





Produktdesign als Enabler der Kreislaufwirtschaft

Produkte können nicht früh genug in die Planung eines kreisläufigen Fertigungsprozesses einbezogen werden. Weil damit zusätzliche Komplexität ins Spiel kommt, sind entsprechende Entscheidungen jedoch oft erst für spätere Produktionsstufen vorgesehen. An dieser Stelle ist deshalb eine Entscheidungshilfe von großem Wert, die Komplexität systematisch reduziert und den Prozess allgemein vereinfacht – erst recht, wenn sie als Impulsgeber und Orientierungshilfe in der Innovationsphase genutzt werden kann.

Schlüsselwörter

Produktentwicklung, zirkuläres Produktdesign, Kreislaufwirtschaft, Wireframing, Onlinetool

Anina Kusch, M. Sc. ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Industrial Ecology an der Hochschule Pforzheim.

Annika Pruhs, M. Sc. ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Industrial Ecology an der Hochschule Pforzheim.

Dr. Jonas Brinker ist Senior Researcher am Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH.

Prof. Dr.-Ing. Jörg Woidasky ist Professor für Nachhaltige Produktentwicklung an der Hochschule Pforzheim und forscht am Institut für Industrial Ecology sowie am Institut für Werkstoffe und Werkstofftechnologien.

Kontakt

inec@hs-pforzheim.de

www.hs-pforzheim.de/inec

DOI: 10.30844/I4SD.24.1.6

Circularity Navigator

Digitale Entscheidungsunterstützung zur Verankerung des Design for Circularity in der Produktentwicklung

Anina Kusch, Annika Pruhs und Jörg Woidasky, Hochschule Pforzheim,
Jonas Brinker, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH

Für eine erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft auf industrieller Ebene müssen bereits in frühen Phasen der Produktentstehung kreislauffähiges und zirkuläres Design von Produkten und Dienstleistungen sowie passende Geschäftsmodelle mitgedacht werden. Heute geschieht dies aufgrund des hohen Aufwands in der Praxis häufig zu spät. Deshalb wurde eine Vorgehensweise zur Entscheidungsunterstützung konzipiert, mit der auf Basis von Produkt- und Geschäftsmodellcharakteristika passende Gestaltungsgrundsätze für das Produktdesign früh identifiziert werden können. Diese wurde für eine entwicklungsbegleitende Anwendung in ein digitales Werkzeug überführt. Der folgende Beitrag skizziert die Entwicklungsschritte und zeigt, wie zukünftig in Unternehmen kreislauffähige und zirkuläre Produkte einfach und zielsicher entwickelt werden können.

Die Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Produkten steigen derzeit nicht nur aus Umweltsicht, sondern auch durch gesetzliche Rahmenbedingungen und Normen wie beispielsweise der EU-Eco-design-Richtlinie [1]. Daher müssen Unternehmen konkrete Zirkularitätsmaßnahmen umsetzen, die so früh wie möglich in der Produktentwicklung ansetzen. Die Identifikation solcher Maßnahmen und deren konkrete betriebliche Umsetzung ist Gegenstand des durch das Bundeswirtschaftsministerium geförderten Forschungsvorhabens „DfC-Industry“ der Hochschule Pforzheim. Die Herausforderung liegt in der umsetzungsorientierten Bereitstellung von Lösungsansätzen, die für ein breites Produktspektrum anwendbar sind und über die bekannten checklistenbasierten Ansätze und Ökobilanzsoftware-Add-ons für die Integration in bestehende CAD-Software hinausgehen [2]. Diese geben dem Anwender zwar Impulse, setzen im Produktentstehungsprozess

(PEP) jedoch oft zu spät an und sind aufgrund des niedrigen Konkretisierungsgrads aus Sicht vieler Produktentwickler oft nicht zufriedenstellend. Mithilfe einer literatur- und expertenbasierten Entscheidungsunterstützung sowie dem Transfer in ein digitales Tool soll daher ein anwendernahes Instrument geschaffen werden, das die Mängel bestehender

Lösungen überwindet und die zirkuläre Gestaltung zukünftiger Produkte sicherstellt.

Methodenentwicklung vom Entscheidungsbaum zum digitalen Tool

Die Operationalisierung des Design for Circularity (DfC) im PEP ist aufgrund der Vielzahl von Dimensionen und Handlungsebenen eine komplexe Aufgabe. Um diese Aufgabe zu bewältigen, können Entscheidungsmatrizen und -bäume die Akteure im PEP praxisorientiert unterstützen [3].

Im Rahmen des Methoden-Entwicklungsvorhabens wurden drei Dimensionen der Kreislaufwirtschaft ausgewählt, die später als Basis für die Entwicklung von Entscheidungsmatrizen dienen sollten:

1. CBM = Circular Business Models: zirkuläre Geschäftsmodelle und Strategien
2. LCI = Life Cycle Intensity: Klassifizierung der Hauptumweltwirkung eines Produktes. Diese Umweltwirkung wird auf Basis einer Ökobilanzuntersuchung (LCA/Life Cycle Assessment) identifiziert und einer spezifischen Lebenszyklusphase zugewiesen
3. EDA = Ecodesign-Anforderungen: Richtlinien wie z. B. die der EU-Richtlinie 2009/125/EC [1]



Die ORCID-Identifizierungsnummern der Autoren dieses Beitrags sind einsehbar unter <https://doi.org/10.30844/I4SD.24.1.6>.

Dies ist ein Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Attribution License, die die Nutzung, Verbreitung und Reproduktion in jedem Medium erlaubt, sofern das Originalwerk ordnungsgemäß zitiert wird.

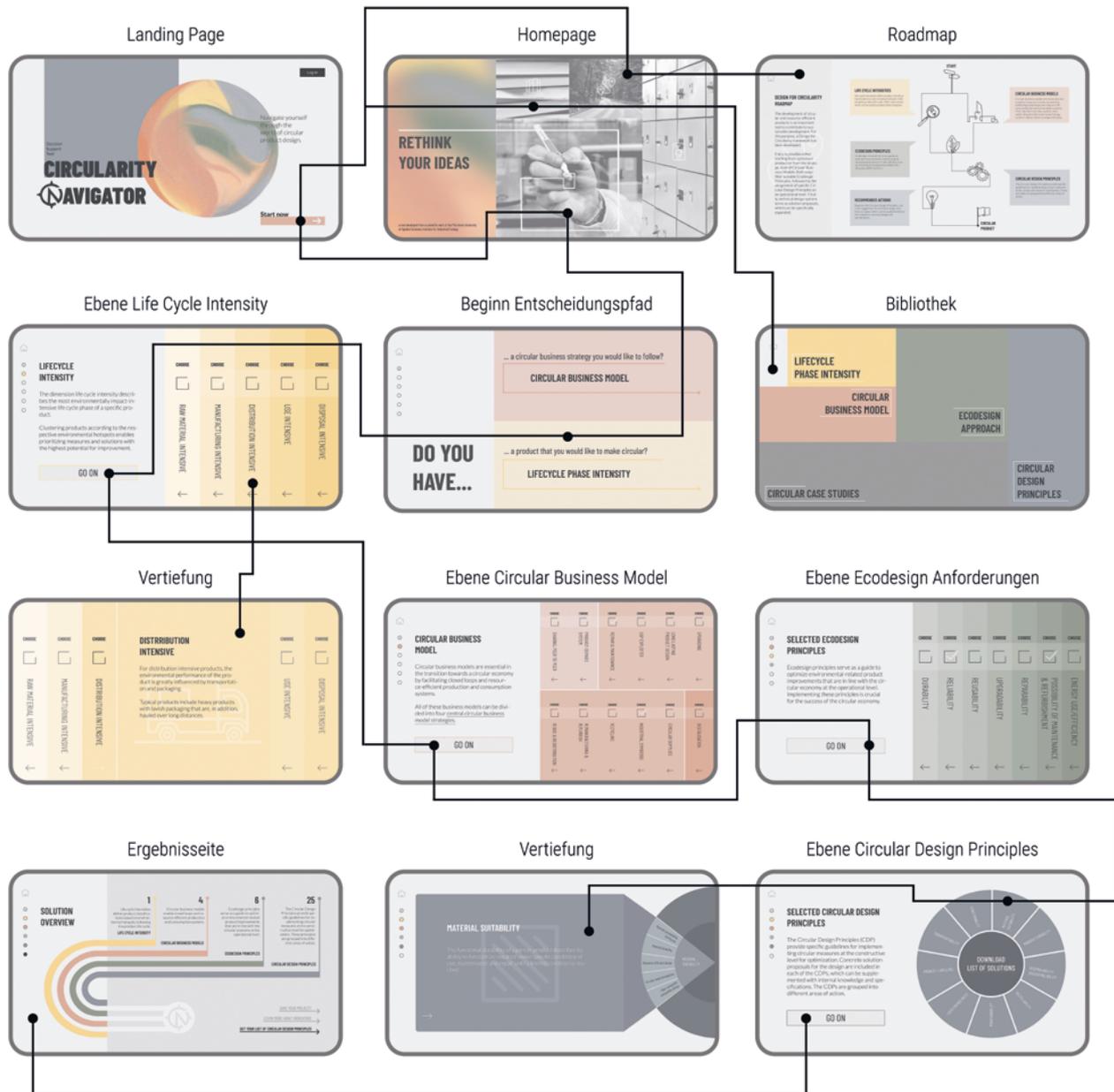


Bild 1: Wireframing des Circularity Navigator.

Die aus jeweils zwei dieser drei Dimensionen gebildeten Entscheidungsmatrizen ermöglichen dann den Vergleich verschiedener Varianten und bieten durch ein Bewertungsraster eine Hilfestellung bei der Entscheidungsfindung. Zudem können Abhängigkeiten und Wechselwirkungen identifiziert werden [4, 5]. Die Kombination der drei Dimensionen ergibt die folgenden drei Matrizen [3]:

In der LCI x EDA-Matrix werden die Lebenszyklusintensitäten den Ecodesign-Ansätzen gegenübergestellt und bewertet. Ausgehend von der Lebenszyklusphase mit den größten ökologischen „Hotspots“ eines Produktes, d. h. der Phase mit dem höchsten Verbesserungspotenzial, werden passende EDAs zuge-

ordnet. Diese Matrix bewertet damit den ökologischen (bzw. „zirkulären“) Beitrag dieser EDAs für die ausgewählte LCI und dient der Priorisierung.

Die CBM x LCI-Matrix kombiniert die LCIs mit sinnvoll anwendbaren CBMs. Sie bewertet den zirkulären Beitrag des Geschäftsmodells für die spezifische Produktart und priorisiert die CBMs für das spezifische Produkt mit seiner jeweiligen LCI.

Die CBM x EDA-Matrix führt die CBMs mit allen EDAs zusammen und dient damit zur Bewertung der Sinnhaftigkeit und Umsetzbarkeit der EDAs im Falle der Umsetzung spezifischer CBMs.

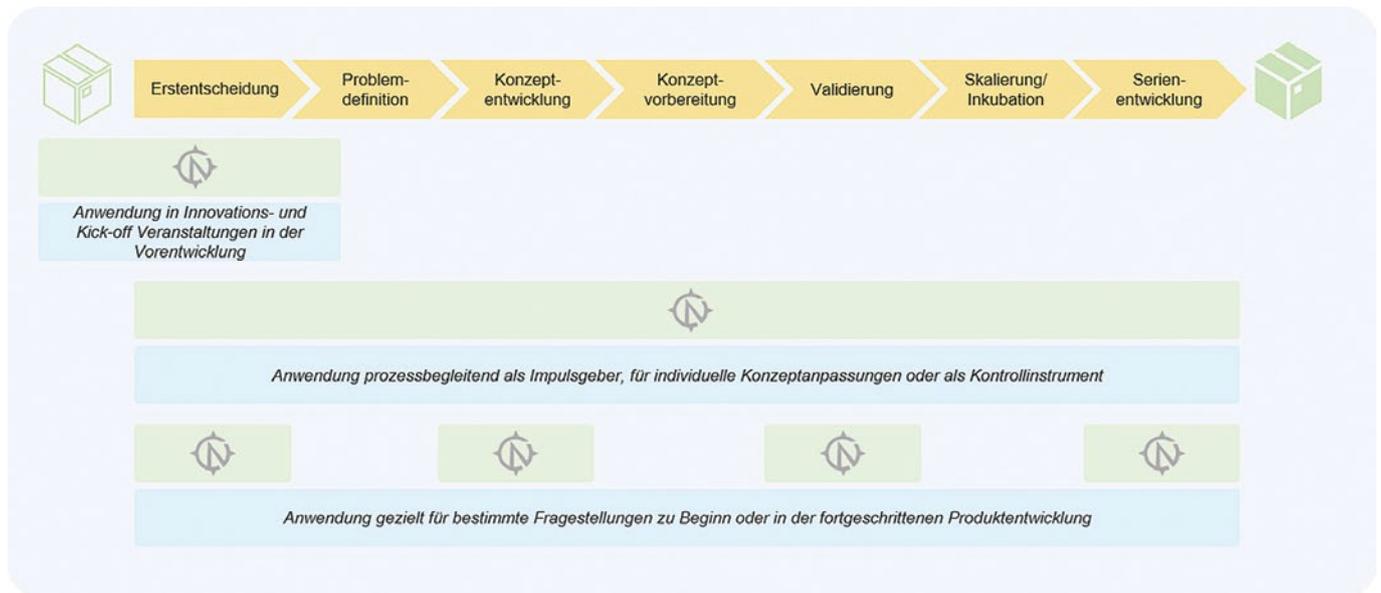


Bild 2: Anwendungszeitpunkte des Circularity Navigators im Stage-Gate-Prozess.

Der Entscheidungsprozess kann entweder von einem strategischen (strategisches Level: Geschäftsmodell) oder einem produktbezogenen Ausgangspunkt (Produktlevel: Neu- oder Folgeentwicklung) gestartet werden [3]. Die Matrizen bilden in beiden Fällen die Grundlage eines Entscheidungsbaums, dessen Pfad zu technischen Prinzipien der Zirkularitätsumsetzung, den Circular Design Principles (CDP), führt.

Für die anwenderorientierte Aufbereitung dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse wurde der Entscheidungsbaum durch die Methode des Wireframing zur Überführung in ein digitales Tool vorbereitet. Als Wireframe wird dabei eine grafische Darstellung einer Benutzeroberfläche verstanden, die bei der Gestaltung von Webseiten, Anwendungen oder Produkten verwendet wird. Diese Visualisierung veranschaulicht die grundlegenden Layout- und Designelemente (**Bild 1**) und kann als Grundlage für eine technische Umsetzung dienen [6]. Die Implementierung der Webanwendung erfolgte dann auf Basis Next.js-Frameworks mit zentraler Datenbank für die Entscheidungsmatrizen und Erklärungstexte. In iterativen Schritten wurden zwischen UX/UI-Team und Softwareentwicklung neue Features definiert und sukzessive implementiert.

Der Circularity Navigator führt Produktentwickler nun durch die Entscheidungsdimensionen. Dabei werden anhand der Bewertungen in den Matrizen die Vielfalt an zirkulären Designprinzipien und die damit verbundene Auswahl an konstruktiven Lösungsansätzen reduziert, während die Auswahl erleichtert wird. Das finale Entwicklungsergebnis des Circularity Navigators wird eine Webanwendung sein,

die sowohl in bestehende Produktentwicklungsmethoden integriert als auch als eigenständige Lösung zur Ideengenerierung im Innovationsmanagement dienen kann.

Einbettung des Circularity Navigators in Produktentwicklungsprozesse

Die Nutzung des Circularity Navigators im PEP soll die Art und Weise, wie Produkte entworfen werden, beeinflussen und so wesentlich zum Erfolg der Kreislaufwirtschaft beitragen. Auf betrieblicher Ebene dienen die EDAs als Instrumente zur gezielten Verbesserung der Umweltverträglichkeit von Produkten [1]. Die Zuordnung und Beschreibung der EDAs für den Circularity Navigator erfolgte anhand eines firmenspezifischen Stage-Gate-Prozesses in Zusammenarbeit mit Unternehmensexperten. Zur Anwendung des Circularity Navigators in Unternehmen wird ein interaktiver Workshop zu Beginn der Produktentwicklung empfohlen. Von den Teilnehmern werden keine Vorkenntnisse zur Zirkularität erwartet. Der sinnvollerweise mit sämtlichen Akteuren durchzuführende Workshop dient der gemeinschaftlichen und effizienten Identifikation zirkulärer Konzepte und Anforderungen an den PEP. Die zentralen Stakeholder, die eine entscheidende Rolle im Gesamtverlauf des Prozesses einnehmen, sind Projektmanager, Entwicklungsingenieure, Fachexperten, Materialentwickler, Kosteningenieure, LCA-Experten, Einkäufer, Produktionsplaner sowie je nach Entwicklungssituation weitere externe Stakeholder wie Kunden oder Entschei-

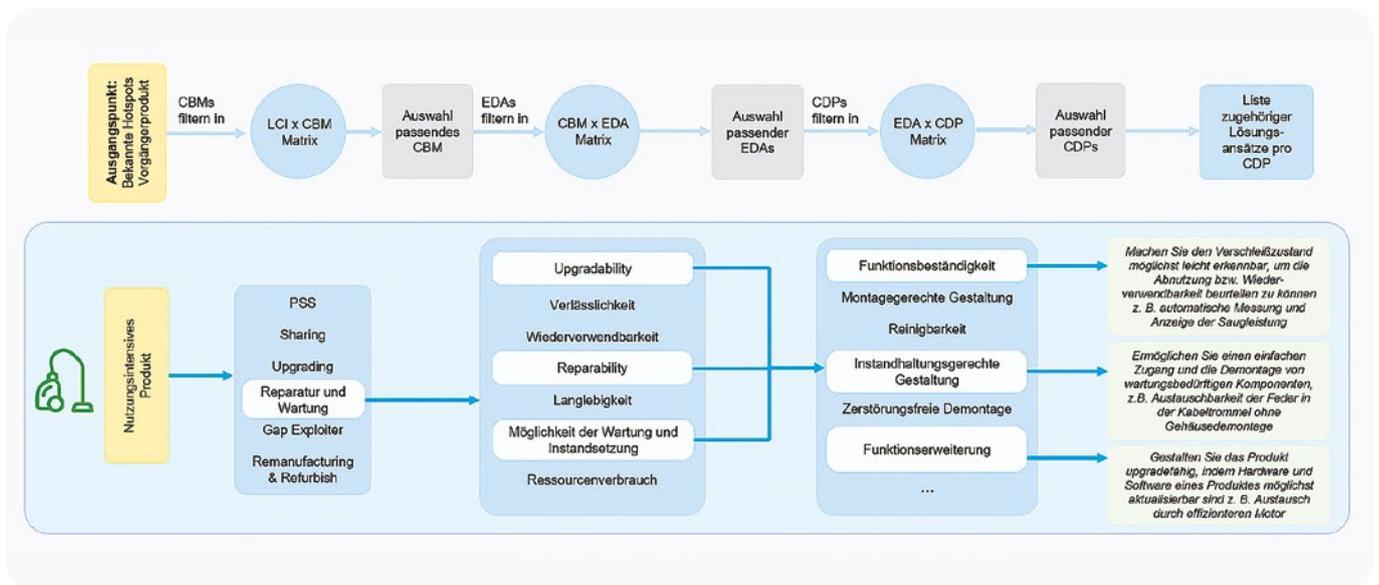


Bild 3: Entscheidungsablauf für den industriellen Produktentwicklungsprozess des Produktbeispiels Staubsauger.

dungsträger. In den weiteren Phasen der Produktentwicklung wird der Circularity Navigator von den jeweils verantwortlichen Stakeholdern in der Entwicklung angewendet [7].

Für Produktentwickler ist es wichtig, die konstruktiven Maßnahmen für zirkuläre Produkte zu kennen. Hier unterstützt der Circularity Navigator nicht nur mit einer produktspezifischen Auswahl an EDAs, sondern zusätzlich mit der technischen Detaillierung eines jeweiligen EDAs auf konstruktiver Ebene, den CDPs. Zusätzlich zu den Informationen über Produktstruktur und Produkteigenschaften ist auch die Kenntnis des idealen Umsetzungszeitpunkts entscheidend für die Umsetzung von Zirkularitätsansätzen: Der Circularity Navigator kann ab der Phase der Ideengenerierung eingesetzt werden, um produktspezifische EDAs auszuwählen und als technische Handlungsmaßnahmen in der Anforderungsliste zu ergänzen. Je nach Entwicklung bzw. Weiterentwicklung des Konzepts kann der Circularity Navigator darüber hinaus für weitere Produktanpassungen oder zur Überprüfung bereits angewandeter oder noch offener zirkulärer Maßnahmen genutzt werden. Zusätzlich dient er als Wissenspool oder als Nachschlagewerk bei offenen Fragen hinsichtlich zirkulärer Strategien.

Nach erfolgreicher Implementierung aller ausgewählten CDPs beginnt nach der Inkubations- bzw. Skalierungsphase die Serienentwicklung der Produkte. In **Bild 2** wird der Prozess der Produktentstehung mit sinnvollen Anwendungszeitpunkten des Circularity Navigators verknüpft, wobei je nach Unternehmen Abweichungen im PEP auftreten. Die hier gezeigten Lösungen sind beispielhaft.

Die Integration des Circularity Navigators im PEP ermöglicht die einfache und systematische Berücksichtigung kreislaufwirtschaftlicher und umweltrelevanter Informationen und deren konstruktive Nutzung. Das Tool stellt dabei für auf anwenderspezifische Produkte und Geschäftsmodelle zugeschnittene Empfehlungen bereit. Besonders wirksam wird es in Unternehmen, bei denen ökologische Voruntersuchungen von Produkten oder zirkuläre Geschäftsmodelle bereits vorhanden sind.

Anwendungsbeispiel für den Circularity Navigator

Die vorgestellte Methode soll nun beispielhaft zur zirkularitätsorientierten Weiterentwicklung eines Staubsaugers angewandt und damit der Entscheidungspfad durch den Circularity Navigator erläutert werden. Der Staubsauger ist Repräsentant der Produktkategorie „Elektrogerät“ [8]. Die schematische Darstellung des beispielhaften Entscheidungspfades dieses Elektrogeräts zeigt **Bild 3**.

Der Einstieg in den Entscheidungsprozess erfolgt auf der „Produktlevel“-Ebene: Aufgrund bereits erfolgter Voruntersuchungen wird das Produkt als nutzungsintensiv klassifiziert. [9] Daher wird die Nutzungsphase als Einstieg bzw. Festlegung für die LCI x CBM-Matrix genutzt. Diese Klassifizierung filtert durch die LCI x CBM-Matrix gezielt Geschäftsmodellfelder mit zirkulären Eigenschaften, wie z. B. „Reparatur und Wartung“, „Sharing“ oder „Upgrading“. Die spezifische Auswahl

ist dabei abhängig von den Anforderungen des Entwicklungsprojekts und der Unternehmenspolitik. In diesem Beispiel wird das Geschäftsmodell „Reparatur und Wartung“ verfolgt, welches sich durch die Verlängerung der Nutzungsdauer und die Steigerung der Funktionalität durch präventive Wartungs- und Reparaturdienste auszeichnet. [10]

Im Folgeschritt werden durch die CBM x EDA-Matrix EDAs identifiziert, die mit dem gewählten Geschäftsmodell kompatibel sind. Im Kontext „Reparatur und Wartung“ sind die grundlegenden EDAs für eine erfolgreiche Umsetzung unter anderem „Reparaturfähigkeit“, „Upgradability“ und die „Möglichkeit der Wartung und Instandsetzung“. Der Circularity Navigator generiert im nächsten Schritt eine Liste von CDPs mit beispielhaften Lösungsansätzen für den Produktentwickler. Die Reparaturfähigkeit eines Produktes kann sich positiv auf die Funktionalität auswirken und die Wiederverwendung ermöglichen [11]. Konkret umsetzbar ist dies durch eine Produktarchitektur, die z. B. während der Nutzungsphase die zusätzliche Bereitstellung von Funktionen und austauschbare Komponenten erlaubt [12]. Eine längere Nutzungsdauer, in der das Produkt in einem definierten betriebsfähigen Zustand bereitsteht, ist das Ziel des EDA „Möglichkeit der Wartung und Instandsetzung“ [11]. Zur Erhaltung dieses Zustandes kann das technische Prinzip der Funktionsbeständigkeit (definiert als Fähigkeit, unter bestimmten Nutzungs-, Wartungs- und Reparaturbedingungen nach Bedarf zu funktionieren, bis ein eingeschränkter Zustand erreicht ist) angewendet werden [13]. Auf konstruktiver Ebene kann hierfür z. B. der Verschleiß auf speziell dafür vorgesehene austauschbare Elemente gelenkt werden [12]. Im Idealfall ist der Verschleißzustand darüber hinaus leicht erkennbar, um die Abnutzung beurteilen zu können. Am Beispiel des Staubsaugers könnte dies durch die Messung und Anzeige der aktuellen Saugleistung umgesetzt werden.

Diskussion und Handlungsempfehlungen

Die Identifikation und Auswahl von Ansätzen für ein kreislauforientiertes und zirkuläres Design sind durch die Vielzahl an Optionen und Abhängigkeiten ein komplexer Prozess. Der Circularity Navigator erleichtert diesen Prozess, indem er Komplexität durch systematisches Vorgehen reduziert und gleichzeitig flexibel im PEP eingesetzt werden kann. Dabei kann das Tool als Impulsgeber und Orientierungshilfe in der Innovationsphase genutzt werden, ermöglicht jedoch keine konstruktionsspezifischen Gestaltungsempfehlungen. Der Detaillierungsgrad durch die CDPs ermöglicht zudem eine Orientierung über konkrete Produktlösungen und verringert den Interpretationsspielraum ge-

nerisch formulierter Nachhaltigkeitsanforderungen. Durch die Erweiterungsmöglichkeit um unternehmensspezifische Lösungen sowie aktueller Informationen im Themengebiet der Kreislaufwirtschaft dient der Circularity Navigator außerdem als Wissensdatenbank.

Für Unternehmen lassen sich aus dem Tool Handlungsempfehlungen für die zirkuläre Produktgestaltung ableiten. Es ermöglicht den Zugang zu kreislauforientiertem und zirkulärem Design aus verschiedenen Richtungen, entweder ausgehend von spezifischen Geschäftsmodellen oder aber von konkreten Produkten. Grundsätzlich ist dabei die frühe Einbindung der verschiedenen Akteure notwendig, um eine Betrachtung von Optionen aus einzelnen Abteilungen mit ihren individuellen Restriktionen und Vorgaben zu ermöglichen. Auch im Verlauf des PEP ist es von Vorteil, Konstruktionsoptimierungen regelmäßig zu hinterfragen, um über die Entwicklungsschritte und Quality Gates hinweg Lösungsräume zu erschließen. Schließlich stellt der Circularity Navigator in seiner Funktion als Wissensbasis eine einfach zugängliche und zentrale Zusammenführung von DfC-Kriterien in der Produktentwicklung sicher.

In einer Erweiterung des Tools soll zukünftig eine quantitative Zirkularitätsbewertung von Produktvarianten basierend auf Kennzahlen sowie eine tiefergehende Unterstützung des Anwenders bei der Auswahl eines für ihn geeigneten Geschäftsmodells ermöglicht werden. Eine Automatisierung der Ableitung von Produktspezifikationen, deren Bewertung und Empfehlung von Optimierungen wird ebenfalls angestrebt. Bei der Entwicklung zirkulärer Produkte können Beteiligte im PEP so von multikriteriell bewertbaren Designoptimierungen profitieren.

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts „DfC-Industry“, das vom Projektträger Jülich sowie im Rahmen des Förderprogramms Ressourceneffizienz vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Kontext der Energiewende für die Projektlaufzeit vom 01.02.2022 – 31.01.2024 unter dem Förderkennzeichen FKZ 03EI5005A gefördert wird. Die Projektpartner Robert Bosch GmbH, iPoint-systems GmbH und das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH/Smart Enterprise Engineering wirken an dem Projekt unter der Leitung des Instituts für Industrial Ecology (INEC) der Hochschule Pforzheim mit.

Literatur

- [1] European Commission: Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council establishing a framework for setting Ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC (2022).
- [2] Tura, N.; Hanski, J.; Ahola, T.; Stahle, M. Piiparinen, S.; Valkokari, P.: Unlocking circular business: A framework of barriers and drivers. In: *Journal von Cleaner Production* 212 (2019), S. 90-98. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.202.
- [3] Pruhs, A.; Kusch, A.; Viere, T.; Woidasky, J.: Operationalisierung von „Design for Circularity“ in der industriellen Produktentwicklung. In: *Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2023*, S. 271-281.
- [4] Grünig, R.; Kühn, R.: *Entscheidungsverfahren für komplexe Probleme. Ein heuristischer Ansatz*. 4. Auflage. Berlin Heidelberg.
- [5] Schawel, C.; Billing, F.: *Top 100 Management Tools. Das wichtigste Buch eines Managers: ABC-Analyse bis Zielvereinbarung*, 4. Auflage. Wiesbaden 2004.
- [6] Gudoniene u. a.: *The Scenarios of Artificial Intelligence and Wireframes Implementation in Engineering Education (2023). Sustainability*. DOI: doi.org/10.3390/su15086850).
- [7] Pruhs, A.; Kusch, A.; Bertagnolli, F.; Viere, T.; Woidasky, J.: Produktentstehungsprozess mit der Lean Methode Makigami – Eine optimierte Produktentwicklung zur Integration eines nachhaltigen und zirkulären Produktdesigns. In: *Industrie 4.0 Management* 39 (2023) 6, S. 55-60. DOI: doi.org/10.30844/IM_23-6_61-65.
- [8] Umweltbundesamt: Elektrogerät. Staubsauger. URL: www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/elektrogeraete/staubsauger#was-sie-beim-kauf-ihres-staubsaugers-beachten-sollten, Abrufdatum 10.11.2023.
- [9] Pérez-Belis, V.; Bakker, C.; Juan, P.; Bovea, M. D.: Environmental performance of alternative end-of-life scenarios for electrical and electronic equipment: A case study for vacuum cleaners. In: *Journal von Cleaner Production* 159 (2017), S. 158-170. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.032, 2017.
- [10] Lüdeke-Freund, F.; Gold, S.; Bocken, N.: A Review and Typology von Circular Economy Business Model Patterns. In: *Journal of Industrial Ecology* 23 (1), S. 36-61. DOI: 10.1111/jiec.12763.
- [11] DIN EN 45554:2020-10: *Allgemeine Verfahren zur Bewertung der Reparier-, Wiederverwend- und Upgradebarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte*; Deutsche Fassung EN 45554:2020.
- [12] Bender, B.; Gericke, K.: *Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*, 9. Auflage. Berlin Heidelberg 2021.
- [13] DIN EN 45552:2020-05: *Allgemeines Verfahren zur Bewertung der Funktionsbeständigkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte*; Deutsche Fassung EN 45552:2020.