

Ansatz zur Ermittlung von Anforderungen der Kreislaufwirtschaft für die Fabrik

Fabrik für die Kreislaufwirtschaft

L. Philipp, M. Schmidt

ZUSAMMENFASSUNG Der Übergang von der linearen Wirtschaft zur Kreislaufwirtschaft muss erfolgen, um dem Klimawandel entgegenzuwirken und eine effizientere Ressourcennutzung zu gewährleisten. Neben den veränderten Anforderungen an die Produkte, wie etwa die Demontagefähigkeit, stehen Fabriken und deren Gestaltung vor neuen Herausforderungen und Anforderungen. Im Rahmen dieses Beitrages wird ein erster Ansatz vorgestellt, mit dem Anforderungen aus der Kreislaufwirtschaft an die Fabrik identifiziert werden können.

STICHWÖRTER

Fabrikplanung, Nachhaltigkeit, Produktionstechnik

Factories for the circular economy

ABSTRACT The transition from linear economy to circular economy is necessary to counteract climate change and ensure a more efficient use of resources. The design of factories is not only faced with new challenges and requirements but also needs to comply with the changing demands on products, e.g. to ensure they can be dismantled. This article presents an initial approach that can be used to identify requirements from the circular economy on factories.

1 Ausgangssituation und Motivation

Das verarbeitende Gewerbe als wirtschaftliches Rückgrat Europas steht vor einer enormen Herausforderung [1]. Nach einem Bericht der Organisation for Economic Cooperation and Development (OECD) ist ohne politische Maßnahmen mit einer Verdoppelung des globalen Ressourcenverbrauchs auf 167 Gt Rohstoffe im Jahr 2060 zu rechnen [2]. Der stetig steigende Ressourcenbedarf ist auch auf die überwiegend lineare Wirtschafts- und Produktionsweise zurückzuführen, die nach dem Prinzip „produzieren, nutzen und entsorgen“ agiert [3]. Dabei werden Rohstoffe vorwiegend mit energetischem Aufwand der Umwelt entzogen und in der Produktion veredelt [4].

Entsprechend sehen sich Unternehmen mit der Verknappung von Rohstoffen sowie Preissteigerungen konfrontiert. Um diesen Herausforderungen europaweit entgegenzuwirken, wurden im Green Deal der EU Maßnahmen definiert, zu denen auch die Kreislaufwirtschaft gehört [5]. Ziel des Paradigmenwechsels von der linearen Wirtschaft zur Kreislaufwirtschaft ist es, Stoffkreisläufe zu schließen, indem Produkte und Rohstoffe nach ihrer Nutzung recycelt oder wiederverwendet werden [6, 7]. Weltweit befindet sich die Implementierung der theoretischen Methoden der Kreislaufwirtschaft in die industrielle Praxis jedoch noch in einem frühen Entwicklungsstadium [8, 9]. So lag der Anteil der Rohstoffen, die am Ende ihrer eigentlichen Nutzungsdauer in die Weltwirtschaft zurückgeführt wurden, im Jahr 2022 nur bei 7,2 % [10]. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass mehr als 90 % der in der Wirtschaft eingesetzten Rohstoffe entweder verschwendet, verloren oder über Jahre hinweg nicht wiederverwendet werden können.

In einigen produktionsnahen Disziplinen, etwa der Produktentwicklung, sind bereits Fortschritte zu verzeichnen [11, 12]. Analog zur linearen Wirtschaft ist die Produktentwicklung auch in der Kreislaufwirtschaft der Ausgangspunkt des Wertschöpfungsprozesses. Sie unterscheidet sich allerdings bereits stark: So müssen bei der Entwicklung kreislauffähiger Produkte neben der eigentlichen Funktionserfüllung auch die Realisierbarkeit der Demontage einzelner Komponenten oder die Nutzung von Sekundärquellen Berücksichtigung finden [13].

In anderen Disziplinen wie der Fabrikplanung birgt der Paradigmenwechsel von der linearen Wirtschaft zur Kreislaufwirtschaft noch große Herausforderungen. Als Beispiel können die schwankenden Kundenbedarfe an Produkten sowie die schwankenden Mengen an Altteilen angeführt werden [14], welche einen erheblichen Einfluss auf die gesamte Dimensionierung der Kapazitäten der Fabrik haben. Des Weiteren wirkt sich die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft beispielsweise durch die anlageninterne Kreislaufführung unmittelbar auf die Gestaltung der Produktionsprozesse aus [15]. Angesichts der Anforderungen der Kreislaufwirtschaft sind zukünftig grundlegende Veränderungen in der Gestaltung von Fabriken erforderlich. Dies betrifft unter anderem die Fertigungsprozesse und -strukturen sowie die Neuausrichtung der Materialflüsse als auch damit verbundene bauliche Anpassungen.

Dieser Beitrag soll einen Grundstein für Forschungsarbeiten zum essenziellen Thema „Fabrik für die Kreislaufwirtschaft“ legen. Hierzu werden zunächst die Kreislaufwirtschaft und das System Fabrik beschrieben sowie beispielhafte Anforderungen der Kreislaufwirtschaft an produktionsnahe Disziplinen vorgestellt. Anschließend wird ein möglicher Ansatz zur Anforderungsermitt-

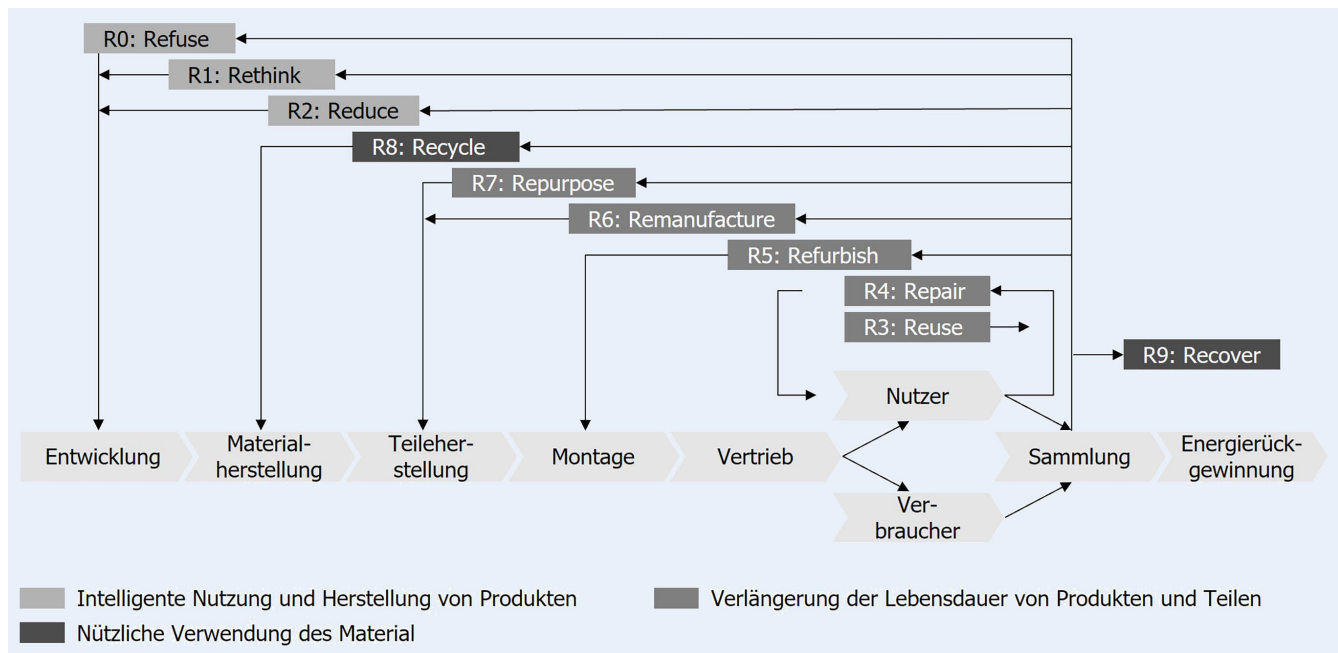


Bild 1. Zuordnung der 9R-Prinzipien zum Wertschöpfungsprozess (in Anlehnung an [25]). Grafik: IFA

lung skizziert, mit welchem Anforderungen aus der Kreislaufwirtschaft an die Fabrik und ihre Planung identifiziert werden können.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Kreislaufwirtschaft

Die Kreislaufwirtschaft bezeichnet ein Produktions- und Konsummodell, dessen Ziel die Lebenszyklusverlängerung von Produkten ist [16]. Darunter kann ein geschlossener Kreislauf verstanden werden, der mit der umweltverträglichen Gewinnung von Rohstoffen für die Primärproduktion und einer ressourcenschonenden Produktion beginnt, eine lange und intensive Nutzung erlaubt und am Ende der Nutzungsdauer eine bestmögliche Rückführung der Altteile und Rohstoffe ermöglicht [17]. Dazu werden Rohstoffe und Produkte so lange wie möglich gemeinsam genutzt, geleast, wiederverwendet, repariert, aufgearbeitet und recycelt [18] und nach ihrer Nutzung wieder als Ausgangsstoffe für neue Produkte eingesetzt. Zur Realisierung der Kreislaufwirtschaft werden zirkuläre Strategien, auch R-Prinzipien genannt, umgesetzt. Die R-Prinzipien werden in einer kaskadierten Reihenfolge angewendet, um Ressourcenströme zu verengen, zu verlängern oder zu schließen [19].

In der Literatur lassen sich verschiedene Rahmenwerke mit einer unterschiedlichen Anzahl an Prinzipien finden, welche sich zudem in ihrer inhaltlichen Ausgestaltung voneinander unterscheiden [20–22]. Dieser Beitrag verwendet das von Potting [23] entwickelte und durch Kirchherr [24] bekannt gemachte „9R-Framework“ zur Ableitung der Anforderungen an die Fabrik. Das Framework besteht aus den drei übergeordneten Strategien Reduce, Reuse und Recycle und umfasst insgesamt zehn Prinzipien. Die zeitlich- und reihenfolgebasierte Zuordnung der zehn Prinzipien in den Wertschöpfungsprozess ist Bild 1 in Anlehnung an Buchberger et al. [25] zu entnehmen.

Durch Ordnungszahlen werden die Prinzipien in der Produktionskette in der Reihenfolge ihrer Priorität für ein Kreislaufsys-

tem geordnet [26]. Je kleiner die Ordnungszahl des jeweiligen Prinzips ist, desto höher ist der Einfluss auf die Kreislaufwirtschaft (Zirkularität) [23].

Nachfolgend werden die Strategien des 9R-Frameworks nach Potting et al. [23] beschrieben:

- R0 – Refuse: Bestehendes Produkt durch die Aufgabe seiner Funktion oder der Übernahme der Funktion durch ein anderes Produkt wegrationalisieren
- R1 – Rethink: Überdenken der Nutzungsweise von bestehenden Produkten
- R2 – Reduce: Steigerung der Effizienz bei der Produktherstellung
- R3 – Reuse: Direkte Wiederverwendung eines entsorgten, funktionsfähigen Produktes. Um eine Wiederverwendung zu ermöglichen, kann Inspektion, Reinigung und Reparatur durchgeführt werden.
- R4 – Repair: Produktlebenszyklusverlängerung durch Reparatur zur Wiederherstellung in einen nutzbaren Zustand.
- R5 – Refurbish: Aufbereiten eines alten Produktes in einen funktionsfähigen Zustand durch das Ersetzen alter und defekter Komponenten.
- R6 – Remanufacture: Durch einen vollständig dokumentierten industriellen Standardprozess wird die Funktion eines alten Produktes auf ein Qualitätsniveau gebracht, das mindestens der ursprünglichen Herstellung entspricht. Der Prozess dafür umfasst das Zerlegen, Prüfen, Reinigen sowie gegebenenfalls den Austausch oder die Reparatur von Teilen.
- R7 – Repurpose: Strukturelle Wiederverwendung von Produkten oder Komponenten für eine neue Funktion.
- R8 – Recycle: Wiederaufbereitung von Abfall zur Rückgewinnung von Rohstoffen oder Produkten.
- R9 – Recover: Energierückgewinnung aus Abfallmaterialien durch energetische Verwertung

Im Folgenden wird auf die Grundlagen der Fabrik als System sowie ihrer Planung eingegangen, da in diese die Anforderungen aus der Kreislaufwirtschaft integriert werden müssen.

		<i>Fabrikfelder</i>		
		<i>Technik</i>	<i>Organisation</i>	<i>Raum</i>
<i>Fabrikebenen</i>	<i>Werk</i>	<ul style="list-style-type: none"> • TGA* - Zentralen 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbauorganisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundstück • Generalbebauung
	<i>Fabrik</i>	<ul style="list-style-type: none"> • TGA* – Verteilung • Informationstechnik 	<ul style="list-style-type: none"> • Produktionskonzept • Logistikkonzept 	<ul style="list-style-type: none"> • Layout • Hülle
	<i>Bereich</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Lagermittel • Transportmittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsorganisation 	<ul style="list-style-type: none"> • Technischer Ausbau
	<i>Arbeitsstation</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Produktionsmittel • Sonstige Mittel 	<ul style="list-style-type: none"> • Qualitäts-sicherungskonzept 	<ul style="list-style-type: none"> • Arbeitsplatz-gestaltung

*Technische Gebäudeausrüstung

Bild 2. Auszug an Fabrikobjekten (in Anlehnung an [15, 37]). Grafik: IFA

2.2 Die Fabrik als System und ihre Planung

Fabriken sind aufgrund ihrer langen Lebensdauer und einem hohen Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit äußerst relevant für den Unternehmenserfolg [15, 27]. Der Paradigmenwechsel von der Linearwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft stellt das System Fabrik sowie dessen Planung vor neue Herausforderungen [28]. In der Wissenschaft und Praxis existiert eine Vielzahl an sequenziellen Fabrikplanungsvorgehen [27, 29–31], die zur Systematisierung in der VDI-Richtlinie 5200 zusammengeführt sind [15, 32]. Das Planungsvorgehen in der Richtlinie besteht aus sieben aufeinander aufbauenden Planungsphasen, die sukzessiv und sequenziell vom Groben ins Feine durchgeführt werden [15, 32]. Der Ansatz der synergetischen Fabrikplanung lieferte einen maßgeblichen Anteil an der VDI 5200 und ist durch die inhaltliche und zeitliche Koordination und Integration der Teildisziplinen der Produktions- und Objektplanung gekennzeichnet [33].

Die Vergangenheit hat aufgezeigt, dass die genannten Disziplinen einen signifikanten Abstimmungsbedarf aufweisen und eine Vielzahl an Wechselwirkungen zwischen ihnen vorherrscht [34]. Durch die Verzahnung der Leistungsphasen der Produktionsplanung (Prozesssicht) mit den Leistungsphasen der Objektplanung (Raumsicht) gemäß der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure [35] wird dem interdisziplinären Charakter der Fabrikplanung Rechnung getragen. Eine bereits in der Planung holistische Betrachtung der Fabrik stellt sicher, dass die Planung und Gestaltung der logistischen und technologischen Prozesse (Prozesssicht) mit denen der Innen- und Außengestaltung der Fabrik aus architektonischer Sicht (Raumsicht) abgestimmt sind und so die vorherrschenden Synergien genutzt werden können.

Im Allgemeinen können Fabriken als komplexe Systeme mit inhärenten Elementen sowie deren Wirkbeziehungen untereinander betrachtet werden [36]. Zur Systematisierung und Reduktion von Komplexität eignen sich die Fabrikobjekte nach Heger [37], welche die zentralen physischen und nicht-physischen inhärenten Elemente der Fabrik darstellen (Bild 2).

Die Fabrikobjekte ergeben sich aus der Gegenüberstellung der von Wirth [38] entwickelten horizontalen Fabrikfelder Technik, Organisation und Raum und den vier vertikalen Fabrikebenen Werk, Fabrik, (Arbeits-)Bereich und Arbeitsstation [39].

2.3 Ansätze der Kreislaufwirtschaft in anderen Disziplinen

Wie in der Einleitung beschrieben, hat die Kreislaufwirtschaft in einigen Disziplinen im Randbereich der Fabrikplanung bereits Einzug gefunden und Anforderungen wurden definiert. Aufgrund des hohen Einflusses auf die Nachhaltigkeit wurden vor allem im Bereich der Produktentwicklung und -gestaltung gezielte Anforderungen identifiziert [40], die sich fundamental von denen der klassischen Produktentwicklung in einer Linearwirtschaft unterscheiden [13]. Mit Blick auf das Ziel, einen möglichst geschlossenen Kreislauf herzustellen, muss bei der Entwicklung integral und interdisziplinär vorgegangen werden. Um dem Ansatz der Kreislaufwirtschaft gerecht zu werden, muss bei der Entwicklung gleichbedeutend sowohl auf die Verfügbarkeit an Materialströmen aus Sekundärquellen als auch auf die Reduzierung der Materialkomplexität beziehungsweise auf den modularen Aufbau geachtet werden [13].

Hierfür lassen sich in der Literatur Strategien und Richtlinien finden, die sich mit der Auswahl von Ressourcen mit geringen Belastungen, der Optimierung der Produkt- und Materiallebensdauer bis hin zur Demontageunterstützung befassen [41–43]. Zur Wiederverwendbarkeit von Materialien sowie Rohstoffen, Bauteilen oder Bauteilgruppen müssen Produkte demontierbar designt werden [44]. Hierfür ist beispielsweise die richtige Wahl von nachhaltigeren Produktions- und Konfektionsmethoden zu beachten. Durch die Verwendung von Clips anstatt Klebe- oder Schweißverbindungen wird am Ende der Produktlebensdauer die Wiederverwendbarkeit erleichtert.

Auch bei der Gestaltung von hybriden Produktionssystemen, die sowohl die lineare als auch die kreislauffähige Produktion abbilden können, sind Anforderungen wie Skalierbarkeit, Flexibilität, aber auch Standardisierung zu berücksichtigen [45, 46]. Auf eine Einführung und Beschreibung von nicht hybriden Produktionssystemen wird an dieser Stelle verzichtet, da nicht hybride Produktionssysteme Anforderungen der Kreislaufwirtschaft nicht oder nur unzureichend gerecht werden können [45].

Anhand der zuvor beschriebenen Darlegung wird deutlich, dass die Kreislaufwirtschaft spezifische Anforderungen an unterschiedliche Disziplinen stellt, die zur Umsetzung notwendig sind.

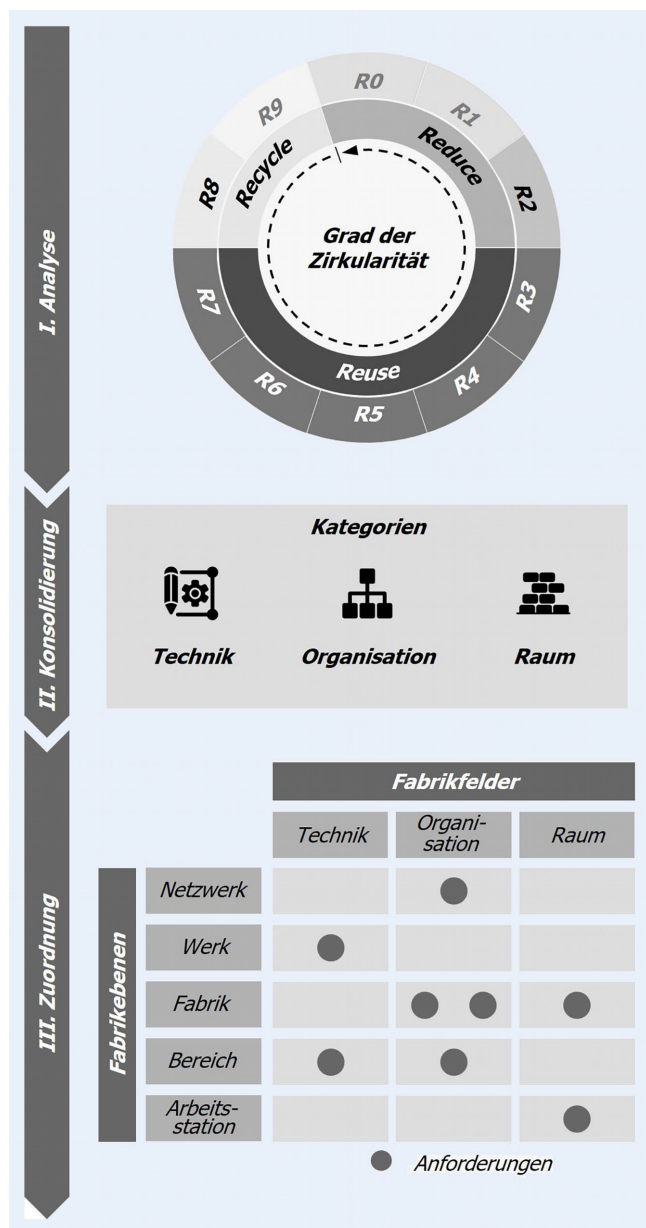


Bild 3. Methodischer Ansatz zur Identifizierung von Anforderungen an die Fabrik aus der Kreislaufwirtschaft. Grafik: IFA

Im Folgenden wird ein Ansatz vorgestellt, der die Identifizierung spezifischer Anforderungen an die Fabrik und ihre Gestaltung ermöglichen soll.

3 Methodischer Ansatz zur Identifikation von Anforderungen

Nachdem die Relevanz disziplinspezifischer Anforderungen der Kreislaufwirtschaft skizziert wurde, wird im Folgenden ein erster Ansatz vorgestellt, der die Identifizierung von Anforderungen an die Fabrik und ihre Gestaltung ermöglichen kann. Der in diesem Beitrag beschriebene Ansatz ist in **Bild 3** dargestellt und besteht aus einem dreiphasigen Prozess, welcher sequenziell durchlaufen wird.

In der ersten Phase erfolgt eine Analyse der Prinzipien mit dem 9R-Framework hinsichtlich ihres Einflusses auf die Fabrik

und deren Planung. Dabei werden nur die Prinzipien betrachtet, die in den Anwendungsbereich dieses Beitrages fallen.

Das Prinzip R0 impliziert den Wegfall der Produktion eines Produktes, sodass eine Restrukturierung einer zu betrachtenden Fabrik nicht erforderlich wäre. Zudem fokussieren die Prinzipien R0 und R1 lediglich die Betrachtung des Produktes [23], sodass von diesen keine Anforderungen an die Fabrik abzuleiten sind. Das Prinzip R9 in Form des energetischen Wiederverwendungsprozesses stellt darüber hinaus allzu spezifische Anforderungen. Deshalb werden in der vorliegenden Analyse in der ersten Phase die Prinzipien R2 bis R8 betrachtet. Ziel der Analysephase ist die Identifikation von Voraussetzungen, die zum einen für die Umsetzung der einzelnen Prinzipien des 9R-Frameworks nötig sind und auf die zum anderen im Rahmen der Fabrikplanung Einfluss genommen werden kann. Unter Berücksichtigung des Ansatzes der synergetischen Fabrikplanung sind dies vor allem Anforderungen aus den logistischen und technologischen Prozessen (Prozesssicht) sowie der Bau- und Objektplanung (Raumsicht). Eine gemeinsame Betrachtung ist durchaus empfehlenswert, um die Synergien zwischen Prozess- und Raumsicht aufzudecken und nutzen zu können.

Im Rahmen der Analyse wird jedes Prinzip zunächst inhaltlich und basierend auf der Einordnung in den Wertschöpfungsprozess (vergleiche Bild 2) beschrieben. Die Beschreibung umfasst neben den durchzuführenden Tätigkeiten und einzelnen Prozessschritten auch die vorherrschenden Schnittstellen zu den unterschiedlichen Struktureinheiten der Fabrik, wie Montage, Produktion oder Logistik. Außerdem soll mit der Analyse Aufschluss über die notwendigen Informationsbedarfe der jeweiligen Prinzipien hergestellt werden. Für die Umsetzung der meisten Prinzipien ist zum Beispiel die Integration einer Demontagelinie zur Zerlegung der zurückgenommenen Produkte in das bestehende Fabrikssystem erwartbar. Die hieraus potenziell resultierenden Anforderungen unter anderem an die Layoutgestaltung oder an die Prognosefähigkeit über die Anzahl an Produktrückläufern sind denkbare Ergebnisse aus der durchzuführenden Analyse.

Das Ziel der zweiten Phase (Konsolidierung) liegt in der systematischen Kategorisierung sowie in der Eliminierung redundanter Anforderungen. Vor allem letztgenannte sind zu erwarten, da von einer hohen Überschneidung der identifizierten Anforderungen der jeweiligen Prinzipien, besonders R4 bis R6, auszugehen ist. Um die Verarbeitung der Anforderungen zu vereinfachen, wird die Konsolidierung mittels eines kategorisierten Anforderungskataloges realisiert. Für die letzte Phase, der Zuordnung der identifizierten Anforderungen zur Fabrik, erscheint die Verwendung übergeordneter Kategorien in Form sogenannter Fabrikfelder als sinnvoll. Während des Konsolidierungsprozesses besteht die Möglichkeit, die Anforderungen mehreren Kategorien zuzuordnen, sofern ihr Einfluss auf mehrere Kategorien zutrifft.

Die letzte Phase des Ansatzes ist die Zuordnung der identifizierten Anforderungen aus der Kreislaufwirtschaft an die Fabrik. Dafür werden die Anforderungen aus dem Anforderungskatalog den Fabrikobjekten nach Heger zugeordnet, sodass die zentralen Elemente der Fabrik berücksichtigt werden. Durch die objektspezifische Zuordnung wird transparent dargelegt, welche Anforderungen von welchem Fabrikobjekt zu erfüllen sind. Es ist nicht auszuschließen, dass die bereits bekannten Fabrikobjekte während der Durchführung ergänzt werden müssen.

So müssen zum Beispiel zur Realisierung der meisten 9R-Prinzipien die bereits hergestellten Produkte am Ende ihres

Lebenszyklus zurück in die Fabrik gelangen. Dafür ist es ebenfalls notwendig, die Reverse Logistik zu betrachten [47] und somit auch die Supply Chain. Dies bedingt eine Ergänzung der im Zusammenhang mit den Fabrikobjekten bereits bekannten Ebenen Werk, Fabrik, Bereich und Arbeitsstation um die Ebene Netzwerk.

Der vorgestellte Ansatz zur Identifizierung von Anforderungen aus der Kreislaufwirtschaft an die Fabrik erlaubt demnach eine kontinuierliche Anpassung und kann zukünftig bedarfsorientiert erweitert werden. Somit kann sichergestellt werden, dass alle potenziellen Anforderungen systematisch dem System Fabrik zugeordnet werden können.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Implementierung kreislauffähiger Prinzipien stellt aus fabrikplanerischer Sicht eine signifikante Herausforderung für eine Vielzahl von Unternehmen dar. Derzeit herrscht Unklarheit, welchen spezifischen Anforderungen der Kreislaufwirtschaft eine Fabrik gerecht werden muss. In Anbetracht des bevorstehenden Paradigmenwechsels von der linearen zur zirkulären Wirtschaft ist es jedoch unumgänglich, sich mit dieser Thematik auseinanderzusetzen.

In diesem Beitrag wird hierfür ein erster, dreiphasiger Ansatz vorgestellt, der die Ableitung von Anforderungen an die Fabrik und deren Gestaltung anhand des 9R-Frameworks ermöglicht. Zunächst werden die einzelnen 9R-Prinzipien analysiert, die gewonnenen Erkenntnisse in geeignete Kategorien konsolidiert sowie abschließend einzelnen Fabrikobjekten zugeordnet.

Um die eingangs beschriebene Herausforderung zu bewältigen und die Einführung kreislauffähiger Prinzipien zu unterstützen, sind weitere Forschungsaktivitäten erforderlich. Der skizzierte Ansatz sollte vertieft und weitergedacht werden, um in Abhängigkeit der identifizierten Anforderungen Maßnahmen aufzudecken, welche die Implementierung der Kreislaufwirtschaft erleichtern.

Literatur

- [1] ManuFUTURE High-Level Group: ManuFUTURE Strategic Research and Innovation Agenda (SRIA) 2030. Stand: 2019. Internet: www.manufuture.org/wp-content/uploads/ManuFUTURE_SRIA_2030_Vfinal.pdf. Zugriff am 20.01.2025
- [2] OECD: Global material resources outlook to 2060. Economic drivers and environmental consequences. Paris: OECD Publishing 2019
- [3] Wilts, H.: Deutschland auf dem Weg in die Kreislaufwirtschaft. Stand: 2016. Internet: library.fes.de/pdf-files/wiso/12651.pdf. Zugriff am 20.01.2025
- [4] Schaller, F.; Randhan, A.; Bösch, E. et al.: Kreislaufwirtschaft als Säule des EU Green Deal. In: Wittpahl, V. (Hrsg.): Klima. Politik & Green Deal, Technologie & Digitalisierung, Gesellschaft & Wirtschaft. Heidelberg: Springer Vieweg 2020, S. 233–251
- [5] Ballester, N.; Zaroffek, J.: Der Kreislaufwirtschaftsaktionsplan als wirtschaftliches Kernstück des Green Deals. In: Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hrsg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. Heidelberg: Springer Vieweg 2022, S. 379–400
- [6] Oluleye, B. I.; Chan, D. W.; Olawumi, T. O. et al.: Assessment of symmetries and asymmetries on barriers to circular economy adoption in the construction industry towards zero waste: A survey of international experts. *Building and Environment* 228 (2023) #109885, pp. 1–13
- [7] Wolf, S.; Jordan, M. M.; Seifert, I. et al.: Wie Industrieproduktion nachhaltig gestaltet werden kann. In: Wittpahl, V. (Hrsg.): Klima. Politik & Green Deal, Technologie & Digitalisierung, Gesellschaft & Wirtschaft. Heidelberg: Springer Vieweg 2020, S. 164–179
- [8] Barreiro-Gen, M.; Lozano, R.: How circular is the circular economy? Analysing the implementation of circular economy in organisations. *Business Strategy and the Environment* 29 (2020) 8, pp. 3484–3494
- [9] Nadeem, S. P.; Garza-Reyes, J. A.; Anosike, A. I. et al.: Coalescing the lean and circular economy. 9th International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, IEOM 2019, Bangkok, pp. 1082–1093
- [10] Circle Economy: The circularity gap report 2023. Stand: 2023. Internet: www.circularity-gap.world/2023. Zugriff am 20.01.2025
- [11] Wang, J. X.; Burke, H.; Zhang, A.: Overcoming barriers to circular product design. *International Journal of Production Economics* 243 (2022) #108346, pp. 1–16
- [12] Boorsma, N.; Polat, E.; Bakker, C. et al.: Development of the Circular Product Readiness Method in Circular Design. *Sustainability* 14 (2022) 15, pp. 1–30
- [13] Jenne, A.: CSR und Kreislaufwirtschaft – Die Zukunft der süddeutschen Industrie liegt in der Kreislaufwirtschaft. In: Herzner, A.; Schmidpeter, R. (Hrsg.): CSR in Süddeutschland. Unternehmerischer Erfolg und Nachhaltigkeit im Einklang. Heidelberg: Springer Gabler 2022, S. 255–274
- [14] Schuh, G.; Mauß, W.; Potente, T. et al.: Green Re-Assembly Upgrade Factory. Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium 2023, AWK, Aachen, pp. 335–360
- [15] Wiendahl, H.-H.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. München: Hanser Verlag 2024
- [16] Ljubicic, I. V.; Metternich, J.: Kreislaufwirtschaft in der Produktion. In: Zäh, M. (Hrsg.): Handbuch nachhaltige Produktion. Rahmenbedingungen, Werkzeuge, Anwendungsfelder. München: Hanser Verlag 2024, S. 229–258
- [17] Kienberger, T.; Mobarakeh, M. R.; Lachner, E. et al.: Systematisches Zusammenwirken von Dekarbonisierung und Kreislaufwirtschaft am Beispiel der Österreichischen Industrie. Studie. Stand: 2022. Internet: fti-monitor.forwit.at/docs/pdf/S260062.pdf. Zugriff am 20.01.2025
- [18] European Parliament: Circular economy: definition, importance and benefits. Internet: www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vkneguz7hwu?ctx=vjxjzv7ta8z1. Zugriff am 20.01.2025
- [19] Bocken, N. M. P.; Pauw, I. de; Bakker, C. et al.: Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering* 33 (2016) 5, pp. 308–320
- [20] Bressanelli, G.; Sacconi, N.; Perona, M. et al.: Towards Circular Economy in the Household Appliance Industry: An Overview of Cases. *Resources* 9 (2020) 11, pp. 1–23
- [21] Jawahir, I. S.; Bradley, R.: Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP* 40 (2016), pp. 103–108
- [22] Sihvonen, S.; Ritola, T.: Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development. *Procedia CIRP* 29 (2015), pp. 639–644
- [23] Potting, J.; Hekkert, M. P.; Worrell, E. et al.: Circular Economy: Measuring innovation in the product chain. Policy Report. Stand: 2017. Internet: www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf. Zugriff am 20.01.2025
- [24] Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127 (2017), pp. 221–232
- [25] Buchberger, S.; Hofbauer, G.; Mangold, L. et al.: Das Konzept der Circular Economy als Maxime für Beschaffung und Vertrieb in der Industrie. Arbeitsbericht Nr. 46. Ingolstadt: Technische Hochschule Ingolstadt 2019
- [26] Bielitz, P.; Jäpel, N.; Heik, D. et al.: Ganzheitliche Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen – der Schlüssel zur Ressourcenwende? *HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik* 60 (2023) 6, S. 1222–1236
- [27] Grundig, C.-G.: Fabrikplanung. Planungssystematik-Methoden - Anwendungen. München: Hanser Verlag 2021
- [28] Lanza, G.; Klenk, F.; Martin, M. et al.: Sonderforschungsbereich 1574: Kreislauffabrik für das ewige innovative Produkt. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 118 (2023) 12, S. 820–825
- [29] Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Hanser; Books on Demand 2010
- [30] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Heidelberg: Springer 2014
- [31] Wiendahl, H.-P.: Grundlagen der Fabrikplanung. In: Eversheim, W.; Schuh, G.; Brankamp, K. (Hrsg.): Produktion und Management »Betriebshütte«. Berlin: Springer-Verlag 1996, S. 9–11
- [32] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 5200 Blatt 1. Fabrikplanung – Planungsvorgehen. Berlin: Beuth Verlag 2011
- [33] Reichardt, J.; Pfeifer, I.: Phasenmodell der Synergetischen Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007) 4, S. 218–225
- [34] Nyhuis, P.; Elscher, A.; Kolakowski, M.: Prozessmodell der Synergetischen Fabrikplanung – Ganzheitliche Integration von Prozess- und Raumsicht. *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004) 4, S. 95–99. Internet: www.werkstattstechnik.de. Düsseldorf: Springer-VDI-Verlag

- [35] Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie: Verordnung über die Honorare für Architekten und Ingenieurleistungen (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure – HOAI). Stand: 2013. Internet: www.gesetze-im-internet.de/hoai_2013/BJNR227600013.html. Zugriff am 20.01.2025
- [36] Burggräf, P.; Schuh, G.: Fabrikplanung. Heidelberg: Springer Verlag 2021
- [37] Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2006
- [38] Wirth, S.; Enderlein, H.; Förster, A. et al.: Zukunftsweisende Unternehmens- und Fabrikkonzepte für KMU. Vortragsband zur Fachtagung, Chemnitz, 1999
- [39] Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2002
- [40] McAloone, T. C.; Bey, N.: Environmental improvement through product development: A guide. Copenhagen: Danish Environmental Protection Agency, 2009
- [41] McAloone, T. C.; Pigosse, D. C. A.: Ökodesign. In: Bender, B.; Gericke, K. (Hrsg.): Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Heidelberg: Springer-Verlag 2021, S. 975–1022
- [42] Das europäische Parlament und der Rat: Richtlinie 2009/125/EG. Stand: 2009. Internet: eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32009L0125. Zugriff am 20.01.2025
- [43] Verein Deutscher Ingenieure: VDI 2243 – Recyclingorientierte Produktentwicklung. Berlin: Beuth Verlag 2002
- [44] Opitz, S.; Dierke, L.; Rödiger, J.: Circular Design – Produkte und Geschäftsmodelle gestalten. In: Büttner, S.; Handmann, U.; Irrek, W. (Hrsg.): Transformation zur Circular Economy. Kleine und mittlere Unternehmen im Wandel begleiten. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2024, S. 97–112
- [45] Riesener, M.; Schukat, E.; Schäfer, N. et al.: Die kreislauffähige Produktion. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 119 (2024) 3, S. 136–140

- [46] Rösiö, C.; Skärin, F.; Gustavsson, P. et al.: Enabling Circular and Reconfigurable Machining System Within the Automotive Industry – A Multiple Case Study. In: Andersson, J.; Joshi, S.; Malmköld, L. et al. (Edit.): Sustainable production through advanced manufacturing, intelligent automation and work integrated learning. Proceedings of the 11th Swedish Production Symposium (SPS2024), Amsterdam, 2024
- [47] Hesse, K.; Clausen, U.: Entsorgung und Kreislaufwirtschaft. In: Handbuch Logistik. Heidelberg: Springer-Verlag 2023, S. 1–119



Luca Philipp, M.Sc. 

Foto: IFA

philipp@ifa.uni-hannover.de

Tel. +49 511 762 18182




Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Schmidt 

Foto: IFA

Leibniz Universität Hannover

Institut für Fabrikanlagen und Logistik – IFA

An der Universität 2, 30823 Garbsen

www.ifa.uni-hannover.de/de

LIZENZ



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