

Nur zirkuläre Ökosysteme eröffnen den Weg zu echter Resilienz in der Industrie

Ökosysteme für eine resiliente und zirkuläre Produktion

W. Boos, G. Hoeborn, L. Klapper, H. Knaup, F. Bantle

ZUSAMMENFASSUNG Globale Wertschöpfungssysteme stehen unter Druck durch Ressourcenknappheit, Klimawandel oder geopolitische Risiken. Der Beitrag zeigt, wie Eigenschaften industrieller Ökosysteme mit zentralen Resilienztreibern zusammenwirken und welche Faktoren besonders wirksam sind. Zwei Anwendungsfälle verdeutlichen die Implikationen für die industrielle Praxis. Die Ergebnisse liefern Unternehmen konkrete Ansätze, um Lieferketten robuster, Ressourcen effizienter und Produktionssysteme anpassungsfähig zu gestalten.

STICHWÖRTER

Resilienz, Ökosysteme, Kreislaufwirtschaft

Ecosystems for a resilient and circular production

ABSTRACT Global value creation systems are challenged by resource scarcity, climate change, and geopolitical risks. This article investigates how characteristics of industrial ecosystems interact with key drivers of resilience and identifies factors that are particularly effective. Two use cases illustrate the implications for industrial practice. The findings provide companies with practical approaches to enhance/strengthen supply chains resilience, improve resources efficiency, and increase the adaptability of production systems.

1 Zirkuläre Ökosysteme als Schlüssel für resiliente Wertschöpfungssysteme

Globale Wertschöpfungssysteme stehen angesichts zunehmender Ressourcenknappheit, der Auswirkungen des Klimawandels, geopolitischer Spannungen und wachsender Risiken in den Lieferketten erheblich unter Druck. Diese Unsicherheiten verlangen von Unternehmen nicht nur die Fähigkeit, kurzfristig auf Störungen zu reagieren, sondern auch langfristig resiliente Strukturen zu entwickeln. [1–3]

Gleichzeitig wird deutlich, dass lineare Produktions- und Konsummodelle an ihre ökologischen und ökonomischen Grenzen stoßen. Die Kreislaufwirtschaft (KLW) bietet einen strategischen Rahmen, um Ressourcen effizienter zu nutzen, Abfälle zu vermeiden und Wertstoffkreisläufe zu schließen, und trägt nachweislich zur Steigerung organisationaler Resilienz bei. Forschungsergebnisse zeigen, dass die Implementierung von KLW-Praktiken nicht nur ökologische Vorteile hat, sondern auch die Robustheit und Anpassungsfähigkeit in Unternehmen und Lieferketten erhöht. [4, 5]

Ökosysteme als offene, dynamische Netzwerke erlauben die effiziente Nutzung von Ressourcen durch den Austausch von Wissen zwischen verschiedenen Akteuren. Sie können die Integration sozialer, wirtschaftlicher und technologischer Prozesse fördern, um lineare Strukturen aufzubrechen und sich so zu einer zirkulären Wertschöpfung zu entwickeln. Somit unterstützen sie die Widerstandsfähigkeit und Anpassungsfähigkeit von Produktionssystemen und leisten einen Beitrag zur nachhaltigen Transformation der Industrie. Marrenbach und Mack [6] sowie Bauer [7] beschreiben, wie resiliente Ökosysteme im industriellen Kontext

aufgebaut und betrieben werden müssen. Dabei wird jedoch nicht erörtert, welche Eigenschaften eines Ökosystems positive Auswirkungen auf die Resilienz haben. Vor diesem Hintergrund untersucht dieser Beitrag, wie sich Eigenschaften von Ökosystemen auf die Treiber der Resilienz auswirken.

Der Beitrag ist in drei zentrale Abschnitte gegliedert. Zunächst wird ein grundlegendes Begriffsverständnis geschaffen. Dazu werden die Begriffe Resilienz, Kreislaufwirtschaft und Ökosystem definiert und deren jeweilige Charakteristika erläutert. Darauf aufbauend wird der Zusammenhang dieser Konzepte herausgearbeitet und aufgezeigt, weshalb ihre Integration für die Gestaltung zukünftiger Produktionssysteme von zentraler Bedeutung ist.

Im zweiten Schritt erfolgt die Analyse des Zusammenspiels von Ökosystem-Eigenschaften und Resilienztreibern. Hierzu werden neun Eigenschaften herangezogen, die ein industrielles Ökosystem charakterisieren, sowie neun Treiber, die maßgeblich zur Resilienz von Organisationen beitragen. Diese Elemente werden in einem Wirkmodell [8] systematisch miteinander in Beziehung gesetzt. Ziel ist es, sichtbar zu machen, welche Eigenschaften von Ökosystemen bestimmte Resilienztreiber besonders stark beeinflussen und welche nur eine untergeordnete Wirkung entfalten.

Darauf aufbauend werden im dritten Kapitel die identifizierten Zusammenhänge anhand zweier Anwendungsfälle konkretisiert. Hierzu dienen die Projekte „Coppa“ und „DiCES“, an denen das FIR der RWTH Aachen beteiligt war und ist. Sie zeigen exemplarisch, wie industrielle Ökosysteme praktisch ausgestaltet werden können und welche Implikationen dies für die Stärkung organisationaler Resilienz in der Produktion hat. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion zentraler Erkenntnisse und einem Ausblick auf

zukünftige Forschungs- und Gestaltungsfelder im Kontext zirkulärer und resilienzfördernder Ökosysteme.

2 Resilienz durch Strukturen und Handlungsfelder zirkulärer Ökosysteme

Die Kreislaufwirtschaft bezeichnet eine Wertschöpfungsform, welche darauf abzielt, ökologische und ökonomische Vorteile in Einklang zu bringen. Das übergreifende Ziel dabei besteht in der Minimierung von Abfällen sowie effizienten Nutzung von Ressourcen. Im Sinne der K LW werden Materialien und Produkte so oft wie möglich in neue Lebenszyklen gehalten [9].

Die Kreislaufwirtschaft lässt sich durch verschiedene R-Strategien operationalisieren. Diese reichen von „Reduce“ (reduzieren), „Refuse“ (verweigern) und „Reuse“ (wiederverwenden) über „Repair“ (reparieren), „Refurbish“ (überholen), „Remanufacture“ (wiederaufbereiten) und „Repurpose“ (umfunktionieren) bis hin zu „Recycle“ (recyclen), „Recover“ (rückgewinnen) und „Remine“ (wiederabbauen). Entscheidend für eine erfolgreiche Umsetzung von Kreislaufwirtschaft sind neben technologischen Innovationen vor allem neue Geschäftsmodelle und die enge Kollaboration aller Akteure entlang der Wertschöpfungskette. [10, 11]

In dieser Forschungsarbeit wird die Kollaboration entlang der Wertschöpfungskette, also eines Ökosystems, besonders hervorgehoben. Conrad et al. [12] sowie Stich et al. [13] definieren ein Ökosystem gleichermaßen als eine dynamische, zumindest teilweise offene Struktur verschiedener voneinander abhängiger, aber autonomer sozialer und wirtschaftlicher Akteure, die ihre Aktivitäten auf ein gemeinsames Ziel ausrichten, um gemeinsam einen Mehrwert zu schaffen.

Neun zentrale Eigenschaften beschreiben die Struktur und Funktionsweise von Ökosystemen im industriellen Kontext [13]:

- **Gemeinsamer Zweck und Vision:** Ein klar definiertes Leitbild mit Zweck, Vision und Mission bildet die Basis für eine gemeinsame Wertschöpfung im Ökosystem.
- **Modulare und komplementäre Lösungen:** Die Identifikation modularer und komplementärer Komponenten des gemeinsamen Wertversprechens stärkt die Anpassungsfähigkeit.
- **Co-Creation unter allen Akteuren:** Die Analyse und Einbindung notwendiger Akteure sowie deren kooperative und kompetitive Beziehungen fördern Innovation und Resilienz.
- **Multilaterale Beziehungen:** Die Visualisierung und Steuerung multilateraler Transaktionen (Waren, Geld, Informationen, immaterielle Güter) schafft Transparenz und Koordination.
- **Informationsbasierte Wertschöpfung:** Der aktive Austausch von Informationen ermöglicht neue Erkenntnisse zu Kundenbedürfnissen und optimiert Angebote des Ökosystems.
- **Autonome Akteure:** Eine Governance, die entlang zentraler Leitprinzipien koordiniert, ermöglicht es den autonomen, aber voneinander abhängigen Akteuren, effektiv zusammenzuarbeiten.
- **Gemeinsamer Werterahmen:** Ein informeller Rahmen aus gemeinsamen Normen, Werten und Regeln wie Kollaboration, Offenheit und Autonomie stärkt das Vertrauen innerhalb des Netzwerks.
- **Gemeinsame technologische Infrastruktur:** Einheitliche Standards und Plattformen unterstützen den reibungslosen Datenaustausch und ermöglichen die Integration von Industrie-4.0-Technologien.

- **Netzwerkeffekte:** Die drei Flywheel-Effekte – Datenschwungrad (Lerneffekte), Wachstumsschwungrad (Netzwerkeffekte) und Kostenschwungrad (Skaleneffekte) – steigern die Skalierbarkeit und Wettbewerbsfähigkeit

Im Kontext der K LW wird von einem zirkulären Ökosystem gesprochen. Als Ausprägung des Ökosystem-Konzepts lässt sich seine Struktur und Funktionsweise ebenfalls über die oben beschriebenen neun Eigenschaften charakterisieren.

Abgrenzend zu (linearen) Ökosystemen wirtschaftlicher Akteure steht beim zirkulären Ökosystem der ganzheitliche Zweck der Wertschöpfung im geschlossenen Kreislauf im Fokus. Alle beteiligten Akteure richten ihre Aktivitäten fundamental auf Prinzipien der Kreislaufwirtschaft aus [14, 15]. Ein zirkuläres Ökosystem ist eine dynamische Struktur aus verschiedenen voneinander abhängigen, aber autonomen Akteuren, die ihre sich ergänzenden Aktivitäten auf ein gemeinsames Ziel hin koordinieren, um gemeinsam zirkuläre Werte zu schaffen und Möglichkeiten für wirtschaftliche und ökologische Nachhaltigkeit zu bieten [14]. Die Bestandteile und Dimensionen eines zirkulären Ökosystems werden in aktuellen Veröffentlichungen als komplexes Zusammenspiel unterschiedlicher Akteure, geteilter Ressourcen und Governance-Modellen beschrieben, das darauf abzielt, Stoffkreisläufe möglichst vollständig zu schließen und die sozialen, ökologischen sowie ökonomischen Potenziale einer nachhaltigen Wirtschaftsweise auszuschöpfen. [14, 15]

Ein zirkuläres Ökosystem im industriellen Kontext basiert auf der intensiven Zusammenarbeit von Herstellern, Zulieferern, Aufbereitern, Konsumenten und Technologieanbietern. Diese Akteure agieren entlang des gesamten Lebenszyklus von Produkten und erlauben so die Rückführung von Rohstoffen und Komponenten in den Produktionsprozess. Studien zeigen, dass eine koordinierte Interaktion dieser Stakeholder unerlässlich ist, um ein effizientes Ressourcenkreislaufsystem aufzubauen und Versorgungsrisiken zu minimieren. Hersteller und Zulieferer arbeiten an der Entwicklung nachhaltiger Produkte und Materialien, Recycler sorgen für die Wiederaufbereitung und Konsumenten beeinflussen die Nachfrage nach zirkulären Lösungen durch ihr Konsumverhalten. Technologieanbieter sind entscheidend für die Entwicklung digitaler Plattformen, welche die Transparenz und Rückverfolgung von Materialien ermöglichen. [16, 17]

Eine zentrale Ressource, welche von allen Akteuren eines zirkulären Ökosystems gemeinsam genutzt werden kann, kann eine digitale Datenplattform zur Erfassung und zum Austausch von Produkt-, Material- und Recyclingdaten sein. Diese Infrastruktur unterstützt die Optimierung von Prozessen, das Design zirkulärer Produkte und eine effiziente Logistik. Reverse Logistics beschreibt die Rückführung gebrauchter Produkte in den Produktionsprozess, um sie zu reparieren, aufzubereiten oder zu recyceln. Dadurch werden stoffliche Wertströme erhalten und Abfälle reduziert. Second-Life-Märkte ermöglichen die Weiterverwendung von Produkten und Komponenten, welche am Ende ihres ersten Lebenszyklus stehen, und leisten einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung und Minderung von Treibhausgasemissionen. Studien zeigen, dass Deutschland durch eine umfassende K LW seinen Rohstoffbedarf und die damit verbundenen Umweltbelastungen signifikant reduzieren kann. [16, 11]

Die zirkuläre Transformation trägt laut Modellierungsstudien nicht nur zur Reduktion von Treibhausgasemissionen und des Rohstoffverbrauchs bei, sondern eröffnet auch neue Wachstumschancen und erhöht die gesellschaftliche Resilienz gegenüber

globalen Krisen wie Versorgungsengpässen und Klimarisiken. Dabei haben zirkuläre Ökosysteme eine befähigende Wirkung. Um deren Potenziale voll auszuschöpfen, postuliert die Forschung, dass Wirtschaft, Politik und Zivilgesellschaft gemeinsam eine ambitionierte Strategie für die Kreislaufwirtschaft entwickeln und umsetzen sollten. [11]

Der Begriff der Resilienz wird von der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften acatech als „Fähigkeit, tatsächlich oder potenziell widrige Ereignisse vorherzusehen und einzukalkulieren, [...] sich schnell davon zu erholen und sich ihnen erfolgreich anzupassen und daraus zu lernen“ [5] definiert. Die Resilienzforschung im industriellen Kontext hebt hervor, dass Eigenschaften wie Anpassungsfähigkeit, Redundanz und das Prinzip der Antifragilität wesentlich für widerstandsfähige Wertschöpfungssysteme sind. Systeme mit modularen Strukturen, hoher Flexibilität und intensiver Zusammenarbeit reagieren nachweislich robuster auf externe Störungen wie Lieferengpässe oder geopolitische Risiken. Dabei steht Resilienz nicht nur für kurzfristige Reaktionen, sondern für die dauerhaft dynamische Fähigkeit, sich proaktiv an veränderte Rahmenbedingungen anzupassen. [18, 19]

Wie die Resilienz, die Kreislaufwirtschaft und zirkuläre Ökosysteme zusammenspielen und voneinander abhängen, beschreibt der folgende Abschnitt.

Die aktuelle Forschung zeigt, dass die Verzahnung von Resilienz und Kreislaufwirtschaft innerhalb industrieller Ökosysteme die Grundlage für eine wettbewerbsfähige und nachhaltige Industrie der Zukunft bilden [10, 11]. Studien belegen, dass zirkuläre Strategien präventive Widerstandskraft stärken, adaptive Reaktionsmöglichkeiten in Krisen fördern und die Erholungsfähigkeit beschleunigen [10, 20]. Wichtige Handlungsfelder zur Steigerung der Widerstandskraft sind die Reduzierung des Ressourceneinsatzes, die Digitalisierung von Wertschöpfungsnetzwerken und die Verlängerung des Produktlebenszyklus [19].

Ein zentrales Prinzip der Kreislaufwirtschaft besteht in der Reduzierung des Ressourcenverbrauchs durch geschlossene Kreisläufe. Ziel eines zirkulären Wirtschaftssystems ist es, Rohstoffe und Materialien dauerhaft in Nutzung zu halten, statt sie nach einmaligem Gebrauch zu entsorgen [21, 22]. Die Transformation zu einer Kreislaufwirtschaft bietet das Potenzial, die Ressourcenproduktivität in Europa jährlich um zwei bis drei Prozent zu erhöhen und Primärrohstoffe im Wert von bis zu 600 Milliarden Euro pro Jahr ab 2030 einzusparen [9].

Die digitale Vernetzung und der Informationsaustausch innerhalb und entlang von Wertschöpfungsketten ermöglichen eine signifikante Steigerung der Materialeffizienz. Moderne Datenplattformen schaffen Transparenz über Materialherkunft, Materialzusammensetzung und Verfügbarkeit, wodurch Materialströme gezielt gesteuert werden können. Wissenschaftliche Studien heben hervor, dass datengestütztes Ressourcenmanagement nicht nur Effizienzgewinne realisiert, sondern auch eine schnellere Anpassung an Störungen, wie Lieferengpässe, ermöglicht. Dies eröffnet Potenziale für den Einsatz alternativer Rohstoffe und optimiert die Nutzung von Recyclingpotenzialen, was sich positiv auf die Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit auswirkt. [19, 23]

Die Verlängerung von Produktlebenszyklen durch Strategien wie Remanufacturing, Refurbishment und Repair stellt einen weiteren zentralen Hebel dar. Gestaltungskonzepte wie „Design for Circularity“ ermöglichen die mehrfache Nutzung und Reparatur von Produkten. Studien zeigen, dass Remanufacturing nicht nur Abfallmengen reduziert, sondern auch substanzielle Einsparungen

von Ressourcen und Emissionen bewirkt. Gleichzeitig stärkt diese Verlängerung der Nutzungsdauer die Unabhängigkeit von Lieferketten und minimiert Produktionsrisiken durch effizientere Nutzung verfügbarer Materialien. [24, 25]

Diese drei Handlungsfelder beschreiben exemplarisch, wie Ökosysteme, Kreislaufwirtschaft und Resilienz miteinander zusammenhängen. Welche Wirkung jedoch konkret die Eigenschaften von Ökosystemen im Kontext der Kreislaufwirtschaft auf die Treiber der Resilienz haben, beschreibt das folgende Kapitel.

3 Wirkung der Eigenschaften von Ökosystemen auf die Treiber der Resilienz

Bevor die Wirkungen der bereits beschriebenen Eigenschaften von Ökosystemen auf die Treiber der Resilienz in der Produktion erklärt werden können, müssen diese Treiber beschrieben werden.

3.1 Treiber der Resilienz

In der Literatur werden je nach Fokusbereich unterschiedliche Anzahlen an Treibern der Resilienz genannt. Oft wird zwischen fünf und zehn Treibern unterschieden [26, 27]. Diese Ausarbeitung fokussiert auf folgende neun Treiber, die durch wissenschaftliche Quellen belegt sind:

- Antizipation und Proaktivität: Die frühzeitige Erkennung potenzieller Störungen durch Monitoring, Risikobewertungen und Prognosetools ist essenziell, ebenso die Verhinderung möglicher Störungen. [28]
- Flexibilität und Wandlungsfähigkeit: Produktionssysteme müssen so gestaltet sein, dass sie schnell und anpassungsfähig auf Veränderungen reagieren können, etwa durch modulare Anlagen, dynamische Fertigungsprozesse und redundante Ressourcen. [29]
- Robuste und transparente Lieferketten: Die Resilienz von Lieferketten beziehungsweise Versorgungssystemen wird gestärkt durch Diversifizierung von Lieferanten, Lagerhaltung, digitale Nachverfolgbarkeit und Kollaboration (gemeinsame Datenräume). [30, 31]
- Digitale Vernetzung und Datenmanagement: Durchgängige Datenflüsse, Industrial IoT und gemeinsame Datenräume erlauben schnelle Entscheidungen und Anpassungen. [31]
- Automatisierung und Fernsteuerung: Der Einsatz von Automatisierungs- und Fernsteuerungstechnologien verbessert die Krisenfestigkeit und hilft, Produktion von fern weiterzuführen. [32]
- Redundanz und Backup-Konzepte: Mehrfach vorhandene Produktionskapazitäten oder alternative Prozesspfade machen Betriebe widerstandsfähiger gegenüber Ausfällen. [33]
- Organisatorische Wandlungsfähigkeit und Qualifikation: Gut geschulte Mitarbeitende, dynamische Arbeitsorganisation und offene Kommunikation sind Voraussetzung, um auf Krisen und Veränderungen konstruktiv zu reagieren. [34]
- Widerstandsfähige Wertstromgestaltung: Die ganzheitliche und systematische Gestaltung belastbarer Wertgenerierungsprozesse und die kontinuierliche Bewertung von Schwachstellen schaffen systematische Widerstandsfähigkeit. [35]
- Nachhaltigkeitsorientierte Produktion: Die Berücksichtigung von Umwelt-, Sozial- und Governance-Zielen erhöht die langfristige Krisenfestigkeit. [36]

Treiber von Resilienz									
Eigenschaften von Ökosystemen	digitale Vernetzung & Datenmanagement	Automatisierung & Fernsteuerung	Widerstandsfähige Wertstromgestaltung	Nachhaltigkeits-orientierte Produktion	Antizipation & Proaktivität	Flexibilität & Wandlungsfähigkeit	Robuste & transparente Lieferketten	Redundanz & Back-Up-Konzepte	organisatorische Wandlungsfähigkeit & Qualifikation
	++ Basis für Vernetzung & Integration	++ Einheitliche Infrastruktur erleichtert Automatisierung	++ Systeme stabilisieren & steuern Wertströme	++ Technologische Basis für Kreislaufwirtschaft & Rückverfolgbarkeit	+ Frühwarnsysteme ermöglichen proaktives Handeln	++ Standards erlauben schnelle Anpassungen	++ Transparenz und Stabilität werden erhöht	+ Backup-Prozesse können zentralisiert werden	+ Technologische Infrastruktur fördert Weiterbildung
	+ Erfordert gemeinsame digitale Plattformen, Einfluss indirekt	- Unterschiedliche Anforderungen erschweren Automatisierung	+ Fordert Innovation & kooperative Weiterentwicklung	++ Gemeinsame Entwicklung fördert nachhaltige Lösungen	++ Unterstützt frühzeitige Risikoerkennung durch Zusammenarbeit	++ Förderung kollaborativer Entwicklung	++ Intensive Zusammenarbeit steigert Transparenz	- Gemeinsame Lösungen reduzieren Redundanz	++ Fördert Wandel & Qualifikationsentwicklung
	++ zentral für effiziente digitale Vernetzung, da Datenqualität, -verfügbarkeit & -interoperabilität gefördert.	+ unterstützen Automatisierung, brauchen aber weitere technische Voraussetzungen	++ schnellere Erkennung von Engpässen & schnelle Anpassung	+ Nachhaltigkeitsstrategien beinhalten weitere Ebenen, Informationen über Kunden & Ressourcen helfen	++ ermöglicht frühzeitige Erkenntnisse & vorausschauendes Handeln bei Störungen & Marktveränderungen	++ fördern schnelle Entscheidungen & Anpassung von Produktionsprozessen & Organisationen	++ erhöhen Transparenz & ermöglichen schnelles Reagieren auf Störungen	+ können helfen, jedoch sind redundante Systeme auch material-/infrastrukturell bedingt	+ Unterstützung Weiterbildung, brauchen jedoch weitere Maßnahmen
	+ kulturelle Grundlage, nur indirekte Effekte	0 Vision liefert keinen direkten Beitrag	+ Stärkt Kooperation, nicht ausschlaggebend	+ Zweck bzw. Vision muss klar auf Nachhaltigkeit in der Produktion ausgelegt sein für Effekt	++ fordert gemeinsame Risikoerkennung & Prävention	++ Einheitliche Ausrichtung erleichtert schnelle Anpassungen	+ Vertrauen fördert Datenaustausch, jedoch nicht strukturgebend	0 Kein direkter Beitrag	++ erleichtert Wandel & Weiterqualifizierung
	+ ermöglicht bessere Rückverfolgbarkeit, abhängig von Governance	++ Modularität erleichtert automatisierter Prozesse	++ Modularität steigert Robustheit & Skalierbarkeit	+ Module fördert Reparatur, Upgrade und Wiederverwendung	+ Unterstützt schnelle Umstellung von Produktionspfaden	++ Modular & leicht automatisierbar	+ Reparatur, Upgrade & Wiederverwendung werden begünstigt	+ Module können Backup bewusst integrieren	+ Fördert Anpassungsfähigkeit & Umgang mit modularen Systemen
	++ Notwendig für Koordination aller Akteure	- Komplexität technischer Umsetzung erschwert	+ Diversifizierte Akteursbasis & minimiert Ausfallrisiken	+ Gemeinschaftliche Verantwortung unterstützt Nachhaltigkeit	+ Breites Netzwerk unterstützt Risikoerkennung	++ Netzwerk erleichtert schnellen Wandel	++ Zusammenarbeit reduziert Abhängigkeiten	+ Partner können Backup-Ressourcen bereitstellen	+ Mehr Akteure fördern Lern- & Anpassungsprozesse
	++ Notwendig, um autonome Einheiten zu koordinieren.	++ Automatisierung basiert auf Fernsteuerung	+ Selbststeuerndes Verhalten erhöht punktuelle Resilienz	+ Autonomie steigert Ressourceneffizienz, nicht automatisch Nachhaltigkeit	+ Systeme erkennen Risiken autonom	++ Selbststeuerung ermöglicht schnelle Reaktion	+ Teilweise Selbststeuerung abhängig von Interoperabilität	- Reduziert Redundanz durch effizientes Management	+ Autonome Systeme benötigen neue Qualifikationen
	+ Vertrauen zwischen Akteuren wird gestärkt	- Einheitliche Werte fördern Effizienz, nicht Redundanz	+ Werte erleichtern Abstimmung im Wertstrom	++ Werte fördern ökologische & soziale Verantwortung	++ Gemeinsame Werte fördern Risikoabschätzung	+ Werte erleichtern Abstimmung & Wandelbereitschaft	+ Vertrauen stärkt Zusammenarbeit	- Gemeinsame Werte fördern Effizienz, aber nicht Redundanz	++ Starke Kultur unterstützt Wandel & Weiterbildung
	++ Voraussetzung, damit Netzwerkeffekte greifen	+ Skaleneffekte fördern Automatisierung	+ Netzwerke stabilisieren & verbessern Wertströme	+ Geteilte Ressourcen fördern gemeinsames Nachhaltigkeit	+ Netzwerke steigern Wissen zur Risikoabschätzung	++ Netzwerke beschleunigen Anpassung	++ Größeres Netzwerk reduziert Abhängigkeiten & fördert Zusammenarbeit	+ Netzwerke schaffen alternative Backup-Ressourcen	+ Netzwerke verbreiten Lernprozesse schnell

Bild Wirkungen der Eigenschaften von Ökosystemen auf Treiber der Resilienz. Grafik: eigene Darstellung

3.2 Wirkungszusammenhang von Ökosystemeigenschaften mit Resilienztreibern

Die Wirkung der Eigenschaften von Ökosystemen im Kontext der Kreislaufwirtschaft auf die gewählten Treiber der Resilienz in der Produktion werden folgend in einer Matrix als Wirkmodell dargestellt (Bild).

Dabei werden die Ökosystem-Eigenschaften in den Zeilen und die Treiber der Resilienz in den Spalten positioniert. Die Zeilen der jeweiligen Eigenschaften beschreiben von links nach rechts ihre Wirkung auf die Treiber der Resilienz. Die Bewertung mit „++“, „+“, „0“ und „-“ der identifizierten Wirkungen unterliegt dabei den Anforderungen an ein Wirkmodell und zeigt qualitative Tendenzen mit einer klaren Richtung (+ oder -), und einer klaren Vor- oder Nachteiligkeit sowie keine Auswirkungen („0“) [37]. „++“ beschreibt dabei eine direkte positive Wirkung, die unmittelbar mit der Ursache einhergeht. „+“ beschreibt eine indirekte positive Wirkung, die erst nach einem oder mehreren Zwischenschritten eintritt [38]. Diese simplifizierte Darstellung der Wirkung unterstützt das intuitive Verständnis der Auswirkungen und reduziert die Komplexität des Modells [39]. Durch die Verwendung bekannter Symbole gewinnt das Modell an visueller Klarheit [40].

3.3 Einfluss von Ökosystemeigenschaften auf zentrale Resilienztreiber

Dieser Abschnitt erklärt die Wirkungen der Eigenschaften von Ökosystemen auf die Treiber der Resilienz aus dem Bild.

Eine gemeinsame technologische Infrastruktur hat einen besonders starken positiven Einfluss auf die Resilienztreiber Digitale Vernetzung und Datenmanagement, Automatisierung und Fernsteuerung, Widerstandsfähige Wertstromgestaltung, Nachhaltigkeitsorientierte Produktion, Robuste und transparente Lieferketten sowie Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. Die Infrastruktur bildet die Basis für Vernetzung und Integration, stabilisiert Wertströme, erhöht Transparenz und unterstützt die Rückverfolgbarkeit in einer kreislaforientierten Produktion. Standardisierte Schnittstellen ermöglichen außerdem schnelle Anpassungen und erleichtern den Ausbau bestehender Systeme. Indirekt werden Antizipation und Proaktivität positiv gestärkt, da Frühwarnsysteme über digitale Infrastrukturen eingebunden werden können. Auch organisatorische Wandlungsfähigkeit und Qualifikation profitieren, da Weiterbildung und Entwicklung über gemeinsame Plattformen leichter zugänglich werden. Schließlich lassen sich Redundanz- und Back-up-Systeme zentralisieren, wodurch das Gesamtsystem flexibler auf Ausfälle reagieren kann. [5, 18, 32]

Die Eigenschaft der Co-Creation hat einen besonders starken positiven Einfluss auf die Resilienztreiber Nachhaltigkeitsorientierte Produktion, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Robuste und transparente Lieferketten, Organisatorische Wandlungsfähigkeit und Qualifikation sowie Antizipation und Proaktivität. Gemeinsame Entwicklungen fördern nachhaltige Lösungen, erleichtern die Risikoerkennung und stärken die Bereitschaft zur Anpassung und Weiterbildung. Durch enge Zusammenarbeit steigt die Transparenz in den Lieferketten und die Stabilität des Gesamtsystems wird erhöht. Indirekt wirkt Co-Creation positiv auf digitale Vernetzung und Datenmanagement sowie resiliente Wertstromgestaltung, da gemeinsame Plattformen und abgestimmte Abläufe den Informationsfluss und die Steuerung unterstützen. Gleichzeitig ergeben sich auch negative Effekte: Unterschiedliche Anforderungen aller Akteure erschweren Automatisierung und Fernsteuerung, während gemeinsame Lösungen Doppelstrukturen verringern und somit Redundanzen einschränken können. [12, 13, 15, 30, 34]

Informationsbasierte Wertschöpfung wirkt besonders positiv auf die Resilienztreiber Digitale Vernetzung und Datenmanagement, Resiliente Wertstromgestaltung, Antizipation und Proaktivität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit sowie Robuste und transparente Lieferketten. Hohe Datenqualität, Verfügbarkeit und Interoperabilität schaffen die Grundlage für wirksames Datenmanagement und eine stabile Vernetzung. So lassen sich Engpässe und Abweichungen frühzeitig erkennen, Prozesse flexibel anpassen und Lieferketten robuster gestalten. Monitoring und Analysen liefern zudem Frühwarnsignale, die vorausschauendes Handeln und schnelle Entscheidungen ermöglichen. Indirekt profitieren Automatisierung und Fernsteuerung, da datenbasierte Prozesse deren Einsatz erleichtern, allerdings zusätzliche technische Voraussetzungen notwendig sind. Auch Redundanz- und Backup-Konzepte können gestärkt werden, indem Ausfälle schneller erkannt und Reservekapazitäten gezielt eingeplant werden. Die organisatorische Wandlungsfähigkeit und Qualifikation werden mittelbar unterstützt, da Daten Weiterbildung erleichtern, jedoch ergänzender Maßnahmen bedürfen. [23, 26, 28, 32]

Modulare und komplementäre Lösungen haben einen stark positiven Einfluss auf die Resilienztreiber Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Widerstandsfähige Wertstromgestaltung, Nachhaltigkeitsorientierte Produktion sowie Automatisierung und Fernsteuerung. Die Aufteilung in Module erleichtert schnelle Umstellungen, da einzelne Komponenten unabhängig voneinander angepasst oder ersetzt werden können. Dadurch steigt die Flexibilität, ohne dass das Gesamtsystem instabil wird. Gleichzeitig macht die modulare Gestaltung Wertströme robuster und skalierbarer, da Störungen gezielt isoliert und behoben werden können, ohne den gesamten Ablauf zu unterbrechen. Auch für eine nachhaltigkeitsorientierte Produktion bieten Module Vorteile, weil Reparatur, Upgrade und Wiederverwendung einzelner Elemente einfacher umsetzbar sind und so Materialkreisläufe unterstützt werden. Schließlich begünstigt Modularität die Automatisierung, da standardisierte Schnittstellen und klar definierte Funktionen den Einsatz automatisierter Prozesse erleichtern. [9, 18, 32, 35, 37]

Ein gemeinsamer Zweck und eine klare Vision haben einen besonders positiven Einfluss auf die Resilienztreiber Antizipation und Proaktivität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit sowie Organisatorische Wandlungsfähigkeit und Qualifikation. Eine einheitliche Vision fördert die Anpassungsfähigkeit, da Veränderungen von allen Beteiligten getragen werden. Zudem fördert ein

gemeinsamer Zweck die Bereitschaft zur Weiterbildung und Qualifikationsentwicklung und stärkt damit die langfristige Wandlungsfähigkeit von Organisationen. Indirekt können gemeinsame Werte und Visionen auch Digitale Vernetzung und Datenmanagement begünstigen, da Vertrauen den Austausch von Informationen erleichtert. Dagegen tragen sie nicht direkt zu Automatisierung und Fernsteuerung, Widerstandsfähige Wertstromgestaltung oder Redundanzkonzepten bei. Nachhaltigkeitsorientierte Produktion, Automatisierung und Fernsteuerung und Redundanz und Backup-Konzepte werden als Treiber nicht beeinflusst, da die zugrunde liegende Vision diese Punkte aktiv berücksichtigen muss, damit ein positiver Effekt auftritt. Bei einer beabsichtigten Nicht-Berücksichtigung können ebenfalls negative Wirkungen entstehen. [10, 12–14, 17]

Multilaterale Beziehungen entfalten eine besonders positive Wirkung auf die Resilienztreiber Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Robuste und transparente Lieferketten sowie Digitale Vernetzung und Datenmanagement. Ein breites Netzwerk von Partnern erleichtert schnelle Umstellungen, da unterschiedliche Akteure flexibel auf neue Anforderungen reagieren können und sich so die Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems erhöht. Gleichzeitig verringern sich Abhängigkeiten innerhalb von Lieferketten, da alternative Bezugsquellen verfügbar sind und Risiken auf mehrere Partner verteilt werden können. Dies führt zu einer höheren Robustheit und Transparenz in der Versorgung. Zudem ist die digitale Vernetzung eng mit multilateralen Beziehungen verbunden, da die Koordination zahlreicher Akteure eine intensive Kommunikation und den Austausch von Daten erfordert. Durch diesen Informationsfluss wird die Steuerung komplexer Systeme unterstützt und die Grundlage für resiliente Entscheidungen geschaffen. [2, 12–15, 18, 30, 34]

Autonome Akteure wirken stark positiv auf die Resilienztreiber Antizipation und Proaktivität, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Digitale Vernetzung und Datenmanagement sowie Automatisierung und Fernsteuerung. Systeme mit einem hohen Maß an Autonomie können Risiken eigenständig erkennen und darauf reagieren. Dadurch wird eine frühzeitige Prävention unterstützt und die Reaktionsgeschwindigkeit bei Störungen deutlich erhöht. Gleichzeitig ermöglicht die Selbststeuerung eine flexible Anpassung an neue Bedingungen, da Entscheidungen dezentral getroffen werden können und nicht auf eine zentrale Steuerung warten müssen. Damit steigt die Wandlungsfähigkeit des Gesamtsystems. Autonomie setzt zudem eine enge digitale Vernetzung voraus, da Informationen kontinuierlich ausgetauscht und verarbeitet werden müssen, um koordiniertes Handeln sicherzustellen. Schließlich bildet die Fähigkeit zur Automatisierung die Grundlage für autonome Abläufe. Ohne automatisierte Prozesse und Fernsteuerung wäre eine selbstständige Funktionsweise der Akteure nicht möglich. [18, 23, 26, 32, 36]

Ein gemeinsamer Werterahmen hat einen besonders positiven Einfluss auf die Resilienztreiber Antizipation und Proaktivität, Organisatorische Wandlungsfähigkeit und Qualifikation sowie Nachhaltigkeitsorientierte Produktion. Durch geteilte Werte entsteht ein gemeinsames Verständnis von Risiken und deren Bedeutung. Dies erleichtert die frühzeitige Einschätzung möglicher Gefahren und unterstützt ein vorausschauendes Handeln. Gleichzeitig stärkt ein stabiler Werterahmen die Bereitschaft zur Anpassung und Weiterentwicklung innerhalb von Organisationen. Mitarbeitende sind eher bereit, neue Qualifikationen aufzubauen und Veränderungsprozesse aktiv mitzugestalten, wenn diese auf einem

gemeinsamen kulturellen Fundament basieren. Darüber hinaus fördern gemeinsame Werte eine Ausrichtung auf wirtschaftliche, ökologische und soziale Verantwortung. Dies schafft Orientierung bei der Entwicklung nachhaltiger Produktionsweisen und erleichtert die Integration entsprechender Ziele in operative Entscheidungen. [9, 10, 12, 13, 17]

Netzwerkeffekte wirken besonders positiv auf die Treiber Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Robuste und transparente Lieferketten sowie Digitale Vernetzung und Datenmanagement. Je größer und dichter ein Netzwerk wird, desto vielfältiger sind die Erfahrungen, Perspektiven und Ressourcen, die den beteiligten Organisationen zur Verfügung stehen. Dies erleichtert es, schnell auf neue Anforderungen oder unerwartete Störungen zu reagieren und Strukturen entsprechend anzupassen, wodurch die Wandlungsfähigkeit steigt. Gleichzeitig verringert sich die Abhängigkeit von einzelnen Partnern innerhalb der Lieferkette, da zusätzliche Bezugsquellen verfügbar sind und der Informationsaustausch an Klarheit gewinnt. Dadurch wird das Gesamtsystem robuster und Störungen können leichter abgefedert werden. Auch die digitale Vernetzung profitiert von Netzwerkeffekten, da eine steigende Anzahl an Interaktionen zu einer besseren Durchlässigkeit von Daten und einer breiteren Nutzung digitaler Anwendungen führt. Auf dieser Basis können Informationen in größerem Umfang ausgetauscht und verarbeitet werden, was wiederum ein wirksames Datenmanagement ermöglicht. [12, 28, 30, 32, 34]

Nach der Beschreibung der Wirkungen der Eigenschaften eines Ökosystems auf die Treiber der Resilienz, fasst das folgende Kapitel die wesentlichen Inhalte kurz zusammen.

4 Drei zentrale Dimensionen ökosystemischer Eigenschaften für Resilienz

Die Analyse der Wirkungszusammenhänge zeigt, dass sich die Eigenschaften von industriellen Ökosystemen in drei grundlegende Kategorien einordnen lassen, die jeweils eine spezifische Funktion für die Stärkung organisationaler Resilienz übernehmen.

Erstens bilden Technologie und Daten die harte Grundlage. Eine gemeinsame technologische Infrastruktur sowie informationsbasierte Wertschöpfung schaffen die Voraussetzungen für digitale Vernetzung, Automatisierung und transparente Wertströme. Sie liefern somit die funktionalen und messbaren Elemente, auf deren Basis Resilienz im Ökosystem überhaupt erst entstehen kann.

Zweitens bilden Kooperation und Werte die weiche Grundlage. Eigenschaften wie Co-Creation, ein gemeinsamer Zweck und ein geteilter Werterahmen wirken vor allem auf die kulturelle und soziale Dimension von Resilienz. Sie fördern Vertrauen, gemeinsames Lernen und die Bereitschaft zur Anpassung. Auf diese Weise schaffen sie ein verbindendes Fundament, das die technologische Basis erst wirksam werden lässt.

Drittens fungieren Modularität, Autonomie und Netzwerkeffekte als Verstärker. Diese Eigenschaften erhöhen die Skalierbarkeit und Dynamik von Resilienzmechanismen. Modulare Strukturen erleichtern schnelle Anpassungen und Wiederverwendung, autonome Akteure steigern die Reaktionsgeschwindigkeit und Netzwerkeffekte multiplizieren den Zugang zu Ressourcen, Informationen und Alternativen. Zusammen sorgen sie dafür, dass Resilienz nicht nur punktuell, sondern systemisch und in großem Maßstab wirksam wird.

Im Gesamtkontext verdeutlicht diese Einordnung, dass die Resilienz nicht von einzelnen Eigenschaften eines Ökosystems gefördert werden, sondern durch ein Zusammenspiel aus harter technologischer und datenbasierter Grundlage, weicher kultureller und kooperativer Basis sowie strukturellen Verstärkern, die Anpassungsfähigkeit und Stabilität über Organisationsgrenzen hinweg skalieren.

5 Implikationen für die praktische Umsetzung in Forschungsprojekten

Die zuvor abgeleiteten Zusammenhänge zwischen Eigenschaften von Ökosystemen und Treibern von Resilienz werden im Folgenden anhand von zwei Anwendungsfällen veranschaulicht. Anhand der Projekte „Coppa“ und „DiCES“ lässt sich zeigen, wie die theoretischen Konzepte in der Praxis ausgestaltet und umgesetzt werden. Die Anwendungsfälle verdeutlichen die Relevanz der entwickelten Mechanismen für die Gestaltung zirkulärer Wertschöpfungssysteme und geben Einblick in ihre Validität unter realen Anwendungsbedingungen.

5.1 Forschungsprojekt „Coppa“

Im Forschungsprojekt „Coppa“ (Open Circular-Collaboration-Plattform for Sustainable Food Packaging from Plastics) wurde ein Modell für ein zirkuläres Ökosystem in der Kunststoffverpackungsindustrie entwickelt. Ausgangspunkt war die Analyse des Ist-Ökosystems, auf deren Grundlage ein Soll-Ökosystem skizziert wurde, das die notwendigen Transformationsprozesse der beteiligten Akteure sichtbar macht. Ein zentrales Ergebnis ist der digitale Produktpass (DPP), der in die Circular Collaboration Plattform (CCP) integriert ist und recyclingrelevante Informationen standardisiert und validiert bereitstellt. Damit wird die bisher bestehende Informationslücke zwischen Produktion und Recycling geschlossen und eine Grundlage für hochwertige Rezyklate geschaffen.

Coppa greift damit wesentliche Mechanismen für die ökosystembasierte resiliente Wertschöpfung auf. Die harte Grundlage aus Technologie und Daten wird durch den DPP und die CCP konkretisiert, die Transparenz über Materialflüsse und Nachhaltigkeitswirkungen herstellen. Die weiche Grundlage aus Kooperation und gemeinsamen Werten spiegelt sich in der kollaborativen Entwicklung des Soll-Ökosystems sowie in neuen Geschäftsmodellen wider, die Vertrauen und gemeinsame Verantwortung betonen. Verstärker wie Netzwerkeffekte und Skalierungspotenziale werden über die offene Plattformarchitektur adressiert, die Interoperabilität und Wachstum ermöglicht. Im Rahmen von Coppa wurden vor allem die Resilienztreiber Digitale Vernetzung und Datenmanagement, Robuste und transparente Lieferketten sowie Nachhaltigkeitsorientierte Produktion gestärkt, da Transparenz über Materialflüsse geschaffen, Informationslücken geschlossen und zirkuläre Prozesse datenbasiert gesteuert werden.

Damit zeigen die Ergebnisse von Coppa, wie sich theoretisch beschriebene Prinzipien resilienter und zirkulärer Ökosysteme praktisch umsetzen lassen. Durch die Verbindung von digitaler Transparenz, kooperativen Geschäftsmodellen und skalierbaren Plattformmechanismen entsteht ein Ökosystem, welches die beteiligten Akteure widerstandsfähiger macht. Unternehmen können Risiken früher erkennen, schneller auf Veränderungen reagieren und Abhängigkeiten in Lieferketten verringern. Gleichzeitig

erlaubt die Transparenz über Materialien und Prozesse eine sichere Nutzung von Rezyklaten und die Einhaltung regulatorischer Anforderungen. Das zirkuläre Ökosystem stärkt somit nicht nur die Kreislauffähigkeit, sondern erhöht auch die Resilienz der beteiligten Organisationen gegenüber technologischen, regulatorischen und marktlichen Unsicherheiten.

5.2 Forschungsprojekt „DiCES“

Im Forschungsprojekt „DiCES“ (Digital Transformation of Circular Economy for Industrial Sustainability) wird ein datenbasiertes Wertschöpfungssystem für die multidimensionale Kreislaufwirtschaft entwickelt. Ziel ist es, lineare Wertschöpfungssysteme so zu transformieren, dass mehrere R-Strategien – etwa Remanufacturing, Refurbishment, Reuse und Repair – parallel angewendet werden können. Damit soll nicht nur das Potenzial einzelner Strategien genutzt werden, sondern die ökologisch und ökonomisch optimale Kombination realisiert werden.

Im Projekt wird ein multidimensionales Wertschöpfungssystem modelliert, das die Rollen von OEM, Zulieferern, Distributoren, Endkunden und Recyclingbetrieben neu definiert. Ergänzend werden ein Entwicklungspfad und ein Anforderungskatalog erarbeitet, die den Übergang von linearen zu zirkulären Systemen systematisch beschreiben. Auf technologischer Ebene entstehen ein KI-gestütztes Prognosemodell sowie ein datenbasiertes Entscheidungsmodell, die auf digitalen Zwillingen basieren und die Auswahl geeigneter R-Strategien in Echtzeit unterstützen. Gleichzeitig werden hybride Produktionssysteme entwickelt, welche Demontage, Aufbereitung und Neuproduktion flexibel kombinieren.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, wie die im vorigen Kapitel herausgestellten resilienzfördernden Schlüsseleigenschaften von Ökosystemen in DiCES adressiert werden. Die harte Grundlage aus Technologie und Daten wird über digitale Zwillinge, KI-Modelle und integrierte IT-Systemlandschaften geschaffen. Die weiche Grundlage aus Kooperation und Werten spiegelt sich in der Entwicklung von Geschäftsmodellen und regionalen Unternehmensökosysteme wider, die Vertrauen und gemeinsame Verantwortung fördern. Die Verstärker schließlich werden in Form von hybriden Produktionssystemen und multizirkulären Auftragsabwicklungen umgesetzt, die Wandlungsfähigkeit, Skalierbarkeit und Netzwerkeffekte ermöglichen. DiCES adressiert besonders die Resilienztreiber Flexibilität und Wandlungsfähigkeit, Antizipation und Proaktivität sowie Widerstandsfähige Wertstromgestaltung, da durch digitale Zwillinge, KI-basierte Prognosemodelle und modulare Produktionssysteme eine vorausschauende und adaptive Steuerung der Wertschöpfung ermöglicht wird.

Im Gesamtkontext zeigt DiCES, dass zirkuläre Ökosysteme nicht nur zur Ressourcenschonung beitragen, sondern zugleich die Resilienz der beteiligten Akteure erhöhen. Durch datenbasierte Transparenz können Risiken und Abhängigkeiten frühzeitig erkannt werden, während modulare Produktionssysteme und neue Kooperationsformen die Fähigkeit zur schnellen Anpassung stärken.

6 Zirkuläre Ökosysteme als Wegbereiter einer widerstandsfähigen Industrie

Der Beitrag hat aufgezeigt, dass die Resilienz industrieller Ökosysteme maßgeblich durch ein komplexes Zusammenspiel

ihrer Eigenschaften gefördert wird. Insbesondere lässt sich die Wirkung dieser Eigenschaften in drei Kategorien unterteilen: Die technologische und datenbasierte Grundlage bildet das Fundament für digitale Vernetzung und transparente Wertschöpfung; kooperative Werte und gemeinsame Ziele schaffen das soziale und kulturelle Fundament, das Vertrauen und Anpassungsfähigkeit fördert; und strukturelle Verstärker wie Modularität, Autonomie und Netzwerkeffekte ermöglichen eine Skalierung und Dynamik der Resilienzmechanismen. Somit wird deutlich, dass Resilienz nicht isoliert durch einzelne Maßnahmen entsteht, sondern durch verschiedene Eigenschaften von Ökosystemen gefördert wird.

Vor dem Hintergrund der drängenden Herausforderungen im globalen Kontext liefern diese Erkenntnisse wertvolle Impulse für die Entwicklung zukunftsfähiger Produktionssysteme. Das Konzept der Kreislaufwirtschaft wird dabei durch technologische Innovationen, erweiterte Kooperationsmodelle und adaptive Organisationsstrukturen kontinuierlich weiterentwickelt. Diese Weiterentwicklung eröffnet vielfältige Forschungs- und Gestaltungsperspektiven, um die Resilienz und Nachhaltigkeit industrieller Ökosysteme zu stärken und dadurch einen wesentlichen Beitrag zur nachhaltigen Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft zu leisten.

FÖRDERHINWEIS

Forschungsprojekt „Coppa“ (Open Circular-Collaboration-Platform for Sustainable Food Packaging from Plastics), gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, Förderkennzeichen 281A707C20. Forschungsprojekt DiCES (Digital Transformation of Circular Economy for Industrial Sustainability), gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Förderkennzeichen 01MN23022A.

DANKSAGUNG

Wir bedanken uns bei Sven König, B.Sc., und Stefanie Bareuther, B.A., für ihre Unterstützung und Zuarbeit zur Entstehung dieses Beitrags.

LITERATUR

- [1] Bossut, M.; Diem, C.; Ivanov, D. et al.: Globale Krisen bewältigen: Mit Daten zu resilienteren Lieferketten. Wirtschaftsdienst 105 (2025) 3, S. 205–211, doi.org/10.2478/wd-2025-0054
- [2] Jung, S.: Globale Lieferketten – Zwischen Kosteneinsparungen & Resilienz, Handelsblatt Research Institute. Stand: 2022. Internet: research.handelsblatt.com/wp-content/uploads/2024/07/Playbook_HRI_ServiceNow_Lieferketten.pdf. Zugriff am 18.11.2025
- [3] Everstream Analytics (Hrsg.): Risiken im Jahr 2025: Geopolitik und kritische Mineralienbeschaffung. Stand: 2025. Internet: www.everstream.ai/de/articles/risiken-im-jahr-2025-geopolitik-und-kritische-mineralienbeschaffung/. Zugriff am 18.11.2025
- [4] ifok GmbH; Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) (Hrsg.): Auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft. Die Entwicklung der gesetzlichen Rahmenbedingungen. Stand: Internet: www.kreislaufwirtschaft-deutschland.de/kreislaufwirtschaft/regulierung. Zugriff am 18.11.2025

- [5] Wörner, J.-D.; Schmidt, Christoph M. (Hrsg.): Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit. acatech IMPULS. Stand: 2022. Internet: www.acatech.de/publikation/sicherheit-resilienz-und-nachhaltigkeit/download-pdf?lang=de. Zugriff am 18.11.2025
- [6] Marrenbach, D.; Mack, J.: Resilienz in Wertschöpfungsnetzwerken. wt Werkstattstechnik online 115 (2025) 06, S. 381–388. DOI: <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2025-06-15>
- [7] Bauer, J.: Industrielle Ökologie. Theoretische Annäherung an ein Konzept nachhaltiger Produktionsweisen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2008
- [8] Ulrich, H.: Management. Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmensführung, Band 13, Bern: P. Haupt 1984
- [9] Ellen MacArthur Foundation (eds.): Growth within: A circular economy vision for a competitive Europe. Stand: 2015. Internet: www.ellenmacarthurfoundation.org/growth-within-a-circular-economy-vision-for-a-competitive-europe. Zugriff am 18.11.2025
- [10] Buß, D.; Gebauer, H.; Glawar, R. et al.: Resiliente Wertschöpfung in der produzierenden Industrie – innovativ, erfolgreich, krisenfest. Whitepaper RESYST. Stand: 2021. Internet: www.fraunhofer.de/de/ePaper/Whitepaper/RESYST/index.html#0. Zugriff am 18.11.2025
- [11] Tauer, R.; Aechtner, J.: Modell Deutschland Circular Economy: Eine umfassende Circular Economy für Deutschland 2045 zum Schutz von Klima und Biodiversität. WWF Deutschland. Stand: Juni 2023. Internet: www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Broschuere.pdf. Zugriff am 18.11.2025
- [12] Conrad, R.; Hoeborn, G.; Neudert, P. K. et al.: Seizing the Potentials of Ecosystems. Whitepaper FIR e. V. an der RWTH Aachen. Stand: 2022. Internet: https://epub.fir.de/files/1290/fir-whitepaper-seizing-the-potentials-of-ecosystems_j36sU30Fzw.pdf. Zugriff am 18.11.2025
- [13] Stich, V.; Hoeborn, G.; Spindler, D. M.: Wettbewerbsvorteil der Zukunft – Ecosystem Design. In: Voß, P. H. (Hrsg.): Die Neuerfindung der Logistik: wie sich die Logistikindustrie für das Zeitalter der Volatilität rüstet. Wiesbaden: Springer Gabler 2023, S. 115–129
- [14] Klapper, L.; Spindler, D.; Hoeborn, G. et al.: Circular Ecosystem Development: A Process Framework and Practical Application. Proceedings of NBM 2025. Stand: 2025. Internet: epub.fir.de/files/3862/fir_Klapper_et_al_Circular_Ecosystem_Development_Framework_Preprint_2025.pdf. Zugriff am 18.11.2025
- [15] Pietrulla, F.: Circular ecosystems: A review. Cleaner and Circular Bioeconomy 3 (2022), #100031, doi.org/10.1016/j.clcb.2022.100031
- [16] Daheim, C.; Jöster-Morisse, C.; Störmer, E. et al.: Kreislaufwirtschaft in Deutschland und der EU: Positionen und Perspektiven. Gütersloh: Bertelsmann-Stiftung, 2024, doi.org/10.11586/2025003
- [17] Hummler, A.; Lindner, R.; Posch, D. et al.: Deutschlands zirkuläre Zukunft: Wie Missionen die Transformation zur Circular Economy beschleunigen. Stand: 2023. Internet: https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/PicturePark/2024-02/BST_Focus_Paper_Deutschlands_zirkulaere_Zukunft_ID2007.pdf. Zugriff am 18.11.2025
- [18] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK (Hrsg.): Resilienz im Kontext von Industrie 4.0. Whitepaper der Plattform Industrie 4.0, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA. Stand: 2022. Internet: www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Resilienz.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Zugriff am 18.11.2025
- [19] Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik WGP (Hrsg.): Resiliente Fabriken in bewegten Zeiten. Stand: 09.01.2025. Internet: wgp.de/de/resiliente-fabriken-in-bewegten-zeiten/. Zugriff am 18.11.2025
- [20] Fromhold-Eisebith, M.: Circular Economy trifft urban-regionale Resilienz – Synergien für eine nachhaltig-anpassungsfähige Stadtentwicklung. Standort 47 (2023) 1, S. 33–39
- [21] Liao, A.: Warranty Chain Management. Digitalization and Sustainability. Singapore: Springer Nature 2022, doi.org/10.1007/978-981-19-2104-9
- [22] Alivojvodic, V.; Kokalj, F.: Redefining Waste: R-Strategies and Metrics as a Framework for Driving Progress of Circular Economy Performance. In: Mitrovic, N.; Mladenovic, G.; Mitrovic, A. (eds.): New Trends in Engineering Research 2024. Cham: Springer Nature 2024, pp. 75–91
- [23] Attajer, A.; Chaabane, S.; Darmoul, S. et al.: Evaluation of Operational Resilience in Cyber-Physical Production Systems: literature review. IFAC-PapersOnLine 55 (2022) 10, pp. 2264–2269, doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.10.045
- [24] Da Silva, S. B. G.; Barros, M. V.; Radicchi, J. Â. Z. et al.: Opportunities and challenges to increase circularity in the product's use phase. Sustainable Futures 8 (2024), #100297, doi.org/10.1016/j.sfr.2024.100297
- [25] Recycling Magazin: Remanufacturing: Besser als neu. Stand: 19.05.2023. Internet: www.recyclingmagazin.de/2023/05/19/remanufacturing-besser-als-neu/. Zugriff am 18.11.2025
- [26] Wachter, C.; Beckschulte, S.; Hinrichs, M. P. et al.: Strategies for Resilient Manufacturing: A Systematic Literature Review of Failure Management in Production. Procedia CIRP 130 (2024), pp. 1393–1402, doi.org/10.1016/j.procir.2024.10.257
- [27] Rincón-Guio, C.; Sarache, W.: Mapping the Multifaceted Landscape of Resilience in Manufacturing Strategy: A Systematic Literature Review and Future Research Avenues. Journal of Industrial Integration and Management 09 (2024) 2, pp. 157–193, doi.org/10.1142/S2424862224500064
- [28] Faruquee, M.; Paulraj, A.; Irawan, C. A.: A typology of supply chain resilience: recognising the multi-capability nature of proactive and reactive contexts. Production Planning & Control 35 (2024) 12, S. 1503–1523, doi.org/10.1080/09537287.2023.2202151
- [29] Rincón-Guio, C.; Rico, A.; Triana-García, R. et al.: Strengthening Resilience in the Manufacturing Sector: A Capabilities-Based Approach. In: Ivanov, V.; Silva, F. J. G.; Trojanowska, J. et al. (eds.): Advances in Design, Simulation and Manufacturing VIII. Proceedings of the 8th International Conference on Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange, DSMIE-2025, Porto, Portugal, doi.org/10.1007/978-3-031-95211-1_17
- [30] Ali, M.; Nazir, S.; Junaid, M.: Blockchain Driven Supply Chain Management and Supply Chain Resilience: Role of Intellectual Capital. In: Mubarik, M. S.; Shahbaz, M. (eds.): Blockchain Driven Supply Chain Management. A Multi-dimensional Perspective. Singapore: Springer Nature 2023, pp. 239–254, doi.org/10.1007/978-981-99-0699-4_14
- [31] Brandon-Jones, E.; Squire, B.; Autry, C. W. et al.: A Contingent Resource-Based Perspective of Supply Chain Resilience and Robustness. Journal of Supply Chain Management 50 (2014) 3, S. 55–73, doi.org/10.1111/jscm.12050
- [32] Ghobakhloo, M.; Iranmanesh, M.; Foroughi, B. et al.: Industry 4.0 digital transformation and opportunities for supply chain resilience: a comprehensive review and a strategic roadmap. Production Planning & Control 36 (2025) 1, pp. 61–91, doi.org/10.1080/09537287.2023.2252376
- [33] Bentz, D.; Doan, A.; Meldt, L. et al.: Resilienz in der industriellen Produktion. Eine Aufnahme der Ist-Situation. Darmstadt: TU Darmstadt, 2025, doi.org/10.26083/tuprints-00029006
- [34] Ferhat, S.; Oger, R.; Ballot, E. et al.: Building a collaborative manufacturing system's network resilience through an adaptability potential analysis. European Journal of Innovation Management (2024), doi.org/10.1108/EJIM-12-2023-1144
- [35] Steinmeyer, M.; Metternich, J.: Resilienz aus der Wertstromperspektive. ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 118 (2023) 9, S. 605–609, doi.org/10.1515/zwf-2023-1123
- [36] Caillaud, E.; Goepp, V.; Berrah, L.: Towards “transformative” resilience for the sustainability of Industry 4.0. IFAC-PapersOnLine 58 (2024) 19, pp. 391–396, doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.243
- [37] Hackl, J.: Wirkmodell der Eigenschaften modularer Produktstrukturen. Dissertation, Technische Universität Hamburg, 2021
- [38] Mayer, A.; Thoemmes, F.; Rose, N. et al.: Theory and Analysis of Total, Direct, and Indirect Causal Effects. Multivariate behavioral research 49 (2014) 5, pp. 425–442, doi.org/10.1080/00273171.2014.931797
- [39] Hitchcock, C.: Causal Modelling. In: Beebe, H.; Hitchcock, C.; Menzies, P. (eds.): The Oxford Handbook of Causation. Oxford: Oxford University Press 2009, pp. 299–314
- [40] Kleinberg, S.: Going From Models to Action. In: Illari, P.; Russo, F. (eds.): The Routledge Handbook of Causality and Causal Methods. New York: Routledge 2024, pp. 506–517

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos, MBA 
wolfgang.boos@fir.rwth-aachen.de

Gerit Hoeborn, M.Sc. 
gerit.hoeborn@fir.rwth-aachen.de

Lars Klapper, M.Sc. 
lars.klapper@fir.rwth-aachen.de

Helena Knaup, M.Sc. 
helena.knaup@fir.rwth-aachen.de

Felix Bantle, M.Sc. 
felix.bantle@fir.rwth-aachen.de
 FIR e. V. an der RWTH Aachen 
 Campus-Boulevard 55, 52074 Aachen
www.fir.rwth-aachen.de

LIZENZ



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