

Systematische Auswahl von R-Strategien mit gezielten Maßnahmen für die Produktentwicklung

R-Strategien in der Produktentwicklung berücksichtigen

A. Aichele, C. Rietdorf, V. Honold, A. Otterbach, R. Miehe, A. Sauer

ZUSAMMENFASSUNG Angesichts von Ressourcenknappheit und Umweltproblemen gewinnt die Kreislaufwirtschaft zunehmend an Bedeutung. In diesem Beitrag wird eine Methodik entwickelt, um das ökologische und wirtschaftliche Potenzial sowie die technische Machbarkeit von R-Strategien zu bewerten und gezielte Maßnahmen für die Produktentwicklung abzuleiten. Der Ansatz besteht aus zehn Schritten: Von der Definition von R-Strategien und Produktbeschreibung über die qualitative Bewertung und Priorisierung von Baugruppen und Unterbaugruppen bis hin zur Definition von Prozessketten und der Integration von spezifischen Anforderungen in den Entwicklungsprozess.

STICHWÖRTER

Produktentwicklung, Nachhaltigkeit, Lifecycle Management

Consideration of R-strategies in product development

ABSTRACT In view of resource scarcity and environmental concerns, circular economy is gaining in importance. This paper develops a methodology for evaluating environmental, economic, and technical potential of R-strategies and deriving targeted measures for product development. The approach consists of ten steps: from the definition of R-strategies and product description to the qualitative assessment and prioritisation of assemblies and sub-assemblies, the definition of process chains, and the integration of specific requirements into the development process.

1 Einleitung

Die globale Rohstoffgewinnung und -verarbeitung ist eine der drängendsten Umweltherausforderungen unserer Zeit. Laut Schätzungen des Ressourcenrates der Vereinten Nationen ist sie für mehr als 55 % der globalen Treibhausgasemissionen, 40 % der Luftverschmutzung und mehr als 90 % des Biodiversitätsverlustes verantwortlich. Diese Zahlen unterstreichen die Notwendigkeit einer ressourcenschonenden, zirkulären Wirtschaft [1]. In Anbetracht der Dringlichkeit hat die Europäische Union die Kreislaufwirtschaft als einen der wichtigsten Bausteine des Europäischen Green Deals identifiziert, um bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Deutschland strebt dieses Ziel bereits bis 2045 an [2, 3]. Um die Transformation zu verwirklichen, ist ein klares Verständnis des Konzepts der Kreislaufwirtschaft notwendig.

Die Kreislaufwirtschaft wird als ein innovatives Wirtschaftssystem verstanden, das darauf abzielt, Abfall zu vermeiden und den Ressourcenverbrauch zu verringern. Durch die Rückgewinnung von Materialien wird das Konzept des Lebenszyklusendes ersetzt. Ziel ist eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung, die Umweltqualität, wirtschaftlichen Wohlstand und soziale Gerechtigkeit zum Nutzen heutiger und zukünftiger Generationen schafft [4]. Für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft sind die R-Strategien von zentraler Bedeutung, die das Fundament zirkulärer Wertschöpfung bilden (**Bild 1**).

Die R-Strategien zielen darauf ab, den Verbrauch natürlicher Ressourcen zu minimieren und die Kreislaufführung von Mate-

rialien zu optimieren. Dabei geht es nicht nur um Recycling; alle zehn R-Strategien müssen berücksichtigt werden, um Materialien so lange wie möglich in ihrer höchstmöglichen Verwertungsform zu halten [5, 6]. Beachtlich ist dabei das Potenzial, das in der Kreislaufwirtschaft steckt. Global besteht die Möglichkeit, allein durch die Etablierung der Kreislaufwirtschaft in fünf Schlüsselindustrien (Zement, Aluminium, Stahl, Kunststoffe, Lebensmittel) bis 2050 ein CO₂-Äquivalent von 9,3 Milliarden Tonnen einzusparen [7]. Für Deutschland wird ein Emissionsreduktionspotenzial von 25 % bis 2040 im Vergleich zu einem dekarbonisierten, primär linearen Wirtschaftsmodell prognostiziert [8, 9].

Unterstützt wird die Transformation durch die seit dem 18. Juli 2024 geltende EU-Richtlinie „Ecodesign for Sustainable Products“ (ESPR). Die ESPR umfasst nahezu alle physischen Produkte und legt fest, dass diese in Zukunft unter Berücksichtigung verschiedener Kriterien entwickelt werden müssen [10]. Dazu gehören Funktionsbeständigkeit, Zuverlässigkeit, Wiederverwendbarkeit, Nachrüstbarkeit, Reparierbarkeit, Wartung und Instandsetzung, der Verzicht auf besorgniserregende Stoffe, Energieeffizienz, Wassereffizienz, Ressourceneffizienz, ein hoher Recyclinganteil, die Möglichkeit der Wiederaufarbeitung, Recyclingfähigkeit, Verwertbarkeit von Materialien, die Minimierung der Umweltauswirkungen sowie die Reduktion des CO₂-Fußabdrucks und der Abfallmenge [10, 11]. Viele dieser Kriterien können durch die Entwicklung kreislauffähiger Produkte erfüllt werden.

Neben den gesetzlichen Anforderungen und dem ökologischen Nutzen, bietet die Kreislaufwirtschaft weitere Vorteile. Unter-

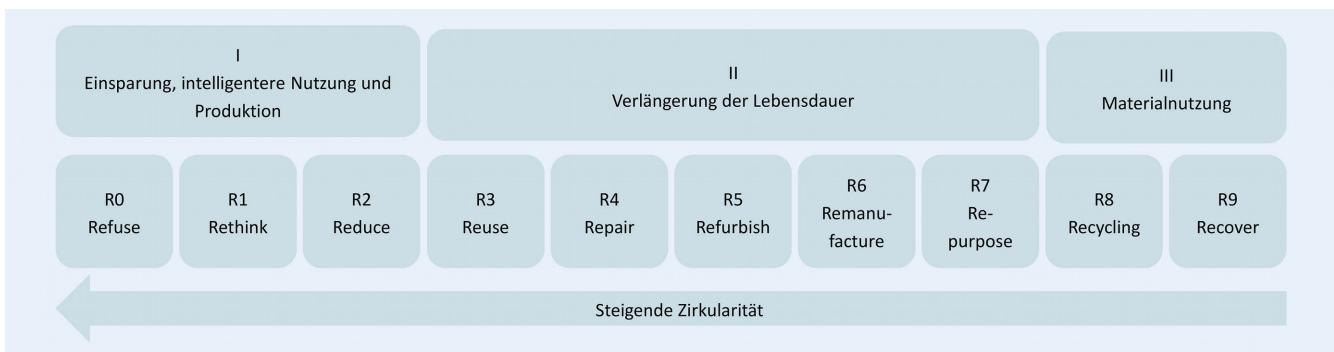


Bild 1. Übersicht über die Einordnung von R-Strategien im 9R-Ansatz. Grafik: Eigene Darstellung nach [6]

nehmen können durch die Umstellung auf Kreislaufmodelle ihre Material-, Energie- und Entsorgungskosten senken und sich Wettbewerbsvorteile sichern. Gleichzeitig kann die deutsche Abhängigkeit von Rohstoffimporten durch eine Senkung des Primärrohstoffverbrauchs verringert werden [7].

Ein Vorreiter in der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien ist das Unternehmen Fairphone. Dieses verwendet für die Herstellung seiner Smartphones nicht nur recycelte Materialien, sondern integriert auch aktiv verschiedene R-Strategien wie Langlebigkeit (Reduce) und Reparaturfähigkeit (Repair), um das Produkt insgesamt nachhaltiger und kreislauffähiger zu gestalten. Dabei wird der gesamte Produktlebenszyklus von der Materialauswahl über das Design bis hin zur Entsorgung und Wiederverwendung berücksichtigt [12]. Trotz solcher Erfolgsbeispiele stehen viele kleine und mittlere Unternehmen (KMU) bei der Umsetzung von zirkulären Ansätzen vor Herausforderungen. Sie sehen sich oft einem stärkeren Wettbewerbsdruck ausgesetzt und haben als Zulieferer oder Unterauftragnehmer nur begrenzten Spielraum bei der Materialauswahl und der Produktgestaltung. Zudem kämpfen KMU häufig mit Cashflow-Problemen, weniger standardisierten Geschäftsprozessen und Schwierigkeiten bei der Suche nach qualifiziertem Personal [13].

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist das Ziel dieses Beitrags, eine praxisorientierte Methode zur Verfügung zu stellen, um KMU bei der Integration von Zirkularität in ihre Produkte zu fördern. Das Verfahren zur niederschwülligen Bewertung sowohl von ökologischen und ökonomischen Potenzialen als auch der technischen Machbarkeit soll KMU bei der Bewertung und Auswahl der für ihre spezifischen Produkte und Prozesse am besten geeigneten R-Strategien unterstützen. Basierend auf der Einschätzung werden die Prioritäten für zukünftige Schritte und Maßnahmen festgelegt, um den gesamten Lebenszyklus nachhaltiger zu gestalten. Soziale Aspekte werden bei der vorgestellten Methode nicht berücksichtigt.

Der Beitrag gliedert sich in vier Kapitel. Nach der Einleitung erfolgt die Darstellung des Stands der Technik, danach die Beschreibung der entwickelten Methode in Kapitel 3 sowie ein Fazit und Ausblick in Kapitel 4.

2 Stand der Technik

2.1 Übersicht über die 9R-Strategien

Lineares Wirtschaften basiert auf Ressourcengewinnung, Produktion, Konsumption und Entsorgung von Produkten. Dies kann zu erheblichen Umweltauswirkungen und wirtschaftlicher Abhängigkeit führen. Um die Folgen unseres Konsumverhaltens

und der damit verbundenen Nutzung natürlicher Ressourcen zu minimieren, existieren verschiedene allgemeingültige Strategien, um Produkte und die darin enthaltenen Materialien effizienter zu nutzen und im Kreislauf zu führen. Sie werden auch als R-Strategien bezeichnet, was auf die gemeinsame Vorsilbe „Re“ der zehn Strategien zurückzuführen ist.

Es existieren vielerlei Definitionen und Frameworks wobei die Definition des Ansatzes 9R's von Potting et al. (2017) [6] in der Literatur am verbreitetsten ist. Dieser unterteilt die R-Strategien zunächst in drei Kategorien (vergleiche Bild 1 oben):

1. Die Einsparung, intelligenter Nutzung und Produktion eines Produkts
2. Die Verlängerung der Lebensdauer des Produkts und/oder Komponenten durch einen werterhaltenden Prozess
3. Die Optimierung der Nutzung der in den Produkten enthaltenen Materialien und Rohstoffe

Die Kategorien und die darin enthaltenen R-Strategien sind nach absteigender Zirkularität sortiert, wobei eine höhere Zirkularität im ersten Sinne mit einem höheren ökologischen Nutzen korreliert, da weniger Ressourcen verbraucht werden und somit Umwelteinwirkungen durch die Prozesskette reduziert werden. Diese Faustregel gilt es individuell für jede Strategie zu überprüfen, da durch Sekundär- oder Rebound-Effekte der ökologische Nutzen zusätzlich beeinflusst werden kann [6].

Die erste Kategorie des 9R-Frameworks zielt auf die Optimierung der Produktnutzung sowie Produktion und eine potenzielle Einsparung des Produkts ab, wodurch sich die Anwendung und Ausführung der Strategien auf die grundlegende Entwicklungsphase des Produkts beschränkt. Dazu zählen die in Tabelle 1 genannten Strategien.

Während traditionelle Ansätze wie das Recycling, die sich im Konzept der Kreiswirtschaft finden, das Abfallmanagement adressieren, reichen sie nicht aus, um die Verbindung zwischen wirtschaftlicher Aktivität, Ressourcenverbrauch und seinen Folgen zu durchbrechen. In einer Kreislaufwirtschaft werden Produkte mit dem Ziel wiederverwendet, ihren Wert so lange wie möglich zu erhalten. Dies beginnt auf Produktebene, geht über Komponenten und endet schließlich bei Materialien, wobei stets der höchstmögliche Wert erhalten bleiben soll. Prozesse, die darauf ausgelegt sind, den Wert von Produkten, Komponenten und Materialien zu erhalten oder wiederherzustellen, werden als werterhaltende Prozesse bezeichnet. Die beschriebenen werterhaltenden Prozesse variieren je nach Zustand der Produkte bei der Wiederverwendung, den spezifischen Schritten, die in jeder Strategie enthalten sind, und den daraus resultierenden Umweltauswirkungen.

Tabelle 1. Strategien der ersten Kategorie des 9R-Frameworks, nach [5].

R0 Refuse	Das Produkt wird nicht benötigt und seine Funktion wird anderweitig erfüllt.
R1 Rethink	Der Einsatz und die Gestalt des Produkts werden überdacht oder die Nutzungsdauer bzw. Häufigkeit wird erhöht.
R2 Reduce	Reduzierung beispielsweise des Ressourcenverbrauchs und Erhöhung der Effizienz in der Produktion und Nutzung.

Tabelle 2. Strategien der zweiten Kategorie des 9R-Frameworks, nach [14].

R3 Reuse	Ein Prozess, durch den Produkte oder Komponenten, die kein Abfall sind, für denselben Zweck wiederverwendet werden, für den sie ursprünglich bestimmt waren.
R4 Repair	Gezielte Reparatur von Mängeln oder Schäden an einem defekten Produkt, um es in den ursprünglichen Zustand vor dem Reparaturbedarf zurückzuversetzen, wodurch eine weitere Nutzung für den vorgesehenen Zweck ermöglicht wird.
R5 Refurbishment	Modifikation eines Objekts oder Produkts, um seine Funktionalität oder Leistung zu erhöhen oder wiederherzustellen oder um es wieder in Übereinstimmung mit technischen Standards oder anderen Anforderungen zu bringen, was zu einem voll funktionsfähigen, qualitativ hochwertigen Gebrauchprodukt führt, das für seinen ursprünglichen Zweck über einen unbestimmten Zeitraum wiederverwendet werden kann und nicht auf den Markt gebracht wird.
R6 Remanufacturing	Werterhaltender standardisierter (industrieller) Prozess, bei dem ein wiederaufbereitetes Produkt mit mindestens der Funktionalität und Leistung des Originalprodukts aus wiederaufbereiteten Komponenten eines oder mehrerer gebrauchter Teile und neuen Komponenten erstellt wird.
R7 Repurposing	Prozess, bei dem ein Produkt oder seine Komponenten für eine andere Funktion angepasst werden, als ursprünglich vorgesehen, ohne wesentliche Änderungen an seiner physikalischen oder chemischen Struktur vorzunehmen.

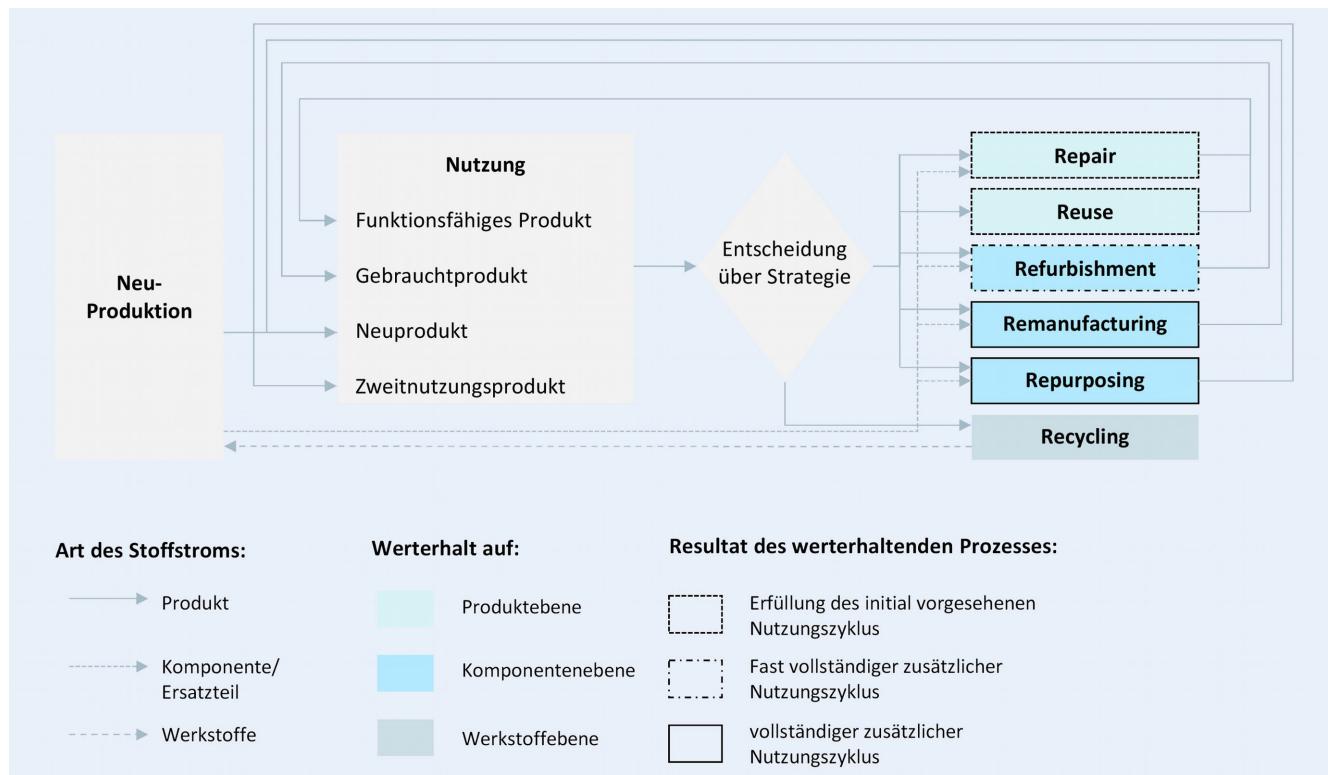
**Bild 2.** Übersicht über die werterhaltenden Prozesse zur Lebensdauerverlängerung. *Grafik: Eigene Darstellung angepasst nach [14]*

Tabelle 2 stellt Strategien zur Implementierung werterhaltender Prozesse zur Lebensdauerverlängerung von Produkten und Komponenten dar [12]. Die Prozesse zur Realisierung dieser Strategien und die daraus resultierenden Zweitnutzungsprodukte zeigt **Bild 2** [14].

Zur Komplettierung des 9R-Frameworks bieten Material- und Energierückgewinnungsstrategien einen letzten Weg der effizienten Abfallrückführung nach Erst- und Zweitnutzungen am End-of-Life des Produkts, falls keine der Strategien R3 bis R7 angewendet werden kann (**Tabelle 3**).

Tabelle 3. Strategien der zweiten Kategorie des 9R-Frameworks, nach [5].

R8 Recycling	Jede Rückgewinnungsoperation, bei der Abfallmaterialien in Produkte, Materialien oder Substanzen umgewandelt werden, entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke, einschließlich der Aufbereitung organischer Materialien, jedoch ausgenommen der Energierückgewinnung und der Umwandlung in Materialien, die als Brennstoff oder für die Auffüllung verwendet werden.
R9 Recover	Wenn kein stoffliches Recycling mehr möglich ist, ist der letztmögliche Weg der Verwertung die energetische Rückgewinnung.

2.2 Berücksichtigung der R-Strategien in der Produktentwicklung

Durch die zunehmende Bedeutung ökologischer Aspekte geprägt mit gesetzlichen Anforderungen sind in der Vergangenheit einige Ansätze entstanden, welche die Zirkularität unter Einbezug der R-Strategien in Unternehmen einführen und unterstützen. So entwickelten Hermandi *et al.* [15] einen Potenzialcheck „Circular Economy“ zur Identifizierung und Umsetzung von Potenzialen der Kreislaufwirtschaft. Das vierstufige Instrument hat zum Ziel in vier betrieblichen Handlungsfeldern über eine Soll/Ist-Analyse mittels definiertem Fragenkatalog Potenziale zu identifizieren und daraus Maßnahmen zu entwickeln. In den betrieblichen Handlungsfeldern ist die Entwicklung und der Entwicklungsprozess mitberücksichtigt. Durch den breiten Fokus auf mehrere Handlungsfelder beschränkt sich der Potenzialcheck aber nur auf „was“ und nicht auf „wie“ es umgesetzt werden kann. Eine Unterstützung des Design-(Entscheidungs-)Prozesses ist somit nicht gegeben.

Weitere Ansätze versuchen die Zirkularität bereits bei der Geschäftsmodellentwicklung mit zu berücksichtigen [16–19]. In den iterativen Abläufen entstehen Produkte, die den Zirkularitätsgedanken per se in sich tragen und die Zirkularität eine absolute Basisanforderung darstellt. Durch dieses Ausrichten auf die Zirkularität ergeben sich auch konkrete Anforderungen an das Design (etwa Reparierbarkeit bestimmter Komponenten). Diese Ansätze sind aber nicht auf Produkte anwendbar, bei deren Entwicklung die Zirkularität kein zentrales Element ist, da der Fokus auf die Erfüllung anderer Anforderungen (zum Beispiel Sicherheit, Funktionen) ausgerichtet ist und diese im Entwicklungsprozess bearbeitet und erfüllt werden müssen. Eine nachgelagerte Berücksichtigung von Zirkularität und bewusste Priorisierung verschiedener Zirkularitätsansätze, um zumindest einige Aspekte zu verbessern, ist nicht vorgesehen.

Für bereits existierende Produkte haben Stölzle *et. al* [20] einen Ansatz mithilfe des House of Quality entwickelt: Über eine Literaturrecherche zum Life Cycle Assessment (LCA) werden die relevanten Anforderungen an eine LCA identifiziert. Anschließend erfolgt ein Abgleich mit den Kriterien für ein zirkuläres Design, um zu erkennen, welche LCA-Anforderungen besonders beeinflusst werden können. Mit diesem Wissen werden dann die Komponenten des Produkts auf die Umsetzbarkeit der zirkulären Designanforderungen bewertet. Dieser Ansatz hat zum einen den Nachteil, dass bereits Literatur mit LCA-Ergebnissen zum Produkt bestehen muss. Zum anderen werden vor allem solche Komponenten designseitig verändert, welche leicht zu beeinflussen sind und nicht diejenigen, die einen besonders hohen negativen Einfluss auf die Zirkularität und somit die LCA haben.

Einen weiteren Ansatz, der das House of Quality im Rahmen einer Quality Function Deployment (QFD) nutzt, schlagen Siwiec *et al.* [21] vor. Dabei wird der Bereich der Kundenanforderungen (Schritt 1 der QFD) ergänzt um ökologische Aspekte bezogen

auf Nachhaltigkeit und Zirkularität. Die weiteren Schritte werden dann analog der QFD durchgeführt. Vorteil dieses Ansatzes ist, dass das Design sowohl für Bestands- als auch Neuproekte verbessert werden kann. Nachteil dieses Ansatzes ist, dass ökologische Aspekte und sonstige Anforderungen gegeneinander gewichtet werden müssen. Insbesondere bei den bereits angesprochenen Produkten mit Fokus auf Erfüllung anderer Anforderungen als der Zirkularität führt dies zwangsläufig laufend zu Zielkonflikten und wenig genereller Akzeptanz, Elemente der Zirkularität in das Produkt einfließen zu lassen.

Ein Sammelsurium weiterer verschiedenster Ansätzen ist auf diversen Internetplattformen zu finden (etwa: ecodesignkit [22], CIRCItnorden [23], Dansk Design Center [24], Ellen MacArthur Foundation [25]). Diese setzen aber, wie bei den bereits vorgestellten Ansätzen, schon bei der Geschäftsmodellentwicklung an und nicht bei der Verbesserung eines existierenden oder geplanten Produkts oder kalkulieren auf Basis von Check-Fragen einen Score mit anschließenden allgemeinen Verbesserungsvorschlägen (Circular Design Rules [26]).

Zusammenfassend zeigt sich, dass bereits viele Ansätze bestehen, um die Zirkularität in der Produktentwicklung mitzuberücksichtigen. Aus den aufgezeigten Schwächen ergeben sich die Anforderungen an die zu entwickelnde Methode:

1. Der Designprozess muss durch die Definition von konkreten Tätigkeiten unterstützt werden, damit klar ist wie R-Strategien im Produkt umgesetzt werden können.
2. Die Methode muss auf bereits bestehende Designkonzepte ohne Einschränkung anderer nicht zirkulärer Anforderungen (zum Beispiel Sicherheit, Funktion) anwendbar sein, um die Zirkularität von Produkten, bei denen diese nicht im Fokus steht, zu verbessern.
3. Es ist eine Priorisierung für relevante R-Strategien vorzunehmen. Durch die Konzentration auf wenige bedeutende Strategien soll die Akzeptanz bei den umzusetzenden Personen sichergestellt werden und vor allem bei KMU die beschränkten Kapazitäten sinnvoll eingesetzt werden.
4. Die Methode soll ohne zusätzliche LCA-Berechnungen anwendbar sein. Sofern diese nicht vorliegen, stellt dies einen hohen zusätzlichen Aufwand dar, was zu einer geringeren Akzeptanz und eventuell einer Nicht-Umsetzung von Aspekten der Zirkularität führt.

3 Entwickelte Bewertungsmethode

Aufgrund der dargestellten Herausforderungen und Anforderungen wird hier ein Ansatz dargestellt, der die Zirkularität von bereits definierten Produkten verbessern soll und in der entwicklungsseitigen Ausdetaillierung des Produkts angewendet wird. Entsprechend dieser Beschreibung findet diese Methode bei gängigen Produktentwicklungsprozessen wie dem V-Modell in der Komponentenspezifikation statt. Durch diese Einordnung in die Phase des Produktentwicklungsprozesses können in dem Ansatz

**Bild 3.** Übersicht über das entwickelte Vorgehen. *Grafik: Eigene Darstellung***Tabelle 4.** Vorlage zur Dokumentation der erarbeiteten Inhalte.

Baugruppe/ Komponente	Funktion/ Eigenschaft	Anzahl	Rethink							Reduce	...
			Der Einsatz und die Gestalt des Produkts werden überdacht oder die Nutzungsdauer bzw. Häufigkeit wird erhöht.								
Baugruppe 01											
Komponente 01											
Komponente 02											
Komponente xx											
Baugruppe zz											
Komponente 01											
Komponente 02											
Komponente xx											
...											

nur die R-Strategien R-1 bis R-8 Anwendung finden (vergleiche Kapitel 2.1). Die für diesen Ansatz entwickelte Methode besteht aus zehn Schritten und ist überblicksartig in **Bild 3** dargestellt.

Schritt 0: Organisation

Dieser vorbereitende Schritt betrifft grundsätzlich notwendige organisatorische Themen: So ist neben dem zu betrachtenden Produkt, Projektumfang und Zeitplan ein Team zur Bearbeitung zu definieren. Bei der Teamauswahl sollte darauf geachtet werden, dass neben der technischen Expertise für die konstruktive Umsetzung des Produkts (Entwickelnde) auch Personen mit Nachhaltigkeitsexpertise (zum Beispiel LCA) vertreten sind. Zusätzlich sind ein bis zwei Moderierende notwendig, welche die Leitung von Workshops übernehmen und bei eventuellen Konflikten vermitteln können.

Schritt 1: Einheitliches Verständnis R-Strategien

Im ersten operativen Schritt der Methode ist ein einheitliches Verständnis zu schaffen: Dies betrifft zuerst die R-Strategien. Dieses einheitliche Verständnis ist notwendig, um die Teilnehmer auf einen gemeinsamen Kenntnisstand zu bringen und eventuellen

Missverständnissen vorzubeugen. Die Umsetzung dieses Schrittes kann beispielsweise mithilfe eines Foliensatzes erfolgen, welcher die Inhalte aus Kapitel 2.1 umfasst.

Schritt 2: Produktbeschreibung

Neben dem einheitlichen Verständnis für die R-Strategien ist ein einheitliches Verständnis für das betrachtete Produkt sicherzustellen. Bei Entwicklungsprojekten sind häufige Änderungen üblich und ein einheitlicher Kenntnisstand ist im Projektteam nicht sichergestellt. Daher ist es notwendig, den Aufbau des Produkts zu Beginn zu besprechen. Es bietet sich eine Detailierungsstufe bis zur Baugruppenebene an, die anhand der Stückliste vorgenommen werden kann. Für erläuternde Informationen (zum Beispiel Funktionen und Charakteristika) bietet sich die Dokumentation in einer separaten Spalte einer Tabelle an (vergleiche Tabelle 4), die auch in weiteren Schritten genutzt wird.

Schritt 3: Beschreibung R-Strategien

Für eine Bewertung der Baugruppen und Komponenten eines Produkts hinsichtlich der Umsetzung möglicher R-Strategien ist für jede Baugruppe und jedes Bauteil die jeweilige R-Strategie

Tabelle 5. Bewertungsskala für die aufgestellten Kriterien.

Stufe	Technische Machbarkeit	Ökologisches Potential	Ökonomisches Potential
1	Im aktuellen Design nicht möglich, hoher Aufwand für Designänderung	Sehr gering	Sehr gering
2	Im aktuellen Design nicht möglich, geringer Aufwand für Designänderung	Eher gering	Eher gering
3	Im aktuellen Design möglich, mit größeren Aufwänden bei der Umsetzung (umfangreiche Demontage, ...)	Eher hoch	Eher hoch
4	Im aktuellen Design möglich, ohne größere Aufwände bei der Umsetzung	Sehr hoch	Sehr hoch

von R-1 bis R-8 entsprechend den spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten zu beschreiben und zu präzisieren. Neben der konkreten Beschreibung, was bei Umsetzung der jeweiligen R-Strategie mit dem betrachteten Element passieren würde, sind die Vor- und Nachteile, sowie gegebenenfalls noch offene Punkte für eine Umsetzung mitaufzunehmen. Zur Dokumentation bietet sich (die in Schritt 2 bereits erwähnte) **Tabelle 4** an.

Schritt 4: Bewertung

Aufgrund beschränkter Ressourcen ist es nicht realistisch, dass alle in Schritt 3 aufgenommenen R-Strategien umgesetzt werden. Daher ist es wichtig, eine Priorisierung vorzunehmen. Für diese Priorisierung werden im vorliegenden Ansatz drei Kriterien verwendet: Die technische Machbarkeit, das ökologische Potenzial und das ökonomische Potenzial werden für jede R-Strategie für die jeweilige Baugruppe/Komponente qualitativ eingeschätzt. Dabei wird je Kriterium anhand einer vierstufigen Skala bewertet, um eine eher negative (Stufe 1 und 2) oder eine eher positive Einschätzung (Stufe 3 und 4) zu erhalten. Die Bewertungsgrundlage zeigt **Tabelle 5**.

Für das ökologische und ökonomische Potenzial ist eine relative Bewertung vorzunehmen. Dabei sind die Baugruppen und Komponenten in Relation innerhalb desselben Produkts zu bewerten. Als Hilfestellung bieten sich für das ökologische Potenzial bereits bestehende LCA-Berechnungen zu Vorgänger- oder Vergleichsprodukten an. Sofern diese nicht vorhanden sind, kann auf allgemeine Erkenntnisse (wie gute Recyclingfähigkeit und -quote von Aluminium und eher schlechte von Elektronikschaltungen/Leiterplatten) oder die Experteneinschätzung im Team zurückgegriffen werden. Zur Verbesserung der Validität der Bewertung des ökonomischen Potenzials können Marktstudien oder Anfragen bei potenziellen Kunden und Verwerten für gebrauchte Komponenten herangezogen werden.

Für einen effizienten Ablauf ist es von Vorteil die Schritte 3 und 4 gemeinsam für jede spezifische R-Strategie durchzuführen. Zusätzlich ist zu beachten, dass, nach Abschätzung der Teammitglieder, bei umfangreichen Produkten (viele Einzelteile, vielstufige Stücklistenstrukturen etc.) nach einigen Stücklistenebenen aufzuhören ist und nicht alle Komponenten zu betrachten sind.

Schritt 5: Visualisierung

Für eine Gesamtübersicht der Bewertungen und die Ableitung der weiter zu verfolgenden Strategien bietet sich eine Visualisierung von Schritt 4 an: Dafür wird ein 3-achsiges Koordinatensystem verwendet (**Bild 4**), in welchem jede Achse einem der drei Kriterien entspricht.

Durch die in Schritt 4 gewählte Skala ergibt sich als möglicher Kombinationsraum ein Würfel. Dieser Würfel lässt sich in acht Teilwürfel unterteilen (vergleiche Schritt 4 je Kriterium eher negativ oder eher positiv) und bildet die Basis für den nächsten Schritt. Hierbei wird je R-Strategie ein Würfel erstellt. In diesen wird jede Baugruppe und Komponente, entsprechend ihrer in Schritt 4 vorgenommenen Bewertung, eingeordnet.

Schritt 6: Priorisierung

Durch die Einordnung der spezifischen R-Strategien in die acht Teilwürfel lässt sich direkt die Priorität ableiten und entscheiden, welche Bereiche des Produkts weiterbearbeitet werden müssen: Strategien, in denen das ökologische und ökonomische Potenzial hoch, die technische Machbarkeit zurzeit aber nicht gegeben ist, sind auf jeden Fall weiter im Betrachtungsumfang zu behalten („Baugruppe A“ in Bild 4). Bei Strategien, deren ökologisches beziehungsweise ökonomisches Potenzial gering, aber das jeweils andere Potenzial hoch ist, ist abhängig von den zur Verfügung stehenden Kapazitäten eine Weiterberücksichtigung in Betracht zu ziehen („Baugruppe B“ und „Baugruppe C“). Im Falle von Strategien, bei denen beide Potenziale gering sind, lohnt sich eine Weiterberücksichtigung nicht. Bei Strategien, deren technische Machbarkeit bereits gegeben ist, sind keine weiteren Maßnahmen im Design notwendig, da diese bereits genutzt werden können („Baugruppe E“).

Schritt 7: Definition der Prozesskette

Konkret bedeutet dies, dass Produkt-, Komponenten-, und Material-/Werkstoffflüsse sowie die dazugehörigen Tätigkeiten definiert werden müssen. Dies umfasst beispielsweise den Ablauf der Rücknahme des genutzten Produkts, eventuelle Tests und Demontage, Reinigung, Reparatur und erneuter Zusammenbau von Baugruppen und Komponenten. Um den Schritt zu vereinfachen, können die in Schritt 3 bereits dokumentierten Ausführungen verwendet und eine Visualisierung der Prozesskette mittels eines Prozessfluss-Diagramms erstellt werden.

Schritt 8: Ableitung von Designanforderungen

Um für die priorisierten R-Strategien sicherzustellen, dass diese umgesetzt werden können, sind aus in Schritt 7 definierten Prozessketten die notwendigen Anforderungen und Änderungen an das Design abzuleiten. Sollten beispielsweise Demontageschritte nötig sein, ist im Design vorzusehen, dass dies für die konkrete Baugruppe oder Komponente möglich ist. Bei vorgesehenen Reparaturen für bestimmte Komponenten, bietet sich an, diese an Stellen mit einfacherem Zugang im Produkt zu platzieren.

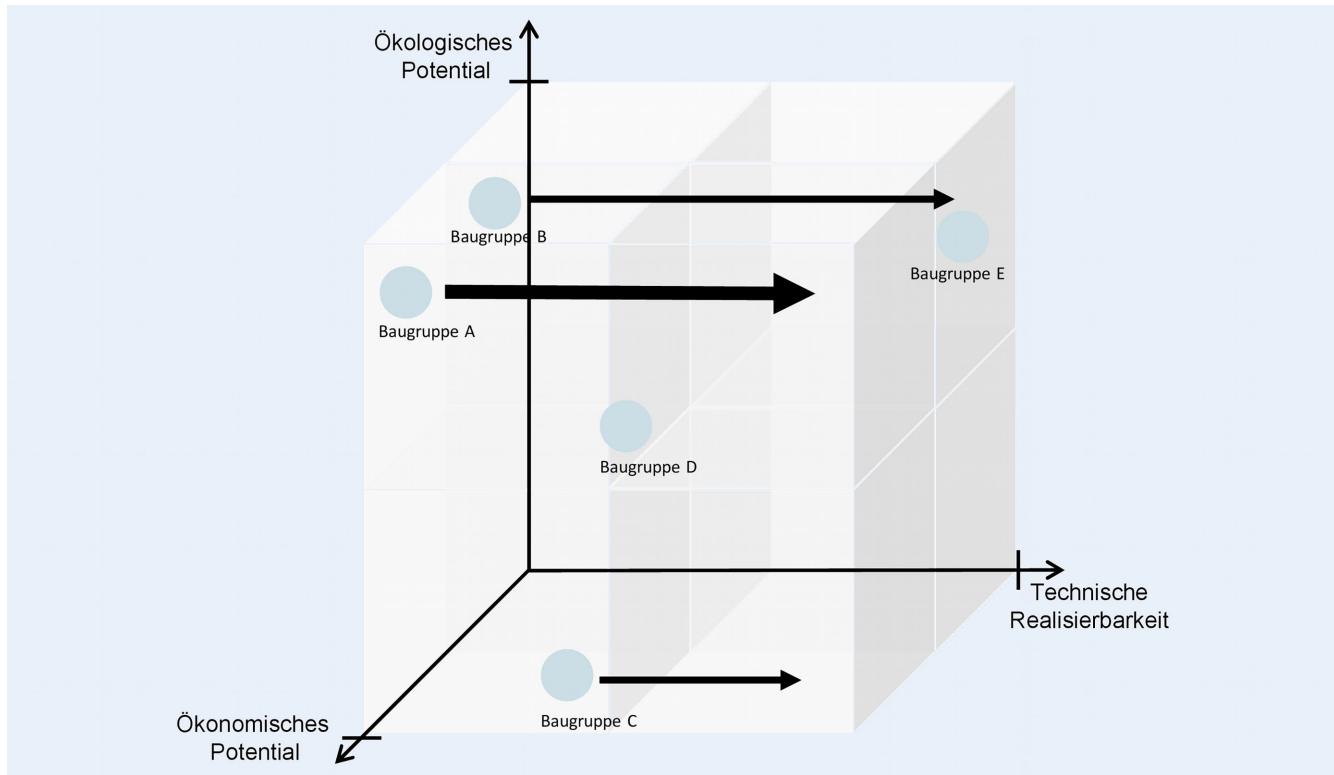


Bild 4. 3-achsiges Koordinatensystem zur Visualisierung der Bewertung und abzuleitenden Entwicklungsrichtungen je Einstufung anhand von beispielhaften Baugruppen. *Grafik: Eigene Darstellung*

Schritt 9: Integration der Anforderungen in den Entwicklungsprozess

Für die Umsetzung der Anforderungen ist es wichtig, diese in den üblichen Entwicklungsprozess miteinzuspielen. Abhängig von den unternehmensspezifischen Vorgehensweisen sind hier zusätzliche Anforderungen oder sogenannte Change Requests zu stellen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieses Beitrags war die Entwicklung und Bereitstellung einer praxisorientierten Methode zur Verbesserung der Zirkularität von Produkten. Bestehende Ansätze zur Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten in der Produktentwicklung setzen vor allem in frühen Phasen an und beeinflussen primär die Produktdefinition. Eine spätere Integration ist nicht vorgesehen. Die vorliegende Methode schließt diese Lücke, indem sie eine strukturierte und praxisnahe Vorgehensweise zur entwicklungsbegleitenden Optimierung bietet.

Die entwickelte Vorgehensweise umfasst zehn aufeinander aufbauende Schritte, welche eine systematische Integration der R-Strategien R-1 bis R-8 in Produkte erlaubt. Zunächst wird ein einheitliches Verständnis der R-Strategien geschaffen, um eine gemeinsame Wissensbasis innerhalb des Teams sicherzustellen. Anschließend erfolgt eine detaillierte Beschreibung des untersuchten Produkts und seiner Baugruppen, um deren Funktionsweise zu verstehen und alle relevanten Eigenschaften zu erfassen. Daraufhin werden die definierten R-Strategien auf den spezifischen Produktkontext übertragen, wobei Vor- und Nachteile je Baugruppe oder Komponente identifiziert und offene Punkte für die Umsetzung festgehalten werden. Diese Grundlage erlaubt eine qualitative Bewertung der R-Strategien hinsichtlich ihrer ökono-

mischen sowie ökologischen Potenziale und technischen Machbarkeit. Die Ergebnisse der Bewertung werden visuell aufbereitet, um eine bessere Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten. Basierend auf dieser Darstellung werden die Baugruppen priorisiert. Anschließend werden für jede priorisierte Baugruppe die notwendigen Prozessschritte zur Umsetzung der ausgewählten R-Strategien definiert und konkretisiert. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen an das Produktdesign. Abschließend werden diese Anforderungen in den Entwicklungsprozess integriert.

Zur weiteren Validierung und Optimierung der entwickelten Methode ist eine praktische Anwendung in Unternehmen vorgesehen. Zudem wird eine Standardisierung der Bewertungsskala angestrebt, um eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Perspektivisch erscheint die Entwicklung digitaler Werkzeuge zur Unterstützung des Vorgehens vielversprechend, da diese eine effizientere und skalierbare Umsetzung ermöglichen. Methodisch wäre es interessant zu prüfen, inwiefern eine Darstellung der Bewertung nicht R-Strategie-spezifisch, sondern baugruppspezifisch einen Einfluss auf die Priorisierung und so gegebenenfalls auf die Verbesserung der Zirkularität bietet.

L i t e r a t u r

- [1] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV): Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Stand: 2024. Internet: <https://www.bmu.de/download/nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie-nkws>. Zugriff am 31.03.2025
- [2] European Commission: Circular economy action plan. The EU's new circular action plan paves the way for a cleaner and more competitive Europe. Internet: environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en. Zugriff am 31.03.2025

- [3] Die Bundesregierung: Klimaschutzprogramm 2023. Mit großen Schritten zur Klimaneutralität. Stand: 04.10.2023. Internet: www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/klimaschutzprogramm-2023-2226992. Zugriff am 31.03.2025
- [4] Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik: Kreislaufwirtschaft. Stand: 2025. Internet: www.ipk.fraunhofer.de/de/kompetenzen-und-loesungen/industrietrends/kreislaufwirtschaft.html. Zugriff am 31.03.2025
- [5] Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M.: Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling* 127 (2017), pp. 221–232
- [6] Potting, J.; Worrell, E.; Hekkert, M. P.: Circular Economy: Measuring innovation in the product chain, The Hague: PBL Netherlands Assessment Agency 2017
- [7] Europäische Investitionsbank: Kreislaufwirtschaft – Überblick 2024. Internet: www.eib.org/attachments/lucalli/20240104_circular_economy_overview_2024_de.pdf. Zugriff am 31.03.2025
- [8] Wiechen, J.; Denter, L.; Wolf, S.: Kreislaufwirtschaft für eine klimaneutrale Industrie. Positionspaper Germanwatch e.V.. Internet: www.germanwatch.org/sites/default/files/germanwatch_kreislaufwirtschaft_fuer_eine_klimaneutrale_industrie_2024_0.pdf. Zugriff am 31.03.2025
- [9] Agora Industrie, Systemiq: Resilienter Klimaschutz durch eine zirkuläre Wirtschaft. Perspektiven und Potenziale für energieintensive Grundstoffindustrien. Studie. Stand: 2023. Internet: www.agora-industrie.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-11_IND_Kreislaufwirtschaft/A-EW_309_Kreislaufwirtschaft_WEB.pdf. Zugriff am 31.03.2025
- [10] European Commission: Ecodesign for Sustainable Products Regulation. Stand: 04.02.2025. Internet: commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en. Zugriff am 31.03.2025
- [11] Europäisches Parlament und Rat: VERORDNUNG (EU) 2024/1781 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 13. Juni 2024 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte, zur Änderung der Richtlinie (EU) 2020/1828 und der Verordnung (EU) 2023/1542 und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG. Stand: 2024. Internet: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=OJ:L_202401781. Zugriff am 31.03.2025
- [12] Martínez Leal, J.; Pompidou, S.; Charbuillet, C. et al.: Design for and from Recycling: A Circular Ecodesign Approach to Improve the Circular Economy. *Sustainability* 12 (2020) 23, #9861
- [13] Büttner, S.; Handmann, U.; Irrek, W.: Transformation zur Circular Economy. Kleine und mittlere Unternehmen im Wandel begleiten. Heidelberg: Springer-Verlag 2024
- [14] DIN SPEC 91472:2023-06: Remanufacturing (Reman) – Qualitätsklassifizierung für zirkuläre Prozesse. Deutsche Fassung Juni 2023
- [15] Hermandi, C.; Dierke, L.; Grundmann, M. et al.: Potenzialcheck Circular Economy. In: Büttner, S.; Handmann, U.; Irrek, W. (Hrsg.): Transformation zur Circular Economy. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2024, S. 85–96
- [16] Golta, K.: So funktioniert Circular Design. Das Fortschrittsdenken kommt an seine Grenzen. Zeit für eine neue Art, die Welt zu denken – und zu gestalten. Stand: 11.02.2022. Internet: page-online.de/tools-technik/circular-design-prozess-projekte/. Zugriff am 31.03.2025
- [17] Draser, B.; Sander, E.: Nachhaltiges Design. Herkunft, Zukunft, Perspektiven. München: oekom 2022
- [18] Ellen MacArthur Foundation: Design and the circular economy – deep dive. Stand: 16.09.2019. Internet: www.ellenmacarthurfoundation.org/design-and-the-circular-economy-deep-dive. Zugriff am 31.03.2025
- [19] CIRCO: Methodology. Internet: www.circonl.nl/international/methodology. Zugriff am 31.03.2025
- [20] Stözlle, M.; Giunta, S.; Rieddorf, C. et al.: Towards Sustainable Urban Mobility: Integrating Design for Circular Economy Principles in E-Scooter Development. 35th CIRP Design 2025, 02–04 April 2025, Patras, Greece. [Accepted paper, in press]
- [21] Siwiec, D.; Pacana, A.; Gazda, A.: A New QFD-CE Method for Considering the Concept of Sustainable Development and Circular Economy. *Energies* 16 (2023) 5, #2474
- [22] Umweltbundesamt: Homepage Ecodesign Kit. Stand: 2025. Internet: ecodesignkit.de/. Zugriff am 31.03.2025
- [23] CIRCit Nord: Tools – CIRCit Nord. Stand: 2025. Internet: circitnord.com/tools/. Zugriff am 31.03.2025
- [24] DDC – Dansk Design Center: Designing Your Circular Transition. Internet: ddc.dk/tools/designing-your-circular-transition/. Zugriff am 31.03.2025
- [25] Ellen MacArthur Foundation: Tools and resources to help transition to a circular economy. Stand: 2025. Internet: www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-design/tools. Zugriff am 31.03.2025
- [26] Institute of Design Research Vienna: Circular Design Rules. Stand: 2023. Internet: cdr.tools/. Zugriff am 31.03.2025



Andreas Aichele, M.Sc.

andreas.aichele@ipa.fraunhofer.de

Tel. +49 711 970-1821

Foto: Privat

Chantal Rieddorf, M.Sc.

Valentin Honold, M.Sc.

Amelie Otterbach

PD Dr.-Ing. Robert Miehe

Prof. Dr.-Ing. Alexander Sauer

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA

Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart

www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



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