verschiedene Einflussgrößen charakterisiert werden. Dabei geht es lediglich um die Eigenschaften, die von außen erkennbar sind. Aus der Wirkung, die bestimmte Einflussgrößen erzielen, können die Zustände des Systems zu bestimmten Zeitpunkten abgeleitet werden.
- **Strukturelles Konzept:** Mit diesem Konzept werden Systeme als Zusammenhang verschiedener Elemente und der Relation zwischen den Elementen beschrieben. Einfachstes Beispiel sind dabei Baugruppen, die aus verschiedenen Komponenten zusammengesetzt werden, um eine Funktionalität zu erfüllen. Die Zusammenhänge können jedoch auch rein logischer Natur sein, wie etwa bei der Software für die Klimasteuerung in einem Fahrzeug und den dazu gehörigen Aktuatoren.
- **Hierarchisches Konzept:** Zuletzt muss dem Punkt Rechnung getragen werden, dass jedes System aus Subsystemen bestehen kann, aber auch Bestandteil eines noch größeren Systems sein kann. In diesem Fall wird häufig auch von Systems of Systems gesprochen.

System Dynamics Modell der
Transformation einer
Plastikorthese zu einem biologisch
inspirierten System

Ein Beispiel für ein System der biologischen Transformation ist das Ökosystem, in dem Kreislaufwirtschaft stattfindet. Im funktionalen Konzept werden die Eingangsgrößen wie Produkte, Komponenten, Materialien und weitere Ressourcen wie zum Beispiel Energie analysiert, während die Ausgangsgrößen in Form von Abfällen untersucht werden. Dadurch lässt sich die Umsetzung im Ökosystem erfassen und das System optimieren. Gerade im Strukturalen Konzept ist durch die Beteiligung verschiedener Stakeholder im Lebenszyklus zu erkennen, dass rein lineare Produktsysteme nicht mehr zutreffend sind. Komponenten und Materialien fließen je nach anwendbarer R-Strategie zwischen verschiedenen Akteuren, von Verwertern über Produktionsunternehmen bis zu Werkstätten, ohne dabei zwingend einem linearen Strang zu folgen. Diese Akteure wiederum generieren jeweils eigene Wertströme, aus denen sich ein hierarchisches Konzept ableiten lässt. Somit kann das Kreislaufwirtschafts-Ökosystem als komplexes System in der biologischen Transformation gesehen werden, womit systemisches Denken in der Gestaltung zwingend erforderlich wird.

8.2 Stand der Technik

Der von Jay W. Forrester entwickelte Ansatz der Systemdynamik dient der Analyse und dem Verständnis komplexer Systeme [4]. Simulationsmodelle und Theorien der Systemdynamik ermöglichen es, das Design und die Produktion von Produkten unter verschiedenen Szenarien zu bewerten und fundierte Entscheidungen in dynamischen und komplexen Umgebungen zu treffen [5].

Die Systemdynamik kombiniert qualitatives Systemdenken mit quantitativen Systemsimulationen, um Entscheidungsträgern ein ganzheitliches Verständnis zu vermitteln [6]. So lassen sich nachhaltige Kreislaufstrategien auf Produktebene entwickeln, beispielsweise zur Bestimmung des optimalen Zeitpunkts für die Wiederaufbereitung oder das Recycling von Produkten. Dabei wird die Wechselwirkung zwischen Systemelementen und ihrer Umwelt modelliert [5]. Im Zentrum dieser Modelle steht eine systematische Abbildung der Beziehungen innerhalb eines Systems. Die wesentlichen Elemente der Systemdynamik sind [4]:

- **Stocks:** Beschreiben den Zustand eines Systems, indem sie akkumulierte Mengen wie den Bestand an Produkten in einem Lager oder den Kontostand eines Kontos darstellen.
- **Flows:** Verändern den Bestand eines Systems, indem sie Ressourcen zuführen oder entziehen, wie etwa die Einstellquote in einem Unternehmen oder die Produktionsrate einer Fabrik.
- **Rückkopplungsschleifen (Feedback Loops):** Beschreiben die Wechselwirkungen zwischen Bestand und Fluss:
 - **Positive Rückkopplung:** Verstärkt Veränderungen im System. Ein wachsender Bestand erhöht den Zufluss, was zu einer noch schnelleren Zunahme des Bestands führt.
 - **Negative Rückkopplung:** Wirkt stabilisierend, indem sie Veränderungen im Bestand ausgleicht, etwa durch Erhöhung des Abflusses oder Verringerung des Zuflusses.

8.3 System Dynamics Modell

Im Projekt wurde ein System Dynamics Modell entwickelt, das die Funktions- und Wirkmechanismen der Gestaltungsdimensionen der biologischen Transformation und nachhaltigen Produktion abbildet. Dafür wurden zunächst die Anforderungen sowie die

System Dynamics Modell der
Transformation einer
Plastikorthese zu einem biologisch
inspirierten System

Anwendungsfälle des Modells erarbeitet. Anschließend wurden die Systemgrenzen für jeden Anwendungsfall definiert. Zudem wurden Stocks definiert, die den aktuellen Zustand des dynamischen Systems für jeden Anwendungsfall beschreiben. Anschließend wurden die Abhängigkeiten zwischen den Bestandsgrößen sowie die kausalen Feedback Loops festgelegt, die das Verhalten des Systems in den jeweiligen Anwendungsfällen bestimmen. Auf Basis dieser Aspekte wurden die Systembestandteile für die einzelnen Anwendungsfälle modelliert [4].

8.4 Projektergebnisse

Ausgangspunkt bildet ein bestehendes Ökosystem. In diesem werden herkömmliche Plastikorthesen hergestellt, verwendet und entsorgt. Dabei bestehen folgende Probleme: negative Auswirkungen auf die Umwelt durch eine begrenzte Lebensdauer der Plastikorthese und der Einsatz von Materialien, die nicht nachhaltig sind. Der Zusammenhang ist in Abb. 8.1 dargestellt.

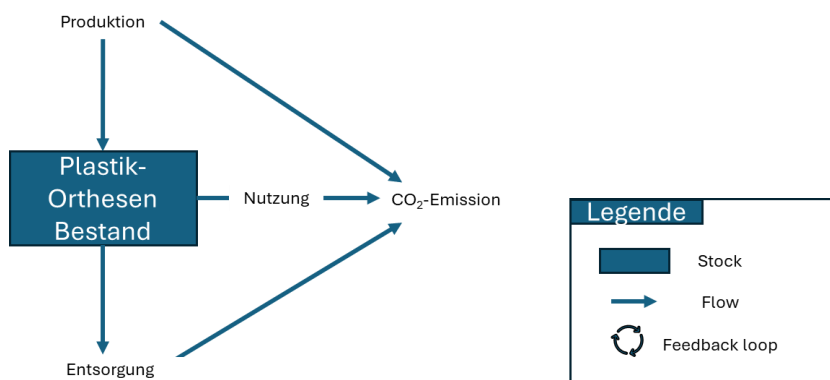


Abb. 8.1 System Dynamics Modell: Ausgangspunkt - Herkömmliche Orthese

Um diese Herausforderungen zu bewältigen können biologische Systeme als Inspirationsquelle genutzt werden. Durch die Nutzung biologischer Prinzipien wird das Design und die Materialauswahl der Orthese angepasst. Dies führt zur verbesserten Haltbarkeit, der Nutzung biokompatibler Materialien und einer natürlichen Abbaubarkeit. Zusätzlich werden biologische Systeme integriert. Hierbei erfolgt eine Symbiose von Materialien, indem technische Materialien verwendet werden, die mit biologischen Systemen interagieren. Durch die Integration wird nicht nur die Anpassungsfähigkeit und Reparierbarkeit der Orthese gesteigert, sondern auch der ökologische Fußabdruck reduziert. Daraus ergibt sich der in Abb. 8.2 dargestellte Auszug des System Dynamic Modells.

System Dynamics Modell der
Transformation einer
Plastikorthese zu einem biologisch
inspirierten System

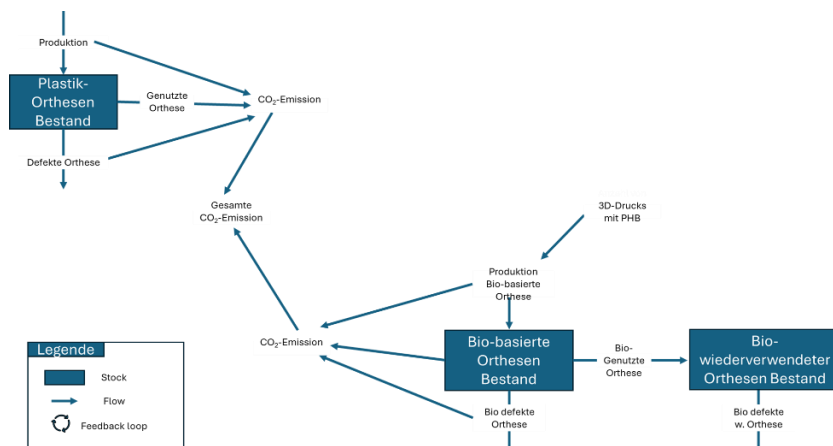


Abb. 8.2 System Dynamics Modell: Bio-Substitution - Bio-basierte Orthese und 3D-Druck

Ein weiterer untersuchter Aspekt ist die Interaktion von Natur und Technik. Durch nachhaltige Produktionsmethoden, die die Verflechtung von Produktionsprozessen mit natürlichen Kreisläufen ermöglichen, wird eine höhere Ressourceneffizienz erzielt. Dies reduziert die Umweltauswirkungen und fördert die Integration in ökologische Kreisläufe. Eine systemische Betrachtung wurde ebenfalls durchgeführt. Eine ganzheitliche Analyse, die alle Phasen des Lebenszyklus – von der Herstellung über die Nutzung bis zur Entsorgung – berücksichtigt, hilft, Abfälle zu minimieren und die Ressourceneffizienz zu optimieren. Dies hat positive soziale Auswirkungen und sensibilisiert für nachhaltige Praktiken. Schließlich zielt das Konzept auf ein nachhaltiges Ökosystem ab, in dem biologisch transformierte Orthesen mit positiven Umweltauswirkungen hergestellt werden. Dieser Endzustand fördert die gesamtökologische Nachhaltigkeit, hat positive soziale Auswirkungen und unterstützt die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft, in der Ressourcen effizient genutzt und wiederverwertet werden. Das Gesamtmodell ist in Abb. 8.3 dargestellt.

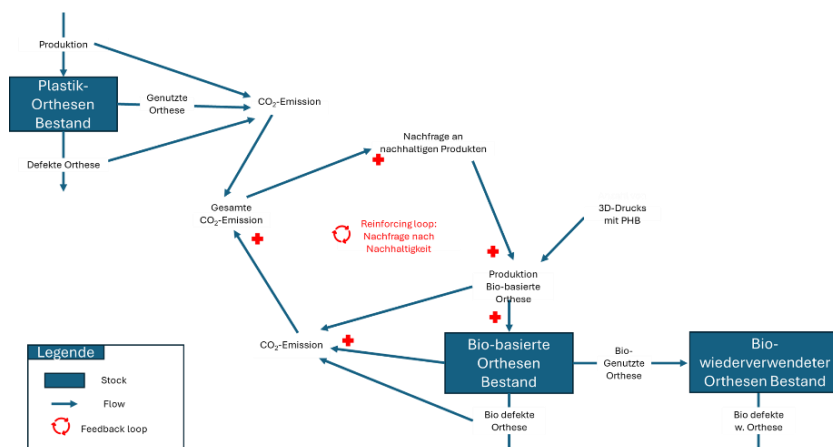


Abb. 8.3 System Dynamics Modell: Feedback Loop - CO₂-Emission und Nachfrage nach nachhaltigen Produkten

8.5

Zusammenfassung

System Dynamics Modelle ermöglichen es, komplexe Systeme zu analysieren und dynamische Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Einflussfaktoren zu simulieren. Im Rahmen des Projekts BioFusion 4.0 wurde ein solches Modell entwickelt, um die Mechanismen und Gestaltungsdimensionen der biologischen Transformation und nachhaltigen Produktion zu analysieren und am Beispiel einer Plastikorthese zu veranschaulichen. Ziel war es, herkömmliche Plastikorthesen durch biologisch inspirierte Alternativen zu ersetzen, welche nachhaltigere Materialien und Designs verwenden, um ökologische Auswirkungen zu verbessern. Das Modell berücksichtigte wesentliche Einflussfaktoren wie Materialauswahl, Produktionsprozesse, Nachfrage nach nachhaltigen Produkten und ökologische Auswirkungen. Die Ergebnisse zeigten, wie biologische Prinzipien zur Optimierung von Produktionsprozessen und Produkten beitragen können. Durch den systemischen Ansatz wurden die Lebenszyklen der Produkte ganzheitlich betrachtet, was zur Entwicklung ressourceneffizienter und umweltfreundlicher Lösungen führte.

Für die Umsetzung der biologischen Transformation in anderen Technologiebereichen, Branchen und Regionen lassen sich folgende Handlungsempfehlungen ableiten: Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Biologie, Ingenieurwesen und Materialwissenschaften sollte ausgebaut werden, um innovative und nachhaltige Lösungen durch die Nutzung biologischer Prinzipien zu fördern. Darüber hinaus ist es essenziell, Modelle und Technologien an regionale Ressourcen und spezifische Bedürfnisse anzupassen, um deren lokale Wirksamkeit und Effizienz sicherzustellen.

8.6

Literatur

- [1] Tomiyama et al.: Development capabilities for smart products. CIRP Annals. Manufacturing Technology 68 (2019), S. 727–750.
- [2] International Council in Systems Engineering (INCOSE): Systems Engineering Handbook. A Guide for System Life Cycle Processes and Activities, 4., überarb. Aufl. Indiana: Wiley, 2015.
- [3] Ropohl, Günter: Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3., überarb. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [4] Sterman, John: System Dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world: The McGraw-Hill Companies, 2000.
- [5] Guevara-Rivera, Edna, et al.: Dynamic simulation methodology for implementing circular economy: A new case study. Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM) 14.4 (2021), Nr. 4, S.850-862.
- [6] Deutsche Gesellschaft für System Dynamics e.V.: Kurze Einführung in System Dynamics. Allgemein. URL: <https://www.systemdynamics.de/system-dynamics-method/ueber-system-dynamics/allgemein/#:~:text=System%20Dynamics%20ist%20eine%20Methodik,bessere%20Entscheidungen%20treffen%20zu%20k%C3%B6nnen>. [Stand: 28.11.2024]

System Dynamics Modell der
Transformation einer
Plastikorthese zu einem biologisch
inspirierten System

9

Technologieradar für biologisch transformierte Technologien

Lynn Faßbender¹, Sebastian Wehking¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Um eine transparente Informationsbasis über Technologien zu schaffen und Chancen und Risiken ihrer Entwicklungen zu erkennen ist eine frühzeitige Technologiebewertung erforderlich. Ein mögliches Verfahren der Technologiefrüherkennung ist das Technologieradar. Das Technologieradar ermöglicht die Erfassung relevanter Technologien und Trends sowie die Ableitung des dazugehörigen Entwicklungsstands und Potenzials der Technologie. Zusammen mit den Industrie- und Forschungspartnern des Forschungsprojekts BioFusion 4.0 erfolgte die Einordnung der entwickelten und erprobten Technologien in das Technologieradar. Die Evaluierung erfolgt unter Berücksichtigung des Anwendungspotenzials für die Biologischen Transformation und die nachhaltige Produktion. Dafür wurden die Technologien anhand von vier Merkmalen kategorisiert und im Technologieradar eingeordnet. Bei den Merkmalen handelt es sich um die Wirkungsweise, den transformativen Charakter, den Technologiereifegrad und den Nachhaltigkeitsreifegrad.

9.1

Einleitung

Die frühzeitige Identifikation und Bewertung neuer Technologien ist essenziell, um Wettbewerbsvorteile zu sichern und nachhaltige sowie zukunftsorientierte Lösungen zu entwickeln. Methoden der Technologiefrüherkennung wie das Technologiescanning, Technologiemonitoring und Technologiescouting bieten Unternehmen strukturierte Ansätze, um technologische Entwicklungen zu beobachten und deren Relevanz einzuschätzen. Im Rahmen des Forschungsprojekts BioFusion 4.0 wurde hierfür ein Technologieradar entwickelt, das Technologien systematisch bewertet und klassifiziert. Das Technologieradar dient dazu, Technologien hinsichtlich ihrer Wirkungsweise, ihres transformativen Charakters, ihrer technologischen Reife und Nachhaltigkeitsreife einzuordnen. Dies stellt sicher, dass technologische Lösungen nicht nur auf ihre technische Umsetzbarkeit, sondern auch auf ihre ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit bewertet werden. Die folgenden Abschnitte beschreiben den Bewertungsprozess und die Einordnung von Technologien im Technologieradar, um deren Potenzial für die Biologische Transformation der Industrie zu bewerten.

9.2

Stand der Technik

Um eine transparente Informationsbasis über neue Technologien zu erstellen, sowie Chancen und Risiken der jeweiligen Technologie zu ermitteln, werden Methoden der Technologiefrüherkennung eingesetzt. Im Rahmen der Technologiefrüherkennung gibt es drei Vorgehensweisen das Technologiescanning, das Technologiemonitoring und das Technologiescouting. Durch das Scanning von Technologien wird ein breiter Überblick über neu entwickelte Technologien bereitgestellt. Im Technologiemonitoring wird der Fokus auf einzelne Technologien vertieft und im Bezug zu der Zeit betrachtet. Eine detaillierte Technologiesuche zu einem bestimmten Thema erfolgt im Technologiescouting. Eine häufig genutzte Methode für das Monitoring von Technologien ist das Technologieradar [1].

Das Technologieradar wird eingesetzt, um relevante Technologien und Trends sowie den dazugehörigen Entwicklungsstand abzubilden. Technologische Trends werden so frühzeitig erkannt und Unternehmen können ihre Wettbewerbsposition am Markt sichern [2]. Ziel des Technologieradars ist es die Chancen der Technologien zu fördern und ihre Herausforderungen zu beherrschen, dabei ist es wichtig den Status quo und die erzielten Fortschritte hinsichtlich der digitalen Technologien konsequent und konsistent zu erfassen [3]. Im Rahmen des Technologieradars wird die technologische Reife (engl. Technology Readiness Level (TRL)) der Technologien und Trends bestimmt. Diese quantifiziert den Entwicklungsstand und die wahrgenommene technische Einsatzbereitschaft auf einer Skala von eins bis neun. Bei einem TRL von eins wurden bereits erste Grundlagen zur Technologie erfasst, wohingegen ein TRL von neun für eine ausgereifte Technologie und den erfolgreichen Betrieb der Technologie steht [4].

Des Weiteren gibt es die Nachhaltigkeitsbewertung. Durch diese wird sichergestellt, dass die Technologien an den Nachhaltigkeitszielen ausgerichtet werden, dabei werden ökologische, soziale und ökonomische Auswirkungen während des gesamten Lebenszyklus bewertet. Um die Nachhaltigkeit zu quantifizieren wird das Sustainability Readiness Level (SRL) genutzt [3].

9.3 Projekthinhalt

Bei der Entwicklung neuer Technologien ist es entscheidend den Mehrwert nicht nur aus einer rein wirtschaftlichen, sondern auch aus ökologischer Sicht zu betrachten. Dabei spielt die technologische Reife der eingesetzten Lösung eine entscheidende Rolle. Denn nur Technologien, die ausgereift und auf die Bedürfnisse der Industrie abgestimmt sind, können erfolgreich implementiert werden. Um die Einführung neuer Technologien zu unterstützen, wurde ein Technologieradar entwickelt. Dieses soll Unternehmen dabei helfen, technologische Lösungen auf ihre Eignung für die industrielle Anwendung zu bewerten. Das Technologieradar wurde unter Beteiligung von den 13 Partnern des Forschungsprojekts BioFusion 4.0 entwickelt und stellt einen strukturierten Bewertungsansatz bereit. Dieser systematische Ansatz klassifiziert Technologien anhand von vier Merkmalen.

9.3.1 Wirkungsweise

Zur Einordnung der Technologien in das Technologieradar wird anfangs die Wirkungsweise bestimmt. Diese sagt aus, ob die Technologie der Bio-Inspiration, Bio-Integration oder Bio-Interaktion zugeordnet werden kann [5]. Des Weiteren wird die entsprechende taxonomische Unterkategorie für die jeweiligen Technologien ausgewählt. Damit eine Technologie der Biologischen Transformation der Produktion dienen kann, muss sich nach den Prinzipien der Biologischen Transformation funktionieren (Bio-Inspiration), ein solches Prinzip hervorrufen (Bio-Integration) oder in der Lage sein, es umzusetzen (Bio-Interaktion) [6].

9.3.2 Transformative Charakter

Darauf aufbauend wird definiert, um was für eine Technologieklasse es sich handelt. Bei den Technologieklassen kann es sich um eine Basistechnologie, Schrittmachertechnologie oder Schlüsseltechnologie handeln [5]. Der nachfolgenden Tabelle sind die Definitionen der jeweiligen Technologieklassen zu entnehmen:

Technologieradar für biologisch
transformierte Technologien

Technologie- klasse Definition

Basis- technologie	Eine Technologie, die selbst nicht nach den Grundsätzen der Biologischen Transformation aufgebaut ist oder funktioniert, die aber zur Biologischen Transformation der Industrie eingesetzt werden kann, um bestimmte Grundsätze der Biologischen Transformation in einer bestimmten Produktionsumgebung oder einem bestimmten System zu fördern.
Schrittmacher- technologie	Eine Technologie in der industriellen Produktion, die durch die Einführung der Prinzipien der Biologischen Transformation verändert werden kann, was zu einer Optimierung des Produktionsumfelds zugunsten der Biologischen Transformation der Industrie führt.
Schlüssel- technologie	Eine Technologie, die auf den Prinzipien der Biologischen Transformation aufbaut und in die Produktionsumgebung oder in spezifische Produktionssysteme eingeführt werden kann, um die Biologische Transformation der Industrie zu erreichen.

Tab. 9.1 Definitionen der Technologieklassen

9.3.3

Technologiereifegrad

Im dritten Schritt erfolgt die Bewertung der technologischen Reife. Diese wird, wie zuvor beschrieben in Form des TRL als Wert zwischen eins und neun angegeben werden. Die Klassifizierung ist der ISO 16603 zu entnehmen.

9.3.4

Nachhaltigkeitsreifegrad

Als letztes wird das SRL für jede Technologie ermittelt. Für die Einordnung wurden sechs Nachhaltigkeitskriterien festgelegt, die sowohl ökologische und soziale auch als ökonomische Aspekte umfassen [5]. Konkret handelt es sich um die folgenden Nachhaltigkeitskriterien:

1. Reduzierung des Ressourcenverbrauchs
2. Reduzierung des CO₂-Fußabdruck
3. Verbesserung der Arbeitssicherheit
4. Verbesserung der Beschäftigungsverhältnisse (Volumen, Diversität, Inklusion)
5. Flexibilität auf Produkt- und Produktionsebene
6. Integration der regionalen Lieferkette

In Workshops mit Expertinnen und Experten wurde das Potenzial der Technologien für jedes Nachhaltigkeitskriterium bewertet. Dabei wurde folgende Skala für den Nachhaltigkeitsreifegrad genutzt:

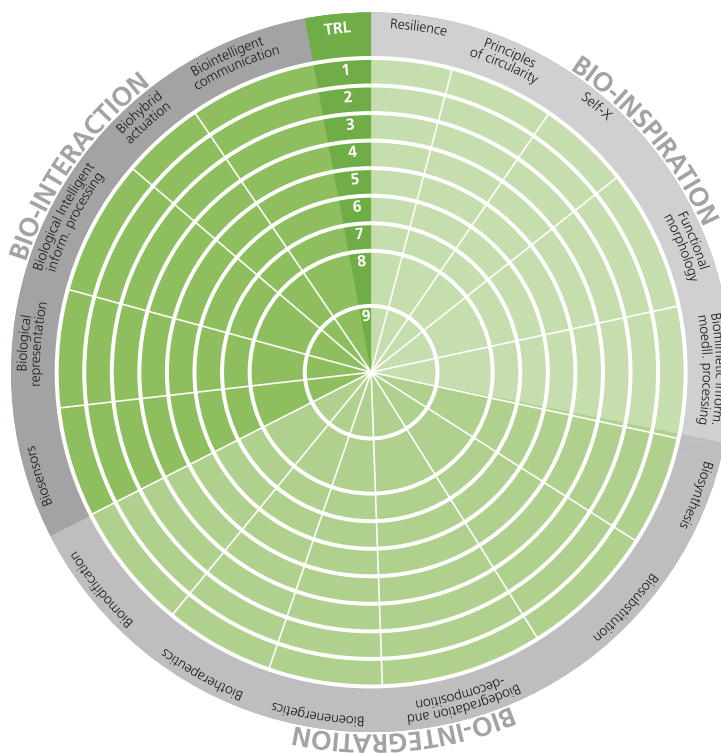
- SRL 0: Nicht anwendbar
- SRL 1: Identifikation des Wirkzusammenhangs von Nachhaltigkeitsproblem und Technologie
- SRL 2: Konzept zur Reduzierung des Nachhaltigkeitsproblems durch Technologieeinsatz formuliert
- SRL 3: Erste Tests / Laborversuche von Technologielösungen mit den relevanten Beteiligten

- SRL 4: Die Technologie wurde pilothaft in einer relevanten Umgebung angewendet um das Nachhaltigkeitsproblem zu lösen
- SRL 5: Die Technologie wurde in einem ersten Aufbau in relevanter Umgebung angewendet und die Lösung des Nachhaltigkeitsproblems konnte validiert werden
- SRL 6: Demonstration der Lösung des Nachhaltigkeitsproblems durch Einsatz der Technologielösung in relevantem Umfeld als Prototyp
- SRL 7: Verfeinerung der Technologielösung und ggfs. ausgeweitete Prototypentests in der entsprechenden Umgebung
- SRL 8: Technologieeinsatz mit Umsetzungsplan zur Lösung des Nachhaltigkeitsproblems ist vollständig erarbeitet und geprüft
- SRL 9: Der Einsatz der Technologie zur Lösung des Nachhaltigkeitsproblems ist bewährt

Das finale SRL für jede Technologie wird aus dem Durchschnitt der sechs Kriterien berechnet.

Unter Berücksichtigung der vier Merkmale wurde eine Grafik erstellt, die alle vier Merkmale auf einem Blick abbildet. Das Ergebnis dieses Schritts ist der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen:

BT Technologies - Technological Readiness Level



- Enabler technology
- Technology to transform
- Transforming technology
- Multidimensional

A technology that is not itself built or functioning according to principles of BT, but that can be used to biologically transform industry to promote certain principles of BT in a defined production environment or system.

A technology in industrial production that can be changed by introducing BT's principles, resulting in an optimization of the production environment / system in favor of the biological transformation of industry.

A technology built on principles of BT that can be introduced into the production environment or into specific production systems to bring about the biological transformation of industry.

Color-coded asterisks refer to dimensions (enabler / to transform / transforming) addressed by the technology.

Technologieradar für biologisch transformierte Technologien

BT Technologies - Sustainability Readiness Level

Technologieradar für biologisch transformierte Technologien

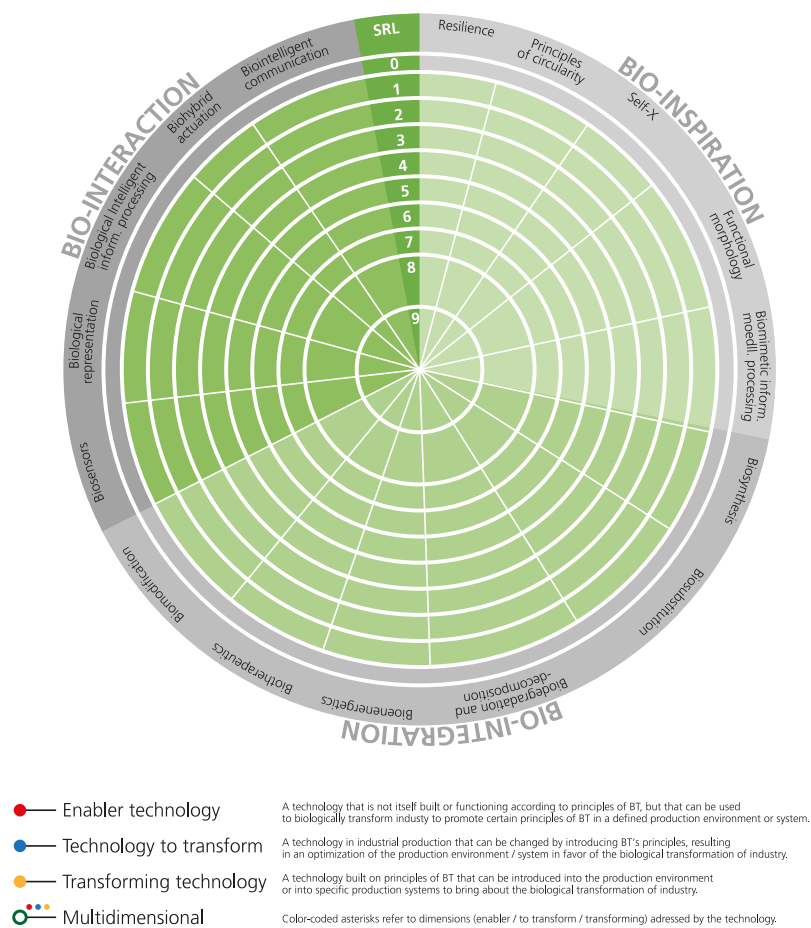


Abb. 9.1 Technologieradar des Forschungsprojekts BioFusion 4.0

9.4 Technologieeinordnung in das Technologieradar

Orientiert an den vier Merkmalen wurden die Technologien des Forschungsprojekts BioFusion 4.0 in Workshops, zusammen mit den Industrie- und Forschungspartnern des Projekts eingeordnet. Für jedes Merkmal erhielten die Teilnehmende Beispiele und weiterführende Informationen, um sie bei der Evaluierung der Technologien in das Technologieradar zu unterstützen. Der folgenden Tabelle sind die Gesamtergebnisse des Workshops (Bewertung der Wirkungsweise, transformativer Charakter, TRL und SRL) für jede Technologie zu entnehmen.

Technologie	Wirkungsweise	Transformativer Charakter	TRL	SRL
Bildbasierte Objekterkennung	Bio-Inspiration	Basistechnologie	5	2
Empfehlung von R-Strategien	Bio-Interaktion	Schrittmachertechnologie	3	2
Digitaler Zwilling mit integrierter Ökobilanz	Bio-Interaktion	Basistechnologie	5	2
Interaktives Lagebild	Bio-Inspiration	Schrittmachertechnologie	4	2
Multiagentensystem	Bio-Inspiration	Schlüsseltechnologie	5	2
Werkerassistenzsystem	Bio-Interaktion	Schrittmachertechnologie	5	2
3D-Druck mit biogenen Polymeren	Bio-Integration	Schlüsseltechnologie	4	2
Herstellung von biogenen Polymeren	Bio-Integration	Schlüsseltechnologie	4	2

Tab. 9.2 Einordnung der Technologien im Technologieradar

Technologieradar für biologisch transformierte Technologien

9.5

Zusammenfassung

Das im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 entwickelte Technologieradar zeigt wie ein systematischer Bewertungsansatz Unternehmen dabei unterstützen kann, neue Technologien strategisch zu bewerten. Durch die Berücksichtigung der technologischen Reife und des Nachhaltigkeitsreifegrads wird nicht nur die technische Machbarkeit, sondern auch die langfristige Nachhaltigkeit der Technologien bewertet. Die methodische Einordnung der Bewertung der Technologien anhand der Merkmale Wirkungsweise, transformative Charakter, TRL und SRL bietet eine ganzheitliche Grundlage für strategische Entscheidungen. Dies ermöglicht es Unternehmen, technologische Innovationen gezielt zu fördern und Herausforderungen, wie den Ressourceneinsatz oder die Kreislaufwirtschaft, erfolgreich zu adressieren. Das Technologieradar stellt somit ein wertvolles Werkzeug dar, um technologische und nachhaltige Fortschritte zu verbinden und eine Transformation hin zu einer ökologisch und ökonomisch verantwortungsvollen Industrie zu unterstützen.

9.6

Literatur

- [1] Schuh, Günther; Zeller, Violett; Stich, Volker (Hg.) (2022): Digitalisierungs- und Informationsmanagement. Handbuch Produktion und Management. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [2] Rohrbeck, R.; Heuer, J.; Arnold, H.: The Technology Radar. an Instrument of Technology Intelligence and Innovation Strategy. In: IEEE International Conference in Management of Innovation and Technology.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland. Technologie- und Trendradar 2021.
- [4] DIN ISO 16603:2019: Raumfahrttechnik.
- [5] Mügge, Janine; Berkhahn, Magda; Knauf, Tobias; Stark, Rainer; Faßbender, Lynn; Lange, Annika et al.: Technology radar for a sustainable biological transformation in the manufacturing industry. In: GCSM.

- [6] Berkhahn, Magda; Kremer, Gerald; Riedelsheimer, Theresa; Lindow, Kai; Stark, Rainer: Taxonomy for Biological Transformation Principles in the Manufacturing Industry. In: Manufacturing Driving Circular Economy, S. 981–989.

Technologieradar für biologisch
transformierte Technologien

10

Personas und User Stories für biologisch transformierte Technologien und Demonstratoren

Personas und User Stories für
biologisch transformierte
Technologien und
Demonstratoren

Lynn Faßbender¹, Sebastian Wehking¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Im Rahmen der Konzeption von Modellen und Methoden zur Förderung der Biologischen Transformation ist eine von Beginn an involvierte Einbeziehung der späteren Nutzer und Anwender essenziell. Aus diesem Grund wurden Personas und User Stories erstellt, welche die Eigenschaften, Ziele, Aufgaben sowie die Anforderungen von den Nutzern und Anwendern repräsentieren. Insgesamt wurden 21 Personas entwickelt, welche anhand ihrer Verantwortlichkeiten und Aufgaben entlang des Lebenszyklus eines Produktes angeordnet wurden. Des Weiteren wurden insgesamt 49 User Stories in den vier Lebenszyklusphasen Begin of Life Planning, Begin of Life Production, Middle of Life und End of Life erhoben. Die in Form von User Stories formulierten Anforderungen beziehen sich auf Funktionalitäten der zu entwickelnden Technologien und Demonstratoren.

10.1

Einleitung

Die nutzerzentrierte Gestaltung von Produkten und Services erfordert ein tieferes Verständnis der Endnutzer und ihrer Bedürfnisse. Hierbei haben sich zwei Methoden, Personas und User Stories, als besonders effektiv erwiesen. Beide Ansätze zielen darauf ab, die Anforderungen und Erwartungen der Nutzer transparent und greifbar zu machen, um die Entwicklung von Lösungen zu erleichtern, die sich konsequent an den Bedürfnissen der Zielgruppe orientieren. Im Rahmen des Forschungsprojekts BioFusion 4.0 wurden diese Methoden genutzt, um die Endnutzer entlang des Produktlebenszyklus zu identifizieren und ihre Anforderungen zu spezifizieren. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Anwendung dieser Methoden im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 und zeigen, am Beispiel der Persona Nachhaltigkeitsmanager und den dazugehörigen User Stories wie diese entwickelt und genutzt wurden, um bedarfsgerechte Technologien zu entwerfen.

10.2

Stand der Technik

10.2.1

Personas

Für die nutzerzentrierte Gestaltung von Produkten und Services ist es im ersten Schritt wichtig zu wissen, wer die relevanten Nutzer sind. Um diese zu ermitteln, wird häufig die Methode der Personas genutzt. Personas sind fiktive Charaktere, die reale Nutzergruppen und ihre Eigenschaften widerspiegeln. Personaprofile enthalten konkrete Eigenschaften eines Nutzers. Dazu zählen seine Ziele, Aufgaben, Eigenschaften, Motivation und Frustration in Bezug auf das zu entwickelnde Produkt oder den Service. Durch die Erstellung von Persona-Profilen werden spätere Nutzer transparent gemacht und der Nutzer sowie seine Bedürfnisse können während des gesamten Entwicklungszeitraums im Blick behalten werden. Sie dienen dazu, die Zielsetzung und Bedürfnisse der Nutzer zu verstehen und entsprechend in die Anwendung einfließen zu lassen. Dadurch wird sichergestellt, dass Produkte und Services für den Nutzer und nicht am

Nutzer vorbei entwickelt werden. Um eine Persona zu erstellen, werden im ersten Schritt so viele Informationen wie nur möglich über die Nutzer gesammelt und im Anschluss geclustert [1].

10.2.2 User Stories

Der zweite Schritt ist die Ermittlung von konkreten Anforderungen der Personas. Diese können in Form von User Stories aufgestellt werden. User Stories formulieren mögliche Anforderungen real, nutzbar und konkret. Bei User Stories handelt es sich um knappe, zielorientiert Beschreibung von Anforderungen, die klassischerweise folgenderweise aufgestellt werden: „Als (Nutzerin/Nutzer) möchte ich (Funktion), um (Ziel).“ Durch ihr geringes Komplexitätslevel sind User Stories insbesondere in den frühen Phasen der Konzeptentwicklung hilfreich und ermöglichen eine genaue Formulierung der Anforderungen, aus welchen im Anschluss die Funktionen abgeleitet werden können [2].

10.3 Projekthalt

10.3.1 Personas des Forschungsprojekts BioFusion 4.0

Im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 wurden Personas entwickelt, welche die adressierten Endnutzer der entwickelten Technologien und Demonstratoren repräsentieren. Diese wurden recht früh im Projekt entwickelt, und bilden die Ausgangslage für die Ideenentwicklung. Des Weiteren werden die Personas unterstützend bei der nutzerzentrierten Gestaltung und bei der Produkt- und Technologieentwicklung eingesetzt. Wie auch schon hervor ausgearbeitet, kann die Zielgruppe durch die Entwicklung und Anwendung von Personas besser verstanden und adressiert werden, indem Ziele, Anforderungen, Bedürfnisse und Verhaltensweise der Nutzer transparent gemacht werden. Insgesamt wurden im Forschungsprojekt 21 Personas entwickelt. Im ersten Schritt wurden die zentralen Aufgaben, Ziele, Anforderungen, benötigte Daten sowie die Motivation und Frustration der Personas in einem Profil zusammengetragen. Im Anschluss wurden die Personas entlang des Lebenszyklus eines Produktes angeordnet. Das Ergebnis ist der folgenden Abbildung zu entnehmen.

Begin of Life: Planning

1. Geschäftsführung
2. Werksleitung
3. Nachhaltigkeitsmanagement
4. Betriebsrat
5. HSE(Health-Safety-Environment)-Management
6. Projektleitung
7. Qualitätsmanagement
8. Produktionsplanung
9. Produktionsleitung
10. Schichtleitung
11. Instandhaltung
12. Produktentwicklung
13. Arbeitsplatzergonomie

Begin of Life: Production

14. Maschinenherstellung
15. Business & Digital Excellence Management
16. Montage

Mid of Life

17. Kunde oder Kundin

Personas und User Stories für
biologisch transformierte
Technologien und
Demonstratoren

End of Life

- 18. Leitung Wertstoffhof
- 19. Logistik Reststoffbearbeitung
- 20. Geschäftsführung Reststoffbearbeitung
- 21. Mitarbeitende Reststoffbearbeitung

Die 21 Personas wurden den vier Lebenszyklus Phasen Begin of Life Planning (gelb), Begin of Life Production (blau), Mid of Life (orange) und End of Life (grün) zugeordnet.

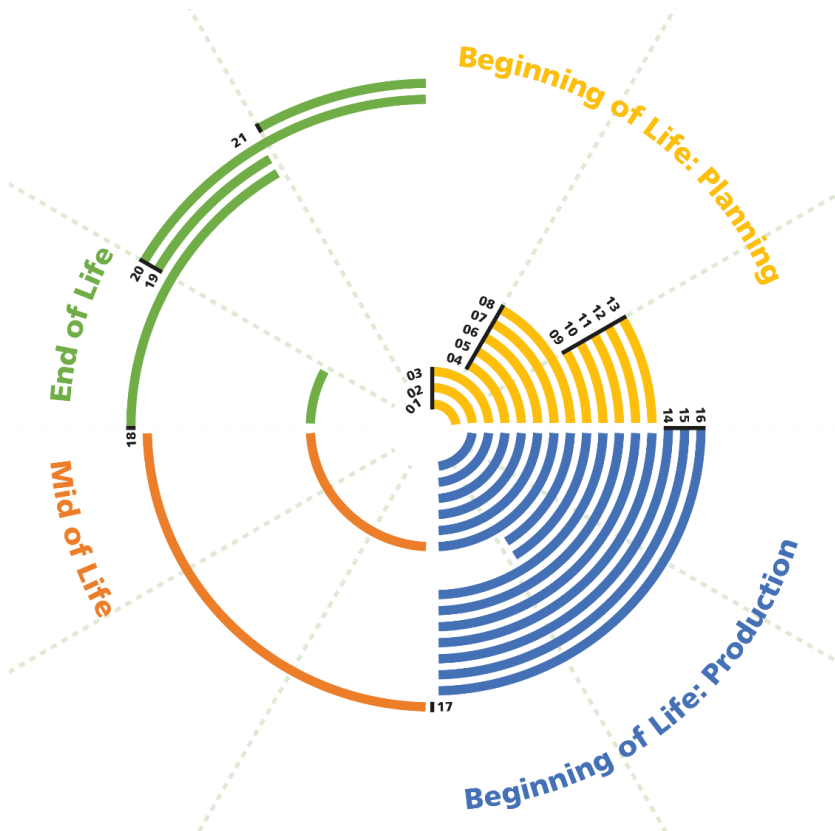


Abb. 10.1 Personas des Forschungsprojekts BioFusion 4.0

10.3.2

User Stories des Forschungsprojekts BioFusion 4.0

Im Anschluss wurden die Anforderungen der zuvor entwickelten Personas an die zu entwickelnden Lösungen mithilfe von nutzerzentrierten User Stories und Akzeptanzkriterien weiter spezifiziert. Die Anforderungen wurde in Interviews und Workshops mit den beteiligten Unternehmenspartnern erarbeitet. Im ersten Schritt wurde unter Angabe der Lebenszyklusphase, der Funktion und des Nutzens folgende Frage beantwortet: „Wer möchte was erreichen und warum?“ Im Anschluss wurden Akzeptanzkriterien für jede User Story erstellt. Diese gelten als Grundlage für die Entwicklung von Funktionen in Anwendungsfällen, werde diese erfüllt, dann wird der formulierte Nutzen aus den User Stories erreicht. Insgesamt wurden 39 User Stories formuliert, welche der nachfolgenden Abbildung zu entnehmen sind.

Personas und User Stories für
biologisch transformierte
Technologien und
Demonstratoren

Begin of Life Planning

Strategieentwicklung und Geschäftsmodelle

Als **Geschäftsführer:in** möchte ich die Implementierung der GME planen und umsetzen, um die Entwicklungsziele zu erreichen.

Als **Geschäftsführer:in** möchte ich Geschäftsmodelloptionen generieren und auswählen, um mein Geschäftsmodell zu entwickeln.

Als **Geschäftsführer:in** möchte ich alternative und zukünftige Geschäftsmodelle kennen, um Chancen und Risiken zu bewerten.

Als **Geschäftsführer:in** möchte ich mein Geschäftsumfeld analysieren, um Stärken und Schwächen zu identifizieren.

Produktentwicklung

Als **Produktentwickler:in** möchte ich die Nachhaltigkeitsbetrachtungen auf einzelne Komponenten / das gesamte Produktmodell heurterbrechen können und mir den CO2 Fußabdruck anzeigen lassen, um die größten Umweltsünder zu identifizieren. Zudem möchte ich eine Warnung erhalten, wenn meine geplanten (Nachhaltigkeits-) Grenzen überschritten werden.

Als **Produktentwickler:in** möchte ich Alternativen zu konventionellen Materialien vorgeschlagen bekommen, die bei gleichen mechanischen Eigenschaften im Hinblick auf die Nachhaltigkeit gleich oder besser bewertet werden. Zudem möchte ich ein Matching von mir definierten Anforderungen und möglichen Materialien erhalten.

Als **Nachhaltigkeitsmanager:in** möchte ich verschiedene Varianten für Produkte und Produktionsplan (z.B. neues Material, Veränderung Produktionsschritte, neue Komponente etc.) berechnen können, um die beste Alternative unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsbetrachtung (Auch unter Berücksichtigung der EoL-Phase) zu finden.

Als **Produktentwickler:in** möchte ich neue Herstellungsverfahren entwickeln, um "flexibel" / "anpassungsfähig" und nachhaltig zu produzieren.

Als **Maschinenhersteller:in** möchte ich bioabbaubare Kunststoffbauteile produzieren, um neue Märkte zu erschließen.

Als **Nachhaltigkeitsmanager:in** möchte ich die Nutzungsmöglichkeiten von bereits verwendeten Produkten und die Beschaffung initiieren.

Produktions- und Prozessplanung

Als **Produktionsplaner:in** möchte ich verschiedene Fertigungstechnologien zielgerichtet miteinander kombinieren, um möglichst geringe Energie-, Material und Ressourcenbedarfe zu verursachen (z.B. Kombination von additiven und fräsenden Fertigungstechnologien) und zukunftsfähige Verfahren und Kombinationen vorgeschlagen bekommen.

Als **Produktionsplaner:in** möchte ich Optionen von BT Equipment vorgeschlagen bekommen, um zukunftsorientierte Produktion zu ermöglichen.

Als **Produktionsplaner:in** möchte ich für jeden Prozess, den ich simuliere, und für jedes Produkt während der Produktionsphase den individuelle CO2-Fußabdruck erfahren, um meine Produktion nachhaltig auszulegen und einen Soll- / Ist-Abgleich zu erhalten.

Als **Produktionsplaner:in** möchte ich biointelligente Services einsetzen, um eine flexible und schnelle Anpassbarkeit der Produktion unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien zu ermöglichen.

Als **Betriebsrat** möchte ich die Verarbeitung personenbezogener Daten regulieren, um Datenschutz sicherzustellen.

Personas und User Stories für biologisch transformierte Technologien und Demonstratoren

Begin of Life Production

Produktion und Produktionssteuerung

Als **Nachhaltigkeitsmanager:in** will ich eine Auswertung der Betriebs- und Zustandsdaten der Produktion hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeit, um Soll-Ist-Vergleich mit den integrierten LCA-Anforderungen und weiteren Nachhaltigkeitskriterien über den DZ wie die Verlängerung der Lebenszeit durch regelmäßige Pflege und Wartung sowie die Erweiterung des modularen Designs durchführen zu können.

Als **Business & Digital Excellence Manager:in** möchte ich durch biointelligente Services unterstützt werden um die Digitalisierung der Produktion vorantreiben und managen zu können.

Als **Arbeitsergonom:in** möchte ich, dass die Haltung meiner Mitarbeitenden ergonomisch gut bewertet ist um die Gesundheit meiner Mitarbeitenden langfristig sicherstellen zu können.

Als **Bereichsleiter:in** der Instandhaltung möchte ich mithilfe der biointelligenten Services optimierte Instandhaltungszeiten erreichen, um Maschinenstillstände auf ein Minimum zu reduzieren.

Als **Schichtleiter:in** möchte ich die Ausfallzeiten meiner Mitarbeitenden minimieren um größtmögliche Planungssicherheit zu erreichen.

Als **Geschäftsführer:in** möchte ich über Entwicklungen in meinem Unternehmensumfeld informiert sein, um schnell reagieren zu können.

Als **Geschäftsführer:in** möchte ich auf Entwicklungen in meinem Unternehmensumfeld reagieren können, ohne dass meine internen Abläufe gestört werden.

Als **Qualitätsmanager:in** möchte ich den Einfluss „biointelligenter Services“ auf die Kennzahlen der Produkt- bez. Produktionsqualität transparent erkennen können, um den Zielkonflikt zwischen Optimierung der Nachhaltigkeit vs. Einhaltung der Qualitätsanforderungen managen zu können.

Als **Produktionsplaner:in** möchte ich die Leistungsfähigkeit der Mitarbeitenden fördern um Effizienz zu steigern.

Als **HSE-Manager:in** möchte ich biointelligente Services einsetzen, um eine Null-Unfall-Strategie umzusetzen.

Als **HSE-Manager:in** werde ich biointelligente Services einsetzen, um eine energieeffizientere Produktion zu befähigen und deren Schädigung auf die Umwelt zu minimieren.

Als **Werksleiter:in** möchte ich einen aktuellen Status meiner Ressourcen haben, um schnell Maßnahmen ableiten zu können.

Als **Monteur:in** möchte ich angenehme Arbeitsbedingungen haben, um gut und effizient arbeiten zu können.

Als **Monteur:in** möchte ich eine nachhaltige Orthese verwenden, um meine Arbeit zu erleichtern.

Als **HSE- / HSE-Manager:in** möchte ich einen optimalen Arbeitsschutz und Unfallverhütung am Arbeitsplatz sicherstellen, um die Gesundheit der Mitarbeitenden zu schützen.

Als **Werksleiter:in** möchte ich die Ergonomie steigern um die Mitarbeitenden zu entlasten, Motivation zu steigern, neue Mitarbeitende für mein Unternehmen zu gewinnen und durch reduzierte Krankheitstage die Kosten zu reduzieren und Planungssicherheit bekommen.

Als **Bereichsleiter:in** möchte ich die volle Transparenz bzgl. von Lieferterminen und Liefertreue der durch „biointelligente Services“ zugeführten Leistungen und Produkte haben, um weiterhin flexibel Betriebs- und Instandhaltungsmittel im Kontext des Zielkonflikts Termintreue und Nachhaltigkeit beschaffen und einsetzen zu können

Als **Projektmanager:in** möchte ich über Risiken, die mein Projekt verzögern können, früh informiert sein, um schnell reagieren zu können.

Als **Projektleiter:in** möchte ich über Risiken, die mein Projekt verzögern können, früh informiert sein, um schnell reagieren zu können.

Personas und User Stories für biologisch transformierte Technologien und Demonstratoren

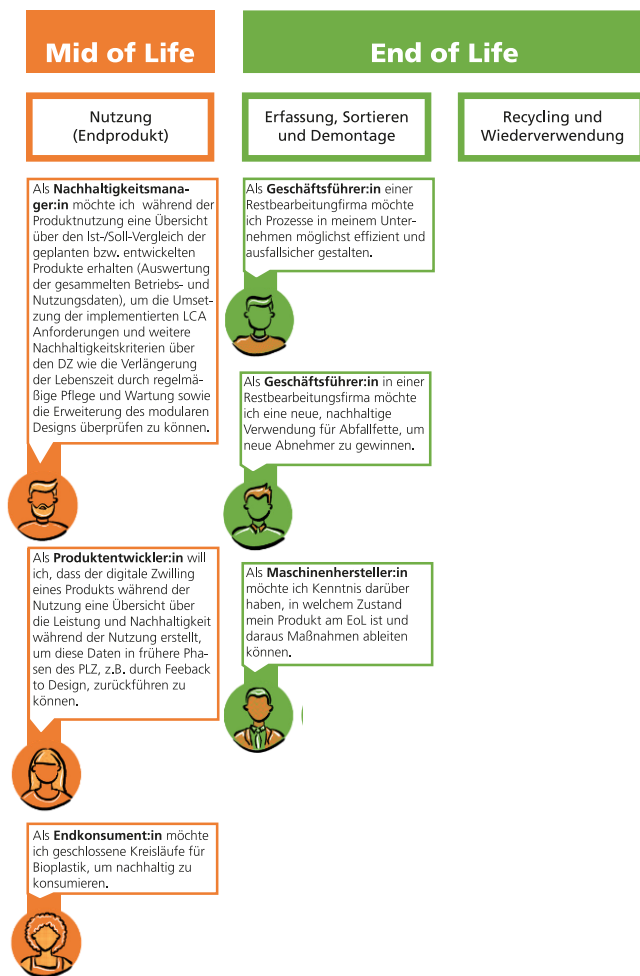


Abb. 10.2 User Stories des Forschungsprojekts BioFusion 4.0

10.4 Projektergebnis

Vor dem Hintergrund zukünftig bedarfsorientierte Produkte/Technologien zu entwerfen wurden im ersten Schritt Personas identifiziert, die die letztendlichen Endnutzer im industriellen Kontext entlang des Produktlebenszyklus sein würden. Im Folgenden wird das Ergebnis der Methoden Personas und User Stories, am Beispiel der Persona „Nachhaltigkeitsmanagerin“ sowie den dazugehörigen Anforderungen präsentiert:

„Noah Müller, 37, ist als Nachhaltigkeitsmanager bei einem Automobilhersteller tätig. Dort zielt er darauf ab, nachhaltige Praktiken in allen Unternehmensprozessen zu integrieren und langfristig ökologischen sowie sozialen Mehrwert zu schaffen. Zu den Kernaufgaben gehört die Analyse und Bewertung von Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen sowie die Entwicklung und Umsetzung von Optimierungsvorschlägen. Weitere Aufgaben umfassen die Erstellung von Lebenszyklusanalyse (LCA), die Implementierung von Nachhaltigkeitskriterien in Geschäftsprozessen sowie die Optimierung des Unternehmens in ökologischer, technischer, sozialer und wirtschaftlicher Hinsicht. Der Nachhaltigkeitsmanager verfolgt das Ziel, eine Kreislaufwirtschaft zu fördern,

Personas und User Stories für
biologisch transformierte
Technologien und
Demonstratoren

Ressourcen- und Energieeffizienz zu steigern sowie nachhaltige Produkte und Prozesse zu entwickeln. Darüber hinaus soll durch gezielte Kommunikation Vertrauen bei Stakeholdern aufgebaut und die Nachhaltigkeitsziele des Unternehmens strategisch vorangetrieben werden. Von einem Nachhaltigkeitsmanager werden fundierte Kenntnisse in der Ökobilanzierung, im Bereich nachhaltiger Produktionsverfahren und im Umgang mit gesetzlichen Vorgaben erwartet. Für die erfolgreiche Umsetzung der Aufgaben werden umfangreiche Daten benötigt, darunter CO₂-Fußabdruck von Produkten und Komponenten, Lebenszyklusdaten, Informationen zu Recyclingstandards und Energieverbräuchen sowie Materialeigenschaften. Seine Motivation zieht er aus der Nachhaltigkeit dem Schutz des Planeten, der Nutzung erneuerbarer Energien und nachwachsender Rohstoffe sowie einem zukunftsweisendem Unternehmensbild. Langsame Entwicklungsprozesse, teure Produkte und der Zielkonflikt zwischen Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit frustrieren ihn.“

Die Kernanforderungen des Nachhaltigkeitsmanagers, die mithilfe von Interviews und Workshops mit den beteiligten Unternehmenspartnern erarbeitet wurden, sind in User Stories dargestellt:

- CO₂-Fußabdruck für einzelne Komponenten bzw. gesamtes Produkt zur Verfügung gestellt bekommen
- Alternative Varianten für Produkte und Produktionspläne finden
- Soll- / Ist-Vergleich zur Überprüfung implementierter Produkt-LCA-Anforderungen erhalten
- Überwachung der Zielerreichung im Hinblick auf die geplante Umweltbelastung

10.5 Zusammenfassung

Die Integration der Methoden Personas und User Stories im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 zeigt, wie wichtig nutzerzentrierte Ansätze für die Gestaltung innovativer und nachhaltiger Technologien sind. Durch die Entwicklung von insgesamt 21 Personas, die entlang des Produktlebenszyklus angeordnet wurden, konnte die Zielgruppe präzise definiert und adressiert werden. Die Persona des Nachhaltigkeitsmanagers veranschaulicht exemplarisch, wie spezifische Anforderungen, Ziele und Herausforderungen eines Nutzers in die Produkt- und Technologieentwicklung einfließen können. Die anschließende Konkretisierung der Anforderungen durch 39 User Stories hat dazu beigetragen, klare Kriterien für die Entwicklung der Lösungen zu formulieren. Dies gewährleistet, dass die entwickelten Technologien nicht nur den funktionalen Anforderungen, sondern auch den Bedürfnissen der Zielgruppe entsprechen. Zusammenfassend tragen die Methoden wesentlich dazu bei, dass Produkte und Technologien entlang des gesamten Lebenszyklus nachhaltiger und nutzerorientierter gestaltet werden können. Sie stellen sicher, dass Lösungen entwickelt werden, die sowohl den ökologischen und ökonomischen Anforderungen gerecht werden als auch langfristig die Akzeptanz und Zufriedenheit der Nutzer fördern.

10.6 Literatur

- [1] Jacobson, Jens; Meyer, Lorena: Praxisbuch Usability und UX. Was alle wissen sollten, die Websites und Apps entwickeln. 3. Aufl. Bonn: Rheinwerk Computing.
- [2] Cohn, Mike: Advantages of User Stories over Requirements and Use Cases. Online verfügbar unter <https://www.mountaingoatsoftware.com/articles/advantages-of-user-stories-for-requirements>.

Personas und User Stories für
biologisch transformierte
Technologien und
Demonstratoren

11

Geschäftsmodelle für die Biologische Transformation: Methode und Vorgehen zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle

Benjamin Gellert¹, Henry Nicolai Buxmann¹, Felix Budde¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Die Übertragung von Prinzipien natürlicher Systeme auf technische Materialien, Strukturen und Prozesse ist essenziell für das Ziel einer nachhaltigen Wertschöpfung. Für eine vollständige Integration von biologischen Prinzipien und insbesondere der Kreislaufwirtschaft in unsere Wirtschaftsweise ist neben der technologischen ebenso die Ebene unternehmerischer Geschäftsmodelle bedeutsam. Dafür wurde im Rahmen von BioFusion 4.0 ein praxisnahes Vorgehensmodell für die zirkuläre Weiterentwicklung von bestehenden Geschäftsmodellen entwickelt: Der Prozess beginnt mit einer Bewertung und Analyse des Geschäftsmodells unter Berücksichtigung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft. Anschließend werden die Potenziale zirkulären Wirtschaftens im Kontext des jeweiligen Unternehmens ermittelt. Darauf aufbauend lassen sich mithilfe eines entwickelten Geschäftsmodellmusterkatalogs individuell geeignete, zirkuläre Geschäftsmodellmuster sowie maßgeschneiderte Maßnahmen identifizieren, aus denen konkrete Handlungsempfehlungen für die Transformation des Geschäftsmodells entstehen. Das Vorgehensmodell wurde in einer Workshopreihe mit dem Anwendungspartner *budatec* (Anlagenhersteller für die Halbleiter- und Solarindustrie in Berlin) erprobt und optimiert. Das Ergebnis beschreibt eine interaktive Begleitung, die es insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen ermöglicht, einen strukturierten Prozess zur Bewertung, Weiterentwicklung und Implementierung zirkulärer Geschäftspraktiken in ihrer Unternehmensstrategie zu etablieren.

11.1

Einleitung

Die Kernprinzipien der Biologischen Transformation – Bioinspiration, Biointegration und Biointeraktion – beziehen sich auf die Übertragung biologischer Materialien, Strukturen und Prozesse auf technische Systeme [1]. Die Überführung dieser primär technologisch geprägten Prinzipien in betriebswirtschaftliche Strukturen, insbesondere in die Gestaltung und Weiterentwicklung von Geschäftsmodellen, stellt eine eigenständige Herausforderung dar. Dies war die Aufgabe des Teilprojekts „Geschäftsmodelle für die Biologische Transformation“ von BioFusion 4.0.

Im Rahmen des dreijährigen Projekts wurden dafür die genannten Kernprinzipien nach Anknüpfungspunkten untersucht, die es erlauben, biologische Prinzipien in die Gestaltung von unternehmerischen Geschäftsmodellen zu implementieren. Ein Geschäftsmodell beschreibt hier die Funktionsweise und Art der Wertschöpfung eines Unternehmens. Es definiert die Ressourcen, Aktivitäten und Partnerschaften, die für ein Wertangebot (physisch oder digital) benötigt werden und stellt über die Kundenbeziehungen, -segmente und den Wettbewerb das Unternehmensumfeld dar (siehe Abb. 11.1) [2, 3]. Ein Geschäftsmodell ist dementsprechend unternehmensspezifisch.

Geschäftsmodelle für die
Biologische Transformation:
Methode und Vorgehen zur
Entwicklung zirkulärer
Geschäftsmodelle



Abb. 11.1 Geschäftsmodell eines Unternehmens im Business Model Canvas (nach [2])

Ein Blick auf die Taxonomie der Biologischen Transformation [4] verdeutlicht, dass insbesondere im Bereich der Bioinspiration und speziell bei den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft Potenziale für die Übertragung technologischer Konzepte auf das Themenfeld von Geschäftsmodellen bestehen. Die Kreislaufwirtschaft ist, global betrachtet, ein ökonomisch aber auch gesellschaftlich zentrales Konzept zur Reduktion der dramatischen Folgen der weit verbreiteten linearen Wirtschaftsmodelle [5]. Die Förderung und Verarbeitung natürlich vorkommender Ressourcen verursachen weltweit einen erheblichen Anteil der Treibhausgasemissionen sowie des Biodiversitätsverlusts und Wasserverbrauchs [6]. Im Gegensatz dazu basiert die Kreislaufwirtschaft auf wiederherstellenden und regenerativen Prinzipien sowie Verhaltensweisen, die darauf abzielen, die Nutzungsdauer und den Wert von Produkten, Komponenten und Ressourcen so lange wie möglich zu erhalten [7]. Eine zirkuläre Transformation unserer Wirtschaftsweise kann jedoch nur gelingen, wenn die Transformation auch innerhalb der Unternehmen stattfindet. Dies erfordert Geschäftsmodelle, die zirkuläre Prinzipien in die zentrale Geschäftslogik integrieren und dabei nicht nur technologische, sondern auch organisatorische und strategische Anpassungen einschließen [5, 8]. Aktuelle Studien dahingehend zeigen, dass viele Unternehmen die Entwicklung hin zu einer zirkulären Wirtschaft zwar als Chance sehen, aber häufig die Konsequenzen für das eigene Geschäftsmodell noch nicht einschätzen können. Darüber hinaus fehlen ihnen Fachkräfte sowie das Know-how, die Transformation langfristig umzusetzen [9]. Das gilt insbesondere für KMU. Sie benötigen daher gezielte Unterstützung bei der Neugestaltung ihres bestehenden Geschäftsmodells, um zirkuläre Prinzipien effektiv integrieren zu können. Eine Lösung dafür wird im folgenden Kapitel dargestellt.

11.2 Stand der Technik

Für die Implementierung zirkulärer Prinzipien in Geschäftsmodellen eignet sich insbesondere das Business Model Canvas (BMC). Dieses Tool ermöglicht es Unternehmen ihre bestehenden Geschäftsmodelle systematisch zu analysieren, zu visualisieren und weiterzuentwickeln [2]. Die bestehende Literatur bietet zahlreiche gut etablierte und validierte Rahmenwerke, um zirkuläre Ansätze mittels BMC in Geschäftsmodellen zu integrieren. Dennoch besteht eine Lücke in praxisorientierten Ansätzen, die speziell auf KMU zugeschnitten und branchenübergreifend anwendbar sind. Die aktuelle Forschung konzentriert sich hauptsächlich auf folgende Ansätze: Die Integration strategischer und operativer Schritte zur Verbesserung eines zirkulären Geschäftsmodells auf der Produktebene oder speziell für dienstleistungsorientierte Unternehmen [10, 11]; theoretische Bewertungen von Geschäftsmodellen im Kontext der Zirkularität mit Anpassungen des BMC [12, 13]; oder die Untersuchung von KMU, wobei jedoch vorrangig die Rolle externer Stakeholder und politischer Akteure bei der Förderung zirkulärer

Geschäftsmodelle für die
Biologische Transformation:
Methode und Vorgehen zur
Entwicklung zirkulärer
Geschäftsmodelle

Innovationen auf einer niedrighschwelligen Ebene betrachtet wird [14, 15]. Da der aktuelle Stand der Technik keinen vollständig übertragbaren Ansatz zur Anleitung von KMU bei der zirkulären Transformation ihres bestehenden Geschäftsmodells bietet, wurde der Fokus auf die Entwicklung eines maßgeschneidertes Vorgehensmodells zur Unterstützung diese Transformation gelegt.

Zentrales Element des Vorgehensmodells war der ebenfalls während der Projektlaufzeit von BioFusion 4.0 entwickelte Geschäftsmodellmusterkatalog (GMMK). Auch hier gibt es in der Literatur bereits Sammlungen und Kategorisierungen nachhaltiger und zirkulärer Geschäftsmodelle. Bocken et al. [16] definieren in ihrer Arbeit Archetypen für nachhaltige Geschäftsmodelle, die sie in technologischen, sozialen und organisationalen Dimensionen clustern. Lüdeke-Freund et al. [17] widmen sich einem ähnlichen Themenfeld und kategorisieren 45 nachhaltige Geschäftsmodelle in Muster, die sie den Dimensionen „ökologisch“, „ökonomisch“ und „sozial“ zuordnen. Dabei können die Muster gleichzeitig mehreren Dimensionen zugeordnet werden. Schroedel [18] stellt in seinem Literaturüberblick eine Sammlung von 92 nachhaltigen Geschäftsmodellmustern vor und ergänzt diese um Fallstudien zu den einzelnen Modellen. Lüdeke-Freund, Gold & Bocken [19] legen einen besonderen Fokus auf zirkuläre Geschäftsmodelle und analysieren in ihrer Arbeit 26 solcher Modelle. Sie ordnen die Geschäftsmodelle den vier Dimensionen „Value Proposition“, „Value Delivery“, „Value Creation“ und „Value Capture“ zu und kategorisieren sie zusätzlich anhand verschiedener Archetypen. Trotz der umfangreichen Forschung im Bereich nachhaltiger Geschäftsmodelle und entsprechender Geschäftsmodellmuster (GMM) bleiben einige Aspekte bislang unzureichend adressiert. Insbesondere zeigt sich ein Bedarf an umfassenden Sammlungen und Analysen von GMM der Kreislaufwirtschaft. Darüber hinaus werden in den bestehenden Studien insbesondere für KMU zentrale Funktionen der GMM, wie ihr direkter Nutzen sowie potenzielle Umsetzungshürden, nicht ausreichend tiefgehend beleuchtet. Der am Fraunhofer IPK entwickelte GMMK geht daher über den aktuellen Stand der Technik hinaus und bildet über 40 zirkuläre GMM ab. Der Katalog bietet nicht nur allgemeine Informationen zur Bedeutung jedes Musters, sondern ist mit Filterfunktionen angereichert, die eine gezielte Auswahl von passenden GMM ermöglichen.

11.3

Geschäftsmodelle der Biologischen Transformation – Fokus Kreislaufwirtschaft

Gestartet wurde mit dem Ziel, Unternehmen bei der Analyse ihres bestehenden Geschäftsmodells hinsichtlich Potenzialen der Biologischen Transformation, und darauf aufbauend bei der Gestaltung und Implementierung von Maßnahmen zur Weiterentwicklung des Geschäftsmodells, zu unterstützen. Dabei sollten insbesondere die Integrationsebenen der Biologischen Transformation – Inspiration, Integration und Interaktion – berücksichtigt werden. Die Aktualität von zirkulären Fragestellungen in der derzeitigen Nachhaltigkeitsforschung sowie die dort verbreitete Herausforderung, bioinspirierte Prinzipien der Kreislaufwirtschaft in unternehmerische Geschäftsmodelle zu integrieren, legte den Fokus zu Beginn des Projekts auf Geschäftsmodelle der Kreislaufwirtschaft als Teilaspekt der Biologischen Transformation. Das Ergebnis sollte die Entwicklung und Bereitstellung eines standardisierten Vorgehens mit entsprechenden Werkzeugen sein, die Unternehmen zu einer eigenständigen Anwendung befähigen. Dafür galt es die Bedeutung und Potenziale von Geschäftsmodellen der Kreislaufwirtschaft für die Praxis aufzuarbeiten und bereits bestehende Ansätze in diesem Kontext zu identifizieren. Aufbauend auf diesen Grundlagen wurden in einem nächsten Schritt zirkuläre Geschäftsmodellmuster zur Biologischen Transformation aus der Literatur und anhand bestehender Anwendungsfälle identifiziert. Die identifizierten Muster galt es für die praktische Anwendung bedarfsgerecht zu beschreiben, mit Fallbeispielen zu hinterlegen und zu kategorisieren. Abschließend sollten sie in die Entwicklung eines

Geschäftsmodelle für die
Biologische Transformation:
Methode und Vorgehen zur
Entwicklung zirkulärer
Geschäftsmodelle

standardisierten Vorgehensmodells zur Analyse, Gestaltung und Implementierung von zirkulären Geschäftsmodellen integriert werden, welches anhand eines Anwendungspartners aus dem Projektkonsortium zu erproben war.

11.4 Projektergebnisse

Das Ergebnis der Arbeiten kann in zwei Aspekte aufgeteilt werden - der Geschäftsmodellmuskatalog sowie das praxisnahe Vorgehensmodell für die zirkuläre Weiterentwicklung von bestehenden Geschäftsmodellen.

11.4.1 Geschäftsmodellmuskatalog

Bei dem entwickelten Geschäftsmodellmuskatalog handelt es sich um eine Sammlung definierter und in Steckbriefen klassifizierter zirkulärer GMM. In Abgrenzung zu spezifischen Geschäftsmodellen einzelner Unternehmen handelt es sich bei GMM um allgemeine Konzepte, die sich durch geschickte Anpassung in jeder Organisation anwenden lassen (z. B. Rücknahmemanagement oder die Herstellung langlebiger und reparaturfähiger Produkte) [20]. Die Sammlung mit über 40 zirkulären GMM-Steckbriefen basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche, Experteninterviews und praktischen Erprobungen [19, 21]. Die folgende Tab. 11.1 GMMK (nach [25]) zeigt die Struktur des GMMK. Neben allgemeinen Informationen über die Bedeutung des Geschäftsmodellmuskatalogs (1–5) ist der Katalog mit weiteren Filterfunktionen (6–9) zur individuellen Auswahl von GMM angereichert. Damit bildet er das zentrale Werkzeug innerhalb des Vorgehensmodells zur zirkulären Weiterentwicklung von Geschäftsmodellen.

1	Definition	Beschreibung des Geschäftsmodellmuskatalogs zur Förderung der Kreislaufwirtschaft
2	Einfluss auf die Elemente des Business Model Canvas	Positiver/negativer Einfluss auf BMC-Elemente aus Perspektive der Kreislaufwirtschaft: Schlüsselressourcen, Schlüsselaktivitäten, Schlüsselpartner, Wertangebot, Kundensegmente, Wettbewerb, Kostenstruktur, Einnahmequellen
3	Nutzen für das Unternehmen	Nutzenkategorien wie Ressourceneinsparung, längere Produktlebensdauer, höhere Gewinnmargen usw.
4	Barrieren bei der Umsetzung	Barrierekategorien wie Kostensteigerungen, rechtliche Hürden, Kundenwiderstand usw.
5	Schritte zur Umsetzung	Allgemeine Schritte zur Umsetzung des Geschäftsmodellmuskatalogs (wie z. B. Aufbau neuer Geschäftsbereiche, Änderung des Produktdesigns)
6	R-Strategien	Zuordnung der R-Strategien nach Kirchherr et al. [22]
7	Wertschöpfungszyklus	Zuordnung in die Wertschöpfungsstufen eines Produkts nach Lacy et al. [23]
8	CBM	Klassifizierung in Circular Business Models (CBMs) nach Lacy et al. [23]
9	Typologie nachhaltiger Geschäftsmodelle	Zuordnung in Arten nachhaltiger Geschäftsmodelle nach Ahrend et al. [24]

Tab. 11.1 GMMK (nach [25])

11.4.2

Vorgehensmodell für die zirkuläre Entwicklung von Geschäftsmodellen

Dieser Teil der Projektergebnisse dokumentiert den praktischen Anteil des Teilprojektes, welcher in Zusammenarbeit mit *budatec* erprobt wurde. Der GMMK wurde in ein Vorgehensmodell integriert, welches KMU mithilfe eines Workshop-Konzepts dabei begleitet, ihr bestehendes Geschäftsmodell zirkulär zu transformieren. Dafür werden die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft auf struktureller und strategischer Ebene betrachtet und deren Integration zunächst losgelöst von technischen Fragestellungen diskutiert. Begonnen wird mit einer allgemeinen Erfassung des Geschäftsmodells, sofern solch eine Darstellung nicht in aktueller Form vorliegt. Insbesondere für KMU ist diese Betrachtung relevant, da in der Regel das Geschäftsmodell im laufenden Betrieb nicht erneut definiert wird. Eine ausführliche Betrachtung mithilfe des BMC schärft jedoch den Blick auf die strategische Auseinandersetzung mit der eigenen Wirtschaftsweise und deckt schnell Handlungsfelder für die Weiterentwicklung des Unternehmens auf. Anschließend richtet sich der Fokus auf die Kreislaufwirtschaft. Dafür ist es sinnvoll, zunächst ein grundlegendes Verständnis für die Kreislaufwirtschaft allgemein beziehungsweise zirkuläre Geschäftsmodelle im Besonderen zu schaffen. Im nächsten Schritt wird dann bewertet, in welchem Umfang das aktuelle Geschäftsmodell bereits Prinzipien der Kreislaufwirtschaft integriert und in welchen Bereichen weitere zirkuläre Praktiken eingeführt werden können. Dafür wird erneut das BMC herangezogen, nun jedoch mit gezielten Fragen, die eine Bewertung des Grades der Zirkularität und der Bedeutung von zirkulären Prinzipien innerhalb des Geschäftsmodells erlauben.

Nach einer Priorisierung der BMC-Elemente hinsichtlich deren zirkulärem Verbesserungspotenzial und der Umsetzbarkeit von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft werden geeignete zirkuläre GMM ausgewählt. Dafür wird der GMMK (Kapitel 1.4.1) mit seinen umfangreichen Steckbriefen verwendet. Muster, die die priorisierten Elemente aus dem vorherigen Schritt positiv beeinflussen, können potenziell im Unternehmen implementiert werden. Nach einer ausführlichen Vorstellung der GMM wird gemeinsam bewertet, welche GMM am relevantesten sind. Dieser Prozess mündet erneut in einer Priorisierung, bei der die GMM in drei Prioritätsstufen unterteilt werden: von 1 (hohe Priorität) über 2 (mittlere Priorität) bis 3 (niedrige Priorität). Das Ergebnis bestimmt die Reihenfolge für die Implementierung der zirkulären GMM im Unternehmen. Auf Basis der priorisierten Geschäftsmodellmuster werden im letzten Schritt konkrete Maßnahmen abgeleitet, die die Kreislaufwirtschaft im Geschäftsmodell weiter verankern. Dabei erhält jede Maßnahme einen detaillierten Maßnahmenplan, der das Ziel, den Einfluss auf das Geschäftsmodell, das Vorgehen sowie das Start- und Abschlussdatum definiert. Zuletzt ist eine Darstellung der Maßnahmen je GMM in einer Roadmap mit zeitlichen Bezugsrahmen vorgesehen (Abb. 11.2).

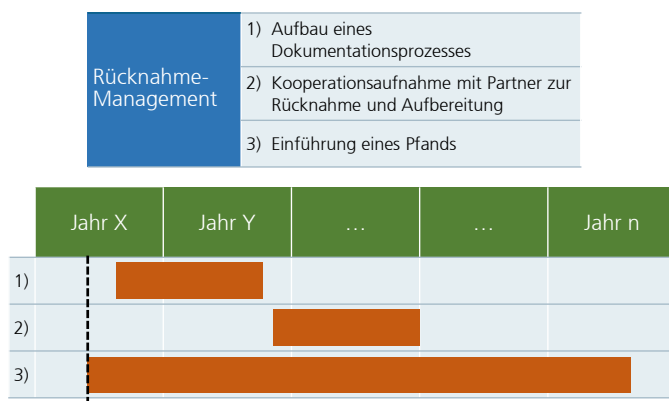


Abb. 11.2 Beispiel-Roadmap für GMM „Rücknahme-Management“

Geschäftsmodelle für die
Biologische Transformation:
Methode und Vorgehen zur
Entwicklung zirkulärer
Geschäftsmodelle

Nach diesen Schritten, aufgeteilt auf vier Workshops, ist das Vorgehensmodell zur Planung einer kreislauffähigen Geschäftsmodellentwicklung zunächst abgeschlossen. Es folgt die Umsetzungsphase im Unternehmen. Werden dort die geplanten Maßnahmen umgesetzt und somit die GMM beim Anwender implementiert, greift das Geschäftsmodell in der Zukunft vermehrt die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft auf. Neben der Sicherung der eigenen Wettbewerbsfähigkeit leistet es dann einen wertvollen Beitrag zur Abkehr von der Linearwirtschaft hin zu kreislauforientierten Wirtschaftsweisen.

11.5 Zusammenfassung

Damit produzierende Unternehmen auch in der Zukunft resilient gegenüber der zunehmenden Ressourcenknappheit bleiben und darüber hinaus ihren negativen Einfluss auf das Klima reduzieren, ist eine Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft unabdingbar. Das setzt neben einer Zunahme an technologischen Innovationen insbesondere auch eine Betrachtung der aktuell vorherrschenden Geschäftsmodelle voraus. Diese müssen zirkulärer werden. Das im Rahmen dieses Kapitels vorgestellte Vorgehensmodell bietet dafür eine Lösung an. Das praxisnahe Modell für die zirkuläre Weiterentwicklung von bestehenden Geschäftsmodellen beschreibt eine interaktive Begleitung, die es vor allem KMU ermöglicht, einen strukturierten Prozess zur Bewertung, Weiterentwicklung und Implementierung zirkulärer Geschäftspraktiken als Bestandteil ihrer Unternehmensstrategie zu etablieren. Das Vorgehensmodell lässt sich aufgrund seiner universellen Struktur auch auf andere Branchen übertragen. Besonders in Branchen mit hohen Ressourceneinsätzen und zunehmendem Druck zur Nachhaltigkeit kann das Modell als Grundlage dienen. Hierbei sollten branchenspezifische Faktoren, wie regulatorische Rahmenbedingungen, technologische Besonderheiten oder bestehende Wertschöpfungsnetzwerke, frühzeitig integriert werden. Eine detaillierte Analyse der branchentypischen Herausforderungen und Chancen gewährleistet eine erfolgreiche Umsetzung und schafft neue Impulse für Geschäftsmodellinnovationen. Obwohl das Vorgehensmodell primär auf die Bedürfnisse von KMU ausgerichtet ist, kann es mit geeigneten Anpassungen auch auf größere Unternehmen übertragen werden. Für die internationale Anwendung in Regionen mit unterschiedlichen Voraussetzungen wäre eine Betrachtung kultureller, wirtschaftlicher und politischer Unterschiede und deren Implikationen für das Vorgehensmodell sinnvoll.

11.6 Literatur

- [1] Bauernhansl T, Brecher C, Drossel W-G, Gumbsch P, Hompel M ten, Wolperdinger M, Hrsg. Biointelligenz. Eine neue Perspektive für nachhaltige industrielle Wertschöpfung: Ergebnisse der Voruntersuchung zur biologischen Transformation der industriellen Wertschöpfung (BIOTRAIN). Stuttgart: Fraunhofer Verlag; 2019
- [2] Osterwalder A, Pigneur Y. Business model generation: A handbook for visionaries, game changers, and challengers. Hoboken, NJ, USA: John Wiley and Sons; 2010
- [3] Gassmann O. The Business Model Navigator: The strategies behind the most successful companies. FT Financial Times publishing. Harlow, United Kingdom: Pearson Education Limited; 2020
- [4] Berkhahn M, Kremer G, Riedelsheimer T, Lindow K, Stark R. Taxonomy for Biological Transformation Principles in the Manufacturing Industry. In: Kohl H, Seliger G, Dietrich F, Hrsg. Manufacturing Driving Circular Economy. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing; 2023: 981–989. doi:10.1007/978-3-031-28839-5_109
- [5] Ghisellini P, Cialani C, Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. Journal of Cleaner Production 2016; 114: 11–32. doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.007

- [6] United Nations Environment Programme, International Resource Panel. Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want; 2019. Im Internet: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/27517>
- [7] Ellen MacArthur Foundation. Towards the circular economy. Vol. 1: an economic and business rationale for an accelerated transition; 2013
- [8] Münger A. Kreislaufwirtschaft als Strategie der Zukunft. Nachhaltige Geschäftsmodelle entwickeln und umsetzen. Freiburg: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG; 2021
- [9] DIHK Deutsche Industrie- und Handelskammer. Kreislaufwirtschaft als Chance? Die DIHK-Umfrage zur Circular Economy, 2024
- [10] Mendoza JMF, Sharmina M, Gallego-Schmid A, et al. Integrating Backcasting and Eco-Design for the Circular Economy: The BECE Framework. *Journal of Industrial Ecology* 2017; 21: 526–544. doi:10.1111/jiec.12590
- [11] Heyes G, Sharmina M, Mendoza JMF, et al. Developing and implementing circular economy business models in service-oriented technology companies. *Journal of Cleaner Production* 2018; 177: 621–632. doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.168
- [12] Lewandowski M. Designing the Business Models for Circular Economy—Towards the Conceptual Framework. *Sustainability* 2016; 8: 43. doi:10.3390/su8010043
- [13] Scholtysik M, Rohde M, Koldewey C, et al. DESIGNING BUSINESS MODELS FOR A CIRCULAR ECONOMY. *Proceedings of the Design Society 2023*; 3: 1347–1356. doi:10.1017/pds.2023.135
- [14] Maher R, Yarnold J, Pushpamali N. Circular economy 4 business: A program and framework for small-to-medium enterprises (SMEs) with three case studies. *Journal of Cleaner Production* 2023; 412: 137114. doi:10.1016/j.jclepro.2023.137114
- [15] Gennari F. The transition towards a circular economy. A framework for SMEs. *Journal of Management and Governance* 2022; 27: 1423–1457. doi:10.1007/s10997-022-09653-6
- [16] Bocken N, Short SW, Rana P, et al. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes. *Journal of Cleaner Production* 2014; 65: 42–56. doi:10.1016/j.jclepro.2013.11.039
- [17] Lüdeke-Freund F, Carroux S, Joyce A, et al. The sustainable business model pattern taxonomy—45 patterns to support sustainability-oriented business model innovation. *Sustainable Production and Consumption* 2018; 15: 145–162. doi:10.1016/j.spc.2018.06.004
- [18] Schroedel S. The Sustainable Business Model Database: 92 Patterns That Enable Sustainability in Business Model Innovation. *Sustainability* 2023; 15: 8081. doi:10.3390/su15108081
- [19] Lüdeke-Freund F, Gold S, Bocken NMP. A Review and Typology of Circular Economy Business Model Patterns. *Journal of Industrial Ecology (Journal of Industrial Ecology)* 2018; 23: 36–61. doi:10.1111/jiec.12763
- [20] Gassmann O, Frankenberger K, Choudury M. Geschäftsmodelle entwickeln. 55+ innovative Konzepte mit dem St. Galler Business Model Navigator. 3. Aufl. München: Hanser; 2021
- [21] Circular Economy Initiative Deutschland, Hrsg. Zirkuläre Geschäftsmodelle: Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen. München/London; 2021
- [22] Kirchherr J, Reike D, Hekkert M. Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *SSRN Journal* 2017. doi:10.2139/ssrn.3037579
- [23] Lacy P, Long J, Spindler W. The Circular Economy Handbook: Realizing the Circular Advantage. Springer eBook Collection. London: Palgrave Macmillan UK; Imprint Palgrave Macmillan; 2020. doi:10.1057/978-1-349-95968-6
- [24] Ahrend K-M. Geschäftsmodell Nachhaltigkeit. Ökologische und soziale Innovationen als unternehmerische chance. [S.l.]: SPRINGER GABLER; 2022
- [25] Gellert B, Buxmann HN, Orth R. Geschäftsmodellentwicklung für Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 2024; 119: 65–69. doi:10.1515/zwf-2024-1011

 Geschäftsmodelle für die
 Biologische Transformation:
 Methode und Vorgehen zur
 Entwicklung zirkulärer
 Geschäftsmodelle

12

Intelligente Reststoffbearbeitung

Natalie Petrusch¹, Clemens Briese¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Zwischen dem Ende der Nutzung und der Entscheidung, was mit einem Produkt weiter geschehen soll, befindet sich ein Teil des Produktlebenszyklus, der kaum bekannt und vielfach übersehen wird. Die Handlungen in diesem Abschnitt sind aber maßgeblich dafür verantwortlich, ob und wie Kreislaufwirtschaft – ein inhärentes Merkmal der biologischen Transformation – real werden kann. Unternehmen, die sich mit der Verarbeitung von bereits genutzten Produkten beschäftigen, sind heute noch beinahe ausschließlich auf die Erfahrung der Mitarbeitenden angewiesen. Mit Informationen am richtigen Ort zur richtigen Zeit über die Art, Zusammensetzung und das Gefahrenpotential bereits genutzter Produkte, könnten diese Unternehmen effizientere Entscheidungen für eine bessere Nutzung von Ressourcen treffen und das eigene Geschäftsmodell stärken. Das Ziel des Teilprojekts war es daher, die notwendigen Informationen zu generieren und diese am richtigen Punkt in der Wertschöpfungskette bereitzustellen, um auf Basis realer Daten zukünftig noch bessere Entscheidungen für die Führung von Materialien im Kreislauf treffen zu können. Realisiert wurde dies mit einem System zur bildbasierten Objekterkennung, welches an die besonderen Umweltbedingungen in der Reststoffbearbeitung angepasst wurde. In Verbindung mit einem Konzept für die Verwertungsplanung und der bedarfsorientierten Bereitstellung von Informationen konnten praktische Fortschritte für eine intelligente Rückführung von Wertstoffen in der Kreislaufwirtschaft geschaffen werden.

12.1

Einleitung

Während immer neue Technologien und Konzepte zur weiteren Verarbeitung von genutzten Produkten entstehen, wird weit weniger darüber gesprochen, wie diese Produkte überhaupt in den Kreislauf finden können. In der Kreislaufwirtschaft spielt der Prozessabschnitt zwischen der Nutzung und der Entscheidung über die weitere Verwendung eines Produkts eine entscheidende Rolle. Unternehmen, die sich mit der Verarbeitung von gebrauchten Produkten beschäftigen, stehen vor der Herausforderung, auf wenig Informationen zurückgreifen zu können und sind meist auf die Erfahrung ihrer Mitarbeitenden angewiesen. Um effizientere Entscheidungen für eine bessere Nutzung von Ressourcen treffen und das eigene Geschäftsmodell stärken zu können, ist jedoch eine genaue Kenntnis über die gebrauchten Produkte zur richtigen Zeit am richtigen Ort von besonderer Bedeutung. Das Ziel dieses Teilprojekts war es daher, diese Informationen zu generieren und entlang der Wertschöpfungskette bereitzustellen, um fundierte Entscheidungen für die Rückführung von Materialien in den Kreislauf treffen zu können.

Im Rahmen des Projekts wurde zu diesem Zweck ein System zur bildbasierten Objekterkennung entwickelt und an die spezifischen Umweltbedingungen in der Reststoffbearbeitung angepasst. Dieses System ermöglicht es, gebrauchte Produkte zu identifizieren und Informationen über sie abzurufen. Darüber hinaus wurde ein Konzept für die Verwertungsplanung entwickelt, um die vielfältigen Möglichkeiten der weiteren Verarbeitung von Produkten, ihren Baugruppen und einzelnen Wertstoffen entsprechend der R-Strategien, bspw. durch Wiederverwendung (re-use) oder Aufarbeitung (re-furbish), zu optimieren [1]. Wie sich diese Herausforderungen auf den Prozess auswirken und welche Anforderungen an die genannten Lösungen bestehen, wurde zusätzlich mittels eines eigens entwickelten Serious Games genauer analysiert. So konnte die

bedarfsorientierte Bereitstellung von Informationen praktische Fortschritte für eine intelligente Rückführung von Wertstoffen in die Kreislaufwirtschaft erzielt werden.

Intelligente Reststoffbearbeitung

Dieses Buchkapitel gibt einen umfassenden Überblick über das genannte Teilprojekt und die erzielten Ergebnisse. Es werden die Ziele des Teilprojekts sowie die jeweiligen Teillösungen vorgestellt. Darüber hinaus wird auf den Zusammenhang zwischen dem Teilprojekt und der Realisierung der Kreislaufwirtschaft eingegangen. Die beschriebenen Ansätze und Ergebnisse bieten wertvolle Erkenntnisse für Unternehmen und Organisationen, die sich mit der Verarbeitung von gebrauchten Produkten in der Kreislaufwirtschaft beschäftigen.

12.2 Stand der Technik

12.2.1 Kreislaufwirtschaft

Zentraler Bestandteil der Kreislaufwirtschaft ist es, Produkte und Materialien in geschlossenen Kreisläufen zu halten, um sie wiederverwenden, reparieren, recyceln oder anderweitig weiterverwerten zu können. Entsprechend ist das wesentliche Element der Kreislaufwirtschaft die Rückführung von Produkten und Materialien in den Produktionsprozess [2, 3]. Dies geschieht sowohl auf materieller Ebene durch Trennung oder Wiederverwendung von Elementen, als auch auf informativer Ebene durch die Bereitstellung von Informationen über die Zusammensetzung, den Zustand und die Herkunft der Produkte. Dadurch können Ressourcen effizienter genutzt und Umweltauswirkungen minimiert werden [2–4]. Insbesondere digitale Lösungen haben in den letzten Jahren im Bereich der Kreislaufwirtschaft an Bedeutung gewonnen. Durch den Einsatz von Technologien wie dem Internet of Things, Künstlicher Intelligenz und Datenanalyse können Produkte und Materialien besser verfolgt und verwaltet werden. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Entwicklung neuer Verfahren zur Materialtrennung und -verarbeitung. Durch innovative Technologien können verschiedene Materialien effektiv getrennt und anderen Kreislaufprozessen zugeführt werden. Entscheidend sind dabei jedoch immer die ganzheitliche Betrachtung sowie die Beurteilung der jeweils möglichen Prozesse [5–7]. Mit den 9-Rs von Potting wird bereits eine umfassende Sammlung von Strategien zur Kreislaufführung bereitgestellt, wobei sie die Auswahl der Optionen immer nach dem Produkt und Zustand richtet [1]. Die genannten Technologien und Verfahren zur Kreislaufwirtschaft sind bereits in vielen Produktfamilien – besonders bei Exklusivgütern – erfolgreich getestet und teilweise fest etabliert. Aufgrund der enormen Absatzmenge und dem damit einhergehenden Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck, rücken jedoch kleinteiligere Produkte immer mehr in den Fokus. Diese Produktfamilien ergeben neue Herausforderungen für die Kreislaufführung – bspw. dadurch, dass die Wertbeurteilung der Einzelteile dieser Produkte nach der Nutzungsphase deutlicher von den Herstellern entkoppelt ist als es bspw. bei Fahrzeugen häufig der Fall ist. [8, 9].

12.2.2 Reststoffbearbeitung

Abfälle ähnlicher Art werden in sogenannten Sammelgruppen zusammengefasst. Eine dieser Sammelgruppen umfasst dabei den Elektroschrott und beinhaltet ausgediente elektronische Geräte und Komponenten wie Computer, Handys, Fernseher und kleine Haushaltsgeräte. Hat ein Produkt dieser Kategorie ausgedient, wird es üblicherweise auf einem Reststoffhof abgegeben und zunächst in einem Container gesammelt. Unternehmen, die sich auf die weitere Verarbeitung von Elektroschrott spezialisiert haben, werden von den Reststoffhöfen nach Bedarf darüber informiert, sobald ein solcher Container bereit zur Abholung ist. Angekommen auf dem Gelände des

weiterverarbeitenden Unternehmens wird der Inhalt des Containers entleert und durch Mitarbeitende direkt sortiert. Je nach Zuordnung, folgt die Zerlegung oder weitere Bearbeitung des Produkts vor Ort. Ist das Produkt final bearbeitet, wird es dem entsprechenden weiterführenden Prozess zugeführt – bspw. kann es an eine Anlage zur Materialverwertung übergeben oder auf einer Plattform zum Verkauf angeboten werden [9].

Intelligente Reststoffbearbeitung

Da Elektroschrott wertvolle Materialien enthält, aber auch Gefahrenstoffe, wie Schwermetalle und giftige Chemikalien, unterliegt die Entsorgung vielen Regularien und verlangt mitunter spezialisierte Technologien – die Prozessmöglichkeiten sind dadurch eingeschränkt und können zu einer wirtschaftlichen Belastung werden. Dem gegenüber stehen Produkte, die noch funktionsfähig sind oder deren Bestandteile für andere Produkte von Wert sind und einem Markt wieder zugeführt werden könnten – diese Absatzmärkte sind in der Regel weniger bekannt oder der Einstieg gestaltet sich aufwendig. Die Entscheidung für eine passende Verwertungsstrategie hängt somit von einer Vielzahl von Faktoren ab, welche ausgehend von der Reststoffbearbeitung kaum systematisch erfasst sind. Mit dem technologischen Fortschritt und der zunehmenden Verbreitung elektronischer Geräte nimmt auch die Menge an Elektroschrott weltweit kontinuierlich zu, was den Druck auf die Reststoffbearbeitung zusätzlich erhöht – es werden gute Entscheidungen, effiziente Sortierprozesse und ein geringer CO₂-Fußabdruck bei gleichzeitiger Beachtung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit benötigt [8, 10, 11].

Die Abwägung zwischen Aufbereitung und Zerlegung ist daher heutzutage eine komplexe Aufgabe mit vielen Variablen und Unsicherheiten. Die Vielfältigkeit der Produkte und der fehlende Zugang zu geeigneten Märkten machen insbesondere den Informationsfluss über das End of Life (EoL) hinaus zu einem kritischen Befähiger. Durch eine verbesserte Kenntnis über die Produkte, den von ihnen ausgehenden Gefahren, regulatorischen Anforderungen und bestehenden Möglichkeiten können dazu beitragen, die Umweltauswirkungen von Elektroschrott zu minimieren und wertvolle Ressourcen zurückzugewinnen.

12.2.3 Bildbasierte Objekterkennung

Die Objekterkennung für die Identifikation gebrauchter Objekte hat sich erheblich weiterentwickelt und ermöglicht Anwendungen in der Qualitätskontrolle, dem Recycling und der Kategorisierung gebrauchter Produkte. KI-Modelle wie YOLO [12] und Fast R-CNN [13] werden häufig verwendet, um abgenutzte, beschädigte oder gealterte Objekte zu erkennen und zu klassifizieren. Innovationen wie die Multiskalenerkennung erhöhen die Genauigkeit bei der Erkennung von Objekten unterschiedlicher Größe und Beschaffenheit, indem mehrere vordefinierte Boxen (Anchor-Boxen) mit verschiedenen Größen und Seitenverhältnissen verwendet werden. Das Training wird hingegen durch verankerungsfreie Ansätze – also Verfahren ohne Anchor-Boxen – in diesem Kontext effizient vereinfacht. Transformatorbasierte Modelle (z. B. DINO DETR [14]) verbessern die Erkennung in komplexen oder unübersichtlichen Szenen. Leichtgewichtige Architekturen (z. B. MobileNet) ermöglichen den Einsatz auf (mobilen) Endgeräten, was für die Vor-Ort-Erkennung in der Industrie oder im Einzelhandel entscheidend ist. Zu den sich abzeichnenden Trends gehören die 3D-Erkennung beschädigter Strukturen und das Zero-Shot-Learning zur Erkennung neuer Objekttypen ohne umfangreiches Neutrainig.

12.3 Die biologische Transformation in der Reststoffbearbeitung

Die Kreislaufwirtschaft ist ein inhärentes Merkmal und zentraler Aspekt der biologischen Transformation. Das wohl bekannteste Beispiel aus der Natur ist der

Nährstoffkreislauf – Pflanzen nehmen Nährstoffe aus dem Boden auf und dienen Tieren als Nahrung; die Ausscheidungen dieser Tiere und ihre Kadaver führen diese Nährstoffe wieder dem Boden zu, sodass sich ein Kreislauf bildet. Darüber hinaus lassen sich unzählige weitere Beispiele finden, begonnen bei Regenwürmern, die abgestorbene Pflanzenreste weiterverarbeiten, über Mistkäfer, die mit dem Kot anderer Lebewesen ihre Eier versorgen, bis hin zur Koprophagie von Kaninchen, bei der erst die erneute Verdauung die Aufnahme bestimmter Nährstoffe ermöglicht. All diese Beispiele zeigen, wie Ressourcen in der Natur durch geschlossene Kreisläufe effizient genutzt werden. Die Reststoffbearbeitung spiegelt eben genau dieses Prinzip wider, wenngleich die Effizienz der Prozesse und Bemühungen um wirklich geschlossene Kreisläufe noch in den Kinderschuhen stecken [15–17].

Um dieses Konzept zu realisieren, wird jedoch eine ganzheitlichere Betrachtung benötigt. Aus diesem Grund wurden im Teilprojekt auch andere Prinzipien der Biologischen Transformation untersucht. Ein wichtiger Ansatz ist dabei die bionische Informationsverarbeitung und Informationsorganisation. Besonders in der Reststoffbearbeitung am EoL gibt es einen Mangel an Informationen. Um diese Lücken zu schließen, müssen Bedarf, Verfügbarkeit und Darstellungsmöglichkeiten in der Reststoffbearbeitung gegeneinander abgewogen werden. Darüber hinaus wurden im Teilprojekt Prinzipien wie Selbstanpassung, Selbstlernen und Selbstoptimierung fokussiert. Besonders die vielseitigen Eingangsstoffe und die starke Abhängigkeit von den Fähigkeiten der Mitarbeitenden prägen die Reststoffbearbeitung. Um sich nahtlos in diesen Abschnitt des Produktlebenszyklus einzufügen und Prozesse nachhaltig optimieren zu können, müssen daher auch neue Technologien diese Eigenschaften in besonderem Maß antizipieren. Durch den Einsatz von bildbasierter Objekterkennung wird der kritische – mitunter zeitaufwendige – Schritt der Identifikation digitalisiert. Methoden des maschinellen Lernens ermöglichen es aus den gesammelten Daten zu lernen und Prozesse entsprechend des realen Bedarfs anzupassen. Durch die Kombination von bionischer Informationsverarbeitung, Selbstanpassung, Selbstlernen und Selbstoptimierung trägt das Teilprojekt unmittelbar zur Gestaltung der operativen Schritte am EoL bei. Gleichzeitig wird durch den bedarfsorientierten Einsatz von Technologie das besondere Gefüge sozialer und ökonomischer Aspekte für diesen Prozessabschnitt betrachtet und dessen Wertschöpfungsbeitrag konkret gefördert [18].

12.4 Projektergebnisse

12.4.1 Anwendungsfall bei BRAL



Abb. 12.1 Technischer Aufbau zur Datenaufnahme

Gemeinsam mit der BRAL Reststoffbearbeitungs GmbH (BRAL) wurde die Vision verfolgt, dass auch Firmen am EoL zukünftig über Informationen verfügen, die es ihnen ermöglichen ihre Routen zu optimieren, Gefahrenpotentialen zu erkennen, Personalbedarfe und Qualifikationen besser zu planen und wirtschaftliche Potentiale vorab zu bestimmen. Als erster Schritt auf diesem Weg war es deshalb das Ziel des Projekts, gemeinsam mit BRAL eine Lösung zu entwickeln, welche den realen Stand der Befüllung von Containern auf den Reststoffhöfen erfasst.



Abb. 12.2 Beispielbild zur Erfassung des Füllstands

Für den Anwendungsfall wurde ein Prozessmodell entwickelt, das die rückläufigen Prozesse in der Wertschöpfungskette identifiziert. Dieses wurde weiter genutzt, um Informationslücken und -bedarfe zu ermitteln, welche als Ausgangspunkt für die technologische Konzeptionierung dienten. Die Datenerfassung sollte mittels bildbasierter Objekterkennung stattfinden, für die eine vollständige Softwarestruktur und technische Umsetzung entwickelt wurde. Der technische Aufbau (Abb. 12.1) wurde robust und mit dem Ziel einer einfachen Handhabung gestaltet, um auf dem Gelände des Anwendungspartners von den dortigen Mitarbeitenden genutzt werden zu können. Auf diesem Weg konnten Daten über den Füllstand eines Testcontainers unter realen Bedingungen gewonnen werden. Die während der Befüllung aufgenommenen Bilder aus dem Inneren eines Containers (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) dienten als Ausgangspunkt für die Bestimmung von Füllständen. Daraus abgeleitet wurde der Füllstand in 10er Schritte und zugehörigen Klassen unterteilt. Im Anschluss wurde eine Klassifikation angelernt, welche nach ersten Validierungen eine korrekte Klassifizierung des Füllstands in 95 % der Fälle zeigte (Tab. 12.1). Die Analyseergebnisse historischer Daten ermöglichten darüber hinaus eine genauere Beschreibung des Potenzials der implementierten Technologie für eine mögliche Anwendung auf einem Reststoffhof. Zusätzliche Testläufe wurden in einer Laborumgebung für die Sortierung von Containerinhalten durchgeführt. Dabei konnten relevante Aspekte bei der Bereitstellung der erfassten Daten identifiziert und ein Rahmenaufbau sowie Kriterien für die effiziente Unterstützung des Sortierprozesses entwickelt werden.

Füllstands- klasse	Anzahl Trainingsbilder	Anzahl Testbilder	Quote
10 %	18	8	100 %
20 %	38	16	97 %
30 %	25	34	97 %
40 %	21	12	100 %
...	...	...	...
80 %	21	5	100 %
90 %	19	10	100 %

Tab. 12.1 Quoten richtig klassifizierter Testbilder nach Füllstandsklasse

12.4.2

Serious Game für die Reststoffbearbeitung

Zusätzlich wurde ein Serious Game auf Basis von Klemmbausteinen mit dem Ziel entwickelt, die Herausforderungen bei der Reststoffbearbeitung verständlich zu machen. Gleichzeitig forderte es die Teilnehmenden aktiv dazu auf bei der Gestaltung eines passenden Konzepts für eine nachhaltige Wertschöpfungskette am EoL mitzuwirken.



Abb.12.3 Container-Station des Serious Games

Zu Beginn stehen die Teilnehmenden vor einem Containerlager mit entsorgten Produkten (Abb.12.3). Das Containerlager besteht hier aus diversen Boxen, in denen sich unterschiedliche Produkte befinden. Bei den Produkten handelt es sich um Würfel aus Klemmbausteinen, deren Varianten sich durch die farbliche Zusammensetzung unterscheiden lassen. Die Runde beginnt mit einem Kundenauftrag. Ein fiktiver Kunde möchte einen bestimmten Klemmbaustein, welcher in einer Produktvariante verbaut ist, in der eigenen Produktion wiederverwenden. Die Teilnehmenden stehen nun vor der Herausforderung das betreffende Produkt sowie die Container, die es enthalten, zu identifizieren, und es in ausreichender Menge zu sammeln. Aufgrund fehlender Informationen über den Inhalt der Container, werden diese per Zufall gewählt. Die Teilnehmenden sind dazu angehalten, alle in einem Container befindlichen Teile zu entnehmen bis ausreichend Produkte der gesuchten Variante vorliegen. Im nächsten Schritt

werden die Teilnehmenden dazu aufgefordert einen möglichst effizienten Verwertungsplan für alle entnommenen Produkte auf Basis der R-Strategien sowie vorgegebener Regeln zu erstellen. Anschließend setzen die Teilnehmenden diesen Plan um und ordnen die Produkte bzw. ihre Bestandteile den jeweiligen R-Strategien zu. Das Ziel besteht darin, am Ende im Vergleich zu anderen Gruppen möglichst wenige Produktbestandteile der thermischen Verwertung (Recover) zuzuordnen. Der finale Material- und Informationsfluss sowie technische Anforderungen werden abschließend in einer Lösungskarte erfasst.

Die Teilnehmenden erkennen dabei die Ambiguität bei der Verwertungsplanung und erhalten eine Vorstellung vom zeitlichen Aufwand für eine umfassende Reststoffbearbeitung. Schnell wird dabei die Lücke im Informationsfluss als eine Hauptursache identifiziert und es entstehen oftmals einige Ideen, welche Anforderungen eine Lösung erfüllen müsste. In einer zweiten Runde durchlaufen die Teilnehmenden deshalb genau das gleiche Szenario, jedoch werden die geforderten Informationen durch die im Teilprojekt entwickelte technische Lösung bereitgestellt. Die Teilnehmenden haben in diesem Durchlauf Zugriff auf Informationen zur Produktzusammensetzung und dessen Standorte. Mittels bildbasierter Objekterkennung, wird anschließend die weitere Verarbeitung schrittweise digital begleitet und die Wahl der optimalen Verwertungsstrategie sichergestellt.

Das Spiel bietet eine Lernumgebung, in der die Teilnehmenden direkt mit Fragen der Kreislaufwirtschaft konfrontiert werden. Sie lernen typische Konflikte bei der Umsetzung kennen und tragen zur Entwicklung einer gemeinsamen Lösung indirekt bei [19].

12.4.3

Demonstrator Fraunhofer IPK

Den Kern dieser Demonstration bildet eine Daumen-Orthese aus unterschiedlichen Kunststoffen. Diese unterstützt spezifische Montagetätigkeiten. Im Gegensatz zum ursprünglichen Szenario, das besonders die wirtschaftlich orientierte Umsetzung von Kreislaufprozessen betrachtet, stellt diese Demonstration vor allem die Vielseitigkeit der Anwendungsmöglichkeiten dar.



Abb.12.4 (De-)Montage-Station für Daumen-Orthese

Im Rahmen der Implementierung wurde die entwickelte Lösung zur bildbasierten Objekterkennung sowohl auf den Montage- als auch auf den Demontageprozess der Dau- men-Orthesen angepasst (Abb.12.4). Dabei flossen auch die Ergebnisse der Entwicklung von Verwertungsstrategien im Rahmen des Serious Games und die Erkenntnisse aus zusätzlichen Analysen zum Informationsbedarf aus dem ursprünglichen Anwendungsfall bei BRAL mit ein. Das Ergebnis ist eine Anwendungssoftware, die alle operativen Schritte in einem hybriden Ansatz – eine Kombination aus bildbasierter Datenerfassung und Rückmeldung zu spezifischer Einschätzung durch den Menschen - begleitet.

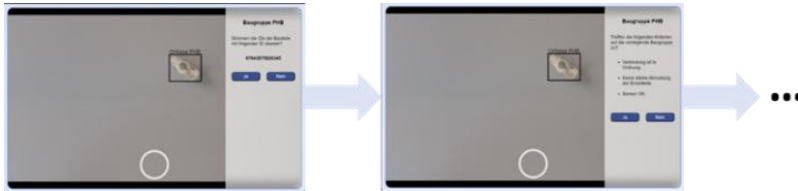


Abb.12.5 UI der hybriden Datenerfassung für Demontage und Verwertungsentscheidung

Im Rahmen der Montage von neuen Produkten wird die passende Auftrags-ID ausgewählt und Informationen über die notwendigen Teile bereitgestellt. Im nächsten Schritt werden diese Teile in das zuvor definierte Aufnahme- und Platzierungsfeld platziert. Werden die Teile von der Software als korrekt identifiziert, folgt eine schrittweise Anleitung zur Montage mit abschließender bildbasierter Qualitätskontrolle. Analog zur Montage verläuft der digital assistierte Prozess der Demontage anschließend rückwärts. Die besondere Herausforderung liegt dabei gleich zu Beginn in der Differenzierung baugleicher Teile, die sich lediglich in ihrer Farbe oder Textur unterscheiden. Wird eine vollständige Orthese passend platziert, wird diese bzw. deren Zusammensetzung eindeutig identifiziert. Es folgen erste Fragen zum allgemeinen Zustand, um die Eignung des Produkts für bestimmte R-Strategien, wie Re-use und Re-pair, zu bestimmen (Abb.12.5). Werden diese verneint, erfolgt eine Anleitung zur Demontage und weitere Fragen, die sich auf die einzelnen Bauteile beziehen. Je nach Antwortmuster erfolgt die Zuordnung des Bauteils zu einer spezifischen R-Strategie.

Diese Entwicklung stellt einen bedeutenden Fortschritt dar, da sie anschaulich demonstriert, welche Daten am EoL benötigt werden und wie diese erfasst werden können. Die integrierte Prozessbegleitung stellt sicher, dass die definierten Verwertungsstrategien korrekt ausgewählt und umgesetzt werden, ohne dabei eine übergenaue Analyse zu fordern. Dieses Ergebnis trägt zur Weiterentwicklung von Technologien und Methoden im Bereich der Kreislaufwirtschaft bei und hat das Potenzial, besonders die Effizienz der Prozesse am EoL mit angemessenem Technologieeinsatz zu verbessern.

12.4.4 Demonstrator Mercedes-Benz

Die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten der technologischen Entwicklung wurden zusätzlich im Rahmen des Mercedes-Benz Demonstrators veranschaulicht. Während es bei den vorherigen Anwendungsfällen stets um Prozesse nach der Nutzungsphase ging, wurde hier die Technologie der bildbasierten Objekterkennung dazu verwendet, um die Datenerfassung während der Montage zu verbessern. Dabei sollte die Komplexität der Montageaufgaben reduziert und somit die Anforderungen an die benötigte Qualifikation der Werker reduziert werden.



Abb.12.6 Montagefläche mit QR-Code-Identifikation und AR-Feedback

Die dafür notwendige eindeutige Zuordnung von Bauteilen erfolgt hier im Gegensatz zu den anderen Anwendungsfällen Mittels QR-Code. Während des Montageprozesses werden dafür die erfassten Bilddaten mithilfe der entwickelten Software automatisch ausgewertet und mit den Vorgaben aus der Montageanleitung verglichen. Bei festgestellten Abweichungen erhält der Werker ein visuelles Feedback über die Position, den Typ des fehlenden Bauteils und die fehlende Verschraubung über Augmented Reality (Abb.12.6). Die Besonderheit besteht dabei in der Integration dieser Identifikationsfähigkeit in das Message-Broker-System (in TP B3 entwickelte Plattformlösung) und dem visuellen Feedback an den Werker. Neben der kontinuierlichen Kontrolle und direkten Fehlererkennung ermöglicht diese Anwendungsvariante regelmäßige Statusbewertungen und eine automatisierte Erfassung und Bewertung möglicher Schwachstellen (Abb.12.7).



Abb.12.7 Kontinuierliche Erfassung zur Bewertung des Montagefortschritts

12.5 Zusammenfassung

Kernziel des Teilprojektes war die Entwicklung und Optimierung von wirtschaftlichen Prozessen in der Reststoffbearbeitung. Durch den Einsatz geeigneter Instrumente und Technologien konnte eine Lücke im Informationsfluss identifiziert und geschlossen werden. Dies verbesserte die Effizienz und Qualität der gesamten Wertschöpfungskette und schuf eine transparente Sicht auf die Produkte nach ihrer Nutzung sowie auf die

verfügbaren Verwertungsmöglichkeiten. Das Ergebnis der Arbeiten ist eine Kombination aus Methode und Technologie, die genutzte Produkte mittels bildbasierter Objekterkennung identifiziert und mithilfe eines Verwertungsplans dem bestmöglichen Verfahren im Rahmen der Kreislaufführung zuordnet.

Um die Funktionsweise dieser Lösung zu veranschaulichen, wurden ein Anwendungsfall, zwei Demonstratoren und ein Serious Game entwickelt. Die Ergebnisse aus diesen unterschiedlichen Implementierungen liefern wichtige Erkenntnisse für die Weiterentwicklung von zirkulären Prozessen sowie dem dabei entstehenden Informationsbedarf. Ein bedeutendes Teilergebnis des Projekts war daher die technologische Konzeptionierung. Hierbei wurden verschiedene Szenarien entwickelt, um aktuelle Hürden und Bedarfe in der Reststoffbearbeitung realitätsnah abzubilden. Durch den hybriden Ansatz bei der Softwaregestaltung wird ein maßvoller und effizienter Einsatz von Digitalisierung erreicht. In Kombination mit der gerichteten Interaktion mit dem Menschen wurde so anschaulich gezeigt, wie die Datenqualität für weitere Auswertungen effektiv verbessert werden kann, ohne auf Flexibilität verzichten zu müssen.

Die Projektergebnisse zeigen die Bedeutung der Prinzipien der Biologischen Transformation, wie bionische Informationsverarbeitung und -organisation, Selbstanpassung, -lernen und -optimierung, für das Ende der Nutzung und die Reststoffbearbeitung auf. Durch den Einsatz von digitalen Lösungen und Technologien konnten effizientere Prozesse ermöglicht und der Informationsfluss entlang der Wertschöpfungskette vervollständigt werden. Das Projekt zeigt, dass die Biologische Transformation nicht nur auf einzelne Effekte und Technologien abzielt, sondern die Grundlage für neue Prozesse bietet.

12.6 Literatur

- [1] Potting, José, et al.: Circular Economy. : PBL Publishers, 2017
- [2] Mukhopadhyay, B.; Mukhopadhyay, Boidurjo: What is circular economy? The Sentinel Editorial 2021
- [3] Stahel, Walter: The circular economy. London, New York: Routledge Taylor & Francis, 2019
- [4] Kirchherr, Julian, et al.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. Resources, Conservation and Recycling 127 (2017), S. 221–232
- [5] Boothroyd, G.; Alting, L.: Design for Assembly and Disassembly. CIRP Annals 41 (1992), Nr. 2, S. 625–636
- [6] Johnson, M. R., Wang, M. H.: Planning product disassembly for material recovery opportunities. International Journal of Production Research 33 (1995), Nr. 11, S. 3119–3142
- [7] Lalic, Bojan, et al. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing. : Springer International Publishing : Springer International Publishing, 2020 (IFIP Advances in Information and Communication Technology)
- [8] Sodhi, Manbir; Reimer, Bryan: Models for recycling electronics end-of-life products. OR Spektrum 23 (2001), Nr. 1, S. 97–115
- [9] Hansen, E., et al.: Circular Business Models. München/London, 2021
- [10] Acerbi, Federica; Taisch, Marco: Information Flows Supporting Circular Economy Adoption in the Manufacturing Sector. In: Lalic, Bojan, et al. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Towards Smart and Digital Manufacturing. : Springer International Publishing, 2020
- [11] Zeiß, Roman: Information Flows in Circular Economy. European Conference on Information Systems (ECIS2019) 2019

- [12] Redmon, Joseph, et al.: You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2016, S. 779–788
- [13] Girshick, Ross: Fast R-CNN. IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV) 2015, S. 1440–1448
- [14] Zhang, Hao, et al.: DINO: DETR with Improved DeNoising Anchor Boxes for End-to-End Object Detection (2022)
- [15] Dieckhoff, Patrick, et al.: Biologische Transformation und Bioökonomie. 2018
- [16] MARZI, Thomas, et al. (Hrsg.): Biologische Transformation. Oberhausen: Verlag Karl Maria Laufen : Verlag Karl Maria Laufen, 2021
- [17] KERGL, R.: Kreislaufwirtschaft. URL <https://www.green-and-fair.de/umwelt-und-klimaschutz/kreislaufwirtschaft/> – Überprüfungsdatum 2025-01-21
- [18] Berkhahn, Magda, et al.: Taxonomy for Biological Transformation Principles in the Manufacturing Industry. In: Kohl, Holger, et al. (Hrsg.): Manufacturing driving circular economy. : Springer, 2023
- [19] Christiansen, Lasse, et al.: On the Quick and Dirty Learning Factory Within the Industry: A Dual Case Study. Proceedings of the 13th Conference on Learning Factories (CLF 2023) 2013, S. 13–20

13

Digitale Zwillinge als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse

Anne Seegrün¹, Joanna Steiner¹, Theresa Riedelsheimer¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Die bloße Anwendung biologischer Prinzipien führt nicht zwangsläufig zu nachhaltigeren Produkten und Prozessen. Um festzustellen, ob sie tatsächlich umweltverträglicher sind, also zum Beispiel weniger Treibhausgase emittieren, bedarf es einer Bewertung der Nachhaltigkeit. Im Projekt BioFusion 4.0 kommt hier die Methode der Ökobilanzierung (deutsch für Life Cycle Assessment, LCA) ins Spiel, die Umwelteinflüsse von Produkten über deren gesamten Lebensweg bewertet. Von der Wiege bis zur Bahre müssen hierfür Daten erfasst und ausgewertet werden, um verschiedene Umweltauswirkungen neutral und objektiv zu bewerten. Technologisch wird dies im Projekt durch Digitale Zwillinge umgesetzt. Als virtuelle Abbilder physischer Produkte und Prozesse ermöglichen sie durch die intelligente Verknüpfung von Plan- und Realdaten eine Echtzeit-Ökobilanz. Das folgende Kapitel beleuchtet das ökologische Potenzial Digitaler Zwillinge im Kontext der biologischen Transformation. Die Projektergebnisse verdeutlichen, wie Digitale Zwillinge Transparenz über die Umweltauswirkung biologisch transformierter Produkte und Prozesse schaffen und so die Grundlage für umweltbewusstere Entscheidungen im Produktdesign und in der Produktion bilden.

13.1

Einleitung

Die Industrie sieht sich heute einer Vielzahl neuer Herausforderungen gegenüber: Demografischer Wandel, Individualisierung, Digitalisierung, Ressourcenknappheit und steigende Anforderungen an die Nachhaltigkeit erfordern ein Umdenken. In Reaktion auf diese Herausforderungen setzen Unternehmen zunehmend auf Industrie 4.0 und digitale Transformation. Dabei steht eine digital gestützte Vernetzungs- und Effizienzstrategie im Vordergrund, die auf Produktivitätssteigerungen, Flexibilitätsverbesserungen und Kostensenkungen abzielt, jedoch keine explizite Nachhaltigkeitsagenda verfolgt [1]. Hier setzt die biologische Transformation an, die durch die Anwendung von Prinzipien der Natur darauf abzielt, eine nachhaltige Wertschöpfung zu erreichen. Dabei wird die Verbindung technischer, digitaler und biologischer Systeme in der Fertigungsumgebung vorangetrieben. Durch die Übertragung natürlicher Prinzipien auf Produktökosysteme eröffnen sich große Chancen für eine ressourcenschonende und nachhaltige Fertigung. In diesem Kontext erweist sich das Konzept des Digitalen Zwillings als besonders vielversprechend. Digitale Zwillinge schaffen die Grundlage für ein vernetztes, selbstregulierendes Produktökosystem, dessen Stabilität und Resilienz in Bezug auf ökologische Parameter überwacht und optimiert werden kann [2]. Dieses Kapitel beleuchtet, wie Digitale Zwillinge als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse fungieren und damit einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Fertigungsindustrie leisten.

13.2

Stand der Technik

Produkte beeinflussen die Umwelt über ihren gesamten Lebenszyklus. Schon vor der Produktion werden dabei wichtige Weichen für deren Nachhaltigkeit gestellt: Die Materialwahl bestimmt so beispielsweise über Transportwege, Entsorgung und

Digitale Zwillinge als Enabler für
biologisch transformierte
Produkte und Prozesse

Lebensdauer des Produkts; Geometrie und Fügearten beeinflussen wiederum die Reparierbarkeit sowie den Aufwand für die Demontage und Wiederverwendung [3]. Um die Umweltauswirkungen eines Produktes objektiv bewerten zu können, müssen die jeweiligen Stoff- und Energieströme über den gesamten Produktlebenszyklus erfasst und analysiert werden. Die Methode der Ökobilanzierung liefert in diesem Kontext eine standardisierte und genormte Vorgehensweise zur Bewertung der Produktnachhaltigkeit anhand verschiedener Wirkungskategorien gemäß ISO-Norm 14040 und 14044 [4,5]. Für jedes individuelle Produkt entsteht dabei ein umfangreicher Datenfundus, der sinnvoll abgespeichert und ausgewertet werden muss. Technologisch ist dies insbesondere durch Digitale Zwillinge umsetzbar. Als digitale Repräsentation eines Produkts, Assets oder Services [6] ermöglichen sie durch die intelligente Verknüpfung von Plan- und Realdaten eine Echtzeit-Ökobilanz. Digitale Zwillinge mit integrierter LCA unterstützen nachhaltigere Konstruktionsentscheidungen für künftige Produktgenerationen, die Optimierung von Produktionsprozessen, das Monitoring und die Wartung im After-Sales-Bereich sowie die Bereitstellung produkt- und instanzspezifischer Informationen zur Demontage, Wiederverwendung, Remanufacturing und Recycling am Ende des Lebenszyklus [3,7].

13.3

Digitale Zwillinge im Kontext der biologischen Transformation

Eine Literaturanalyse von Seegrün et al. [2], die im Rahmen des Teilprojektes „Engineering biologisch transformierter Produkte und Prozesse“ durchgeführt wurde, kommt zu dem Schluss, dass bisher nur vereinzelt Forschung zu Digitalen Zwillingen im Kontext der biologischen Transformation existiert. Aktuelle Publikationen heben zwar das erhebliche Potential von Digitalen Zwillingen für eine biologisch transformierte Wertschöpfung hervor – etwa durch eine gesteigerte Prozesstransparenz, verbesserte Prozessplanung oder optimierte Produktionssysteme – allerdings fehlte es bislang an einer grundlegenden Einordnung des Konzepts eines Digitalen Zwillings in den Kontext der biologischen Transformation. In einem ersten Impuls zur Schließung dieser Forschungslücke wurde durch das Team der Forscherinnen und Forscher und beteiligten Technologieunternehmen ein Konzept für einen Digitalen Zwilling mit integrierter Ökobilanz entwickelt (vgl. hierzu Abb. 13.1).

Hierbei begleitet der Digitale Zwilling sein physisches Gegenstück während des gesamten Produktlebenszyklus. Innerhalb dieser digitalen Repräsentation werden ausgewählte Merkmale, Zustände und Verhaltensweisen der Produktinstanz oder des Systems abgebildet und Modelle, Informationen und Daten über Lebenszyklusphasen hinweg verknüpft. Der Digitale Zwilling verwendet angereicherte Datensätze zu verschiedenen Produktzuständen, wie z. B. 3D-Modelle und Produktstrukturen aus CAD- oder PLM-Systemen ("As designed"), Fertigungsstücklisten der Produktinstanz aus ERP- oder MES-Systemen ("As built"), Informationen zur Wartungshistorie ("As maintained") oder (Echtzeit-)Daten aus der Nutzungsphase ("As used"). [2]

Während eines Produktlebens werden hierzu mehrmals die zentralen Schritte der Datensammlung und Bewertung einer Ökobilanz durchlaufen. Bereits in der Entwicklungsphase kann dabei auf Basis von Annahmen und Plandaten eine erste Ökobilanzierung (As-planned LCA) für Produkt- und Prozessalternativen durchgeführt und im Digitalen Master hinterlegt werden. Sobald die Produktion beginnt, erzeugt das Produkt einen individuellen CO₂-Fußabdruck, der anhand von Energie- und Ressourcenverbrauchsdaten im Digitalen Schatten (As-is LCA) erfasst wird. Durch die intelligente Verknüpfung des Digitalen Masters und Schattens können Abweichungen vom Plan erkannt und Optimierungspotenziale identifiziert werden. [2,3]

Digitale Zwillinge als Enabler für
biologisch transformierte
Produkte und Prozesse

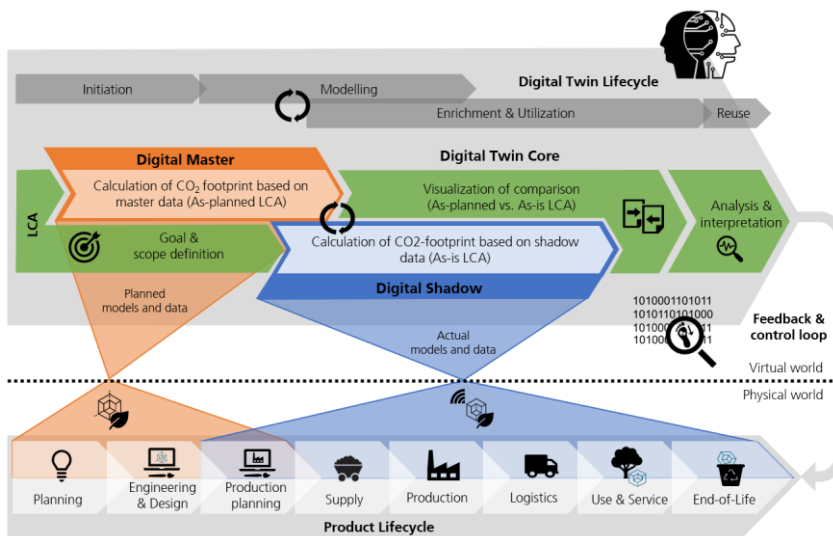


Abb.13.1 Konzept eines Digitalen Zwillings mit integrierter Ökobilanz (vereinfachte Darstellung, in Anlehnung an [2])

Das Konzept des Digitalen Zwillings mit integrierter LCA bietet einen vielversprechenden Ansatz zur Schaffung eines vernetzten und selbstregulierenden Produktökosystems, dessen Stabilität und Widerstandsfähigkeit im Hinblick auf ökologische Parameter überwacht und gesteuert werden kann. Digitale Zwillinge setzen bioinspirierte Wirkungsweisen in technischen Systemen um, etwa durch Selbstabbildung und Selbstkontrolle (sogenanntes „Self-X“), und verknüpfen natürliche und technische Systeme mittels Informationstechnologie (Biointeraktion) (vgl. hierzu Kapitel 5). Ein Digitaler Zwilling mit integrierter LCA trägt demnach bereits einige biologische Prinzipien in sich, fungiert darüber hinaus aber vor allem als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse, in dem er diese mit von der Natur inspirierten Eigenschaften ausstattet. [2]

Im Projekt wird das Konzept des Digitalen Zwillings anhand verschiedener Anwendungsfälle demonstriert: Bei der Fertigung von Fahrzeugkomponenten, bei der selbstorganisierten Prozessbearbeitung in der Produktion von Batteriesteuerungsmodulen sowie in der Herstellung einer Orthese aus biogenem Material mittels 3D-Druckverfahren (siehe Kapitel 17). Im Folgenden werden die relevanten Projektergebnisse am Beispiel eines Digitalen Zwillings für das Monitoring von Umweltauswirkungen entlang des Lebenszyklus einer additiv gefertigten Fingerorthese vorgestellt.

13.4 Projektergebnisse

Zur Umsetzung des Digitalen Zwillings-Konzepts im Anwendungsfall der Fingerorthese wurden zunächst relevante Personas identifiziert, um die Bedürfnisse, Ziele und Herausforderungen der entsprechenden Endnutzerinnen und -nutzer entlang des Produktlebens abzubilden (vgl. hierzu Kapitel 10). Im Rahmen des Teilprojektes wurden dabei folgende Personas adressiert: Nachhaltigkeitsmanagerin (Sustainability Manager SM), Produktionsplaner (Production Planner PP) und Produktentwicklerin (Product Developer PD) (siehe Abb.13.2). Die Kernanforderungen dieser Personas wurden im Rahmen von Interviews und Workshops mit den beteiligten Projektpartnern erarbeitet und in User Stories zusammengefasst. Die abgeleiteten User Stories beziehen sich dabei auf die folgenden Kernaspekte:

Digitale Zwillinge als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse

- Berechnung der Umweltauswirkung verschiedener Produkt- und Prozessvarianten (I),
- Analyse der Umweltauswirkung auf Komponentenebene (II),
- Warnung bei Überschreitung von Nachhaltigkeitsgrenzen (III),
- Berechnung der Umweltauswirkungen der Produktion (IV),
- Soll-Ist-Vergleich der umgesetzten LCA-Anforderungen in der Produktion (V),
- Rückführung von Nachhaltigkeitsdaten in die Produktentwicklung (VI),
- Soll-Ist-Vergleich der umgesetzten LCA-Anforderungen in der Nutzung (VII).

Im Rahmen eines nutzerzentrierten Vorgehens bildeten die abgeleiteten Personas und User Stories die Grundlage für die Definition der Anforderungen an die digitale Zwillinglösung. Entsprechend des Anwendungsfalls wurden die Systemgrenzen bestimmt, die zentralen Funktionen und Services in einem Use Case-Diagramm dargestellt und die Fähigkeiten der Lösung spezifiziert. Zur weiteren Konkretisierung wurden die Abläufe und Systemkomponenten beschrieben und strukturiert. Diese methodische Herangehensweise ermöglichte die Auswahl eines geeigneten Lösungsprinzips und die Konzeption der IT-Systemarchitektur des Digitalen Zwillings. Ein initiales Dashboardkonzept wurde unter der Berücksichtigung von Nutzerfeedback im Projektverlauf kontinuierlich überarbeitet. Diese iterative Anpassung förderte die Optimierung der Benutzerfreundlichkeit und Funktionalität, um den erhobenen Personaanforderungen gerecht zu werden. [8]

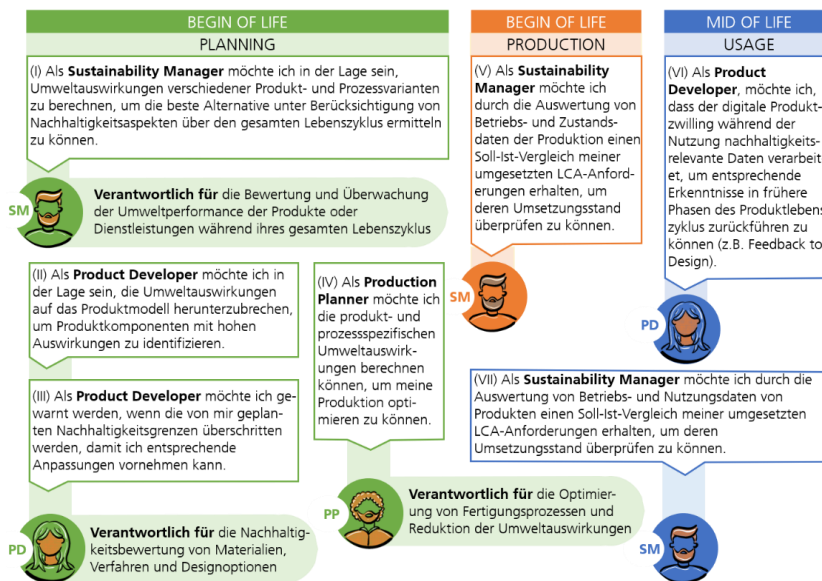


Abb.13.2 Relevante Personas und User Stories für einen Digitalen Zwilling mit integrierter Ökobilanz (in Anlehnung an [9])

Abb.13.3 zeigt das Dashboard des Digitalen Zwillings mit integrierter LCA am Beispiel der Produktion einer Daumenorthese für Montageprozesse, das für den integrierten Technologiedemonstrator im Virtual Engineering Lab des Fraunhofer IPK entwickelt wurde. Die Benutzeroberfläche des Dashboards ist in verschiedene Bereiche unterteilt, die die zentralen Lebenszyklusphasen der Orthese abbilden: *Planning*, *Production*, *Usage* und *End-of-Life*.

Im *Planning*-Bereich werden die Struktur und Konfiguration der Orthese festgelegt. Die Daumenorthese besteht aus einem Front- und einem Back-Teil und kann optional um zusätzliche Komponenten wie RFID-Tags und Klettbänder erweitert werden. Für die

Digitale Zwillinge als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse

Fertigung stehen verschiedene Materialien wie PHB, PLA und PC-ABS zur Auswahl. Das Dashboard ermöglicht es den Benutzern, die Beschaffung der Materialien aus verschiedenen Standorten, beispielsweise Shenzhen, Berlin oder Lyon, zu simulieren. Dabei werden die Auswirkungen dieser Beschaffungsentscheidungen auf den CO₂-Fußabdruck der ausgewählten Produktvariante transparent gemacht. Der CO₂-Fußabdruck wird basierend auf Planungswerten und Annahmen berechnet und variiert je nach spezifischer Produktkonfiguration. Das zugrunde liegende LCA-Modell berücksichtigt neben dem CO₂-Fußabdruck auch Indikatoren weiterer Wirkungskategorien (z.B. Versauerungs-, Ozonabbaupotential), die im Dashboard allerdings nicht dargestellt werden. Der Fokus auf den CO₂-Fußabdruck wurde aufgrund seiner hohen Bekanntheit und Akzeptanz gewählt, um eine benutzerfreundliche Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen, ohne dabei den umfassenderen Kontext der Umweltauswirkungen zu vernachlässigen.

Im *Production*-Bereich wird der Digitale Zwilling mit realen Produktionsdaten verknüpft, um eine detaillierte Überwachung und Analyse des Produktionsprozesses zu ermöglichen. Daten wie der Energieverbrauch sowie die Temperaturen der 3D-Drucker werden erfasst und in Echtzeit dargestellt. Über verschiedene Widgets werden der Druckstatus, Druckfortschritt, Extrudertemperaturen sowie der aktuelle Energieverbrauch angezeigt. Zudem wird der geplante (As planned) mit dem tatsächlichen (As built) CO₂-Fußabdruck verglichen, was den Nutzerinnen und Nutzern ermöglicht, Abweichungen zwischen Plan- und Ist-Zustand während der Produktion der Orthese nachzuvollziehen.

In den *Usage*- und *End-of-Life*-Bereichen werden Informationen zur Nutzungsdauer der Orthese bereitgestellt. Hierzu zählen unter anderem das Produktionsdatum, die bisherige Nutzungszeit, die verbleibende Lebenszeit sowie der CO₂-Fußabdruck (As planned und As built). Im unteren Bereich können Entscheidungen zum End-of-Life der einzelnen Komponenten einer bereits genutzten Orthese getroffen und deren Auswirkungen auf den CO₂-Fußabdruck simuliert werden.

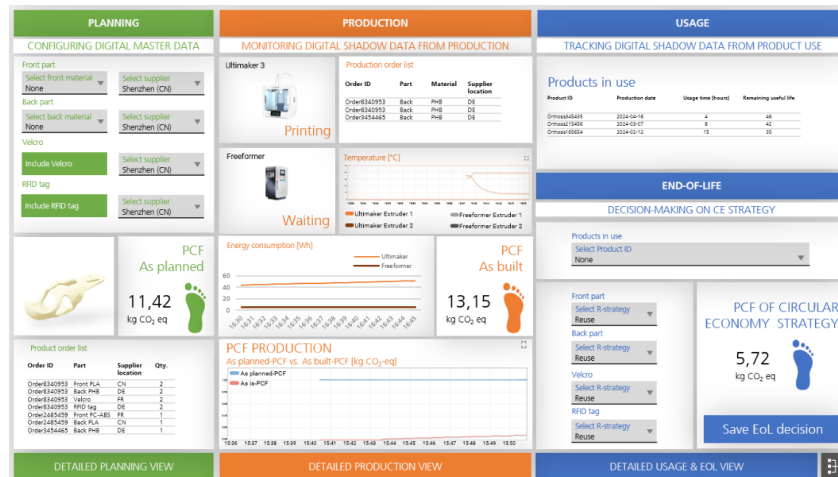


Abb.13.3 Dashboard des Digitalen Zwillings mit integrierter Ökobilanz (Nachbildung, in Anlehnung an [8])

13.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend ermöglicht der Digitale Zwilling die Transparenz über nachhaltigkeitsrelevante Informationen entlang des gesamten Lebenszyklus von biologisch

Digitale Zwillinge als Enabler für biologisch transformierte Produkte und Prozesse

transformierten Produkten und Prozessen – von der Planning-Phase über die Production bis hin zur Usage- und End-of-Life-Phase. Hierdurch wird deutlich, wie Entscheidungen in den verschiedenen Phasen des Produktlebens die Nachhaltigkeit beeinflussen. Im Verlauf des Lebenszyklus werden zunehmend detailliertere Daten zum CO₂-Fußabdruck verfügbar, wobei eine präzise Bestimmung erst am Ende eines Produktlebens möglich ist. Die gewonnenen Erkenntnisse können im Rahmen eines Feedback-to-Design-Prozesses in die Produktentwicklung rückgeführt werden, da insbesondere die Planning-Phase das größte Potenzial zur Optimierung der Nachhaltigkeit bietet. Eine erhöhte Transparenz trägt letztlich zu fundierteren und nachhaltigeren Entscheidungsprozessen über den gesamten Lebenszyklus eines biologisch transformierten Produktes bei. Digitale Zwillinge sind hierbei insbesondere zur Umsetzung der neuen regulatorischen Anforderungen für Nachhaltigkeitsbewertungen 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 Umweltauswirkungen über mehrere Produktlebens hinweg wird die Forschung zukünftig beschäftigen.

Digitale Zwillinge als Enabler für
biologisch transformierte
Produkte und Prozesse

13.6 Literatur

- [1] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.: Whitepaper Biologische Transformation und Bioökonomie. URL: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/biologische-transformation.html> [Stand: 23.01.2025]
- [2] Seegrün, Anne; Mügge, Janine; Riedelsheimer, Theresa; Lindow, Kai: Digital Twins for Sustainability in the Context of Biological Transformation. In: Kohl, Holger; Dietrich, Franz; Seliger, Günther (Hrsg.): *Manufacturing Driving Circular Economy*. Cham: Springer Nature, 2023, S. 576–584. DOI: 10.1007/978-3-031-28839-5_65
- [3] Riedelsheimer, Theresa: Je früher, desto besser. FUTUR 2022, Nr. 1, S. 40–45. URL: <https://www.ipk.fraunhofer.de/de/medien/futur/futur-2022-1/je-frueher-desto-besser.html> [Stand: 23.01.2025]
- [4] DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020
- [5] DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020
- [6] Stark, Rainer; Damerau, Thomas: Digital Twin. In: Chatti, Sami; Tolio, Tullio (Hrsg.): *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 1–8. DOI: 10.1007/978-3-642-35950-7_16870-1
- [7] Seegrün, Anne; Kruschke, Thomas; Mügge, Janine; Hardinghaus, Louis; Knauf, Tobias; Riedelsheimer, Theresa; Lindow, Kai: Sustainable product lifecycle management with Digital Twins: A systematic literature review. *Procedia CIRP* 119 (2023), S. 776–781. DOI: 10.1016/j.procir.2023.03.124
- [8] Wehking, Sebastian; Seegrün, Anne; Riedelsheimer, Theresa; Lindow, Kai: Sustainable Product Lifecycle Management – Implementation of a Digital Twin of a Biologically Transformed Product-Ecosystem. *Procedia CIRP* 125 (2024), S. 30–35. DOI: 10.1016/j.procir.2024.08.006
- [9] Riedelsheimer, Theresa; Seegrün, Anne; Lindow, Kai: Digital Twins for Real-Time Life Cycle Assessment of Products. In: Fukushige, Shinichi (Hrsg.): *EcoDesign for Circular Value Creation: Volume I*. Singapur: Springer Nature, 2025, S. 447–464. DOI: 10.1007/978-981-97-9068-5

Annika Lange¹, Prof. Dr.-Ing. Thomas Knothe¹, Dirk Busse²

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

² budatec GmbH

Der Betrieb von ganzheitlichen Produktionssystemen (GPS) bietet nicht nur großen Unternehmen Vorteile, sondern auch kleine und mittlere Unternehmen (KMU) profitieren davon. Dennoch stehen KMU vor Herausforderungen bei der Einführung und dem Betrieb von GPS. Denn sie verfügen häufig nicht über die entsprechenden Ressourcen. Daher besteht der Bedarf, GPS ressourcenschonend zu gestalten, sodass sie für KMU praktikabler werden und die Managementebene entlasten. Hier bieten biologische Prinzipien vielversprechende Ansätze. In diesem Beitrag werden zwei Ansätze vorgestellt, die biologische Prinzipien nutzen.

14.1 Einleitung

Die methodische Entwicklung und Anwendung von Produktionssystemen hat eine lange Tradition und wurde kontinuierlich weiterentwickelt. Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) verfolgen das Ziel, Ressourcen effizient einzusetzen, um eine maximale Produktivität zu erreichen und die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern [1]. Studien zeigen, dass 89 % der befragten Unternehmen durch die Implementierung eines GPS ihre Termintreue verbessern sowie 67 % eine Reduzierung der Durchlaufzeit erzielen konnten. GPS stellen ein systematisches Rahmenwerk dar, das klar definierte Prinzipien enthält, die durch Methoden und Werkzeuge die Gestaltung und den Betrieb der Produktion effektiv unterstützen [2]. Die Einführung eines GPS kann aus verschiedenen Gründen erfolgen. Einige Unternehmen fordern von ihren Lieferanten die Implementierung eines GPS, um die Vorteile entlang der gesamten Lieferkette zu nutzen [3, 4]. Ein weiterer Grund für die Einführung besteht in dynamischen Marktbedingungen und häufigen Veränderungen, die auch jene Unternehmen zur Implementierung bewegen, die den Aufwand bisher gescheut haben [5].

Trotz der potenziellen Vorteile stehen insbesondere KMU bei der Einführung und dem Betrieb eines GPS vor erheblichen Herausforderungen. Begrenzte finanzielle und personelle Ressourcen sowie mangelndes Methodenwissen stellen dabei zentrale Hindernisse dar [6, 7]. Des Weiteren ist die Managementebene von KMU häufig in zahlreiche operative und strategische Prozesse involviert, wodurch sie ein Bottleneck im Entscheidungsprozess darstellen [5]. In der Praxis werden Disruptionen häufig zu spät erkannt. Nach deren Identifikation stehen erforderliche Daten häufig nicht bereit, sodass diese zunächst zusammengetragen werden müssen. Erst danach können entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Allerdings verändern sich Rahmenbedingungen rasch, sind die Daten erst einmal zusammen getragen, so gelten sie fast wieder als veraltet [8]. Auch in diesem Fall ist die Managementebene von KMU häufig als Entscheider involviert. Daraus ergibt sich als Anforderung, dass die Implementierung und der Betrieb von GPS ressourcenschonend sein sollen.

Biologische Systeme nutzen Ressourcen häufig besonders effizient; ein Beispiel hierfür ist die Selbstheilung. Diese setzt ein, sobald eine Abweichung zum Gleichgewichtszustand identifiziert wird. So reagiert beispielsweise das Immunsystem sofort bei einer Virusinfektion, um den Gleichgewichtszustand wiederherzustellen. Durch die Eigenreaktion des Immunsystems sind keine beziehungsweise weniger Ressourcen von extern erforderlich. Somit trägt das Prinzip zu einer Ressourcenschonung bei. Dies legt die

Vermutung nahe, dass die Inspiration von biologischen Prinzipien einen vielversprechenden Ansatz zur Unterstützung von GPS in KMUs sein könnte. Die Inspiration von biologischen Mechanismen für technische Systeme ist ein zentraler Bestandteil der biologischen Transformation, die sich mit der Übertragung biologischer Mechanismen und Prozesse auf die Technik beschäftigt [9–11].

14.2 Stand der Technik

Eine systematische Literaturrecherche zeigt, dass bereits Forschungsaktivitäten im Zusammenhang von Produktionssystemen und Bionik stattgefunden haben [12]. Die identifizierten Ansätze beziehen sich jedoch auf sehr spezifische Aspekte. Cyber-physische Systeme (CPS) können die Flexibilität der Produktion fördern. Bergs et al. [13] beschreiben dazu einen bioinspirierten Ansatz, der das Prinzip der Selbstanpassung beinhaltet. In einem weiteren Ansatz wird ein Phasenmodell vorgestellt, das die verschiedenen Stufen hin zu einer autonomen Produktion beschreibt. Auch in diesem Ansatz spielen Self-X Prinzipien eine Schlüsselrolle [14]. Sie beschreiben selbstorganisierende Prozesse, bei denen Systeme eigenständig Eigenschaften wie Selbstorganisation und Selbstregulation entwickeln, um ihre Funktionalität und Stabilität zu gewährleisten. In mehreren Beiträgen werden Planungsaspekte fokussiert, wobei genetische Algorithmen und Schwarmalgorithmen zur Planung eingesetzt werden [15–17]. Lediglich Demeester et al. betrachten methodische Aspekte, indem sie bestehende Konzepte wie Poka Yoke oder Modularisierung aufgreifen und Parallelen zur Biologie ziehen [18].

14.3 Potenziale aus der Natur für vernetzte ganzheitliche Produktionssysteme

In diesem Abschnitt werden die biologischen Prinzipien eingeführt, die in der Methodik für bionische GPS verwendet werden. Dazu werden deren Eigenschaften beschrieben.

14.3.1 Selbstheilung

Selbstheilung tritt in der Natur in verschiedenen Systemen auf. Unter ihr wird der Mechanismus verstanden, dass ein System nicht nur Störungen abwehren, sondern auch zum ursprünglichen Zustand zurückkehren kann [19]. Um das biologische Prinzip der Selbstheilung auf die Technik zu transformieren, werden zunächst die Prinzip-Eigenschaften beschrieben. Im ersten Schritt werden Abweichungen zum Normalzustand detektiert. Werden Anomalien im System identifiziert, folgt der Schritt der Heilung. Hierzu greifen Mechanismen eigenständig in das System ein, um es zum Normalzustand zurückzuführen. Wie in der Einleitung erwähnt, trägt Selbstheilung zur Ressourcenschonung bei, indem durch eigene Kraft der Gleichgewichtszustand wieder erreicht wird. So kann auf zusätzliche, externe Ressourcen verzichtet werden.

14.3.2 Bioindikatoren

Bioindikatoren sind Organismen, die aufgrund spezifischer Umwelteinflüsse mit einer Veränderung ihrer Lebensfunktion reagieren. Sie können in verschiedene Cluster unterteilt werden, eine Gruppe der Bioindikatoren sind Zeigerindikatoren, ihr Auftreten deutet auf spezifische Umfeldfaktoren hin [20].

Daphnien werden der Gruppe der Zeigerindikatoren zugeordnet, durch sie können Rückschlüsse auf die Wasserqualität getroffen werden. Die Fortpflanzung erfolgt sowohl geschlechtlich als auch ungeschlechtlich; bei beiden Varianten sind Rückschlüsse auf die Wasserqualität möglich. Bei der ungeschlechtlichen Fortpflanzung ist anhand der Farbe erkennbar, ob es sich um Männchen oder Weibchen handelt. Bei einer guten Wasserqualität schlüpfen Weibchen, bei einer schlechten hingegen Männchen. Sie unterscheiden sich von den Weibchen durch eine dunklere Farbe. Bei der geschlechtlichen Fortpflanzung werden sogenannte Dauereier gelegt. Sie schlüpfen im Frühjahr bei guter Wasserqualität. Ist diese nicht ausreichend, verweilen sie in den Eiern, bis die entsprechende Qualität erreicht ist. Grundsätzlich sterben Daphnien im Herbst mit einer abnehmenden Wassertemperatur. Durch eine neue auftretende Generation im Frühjahr können Rückschlüsse auf die Wasserqualität getroffen werden. [21]

Daphnien können als ein systemintegriertes Frühwarnsystem für veränderte Umweltbedingungen dienen, denn durch ihr Auftreten oder Ausbleiben können direkte Rückschlüsse auf die Wasserqualität gezogen werden. Bei schlechter Wasserqualität wird ein frühzeitiges Entgegenwirken ermöglicht, wodurch schwerwiegende Folgen verhindert werden können. Auf diese Weise werden weniger Ressourcen benötigt, als wenn bereits weitreichende Auswirkungen eingetreten sind.

14.3.3 Gedächtnis

Das Gedächtnis kann Informationen aufnehmen, verarbeiten und gespeicherte Informationen abrufen. Dabei wird zwischen verschiedenen Gedächtnissen differenziert, die unterschiedliche Aufgaben haben. Diese sind: das sensorische Gedächtnis, das Kurz- und das Langzeitgedächtnis. [22] Das sensorische Gedächtnis nimmt Impulse aus der Umgebung wahr und wird dadurch auf Situationen aufmerksam. Die Informationen werden enkodiert und an das Kurzzeitgedächtnis (KZG) weitergeleitet. Dies stellt Informationen aktiv zur Verfügung. Werden spezifische Impulse mehrfach gesendet, so werden diese Informationen vom KZG ins Langzeitgedächtnis (LZG) transformiert. Aus dem LZG können Informationen abgerufen werden und zur Verarbeitung ins KZG transferiert werden. [22, 23]

Durch die Bereiche des Gedächtnisses werden Ressourcen aus verschiedenen Blickrichtungen geschont. Das sensorische Gedächtnis erfasst zahlreiche Informationen. Durch eine schnelle Filterung in relevante und irrelevante Informationen erfolgt eine Ressourcenschonung, indem nur wichtige Informationen weiterverarbeitet werden. Das KZG trägt ebenfalls zur Ressourcenschonung bei, indem Informationen zeitlich begrenzt gespeichert werden. Dies verhindert, dass das Gehirn mit Informationen überladen wird. Im LZG erfolgt wiederum eine Differenzierung in relevant und nicht relevant, sodass nur relevante Informationen langfristig gespeichert werden. Durch den Mechanismus des Vergessens können Informationen wieder aus dem LZG entfernt werden. Somit trägt das LZG ebenfalls zur Ressourcenschonung bei.

14.4 Bionisches ganzheitliches Produktionssystem

In diesem Abschnitt werden zwei Konzepte vorgestellt, bei denen biologische Prinzipien die GPS Prinzipien unterstützen.

14.4.1

Selbstheilung zur Verbesserung der Standardisierung

Inspiziert durch die Mechanismen der Selbstheilung wird ein Ansatz beschrieben, bei dem diese Mechanismen auf Produktionssysteme übertragen werden. Abb.14.1 zeigt schematisch den modellbasierten Selbstheilungsansatz für Prozesse.

Im ersten Schritt ist eine Virtualisierung der Fertigungsprozesse erforderlich, dazu wird die am Fraunhofer IPK entwickelte Shopfloor-IT eingesetzt. Basierend auf verknüpften Referenzmodulen erfolgt die Virtualisierung des Prozessmodells zur Beschreibung und Integration der einzelnen Fertigungsschritte. Die Referenzmodule sind auf den Regeln der integrierten Unternehmensmodellierung (IUM) erstellt. Sie unterstützt KMU im Prozessmanagement, da sie durch ihre Niederschwelligkeit einen einfachen Zugang bietet, lediglich vier Grundelemente (Auftrag, Produkt, Aktivität und Ressource) sind erforderlich. Dank der durchgängigen Methode sind flexible und durchgängige IT-Unterstützungen möglich. [5]

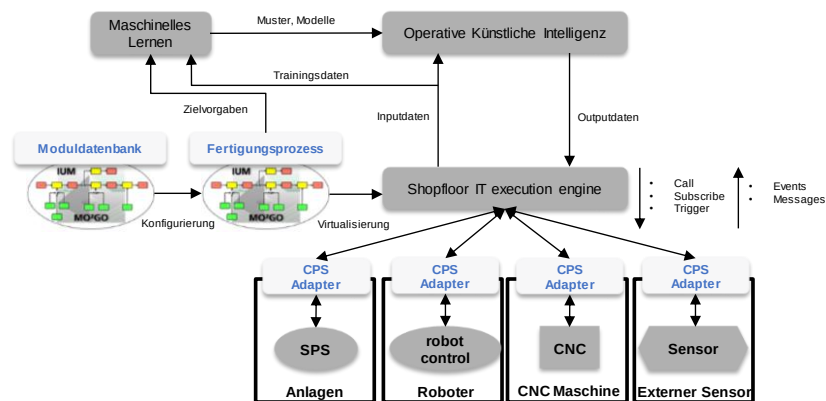


Abb.14.1 Modellbasierter Ansatz zur Selbstheilung von Prozessen [5]

Der Prozessassistent (PA) kann spezifisch für Modelle konfiguriert werden und dient u. a. als Überwachungsinstrument. Durch standardisierte Interaktionsfunktionen lassen sich Ein- und Ausgabeparameter des Moduls adressieren. Eine Anomaliedetektion unterstützt, um die Abweichungen zu identifizieren. Hierzu kann beispielsweise ein Datenabgleich oder Process Mining eingesetzt werden. Die Shopfloor-IT folgt dem „Plug&Produce“-Prinzip. Dazu ist der Maschinensteuerung ein CPS-Adapter vgeschaltet, der eine Interoperabilität zu den übergeordneten Systemen ermöglicht [24]. Um von der Maschinensteuerung unabhängig zu sein, können externe Sensoren hinzugeschaltet werden, um beispielsweise Fertigungs- und Prüfparametern zu erfassen. Die Erkenntnisse aus der Anomaliedetektion bilden die Basis für die Selbstkonfigurationsmechanismen. Dazu ermöglicht die Shopfloor-IT folgende Aspekte:

- Hinzufügen neuer Komponenten,
- Ändern der Vernetzungen zwischen bestehenden Komponenten,
- Schrittweise Automatisierung der Einstellungen von Maschinen und Anlagen für spezifische Fertigungsprozesse. [5]

Mit diesem Ansatz können Qualitätsveränderungen oder Komponentenausfälle nicht nur schnell detektiert, sondern auch direkt kompensiert werden. Ein manuelles Eingreifen ist erst erforderlich, wenn die Prozessheilung das Problem nicht lösen kann. Der Ansatz bietet neben der Prozessüberwachung die Möglichkeit, Daten zu erfassen und für spätere Analysen zur Verfügung zu stellen. [5]

Mit diesem Ansatz werden alle Voraussetzungen erfüllt, eine künstliche Intelligenz (KI) zu trainieren, die zukünftig in der Lage ist, Routineentscheidungen selbstständig zu treffen. Die KI wird dabei Natural Language Processing (NLP) nutzen, um Prozessmodelle zu interpretieren. So wird ebenfalls ermöglicht, dass die Prozessmodelle noch für die Mitarbeitenden lesbar sind. Gleichzeitig ermöglicht das Function Calling eine direkte Ansteuerung der Shopfloor-IT, sodass die KI nicht nur Entscheidungen trifft, sondern diese auch unmittelbar in Aktionen wie das Steuern von Maschinen oder das Auslesen von Sensordaten umsetzt.

14.4.2

Bioindikatoren zur Anomaliedetektion und Gedächtnis zur Unterstützung des Maßnahmenmanagements

Inspiziert von Bioindikatoren und dem Gedächtnis wird nachfolgend ein Ansatz beschrieben, der zur Anomaliedetektion dient und ein Maßnahmenmanagement unterstützt. Anders als bei der Anomaliedetektion in dem Selbstheilungsansatz geht es nicht darum, Prozessabweichungen zu detektieren, sondern Veränderungen im Unternehmensumfeld wahrzunehmen.

Auch in diesem Ansatz ist die Grundlage ein Unternehmensmodell. Dies basiert ebenfalls auf der IUM. Der PA wird so konfiguriert, dass er als Lagebild fungieren kann. Durch den Bezug zum Unternehmensmodell können im PA Informationen abgerufen und im Lagebild visualisiert werden. Darüber hinaus ist die Anbindung weiterer Systeme, wie beispielsweise einem Enterprise Resource Planning-Systeme, über geeignete Schnittstellen möglich [8]. So wird ermöglicht, dass aktuelle Daten der Produktion im Lagebild visualisiert werden. Des Weiteren werden die Ergebnisse aus einer unternehmensindividuellen Umfeldanalyse im Lagebild dargestellt.

Die Daten aus dem Unternehmensumfeld werden durch ein Web-Scraping bereitgestellt und ein unternehmensindividuelles KI-Modell bewertet die Relevanz der Nachrichten [25]. Durch einen weiteren Algorithmus wird erkannt, wenn Nachrichten zu einem Thema gehäuft auftreten. Diese Nachrichten können sich auf negative Ereignisse, wie politische Sanktionen oder Rohstoffengpässe beziehen, gleichzeitig sind auch Nachrichten zu Technologieentwicklungen relevant, damit das Unternehmen auch langfristig wirtschaftlich agieren kann. Diese beiden Aspekte sind Teil einer Trendanalyse. In Analogie zu den Bioindikatoren stellt dies den Schritt der Erkennung von Umweltveränderungen dar. [26]

Basierend auf den Erkenntnissen der Trendanalyse erfolgt die Anomaliedetektion. Dabei wird ein Abgleich anhand von Erkenntnissen der Trends mit Informationen aus dem Unternehmensmodell sowie den Vitaldaten der Produktion gemacht. Nachfolgend wird dies am Beispiel von Lieferanten verdeutlicht. Aus der Trendanalyse stammt die

Erkenntnis, dass vermehrt Nachrichten zu China auftreten (vgl.

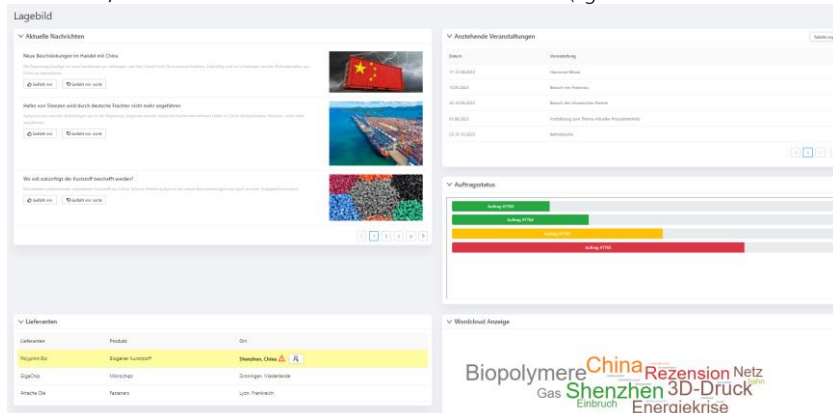


Abb. 14.2). Im Rahmen der Anomaliedetektion wird geprüft, ob es Übereinstimmungen zu Lieferantenstandorten gibt. Wird eine Übereinstimmung gefunden, so wird dieser Lieferant im Lagebild gekennzeichnet. In Analogie zu den Bioindikatoren ist dies der Aspekt von deren Auftreten bzw. Ausbleiben. Allerdings muss im Fall der Kennzeichnung eines Lieferanten, manuell geprüft werden, ob ein positiver oder negativer Einfluss vorliegt. [26]

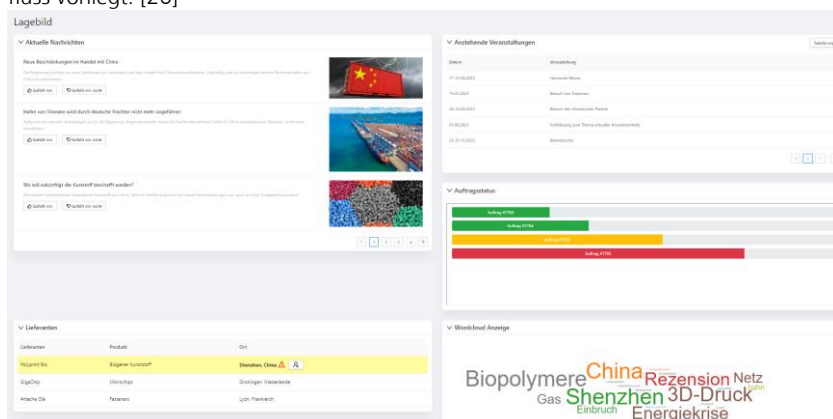


Abb.14.2 Darstellung des interaktiven Lagebilds

Im nächsten Schritt soll vorhandenes Wissen bereitgestellt werden – sprich vom LZG ins KZG überführt werden. In Bezug auf den Lieferantenausfall bedeutet dies, dass nach Alternativlieferanten gesucht wird. Durch einen Matchingalgorithmus, der nach spezifischen Produktcharakteristika sucht, wird ein Musterabgleich mit bestehenden Lieferanten gemacht, ob davon einer infrage kommt. Handelt es sich um einen dauerhaften Lieferantenausfall, so ist auch der Abgleich mit Lieferantendatenbanken möglich. Bislang verfügt häufig die Managementebene in KMUs über das Wissen, wie im Falle eines Lieferantenausfalls gehandelt werden muss. Durch diesen Ansatz werden jedoch weitere Mitarbeitende befähigt durch die Unterstützung des Lagebildes entsprechende Entscheidungen zu treffen. [26]

14.5

Zusammenfassung

Die Managementebene in KMU stellt häufig einen Bottleneck dar, da sie in zahlreiche operative und strategische Prozesse involviert ist. Um dem entgegenzuwirken, kann

Bionische Integration für vernetzte Produktionssysteme

insbesondere das GPS-Prinzip „Standardisierung“ Abhilfe schaffen. Dennoch verfügen KMU in der Regel nicht über die erforderlichen Ressourcen und das nötige Methodenvissen, um ein GPS zu implementieren und zu betreiben.

Um dem Ressourcenthema entgegenzuwirken, bieten biologische Prinzipien einen vielversprechenden Ansatz. In diesem Beitrag wurden die biologischen Prinzipien Selbstheilung, Bioindikatoren und Gedächtnis in ihren Funktionsfähigkeiten beschrieben und innerhalb von zwei Ansätzen auf Produktionssysteme transferiert. Beide Ansätze führen im ersten Schritt eine Detektion von Anomalien durch. Im zweiten Schritt wird bei der Prozessheilung durch die automatisierte Einleitung von Maßnahmen der Gleichgewichtszustand wieder erreicht. Im zweiten Ansatz werden automatisiert durch einen Matching-Algorithmus Alternativen identifiziert und für ein Maßnahmenmanagement bereitgestellt. Die beiden vorgestellten Ansätze setzen den Fokus auf einen ressourcenschonenden Betrieb. In weiteren Forschungsaktivitäten sollte auch noch ein Fokus auf eine ressourcenschonende Einführung von Maßnahmen gelegt werden.

14.6

Literaturverzeichnis

- [1] Dombrowski, Uwe; Mielke, Tim: Ganzheitliche Produktionssysteme. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015
- [2] VDI 2870: 2012. Ganzheitliche Produktionssysteme - Grundlagen, Einführung und Bewertung - Blatt 1
- [3] Dombrowski, Uwe; Schmidtchen, Kai: Ganzheitliche Produktionssysteme. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010), Nr. 10, S. 914–918
- [4] Kinkel, Steffen; Wengel, Jürgen: Neue Produktionskonzepte: Eine Diskussion macht noch keinen Sommer. Mitteilungen aus der Produktinnovationserhebung 4 (1997), S. 1–9
- [5] Lange, Annika; Gering, Patrick; Oertwig, Nicole; Knothe, Thomas: Bionik in Ganzheitlichen Produktionssystemen. Industrie 4.0 Management 38 (2022), Nr. 1, S. 57–60
- [6] Lay, G; Neuhaus, R: Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) -Fortführung von Lean Production. Angewandte Arbeitswissenschaft 185 (2005), S. 32–47
- [7] Spath, D.; Korge, A.; Scholtz, O.: Ganzheitliche Produktionssysteme. Ratio. Neues vom RKW Baden-Württemberg 9 (2003), Nr.3, S. 9–11
- [8] Knothe, Thomas; Lange, Annika; Torka, Jan; Busse, Dirk; Steier, Karlheinz; Gmeiner, Thomas; Hüttinger, Veronika: MAP - Maschinelles Lernen für das agile Prozessmanagement im Maschinen- und Gerätebau. Berlin, 2024
- [9] Byrne, G; Dimitrov, D; Monostori, L; Teti, R; van Houten, F; Wertheim, R: Biologisation: Biological transformation in manufacturing (2018), S. 1–43
- [10] Bauernhasl, T; Brecher, C; Drossel, W.-G; Gumbsch, P; ten Hompel, M; Wolpertinger, M: Biointelligenz. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2019
- [11] Berkhahn, Magda; Kremer, Gerald; Riedelsheimer, Theresa; Lindow, Kai; Stark, Rainer: Taxonomy for Biological Transformation Principles in the Manufacturing Industry. In: Kohl, Holger; Seliger, Günther; Dietrich, Franz (Hrsg.): Manufacturing Driving Circular Economy. Cham: Springer International Publishing, 2023
- [12] Lange, Annika; Poeche, Moritz: Literature Review of Biological Transformation in Holistic Production Systems. In: Kohl, Holger; Seliger, Günther; Dietrich, Franz (Hrsg.): Manufacturing Driving Circular Economy. Cham: Springer International Publishing, 2023
- [13] Bergs, T.; Schwaneberg, U.; Barth, S.; Hermann, L.; Grunwald, T.; Mayer, S.; Biermann, F.; Sözer, N.: Application cases of biological transformation in manufacturing technology. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 31 (2020), S. 68–77

- [14] Bauer, Dennis; Schumacher, Simon; Gust, Alexander; Seidelmann, Joachim; Bauernhansl, Thomas: Characterization of Autonomous Production by a Stage Model. *Procedia CIRP* 81 (2019), S. 192–197
- [15] Leitão, Paulo; Barbosa, José: Biological Inspiration to Solve Complexity in Intelligent and Adaptive Manufacturing Systems. *IFAC Proceedings Volumes* 10 (2010), Nr. 1, S. 204–209
- [16] Denkena, Berend; Dittrich, Marc-André; Stamm, Siebo; Wichmann, Marcel; Wilmsmeier, Sören: Gentelligent processes in biologically inspired manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 32 (2021), S. 1–15
- [17] Chaudhry, Imran; Khan, Abdul Munem; Khan, Abid Ali: A genetic algorithm for flexible job shop scheduling. *Processdings of the World Congress on Engineering* 1 (2013), S. 703–708
- [18] Demeester, Lieven; Eichler, Knut; Loch, Christoph: Organic Production Systems: What the Biological Cell Can Teach Us About Manufacturing. *Manufacturing & Service Operations Management* 6 (2004), Nr. 2, S. 115–132
- [19] Diesendruck, Charles; Sottos, Nancy; Moore, Jeffrey; White, Scott: Biometrische Selbstheilung. *Angewandte Chemie* 127 (2015), Nr. 36, S. 10572–10593
- [20] Arbeitskreis Bioindikation der Fachgruppe "Umweltchemie und Ökotoxikologie" der Gesellschaft Deutscher Chemiker: Begriffsdefinitionen zur Bioindikation. *UWSR - Z. Umweltchem. Ökotox.* 8 (1996), Nr. 3, S. 169–171
- [21] Ebert, Dieter: Ecology, epidemiology, and evolution of parasitism in *Daphnia*. Bethesda, Md.: National Center for Biotechnology Information, 2005
- [22] Gruber, Thomas: *Gedächtnis*. 1. Aufl. Wiesbaden: VS Verl. für Sozialwiss, 2011
- [23] Myers, David: *Psychologie*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014
- [24] Jaekel, Frank-Walter; Torka, Jan; Eppelein, Martin; Schliephack, Wolf; Knothe, Thomas: Model Based, Modular Configuration of Cyber Physical Systems for the Information Management on Shop-Floor. In: Debruyne, Christophe; Panetto, Hervé; Weichhart, Georg; Bollen, Peter; Ciuciu, Ioana; Vidal, Maria-Esther; Meersman, Robert (Hrsg.): *On the Move to Meaningful Internet Systems. OTM 2017 Workshops*. Cham: Springer International Publishing, 2018
- [25] Agacayaklar, Furkan; Lange, Annika; Scholz, Julia-Anne; Knothe, Thomas; Busse, Dirk: Modularized Active Learning Solution for Labelling Text Data for Business Environment Analysis. In: Herberger, David; Hübner, Marco (Hrsg.): *Proceedings of the Conference on Production Systems and Logistics: CPSL 2022*. Hannover: publish-Ing, 2022
- [26] Lange, Annika; Gering, Patrick; Agacayaklar, Irfan; Knothe, Thomas; Busse, Dirk: Bioinspirierte Erkennung von Abweichungen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 117 (2022), Nr. 9, S. 553–557

15

Selbstorganisierende Produktionssysteme

Selbstorganisierende
Produktionssysteme

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann^{1,2}, Prof. Dr.-Ing. Julian Polte^{1,2},
Christopher Mühlich¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

² Technische Universität Berlin

Angehts dynamischer Markt- und Produktionsbedingungen müssen produzierende Unternehmen ihre Anpassungsfähigkeit steigern, um wettbewerbsfähig zu bleiben. Selbstorganisierende Produktionssysteme bieten hierfür einen vielversprechenden Ansatz, der von biologischen Prinzipien inspiriert ist. In der Natur ermöglichen Phänomene wie Schwarmintelligenz, dass verteilte Systeme wie Ameisen- oder Bienenkolonien sich ohne zentralen Koordinator flexibel an Veränderungen anpassen können. Im Projekt BioFusion 4.0 wurde untersucht, wie dieses biologische Prinzip der Selbstorganisation auf Produktionssysteme übertragen und technisch umgesetzt werden kann. Hierbei wurden die zentralen Akteure eines Produktionssystems – Menschen, Maschinen und IT-Systeme – als Multiagentensystem modelliert. Diese Systeme bestehen aus Softwareagenten, die dezentral agieren und kooperative Entscheidungen zur Erreichung gemeinsamer Systemziele treffen. Der vorliegende Beitrag beschreibt die erzielten Projektergebnisse anhand zweier Demonstratoren mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Der erste Demonstrator simuliert eine Produktionsumgebung, in der verteilte Optimierungsverfahren zur dezentralen Planung der Maschinenbelegung und Auftragsfreigabe angewandt werden. Ziel ist es zu demonstrieren, wie in einem verteilten System ohne zentralen Koordinator Entscheidungen getroffen werden können. Der zweite Demonstrator überträgt die entwickelte Algorithmik in die industrielle Praxis. Am Beispiel einer Prozesskette zur Montage von Batteriesteuerungsmodulen wird gezeigt, wie Softwareagenten die Akteure eines Produktionssystems repräsentieren und Produktionsprozesse selbstorganisiert steuern können.

15.1

Einleitung

Produktionsprozesse bestehen in der Regel aus mehreren Teilschritten, welche in einer technisch bedingten Reihenfolge von unterschiedlichen Systemen, wie z. B. Werkzeugmaschinen, Montage- oder Logistiksystemen, nacheinander abgearbeitet werden. Dabei ergibt sich das Endprodukt als Summe der aufeinander abgestimmten Teilschritte. Alle Teilprozesse müssen daher zu einem passenden Zeitpunkt am passenden System ausgelöst werden. Analog dazu werden in der Natur Prozesse durch Marker ausgelöst, die als Signalgeber Koordinations- und Synchronisationsprozesse zwischen unterschiedlichen Akteuren ermöglichen. Ein Beispiel für einen Marker ist in der Biologie das Pheromon bei sozialen Insekten, wie Ameisen, zu beobachten. Wenn eine Ameise eine Futterquelle findet, legt sie eine Pheromonspur auf dem Weg zum Nest, um andere Ameisen über den Ort der Futterquelle zu informieren. Dieses chemische Signal löst in der Folge bei anderen Ameisen das Verhalten aus, der Spur zu einer bereits identifizierten Nahrungsquelle zu folgen. Durch den Einsatz von Markern können sich Ameisen innerhalb einer Kolonie dezentral koordinieren, obwohl jede Ameise individuell handelt. Marker repräsentieren damit Schlüsselemente, um den Lebenserhalt und das ökologische Gleichgewicht biologischer Systeme aufrechtzuerhalten. Im Unterschied dazu werden in der Produktion konventionell sämtliche Teilschritte für die Fertigung eines Produktes mit hohem Aufwand zentral geplant. Vor diesem Hintergrund ist es zweckmäßig, Konzepte aus der Natur auf Produktionssysteme zu übertragen, um ganzheitliche kooperative Systeme zu schaffen, bei denen sich die Beteiligten selbstständig aufeinander abstimmen und gleichzeitig individuelle Interessen verfolgen.

Somit wird es möglich, dass sich ein Produktionsumfeld bei veränderten Randbedingungen schnell an die neue Situation anpassen kann.

Selbstorganisierende
Produktionssysteme

15.2 Stand der Technik

In produzierenden Unternehmen obliegt dem Auftragsmanagement die Aufgabe, den Durchlauf von Produktionsaufträgen basierend auf der Kundennachfrage zu planen und durchzuführen. Dies beinhaltet die bedarfsgerechte Bereitstellung notwendiger Ressourcen, die optimale Auslastung von Produktionskapazitäten sowie die Fertigstellung der Produkte in der geforderten Menge und innerhalb der vorgegebenen Lieferfrist [1]. Bekannte Ansätze zur Planung und Steuerung von Produktionsaufträgen lassen sich in die Kategorien prädiktiv-reaktiv, robust-proaktiv und vollständig-reaktiv einteilen [2, 3].

Prädiktiv-reaktive Ansätze basieren auf der Erstellung eines initialen Produktionsplans, der während der Ausführung lediglich bei Auftreten von Störungen angepasst wird. Hierbei kommen häufig metaheuristische Verfahren, wie genetische Algorithmen, in Verbindung mit regelbasierten Modellen zum Einsatz. Beispiele für solche Anwendungen finden sich in Niehues [4] und Hong et al. [5]. Robust-proaktive Methoden hingegen nutzen Prädiktionsmodelle, um verschiedene Varianten von Produktionsplänen zu simulieren und deren Qualität anhand vordefinierter Leistungskriterien zu bewerten. In Vieira et al. [6] wird ein Ansatz beschrieben, der Produktionspläne mithilfe ganzzahliger linearer Optimierung erstellt und diese in Verbindung mit einem ereignisdiskreten Simulationsmodell evaluiert, um geeignete Lösungsvorschläge für die Planungsphase zu generieren. Im Gegensatz dazu verzichten vollständig-reaktive Ansätze auf die Erstellung eines initialen Produktionsplans und reagieren ausschließlich auf Echtzeitergebnisse innerhalb der Produktion. Hierbei kommen in der Regel einfache Dispatching-Regeln, wie First-In-First-Out oder die Kürzeste-Operationszeit-Regel [7] zum Einsatz, die jedoch nur bedingt anpassungsfähig sind, wenn sich die Produktionsbedingungen ändern [8].

Im Bereich der reaktiven Planung und Steuerung von Produktionsprozessen werden in der Fachliteratur verschiedene Ansätze auf Basis von Multi-Agenten-Systemen (MAS) diskutiert. Wang et al. [9] präsentiert einen agentenbasierten Ansatz, der unter Verwendung von Echtzeit-Zustandsinformationen und einem Verhandlungsmechanismus die optimale Verteilung der Produktionsaufträge ermittelt. Allerdings wird hierbei die Auswirkung der getroffenen Entscheidungen auf die zukünftige Ressourcenplanung nicht berücksichtigt, was zu Engpässen und sogenannten Deadlocks führen kann. Bi et al. [10] verwenden ein MAS, um schnell auf Störungen in der Lieferkette zu reagieren. In diesem System sind die Agenten mit einer modellbasierten Wissensbasis sowie einem Kommunikationsnetzwerk ausgestattet. Dank ihres Wissens über eigene Fähigkeiten und die Umgebungsbedingungen sind die Agenten in der Lage, im Falle einer Störung eigenständig Strategien zur Wiederherstellung des Produktionsprozesses zu entwickeln. Die Ergebnisse einer Fallstudie legen nahe, dass der agentenbasierte Ansatz Vorteile hinsichtlich Reaktionsfähigkeit, Flexibilität und Skalierbarkeit bietet, insbesondere in großen Produktionssystemen, im Vergleich zu zentralisierten Steuerungsarchitekturen.

Zunehmend finden auch Methoden des Reinforcement Learning Anwendung in der echtzeitnahen Produktionsplanung [11, 12]. Diese Ansätze erfordern jedoch realitätsnahe Simulationsmodelle und aufwendige Trainingsphasen bei Änderungen der Systemkonfiguration, was die Flexibilität der Systeme einschränkt [13]. Um den Anforderungen an Flexibilität und Reaktionsfähigkeit gerecht zu werden, sind innovative Methoden zur Produktionsplanung und -steuerung erforderlich, die die Vorteile dezentraler Steuerungsansätze mit denen von Optimierungstechniken kombinieren.

15.3

Ökologisch intelligente Services für die Produktion

Das Teilprojekt „Ökologisch intelligente Services für die Produktion“ von BioFusion 4.0 hatte zum Ziel, eine Softwareplattform zu entwickeln, die den Austausch von Informationen und Dienstleistungen zwischen heterogenen Akteuren in der Produktion ermöglicht. Zu diesen Gruppen zählen Menschen, Maschinen und IT-Systeme, die jeweils individuelle Dienstleistungen innerhalb eines übergeordneten Produktionsnetzwerks anbieten. Die Softwareplattform soll dabei folgende zentrale Systemfunktionalitäten bieten:

- **Vernetzung dezentraler Produktionsteilnehmender:** Menschen, Maschinen und IT-Systeme werden miteinander verbunden, um einen effizienten Informationsaustausch zu gewährleisten.
- **Adaptive Kommunikationsmechanismen:** Die Plattform wird in der Lage sein, sich dynamisch an die Anforderungen der Beteiligten anzupassen.

Durch diese Funktionalitäten wird eine Selbstorganisation der Teilnehmenden innerhalb eines Produktionsprozesses ermöglicht. Inspiriert von Beispielen aus der Natur, wie selbstorganisierende Ökosysteme, wurde im Teilprojekt ein bioinspiriertes Konzept entwickelt, das die Anforderungen an die Systemfunktionalität erfüllt.

15.3.1

Arbeitspakete

Ausgehend von der Zielsetzung des Teilprojektes wurden auf Basis der Vorhabensbeschreibung des BioFusion 4.0 Projektes die folgenden Aufgaben bearbeitet:

1. **Definition ökologisch intelligenter Services:** Begriffsbestimmung und Klärung, welche Dienstleistungen durch die Plattform bereitgestellt werden sollen.
2. **Identifikation naturinspirierter Dienste:** Untersuchung von Beispielen für adaptive Kommunikation und Interaktion zwischen Akteuren im Produktionsumfeld.
3. **Entwicklung einer bioinspirierten Netzwerkarchitektur:** Erstellung eines Konzepts, das die Vernetzung der Teilnehmenden ermöglicht.
4. **Algorithmus zur dezentralen Entscheidungsfindung:** Entwicklung eines Algorithmus, der es den Akteuren ermöglicht, Entscheidungen autonom zu treffen.
5. **Datensammlung zu Anwendungsfällen:** Akquisition relevanter Daten für die Implementierung von Demonstratoren im Fraunhofer IPK und im Mercedes-Benz Werk Marienfelde.

15.3.2

Methodik

Das methodische Vorgehen gliederte sich in folgende drei Hauptphasen:

1. **Anforderungsanalyse:** Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurden Beispiele naturinspirierter Dienste identifiziert, analysiert und Anforderungen an das zu entwickelnde System abgeleitet. Die Ergebnisse wurden zur Begriffsbestimmung ökologisch intelligenter Services verwendet. Darüber hinaus wurde das Entwicklungsvorgehen konkretisiert sowie notwendige Annahmen zur Eingrenzung der Aufgabenstellung getroffen. Für das Verständnis der Perspektiven heterogener Akteure im Produktionsumfeld wurden User Stories und Personas als methodisches Werkzeug eingesetzt.

2. **Konzeptentwicklung:** Bei der Konzeptentwicklung wurden adaptive Mechanismen zur Kommunikation relevanter Akteure sowie eine entsprechende Netzwerkarchitektur ausgearbeitet. Hierbei galt es potenzielle Schnittmengen mit den anderen Teilprojekten zu berücksichtigen. Das Konzept sollte hierbei vorbereitend für den Demonstrator am Fraunhofer-Institut sowie für den Anwendungsfall bei Mercedes-Benz.
3. **Sammeln relevanter Daten:** Es wurden relevante Daten in Zusammenarbeit mit Technologie- und Anwendungsfallpartnern erfasst, um die Konzepte mit konkreten Informationen zu untermauern.

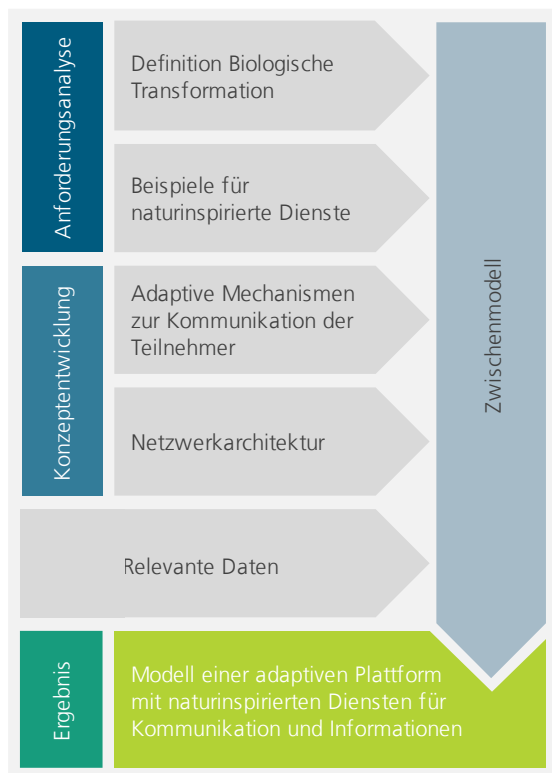


Abb. 15.1 Methodisches Vorgehen

15.4 Projektergebnisse

15.4.1 Anforderungsanalyse

Auf Basis der durchgeführten Anforderungsanalyse wurden ökologisch intelligente Services als analoge oder digitale Dienstleistungen definiert, welche die Wechselwirkungen zwischen Menschen und Maschinen im Produktionsökosystem erkennen. Sie bieten Handlungsoptionen und führen die getroffenen Entscheidungen aus. Im Hinblick auf die Biologische Transformation wurden ökologisch intelligente Services wie folgt definiert:

Ein ökologisch intelligenter Service, im Kontext der Produktion, ist eine analoge oder digitale Dienstleistung, die die Wechselwirkungen zwischen Menschen und Maschinen

Selbstorganisierende
Produktionssysteme

im Ökosystem kennt, den Ist-Zustand erkennt, Handlungsoptionen anbietet und die getroffene Wahl ausführt. Die Dienstleistung kann dabei singulär, als Verbund von mehreren Dienstleistungen oder aber hybrid, also im Zusammenwirken von Produkt und Dienstleistung erbracht werden.

Selbstorganisierende
Produktionssysteme

Die Anforderungen an die Gestaltung des Systems umfassen:

- Berücksichtigung heterogener Akteure und ihrer individuellen Anforderungen.
 - Menschen müssen durch mobile Endgeräte und AR-Unterstützung in die digitalen Prozessabläufe des MAS integriert werden
 - Maschinen und IT-Systeme müssen über standardisierte und interoperable Kommunikationsprotokolle digital vernetzt sein
- Informationen über den Produktionsprozess sowie über den Zustand der Akteure müssen dezentral erfasst und verarbeitet werden
- Die Akteure müssen Entscheidungen über die Aufgabenverteilung und den Ablauf des Produktionsprozesses ohne zentralen Koordinator treffen und ausführen können

15.4.2 Konzeptentwicklung

Auf Basis der Anforderungsanalyse wurde aus dem Fachgebiet der Verteilten Künstlichen Intelligenz ein MAS als technischer Lösungsansatz identifiziert. Ein MAS beschreibt ein Netzwerk von Agenten, die autonom handeln, Informationen durch die Bereitstellung und Nutzung von Services austauschen sowie Aufgaben kooperativ lösen können. Agenten werden dabei als die Erweiterung eines Digitalen Zwillings um Funktionalitäten der autonomen Zustandsverwaltung und Entscheidungsfindung betrachtet. Somit erhalten alle betrachteten Akteure des Produktionsprozesses einen virtuellen Agenten mit dem sie eindeutig assoziiert sind. Jeder Agent ist damit in Abhängigkeit der Konstitution und Merkmalen seines assoziierten Akteurs in Besitz von Dienstleistungen, die dem MAS generell zur Verfügung gestellt wird. Unter dem Begriff der Dienstleistung werden dabei folgende Arten verstanden:

- **Informationsbereitstellung:** Alle Agenten haben Zugriff auf Informationen, die im Digitalen Zwilling dem damit assoziierten Akteur hinterlegt sind. Andere Agenten können bestimmte Informationen anfragen. Der Agent, der im Besitz der Informationen ist, kann jedoch individuell entscheiden, ob die Information preisgegeben und damit die Anfrage stattgegeben wird.
- **Prozessbereitstellung:** Agenten stellen je nach Konfiguration ihres assoziierten Akteurs Prozesse bereit, die durch andere Agenten angefragt werden können. Zum Beispiel stellt ein 3D-Drucker den Prozess "Bauteil drucken" und ein mobiler Roboter den Prozess "Bauteil transportieren" bereit. Damit die Anfrage eines Prozesses gültig ist, müssen die dafür jeweils definierten Bedingungen in Form notwendiger Informationen (z.B. CAD-Datei, Materialnummer des zu transportierenden Bauteils etc.) vorliegen. Auch hier obliegt die Entscheidung über die Ausführung des Prozesses dem Agenten, der im Besitz dieses Prozesses ist. Die Entscheidung kann vom Anwender des MAS durch individuell konfigurierbare Präferenzen im Design einzelner Agenten angepasst werden.

Die Anfragen zu Dienstleistungen sowie auch deren Ausführung wird über eine gemeinsame Kommunikationsinfrastruktur in Form von Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) im Netzwerk der Agenten veröffentlicht. MQTT bietet durch sein Publish-Subscribe-Pattern einen flexibel adaptierbaren Kommunikationsmechanismus. Zusammen mit den Informationsmodellen einzelner Agenten wird dadurch die Grundlage geschaffen, verschiedene naturinspierte Mechanismen zu untersuchen. Darüber hinaus können Softwareagenten, offene Prozessaufgaben ohne zentralen Koordinator untereinander aufteilen. Hierzu wird das Problem der Aufgabenverteilung als

sequenzielles Entscheidungsproblem modelliert, das mithilfe von Optimierungsverfahren gelöst werden. Konkret wurde die Aufgabenverteilung als Multi-Agent Markov Entscheidungsprozess abgebildet. Zur Lösung des Optimierungsproblems wurde ein verteilter Max-Plus Algorithmus implementiert, in dem Agenten die zu verteilenden Aufgaben individuell auf Basis einer vordefinierten Nutzenfunktion. Agenten kommunizieren iterativ mit ihren Nachbarn im Netzwerk und tauschen Nachrichten aus, die ihren maximalen Nutzen für die Zuordnung einer Aufgabe ausdrücken. Jede Nachricht berücksichtigt den eigenen Nutzen eines Agenten sowie die von anderen empfangenen Nutzeninformationen, um Konflikte zu vermeiden. Die Formel basiert auf einer Maximierung des Gesamtnutzens. Nach mehreren Iterationen konvergieren die Agenten zu einer stabilen Zuordnung, bei der keine weiteren Änderungen im Nutzenwert auftreten. Jeder Agent entscheidet final basierend auf dem maximierten Nutzen, welche Aufgabe er übernimmt. Details zum implementierten Algorithmus ist in Uhlmann et al. [14] zu finden.

15.4.3

Implementierung und Demonstratoren

Die Implementierung des Multiagentensystems erfolgte in zwei Demonstratoren:

Demonstrator im Fraunhofer IPK: Der Demonstrator zeigt die selbstorganisierende Produktionssteuerung in einem interaktiven Hardwareaufbau mit acht Arbeitsstationen, die über Mikrocontroller und Touchscreens gesteuert werden. Der Demonstrator setzt sich aus einem interaktiven Hardwareaufbau, dem MAS als implementiertes Softwaresystem sowie einer grafischen Benutzeroberfläche zusammen. Die Komponenten des Demonstrators sind in Abb. 15.2 dargestellt.

Der Hardwareaufbau des Demonstrators repräsentiert ein vereinfachtes Fabriklayout, das auf die Bearbeitung auftragsindividueller Prozessschritte ausgelegt ist. Es umfasst acht Arbeitsstationen, die in einer Matrixform angeordnet sind. Hierbei wird jede Arbeitsstation durch Core2 ESP32 IoT Development Kits von M5Stack, Shenzhen, welche mitunter einen Mikrocontroller und einen Touchscreen-Bildschirm enthalten, abgebildet. An jeden Core2 ist zudem jeweils ein RFID-Reader angebunden, welche zur Auftragsfassung dienen.

Alle aktuellen Zustands- und Auftragsinformationen der jeweiligen Arbeitsstationen sind über die Bildschirme der Mikrocontroller einsehbar. Die Arbeitsstationen können über die Bildschirme betriebsunfähig oder betriebsbereit gesetzt werden, wodurch Störungen simuliert werden und eine Neuplanung der Aufgabenverteilung initiiert wird. Dabei wird angenommen, dass Störungen nicht während der Bearbeitung eines Prozessschrittes auftreten können, sondern davor auftreten und vom Algorithmus bedacht werden. Weitere Details zur Umsetzung des Demonstrators sind in Uhlmann et al. [15] zu finden.

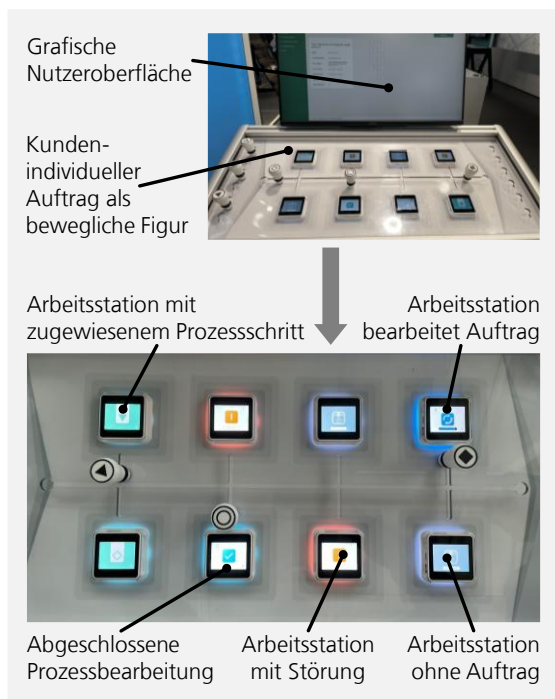


Abb. 15.2 Demonstrator des Multiagentensystems am Fraunhofer IPK

Demonstrator im Mercedes-Benz Werk Marienthal: Der bei Mercedes-Benz entwickelte Demonstrator repräsentiert einen Ausschnitt aus der Produktion eines des Batteriesteuerungsmoduls „EEC“. Dabei umfasst der Produktionsprozess sowohl produktions-technische Aufgaben wie das Verschrauben von mehreren Schützen und die Montage eines Kabelbaums, als auch logistische Teilschritte, wie die Kommissionierung und den Transport der Bauteile. Das Ziel des Anwendungsfalls ist, dass die verschiedenen Akteure, darunter Maschinen, Menschen sowie IT-Systeme in verschiedenen Bereichen und Positionen zusammenarbeiten und sich selbstständig untereinander abstimmen. Alle im folgenden beschriebenen Akteure werden als individuelle Softwareagenten abgebildet, die lokal Zustandsinformationen erfassen, verarbeiten und Prozesse in ihrem Einflussbereich steuern.

Für den Transport von Bauteilen zwischen den verschiedenen Stationen kommt ein Automated Guided Vehicle (AGV) des Typs LD-90 der Firma Omron zum Einsatz. Über eine Telnet-Schnittstelle erfolgt die Kommunikation und Steuerung des AGV sowie der fest verbauten Sensoren des AGV. Zudem wurde das AGV um ein umfangreiches Sensorsystem erweitert. Dieses umfasst Wägezellen, RFID-Reader und eine Industriekamera des Typs Basler acA4096-40um der Firma Basler AG wodurch eine genaue Nachverfolgung der Bauteile gewährleistet werden soll.

Das durch das Fraunhofer IPK entwickelte MAS umfasst sowohl die Algorithmik für die Selbstorganisation unter den einzelnen Akteuren als auch eine Web-Applikation mit grafischer Oberfläche für den Mitarbeitenden, welche vor allem als Schnittstelle zwischen Menschen und MAS dienen soll. Über eine sogenannte „Task-List“ (dt. Aufgabenliste) der Web-Applikation können Nutzer Produktionsaufträge auswählen, zuweisen und abschließen. Die Nutzung kann hierbei über Computer oder auch mobile Endgeräte, wie Smartphones oder Tablets, erfolgen.

Selbstorganisierende
Produktionssysteme

Im Lager erfolgt die Kommissionierung der Bauteile und wird von einem Mitarbeitenden durchgeführt. Dieser ist mit einer AR-Brille der Baureihe HoloLens 2 der Firma Microsoft Corporation, Redmond, welche einer von Mercedes-Benz entwickelte Pick-by-Vision Ansicht enthält, ausgestattet. Bei der Ansicht wird anhand von Pfeilen die Lagerposition und eine Kiste mit den jeweiligen Bauteilen angezeigt. Die Entnahme der Bauteile aus dem Lager wird über die integrierte Kamera der Brille erfasst. Der Entnahmeprozess wird abschließend über eine Geste manuell abgeschlossen. Die Kommunikation der AR-Brille und dem MAS erfolgt über eine MQTT-Schnittstelle.

An der Arbeitsstation für die Schützmontage entnimmt ein Mitarbeitende zunächst die Schütze vom AGV und platziert diese auf dem Montagetisch. Die Entnahme wird über Wägezellen sowie eine Industriekamera des erweiterten Sensorsystems des AGV erfasst und an das MAS über eine MQTT-Schnittstelle weitergeleitet. Bei erfolgreicher Entnahme erfolgt der nächste Arbeitsschritt. Der Arbeitsplatz ist mit einem Videoprojektor und einer Industriekamera ausgestattet und unterstützt den Mitarbeitenden visuell bei der Montage. Hierbei projiziert der Videoprojektor die Positionen, an denen die Schütze positioniert und verschraubt werden sollen. Mithilfe der Industriekamera wird die korrekte Positionierung und Montage der Schütze überprüft und dem Mitarbeitenden über den Videoprojektor eine visuelle Rückmeldung gegeben, ob das Bauteil richtig positioniert und verschraubt wurde.



Abb. 15.3 Digital assistierte Verschraubung der Schütze als Teil des Demonstrators im Mercedes-Benz Werk Marienthal

Zudem wird mithilfe eines Drehmomentschraubers der Firma Atlas Copco das Anzugsdrehmoment der Schrauben auf Korrektheit überprüft und an das MAS übermittelt. Abb. 15.3 zeigt den Vorgang der Schützverschraubung. Bei der Arbeitsstation zur Kabelbaummontage entnimmt ein Mitarbeitender den Kabelbaum vom AGV. Die Bestätigung erfolgt analog zur Entnahme der Schütze mit dem Unterschied, dass anstelle einer Industriekamera ein RFID-Reader zum Einsatz kommt. Entsprechend dazu ist der Kabelbaum mit einem RFID-Tag ausgestattet. Nach der Entnahme erfolgt eine

Vormontage durch den Mitarbeitenden. Der Kabelbaum wird hierbei am EEC fixiert und an den hierfür vorgesehenen elektrischen Verbindern vorgesteckt. Anschließend wird durch Berührung eines Industrieroboters des Typs UR-10 der Firma Universal Robots ein kollaborativer Prozess gestartet. Der UR-10 fährt hierbei nochmal alle Steckverbindungen ab und steckt diese mit einer vorgegebenen Kraft, sodass diese einrasten. Die Zusammenarbeit zwischen dem Roboter und dem MAS erfolgt über eine TCP/IP-Schnittstelle.

Das AGV, das für den Transport der Bauteile zuständig ist, ist mit umfangreichen Sensorsystemen ausgestattet, sodass eine Be- und Entladung der Bauteile registriert werden kann. Das Sensorsystem setzt sich aus einer Kamera mit externem Ringlicht, einem RFID-Reader, vier Wägezellen und einem JETSON Xavier (eingebettetes System) von der Nvidia Corporation zusammen. Der JETSON Xavier dient als zentrale Schnittstelle zwischen dem Sensorsystem und dem Softwareagenten. Alle Sensoren, die sich auf dem AGV befinden, sind über die serielle Schnittstelle des JETSONs verbunden und können darüber gesteuert und ausgelesen werden. Auf dem JETSON selbst läuft ein Softwareagent, welcher die Ansteuerung des AGVs übernimmt. Die vier Wägezellen sind jeweils nach innen gerichtet am Rahmen des AGV-Gerüsts angebracht. Sie dienen der genauen Detektion und Messung der Gewichte von Schützen und Kabelbäumen während des Be- und Entladungsprozesses. Hierbei werden die Wägezellen über die GPIO-Pins (General Purpose Input/Output) des eingebetteten Systems angesteuert. Ein Hx711-Verstärker erleichtert die Handhabung, da die analogen Signale der Wägezellen in digitale Signale umgewandelt werden können. Die mit einem externen Ringlicht ausgestattete Kamera dient dem präzisen Scannen und Einlesen von QR-Codes auf den Schützen. Die Kamera ist von oben auf die Schütze gerichtet und nimmt Bilder auf, die für die Verarbeitung des QR-Code-Scans erfolgt. Das externe Ringlicht unterstützt die Kamera bei der optimalen Bildaufnahme. Hierbei wirkt das Ringlicht als homogene Lichtquelle für die Bildaufnahme und gewährleistet damit optimale Bildqualität. Durch die verbesserte Ausleuchtung können unterbelichtete Bilder vermieden werden. Während des Beladungsprozesses nimmt die Kamera kontinuierlich Bilder auf, bis in allen vordefinierten Bildsektoren die QR-Codes der Schützen erfolgreich detektiert und identifiziert wurden. Beim Entladungsprozess scannt das System durchgehend nach QR-Codes, bis kein QR-Code mehr in den Bildern identifiziert werden kann. Dadurch wird dem System signalisiert, dass sich auf dem AGV keine Schützen mehr befinden. Der Demonstrator wurde im Rahmen der zweiten Zukunftswerkstatt des Projekts Biofusion 4.0 präsentiert.

15.5

Zusammenfassung

Das Teilprojekt „Ökologisch intelligente Services für die Produktion“ zielte darauf ab, durch die Entwicklung ökologisch intelligenter Services und die Implementierung eines Multiagentensystems die Selbstorganisation in der Produktion zu fördern. Als Ergebnis ist ein Modell einer adaptiven Plattform mit naturinspirierten Diensten für Kommunikation und Informationen entstanden, welches die Effizienz und Flexibilität der Produktionsprozesse erheblich steigern kann und die Grundlage für zukünftige technologische Entwicklungen im Bereich der intelligenten Produktion bildet.

15.6

Literatur

- [1] Westkämper, E., 2006. Einführung in die Organisation der Produktion. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [2] Cai, L., Li, W., Luo, Y., He, L., 2023. Real-time scheduling simulation optimisation of job shop in a production-logistics collaborative environment 61, S. 1373.

- [3] Qiao, F., Ma, Y., Zhou, M., Wu, Q., 2020. A Novel Rescheduling Method for Dynamic Semiconductor Manufacturing Systems 50, S. 1679.
- [4] Niehues, M.R., 2016. Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung.
- [5] Hong, T.-Y., Chien, C.-F., 2020. A simulation-based dynamic scheduling and dispatching system with multi-criteria performance evaluation for Industry 3.5 and an empirical study for sustainable TFT-LCD array manufacturing 58, S. 7531.
- [6] Vieira, M., Moniz, S., Gonçalves, B.S., Pinto-Varela, T. et al., 2022. A two-level optimisation-simulation method for production planning and scheduling: the industrial case of a human–robot collaborative assembly line 60, S. 2942.
- [7] Löffding, H., 2016. Verfahren der Fertigungssteuerung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [8] Zhang, T., Xie, S., Rose, O., 2017. Real-time job shop scheduling based on simulation and Markov decision processes, in 2017 Winter Simulation Conference (WSC), IEEE, S. 3899.
- [9] Wang, J., Zhang, Y., Liu, Y., Wu, N., 2019. Multiagent and Bargaining-Game-Based Real-Time Scheduling for Internet of Things-Enabled Flexible Job Shop 6, S. 2518.
- [10] Bi, M., Chen, G., Tilbury, D.M., Shen, S. et al., 2022. A Model-based Multi-agent Framework to Enable an Agile Response to Supply Chain Disruptions.
- [11] Zhang, M., Lu, Y., Hu, Y., Amaitik, N. et al., 2022. Dynamic Scheduling Method for Job-Shop Manufacturing Systems by Deep Reinforcement Learning with Proximal Policy Optimization 14, S. 5177.
- [12] Luo, B., Wang, S., Yang, B., Yi, L., 2021. An improved deep reinforcement learning approach for the dynamic job shop scheduling problem with random job arrivals 1848, S. 12029.
- [13] Hofmann, C.C., 2021. Vorausschauende und reaktive Mehrzieloptimierung für die Produktionssteuerung einer Matrixproduktion. Shaker Verlag.
- [14] Uhlmann, E.; Polte, J.; Mühlich C.: Distributed real-time production control for resilient manufacturing systems. Procedia CIRP 120 (2023), S. 1274 – 1279.
- [15] Uhlmann, E.; Polte, J.; Mühlich C.: Steigerung der Ressourceneffizienz durch agentenbasierte Produktionssteuerung. In: Nachhaltigkeit in der Produktion. Fertigungstechnik; Band 712. Hrsg.: Brecher, C.; Krüger, J.; Uhlmann, E.; Verl, A.; Riedel, O.; Lechler, A. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2024, S. 1 – 15.

16

Integration menschlicher Bewegungsdaten im industriellen Kontext

Jan Kuschan¹, Niklas Grambow¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Die industrielle Produktion durchläuft eine Phase tiefgreifender Veränderungen, die nicht nur technologischer, sondern auch soziokultureller Natur sind. Während Industrie 4.0 die Automatisierung, Digitalisierung und Vernetzung von Maschinen vorantrieb, steht Industrie 5.0 für eine menschenzentrierte Perspektive [1]. Diese neue Phase setzt auf die Symbiose von Mensch und Maschine, bei der der Mensch durch adaptive Systeme, intelligente Sensorik und Datenverarbeitung optimal in den Produktionsprozess integriert wird. Abb. 16.1 zeigt schematisch mögliche Kommunikationsmittel zwischen Mensch und Roboter.

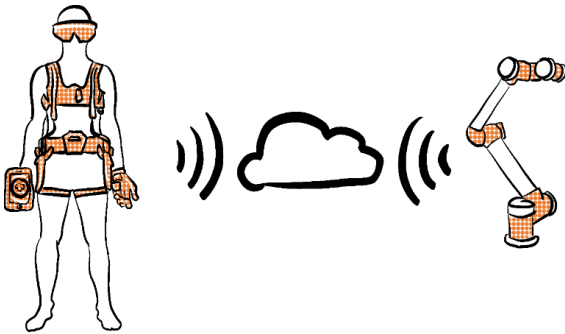


Abb. 16.1 Übersicht Industrie 5.0 – Mensch-Technologie-Integration.

Ein zentraler Aspekt dieses Paradigmenwechsels ist die Nutzung menschlicher Bewegungsdaten zur Verbesserung von Arbeitssicherheit, Ergonomie und Effizienz. Tragbare Geräte wie die ErgoJack-Westen [2] und Soft-Robotic-Exosuits wie das Power-Grasp-System [3] setzen neue Maßstäbe in der Mensch-Maschine-Interaktion. Diese Technologien nutzen Sensoren, maschinelles Lernen und Datenverarbeitung, um Bewegungen zu analysieren und Ermüdung zu erkennen [4-6].

Das Teilprojekt C1 des BioFusion 4.0 Programms untersucht die Entwicklung innovativer Assistenzsysteme für industrielle Arbeitsumgebungen und kombiniert die Möglichkeiten von Wearable-Technologien mit biologisch inspirierten Ansätzen, um die Arbeitsbedingungen in der Produktion zu verbessern und gleichzeitig ökologische Ziele zu erreichen.

16.1

Hintergrund und Motivation

Der demografische Wandel und der Fachkräftemangel stellen die Industrie vor neue Herausforderungen. Ein wachsender Anteil älterer Arbeitnehmer bedeutet, dass ergonomische Belastungen und gesundheitliche Risiken am Arbeitsplatz stärker berücksichtigt werden müssen. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Effizienz und Produktivität, wodurch die Bedeutung von technologischen Assistenzsystemen zunimmt. [7,8] Physische Belastungen wie Zwangshaltungen, repetitive Bewegungen und Überkopfarbeiten gehören zu den häufigsten Ursachen arbeitsbedingter Erkrankungen. Studien

zeigen, dass 19 % aller Arbeitsunfähigkeitstage auf physisch anspruchsvolle Tätigkeiten zurückzuführen sind. Die Integration von Sensortechnologien und künstlicher Intelligenz kann helfen, solche Belastungen zu reduzieren und die langfristige Gesundheit von Mitarbeitenden zu sichern. [9]

Das Projekt greift auf eine Kombination moderner Technologien zurück, die speziell für die Anforderungen der Industrie 5.0 entwickelt wurden. Hierzu zählen:

1. Inertialsensoren zur Aktivitätserkennung (IMU-basierte Systeme): Wearables mit integrierten Inertialsensoren (IMUs) bieten die Möglichkeit, menschliche Bewegungen präzise zu erfassen. In Teilprojekt C1 werden diese Daten verwendet, um ergonomische Belastungen zu analysieren und spezifische Arbeitsabläufe zu erkennen.
2. Maschinelles Lernen für Mustererkennung und Entscheidungsfindung: Durch den Einsatz von Deep-Learning-Modellen wie DC-LSTMs können Bewegungs- und Aktivitätsmuster in Echtzeit analysiert werden. Diese Modelle ermöglichen eine hohe Präzision bei der Erkennung von Montageaufgaben und tragen dazu bei, adaptive Assistenzsysteme zu realisieren.
3. Bioinspirierte Systemintegration: Durch die Übertragung biologischer Prinzipien, wie Selbstorganisation und Adaptivität, auf die Assistenzsysteme wird eine flexible und nachhaltige Unterstützung ermöglicht. Diese bioinspirierten Ansätze sollen eine dynamische Anpassung der Systeme an individuelle Arbeitsbedingungen gewährleisten.

16.2 Methodik

Die Methodik des Teilprojekts im Rahmen des BioFusion 4.0 Programms basiert auf einem interdisziplinären Ansatz, der moderne Technologien zur Integration menschlicher Bewegungsdaten in industrielle Arbeitsumgebungen nutzt. Ziel ist es, durch den Einsatz von tragbaren Technologien und intelligenten Algorithmen die Ergonomie, Sicherheit und Effizienz am Arbeitsplatz zu verbessern.

16.2.1 IMUs zur Posen- und Aktionserkennung bei tragbaren Systemen

IMUs, bestehend aus Beschleunigungssensoren, Gyroskopen und Magnetometern, liefern präzise Daten über Bewegungen, Lage und Orientierung des Körpers. Systeme wie die ErgoJack-Weste, dargestellt in Abb. 16.2, verwenden diese Technologie, um Zwangshaltungen und Bewegungsmuster zu erkennen. Die Datenübertragung erfolgt drahtlos, wodurch Echtzeit-Feedback an den Träger und die Integration in weiterführende Analysesysteme möglich wird.

Integration menschlicher
Bewegungsdaten im industriellen
Kontext



Abb. 16.2 ErgoJack-West: Textile 3-lagige Weste mit heraustrennbarem Elektronik-Layer. Die integrierten IMUs erfassen die Körperhaltung und können durch die eingebettete Rechneinheit die Pose der Person abschätzen.

16.2.2 Maschinelles Lernen für die Bewegungsanalyse

Die Aktionserkennung wird in der Regel primär für Aktivitäten des täglichen Lebens durchgeführt [10-12], wobei die Anforderungen in industriellen Anwendungen deutlich abweichen. In der Industrie stehen häufig kurze, dynamische Aktionen im Vordergrund, die oft ineinander übergehen. Dies stellt eine Herausforderung für die Datenannotation dar, da die Abgrenzung zwischen den einzelnen Aktionen nicht immer eindeutig ist. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, folgt der Ablauf einem klar strukturierten Prozess: Zunächst werden die Daten aufgenommen, gefolgt von einer sorgfältigen Annotation, um die relevanten Bewegungen zu kennzeichnen. Anschließend wird ein Modell antrainiert, das die Bewegungsdaten analysiert und die erkannten Aktionen klassifiziert. Um die Komplexität zu reduzieren, werden die Klassen zusammengefasst und die Anzahl der verwendeten Sensoren optimiert. Dieser iterative Prozess ermöglicht eine präzise Erkennung und Klassifikation der Bewegungen, die für die Entwicklung effektiver Assistenzsysteme in der industriellen Umgebung unerlässlich sind. Abb. 16.3 zeigt den zyklischen Ablauf zum Training des Modells.

Integration menschlicher
Bewegungsdaten im industriellen
Kontext

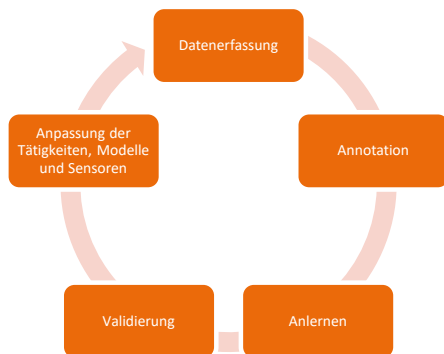


Abb.16.3 Kontinuierlicher Verbesserungsprozess zum Erstellen von Modellen zur Erfassung von Aktionen. Die erfassten Daten werden annotiert, anschließend wird ein Modell angelern, welche im nächsten Schritt in der realen Umgebung validiert werden. Auf Basis der Ergebnisse werden weitere Tätigkeiten hinzugefügt oder kombiniert, die Modelle oder die Sensorpositionierung ein - eigenschaften (z.B. Abtastrate) angepasst.

Zur Klassifikation von Bewegungen wurden Deep-Learning-Modelle wie DC-LSTM eingesetzt. Diese Modelle kombinieren Convolutional Neural Networks (CNNs) zur Merkmalsextraktion mit Long-Short-Term-Memory (LSTM)-Schichten zur Analyse zeitlicher Abhängigkeiten.

16.2.3 Datenaugmentation

Datenaugmentation ist ein entscheidender Schritt im maschinellen Lernen, insbesondere wenn es um die Verarbeitung von Bewegungsdaten geht. Die Aufnahme realer Daten ist häufig mit großem Aufwand verbunden. Dadurch ist die Fähigkeit der Modelle eingeschränkt, generalisierbare und robuste Vorhersagen zu treffen. Durch die Anwendung von Augmentationsmethoden wie Zeitverzerrung, Rotation und Cropping wird die Variabilität der Trainingsdaten erheblich erhöht. Dies ermöglicht es den Modellen, sich besser an unterschiedliche Bewegungsmuster und -bedingungen anzupassen. Darüber hinaus hilft die Datenaugmentation, das Problem der Überanpassung zu minimieren, indem sie die Vielfalt der Trainingsdaten erhöht und somit die Generalisierungsfähigkeit der Modelle verbessert. In einem industriellen Kontext, in dem Aktionen häufig kurz und dynamisch sind, ist die Fähigkeit, mit variierenden Daten umzugehen, von entscheidender Bedeutung, um präzise und zuverlässige Ergebnisse zu erzielen.

16.3 Förderung der Biologischen Transformation

Die Umsetzung der zuvor beschriebenen Verfahren und Technologien wurde in realen industriellen Umgebungen getestet, um die Praxistauglichkeit und den Nutzen zu bewerten. Vorangegangene Pilotprojekte im Mercedes-Benz Werk Berlin und umfangreiche Anwendungen in der Versuchsumgebung des Fraunhofer IPK dienten als Demonstratoren für den Einsatz der Wearable-Technologien in der Praxis. Dabei wurden folgende Anwendungen realisiert:

- **Ergonomische Unterstützung in der Montage:** Bei Tätigkeiten wie dem Anbringen von Bauteilen oder dem Heben von Lasten bieten die Wearable-Systeme adaptive Unterstützung. Dies reduziert nicht nur die körperliche Belastung, sondern optimiert auch die Arbeitsabläufe, indem es den Arbeitern ermöglicht, Aufgaben schneller und präziser auszuführen.

Integration menschlicher
Bewegungsdaten im industriellen
Kontext

- **Echtzeit-Datenanalyse und Feedback:** Die IMU-Daten werden in Echtzeit analysiert und bieten Feedback zu Haltungen oder Bewegungsmustern. Bei der Erkennung von ungünstigen ergonomischen Positionen können automatische Anpassungen oder Warnungen ausgegeben werden.
- **Reduktion von Verletzungsrisiken:** Durch die Analyse und Optimierung der Arbeitsabläufe können potenzielle Risiken frühzeitig erkannt und minimiert werden, was langfristig zu einer Senkung der krankheitsbedingten Ausfälle führt.

16.3.1

Präzise Erkennung von Montagetätigkeiten

In einer Untersuchung wurden Bewegungsdaten von IMUs bei Mercedes-Benz im Werk Berlin verwendet, um Montagetätigkeiten wie Schrauben, Verkabeln und Positionieren von Bauteilen zu klassifizieren. Die Unterteilung der Aktionen in sechs Klassen führte zu einer Erkennungsgenauigkeit von bis zu 95 %. Besonders bei repetitiven Arbeiten zeigte sich die Robustheit der Modelle. Die Ergebnisse auf dem reduzierten Labelsatz sind sehr vielversprechend – eine exemplarische Konfusionsmatrix ist in Abb.16.4 dargestellt – und zeigen sowohl für die Accuracy als auch für den F1-Score einen Durchschnitt von etwa 0,94. Diese Metriken beschreiben die Performance eines Modells, wobei die Accuracy den Anteil der korrekt gemachten Vorhersagen eines Modells angibt. Dieser Durchschnitt wurde über 12 Trainingszyklen berechnet und wies eine Varianz von etwa 0,5 % für beide Metriken auf.

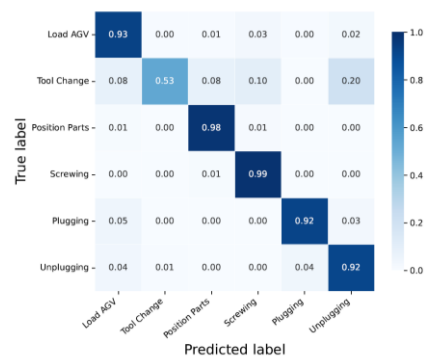


Abb.16.4 Konfusionsmatrix der reduzierten Klassenkonfiguration [13].

Eine tiefere Untersuchung zeigt den Einfluss der zuvor genannten Parameter. Interessant war, dass eine größere Anzahl von Datensätzen zu leicht schlechteren Ergebnissen in der kategorialen Genauigkeit führte, möglicherweise aufgrund höherer Varianzen im Datensatz. Wie erwartet, zeigen eine hohe feinere Unterteilung der Aktionen schlechtere Ergebnisse in der Accuracy; bei 18 Klassen fiel diese auf 0,75. Eine Reduktion auf 6 Klassen führte zu sehr guten Ergebnissen, während eine weitere Reduzierung auf 4 die Accuracy sogar auf 0,955 verbesserte.

Die Erhöhung der Anzahl der Epochen, in denen der komplette Datensatz einmal verarbeitet wird, verbesserte die Ergebnisse weiter, jedoch scheinen 20 Epochen für die aktuelle Untersuchung angemessen, um die Rechenzeit des DC-LSTM zu reduzieren. Die Batch-Größe hat einen großen Einfluss: Eine Anzahl von Batches (240) führte zu schlechteren Ergebnissen, während 4-12 Batches im Vergleich bessere Ergebnisse erzielten. Auch die Fenstergröße, die angibt wie viele Datenpunkte auf einmal betrachtet werden, hat einen erheblichen Einfluss; bei hohen Fenstergrößen (128 Abtastpunkten) wurden bessere Ergebnisse erzielt, jedoch mit einem höheren Rechenaufwand, sodass bei 256 das Training stoppt. Ein Kompromiss scheint sinnvoll, weshalb eine Fenstergröße von 64 für das weitere Training bevorzugt wird. Der ermittelte Parametersatz wird für die weiteren Entwicklungen verwendet.

16.3.2

Ergonomische Verbesserungen durch Echtzeit-Feedback

In einem weiteren Demonstrator wurde die ErgoJack-Weste für Montagetätigkeiten an höhenverstellbaren Montagearbeitsplätzen erweitert. Die integrierten IMUs überprüfen kontinuierlich die Oberkörperpose der Mitarbeitenden. Abhängig von der Körperhaltung gibt das System über den Monitor ein Feedback, ob der Tisch nach oben, unten oder nicht verfahren werden soll. Abb.16.5 zeigt alle drei Situationen, die das System berücksichtigt. Diese Echtzeit-Interventionen helfen dabei, Zwangshaltungen direkt zu korrigieren, indem sie Mitarbeitende aktiv auf ungünstige Positionen hinweisen. Dadurch wird nicht nur die Ergonomie am Arbeitsplatz verbessert, sondern auch langfristige Gesundheitsrisiken reduziert. Die Integration dieser Technologie fördert eine proaktive Haltung zur Arbeitssicherheit und trägt zur Schaffung eines gesünderen Arbeitsumfelds bei.



Abb.16.5 ErgoJack zur Überwachung der Ergonomie an Montagearbeitsplatz. Oben: Tisch ist für Greifertätigkeiten aus den höheren Bereichen zu hoch eingestellt. Das System empfiehlt den Tisch nach unten zu fahren. Mitte: Die Tischhöhe ist für die Montagetätigkeit auf der richtigen Höhe. Unten: Der Tisch ist zu tief eingestellt, was zu einer ungünstigen Körperpose führt. Das System empfiehlt den Tisch nach oben zu verfahren.

16.4

Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration menschlicher Bewegungsdaten im industriellen Kontext ist ein zentraler Bestandteil der Transformation hin zu Industrie 5.0, die eine menschenzentrierte Perspektive betont. Durch den Einsatz innovativer Technologien, wie tragbaren Geräten und intelligenten Algorithmen, wird die Ergonomie, Sicherheit und Effizienz am Arbeitsplatz verbessert. Die ErgoJack-Weste und Soft-Robotic-Exosuits stellen Beispiele dar, wie moderne Sensorik und maschinelles Lernen genutzt werden, um Bewegungen zu analysieren und ergonomische Belastungen zu reduzieren.

Die Methodik des Teilprojekts basiert auf der präzisen Erfassung von Bewegungsdaten mittels IMUs und der Anwendung von Deep-Learning-Modellen zur Mustererkennung. Die Ergebnisse zeigen eine vielversprechende Erkennungsgenauigkeit bei der Klassifikation von Montagetätigkeiten, was die Robustheit der entwickelten Systeme unterstreicht. Zudem ermöglicht die Echtzeit-Feedback-Funktion der ErgoJack-Weste eine sofortige Korrektur von Zwangshaltungen, wodurch langfristige Gesundheitsrisiken minimiert werden.

Im Ausblick wird deutlich, dass die fortschreitende Entwicklung dieser Technologien nicht nur die Effizienz von Produktionsprozessen steigern, sondern auch die Lebensqualität der Mitarbeitenden verbessern kann. Zukünftige Forschungsanstrengungen sollten sich auf die weitere Optimierung der Algorithmen, die Erweiterung der Anwendungsbereiche und die Integration zusätzlicher oder Verbesserung von vorhandenen Sensoren konzentrieren, um eine noch umfassendere Unterstützung der Mitarbeitenden zu gewährleisten. Die Schaffung einer symbiotischen Beziehung zwischen Mensch und Maschine wird entscheidend sein, um den Herausforderungen der modernen Arbeitswelt gerecht zu werden und eine nachhaltige, gesunde Arbeitsumgebung zu fördern.

16.5

Literatur

- [1] Xun Xu, Yuqian Lu, Birgit Vogel-Heuser, and Lihui Wang. "Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception". In: *Journal of Manufacturing Systems* 61 (2021), pp. 530–535. ISSN: 0278-6125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0278612521002119>.
- [2] Jean-Paul Goppold, Jan Kuschan, Henning Schmidt, Mirko Wolschke, Jana Liebach, Jörg Krüger, Roman Hackbart, Jan Kostelnik, and Gregor Thiele. "PowerGrasp - Design and Evaluation of a Modular Soft-Robotic Arm Exosuit for Industrial Applications". In: 52nd International Symposium on Robotics (ISR 2020). Online-Event, Germany, June 2020.
- [3] Jan Kuschan, Henning Schmidt, and Jörg Krüger. "Improved ergonomics via an intelligent movement and gesture detection jacket". In: *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics*. VDE. 2016.
- [4] Jan Kuschan, Moritz Burgdorff, Hristo Filaretov, and Jörg Krüger. "Inertial measurement unit based human action recognition for soft-robotic exoskeleton". In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 1140. 1. IOP Publishing. 2021, p. 012020.
- [5] Jan Kuschan, Hristo Filaretov, and Jörg Krüger. "Inertial Measurement Unit based Human Action Recognition Dataset for Cyclic Overhead Car Assembly and Disassembly". In: 2022 IEEE 20th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). 2022, pp. 469–476. DOI: 10.1109/INDIN51773.2022.9976078.
- [6] Jan Kuschan, and Jörg Krüger. "Fatigue recognition in overhead assembly based on a soft robotic exosuit for worker assistance." *CIRP Annals*, 70(1), 9-12. 2021

- [7] Thomas Grobe and Sven Bessel. "Gesundheitsreport 2022 – Arbeitsunfähigkeiten". In: Techniker Krankenkasse, 2022.
- [8] Martin Eisenmann. „Digitalisierte Logistik – Akzeptanzverhalten und soziotechnische Auswirkungen". Tech. rep. 2021. DOI: 10.24406/IML-N-643028. URL: <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-643028.html>.
- [9] Michiel P De Looze, Tim Bosch, Frank Krause, Konrad S Stadler, and Leonard W O'Sullivan. "Exoskeletons for industrial application and their potential effects on physical work load". In Ergonomics 59.5 (2016), pp. 671–681.
- [10] Heike Leutheuser, Dominik Schuldhaus, and Bjoern M. Eskofier. "Hierarchical, multi-sensor based classification of daily life activities: comparison with state-of-the-art algorithms using a benchmark dataset". In: PloS one 8.10 (2013), e75196. DOI:10.1371/journal.pone.0075196.
- [11] Ricardo Chavarriaga, Hesam Sagha, Alberto Calatroni, Sundara Tejaswi Digmarti, Gerhard Tröster, José Del R. Millán, and Daniel Roggen. "The Opportunity Challenge: A Benchmark Database for On-body Sensor-based Activity Recognition". In: Pattern Recogn. Lett. 34.15 (Nov. 2013), pp. 2033–2042. ISSN: 0167-8655. DOI: 10.1016/j.patrec.2012.12.014. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2012.12.014>.
- [12] Koray Açıcı, Çağatay Berke Erdaş, Tunç Aşuroğlu, and Hasan Özgül. "HANDY: A Benchmark Dataset for Context-Awareness via Wrist-Worn Motion Sensors". In: Data 3.3 (2018), p. 24. DOI: 10.3390/data3030024.
- [13] Jan Kuschan, Niklas Grambow, Marcel Radke, Sophie Irmer and Jörg Krüger. "Wearable Systems for Action Recognition of Industrial Assembly Tasks". At WearAcon Europe, URL: 08_J_Kuschan_WEARABLE_SYSTEMS_FOR_ACTION_RECOGNITION_OF_INDUSTRIAL_ASSEMBLY_TASKS.pdf.

 Integration menschlicher
 Bewegungsdaten im industriellen
 Kontext

Linus Aulich¹, Lene Loitsch¹, Michael Salinas², Annika Brehmer¹, Christoph Hein¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

² ARBURG GmbH + Co KG

Unsere Gesellschaft ist heute in vielen Bereichen auf die Verwendung von Kunststoffen und Polymeren angewiesen, sei es als Verpackungs- und Baumaterial oder als Bestandteil von Textilien und Kleidung. Große Mengen dieser Kunststoffe, die aus fossilen Rohstoffen hergestellt werden, gelangen in die Umwelt, wo sie mehrere hundert Jahre verbleiben und eine große Belastung für die Ökosysteme darstellen. Biologisch abbaubare Polymere wie Polyhydroxyalkanoate (PHAs) können mit Hilfe von Mikroorganismen hergestellt werden und stellen damit eine Alternative zu vielen konventionellen Kunststoffen dar. Die hohen Produktionskosten mikrobiell hergestellter Biopolymere können durch den Einsatz kostengünstiger Substrate gesenkt werden. Darüber hinaus ist die Entwicklung spezifischer Prozessketten erforderlich, um Polymere wie PHAs zu biologisch abbaubaren Kunststoffen zu verarbeiten. Ziel dieses Teilprojektes war die Entwicklung einer Prozesskette, die alle Produktions- und Verarbeitungsschritte eines PHA-Biopolymers vom Substrat aus biogenen Reststoffen bis zur Herstellung eines Bauteils umfasst. Diese bestand aus einem Bioreaktor zur mikrobiellen Produktion des Biopolymers, einem Homogenisator zur Abtrennung des Biopolymers von der Zellmasse, einem Extruder zur Herstellung eines Polymergranulats sowie einem spezifischen Maschinensystem zur additiven Fertigung. Als biogener Reststoff wurden Abfallfette aus der Lebensmittelproduktion als Substrat für die mikrobielle PHA-Produktion verwendet, wobei im Labormaßstab ein Ertrag von über $40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ PHAs erreicht wurde. Die aus den Zellen extrahierten und zu Kunststoffgranulat verarbeiteten PHAs wurden auf einem 3D-Drucker zu einer Daumenorthese verarbeitet. Die so hergestellten Bauteile wurden abschließend auf ihre biologische Abbaubarkeit untersucht. Mit der entwickelten Prozesskette kann der gesamte Kreislauf vom Rohstoff über das Produkt bis hin zum Abbau des Materials in der Umwelt nachvollzogen werden.

17.1

Einleitung

Die Abhängigkeit unserer Gesellschaft von fossilen Kunststoffen zeigt sich in ihrem weit verbreiteten Einsatz in Verpackungen, im Bauwesen und bei Konsumgütern. Über 90 % dieser Kunststoffe werden aus fossilen Ressourcen hergestellt [1]. Große Mengen davon gelangen in die Umwelt, allein im Jahr 2016 wurden schätzungsweise 23 Millionen Tonnen Kunststoffe in aquatische Ökosysteme freigesetzt, wo sie bis zu mehreren hundert Jahren verbleiben, bevor sie abgebaut werden [2, 3]. Als Mikroplastik sind sie sowohl in marinen Biota als auch im menschlichen Körper nachweisbar [4, 5]. Eine Alternative zu konventionellen Kunststoffen stellen sogenannte Biopolymere dar, welche im besten Fall aus nachwachsenden Rohstoffen hergestellt werden und in der Umwelt in vergleichsweise kurzen Zeiträumen biologisch abbaubar sind und somit die Ökosysteme weniger belasten [6]. Eine Gruppe dieser bioabbaubaren Polymere sind die aliphatischen Polyester aus der Familie der Polyhydroxyalkanoate (PHAs). PHAs werden mit Hilfe von Mikroorganismen hergestellt. Eine Vielzahl verschiedener Bakterienspezies ist in der Lage, PHAs als Energiespeicher zu synthetisieren und Kohlenhydrate oder Fettsäuren als Kohlenstoffquelle für die Biosynthese von PHAs zu nutzen. Einer dieser Mikroorganismen ist das gramnegative Bakterium *Cupriavidus necator* [7]. Der Nachteil der mikrobiologischen Herstellung von Biokunststoffen wie PHA sind die sehr hohen Produktionskosten, die eine Konkurrenzfähigkeit zu konventionellen Kunststoffen erschweren. Eine Möglichkeit diese Kosten zu senken, besteht in der Optimierung der

Produktionsprozesse, zum Beispiel durch die Verwendung kostengünstiger Substrate. Darüber hinaus ist die Entwicklung neuer Prozessketten und Produktionsverfahren zur Verarbeitung von PHA-Biopolymeren zu biologisch abbaubaren Kunststoffen von enormer Bedeutung für die Etablierung als industriell nutzbarer Werkstoff.

17.2

Stand der Technik

Chemisch betrachtet sind PHAs lineare Biopolyester, welche sich je nach Substratverfügbarkeit bei der mikrobiellen Fermentation des Mikroorganismus in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. So können verschiedene Homo- und Copolymere mit unterschiedlich langen Kohlenstoffseitenketten gebildet werden. Der am häufigsten vorkommende PHA-Typ ist Poly-(R)-Hydroxybutyrat (PHB), welches auch von *C. necator* auf Grundlage von pflanzlichen Fetten als Substrat gebildet wird [8].

PHB hat ähnliche Materialeigenschaften wie Polypropylen, ist jedoch unter normalen Umweltbedingungen vollständig biologisch abbaubar und biokompatibel und somit eine nachhaltige Alternative zu herkömmlichen Kunststoffen. Allerdings weist PHB dabei einige nachteilige Eigenschaften auf. Es zeigt zwar eine hohe Zugfestigkeit, ist jedoch sehr spröde. Zudem liegt die Schmelztemperatur von 175 °C nahe der Zersetzungstemperatur von circa 200 °C, wodurch hohe Anforderungen an die Verarbeitung von PHB als Kunststoff gestellt werden [9, 10]. Diese Aspekte schränken sowohl die industrielle Produktion als auch die Anwendungsmöglichkeiten erheblich ein, weshalb die Anpassung der Materialeigenschaften und Prozessierungsmethoden ein zentrales Ziel der Forschung darstellt.

Eine mögliche Verarbeitungstechnologie für PHAs als Kunststoff ist die additive Fertigung. Für dieses Verarbeitungsverfahren wurden bereits verschiedene Anwendungen von PHAs, insbesondere im biomedizinischen Bereich, untersucht. Bisherige Ergebnisse nutzten meist das 3D-Druckverfahren des fused deposition modeling (FDM) aus PHA-Filamenten. Aufgrund der hohen Anforderungen des Verfahrens an das Material wurden bisher lediglich Compounds aus PHA und anderen Polymeren und Additiven verwendet. Diese umfassen beispielsweise Blends aus PHA und Polylactid (PLA) mit Additiven wie Cellulose-Nanokristallen, Dicumylperoxid, Maleinsäureanhydrid oder Afrik [11-13]. Um die hervorragende biologische Abbaubarkeit von PHA effektiv nutzen zu können, müssen jedoch neue Herstellungsverfahren zur Verarbeitung von reinem PHA-Biopolymer entwickelt werden.

17.3

Implementierung einer Prozesskette zur additiven Fertigung einer Daumenorthese aus PHB

In diesem Teilprojekt soll die gesamte Prozesskette von der mikrobiellen Fermentation zur PHB-Produktion und der Extraktion des PHB-Biopolymers aus den Bakterien bis zur Extrusion des Polymers zu einem Kunststoffgranulat und dessen Anwendung in der additiven Fertigung betrachtet werden. Als kostengünstiges und biogenes Substrat werden Abfallfette aus der Lebensmittelproduktion für die mikrobielle PHB-Produktion verwendet. Zur additiven Fertigung des extrahierten Polymers soll dieses auf einem Granulat-3D-Drucker verarbeitet werden. Als Anwendungsbeispiel fungiert eine Daumenorthese, welche nach ihrer Nutzungsphase aufgrund der sehr guten Bioabbaubarkeit des PHBs beispielsweise kompostiert werden kann. Die einzelnen Prozessschritte sind im Folgenden:

Additive Fertigung mit biogenen
Polymeren

- Produktion des PHBs mittels mikrobieller Fermentation von *Cupriavidus necator* auf dem Substrat Abfallfett,
- Extraktion des PHBs aus den Bakterienzellen,
- Extrusion und Granulierung des PHBs zu einem Polymergranulat,
- 3D-Druck des PHB-Granulats,
- Überprüfung der biologischen Abbaubarkeit.

Additive Fertigung mit biogenen
Polymeren

17.4 Projektergebnisse

Die Demonstratorstrecke zur Produktion und additiven Fertigung von biogenen Polymeren wurde am Fraunhofer IPK aufgebaut und in Betrieb genommen. Die einzelnen Bestandteile und Methoden der Prozessstrecke sind im Folgenden beschrieben.

17.4.1 Mikrobielle PHB-Produktion

Die mikrobielle PHB-Produktion erfolgte durch die Fermentation des Bakteriums *Cupriavidus necator* in einem 2 L Bioreaktor. Als Kohlenstoffsubstrat wurde Abfallfett der Firma BRAL Reststoff-Bearbeitungs GmbH verwendet. Die Fermentation erfolgte in Mineralsalzmedium mit Urea als Stickstoffquelle. Der konstante Feed aus Abfallfett wurde nach ca. 10 h Prozesszeit gestartet. Offline-Proben wurden in regelmäßigen Abständen genommen und die Biotrockenmasse und deren PHB-Gehalt mittels Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) bestimmt. Das Prozessdiagramm einer durchgeführten mikrobiellen Fermentation ist in Abb.17.1 zu sehen. Bei einer Biotrockenmasse von ca. $55 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ wurde eine PHB-Konzentration von $42 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ beziehungsweise $0,76 \text{ g}_{\text{PHB}} \cdot \text{g}_{\text{Biomasse}}^{-1}$ erreicht.

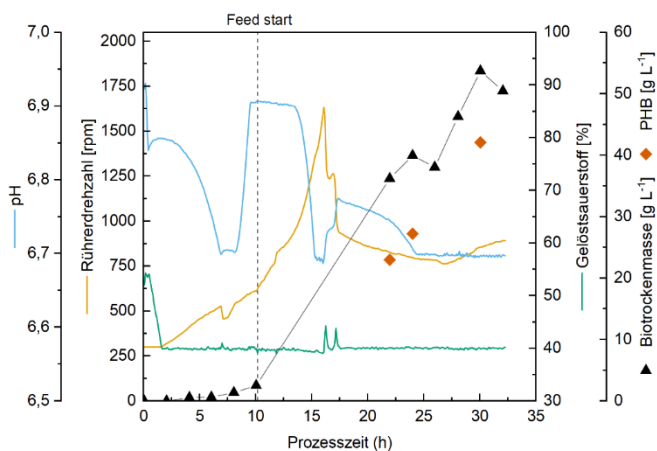


Abb.17.1 Prozessdiagramm der 2 L-Kultivierung zur Gewinnung von PHB aus Abfallfett. Der Feed des Abfallfetts wurde nach ca. 10 h gestartet.

17.4.2 Extraktion des PHB-Biopolymers und Verarbeitung zum Druckgranulat

Das von den Bakterien während der Fermentation gebildete und intrazellulär gespeicherte PHB-Biopolymer wurde mittels Hochdruckhomogenisator und chemischer Extraktion aus den Zellen gelöst und lag nach der Aufreinigung in Pulverform vor. Die Extrusion und Granulierung des PHB-Pulvers erfolgte durch die Firma COLLIN LAB & PILOT SOLUTIONS GMBH. Das so gewonnene PHB-Granulat wurde zur Materialqualifizierung für die additive Fertigung eingesetzt.

17.4.3

Additive Fertigung einer Daumenorthese aus PHB

Die additive Fertigung mit dem mikrobiell produzierten PHB erfolgte auf dem Granulatdrucker *freeformer 300-3X* der Firma ARBURG GMBH. Dieser 3D-Drucker arbeitet nach dem additiven Fertigungsverfahren ARBURG Kunststoff-Freiformen (AKF), bei welchem Standardgranulate, wie beim Spritzgießen, aufgeschmolzen werden.

Das Qualifizieren eines Materials für das AKF-Verfahren erfordert in erster Linie das Anpassen der Prozesstemperaturen, um das Material als Polymerschmelze durch die Düse austragen zu können. Hierbei wurden zur Bestimmung der initialen Prozesstemperaturen Ergebnisse aus der thermischen Analyse des PHBs mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie verwendet. Nachdem bereits in ersten Vorversuchen beobachtet werden konnte, dass PHB thermisch empfindlich ist und während der Verarbeitung degradiert, wurde versucht, die Verarbeitungstemperaturen so niedrig wie möglich zu wählen und dabei jedoch die Schmelztemperatur von ca. 175 °C nicht zu unterschreiten.

Nach der Materialqualifizierung erfolgte der Druck einer Daumenorthese aus PHB mit dem wasserlöslichen Stützmaterial Armat 12. Hierbei war insbesondere das sehr schmale Prozessfenster des PHBs problematisch, da mit hoher Wahrscheinlichkeit ein molekularer Abbau des Materials aufgrund der langen Verweilzeit im beheizten System zum Abfall des Massedrucks und damit zum Abbruch des Drucks führte. Durch die regelmäßigen Unterbrechungen des Bauauftrags und dem Abspritzen des degradierten Materials konnte die Daumenorthese vollständig aufgebaut werden. Das PHB-Biopolymer lässt sich somit grundsätzlich mit einem *freeformer 300-3X* verarbeiten, in Kombination mit dem Stützmaterial Armat 12 auch zu komplexen Bauteilen, bei denen die Stützstruktur anschließend in einem Wasserbad aufgelöst wird. Die aus PHB gedruckte Orthese mit Chipaufnahme ist in Abb.17.2 gezeigt.



Abb.17.2 Aus PHB gedruckte Daumenorthese (A) mit Stützmaterial Armat 12 (B) fertig montiert nach Lösen des Stützmaterials

17.4.4

Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit

Die biologische Abbaubarkeit des produzierten und für die additive Fertigung eingesetzten Polymers wurde über einen manometrischen Respirationstest evaluiert. Hierbei wird der Abbau der Probe indirekt über den biologischen Sauerstoffbedarf bestimmt. Dafür wurden die Proben des unbehandelten, granulierten sowie verdruckten PHBs jeweils vier Wochen in Belebtschlamm inkubiert und die Abbauraten verglichen.

Die Bestimmung der biologischen Abbaubarkeit ergab, dass unbehandeltes PHB im Vergleich zum prozessierten Polymer mit einer Abbaurate von ca. 7 % pro Woche am schnellsten abgebaut wird. Daraus ergibt sich, dass die Abbaurate unter anderem von der Materialform abhängig ist und so eine höhere Verdichtung des Materials, zum Beispiel durch die Granulierung, die Abbaugeschwindigkeit verlangsamt. Die Abbauraten der untersuchten PHB Probematerialien sind in Abb.17.3 dargestellt.

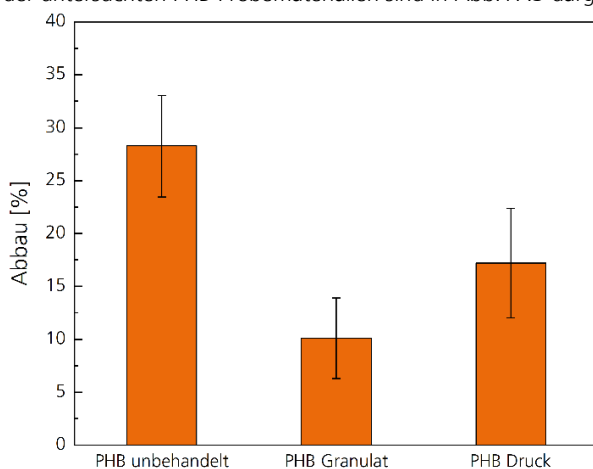


Abb.17.3 Mittels manometrischem Respirationstest bestimmter Abbau verschiedener PHB-Materialien über einen Zeitraum von vier Wochen in Belebtschlamm.

17.5

Zusammenfassung

Die in diesem Teilprojekt erfolgreich implementierte additive Fertigung mit biogenen Polymeren auf Grundlage von Abfallfett kann als Beispiel einer biologisch transformierten Wertschöpfungskette dienen. Aus diesem Beispiel lassen sich folgende Handlungsempfehlungen ableiten. Zum einen sollte bei der Implementierung einer nachhaltigen Wertschöpfungskette ein großer Fokus auf die Nutzung regionaler Substrat-Abfallströme gelegt werden. Dazu sollten Unternehmen der produzierenden Industrie in der räumlichen Nähe des Verarbeitungsstandorts identifiziert werden, welche einen Abfallstoff als Substrat zur Verfügung stellen können, wie in diesem Beispiel durch die Verwendung von lokal gesammelten Abfallfetten gezeigt. Dies reduziert Transportkosten und fördert die regionale Kreislaufwirtschaft. Zum anderen sollten aus der implementierten Wertschöpfungskette weitere Anwendungsbeispiele für biologisch abbaubare Polymere entwickelt werden. Es wäre sinnvoll, Produkte aus biogenen Polymeren, wie zum Beispiel Einwegartikel, zu untersuchen und Prototypen zu erstellen, um das Marktpotential und die praktischen Einsatzmöglichkeiten dieser Materialien aufzuzeigen. Darüber hinaus könnte die Erforschung innovativer Anwendungsmethoden dazu beitragen, die bisher unzureichenden Materialeigenschaften bezüglich mechanischer und chemischer Stabilität zu verbessern.

17.6

Literatur

- [1] World Economic Forum: The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics (2016). URL: <https://www.weforum.org/publications/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics/> [Stand: 31.01.2016]
- [2] Borrelle et al.: Predicted growth in plastic waste exceeds efforts to mitigate plastic pollution. *Science* 369 (2020), Nr. 6510, S. 1515-1518
- [3] Chamas et al.: Degradation Rates of Plastics in the Environment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* 8 (2020), Nr. 9, S. 3494–3511
- [4] Rezaia et al.: Microplastics pollution in different aquatic environments and biota: A review of recent studies. *Marine Pollution Bulletin* 133 (2020), Nr. 3, S. 191–208
- [5] Vethaak et al.: Microplastics and human health. *Science* 371(2021), Nr. 6530, S. 672–674
- [6] Narancic et al.: Recent Advances in Bioplastics: Application and Biodegradation. *Polymers* 12 (2020), Nr. 4, S. 920
- [7] Verlinden et al.: Production of polyhydroxyalkanoates from waste frying oil by *Cupriavidus necator*. *AMB Express* 1 (2011), Nr. 11
- [8] Chakraborty et al.: PHA productivity and yield of *Ralstonia eutropha* when intermittently or continuously fed a mixture of short chain fatty acids. *Journal of Biomedicine and Biotechnology* (2012) 506153
- [9] Byrom: Production of poly- β -hydroxybutyrate: poly- β -hydroxyvalerate copolymers. *FEMS Microbiology Letters* 103 (1992), 2, S. 247–250
- [10] Dai et al.: Characterisation of polyhydroxyalkanoate copolymers with controllable four-monomer composition. *Journal of Biotechnology* 134 (2008) 1–2, S. 137–145
- [11] Kontárová et al: Printability, Mechanical and Thermal Properties of Poly(3-Hydroxybutyrate)-Poly(Lactic Acid)-Plasticizer Blends for Three-Dimensional (3D) Printing. *Materials* 13 (2020) 21, S. 4736
- [12] Frone et al.: Morpho-Structural, Thermal and Mechanical Properties of PLA/PHB/Cellulose Biodegradable Nanocomposites Obtained by Compression Molding, Extrusion, and 3D Printing. *Nanomaterials* 10 (2019) 1, S. 51
- [13] Chiulan et al.: Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters. *Bioengineering* 5 (2017) 1, S. 2

18

Integrierter Forschungsdemonstrator

Integrierter
Forschungsdemonstrator

Sebastian Wehking¹, Till Tschiltschke¹

¹ Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

Auf Grundlage der im Projekt BioFusion 4.0 erprobten Modelle und Technologien wurde am Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK ein integrierter Forschungsdemonstrator entwickelt. Eine modellhafte Wertschöpfungskette dient als Strukturierungsrahmen zur Abbildung aller erforderlichen Aktivitäten und Prozesse, von der Produktentwicklung über die Materialherstellung bis hin zu Nutzung und Instandhaltung im Kontext nachhaltiger Kreislaufwirtschaft. Der Technologie-demonstrator vereint die in BioFusion 4.0 entwickelten Modelle und Methoden, die in den beteiligten Unternehmen dezentral erprobt wurden.

18.1

Einleitung

Die Integration biologischer Prinzipien in industrielle Prozesse eröffnet neue Potenziale für nachhaltige Wertschöpfung. Im Rahmen des Projekts BioFusion 4.0 wurden innovative Modelle und Technologien entwickelt, die im Forschungsdemonstrator am Fraunhofer IPK miteinander verknüpft werden. Dieser Demonstrator dient dazu, die biologisch transformierte Wertschöpfung entlang des gesamten Lebenszyklus eines spezifischen Produkts – einer Daumenorthese aus biobasiertem Material – anschaulich darzustellen. Die Daumenorthese ermöglicht Werkern eine ergonomische Unterstützung bei der Montage von Klemmverbindungen, und bietet somit einen praktischen Anwendungsfall für die in diesem Projekt entwickelten Konzepte. Im Rahmen des Demonstrators werden sämtliche Aktivitäten und Prozessschritte des Lebenszyklus abgebildet, wobei die Lebenszyklusphasen „Begin of Life“ (Produktionsplanung und -produktion), „Middle of Life“ sowie „End of Life“ detailliert betrachtet werden. Die Erprobung am Demonstrator ermöglicht es, die Potenziale und Herausforderungen der biologisch transformierten Wertschöpfung im industriellen Kontext zu beleuchten und bietet wertvolle Erkenntnisse für die zukünftige Forschung und Entwicklung in diesem Bereich.

18.2

Vorbereitung und Koordination der Erprobung

Die Ausarbeitung und initiale Erprobung der verschiedenen Anwendungsfälle erfolgten zunächst in Teilen dezentral. Ziel war es, die Gesamtsicht und spätere Integration der Vorgehensweisen und Ergebnisse sicherzustellen. Den Rahmen hierzu bildeten die entwickelten Zukunftsszenarien sowie die entwickelten Modelle und Methoden. Dabei betrifft die Koordination inhaltliche und zeitliche Aspekte sowie die Einrichtung von Arbeitsgruppen und die Festlegung von Verantwortlichkeiten.

Folgende Aufgaben wurden durchgeführt:

1. Übergreifende systemische Planung der Anwendungsfälle, Demonstratoren und deren Schnittstellen,
2. Definition der übergreifenden Fokusthemen und Festlegung der Arbeitsgruppen mit allen relevanten Akteuren,
3. Klärung von Aufgaben und Arbeitsteilung auf inhaltlicher, organisatorischer und zeitlicher Ebene (z.B. Definition von Testaufbau und -durchführung, Schnittstellenkommunikation, Planung der technischen Integration) sowie

4. Begleitende Betrachtung der ökologischen Nachhaltigkeit der entwickelten Lösungen

Das resultierende Konzept ist der nachfolgenden Abb. 18.1 zu entnehmen.

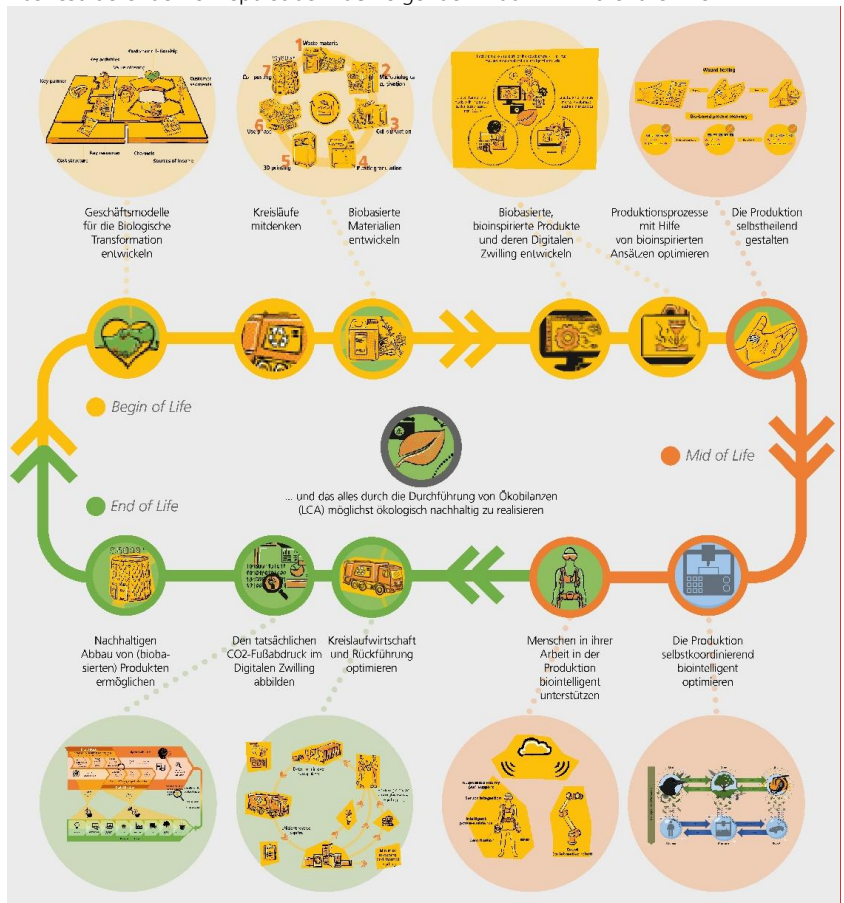


Abb. 18.1 Integration biologischer Prinzipien entlang des gesamten Produktlebenszyklus

18.2.1

Aufbau und Inbetriebnahme der Demonstratoren

Zunächst wurden die dezentral ausgearbeiteten und initial erprobten Technologiedemonstratoren weiter in den einzelnen Teilprojekten erprobt. Dabei wurden verschiedene Bioprinzipien in den Anwendungsfällen umgesetzt und deren ökologische Nachhaltigkeit begleitend untersucht. Die technologischen Erprobungen in den einzelnen Teilprojekten wurden zur Demonstration und zur Darstellung nach Außen in einen verknüpften Technologiedemonstrator an mehreren Standorten (PTZ, Mercedes-Benz Werk Berlin, BRAL, budatec) integriert. Der Aufbau und die Inbetriebnahme der Demonstratoren wurden parallel zur technologischen Erprobung durchgeführt. Die in Betrieb genommenen Demonstratoren wurden im Rahmen der dritten Zukunftswerkstatt präsentiert.

Für die Schnittstellen der Demonstratoren wurde am Beispiel der verwendeten 3D Drucker ein Proof of Concept in CONTACT Software Elements for IoT erstellt (siehe Abb. 18.2).

Integrierter

Forschungsdemonstrator

Kommentiert [RT1]: Hier ist ein Schreibfehler bei dem zweiten Textfeld unten links. Karamo hatte diese Grafik aber nachgebildet für die werkstatt technik online:

Bild 1 hier: R:\Veröffentlichungen_und_Konferenzen\2025\wt online 2025\Abbildungen

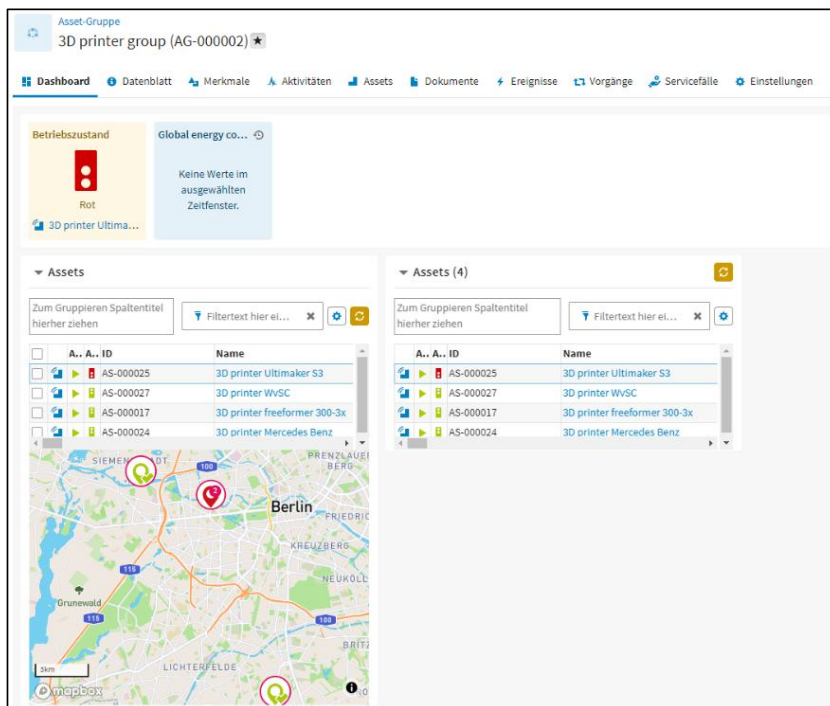


Abb. 18.2 Dashboard mit den verfügbaren 3D Druckern und Betriebszuständen

Der integrierte Technologiedemonstrator wurde im Virtual Engineering Lab (VEL) des Fraunhofer IPK eingerichtet. Es wurde ein Produktionsumfeld dargestellt, welches mehrere Produktionsprozesse umfasst. Zunächst wurde der 3D-Druck als zentrale Produktionsmethode für Verschleißteile (Werkzeug, Werkzeughalter oder Werkstückhalter) in der Produktion identifiziert. Im Sinne des Projektrahmens und der ökologischen Potenziale wird hier ein biogenes Polymer verwendet (siehe Kapitel 17). Als Anwendungsbeispiel wurde eine Daumenorthese ausgewählt, jedoch ist im Weiteren auch die Übertragung auf andere Produkte denkbar. Für den Fall, dass ein solches Verschleißteil defekt ist, wird ein Microservice aufgerufen und ein 3D-Druck für ein temporäres Ersatzteil angestoßen, welches sich nach Ende des Einsatzes selbst zersetzt, da es aus biogenen Polymeren besteht. Die Vernetzung der verschiedenen Technologien ist von entscheidender Bedeutung, um eine effektive Zusammenarbeit und Koordination entlang des gesamten Lebenszyklus zu ermöglichen.

Zur finalen Inbetriebnahme des Demonstrators wurden Räumlichkeiten am Fraunhofer IPK geschaffen. Der Demonstrator für BioFusion 4.0 wurde im Virtual Engineering Lab (VEL) aufgebaut.

18.3 Projektergebnisse

Die Projektergebnisse gliedern sich in die fachliche Ausarbeitung und den technologischen Aufbau und die Inbetriebnahme des Demonstrators.

18.3.1

Hauptergebnis 1: Fachlich (Storyline)

Auf Basis der zuvor erprobten Modelle und Technologien im Forschungsprojekt BioFusion 4.0 wurde ein integrierter Forschungsdemonstrator am Fraunhofer IPK geschaffen. Dieser demonstriert entlang des Lebenszyklus einer Daumenorthese die biologisch transformierte Wertschöpfung. Im Demonstrator werden alle Aktivitäten und Prozessschritt entlang des Lebenszyklus angeordnet. Wie bei den Personas und User Stories werden auch hier die vier Phasen Begin of Life Planning, Begin of Life Production, Middle of Life und End of Life betrachtet.

Der Kreislauf startet mit der Planungsphase. Hier liegt der Fokus auf der Planung des Produkts und der Vorbereitung der Produktion. Dafür werden als erstes verschiedene Produktvarianten, sowie deren Digitale Zwillinge entwickelt und konfiguriert. Nachdem ein Produktionsauftrag eingegangen ist, wird überprüft, ob das benötigte Material vorliegt. Ist dies nicht der Fall, wird das Material vor Ort im biotechnologischen Verfahren hergestellt oder von einem Lieferanten bezogen. Hierbei kommt das interaktive Lagebild zum Einsatz, um einen möglichen Lieferantenausfall frühzeitig zu detektieren und einen alternativen Lieferanten zu bestimmen. Auf Basis der im Begin of Life getroffenen Entscheidungen kann der geplante CO₂-Fußabdruck am Ende der Planungsphase bestimmt werden.

Als nächstes folgt die Produktionsphase. Mithilfe des Multi-Agenten Systems wird ermittelt, welche Ressourcen (3D-Drucker, Bearbeitungsstationen, Werker) verfügbar sind. Daraufhin wird der Druckauftrag an den ermittelten 3D-Drucker gesendet. Dieser druckt die benötigten Bauteile aus biogenem Polymer. Während des Drucks werden konstant der Energieverbrauch und die Wärme des Druckers sensorisch erfasst und im Digitalen Zwilling mit integrierter Ökobilanz ausgewertet. Ist der Druckauftrag abgeschlossen, werden alle für die Orthese benötigten Bauteile entnommen. Anschließend wird mittels der automatisierten Objekterkennung auf die Vollständigkeit der erzeugten Bauteile geprüft. Ist diese Prüfung positiv, wird einem Werker die entsprechende Montageanleitung für die Orthese ausgegeben. Bei der Montage tragen die Werker eine Sensorweste, und erhalten anhand analysierter Ergonomiedaten Empfehlungen für eine optimale Tischhöhe. Nach fertiger Montage wird eine Qualitätskontrolle mittels automatisierter Objekterkennung durchgeführt. In der Produktionsphase werden in Echtzeit Energiedaten aufgezeichnet und der tatsächliche CO₂-Fußabdruck im Digitalen Zwilling berechnet und angegeben.

Im Anschluss folgt die Nutzungsphase. Hier wird die Orthese von Werkern bei der Montage eingesetzt. Dabei werden Nutzungsdaten (z.B. Anzahl der Nutzungszyklen) erfasst und im Digitalen Zwilling zusammengeführt.

Am Ende des Produktlebenszyklus wird die automatisierte Objekterkennung eingesetzt, um den Zustand der Orthese zu bewerten. Darauf aufbauend werden verschiedenen R-Strategien zur Verwertung der einzelnen Bauteile vorgeschlagen. Die Orthese wird im Anschluss durch eine Werkerin oder einen Werker in Sensorweste unter demontiert. Für die einzelnen Bauteile werden dann die zuvor bestimmte R-Strategie durchgeführt. Im Demonstrator werden drei Strategien abgebildet. Im Zuge der energetischen Verwertung (recover) wird durch das Zersetzen des Bauteils Energie zurückgewonnen. Die zweite R-Strategie ist das Recycling, hier wird das Material des Bauteils genutzt für die Herstellung eines neuen Bauteils. Wird der Zustand des Bauteils als sehr gut bewertet, so kann dieses Bauteil wiederverwendet werden.

Integrierter

Forschungsdemonstrator

18.3.2

Hauptergebnis 2: Technologischer Aufbau und Inbetriebnahme

Für den technologischen Aufbau des Demonstrators wurden die Einzelemente anhand der entwickelten Storyline vernetzt. Dabei wurden insbesondere die folgenden Schritte durchgeführt:

- Planung der benötigten Software-Infrastruktur und entsprechender Schnittstellen
- Durchführung der räumlichen Planung
- Aufbau des IT-Netzwerks und Sicherstellen der Interkonnektivität der Komponenten
- Testen der Komponenten
- Softwareseitige Vernetzung der Komponenten (u.a. des 3D-Druckers und der IT-Systeme)
- Durchführung der Gefährdungsbeurteilung
- die finale Vernetzung der Komponenten und das Testen der vernetzten Gesamtlösung in verschiedenen Szenarien
- Inbetriebnahme

Folgende Schritte sind auch nach Abschluss des Forschungsprojekts geplant:

- Integration in weitere Forschungsprojekte zu dem Sicherstellen der wissenschaftlichen Verwertung
- Durchführung weiterer Nutzerstudien zur Validierung des Transfers in andere Industrien

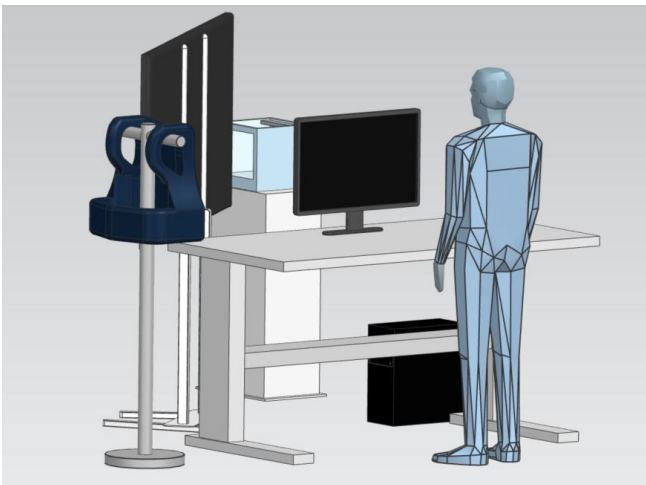


Abb. 18.3 CAD-Modell des physischen Demonstratoraufbaus am Fraunhofer IPK

Der physische Demonstratoraufbau (siehe Abbildung 18.3) beinhaltet die Darstellung des biologisch transformierten Geschäftsmodells (Teilprojekt A1). Auf dem Bildschirm wird eine Störung der Lieferkette und ein entsprechender Alternativprozess (B2) angezeigt. Die Orthesenteile können vor Ort gedruckt (C2) und montiert werden. Während der Montage erfolgt eine Erfassung und Visualisierung von Ergonomiedaten (C1) und die Bauteilerkennung (A2). Das Layout beinhaltet auch einen Arbeitsplatz zur Nutzung der Orthese. Wird die Orthese zerstört oder muss sie repariert werden, werden potenzielle R-Strategien vorgeschlagen (A2). Die Datenerfassung im Gesamtprozess erfolgt durch das Teilprojekt B3. Die begleitende Nachhaltigkeitsbetrachtung mithilfe des Digitalen Zwillings wurde im Rahmen von B1 umgesetzt.

Integrierter
Forschungsdemonstrator

Abschließend wurde der integrierte Forschungsdemonstrator in den Räumlichkeiten des VEL am Fraunhofer IPK aufgebaut (siehe Abbildung 18.4).

Integrierter

Forschungsdemonstrator



Abb. 18.4 Fertiger Aufbau des integrierten Forschungsdemonstrators im Virtual Engineering Lab am Fraunhofer IPK

19 Handlungsempfehlungen

Im Rahmen der BIOTRAIN-Studie wurden zehn wesentliche Handlungsfelder der biologischen Transformation identifiziert, die als Ordnungsrahmen für die Entwicklung konkreter Handlungs- und Gestaltungsempfehlungen dienen. Das Projekt BioFusion 4.0 hat sich auf die aktive Weiterentwicklung von sechs dieser Handlungsfelder konzentriert, um Unternehmen dabei zu unterstützen, die Biologische Transformation in ihre Wertschöpfung zu integrieren. Diese Handlungsfelder umfassen: „Biologie-Technik-Schnittstelle“, „Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle“, „Biohybride, bioinspirierte Produktionstechnik und -organisation“, „Menschzentrierte Arbeitsplatzgestaltung“, „Bioinspirierte, biobasierte Datenverarbeitung“ sowie „Biointelligente Materialien“. In den folgenden Abschnitten werden anhand dieser Handlungsfelder mögliche Schritte formuliert, die Unternehmen auf ihrem Weg zu einer biobasierten, biointegrierten und biointelligenten Wertschöpfung unterstützen können.

19.1 Biologie-Technik-Schnittstelle

Die Integration von biologischen und technischen Systemen erfordert gezielte Maßnahmen, um deren Kommunikation und Interaktion effizient zu gestalten. Hier sind einige praxisnahe Umsetzungshilfen:

1. **Markt- und Technologierecherchen durchführen:** Führen Sie gezielte Markt- und Technologierecherchen durch, um Entwicklungen im Bereich biointelligenter Sensortechnologien frühzeitig zu erkennen und für Ihr Unternehmen nutzbar zu machen.
2. **Interdisziplinäre Teams aufbauen und stärken:** Fördern Sie die Zusammenarbeit zwischen Biologen, Ingenieurinnen und Informatikern, um innovative biointelligente Lösungen zu entwickeln.
3. **Schulungs- und Weiterbildungsprogramme:** Schulen Sie gezielt Mitarbeitende zur Integration biologischer Prozesse in technische Systeme, damit diese die neuen Technologien kompetent einsetzen können.
4. **Prototyping und Pilotprojekte für Biologie-Technik-Schnittstellen umsetzen:** Testen Sie die Integration von Sensorik, Aktorik und Algorithmik durch gezielte Pilotprojekte, um deren Praxistauglichkeit zu bewerten und weiterzuentwickeln.
5. **Digitale Zwillinge nutzen:** Nutzen Sie digitale Zwillinge zur Simulation und Optimierung biologisch-technischer Systeme, um deren Effizienz und Nachhaltigkeit zu steigern.
6. **Sensorik zur Erfassung biologischer Signale integrieren:** Implementieren Sie innovative Sensorlösungen, um biologische Parameter zuverlässig zu erfassen und technische Prozesse entsprechend zu steuern.
7. **Datenanalyse und algorithmische Optimierung vorantreiben:** Setzen Sie auf fortschrittliche Datenanalyse-Methoden und Algorithmen, um biologisch-technische Daten effektiv auszuwerten und zu nutzen.
8. **Kooperationen mit Forschungseinrichtungen und Technologiepartnern eingehen:** Arbeiten Sie mit spezialisierten Partnern zusammen, um Zugang zu neuesten Erkenntnissen und Technologien im Bereich Biologie-Technik-Schnittstellen zu erhalten.

Durch diese Schritte können Unternehmen die Potenziale der Biologie-Technik-Schnittstelle gezielt erschließen und innovative, zukunftsfähige Lösungen entwickeln.

19.2

Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle

Die biologische Transformation eröffnet Unternehmen neue Möglichkeiten, indem sie biologische Prinzipien und Technologien mit bestehenden Wertschöpfungsprozessen verbindet. Um diese Potenziale erfolgreich zu nutzen, können sich Unternehmen an folgenden Maßnahmen zur Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle orientieren:

1. **Markt- und Bedarfsanalyse:** Identifizieren Sie relevante Trends und Kundenbedürfnisse, um innovative Geschäftsmodelle abzuleiten.
2. **Identifikation technologischer Potenziale:** Ermitteln Sie, welche digitalen und biotechnologischen Innovationen Ihr Geschäftsmodell erweitern oder verbessern können.
3. **Interdisziplinäre Zusammenarbeit:** Binden Sie Fachleute aus verschiedenen Fachrichtungen ein, um vielseitige Perspektiven und kreative Lösungsansätze zu fördern.
4. **Prototyping und Experimentieren:** Entwickeln und testen Sie frühzeitig Prototypen Ihrer Geschäftsmodelle, um Risiken zu minimieren und Marktfeedback einzuholen.
5. **Agile Methoden anwenden:** Etablieren Sie agile Methoden und flexible Strukturen, um schnell auf Marktveränderungen reagieren zu können.
6. **Nachhaltigkeitsbewertung:** Berücksichtigen Sie ökologische und soziale Aspekte in Ihren Geschäftsmodellen, um langfristige Nachhaltigkeit und Akzeptanz bei den Kunden zu gewährleisten.
7. **Partnerschaften und Netzwerke ausbauen:** Kooperieren Sie mit anderen Unternehmen, Start-ups oder Forschungseinrichtungen, um Ressourcen und Wissen zu bündeln und synergetische Effekte zu erzielen.
8. **Kundenfeedback integrieren:** Nutzen Sie Kundenfeedback aktiv, um Ihre Geschäftsmodelle laufend zu verbessern und an die Bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer anzupassen.

Diese Schritte können Unternehmen dabei helfen, innovative und zukunftsfähige Geschäftsmodelle zu entwickeln, die sich an den dynamischen Anforderungen des Marktes orientieren.

19.3

Biohybride, bioinspirierte Produktionstechnik und -organisation

Die biologische Transformation eröffnet neue Möglichkeiten zur Gestaltung von Produktionssystemen. Hier sind einige praxisnahe Umsetzungshilfen:

1. **Entwicklung adaptiver Systeme:** Integrieren Sie adaptive Systeme, die Entscheidungen basierend auf Echtzeitdaten treffen können, um Flexibilität und Effizienz zu erhöhen.
2. **Nutzung biologischer Prinzipien:** Implementieren Sie Prinzipien wie Selbstorganisation, Selbstanpassung und Selbstheilung, um Produktionssysteme resilienter und weniger ressourcenintensiv zu gestalten.
3. **Multi-Agenten-Systeme:** Modellieren Sie Menschen, Maschinen und IT als Softwareagenten, die autonom agieren und kooperativ Entscheidungen treffen.
4. **Echtzeit-Datenanalyse:** Setzen Sie Sensoren und IoT-Technologien ein, um kontinuierlich Daten zu erfassen und die Prozesse dynamisch anzupassen.

5. **Schulung der Mitarbeitenden:** Fördern Sie eine Schulungskultur, in der Mitarbeitende lernen, mit neuen Technologien und selbstorganisierten Systemen umzugehen.
6. **Prototyping und Testing:** Erstellen Sie Prototypen bionischer Systeme und testen Sie diese in realen Produktionsumgebungen, um deren Wirksamkeit zu evaluieren.
7. **Etablierung adaptiver Steuerungssysteme:** Entwickeln Sie Produktionssysteme, die auf Echtzeitdaten basierende, autonome Anpassungsmechanismen implementieren, um flexibel auf Veränderungen in der Produktionsumgebung zu reagieren.
8. **Verankerung nachhaltiger Produktionsprozesse:** Integrieren Sie Strategien zur Schließung von Materialkreisläufen und Ressourcenschonung, die auf biologischen Vorbildern basieren, um eine nachhaltigere Produktion zu gewährleisten.

Mit der Orientierung an diesen Schritten können Unternehmen biologische Prinzipien gezielt in ihre Produktionsprozesse integrieren, um deren Effizienz und Anpassungsfähigkeit zu steigern.

19.4

Menschenzentrierte Arbeitsplatzgestaltung

1. **Ergonomische Analyse:** Führen Sie systematische ergonomische Bewertungen von Arbeitsplätzen durch, um potenzielle Gefahren zu identifizieren und die Gestaltung zu optimieren.
2. **Feedbacksysteme implementieren:** Nutzen Sie Sensoren und Wearables, um Echtzeit-Feedback zur Körperhaltung und Bewegung der Mitarbeitenden zu geben, um ergonomische Fehler sofort zu korrigieren.
3. **Partizipative Gestaltung:** Involvieren Sie Mitarbeitende in den Gestaltungsprozess ihrer Arbeitsumgebung, um deren Bedürfnisse und Präferenzen zu berücksichtigen.
4. **Flexible Arbeitsplätze:** Entwickeln Sie modulare und anpassbare Arbeitsplätze, die auf verschiedene Aufgaben und individuelle Bedürfnisse der Mitarbeitenden abgestimmt sind.
5. **Schulungen anbieten:** Implementieren Sie Schulungsprogramme zur Sensibilisierung für ergonomische Praktiken und zur Nutzung neuer Technologien.
6. **Technologische Unterstützung:** Setzen Sie intelligente Assistenzsysteme ein, die Mitarbeitende bei der Ausführung körperlich anstrengender Aufgaben unterstützen.
7. **Regelmäßige Evaluierung:** Führen Sie regelmäßige Bewertungen der Arbeitsplatzgestaltung durch, um kontinuierliche Verbesserungen sicherzustellen.
8. **Gesundheitsfördernde Maßnahmen:** Implementieren Sie Programme zur Gesundheitsförderung, die Stressbewältigung und Fitness der Mitarbeitenden unterstützen.

Durch die Umsetzung dieser Ansätze können Unternehmen eine gesundheitsfördernde und produktive Arbeitsumgebung schaffen, die den Bedürfnissen der Mitarbeitenden gerecht wird.

19.5

Bioinspirierte, biobasierte Datenverarbeitung

1. **Entwicklung von Algorithmen:** Nutzen Sie bioinspirierte Algorithmen, wie genetische Algorithmen oder Schwarmintelligenz, um Datenverarbeitungsprozesse zu optimieren und adaptive Systeme zu schaffen.

Handlungsempfehlungen

2. **Echtzeit-Datenintegration:** Integrieren Sie Sensoren und IoT-Technologien, um Echtzeitdaten zu sammeln und zu analysieren, was eine dynamische Anpassung an Veränderungen ermöglicht.
3. **Interaktive Benutzeroberflächen:** Entwickeln Sie benutzerfreundliche Dashboards, die es Anwendern ermöglichen, Daten schnell zu interpretieren und Entscheidungen basierend auf biologisch inspirierten Modellen zu treffen.
4. **Datenfusionstechniken:** Implementieren Sie Techniken zur Datenfusion, um Informationen aus verschiedenen Quellen zu kombinieren und so ein umfassenderes Verständnis komplexer Systeme zu ermöglichen.
5. **Schulung und Sensibilisierung:** Bieten Sie Schulungen an, um Mitarbeitende in der Anwendung bioinspirierter Datenverarbeitungstechniken zu schulen und deren Nutzen zu verdeutlichen.
6. **Prototypentwicklung:** Erstellen Sie Prototypen für die biobasierte Datenverarbeitung, um Konzepte in der Praxis zu testen und weiterzuentwickeln.
7. **Kollaborationen eingehen:** Arbeiten Sie mit Forschungseinrichtungen und Start-ups zusammen, um neueste Erkenntnisse und Technologien in Ihre Datenverarbeitungsstrategien zu integrieren.
8. **Nachhaltigkeitsbewertung durchführen:** Nutzen Sie Ökobilanzen und Lebenszyklusanalysen, um die Umweltauswirkungen von Datenverarbeitungssystemen zu bewerten und zu optimieren.

Durch die Umsetzung dieser Schritte können Unternehmen die Vorteile bioinspirierter und biobasierter Datenverarbeitungstechnologien nutzen und ihre Prozesse nachhaltiger gestalten.

19.6

Biointelligente Materialien

1. **Materialforschung und -entwicklung:** Investieren Sie in die Forschung nach biobasierten und biologisch abbaubaren Materialien, um nachhaltige Alternativen zu konventionellen Kunststoffen zu entwickeln.
2. **Pilotprojekte initiieren:** Testen Sie neue biointelligente Materialien in Pilotprojekten, um deren Eigenschaften und Anwendbarkeit in realen Produktionsumgebungen zu evaluieren.
3. **Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen:** Kooperieren Sie mit Hochschulen und Forschungseinrichtungen, um Zugang zu neuesten Forschungsergebnissen und Technologien zu erhalten.
4. **Zertifizierung und Standards:** Stellen Sie sicher, dass neue Materialien den erforderlichen Umwelt- und Sicherheitsstandards entsprechen, um deren Marktfähigkeit zu gewährleisten.
5. **Wertstoffkreisläufe schaffen:** Entwickeln Sie Konzepte für die Rückführung und Wiederverwertung von biointelligenten Materialien im Produktionsprozess.
6. **Schulung der Mitarbeitenden:** Schulen Sie Ihre Mitarbeitenden im Umgang mit neuen Materialien und deren spezifischen Eigenschaften, um eine erfolgreiche Integration in die Produktion zu gewährleisten.
7. **Ökobilanzen erstellen:** Führen Sie Ökobilanzen durch, um die Umweltauswirkungen neuer Materialien zu bewerten und kontinuierlich zu verbessern.
8. **Marktforschung betreiben:** Analysieren Sie Markttrends und Kundenbedürfnisse, um die Entwicklung von biointelligenten Materialien gezielt auszurichten.

Durch die Umsetzung dieser Schritte können Unternehmen die Vorteile biointelligenter Materialien nutzen und ihre Produktionsprozesse nachhaltiger gestalten.

Handlungsempfehlungen

20 Glossar

Glossar

B

Bioindikatoren	Bioindikatoren sind Organismen, die aufgrund spezifischer Umwelteinflüsse mit einer Veränderung ihrer Lebensfunktion reagieren.
Biologische Transformation	Biologische Transformation in der Produktion ist ein ganzheitlicher Ansatz zur Veränderung der industriellen Wertschöpfung hin zu nachhaltig optimierten Produkt- und Produktionssystemen durch eine beschleunigte Konvergenz von technischen, digitalen und biologischen Systemen in der Produktionsumgebung. 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).
Biopolymere	Biopolymere sind eine umweltfreundliche Alternative zu konventionellen Kunststoffen, da sie idealerweise aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen und in der Natur innerhalb kurzer Zeit biologisch abgebaut werden können.
Business Model Canvas	Das Business Model Canvas ist ein Tool, das Unternehmen ermöglicht ihre bestehenden Geschäftsmodelle systematisch zu analysieren, zu visualisieren und weiterzuentwickeln.

D

Digitaler Master	Im digitalen Zwillingkonzept repräsentiert der digitale Master alle relevanten Modelle der Planungsphase des betrachteten physischen Systems (z.B. CAD-Modell, Bill of Materials).
Digitaler Schatten	Im digitalen Zwillingkonzept besteht der digitale Schatten aus Daten, die über den Lebenszyklus des abgebildeten Systems gesammelt werden (z.B. Betriebs-, Zustands- oder Prozessdaten).
Digitaler Zwilling	Digitale Zwillinge sind digitale Abbildungen realer Produkte, die Zustände, Eigenschaften und Verhalten ihrer physischen Gegenstände repräsentieren. Sie erfassen Daten über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts und ermöglichen es, diese ganzheitlich zu analysieren, zu simulieren und zu optimieren.

E

Exoskelett	Ein Exoskelett ist ein mechanisches System, das menschliche Bewegungen aktiv oder passiv unterstützt, die Kraft und Ausdauer steigert oder Bewegungen erfasst und in Echtzeit auf robotische Systeme überträgt.
------------	---

F

Fermentation Fermentation ist ein biochemischer Prozess, bei dem Mikroorganismen wie Bakterien oder Hefen organische Stoffe, wie Zucker, in chemische Verbindungen umwandeln, oft unter Ausschluss von Sauerstoff. Dieser Prozess wird unter anderem zur Herstellung von Biopolymeren aus nachwachsenden Rohstoffen genutzt.

G

Ganzheitliche Produktionssysteme Ganzheitliche Produktionssysteme (GPS) verfolgen das Ziel, Ressourcen effizient einzusetzen, um eine maximale Produktivität zu erreichen und die Wettbewerbsfähigkeit zu sichern

Geschäftsmodell Ein Geschäftsmodell beschreibt die Funktionsweise und Art der Wertschöpfung eines Unternehmens, definiert die Ressourcen, Aktivitäten und Partnerschaften, die für ein Wertangebot benötigt werden und stellt über die Kundenbeziehungen, -segmente und den Wettbewerb das Unternehmensumfeld dar.

Geschäftsmodellmuster In Abgrenzung zu spezifischen Geschäftsmodellen einzelner Unternehmen handelt es sich bei Geschäftsmodellmustern um allgemeine Konzepte, die sich durch geschickte Anpassung in jeder Organisation anwenden lassen.

I

Industrie 4.0 Die Vision von Industrie 4.0 beschreibt eine hochflexible, ressourcenschonende und urbanverträgliche Produktion. Im Zentrum der Industrie 4.0 steht die intelligente Fabrik, in der Mensch und Maschine Hand in Hand arbeiten, wobei Arbeitnehmer aller Generationen durch intelligente Assistenzsysteme unterstützt werden.

Internet of Things Das Internet of Things (IoT) bezeichnet ein Netzwerk von physischen Geräten, Fahrzeugen, Haushaltsgeräten und anderen Objekten, die mit Sensoren, Software und Internetverbindung ausgestattet sind. Diese Geräte können Daten sammeln, austauschen und miteinander kommunizieren, um Prozesse zu automatisieren, Informationen in Echtzeit bereitzustellen und die Effizienz zu steigern. IoT ermöglicht eine Vielzahl von Anwendungen, von Smart Homes bis hin zu industriellen Automatisierungslösungen.

K

Kreislaufwirtschaft Die Kreislaufwirtschaft, auch Circular Economy genannt, ist ein Wirtschaftssystem, das auf die Vermeidung von Abfall und die Verringerung von Ressourcennutzung abzielt. Sie basiert auf wiederherstellenden und regenerativen Prinzipien sowie Verhaltensweisen, die darauf abzielen, die Nutzungsdauer und den Wert von Produkten, Komponenten und Ressourcen so lange wie möglich zu erhalten.

Glossar

M

Multiagenten-system Multiagentensysteme bestehen aus Softwareagenten, die dezentral agieren und kooperative Entscheidungen zur Erreichung gemeinsamer Systemziele treffen.

O

Ökobilanzierung Die Ökobilanzierung (engl.: LCA – Life Cycle Assessment) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen entlang ihres gesamten Lebenswegs.

Ökologisch intelligenter Service Ein ökologisch intelligenter Service, im Kontext der Produktion, ist eine analoge oder digitale Dienstleistung, die die Wechselwirkungen zwischen Menschen und Maschinen im Ökosystem kennt, den Ist-Zustand erkennt, Handlungsoptionen anbietet und die getroffene Wahl ausführt. Die Dienstleistung kann dabei singular, als Verbund von mehreren Dienstleistungen oder aber hybrid, also im Zusammenwirken von Produkt und Dienstleistung erbracht werden.

R

R-Strategien R-Strategien systematisieren verschiedene Verwertungsstrategien im Rahmen der Kreislaufwirtschaft und zielen darauf ab, den Verbrauch von natürlichen Ressourcen zu reduzieren sowie die Kreislaufführung von Materialien zu unterstützen.

S

Selbstheilung Unter Selbstheilung wird der Mechanismus verstanden, dass ein System nicht nur Störungen abwehren, sondern auch zum ursprünglichen Zustand zurückkehren kann.

Selbstorganisation Selbstorganisation ist die Fähigkeit, komplexe Strukturen zu bilden, indem hierarchisch strukturierte Materialien nach dem Vorbild biologischer Formen und Wachstumsprozesse selbstständig entstehen.

Self-X Self-X-Prinzipien beschreiben selbstorganisierende und selbstoptimierende Prozesse, bei denen Systeme eigenständig Eigenschaften wie Selbstheilung, Selbstorganisation und Selbstregulation entwickeln, um ihre Funktionalität und Stabilität zu gewährleisten.

Serious Game Ein Serious Game ist ein Spiel, das spielerische Elemente nutzt, um reale Lern- oder Problemlösungsziele zu vermitteln.

SWOT-Analyse Die SWOT-Analyse ist ein bewährtes Werkzeug zur systematischen Erfassung und strategischen Bewertung von Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken, um fundierte Entscheidungen zu treffen und geeignete Handlungsempfehlungen abzuleiten.

System Dynamics Modell System Dynamics Modelle eignen sich, um komplexe Systeme zu analysieren sowie die Wechselwirkungen zwischen

Glossar

verschiedenen Einflussfaktoren zu untersuchen und zu simulieren. Dabei wird das dynamische Verhalten des Systems über die Zeit betrachtet.

Szenarioanalyse Die Szenarioanalyse ist eine Methode zur systematischen Untersuchung und Bewertung möglicher zukünftiger Entwicklungen. Sie beinhaltet das Erstellen und Analysieren verschiedener Szenarien, um die Auswirkungen von Unsicherheiten und Variablen auf eine Organisation oder ein Projekt zu verstehen. Durch diese Analyse können strategische Entscheidungen besser vorbereitet und Risiken minimiert werden.

T

Taxonomie Eine Taxonomie ist ein systematisches Verfahren oder Modell, das dazu dient, Objekte anhand festgelegter Kriterien zu klassifizieren und in bestimmte Kategorien oder Klassen zu gruppieren.

Technologie-radar Ein Technologieradar ermöglicht die Erfassung relevanter Technologien und Trends sowie die Ableitung des dazugehörigen Entwicklungsstands und Potenzials der Technologie.

Technologie-reifegrad Der Technologiereifegrad (engl. Technology Readiness Level (TRL)) quantifiziert den Entwicklungsstand und die wahrgenommene technische Einsatzbereitschaft von Technologien und Trends auf einer Skala von eins bis neun.

Glossar

Impressum

Autorinnen und Autoren

Linus Aulich, Annika Brehmer, Clemens Briesse, Felix Budde, Dirk Busse, Henry Nicolai Buxmann, Lynn Faßbender, Benjamin Gellert, Niklas Grambow, Christoph Hein, Prof. Dr.-Ing. Thomas Knothe, Jan Kusch, Annika Lange, Lene Loitsch, Marvin Manoury, Janine Mügge, Christopher Mühlich, Natalie Petrusch, Prof. Dr.-Ing. Julian Polte, Theresa Riedelsheimer, Michael Salinas, Anne Seegrün, Till Tschiltschke, Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann, Sebastian Wehking

Herausgeber

Dr.-Ing. Kai Lindow

Beteiligte Projektpartner

Fraunhofer IPK (Konsortialführung)
5thIndustry GmbH
ARBURG GmbH
BRAL Reststoff-Bearbeitungs GmbH
budatec GmbH
COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH
CONTACT Software GmbH
Fraunhofer IPA
GreenDelta GmbH
KleRo GmbH Roboterautomation
Mercedes-Benz AG
ModuleWorks GmbH
Technische Universität Berlin
Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e.V.

Gefördert vom



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



PTKA
Projektträger Karlsruhe

Karlsruher Institut für Technologie

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8–9
10587 Berlin
Tel: +49 30 39006-0
Fax: +49 30 391 1037
info@ipk.fraunhofer.de
www.ipk.fraunhofer.de

Bildquellen

Soweit nicht anders angegeben: Fraunhofer IPK

Nachdruck, auch in Auszügen, nur mit vollständiger Quellenangabe und nach Rücksprache mit der Redaktion. Bitte senden Sie uns ein Belegexemplar.

© Fraunhofer IPK, Berlin 2025

DOI: 10.24406/publica-4353