ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of
ZBW
Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Bielitz, Pia; Jäpel, Nicole; Heik, David; Reichelt, Dirk

Article — Published Version

Ganzheitliche Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen – der Schlüssel zur Ressourcenwende?

HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik

Provided in Cooperation with:
Springer Nature

Suggested Citation: Bielitz, Pia; Jäpel, Nicole; Heik, David; Reichelt, Dirk (2023) : Ganzheitliche Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen – der Schlüssel zur Ressourcenwende?, HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik, ISSN 2198-2775, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden, Vol. 60, Iss. 6, pp. 1222-1236,
https://doi.org/10.1365/s40702-023-01008-5

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/308109

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik (2023) 60:1222–1236
https://doi.org/10.1365/s40702-023-01008-5

SCHWERPUNKT

Ganzheitliche Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen – der Schlüssel zur Ressourcenwende?

Pia Bielitz · Nicole Jäpel · David Heik · Dirk Reichelt

Eingegangen: 27. April 2023 / Angenommen: 22. August 2023 / Online publiziert: 25. September 2023
© The Author(s) 2023

Zusammenfassung Wandlungsfähigkeit von Unternehmen ist der Schlüssel, um gegenüber Multikrisen wie in den letzten Jahren bestehen zu können und langfristig handlungsfähig zu bleiben. Gleichzeitig fordert die globale Situation aber auch dringend einen Wandel hin zu einem drastisch reduzierten Ressourcenverbrauch. Im vorliegenden Beitrag wird daher untersucht, wie sich die Wandlungsfähigkeit eines Produktionssystems steigern und gleichzeitig der Ressourceneinsatz im Unternehmen senken lässt. Durch die Zusammenführung der vier grundlegenden Ressourcenschonungsstrategien (repair, reuse, recycle und reduce) mit den fünf etablierten Wandlungsbefähigern (Kompatibilität, Mobilität, Modularität, Skalierbarkeit, Universalität) können die Interdependenzen zwischen diesen evaluiert werden. Die Anwendung dieser auf ein sozio-technisches System fördert dabei außerdem einen gesamtheitlichen und stärker menschzentrierten Ansatz. Anhand des entwickelten Use-Cases „flexible Qualitätssicherung zur Ressourcenschonung“ wird darüber hinaus ein konkretes Anwendungsbeispiel zur parallelen Implementierung eines wandlungsfähigen, menschzentrierten und ressourcenschonenden Prozesses im Unternehmensumfeld erläutert. Damit unterstützt der Beitrag die konsequente Auslegung von Produktionssystemen auf Resilienz, Menschzentrierung und Nachhaltigkeit, welche als die drei wesentlichen Schlüsseltreiber der Industrie 5.0 gelten.

Schlüsselwörter Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen · Wandlungsbefähiger · Sozio-technisches System · Nachhaltigkeit · Ressourcenschonung · Kreislaufwirtschaft

✉ Pia Bielitz
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Deutschland
E-Mail: pia.bielitz@htw-dresden.de

Nicole Jäpel · David Heik · Dirk Reichelt
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden, Deutschland

Holistic Adaptability of Production Systems—the Key to the Resource Turnaround?

Abstract The adaptability of companies is the key to being able to withstand multi-crises such as those experienced in recent years and to remain capable of acting in the long term. At the same time, however, the global situation also urgently calls for a change toward drastically reduced resource consumption. This paper, therefore, examines how the adaptability of a production system can be increased while at the same time reducing the use of resources in the company. By merging the four strategies of sustainability (repair, reuse, recycle, reduce) with the five established transformation enablers (compatibility, mobility, modularity, scalability, universality), the interdependencies between them can be evaluated. Applying these to a socio-technical system also promotes a holistic and more human-centered approach. Based on the developed use case "flexible quality assurance for resource conservation", a concrete application example for the parallel implementation of an adaptable, human-centered, and resource-conserving process in a corporate environment is explained. In this way, the paper supports the consistent design of production systems for resilience, human-centeredness, and sustainability, which are considered to be the three essential key drivers of Industry 5.0.

Keywords Adaptable production systems · Transformation enablers · Socio-technical system · Sustainability · Conserving resources · Circular economy

1 Einleitung

Das Bewusstsein, Unternehmen resilient und wandlungsfähig zu gestalten, ist durch die Multikrisen der vergangenen Jahre präsenter denn je. Herausforderungen wie steigende Energiepreise, Personalengpässe sowie generelle Unsicherheiten und Ressourcenknappheit lassen sich mit der bisherigen Wirtschaftsweise nicht mehr lösen. Neben der Stärkung der Resilienz eines Unternehmens durch Erhöhung der Wandlungsfähigkeit, gilt es außerdem den Verbrauch von Ressourcen drastisch zu reduzieren und somit auch zukünftig die Produktionsfähigkeit zu gewährleisten. Ein wertschöpfungsketten-übergreifendes Umdenken und Umgestalten der bisherigen Geschäftsmodelle, weg von linearen Wirtschaftsweisen hin zu einer nachhaltigeren (Kreislauf-)Nutzung von Ressourcen, ist zwingend erforderlich. Ressourcenschonung bringt nicht nur finanzielle Einsparungen, sondern steigert auch die Unabhängigkeit von Rohstoffimporten. Jedes im Produktionsprozess nicht benötigte Material muss nicht erzeugt und später entsorgt werden. Somit wird CO2 eingespart, die Umwelt weniger durch Schadstoffe belastet und damit der Umwelterhalt gefördert. Ressourcenschutz trägt so langfristig dazu bei, umweltbedingte Krisen zu vermeiden. Ressourcen zu schonen und in den Wertschöpfungskreislauf eines Unternehmens zurückzuführen wird damit zur Pflichtaufgabe der verarbeitenden Industrie. Bereits 70,8 % der kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) in der DACH-Region haben dies erkannt und betrachten Nachhaltigkeit als relevant für ihr Unternehmen. Bisher verfolgen jedoch nur 60 % auch explizite Umweltstrategien (Alsdorf et al. 2023). Für

einen ganzheitlichen Ansatz muss der Begriff Ressourcenschonung außerdem noch weiter, als rein materiell, gefasst werden. Gerade unter der Herausforderung des Fachkräftemangels und dem Menschen selbst, als begrenzte Ressource, muss dieser sowie die Organisation eines Unternehmens ebenfalls Beachtung finden. Somit stellt sich die Frage, wie schaffen es Unternehmen Ressourcenschonungsstrategien effektiv umzusetzen und gleichzeitig die Wandlungsfähigkeit ihres Produktionssystems zu steigern? Sind Wandlungsbefähiger sogar der Schlüssel zur Ressourcenwende und wie kann dabei ein menschzentrierter Ansatz integriert werden? In der aktuellen Literatur lassen sich bisher keine umfassenden Ansätze dazu finden. Der folgende Beitrag untersucht daher die Wechselwirkungen zwischen Wandlungsbefähigern und Ressourcenschonungsstrategien. Unter Anwendung der fünf etablierten Wandlungsbefähiger Kompatibilität, Mobilität, Modularität, Universalität und Skalierbarkeit wird ein ganzheitlicher, sozio-technischer Ansatz zur Betrachtung der konsequenten Auslegung von Produktionssystemen auf eine ressourcenschonendere Wirtschaftsweise aufgezeigt. Anhand eines entwickelten Demonstrators wird außerdem ein Beispiel zur Anwendung im Produktionsumfeld erläutert.

2 Stand der Forschung

Für die Weiterentwicklung der Industrie 4.0 hin zu Industrie 5.0 wurden drei wesentliche Schlüsseltreiber in der Literatur identifiziert. So wird die *Resilienz* von Unternehmen als ein Kernaspekt verstanden, der die Stärkung der Widerstandskraft in der industriellen Produktion fördert. Die „Industrie 4.0“ wird hauptsächlich durch Technik und Vernetzung dieser getrieben, die nächste Stufe stellt einen *menschzentrierten Ansatz* in den Mittelpunkt, der im Produktionsprozess die Bedürfnisse des Menschen fokussiert und fragt, wie Technologie für die Arbeitnehmenden nützlich sein kann. Als dritter Treiber gilt die *Nachhaltigkeit*. Diese adressiert die Schonung natürlicher Ressourcen sowie die Verringerung von Umweltauswirkungen (Zizic Crnjac et al. 2022).

2.1 Resilienz durch Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen

Resilienz verfolgt die Aufrechterhaltung der wertschöpfenden und wirtschaftlichen Betriebsfähigkeit durch wandlungsfähige Produktionssysteme und eine agile Organisation, insbesondere in Krisenzeiten (Kohl et al. 2021). Wandlungsfähigkeit im Kontext des Produktionssystems taucht dabei erstmals Ende der 90er-Jahre auf (Wiendahl et al. 2014). Bis heute lassen sich eine Vielzahl an Ansätzen zur Wandlungsfähigkeit produzierender Unternehmen finden, welche jedoch im Kern folgendes gemein haben. Bei Veränderungsbedarf kann das sozio-technische System (Produktionssystem) reaktiv aber auch proaktiv seine Organisationsstrukturen, Prozesse oder sein Handeln neu ausrichten bzw. rekonfigurieren. Die Umsetzung erfolgt nach dem Minimalprinzip (Nyhuis et al. 2010). Um den Wandel eines Systems zu ermöglichen, führt Hernández Morales (2003) erstmals in 2003 den Begriff Wandlungsbefähiger an, der noch immer dem Stand der Wissenschaft entspricht. Ein System kann dabei als wandlungsbefähigt angesehen werden, wenn es kompatible, mobile, modulare,

skalierbare und universale Eigenschaften aufweist (Hernández Morales 2003, Wiendahl et al. 2014, Lanza et al. 2018).

2.2 Menschzentrierung durch Verknüpfung Wandlungsfähigkeit und sozio-technisches System

Ein sozio-technisches System verknüpft soziale mit technologischen Teilaspekten innerhalb einer Organisationsstruktur. Besonders bei Entstehung von Produktionssystemen spielt die Aufgabenteilung zwischen den Teilaspekten Mensch und Technik eine zentrale Rolle. Die Funktionsverteilung bestimmt dabei den Grad der Automatisierung (Ulich 2020). Nyhuis et al. (2010) definieren Produktionssysteme als sozio-technische Systeme, die den *Input* von:

- Personellen (Know-how),
- Technologischen (Technologien),
- Materiellen (Primär- und Sekundärrohstoffe) und
- Finanziellen Ressourcen

mittels wertschöpfenden sowie unterstützenden Produktions- und Logistikprozessen in *Output* (Produkte, Abfälle, Nebenprodukte) verwandeln.

Im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtungsweise werden die zuvor erläuterten Forschungsansätze zu wandlungsfähigen Produktionssystemen und sozio-technischen Systemen zusammengeführt (Jäpel et al. 2023). Das heißt die Wandlungsbefähiger werden nicht nur auf rein technischer Ebene, sondern ebenso auf menschlicher und organisationaler Ebene angewendet. Somit wird eine stärkere *Menschzentrierung* gewährleistet. Ähnliche Ansätze finden sich auch bei Heinen et al. (2008). Demnach wird Wandlungsfähigkeit ermöglicht durch kompatible, mobile, modula-

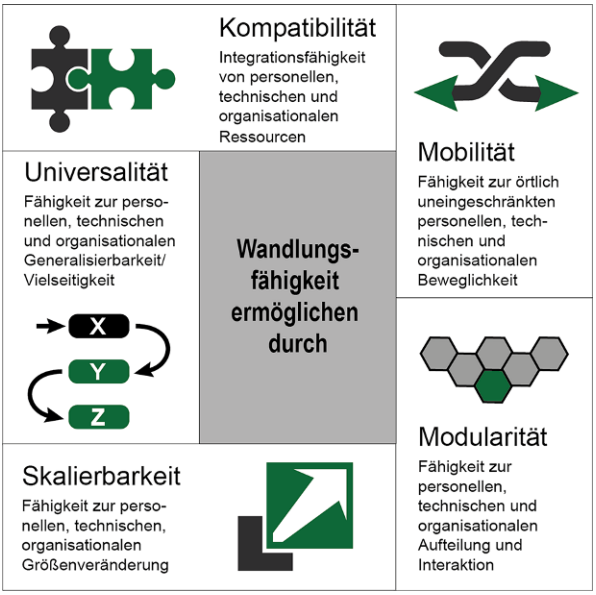

Abb. 1 Ganzheitliche Wandlungsbefähiger im sozio-technischen System

re, skalierbare und universale Mensch-Technik-Organisation (MTO)-Teilaspekte im Unternehmen (siehe Abb. 1).

2.3 Nachhaltigkeit durch Ressourcenschonung in Produktionssystemen

Das Bewusstsein der begrenzenten Ressourcen und die damit einhergehende Idee der Kreislaufnutzung ist bereits seit „Die Grenzen des Wachstums“ von 1972 bekannt (Meadows et al. 1972). Dennoch lag 2022 der weltweite Anteil an Materialien, die nach dem Ende ihrer Nutzungsdauer wieder in die Weltwirtschaft zurückgeführt wurden, so genannte Sekundärmaterialien, bei lediglich 7,2 % des gesamten Materialinputs in die Wirtschaft. Das heißt, dass mehr als 90 % der in der Wirtschaft eingesetzten Materialien entweder verschwendet werden, verloren gehen oder über Jahre hinweg nicht wiederverwendet werden können (Circle Economy 2023). Gleichzeitig sind Rohstoffe nur begrenzt verfügbar und etwa die Hälfte der in der EU verbrauchten Rohstoffe müssen laut *Eurostat* importiert werden. Dies bedeutet Abhängigkeiten von anderen Ländern, insbesondere bei der Versorgung mit kritischen Materialien. Ein deutlich geringerer Ressourcenverbrauch würde Versorgungsrisiken und Preisschwankungen reduzieren (Europäisches Parlament 2023). Um auf Strategien zur Ressourcenschonung einzugehen, muss jedoch zunächst geklärt werden, was unter dieser zu verstehen ist und wie ein Kreislaufwirtschaftsansatz definiert werden kann. In der Literatur wird mit Ressourcenschonung allgemein assoziiert, weniger Ressourcen zu fördern, zu verarbeiten, zu transportieren und letztlich zu entsorgen (Hinterberger 2022). In seiner Perfektion ist Ressourcenschonung das konsequente Zirkulieren von sämtlichen eingesetzten Ressourcen. McDonough und Braungart (2002) formten mit ihrem Werk „Cradle to cradle: Remaking the way we make things“ das Grundverständnis der Kreislaufwirtschaft. Ihre Idee ist, in der Industrie das hoch effiziente System der Natur mit ihren Nährstoffströmen zu imitieren, in dem Abfall überhaupt nicht aufkommt. Das „Cradle to cradle“ Prinzip verlangt, dass alle von der Industrie hergestellten Produkte und Materialien entweder aus biologisch bzw. physikalisch abbaubaren Materialien oder aus technischen Materialien bestehen. Somit sollen sie zur Nahrung für biologische Kreisläufe werden oder in geschlossenen technischen Kreisläufen dauerhaft als Grundlage für die Produktion zirkulieren (McDonough und Braungart 2002). Um solche Kreisläufe zu realisieren und damit den Energie- und Ressourcenverbrauch signifikant zu reduzieren, ist es vor allem nötig, von Anfang an nachhaltigere Produkte zu erzeugen. Schätzungsweise über 80 % der Umweltauswirkungen eines Produktes werden während der Entwurfsphase bestimmt (Europäisches Parlament 2023). Deshalb müssen Strategien zur Ressourcenschonung bereits während des Designprozesses Berücksichtigung finden. Darunter zählen Prinzipien wie Reparaturfähigkeit, Langlebigkeit, Aufrüstbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Energieeffizienz, Schadstofffreiheit und auch der Recyclingprozess der Produkte. In der Literatur lassen sich diese meist als „r-Strategien“ finden. Die am häufigsten verwendeten sind die vier R’s – recycle, repair, reuse und reduce (z. B. Hinterberger 2022). In der Literatur lassen sich noch weitere „r-Strategien“ wie refurbish oder rethink finden. Potting et al. (2017) bspw. führen in ihrem Beitrag gleich zehn solcher Strategien an und ordnen diese innerhalb der Produktionskette in der Reihenfolge ihrer Priorität für ein Kreislaufsystem an.

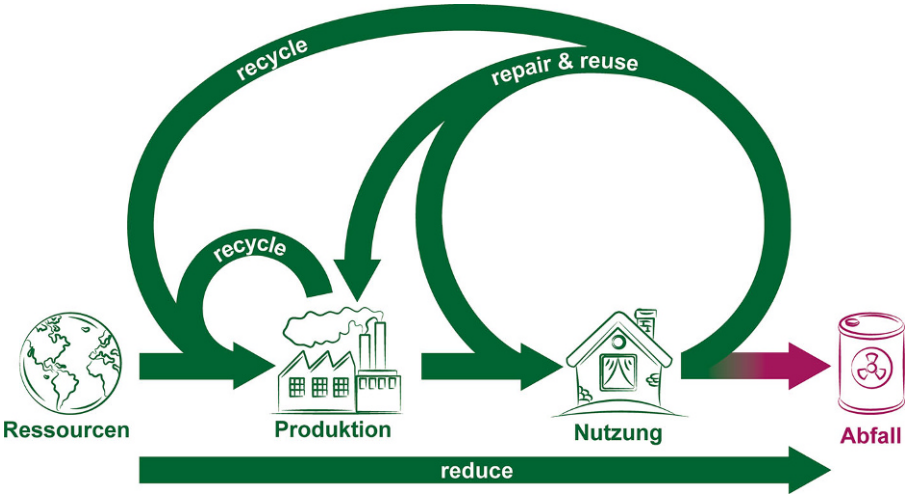

Abb. 2 Ressourcenschonungsstrategien im Produktionskreislauf

Da sich aber letztlich alle Strategien unter den genannten vier Grundprinzipien zusammenfassen lassen, beschränkt sich der vorliegende Beitrag auf diese. Um einen wesentlich geringeren Ressourcen- und Materialverbrauch in der Produktion und darüber hinaus im kompletten Lebenszyklus eines Produktes zu erreichen, muss bei allen Strategien der Fokus auf der Reduzierung des Ressourceneinsatzes und des Abfallausstoßes liegen. Daher ist auch bei den Rückführschleifen der Ressourcen (siehe Abb. 2) auf Energieeffizienz zu achten. Insbesondere die Prinzipien repair und recycle benötigen zusätzliche Energie in der Anwendung. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass je kleiner der Kreislauf in der Abbildung ist, desto energieeffizienter und damit zirkulärer ist er (de Ruyter 2019). Recycling allein, insbesondere minderwertiges, ist immer noch eng mit einer linearen Wirtschaft verbunden. Daher sind Strategien zur Wiederverwendung, Reparatur und Verlängerung der Lebensdauer von Produkten und -komponenten, immer dem reinen Recycling vorzuziehen (Potting et al. 2017).

Für einen ganzheitlichen Ansatz müssen diese Ressourcenschonungsstrategien außerdem nicht nur auf Produktebene, sondern auf kompletter Produktionssystemebene Anwendung finden. Es ist daher notwendig bei jedem Entwurfsprozess – unabhängig ob für ein Produkt, einen Arbeitsprozess, eine Fertigungsinsel oder auch ein Geschäftsmodell – die genannten Prinzipien, allen voran die Reduzierung des Ressourceneinsatzes, zu berücksichtigen.

3 Herleitung und Anwendung des methodischen Ansatzes

3.1 Empirisches Vorgehen und Methodik

Für diesen Beitrag werden unterschiedliche qualitative Forschungsmethoden kombiniert. Im Fokus stehen dabei primäre Forschungsmethoden mit starkem Erkennt-

nisgewinn für die Praxis. Eine Fallstudie (Case Study), die nach Robra-Bissantz und Strahringer (2020) zur Erforschung komplexer gegenwärtiger Phänomene und darauf basierend zur Ableitung von Theorien angewendet wird, ist die Basis für die nachfolgend genutzten wissenschaftlichen Ansätze. Eine exploratorische Untersuchung bei einem nach EU-Kommission definierten mittleren Unternehmen (European Commission 2003) aus Sachsen, welches im industriellen Sektor tätig ist, führte zu ersten Forschungsansätzen zur Beschreibung und Bewertung der Wandlungsfähigkeit des untersuchten Unternehmens. Für die Fallstudie wurden die Geschäftsprozesse hinsichtlich der Themenschwerpunkte vernetzte Wertschöpfung, Fabrikplanung, Logistik sowie Digitalisierung analysiert. Dies erfolgte durch Befragung der Mitarbeitenden, Beobachtungen im Arbeits- und Produktionsbereich vor Ort sowie Sichtung von Geschäftsunterlagen. Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgte eine Abstraktion in allgemeingültige Phänomene zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit in produzierenden mittleren Unternehmen. Dabei wurden die, mithilfe einer qualitativen, sekundären Literaturanalyse, festgehaltenen Befähiger mit dem MTO-Ansatz bzw. (H)uman, (T)echnology and (O)rganisation-(HTO-approach) in einem Modell zusammengeführt. Beim beschriebenen methodischen Vorgehen wurden induktive und deduktive Verfahren miteinander verknüpft. Zur konsequenten Auslegung von Produktionssystemen im Sinne der Industrie 5.0 identifizierten Schlüsseltreiber Resilienz, Menschzentrierung und Nachhaltigkeit erfolgte im letzten Schritt eine argumentativ-deduktive Analyse. Argumentativ-deduktive Analysen spielen neben formal-/konzeptionell-deduktiven Analysen eine bedeutende Rolle zum Schließen von Forschungslücken im Bereich der Wirtschaftsinformatik (Wilde und Hess 2007). Hierfür wurde das Modell der Wandlungsbefähigung um die 4R-Prinzipien ergänzt und argumentativ an Beispielen erläutert.

3.2 Anwendung der Methodik der Wandlungsbefähiger auf ganzheitlicher Systemebene

Zur Untersuchung der Interdependenzen von Ressourcenschonungsstrategien und Wandlungsfähigkeit soll zunächst gezeigt werden, wie die zuvor dargestellten Wandlungsbefähiger auf ein sozio-technisches System angewendet werden können. Die Tab. 1 zeigt dazu Handlungsempfehlungen für eine gesamtsystemische Umsetzung auf.

Für den Befähiger *Modularität* bedeutet die Umsetzung auf der Ebene Mensch bspw., dass Mitarbeitende durch vielfältige Qualifikationen – erlangt in Form von Qualifikationsbausteinen – für einen flexibleren Einsatz in ihrem Arbeitsumfeld befähigt werden. Auf Ebene der Technik kann solch eine Umsetzung der *Modularität* z. B. durch Einführung eines flexibleren Fertigungskonzeptes wie einem Matrixproduktionssystem erreicht werden. Hellmich et al. (2022) definieren Matrixproduktionssysteme als Produktionssysteme, die aus „... frei anfahrbaren und logistisch individuell beplanbaren Prozessmodulen bestehen, welche über einen flexiblen Materialfluss miteinander verbunden sind“. Somit besitzen sie besonders hohes Potenzial, um bei wechselnden Produkteigenschaften sowie schwankenden Produktionsmengen und Losgrößen reagieren zu können (Hellmich et al. 2022). Auf der Ebene der Organisation kann *Modularität* in Form von einzelnen, rekonfigurierbaren

Tab. 1 Anwendung der Wandlungsbefähiger auf ein sozio-technisches System

Objekte	Ebene		
	Mensch	Technik	Organisation
Kompatibilität	Anpassungsfähigkeit und -willen der Mitarbeitenden sich an neue/sich ändernde Prozesse und Aufgaben anzupassen	Maschinen/Anlagen, Materialflusssysteme und Gebäudetechnik verfügen über standardisierte Anschlüsse und Schnittstellen, können interagieren sowie Informationen austauschen	Dokumentation von Prozessen, Nutzung von Standards (Protokolle, Bibliotheken, Open-Source-Software und -Hardware) und einheitlichen Schnittstellen, Plattformunabhängigkeit
Mobilität	Örtliche Unabhängigkeit, Remote Bedienung von Anlagen/ Maschinen, Online-Überwachung von Prozessen	Uneingeschränkte Beweglichkeit von Maschinen und Anlagen, mobile Materialbereitstellung	Umstrukturierungsfähigkeit der Organisation und Prozesse, Wechselarbeitsplätze
Modularität	Vielfältige Qualifikationen der Mitarbeitenden in einzelnen Qualifikationsbausteinen ermöglichen	Standardisierte physische Eigenschaften aller Produktionskomponenten und Anlagen, Anordnung in flexiblen Prozessmodulen, welche unabhängig beplant, angefahren und betrieben werden können	Prozesse sind modular gestaltet, lassen sich bedarfsgesteuert kombinieren und reorganisieren, klare Berechtigungs-, Qualifikations- und Zugangsbestimmungen für alle Prozesse abgestimmt auf Qualifizierungsbausteine
Skalierbarkeit	Flexible Arbeitsmodelle (zeit-, umfangs- und ortsflexibel), Einsatz von Leiharbeitenden/Freelancer, Weiterbildung der Mitarbeitenden	Technische und räumliche Erweiterbarkeit und Reduzierbarkeit von Fertigungskomponenten und Gebäudeinfrastrukturen	Erweiterbarkeit und Reduzierbarkeit der Gebäude, Logistik- u. Produktionsflächen; anpassungsfähige Geschäftsmodelle und -prozesse an wandelnde Produktionsbedingungen
Universalität	Vielseitig und flexibel einsetzbares Personal durch breite Qualifikationen, Prozessverständnis und Problemlösungsfähigkeit	Vielseitig einsetzbare Maschinen- und Anlagen- sowie Logistikinfrastruktur, Anpassbarkeit der Komponenten an individuelle Bedürfnisse z. B. Sitz-/Stehhöhe, Greifpositionen, nutzerspezifische Informationsvisualisierung (Helligkeit, Schriftgröße, Kontrast, Sprache)	Konzept für abteilungsübergreifende Zugriffs-, Zutritts- & Weisungsberechtigungen, flexible/ universelle Gestaltung von Organisationseinheiten und Prozessen

Prozessbausteinen umgesetzt werden. Mit Hilfe von klaren Berechtigungs-, Qualifizierungs- und Zugangsbestimmungen für alle Prozessbausteine, abgestimmt auf die Qualifikationsbausteine der Mitarbeitenden, lassen sich etablierte Prozesse flexibel kombinieren und an wandelnde Bedarfe anpassen.

3.3 Anwendung der Ressourcenschonungsstrategien auf ganzheitlicher Systemebene

Zur wirksamen Umsetzung von Ressourcenschonungsstrategien spielt wie eingangs erläutert der Prozess des Produktdesigns eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus sind die Grundprinzipien nachhaltiger Gestaltung jedoch auch für alle weiteren Lebensphasen von Produkten sowie allen Ebenen eines sozio-technischen Systems relevant. Zum einen sollte Reparaturfähigkeit (repair) durch modularen Aufbau von Produkten aber auch der Anlagen und Maschinen im Unternehmen sichergestellt werden. Zum anderen sollten die verwendeten Rohstoffe, Komponenten und Bauteile vielseitig einsetzbar (reuse) sein wie z. B. universelle Werkzeugaufsätze für verschiedene Anwendungen. Weiterhin müssen die vorhandenen Materialien effizienter und länger verwendet werden, um einen starken Rückgang der Gewinnung von neuen Rohstoffen (reduce) zu erzielen (Circle Economy 2023). Zur Umsetzung der Trennbarkeit und damit Wiederverwendbarkeit (reuse und recycle) der eingesetzten Materialien ist eine Transparenz über alle Prozesse und insbesondere Stoffströme erforderlich. Erst das Wissen, welche Stoffe in welchen Erzeugnissen eingebracht wurden, ermöglicht eine langfristige Zirkularität der eingesetzten Stoffe. Diese Nachvollziehbarkeit der Wertschöpfungsketten kann bspw. durch digitale Identitäten wie digitale Produktpässe erzielt werden. Für einen ganzheitlichen Ansatz gilt es außerdem auch die Ressource Mensch zu schonen, indem Mitarbeitende achtsam und optimal fördernd eingesetzt werden und bspw. individuelle Weiterbildungen oder Mitwirkungsmöglichkeiten erhalten. Ziel muss es sein, die intrinsische Motivation der Mitarbeitenden zu fördern und so die individuellen Potenziale optimal zu nutzen. Zudem wirken sich intrinsische Faktoren der Mitarbeitenden auf organisatorische Maßnahmen, Praktiken und somit letztlich auf die Nachhaltigkeit des ganzen Unternehmens aus (Florea et al. 2013). Zur wirksamen Reduzierung des gesamtsystemischen Ressourcenverbrauches bedarf es nicht zuletzt auch einer Verlängerung der Lebenszyklen allgemein und zirkulärer Geschäftsmodelle, wie z. B. stärker serviceorientiertere Modelle und Dienstleistungen. Damit einher geht eine notwendige Anpassung in der Organisationsstruktur des Unternehmens, da ein solcher Wechsel auch Auswirkungen auf diese hat. Ein möglicher Ansatz hierfür sind hybride Organisationsstrukturen, welche den Übergang zu einem gemischten Geschäftsmodell aus Produkt-, Service- und digitalen Angeboten unterstützen (Brosig et al. 2022).

3.4 Zusammenführung Wandlungsbefähiger und Ressourcenschonung

Zur Identifikation möglicher Zielkonflikte oder sich begünstigender Kaskadeneffekte erfolgt eine Zusammenführung der Wandlungsbefähiger mit den Ressourcenschonungsstrategien, dargestellt im Modell (siehe Abb. 3). Aus diesem ergeben sich eine Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten der einzelnen Ebenen des sozio-technischen Systems in Verbindung mit den Wandlungsbefähigern und unter Betrachtung der Ressourcenschonungsstrategien. Nachfolgend sollen die möglichen Auswirkungen dieser Kombinationen exemplarisch anhand jeweils eines Wandlungsbefähigers erläutert werden. Am Beispiel des Befähigers *Modularität* lassen sich auf allen Ebe-

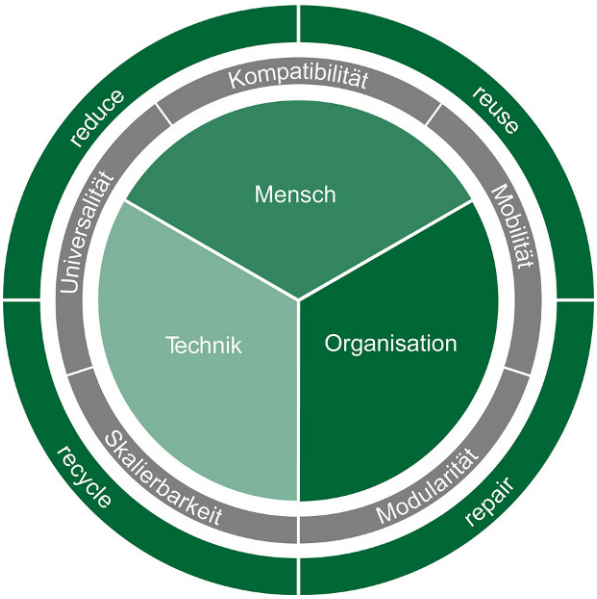

Abb. 3 Modell der Wandlungsbefähigung unter Einbezug der 4Rs zur Ressourcenschonung

nen des sozio-technischen Systems positive Interdependenzen feststellen. So fördern modulare Prozessbausteine (Ebene Organisation) auch die Konfigurierbarkeit von Geschäftsmodellen und unterstützen dabei zeitgleich die Umstellung von produktorientierten Geschäftsmodellen hin zu serviceorientierten, zirkulären Modellen (reduce). Auf technischer Ebene umgesetzte *Modularität*, in Form von Matrixproduktionssystemen, unterstützen das effiziente Produzieren von Ersatzteilen und somit die Reparierbarkeit (repair). Weiterhin kann ein Matrixproduktionssystem zur Demontage von Produkten rekonfiguriert werden, um so auch zum Ende des Produktlebenszyklus die eingesetzten Ressourcen zurückzugewinnen (recycle) (Hellmich et al. 2022). Modulare Qualifikationsbausteine (Ebene Mensch) wiederum fördern die beschriebene notwendige, intrinsische Motivation der Mitarbeitenden und die optimale Ausschöpfung ihrer Potenziale. Somit unterstützen sie die Schonung der menschlichen Ressource (reduce).

Darüber hinaus lassen sich auch mit Umsetzung der anderen Wandlungsbefähiger eine Vielzahl weiterer positiver Wechselwirkungen auf die Ressourcenschonung ausmachen. So unterstützt ein kompatibler Aufbau (*Kompatibilität*) von Produkten und Maschinen die Austauschbarkeit einzelner Komponenten. Dies steigert nicht nur die Wandlungsfähigkeit, sondern reduziert gleichzeitig den Einsatz von Primärrohstoffen (reduce). Die *Universalität* von Prozessen ermöglicht die Bearbeitung unterschiedlicher Stoffkreisläufe aus, in den Produktionskreislauf, zurückgeführtem Material (recycle, reuse). *Universalität* auf der technischen Ebene wiederum gestattet eine ergonomische Anpassung der Maschinen an die Anforderungen der individuellen Bedürfnisse der Mitarbeitenden und gewährleistet somit eine Schonung der Ressource Mensch (reduce). Durch *Mobilität* auf den Ebenen Mensch und Organisation lassen sich bspw. mithilfe von Remote-Arbeit sowohl die Ressource Mensch als auch Kraftstoff/Energieressourcen einsparen (reduce). Nicht zuletzt befähigt die

Skalierbarkeit aller Ebenen (Mensch, Technik und Organisation) das gesamte soziotechnische System zur Einsparung von Energie (reduce) durch optimale Anpassung an wandelnde Produktionsanforderungen.

Andersherum kann die für die langfristige Zirkularität der Materialien notwendige, beschriebene Transparenz der eingesetzten Materialien auch die Wandlungsfähigkeit der Unternehmen fördern. Digitale Produktpässe, welche z. B. durch Nutzung von Blockchain-Technologien in Verbindung mit dem Internet der Dinge umgesetzt werden können, ermöglichen einen sicheren, dezentralen Datenaustausch für eine permanente, gemeinsam nutzbare Aufzeichnung der vollständigen Lieferketten (Wang et al. 2019). Damit kann durch die vollständige Transparenz sowohl die notwendige Rückverfolgbarkeit der eingesetzten Rohstoffe als auch eine bessere Planbarkeit, Entwicklung und Stärkung der eigenen Wertschöpfungsketten gewährleistet werden.

Trotz der Vielzahl an positiven Effekten lassen sich auch Zielkonflikte sowie negative Wechselwirkungen beobachten. Zielkonflikte treten vorwiegend zwischen den einzelnen Ressourcenschonungsstrategien auf. In Abhängigkeit des betrachteten Prozesses bedarf es einer individuellen Abschätzung, welche Ressource zu priorisieren ist. Bspw. kann die Rückgewinnung von eingesetzten (seltenen) Rohstoffen als wichtiger erachtet werden als die Einsparung von Energie, welche für den Rückgewinnungsprozess notwendig ist. Negative Wechselwirkungen werden insbesondere durch die für die Wandlungsfähigkeit notwendige Digitalisierung (z. B. Remote-Arbeit, smarte Produkte, digitale Produktpässe) und der damit verbundenen benötigten Rechentechnik verursacht. Im Speziellen aufwendige Rechenoperationen, die z. B. bei der Nutzung von Blockchains zwangsläufig auftreten, verursachen einen starken Energieverbrauch. In der Gesamtbetrachtung überwiegen eher die positiven Auswirkungen auf die Ressourcenschonung beim Einsatz dieser Technologien. Umso essenzieller ist es jedoch, auch Rechentechnologien auf ihre Effizienz zu prüfen und den Einsatz regenerativer Energiequellen zu bevorzugen.

4 Anwendungsbeispiel im Unternehmensumfeld

Im nachfolgenden Absatz wird auf Grundlage der Anwendung des Wandlungsbefähigers *Modularität* am sozio-technischen System der im Rahmen des Forschungsvorhabens „ProMenTaT – Produktionssysteme mit Menschen und Technik als Team“ komplettierte Demonstrator „flexible Qualitätssicherung zur Ressourcenschonung“ vorgestellt. Die daraus resultierenden Wirkungszusammenhänge zwischen Wandlungsfähigkeit und Ressourcenschonung werden aufgezeigt. Der Demonstrator wurde im IIoT TestBed der HTWD implementiert und evaluiert. Er stellt die Ansätze zur Erforschung von Wandlungsfähigkeit im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion auf Ebene des Moduls (Maschinen- und Anlagenebene) dar. Hierfür finden Industrie 4.0 relevante Schlüsseltechnologien und Digitalisierungsansätze zur Bildverarbeitung sowie Mensch-Maschine-Interaktionen eine Anwendung. Das herzustellende Produkt durchläuft zunächst vollautomatisiert alle vorgelagerten Produktionsschritte bis hin zu einer Qualitätssicherung via Computer Vision. Ziel des Prozessschrittes ist es, potenziell fehlerhaft gefertigte Produkte zu detektieren. Bei Anomalien er-

folgte bisher eine direkte Kennzeichnung als Fehlproduktion (Ausschuss) und die damit verbundene Ausschleusung des Erzeugnisses. Zur Steigerung der Ressourcenschonung wurde dieser Schritt angepasst und der Prozess wie folgt erweitert. Zuerst wird abgefragt, ob ein geeigneter Mitarbeitender – charakterisiert durch ein passendes Qualifikationsprofil und notwendige Berechtigungen – verfügbar ist. Bei Nichtverfügbarkeit wird das Produkt mit Defekt eingelagert. In einem separaten Prozess, der an dieser Stelle nicht weiter beschrieben wird, ist die Weiterverwendung des Erzeugnisses als Ressourcenquelle (recycle) anzustreben. Sofern allerdings geeignete Mitarbeitende verfügbar sind, wird eine zusätzliche Funktionalität freigeschaltet. Die Mitarbeitenden werden bei einem potenziellen Qualitätsmangel mithilfe eines mobilen Human-Machine-Interface (HMI) über die Anomalie in Kenntnis gesetzt und das betroffene Erzeugnis wird zu einem Handarbeitsplatz umgeleitet. Zunächst erfolgt eine zweite optische Inspektion, diesmal durch den Menschen ausgeführt. Ein fälschlicherweise erkanntes, fehlerfreies Erzeugnis wird zurück in die Produktion geleitet und kann als Indikator für Anomalien im Qualitätssicherungsprozess

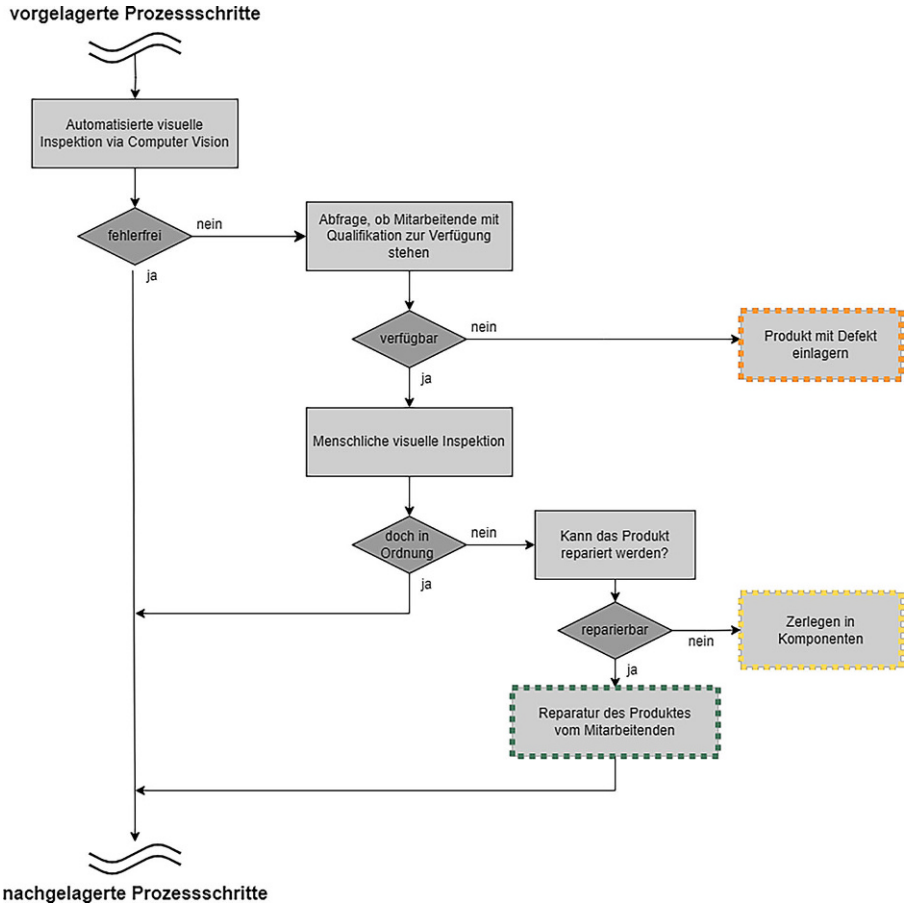

Abb. 4 Prozessablauf flexible Qualitätssicherung zur Ressourcenschonung

dienen und folglich eine Überprüfung dessen initiieren. Fehlerbehaftete Erzeugnisse werden unmittelbar durch den Mitarbeitenden repariert (repair) und in den nachgelagerten Prozess zurückgeführt. Sofern die Fehlerbehebung nicht möglich ist, erfolgt eine Zerlegung des Erzeugnisses in seine Ursprungkomponenten und nach einem bestandenen Qualitätscheck die Rückführung in den Produktionskreislauf (reuse) (siehe Abb. 4).

Mit dem vorgestellten Use Case wird verdeutlicht, wie wandlungsfähige Produktionssysteme, Berechtigungskonzepte und modulare Fertigungsprozesse in Bezug auf Resilienz, Ressourcenschonung und Einsatz von Mitarbeitenden gewinnbringend eingesetzt werden können. Dabei wurden die von Lanza et al. (2018) vorgeschlagenen Leitsätze zur Erforderlichkeit von Wandlungsfähigkeit, dem Einsatz von Industrie 4.0 entscheidenden Technologien sowie der Menschzentrierung von Produktionssystemen berücksichtigt. Ein Schwerpunkt dabei bildet zum einen die Ausgestaltung von modularen Kompetenz- und Qualifikationsbausteinen wie auch Berechtigungskonzepten. Zum anderen werden modulare Gestaltungskonzepte für optionale Prozessschritte vorgestellt. Durch die Erhöhung der Wandlungsfähigkeit können demnach komplementäre Ziele zur ganzheitlichen Nachhaltigkeit erreicht werden. Neben der frühzeitigen Erkennung und Analyse von Fehlern sowie Ursachen kann die Anzahl von Schlechtteilen durch Reparaturoptionen gesenkt und Rohstoffe in den Produktionskreislauf zurückgeführt werden. Die menschzentrierte Prozessadaption fördert zudem Wohlbefinden, Zugehörigkeit und Gesundheit durch ein breiteres Aufgabenspektrum. Der Einsatz eines mobilen HMI ermöglicht eine flexible Gestaltung des Arbeitsprozesses (z. B. durch freiere Zeiteinteilung und größeren Wirkungsbereich des Werkers). In Folge wird der Prozess dekarbonisierter, nachhaltiger, grüner und insgesamt stabiler.

5 Zusammenfassung und Forschungsausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde untersucht, welche Maßnahmen zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit und Senkung des Ressourceneinsatzes im Unternehmen notwendig sind. In der Zusammenführung der vier grundlegenden Ressourcenschonungsstrategien (repair, reuse, recycle und reduce) mit den fünf etablierten Wandlungsbefähigern (Kompatibilität, Mobilität Modularität, Skalierbarkeit, Universalität) konnten die Interdependenzen zwischen diesen evaluiert werden. Durch die Anwendung auf ein sozio-technisches System wurde ein gesamtheitlicher Ansatz mit einer stärkeren Menschzentrierung gefördert. Anhand des entwickelten Demonstrators „flexible Qualitätssicherung zur Ressourcenschonung“ wurde ein Anwendungsbeispiel zur parallelen Implementierung eines wandlungsfähigen und ressourcenschonenden Prozesses erläutert. Es lässt sich festhalten, dass vor allem positive Wechselwirkungen bei einer gesamtsystemischen Umsetzung von Wandlungsfähigkeit auf den Ressourceneinsatz zu beobachten sind. Das Erreichen einer zirkulären Wirtschaftsweise ist dennoch keineswegs ein Selbstläufer. Auch wenn die Umsetzung der Wandlungsbefähiger dies deutlich fördern kann, ist ein aktives Handeln und Mitdenken von Ressourcenschonung auf allen Unternehmensebenen notwendig, um wirkliche Kreisläufe zu ermöglichen. Zukünftig muss daher sowohl an

weiteren Konzepten für die Ermöglichung von vollständigen Kreisläufen als auch an neuen Geschäftsmodellen bspw. im Bereich Open Hardware oder Social Entrepreneurship geforscht werden. Zusätzlich muss die Energieeffizienz von digitalen Technologien verbessert und deren Einstiegshürden noch weiter reduziert werden. Weiterführende Arbeiten sind außerdem an dem vorgestellten Demonstrator notwendig. Im nächsten Schritt muss dieser skaliert, in einem realen produktiven Umfeld validiert und hinsichtlich Adaptionsmöglichkeiten auf unternehmensrelevante Anforderungen überprüft werden. Für Unternehmen gilt, nur wem es zukünftig gelingt, neben der Digitalisierung auch Wandlungsfähigkeit, Nachhaltigkeit und eine stärkere Menschzentrierung umzusetzen, wird resilient gegenüber kommenden Herausforderungen und damit langfristig wettbewerbsfähig werden.

Förderung Diese Forschung wurde im Rahmen des Projektes „Produktionssysteme mit Menschen und Technik als Team“ (ProMenTaT, Antragsnummer: 100649455) aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds Plus (ESF Plus) und aus Steuermitteln auf Grund des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushalts gefördert.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de.

Literatur

Alsdorf H, Kosmol L, Rivera Fernandez Z (2023) Relevanz und Bedeutung der Nachhaltigkeit – Green IT/IS als Nischenthema in KMU der DACH-Region. HMD 60(1):162–172. https://doi.org/10.1365/s40702-022-00863-y

Brosig C, Strahringer S, Westner M (2022) From selling machinery to hybrid offerings—organizational impact of digital servitization on manufacturing firms. Int J Inf Syst Proj Manag 10(3):5–27. https://doi.org/10.12821/ijispm100301

Circle Economy (2023) The circularity gap report 2023. Circle Economy, Amsterdam, S 1–64

Europäisches Parlament (Hrsg) (2023) Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile (20151201STO05603). https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/economy/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile (Erstellt: 22. Febr. 2023). Zugegriffen: 29. März 2023

European Commission (2003) Commission Recommendation of 6 May 2003 concerning the definition of micro, small and medium-sized enterprises (Text with EEA relevance) (notified under document number C(2003) 1422) (1422), 36–41. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003H0361&from=EN. Zugegriffen: 12. Juli 2022

Florea L, Cheung Y, Herndon N (2013) For all good reasons: role of values in organizational sustainability. J Bus Ethics 114(3):393–408. https://doi.org/10.1007/s10551-012-1355-x

Heinen T, Rimpau C, Wörn A (2008) Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Nyhuis P, Reinhart G, Abele E (Hrsg) Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. PZH Produktionstechnisches Zentrum, Garbsen, S 19–32

Hellmich A, Zumpe F, Zumpe M, Münnich M, Wiese T, Büttner T et al (2022) Umsetzung von cyber-physischen Matrixproduktionssystemen https://doi.org/10.48669/fb40_2022-03

Hernández Morales R (2003) Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. VDI, Düsseldorf (Diss)

Hinterberger F (2022) Ressourcenschutz ist nicht nur der beste Klimaschutz. Fact Mag Nachhalt Wirtsch 18(2):9–15

Jäpel N, Bielitz P, Reichelt D (2023) Beschreibung und Bewertung der Wandlungsfähigkeit. Mit Fokus auf produzierenden mittleren Unternehmen. Z Wirtsch Fabrikbetr 118(1–2):10–14. https://doi.org/10.1515/zwf-2023-1019

Kohl H et al (2021) White Paper „RESYST“ – Resiliente Wertschöpfung in der produzierenden Industrie – innovativ, erfolgreich, krisenfest. Fraunhofer-Geselschaft e. V., München, S 4 (https://www.fraunhofer.de/s/ePaper/Whitepaper/RESYST/index.html#42)

Lanza G, Nyhuis P, Fisel J, Jacob A, Nielsen L, Schmidt M, Stricker N (2018) Wandlungsfähige, menschzentrierte Strukturen in Fabriken und Netzwerken der Industrie 4.0. acatech Studie. Utz, München

McDonough W, Braungart M (2002) Cradle to cradle. Remaking the way we make things, 1. Aufl. North Point Press, New York. ISBN 0-86547-587-3

Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens WW 3rd (1972) The limits to growth. A report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind, 4. Aufl. Universe Books (A Potomac Associates book), New York. ISBN 0-87663-165-0.

Nyhuis P, Klemke T, Wagner C (2010) Wandlungsfähigkeit – Ein systemischer Ansatz. In: Nyhuis P (Hrsg) Wandlungsfähige Produktionssysteme, 1. Aufl. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e. V. (HAB). Gito, S 3–21

Potting J, Hekkert M, Worrell E, Aldert H (2017) Circular economy: measuring innovation in the product chain. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague

Robra-Bissantz S, Strahringer S (2020) Wirtschaftsinformatik-Forschung für die Praxis. HMD 57(2): 162–188. https://doi.org/10.1365/s40702-020-00603-0

de Ruyter C. (2019) Circular economy and the EU. Hg. v. European Generation. Milan. https://www.europeangeneration.eu/single-post/2019/10/25/Circular-economy-and-the-EU (Erstellt: 25. Okt. 2019). Zugegriffen: 29. März 2023

Ulich E (2020) Arbeitspsychologie, 7. Aufl. vdf, Zürich

Wang Y, Han JH, Beynon-Davies P (2019) Understanding blockchain technology for future supply chains: a systematic literature review and research agenda. Supply Chain Manag Int J 24(1):62–84. https://doi.org/10.1108/SCM-03-2018-0148

Wiendahl H-P, Reichardt J, Nyhuis P (2014) Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten, 2. Aufl. Hanser, München, Wien

Wilde T, Hess T (2007) Forschungsmethoden der Wirtschaftsinformatik. Wirtschaftsinformatik 49(4): 280–287. https://doi.org/10.1007/s11576-007-0064-z

Zizic Crnjac M, Mladineo M, Gjeldum N, Celent L (2022) From industry 4.0 towards industry 5.0: a review and analysis of paradigm shift for the people, organization and technology. Energies 15(14):5221. https://doi.org/10.3390/en15145221