

11.22



Müll und Abfall

Fachzeitschrift
für Kreislauf-
und Ressourcen-
wirtschaft

54. Jahrgang
November 2022
Seite 585-652

www.MUELLundABFALL.de



Umweltrecht in der Praxis Planung und Zulassung umweltrelevanter Vorhaben

Von Dr. jur. Sven Fischerauer

2022, 555 Seiten, mit zahlreichen Übersichten,
Praxistipps und Beispielen, € 74,-

ISBN 978-3-503-20908-8

eBook: € 67,40. ISBN 978-3-503-20909-5

Online informieren und bestellen:
www.ESV.info/20908





Einfach mehrfach nutzen.



Handbuch Kreislaufwirtschaft

Herausgegeben von Prof. Dr. jur. Walter Frenz

Erscheint ca. Dezember 2022, ca. 1.000 Seiten, mit zahlreichen farbigen Abbildungen, Übersichten und Praxisbeispielen, fester Einband, Preis folgt ISBN 978-3-503-20067-2

eBook: Preis folgt, ISBN 978-3-503-20068-9

Vor dem Hintergrund einer weiter anwachsenden Bedeutung der **circular economy** für den **Klimaschutz** und auf Grundlage des **KrWG 2020**, **Green Deal** und der **EU-Kreislaufstrategie**: Das **neue Handbuch** verschafft Ihnen einen umfassenden, interdisziplinären Überblick zum hochaktuellen Thema **Kreislaufwirtschaft**.

Mit vielen Übersichten und Beispielen

Die akuten Problemfelder, mit denen sich Praktiker derzeit konfrontiert sehen, werden notwendigerweise komplex, dabei aber stets gut verständlich und lösungsorientiert erläutert – aus **rechtlicher, wirtschaftlicher und technisch-naturwissenschaftlicher Sicht**.

- ▶ über 30 instruktive Beiträge aus den Bereichen Recht, Technik, Ökonomie und Ökologie
- ▶ umfangreiches Autorenteam aus renommierten Expertinnen und Experten
- ▶ viele Querschnittsthemen wie Umwelt-, Klima- und Ressourcenschutz, Digitalisierung sowie Wettbewerbs- und Vergaberecht
- ▶ wichtige Instrumentarien wie Gebührengestaltung, steuerliche Aspekte, ökonomische Anreize, Information und Ökodesign



Online informieren
und versandkostenfrei bestellen:
www.ESV.info/20067

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG

Auf Wissen vertrauen

Chancen und Grenzen der „Circular Economy“: Erkenntnisse aus der BMBF-Fördermaßnahme ReziProK

Opportunities and limits of the „circular economy“: New insights gained from 25 projects funded by the German Ministry for Research and Education

Prof. Dr. Henning Friege

Zusammenfassung

Die „Circular Economy“ erfasst über die stoffliche Verwertung und Wiederverwendung hinaus zahlreiche weitere Wertschöpfungsstufen, wie etwa die Aufarbeitung von Produkten nach Gebrauch oder die Intensivierung der Produktnutzung. Alle diese Aktivitäten dienen der Verringerung des Ressourcenverbrauchs. Aus der Abfallwirtschaft sind zahlreiche physikalische, technische und ökonomische Hindernisse für stoffliche Verwertung und Wiederverwendung bekannt, die in Form von sieben „Stolpersteinen“ systematisiert werden können. Die frühzeitige Beachtung dieser Hindernisse erleichtert die Einschätzung der Erfolgsaussichten abfallwirtschaftlicher Maßnahmen. Anhand von Beispielen aus der Literatur sowie Erkenntnissen aus dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Fördermaßnahme „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe (ReziProK)“ wird untersucht, wie sich die Stolpersteine in einer „Circular Economy“ auswirken. Außerdem diskutieren wir hier, welche neuen Chancen sich dadurch für die Überwindung der Stolpersteine bieten: So kann bei Produkt-Service-Systemen das Problem der Dissipation von Produkten deutlich verringert bzw. durch gut organisierte Rückwärtslogistik entschärft werden. Es zeigte sich, dass der Transfer von Informationen über die materielle Zusammensetzung sowie die Anwendungsgeschichte von Produkten für ein erfolgreiches Ressourcenmanagement genormter technischer Lösungen bedarf. Die Problematik von Schadstoffen in gebrauchten Produkten lässt sich nur bedingt entschärfen. Die ökonomischen Stolpersteine bedürfen einer weiteren Ausdifferenzierung, um die Probleme der „Circular Economy“ in komplexen Wertschöpfungsketten zu verdeutlichen.

Abstract

In addition to recycling and re-use, the so-called circular economy covers numerous other stages of the value chain, such as the reprocessing of products after use or the intensification of product use. All these activities are aimed at reducing resource consumption. Numerous physical, technical and economic obstacles to material recovery and

re-use are known from waste management, which can be systematised in the form of seven “stumbling blocks”. Early attention to these obstacles facilitates the assessment of the chances of success of waste management measures. Using examples from the literature as well as findings from 25 FONA projects “Resource Efficient Circular Economy – Innovative Product Cycles (ReziProK)” funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF), the study examines the impact of the stumbling blocks in a “circular economy”. Furthermore, new opportunities provided by the “circular economy” for overcoming the stumbling blocks are discussed. Thus, in product-service systems, the problem of dissipation of products can be significantly reduced or mitigated by well-organised reverse logistics. It became apparent that the transfer of information on the material composition and the application history of products requires standardised technical solutions for successful resource management. The problem of pollutants in used products can only be mitigated to a limited extent. Furthermore, the economic stumbling blocks should be differentiated in order to better clarify the problems of the “circular economy” in complex value chains.

1. Einleitung

Die „Circular Economy“ wird seit etwa fünfzehn Jahren weltweit als noch weitgehend theoretisches Konzept entwickelt [WBCSD 2010]. Die EU-Kommission arbeitet seit 2014 [EU 2014] bis zum Circular economy action plan [EU 2020a] und weiter intensiv mit diesem Begriff, der vielfältig interpretiert wurde. Mit Art. 2 Nr. 9 der Taxonomie-Verordnung [EU 2020b] wurde eine erste Legaldefinition der sogenannten Circular Economy geschaffen: „Circular economy means an economic system whereby the value of products, materials and other resources in the economy is maintained for as long as possible, enhancing their efficient use in production and consumption, thereby reducing the environmental impact of their use, minimising waste



Prof. Dr. Henning Friege
N³ Nachhaltigkeitsberatung; langjährige Tätigkeit im Umweltbereich in öffentlichen Einrichtungen und Unternehmen. Habilitation im Fach Abfallwirtschaft 2013 an der TU Dresden, Hon.-Prof. für Nachhaltigkeitswissenschaften, Universität Lüneburg

KREISLAUFWIRTSCHAFT | BMBF-FÖRDERMASSNAHME REZIPROK

Symbol	Kurzbezeichnung	Beschreibung
ΔS	Material-Entropie	Entropie-Effekt verursacht durch die Mischung von Materialien in Produkten, der bei der Aufspaltung chemischer Bindungen oder der Trennung von Gemischen beim Recycling zu beachten ist
$D!$	Dissipative Verteilung	Entropie-Effekt verursacht durch die räumliche Verteilung von Erzeugnissen an gewerbliche bzw. private Nutzer, der bei der Rückführ-Logistik für Altprodukte zu beachten ist
$H \leftrightarrow R$	Dualismus von Ressourcen und gefährlichen Stoffen	Bei der Rückgewinnung von Ressourcen oder der erneuten Nutzung von Produkten zu beachtende Probleme durch vorhandene Schadstoffe
$I?$	Informationsdefizit	Bei der stofflichen Verwertung von Abfällen bzw. auch der erneuten Nutzung eines Altprodukts auftretende Kenntnislücken hinsichtlich der materiellen Zusammensetzung und Zerlegbarkeit
Δt	Dimension Zeit	a) Dynamische zeitliche Verschiebungen des Aufkommens von Altprodukten in Relation zum Zeitraum des Inverkehrbringens von Produkten; b) Veränderung der Einschätzung der Gefährlichkeit oder Nutzbarkeit von Stoffen mit der Zeit
$EcY!$	Wettbewerbsfähigkeit	Wirtschaftliche Grenzen von Wiederverwendung oder Recycling, z. B. auf Grund hoher Prozesskosten, mit der Folge mangelnder Wettbewerbsfähigkeit von Sekundärmaterialien oder aufbereiteten Produkten
ΔEcY	Einkommensdisparität	Beeinflussung der Sortierung oder Verlagerung von Abfallströmen durch Einkommensunterschiede, u. a. mit der Folge von Aktivitäten des informellen Sektors

Tabelle 1
„Stolpersteine“
[Friege & Kümmerer
2022]

and the release of hazardous substances at all stages of their life cycle, including through the application of the waste hierarchy.“

Ziel ist also eine Wirtschaftsweise, in der Ressourcen, Materialien und Produkte solange wie möglich genutzt werden. Konsequenz einer solchen Umsteuerung ist ein geringeres Abfallaufkommen. Aus der Definition ergibt sich, dass damit auch Umweltbelastungen generell und speziell die Freisetzung gefährlicher Stoffe verringert werden. Letzteres trifft allerdings nur dann zu, wenn die Prozesse, die für eine intensivere und effizientere Ressourcennutzung eingesetzt werden, weniger umweltschädlich sind als die bisher üblichen Verfahren. Insbesondere hat die Freisetzung von Schadstoffen zunächst einmal nichts mit der Ressourceneffizienz zu tun. Die Kommission setzt also bei dieser Definition voraus, dass die durch die Gewinnung der primären Rohstoffe verursachten Umweltschäden größer sind als diejenigen, die bei „zirkulären“ Aktivitäten im „life cycle“ des Produkts entstehen – was häufig, aber nicht immer zutrifft, wie etwa bei der stofflichen Verwertung von Leichtverpackungen [Franke et al. 2014]. Die o. g. Definition verdeutlicht, dass die „Circular Economy“ sich auch auf wesentliche Grundlagen des Abfallrechts stützt, also Art 4 Abs. 1 WFD (Abfall-Hierarchie) und Art. 4 Abs. 2 WFD (Ausnahmen von der Hierarchie) [EU 2018]. Die Kommission verzichtet in der Legaldefinition auf frühere, wissenschaftlich nicht haltbare [de Man & Friege 2016, Friege et al. 2019] Formulierungen wie „non-toxic material cycles“ im 7. Umweltprogramm (7th EAP [EP 2013]) und auf den Begriff „zero waste“.

2. Problemstellung und Vorgehensweise

Die Entwicklung von einer weitgehend linearen Wirtschaft mit hohem Aufkommen an nicht verwerteten Abfällen zu einer Wirtschaftsweise, die Ressourcenschutz priorisiert und damit das Abfallaufkommen drastisch reduziert, wirft die Frage auf, ob aus der Ab-

fallwirtschaft bekannte Hindernisse für die Rückgewinnung von Ressourcen in einer „Circular Economy“ beseitigt werden, welche weiterhin bestehen, und wie verbleibende Hindernisse mit neuen Strategien angegangen werden können. Aus einer Analyse der Probleme beim Umgang mit Elektro- und Elektronikaltgeräten wurde eine einfache Systematik für die bei der Verwertung bzw. der Wiederverwendung von gebrauchten Produkten bzw. Abfällen auftretenden Probleme entwickelt [Friege 2012a, 2012b]. Diese lässt sich allgemein für eine erste Einschätzung des Erfolgs abfallwirtschaftlicher Initiativen nutzen. In Tabelle 1 findet sich eine aktuelle, leicht veränderte Formulierung der „Stolpersteine“¹ (entnommen aus [Friege & Kümmerer 2022]). Auch wenn sich zahlreiche Phänomene unter den sieben Stolpersteinen subsummieren lassen, sind z. B. regionale oder nationale kulturelle oder regulatorische Rahmenbedingungen von hoher Bedeutung, können aber nicht in dieser Weise generalisiert werden.

In der Fachliteratur finden sich zahlreiche Probleme, die mit Hilfe der Systematik von Tab. 1 interpretiert werden können. In der vorliegenden Veröffentlichung werden diese Stolpersteine auf Erkenntnisse aus der BMBF-Fördermaßnahme² „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Innovative Produktkreisläufe“ (ReziProK) angewendet. Die Förderung für ReziProK beträgt insgesamt ca. 30 Mio € in der Zeit zwischen 2019 und 2023; hinzu kommen ca. 11 Mio € Mittel von Industriepartnern. Die Fördermaßnahme umfasst 25 F&E-Projekte sowie das Vernetzungs- und Transfervorhaben RessWinn³. Ziel der Forschungsprojekte ist es, Produkt- bzw. Materialkreisläufe stärker zirkulär zu gestalten und Produktnutzung zu verlängern, wobei dies durch eine Kombination entsprechender Geschäftsmodelle, Designkonzepte und digitaler Technologien erreicht werden soll.

Folgende Fragen sollen geklärt werden:

- ◆ Welche aus der Abfallwirtschaft bekannten Stolpersteine sind für die Projekte relevant?
- ◆ Welche Stolpersteine lassen sich, auch teilweise, überwinden?
- ◆ Mit welchen Mitteln oder Strategien kann dies gelingen?

Die Auswertung der ReziProK-Projekte stützt sich auf bereits vorliegende wissenschaftliche Veröffentlichungen von Projektteilnehmern und auf die Vorträge sowie Poster aus der ReziProK Transferkonferenz vom

1 In der ursprünglichen deutschen Fassung ist von Dilemmata die Rede. Für englischsprachige Fachvorträge und Veröffentlichungen wurde zum besseren Verständnis der Begriff „stumbling stone“, also Stolperstein, eingeführt. Diskussionen mit Kolleginnen und Kollegen führten zum Verzicht auf den ursprünglich genannten Stolperstein „Vollzugsprobleme“, da dies nur bedingt etwas mit der Charakterisierung abfallwirtschaftlicher Prozesse hat. Der Stolperstein „Überflusgesellschaft“ wurde aufgegeben, weil er nur auf die Abfallmenge, nicht aber deren Behandlung abhebt. Die Interessengegensätze zwischen verschiedenen Akteuren lassen sich auf ökonomische Ursachen zurückführen und wurden daher in den ökonomischen Stolperstein übernommen.

2 FONAPRO-Programm des Bundesministeriums für Forschung und Bildung (BMBF): <http://www.fona.de>

3 Die Projektleitung für RessWinn liegt bei der DECHEMA e.V., Frankfurt am Main. N³ hat in RessWinn u. a. die Aufgabe, Nachhaltigkeitsaspekte zu bearbeiten und den Wissenstransfer zu fördern.

23./24. Juni 2022⁴. Die hier dargestellten Ergebnisse wurden mit den Projektteams diskutiert und ggf. angepasst.

Für die folgende Auswertung werden die Projekte nach Produkt- bzw. Rohstoffbereichen sortiert:

- Elektro- und Elektronikprodukte für private und gewerbliche Nutzung sowie elektrisch betriebene Kleintransporter und E-Lastenräder
 - Baumaterialien und Bauprodukte
 - Textilien und Fasern
 - bei denen die Identifizierung von Altprodukten bzw. die Verfolgung von Materialien auf dem Produktlebensweg Teil des Arbeitsplans sind.
- Außerdem werden mehrere Projekte vorgestellt,

der Bezug der Projekte zu Aktivitäten bzw. Strategien der „Circular Economy“ orientiert sich an der vom niederländischen Planbureau voor de Leefomgeving herausgegebenen Kategorisierung [Potting et al. 2017].

3. Gruppe 1: Projekte im Bereich Elektro- und Elektronikprodukte

Nach wie vor stellen Elektro- und Elektronikaltgeräte (EEAG) mit einer Zunahme von 21 % weltweit zwischen 2014 und 2019 [UNU 2020] die am schnellsten wachsende Abfallfraktion dar. Neben Eisen und Aluminium enthalten Elektronikprodukte ein breites Spektrum komplexer Materialien. Hierzu zählen Neodym zur Herstellung der $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ -Hochleistungsmagnete, Indiumzinnoxid (ITO, eine Mischung aus In_2O_3 und SnO_2) für Flüssigkristall-Bildschirme, Leuchtdioden u. a. m. oder Cadmiumtellurid (CdTe) für PV-Module. Viele dieser Materialien sind für die Transformation der Energieversorgung bzw. zur Steigerung der Energieeffizienz z. T. nicht verzichtbar und werden wie Lithium und Cobalt als „critical raw materials“ eingestuft, weil sie in Europa nicht gewonnen werden und nur wenige, z. T. geopolitisch problematische Quellen vorhanden sind. Neben den Metallen werden in Elektro- und Elektronikgeräten (EEG) unterschiedliche Polymere (etwa 20 bis 35 % des Gesamtgewichts) mit zahlreichen Additiven, u. a. Flammenschutzmitteln (etwa 5–10 %), eingesetzt. Wegen Änderungen der Rechtslage (Richtlinie zur Beschränkung gefährlicher Stoffe (RoHS I bzw. RoHS II) in den vergangenen zwanzig Jahren enthalten EEG oft mittlerweile nicht mehr zugelassene Additive wie Decabromdiphenylether oder Tetrabrombisphenol A oberhalb von Schwellenwerten [Wolf et al. 2017]. Der ökologische Fußabdruck der Elektro- und Elektronikgeräte wie auch der von Akkumulatoren ist wegen der für ihre Herstellung benötigten Energie hoch, wobei der Energiebedarf für Primärmetalle meist deutlich, z. T. vielfach über dem von Sekundärmetallen liegt. Die Einbeziehung von Elektrogeräten wie (elektrisch betriebenen) Fahrzeugen in eine „Circular Economy“ ist mithin von hoher Bedeutung,

- um seltene Primärmineralien zu substituieren und damit Europas Abhängigkeit von Lieferanten außerhalb der EU zu verringern,

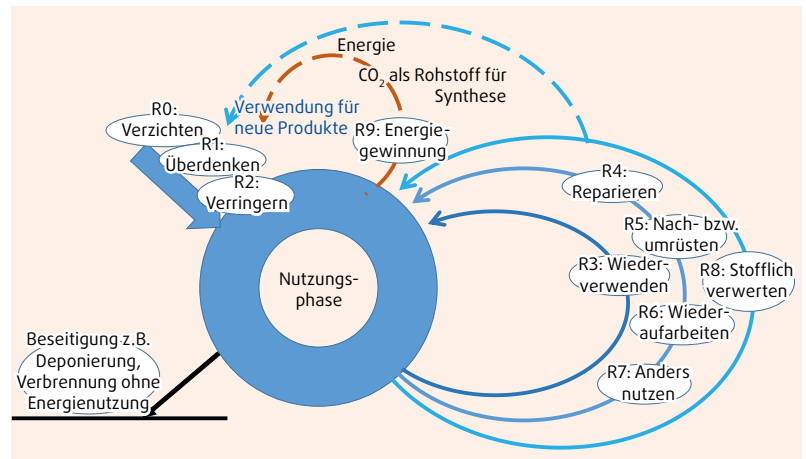


Abbildung 1
„R-Strategien“ – mögliche Aktivitäten in einer „Circular Economy“ mit dem Ziel der Verringerung des Verbrauchs stofflicher Ressourcen (verändert und ergänzt nach [Potting et al. 2018])

- um den Energiebedarf für die Gewinnung von Metallen und damit wiederum die Emission von Treibhausgasen deutlich zu senken,
- um die Transformation zur Energieversorgung ohne fossile Primärenergieträger zu ermöglichen,
- um die Menge an z. T. gefährlichen Abfällen deutlich zu verringern.

Für EEG bzw. EEAG treffen sämtliche Stolpersteine zu (siehe auch Tabelle 1):

- Die meist hohe Material-Entropie (ΔS) erschwert die Rückgewinnung von Neben- und Spurenbestandteilen. So ist etwa die Abtrennung von Kupfer aus Stahlschrotten nicht möglich, was neben dem Verlust an Kupfer auch zur Abwertung des Stahls beiträgt. Erst recht gilt dies für weitere Edelmetalle, die als Oxide in der Schlacke der Stahlhütten landen. Die Gründe hierfür sind sowohl grundsätzlich in der Metallurgie [Reuter et al. 2018] als auch bei dem für eine technisch mögliche Abtrennung erforderlichen Energieaufwand zu suchen [Daehn et al. 2017], der gleichzeitig eine wirtschaftliche Hürde (EcY!) darstellt.
- Weiterhin wird eine stoffliche Verwertung von Plastikteilen aus EEG durch das Vorhandensein von Schadstoffen wie etwa den o. g. Flammenschutzmitteln ($H \leftrightarrow R$) meistens verhindert, wobei die Verwertung in der Regel umso problematischer wird, je älter das jeweilige EEG ist (Δt).
- Die Dissipation der EEG in alle privaten Haushalte, Gewerbe, Handwerks- und Industriebetriebe (DI) macht eine auch nur annähernd vollständige Erfassung gebrauchter Geräte unmöglich. Darüber hinaus werden höherwertige EEG durch den informellen Sektor abgegriffen (siehe ΔEcY) und z. T. illegal exportiert. Diese Dissipation ist eine entscheidende Ursache für das Verfehlen der in der WEEE-Richtlinie [EU 2012] vorgegebenen Sammelquote von 65 %. In Deutschland wird seit ca. zehn Jahren eine Sammelquote im Bereich von 45 % [UBA 2022] erreicht.
- Vor allem die Wiederverwendung gebrauchter EEG bzw. das Recycling von EEG werden durch den Verlust an Information (I?) über die Reparaturmöglichkeiten von Geräten [Rudolf et al. 2022] bzw. deren stoffliche Zusammensetzung erschwert.

⁴ <https://innovative-produktkreislaeufe.de/News/ReziProK+Transferkonferenz+2022.html>

KREISLAUFWIRTSCHAFT | BMBF-FÖRDERMASSNAHME REZIPROK

Tabelle 2
Projekte aus ReziProK mit Schwerpunkt Elektro- und Elektronikgeräte sowie elektrisch betriebene Kleinfahrzeuge; R-Strategien siehe Abbildung 1

Akronym	„R“-Strategien	Bezeichnung des Projekts
AddRE-Mo	R4,R6	Werterhaltungsszenarien für urbane Elektromobilität der Personen und Lasten durch additive Fertigung und Refabrikation
Circular by Design	R0,R2,R3,R4,R8	Ressourcenwende über nachhaltiges Produktdesign von Konsumgütern am Fallbeispiel Kühl-/Gefriergerät
EffizientNutzen	R3,R4	Datenbasierte Geschäftsmodelle für die Kaskadennutzung und verlängerte Produktnutzung von Elektronikprodukten
KOSEL	R1,R4	Kreislaufgerechter Open-Source-Baukasten für elektrisch angetriebene Poolfahrzeuge
LEVmodular	R1,R2,R4,R6	Light Electric Vehicle modular – mit neuer Mobilität zur ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft
LifeCycling ²	R1,R3,R4,R8	Rekonfigurierbare Designkonzepte und Services für die ressourceneffiziente (Weiter-)Nutzung von E-Cargobikes
MoDeSt	R1,R3,R4,R5	Produktzirkularität durch modulares Design – Strategien für langlebige Smartphones
ResmaP	R1,R4,R5,R6	Ressourceneffizienz durch smarte Pumpen

In der Tabelle 2 sind die für diese Veröffentlichung ausgewerteten ReziProK-Projekte aufgelistet und die jeweils verfolgten „R-Strategien“ (siehe Abbildung 1) angegeben. Der technische und wirtschaftliche Reifegrad ist von Projekt zu Projekt sehr unterschiedlich: z. T. handelt es sich um vertiefte Design-Studien („Circular by Design“ am Modell eines Kühlschranks), z. T. um den Aufbau eines Geschäftsmodells für ein in Kürze auf dem Markt erhältliches Produkt („ResmaP“ für elektrische Heizungspumpen).

Zusätzlich zu Elektrogeräten, die unter das ElektroG fallen, wurden mehrere Projekte mit (teil-)elektrisch betriebenen Fahrzeugen ausgewertet. Es lässt sich aus Tabelle 2 erkennen, dass immer mindestens zwei Wege beschritten wurden, um einer „Circular Economy“ näherzukommen. In allen Projekten findet sich R4, also Reparatur defekter Geräte, teilweise verbunden mit R3, also erneute Nutzung nach Funktionstest.

Im Projekt „EffizientNutzen“ wurden ca. 500 Gebrauchtgeräte (HiFi-Geräte, TV-Geräte, Monitore, Musikinstrumente, elektronisches Spielzeug, Spielkonsolen) von privaten Nutzern eingesammelt und unentgeltlich in einer qualifizierten Werkstatt repariert, wobei eine Erfolgsquote von 58 % erreicht wurde. Im Mittel waren die eingesandten Geräte acht, im Median fast 14 Jahre alt. Als wichtige Hindernisse wurden u. a. fehlende Reparaturanleitungen (siehe I?) und die zeit- und kostenaufwendige Beschaffung von Ersatzteilen sowie Schäden beim Transport (EcY!) identifiziert. Aus der parallel durchgeführten Befragung der Teilnehmer wurde eine wirtschaftliche Schwelle von Reparaturen bei Kosten von 20 bis 40 % des Neupreises abgeleitet; aus Sicht des Reparaturbetriebs folgt daraus, dass der Preis eines Geräts mindestens 90 € betragen müsse. Die Projektgruppe stellt sich zur Überwindung des systemimmanenten Informationsdefizits den Aufbau einer „Reparatur-Plattform“ vor, auf der digitale Repa-

raturanleitungen erstellt und für lizenzierte Betriebe bereitgestellt werden [Rudolf et al. 2022].

Bei „MoDeSt“ wurde untersucht, wie sich das Nutzerverhalten durch modularen Aufbau von Smartphones bzw. Tablets im Gegensatz zu den marktbeherrschenden Geräten ändert. Der Austausch von Modulen bei Schäden oder im Fall einer technischen Verbesserung spart Ressourcen, wenn dies tatsächlich zu einer deutlich längeren Nutzungsdauer führt. Neben den technischen Voraussetzungen einschließlich der Bereitstellung von Ersatzteilen durch den Hersteller sind geeignete Geschäftsmodelle notwendig. Die Akzeptanz auf Seiten der Kunden bzw. Nutzer muss durch begleitende Dienstleistungsangebote sichergestellt werden (modulare Produkt-Service-Systeme (PSS)). Ein solches Geschäftsmodell kann wirtschaftlich tragfähig sein, wenn die gesamte Nutzungsphase der Geräte über den Hersteller oder einen „Orchestrator“ mit Hilfe einer Plattform organisiert wird.

Im Fall von „ResmaP“ geht es um gewerbliche Kunden, vorwiegend Heizungsfachbetriebe, so dass das Problem der Dissipation (DI) von Produkten, hier Heizkreisumpen, deutlich besser beherrschbar ist. Das Informationsdefizit (I?) ist wegen der Rücknahme durch den Hersteller gering und wird durch sensorgestützte Überwachung minimiert. Der digital unterstützte Service kann durch Fernüberwachung und Aufzeichnung von Betriebsdaten zu einer Optimierung der Instandhaltung (Fehlererkennung, Bereitstellung von Ersatzteilen) genutzt werden, wie auch zur Wiederverwendung einzelner Module oder Komponenten, sofern die Pumpe außer Betrieb genommen werden muss. Bei 100 untersuchten defekten Rückläufern (unter Berücksichtigung aller Defektarten) können, so eine Erkenntnis aus dem Projekt, mehr als 80 % der Module ganz oder teilweise wiederverwendet werden.

In dem Projekt „Circular by Design (CbD)“ wurden u. a. die Schwierigkeiten des Recyclings von Kühl- und Gefriergeräten im Detail gemeinsam mit einem Aufbereiter und einem Hersteller analysiert, um den Einfluss der Stolpersteine ΔS und I? besser zu verstehen und so weit möglich zu überwinden. Als besonders kritisch wurden die von Produkt zu Produkt unterschiedliche Verteilung der technischen Komponenten im Gerät und deren Befestigung sowie fehlende Informationen zum Aufbau der Geräte analysiert, die eine manuelle Demontage erschweren. Diese Problematik verschärft sich bei Kühlschränken jüngerer Datums wegen der Integration zusätzlicher Funktionen und damit weiterer Materialien. Für die Verwertbarkeit und die Reparaturfähigkeit sollte ein modularer Aufbau gewählt werden, bei dem technische Funktionen zentral zusammengefasst und Hülle sowie Isolation trennbar verbunden werden (Konzept „Kühl und Schrank“). Diverse Geschäftsmodelle (Leasing von Kühlschränken, Kühlleistung verkaufen etc.) wurden diskutiert.

Ziel von „KOSEL“ ist der Bau eines modularen Nutzfahrzeugs (bis 3,5 t Ladung) mit einer Lebensdauer von ca. 30 Jahren und einer Laufleistung von 1 Mio. km. Gedacht ist an Pool-Fahrzeuge für Gewerbetreibende, mithin eine vom Hersteller gut kontrollierbare Dissipation. Kunden sollen auf ein „open source“-System zurückgreifen können, so dass deren Informati-

onsdefizit I? minimiert wird. Durch Zerlegbarkeit des Fahrgestells in verschiedene Module, Austauschbarkeit und Individualisierbarkeit mit Hilfe eines Baukasten-Systems, stabile Grundmodule und leicht ersetzbare Teile in typischen Unfallzonen wird die Zahl der Einzelteile verringert und damit das ΔS -Problem verkleinert. Ein ähnlicher Ansatz mit Bezug auf das Kundenspektrum und die Reparierbarkeit wird bei „LEVmodular“, einem Transportfahrzeug von 450 kg Gewicht bei 300 kg Zuladung, verfolgt. Hier wird die Zahl der benutzten Materialien bewusst begrenzt und an der Verwertbarkeit ausgerichtet, z. B. Stahl statt CFK. Die Module wurden anhand des französischen Reparatur-Index [Runder Tisch Reparatur 2022] bewertet. Bei einem weiteren Elektromobilitäts-Projekt, „AddRE-Mo“, wird der Austausch von Motoren durch additive Refabrikation zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Elektrofahrzeugen eingesetzt [Koop et al. 2021a, 2021b]. Wegen der Vielzahl von Herstellern und Reparaturbetrieben – Stolperstein I? – wird der Aufbau eines entsprechenden Werterhaltungs-Netzwerks empfohlen. Die Identifikation der Motoren und Ersatzteile erfolgt über eine Bildklassifizierung, so dass das Informationsdefizit von zwei Seiten angegangen wird. Die additive Refabrikation von Teilen (3D-Druck) stellt eine große Erleichterung für die Beschaffung von Ersatzteilen dar und wurde im Projekt zunächst an Getriebe-Zahnradern demonstriert. Bei „LifeCycling²“ wurden diverse Geschäftsmodelle für Lastenfahräder geprüft, um die Lebensdauer zu verlängern. Diese zielen auf eine Verringerung der Dissipation (D!) sowie eine Verbesserung der Informationslage (I?) ab: Als Alternativen zum Kauf wurde ein Business Model Canvas für Leasing, Miete und geteilte Nutzung durchgeführt und u. a. die Beeinflussung des Nutzerverhaltens durch ein Anreizsystem geprüft. Auch in diesem Fall sind Wertehaltungs-Netzwerke erforderlich, u. a. um weitere Nutzungsphasen technisch zu ermöglichen und die Akzeptanz der Kunden zu gewinnen.

4. Gruppe 2: Baumaterialien, Bauprodukte, Möbel

Mineralische Baustoffe sind zwar in großen Mengen, aber nicht unbegrenzt verfügbar. Der Bedarf an Gesteinskörnungen – mineralische Primär-Rohstoffe – betrug in Deutschland im Jahr 2016 insgesamt 566,5 Mio. t, wovon 72,2 Mio. t durch Recycling (RC)-Baustoffe, also nur 12,7 % des Gesamtbedarfes gedeckt wurden [Bundesverband Baustoffe 2017]. Ein erheblicher Teil wird lediglich als Verfüllmaterial oder für den Deponiebau verwendet. Der Abbau mineralischer Rohstoffe (Sandgruben, Auskiesungen, Tongruben, Kalksteinbrüche, ...) wird durch mangelnde Zugänglichkeit, Wasserschutz- und Naturschutzgebiete sowie politischen Widerstand gegen weitere Aufschlüsse erschwert. Die regional unterschiedliche Ressourcenverknappung (siehe z. B. [Verbücheln/Wagner-Endres 2019]) macht sich aktuell durch längere Transportwege und deutliche Preissteigerungen bemerkbar, wobei eine signifikante Verringerung der Nachfrage nicht zu erwarten ist [BTB 2020]. Wichtige mineralische Baustoffe tragen wegen ihrer energieintensiven Produk-

tion erheblich zu den THG-Emissionen bei, z. B. die Zementherstellung mit 2 % Anteil an den deutschen bzw. 8 % an den globalen Emissionen. Wiederverwendung und Recycling von Baumaterialien bzw. Bauprodukten sind daher geboten. Der relativ geringe Anteil an RC-Material in neuen Baustoffen, vor allem im Hochbau, hat mehrere Ursachen:

- ◆ Es fehlte bisher an entsprechender Nachfrage, so dass eine hochwertige Verwertung von Abbruchmassen nicht wirtschaftlich darstellbar war (EcY!).
- ◆ Die kontinuierliche Errichtung neuer Bauwerke und die lange Lebensdauer vor allem von Wohngebäuden führen dazu, dass die insgesamt benötigte Menge an Gesteinskörnungen mit 566,5 Mio t mehr als doppelt so hoch ist wie die verfügbare Menge an Abfällen aus dem Baubereich mit 214,6 Mio t (Δt -Problem).
- ◆ Hinzu kommt die Vermischung verschiedener Materialien, was beim Rückbau von Gebäuden ab etwa dem Errichtungsjahr 1970 auf Grund des steigenden Einsatzes weiterer Bauprodukte, z. B. auf Basis von Polymeren, zu größeren Schwierigkeiten bei der Sortierung führt (ΔS). Während der Nutzung von Gebäuden gehen im Übrigen Informationen über verwendete Baumaterialien bei Errichtung bzw. Umbauten verloren (I?).
- ◆ In früheren Jahrzehnten verbaute und mittlerweile verbotene Bauprodukte, z. B. aus Asbest, mit Chloraromaten behandeltes Holz oder Hexabromcyclododecan als Flammenschutzmittel in der thermischen Isolierung, ($H \leftrightarrow R$) verhindern die stoffliche Verwertung der jeweils belasteten Baustoffe.
- ◆ Bei Möbeln führt der Aufbau aus oft unterschiedlichen, aber fest verbundenen Materialien (Holz, Plastik, Stahl, Gewebe...) dazu, dass nur einfache Verwertungsmöglichkeiten bestehen, etwa A III-Holz für Biomasse-Kraftwerke.

Die im Bereich Baumaterialien, Bauprodukte und Möbel untersuchten Projekte sind in Tabelle 3 aufgelistet. Auch diese Projekte befinden sich in unterschiedlichen Phasen der Realisierung bzw. Verfügbarkeit am Markt: UpZent basiert auf einem schon länger bestehenden Sozialprojekt, dessen Professionalisierung und Verbreitung gefördert werden sollte, während PERMA, REPOST und RessProKA jeweils in oder vor einer Pilotierungsphase stehen.

Bei „REPOST“ geht es vorwiegend um das Recycling von Porenbetonsteinen, deren Menge aus dem Gebäuderückbau in den kommenden Jahren voraussichtlich stark ansteigen wird [Steins et al. 2021]. Stoffliche Verwertung und ggf. Wiederverwendung sind u. a. wegen der Vorgaben aus der GewerbeabfallVO abfallwirtschaftlich geboten und aus Gründen des Klimaschutzes sinnvoll. Das Projekt ergab, dass der Einsatz sortenreiner, vermahlener Porenbetonabfälle zur Einsparung von 20 % bis 40 % an Primärrohstoffen – in Abhängigkeit der Güteklasse – bei der Herstellung von neuen Porenbetonsteinen führt. Bei den eingesparten Primärrohstoffen handelt es sich in erster Linie um Sand, Branntkalk und Portlandzement. Bei geringer Sortenreinheit können daraus z. B. Leichtbeton-Mau-

KREISLAUFWIRTSCHAFT | BMBF-FÖRDERMASSNAHME REZIPROK

Tabelle 3
Projekte aus ReziProK
mit Schwerpunkt
Baumaterialien, Bau-
produkte, Möbel

Akronym	„R“ Strategie	Bezeichnung des Projekts
PERMA	R1,R3,R4,R5,R7	Plattform zur effizienten Ressourcenauslastung in der Möbel- und Ausstattungsindustrie
REPOST	R7,R8	Recycling-Cluster Porenbeton: Erarbeitung neuer Optionen für die Kreislauf-führung von Porenbeton
RessProKA	R1,R3,R6,R8	Schließung von ressourceneffizienten Produkt-Kreisläufen im Ausbaugewerbe durch neue Geschäftsmodelle
UpZent	R2,R8	„Upcycling Zentrum“ – Ein partizipatives Geschäftsmodell zur Sensibilisierung und Implementierung einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft

erwerksprodukte produziert werden; hier befindet man sich aber noch im Technikums-Maßstab. Die Abtrennung des Materials aus Bauabfall-Strömen wurde im Projekt händisch vorgenommen. Porenbeton lässt sich im Bauabfall allerdings auf Grund seines geringeren spezifischen Gewichts erkennen und somit separieren, zum Beispiel durch Sink-Schwimm-Trennung. Insofern spielen die Dissipation $D!$ und die oft mangelnde Dokumentation verwendeter Baumaterialien ($I?$) keine entscheidende Rolle. Großtechnische Lösungen für die Sortierung müssen aber erarbeitet werden. Mit den im Projekt REPOST erarbeiteten Recyclingoptionen für sortenreinen Altporenbeton („Porenbeton zu Porenbeton“) ließe sich in Deutschland Altporenbeton im zweistelligen kt-Bereich pro Jahr verwerten. Die Verwertung von Porenbeton-Abfällen entlastet die Klimabilanz des Porenbetons mit ca. 0,5 kg CO_2 -Äquivalenten pro kg Produkt.

Das Projekt „RessProKA“ setzte bei den im gewerblichen Hochbau häufigen Umbauten durch Nutzerwechsel an, bei denen vor allem Zwischenwände, Böden und abgehängte Decken entfernt bzw. ersetzt werden. Die Umlaufzeiten im Ausbaugewerbe liegen oftmals bei unter zehn Jahren. Ziele sind die weitere Nutzung von Bauteilen, ggf. deren Refabrikation und die Nutzung von RC-Material für neue Produkte. Technisch sind solche Lösungen bereits verfügbar, entsprechen aber nicht den aktuellen linearen Geschäftsmodellen der Hersteller („sell and forget“). Die neuen, zunächst im Rahmen eines Planspiels getesteten Geschäftsmodelle umfassen Rückgaberechte bzw. Rückgabepflichten des Nutzers sowie ein Servicepaket für Umbau und Instandhaltung der Konstruktionen. Damit übernehmen die Hersteller die Produktverantwortung über den gesamten Lebenszyklus ihrer Bauprodukte. So verfügen sie über die vollständige Information über die Bauteile und evtl. während der Nutzung vorgenommene Änderungen. Dies versetzt sie in die Lage, die Gewährleistung auch bei mehreren Nutzungszyklen zu übernehmen. Die wirtschaftliche Umsetzung wird durch entsprechende Nachfragen mit dem Ziel der Verbesserung von THG-Bilanzen auf der Seite der Bauherren und Mieter wahrscheinlicher. Pilotprojekte sind bereits erfolgreich angelaufen. Eine technische Optimierung in Richtung auf modulare Bauweisen und präzise Standards ist zur Unterstützung von Geschäftsmodellen mit dem Ziel der Wiederverwendung erforderlich. Die direkte Produktverantwortung hat in diesem Fall zahlreiche positive Wirkungen: Der Hersteller hat Interesse daran, sämtliche Informationen auf neuem

Stand zu halten (Verringerung von $I?$) und wird für das Nutzungsende von sich aus auf gute Zerlegbarkeit und Verwertbarkeit (Beachtung des ΔS -Problems) hinarbeiten. Dies gilt auch für die Vermeidung des Einsatzes potenziell schädlicher Stoffe ($H \leftrightarrow R$), auch wenn spätere Erkenntnisse über kritische Eigenschaften nie ausgeschlossen werden können.

Beim Projekt „PERMA“ werden ähnliche Ziele verfolgt wie bei „RessProKA“, allerdings hier für Büromöbel und Raumsysteme. In diesem Fall korrespondiert aber nicht nur ein Hersteller mit seinen Kunden bzw. Nutzern der Bauteile, sondern Planer, Hersteller und weitere Dienstleister organisieren auf einer gemeinsamen Plattform die Kommunikation mit einer Vielzahl von Kunden. Für die Kunden werden individuelle Büroausstattungen zur Miete angeboten, die nach dem Ende der ersten Nutzung erneut genutzt oder umgebaut, ggf. in ihrem Verwendungszweck variiert werden können. Nach Installation der Plattformbetreiber-Gesellschaft soll im Laufe des Jahres 2022 auch ein Prototyp der Plattform umgesetzt werden. Zur Unterstützung der Wettbewerbsfähigkeit dieses Geschäftsmodells wurde ein Siegel für kreislauffähige Produkt- und Qualitätsmerkmale konzipiert. Die Einschätzung zu den Stolpersteinen entspricht der bei „RessProKA“.

„UpZent“ ist ein Projekt, das auf einem bestehenden Modell aufsetzt, um dieses auch anderswo zu installieren, Kooperationen aufzubauen und das Geschäftsmodell weiter zu verbessern. Im Gegensatz zu den meisten anderen Projekten der Fördermaßnahme werden bei „UpZent“ Möbel, aber auch Spielsachen u. a. m. aus definierten und regional verfügbaren Gewerbeabfällen – z. B. Altholz, Textilresten, Plastikabfällen – hergestellt. Eine aus gebrauchten Holzpaletten hergestellte Bank substituiert mithin eine Bank aus Frischholz und reduziert damit nahezu sämtliche für eine neue Bank benötigten Ressourcen. Das Design der Produkte folgt hier den zur Verfügung stehenden Abfällen. Die Produkte werden weitgehend aus einheitlichen Materialien aufgebaut, so dass sie nach (ggf. mehrfachem) Gebrauch den Verwertungs- oder Beseitigungsweg gehen können, der für die genutzten gewerblichen Abfälle ohnehin vorgesehen war. Die Produktion wird in Sozialwerkstätten durchgeführt. Da es sich bei den bei „UpZent“ genutzten Materialien um Gewerbeabfälle handelt, kann der Abfallerzeuger langfristig auch andere Verwertungs- oder Vermeidungsmaßnahmen durchführen. Für eine Ausdehnung des Geschäfts bleibt die Wettbewerbsfähigkeit $EcY!$ der entscheidende Stolperstein. Im Rahmen des Projekts wurde ein Organisations- und Geschäftsmodell entwickelt, welches durch Prozessstandardisierung, Definition von Prozessketten und Beschreibung von Kernprozessen auf andere soziale Werkstätten übertragen werden kann. Eine Erprobung unter realen Marktbedingungen wurde noch nicht durchgeführt.

5. Gruppe 3: Textilien und Fasern

Die globale Faserproduktion lag 2015 bei nahezu 91 Mio. t, wovon 69 % synthetischen Ursprungs waren. Polyester mit 52,1 Mio. t und Baumwolle mit 20,6 Mio. t sind die bedeutendsten Fasern ([Bartl 2019] und dort

zit. Literatur). Die Menge an Alttextilien bzw. Faserabfällen aus Textilien wächst weltweit rasant. Durch die von zahlreichen Produzenten bzw. Handelsketten voran getriebene Beschleunigung des Wechsels der Kollektionen („fast fashion“) von einem saisonalen auf einen monatlichen Rhythmus bei gleichzeitigem Verlust an Qualität der Ware führt u. a. zu einem steigenden Aufkommen an Alttextilien. In Deutschland war in den Jahren 2015 bis 2018 ein mittlerer Anstieg der getrennt gesammelten Menge pro Einwohner und Jahr um 2,2% auf 15,3 kg festzustellen [BVSE 2020]. Der Anteil hochwertiger Alttextilien, deren Wiederverwendung (R3) bisher etwa die Hälfte der Kosten für Sammlung und Sortierung deckte, geht kontinuierlich zurück. Nicht wiederverwendbare Anteile werden als Putzlappen verkauft oder in der Reißerei zu Fasern und Fluff verarbeitet, die z. B. als Malervlies oder Füllstoff für Kissen genutzt werden können (R8). Neben Verunreinigungen von etwa 10% in der Abfallfraktion „Alttextilien“ hat sich auch der Anteil an Textilien verdoppelt, die überhaupt nicht für das Recycling geeignet sind und ebenso wie die nicht getrennt gesammelte Menge (4,5 kg pro Einwohner und Jahr [Dornbusch et al. 2020]) energetisch verwertet (R9) werden. Der Marktpreis für unsortierte Ware sank von 25–35 Ct/kg im Jahr 2015 auf 20–26 Ct/kg im Jahr 2018 [BVSE 2020]. Bei einer globalen Betrachtung ist die Textilproduktion in sogenannten Billiglohnländern zu beachten, bei der es auch um Ausbeutung von Menschen und hohe Belastung der Umwelt geht. Der Handel mit gebrauchten Textilien spielt traditionell eine große Rolle; 2009 betrug das Handelsvolumen global etwa 2,5 Mrd. US-\$ [UNEP/ISWA 2015]. Weniger als 1% Prozent der Textilien werden stofflich zu neuen Textilien verarbeitet. Ca. 87% der nicht mehr tragbaren Textilien werden deponiert oder verbrannt [EMAF 2017]; die energetische Verwertung dominiert nur in einigen Industrieländern [Bartl 2019]. In der EU sollen ab 2025 Alttextilien generell getrennt gesammelt werden [EU 2018]. Zurzeit wird intensiv diskutiert, welche Rolle dabei die Produzentenverantwortung spielen soll, wie vorhandene Sammelstrukturen genutzt werden können usw. (siehe z. B. [Fairwertung & VKU 2022]).

Die Entscheidung der EU, eine Sammlung der Fraktion Alttextilien per Richtlinie einzuführen, ist abfallwirtschaftlich ein wichtiger Schritt. Zahlreiche Stolpersteine sind jedoch im Sinne eines effizienten Ressourcenschutzes zu überwinden:

- ◆ Ein hoher Grad an Wiederverwendung bereits getragener Kleidung ist bislang Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit der Wertschöpfungskette Alttextilien (EcY!). Die Wirtschaftlichkeit leidet bei schlechterer Qualität der Ware und steigenden Mengen, zumal große, neue Absatzmärkte nicht in Sicht sind.
- ◆ Im Fall hoher Erlöse aus Alttextilien spielen illegale Sammler eine Rolle und greifen z. T. mit eigenen Sammelgefäßen, z. T. durch Beraubung von Containern der Kommunen oder anderer Sammler (siehe z. B. [DRK 2022]), gute Ware ab (ΔEcY).
- ◆ Textilien bestehen meist aus mehreren Faserarten und enthalten oft zahlreiche weitere Materialien für Verschlüsse, Verzierungen etc. (ΔS).

Dies verhindert bisher weitgehend ein sinnvolles Recycling der Fasern („fibre to fibre recycling“). Lösungen für ein verbessertes mechanisches oder chemisches Recycling und dafür geeignete rechtliche Rahmenbedingungen werden intensiv erforscht [Duhoux et al. 2021].

- ◆ Zwar wird die Zusammensetzung der verwendeten Fasern meist angegeben, ist aber nicht maschinenlesbar, so dass beim industriellen Recycling nicht wiederverwendbarer Ware ein Informationsdefizit (I?) besteht.
- ◆ Textilien können aus technischen Gründen Additive enthalten, die eine Verwertung unmöglich machen ($H \leftrightarrow R$); so wird der intensive Einsatz von Perfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) mittlerweile auch international als kritisch für die Verwertung angesehen [NRDC 2021]. Außerdem werden im Rahmen der globalen Arbeitsteilung bei der Herstellung von Textilien z. T. in der EU verbotene Stoffe verwendet [Gobalakrishnan et al. 2021].

Technische Fasern werden in der Regel länger verwendet und können wegen ihrer speziellen Anwendungsbereiche bei einem möglichen Recycling der entsprechenden Altprodukte meist identifiziert werden. Allerdings gibt es bisher – abgesehen von Produktionsabfällen – kaum Möglichkeiten des mechanischen Recyclings. Bei den besonders hochwertigen Carbonfasern mangelt es an industriell verfügbaren Verwertungsverfahren (Überblick bei [Pimenta & Pinho 2014]).

Aus der Fördermaßnahme ReziProK werden die in Tabelle 4 genannten Projekte im Folgenden analysiert.

Die Projekte „DiTex“ und „Wear2Share“ behandeln die „Circular Economy“ von Bekleidung, während bei „All-Polymer“ Fasern zur Verbesserung der Haltbarkeit von Plastikprodukten eingesetzt werden.

Mit „DiTex“ wurden bestehende Modelle für Berufskleidung und Objekttextilien im Sinne einer Verengung und Verlangsamung von Stoffkreisläufen mit dem Ziel der Umweltentlastung und eines geringeren Ressourcenverbrauchs optimiert. Ein kooperativer Design-Prozess (R1, R2) erwies sich als wichtige Voraussetzung für das gewünschte Ergebnis. Mit funktional angepassten Geweben, Wasch- und Reparaturdienstleistungen (R4) konnten mindestens jeweils 50 Umläufe von Bettwäsche, Polo-Shirt und Polizeihemd (R3) erreicht werden. Die Zusammensetzung der Textilien ermöglicht bei Bettwäsche (50% Baumwolle oder Lyocell, 50% Polyester) eine Faser-zu-Faser-Verwertung, bei reinen Polyester-Textilien ist chemisches Recycling möglich (R8). In diesem Geschäftsmodell können die Stolpersteine ΔS , $D!$, $I?$ und $H \leftrightarrow R$ umgangen bzw. überwunden werden. Die bei Vermietung von Berufs-

Akronym	„R“-Strategien	Bezeichnung des Projekts
All-Polymer	R2, R8	Faserverstärkung zur Erhöhung der Ressourceneffizienz hochwertiger, voll recyclingfähiger Kunststoffprodukte
DiTex	R1, R2, R3, R4, R8	Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft
Wear2Share	R1, R3	Innovative Kreislaufgeschäftsmodelle in der Textilwirtschaft

Tabelle 4
Projekte aus ReziProK mit Schwerpunkt Textilien bzw. Fasern

Akronym	Bezeichnung des Projekts	Methodik
DIBICHAIN	Digitales Abbild von Kreislaufsystemen mittels Blockchain-Technologie	Blockchain-Technik zum Austausch von Daten auf dem Produktlebensweg
DiLink	Digitale Lösungen für industrielle Kunststoffkreisläufe	App mit virtuellem Abbild von Produktionsabfällen zur Kommunikation relevanter Qualitätsparameter
DiTex	Digitale Technologien als Enabler einer ressourceneffizienten kreislauffähigen B2B-Textilwirtschaft	Ermittlung und Nutzung von waschbeständiger RFID-Fäden, Knöpfe etc. als „intelligente Etiketten“
EIBA	Sensorische Erfassung, automatisierte Identifikation und Bewertung von Altteilen anhand von Produktdaten sowie Informationen über bisherige Lieferungen	KI-unterstützte Identifizierung und Zustandsbewertung mit Bilderkennung unter Einsatz von Tiefenkameras
OptiRoDig	Optimierung der Rohstoffproduktivität in der Gießerei- und Stahlindustrie aus Produkten der Recyclingwirtschaft durch Nutzung moderner mathematischer Verfahren, Vernetzung und Digitalisierung	Digitales Netzwerksystem, in dem umfangreiche Analysedaten von Schrotten für Schmelzbetriebe zur Verfügung stehen

Tabelle 5
Methoden zur Identifizierung und Charakterisierung von Altprodukten sowie zur Verfolgung von Produkten („tracing“)

kleidung ohnehin gute Informationslage für den Vermieter lässt sich – wie im Projekt realisiert – durch „intelligente Etiketten“ verbessern, mit denen auch die Zahl der Waschzyklen und Reparaturen dokumentiert wird [Müller et al. 2021].

Im Gegensatz zu Berufskleidung lassen sich bei Textilien für den Bereich Endverbraucher bestehende Stolpersteine nur schwer umgehen, wie aus dem Projekt „Wear2Share“ erkennbar. Untersucht wurden bestehende Geschäftsmodelle zur Vermietung bzw. gemeinsamer Nutzung von Alltags-Bekleidung für Kinder und Damen mit dem Ziel einer effizienteren Nutzung, also längerer Tragezeit [Bodenheimer et al. 2022]. Eine wirtschaftlich tragfähige Basis (EcY!) lässt sich nach den Erkenntnissen aus diesem Projekt dann erreichen, wenn

- ◆ überwiegend hochpreisige Kleidungsstücke in die Vermietung gelangen, damit es für den Konsumenten attraktiv ist, diese zu mieten statt zu kaufen,
- ◆ die Kleidungsstücke nicht einer schnell wechselnden Mode unterliegen, so dass mehrfache Vermietung möglich ist,
- ◆ der Zweck einer einmaligen Miete für die Konsumenten sinnvoll erscheint,
- ◆ die Textilien haltbar sind und geringen Reparaturaufwand erfordern.

Der Aufbau einer an Mietkleidung interessierten Kundenbasis bedarf eines erheblichen begleitenden Kommunikations- und Marketing-Aufwands. Ein wichtiger Treiber ist der Wunsch vieler Verbraucherinnen und Verbraucher, mit der Nutzung von Bekleidung etwas zur nachhaltigen Entwicklung beizutragen. Kostenvorteile erwarten nur wenige Kunden, auf der anderen Seite sind die Sorge von Haushalten vor Haftung bei Beschädigungen, Gebrauchsspuren etc. Hindernisse für eine Beteiligung an Mietmodellen.

Aus Sekundärrohware, die aus der Sortierung von Kunststoffabfällen gewonnen wird, lassen sich auf Grund von Qualitätsmängeln vielfach nur geringwertige Produkte herstellen. Im Projekt „All-Polymer“ werden Fasern bzw. faserverstärkte Kunststoff-Bänder

(„tapes“) zur Verbesserung der Qualität und Langlebigkeit von Kunststoffprodukten aus Rezyklaten eingesetzt. Prototypen aus den Bereichen Verpackung, Bauwirtschaft und Fahrzeugbau zeigen, dass sich dadurch langlebige und/oder mehrfach verwendbare Produkte herstellen lassen. Damit werden die durch Dissipation (DI), Vermischung mit ähnlichen Kunststoffen und Materialvielfalt (ΔS) entstandenen Probleme für eine weitere Nutzungsphase umgangen. Die neuen Produkte können wiederum stofflich verwertet werden.

6. Möglichkeiten zur Umgehung des Stolpersteins „Informationsdefizit“

Eine auf Langlebigkeit, Wiederverwendbarkeit und Verwertbarkeit von Produkten ausgerichtete Wirtschaftsweise ist auf Informationen über die Zusammensetzung, die Zerlegbarkeit und den Gebrauchszustand der Produkte angewiesen. In Tabelle 5 sind einige Projekte aufgeführt, bei denen sich aus der Identifizierung und Charakterisierung von gebrauchten Produkten bzw. deren Verfolgung über den Lebensweg wesentliche Erkenntnisse zur Überwindung von Informationsdefiziten (I?) ergeben.

Die Blockchain-Technik ermöglicht die Verteilung von Daten, die unveränderbar und verschlüsselt für einen dezentralen Abruf bereitstehen. Im Projekt „DIBICHAIN“ wurde ein Blockchain-Demonstrator zum Austausch von produktbezogenen Daten – als Beispiel diente ein Flugzeugteil – entwickelt. Zugriffe auf diese Daten können von Berechtigten anonym vorgenommen werden, so dass individuell Materialdaten, Ökobilanzen usw. geteilt werden können. Die Blockchain fungiert dabei als verteiltes Produkt ID Register, das öffentlich zugängliche Informationen über ein Produkt enthält und fortschreibt, ohne dabei vertrauliche Produkt- oder Herstellerinformationen zu preisgeben. Die Blockchain dient auch zur Kontaktaufnahme zwischen den Teilnehmern. Im Projekt „DiTex“ wurden Radio-Frequency Identification (RFID)-„Etiketten“ auf ihre Brauchbarkeit überprüft und eingesetzt. Damit können alle notwendigen Informationen während der Gebrauchsphase des Produkts einschließlich des Übergangs zum Abfall gespeichert, aktualisiert und abgerufen werden. Die Methode der Beschriftung und Auslesung der Etiketten ist Angelegenheit der Partner im Wertschöpfungsnetz.

Für die Beteiligten an einem Produktionsprozess auf Basis von Sekundärrohstoffen sind schnell verfügbare Informationen über die Qualität der zur Verfügung stehenden Materialien ein Schlüssel. Beim Projekt „DiLink“ wurde eine App entwickelt, die auf einen späteren Produktpass ausgerichtet ist. Hier wurden durch online-Spektroskopie gewonnene Daten zu Kunststoffabfällen aus verschiedenen Produktionsprozessen direkt mit potenziellen Nutzern ausgetauscht. Im Fall von „OptiRoDig“ geht es um die Zusammensetzung und weitere Parameter zur Charakterisierung von Schrotten, die über ein Netzwerk den Schmelzwerken mit dem Ziel der Maximierung des Schrotteinsatzes und der Minimierung des Energieaufwands zur Verfügung gestellt werden können. In beiden Fällen ist der Kreis der Beteiligten im Netzwerke durch

Kunden-Lieferanten-Beziehungen der jeweiligen spezifischen Industriezweige beschränkt.

Im Projekt „EIBA“ wurden gebrauchte Anlasser an einem Arbeitsplatz gewogen, mit Tiefenkameras fotografiert und über eine KI-unterstützte Bilderkennung-Software deren Identität (Hersteller, Alter etc.) sowie Gebrauchszustand ermittelt [Caspers et al. 2021]. Durch die Kombination der spezifischen Stärken von Menschen und Maschinen samt KI lässt sich die Frage der Wiederverwendbarkeit sowie ggf. notwendiger Reparaturen an den Anlassern deutlich schneller und sicherer beantworten.

7. Diskussion

Die hier vorgestellten Beispiele aus der BMBF-Fördermaßnahme „ReziProK“ spiegeln nur einige der zahlreichen Varianten der „Circular Economy“ wider. Wegen der Vielfalt der Ansätze und der unterschiedlichen Anwendungsbereiche lassen sich aber einige Tendenzen erkennen:

- ◆ Mit einem veränderten Design können unterschiedliche Ziele im Sinne der Verlangsamung, Verengung oder Schließung von Material- bzw. Produktströmen erreicht werden [Bocken et al. 2016]. Innovationen zur Verringerung der Materialvielfalt bzw. zur Verbesserung der Reparierbarkeit (Modularität, Zerlegbarkeit) oder Verwertbarkeit und damit Maßnahmen zur Minimierung von Effekten des Stolpersteins ΔS wurden vielfältig bei ReziProK eingesetzt; z. B. sind bei DiTex, UpZent, RessProKA Wiederverwendbarkeit, Reparierbarkeit und stoffliche Verwertung durch Design-Optimierung integrale Bestandteile der jeweiligen Produkte.
- ◆ Der Stolperstein „Dissipative Verteilung“ (D!) lässt sich mit einer geeigneten Rückführ-Logistik, also etwa der Sammlung einer großen Zahl gleichartiger Altprodukte (z. B. bezogen auf Hersteller und/oder Baujahr), verringern. Dies lässt sich in Geschäftsmodellen realisieren, bei denen die Nutzer Produkte nur leihen können (DiTex, Wear2Share, RessProKA, LifeCycling²) oder andere Motive für eine Rückgabe haben, wie etwa finanzielle Vergünstigungen, die Installation neuer Hardware o. dgl. (MoDeSt, ResmaP, PERMA). Gewerbebetriebe sind dafür wesentlich besser geeignet als private Haushalte, da sie Textilien, Maschinen, IT-Ausrüstung etc. zu einem definierten Zeitpunkt zurückgeben können. Ein Hersteller, der seine Produkte für einen weiteren Nutzungszyklus, Reparatur oder Verwertung zurücknimmt und einen Teil seiner Wertschöpfung darauf aufbaut (PSS, siehe u. a. [Brinker et al. 2022]), muss für ein geeignetes Produktdesign sorgen. Dadurch werden die Materialentropie (ΔS) und die Werterhaltung als Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb EcY! miteinander verbunden [Regenfelder 2019].
- ◆ Kritische Substanzen, die einer Wiedernutzung oder stofflichen Verwertung entgegenstehen ($H \leftrightarrow R$), können bei entsprechender Auswahl der eingesetzten Materialien (z. B. bei DiTex, RessProKA) weitgehend umgangen werden. Eine

geänderte Einschätzung von Chemikalien über die Zeit (Δt) bleibt aber bei langlebigen Produkten ein Risiko.

- ◆ Das vor allem für Wiederverwendung und stoffliche Verwertung äußerst hinderliche Informationsdefizit (I?) lässt sich durch Geschäftsmodelle verringern, bei denen Hersteller und Nutzer in Kontakt bleiben (MoDeSt, ResmaP, RessProKA, LifeCycling²...). Dies gilt in ähnlicher Weise für Baukastensysteme (KOSEL, LEVmodular, AddRE-Mo), bei denen Kunden langfristig Ersatzteile erhalten oder über „additive manufacturing“ selbst herstellen können. Für hoch dynamische Wertschöpfungsketten mit vielen, z. T. wechselnden Beteiligten können Blockchain-Systeme (Projekt DIBICHAIN) genutzt werden. Das Projekt EIBA zeigt, dass Identifizierung und Zustandserfassung angelieferter Altprodukte durch KI-unterstützte Bilderkennung gelingen kann. Die online-Information über Maschinenzustände (z. B. im Projekt ResmaP) ermöglicht eine zeitgenaue Instandhaltung, verringert Stillstandzeiten und sollte zur Verlängerung der Nutzungsdauer von Maschinen beitragen. Die Bedeutung der Information zeigt sich auch daran, dass Konsumentengeräte mit Anzeige von Fehlerdiagnosen die Bereitschaft zur Reparatur erhöhen [van den Berge et al. 2022].
- ◆ Das Verwertungsgeschäft in der Abfallwirtschaft folgt einem vergleichsweise einfachen Ansatz – die Wirtschaftlichkeit (EcY!) bemisst sich aus dem Verkaufspreis für einen Sekundärrohstoff in Relation zu den für Sammlung und Sortierung von Abfällen sowie deren Aufbereitung entstehenden Kosten. Wegen der enormen Komplexität der Geschäftsmodelle in der „Circular Economy“, bei denen primäre und sekundäre Materialien bzw. Güter in miteinander verbundenen Märkten im Wettbewerb stehen [Zink & Geyer 2017], sind Kosten- und Ertragsmodelle ungleich schwieriger zu erstellen. Weitere Probleme: Die Wahrnehmung der Kunden von Produkten aus wiederaufbereitetem oder recyceltem Material ist tendenziell geringer als bei herkömmlichen Waren, was zu niedrigeren realisierbaren Preisen führt [Geissdoerfer et al. 2018]. Die Komplexität bei der Steuerung der Wertschöpfungsketten führt außerdem zu hohen Transaktionskosten.
- ◆ Ein ökonomisch motivierter Eingriff Dritter in Geschäftsmodelle, die auf PSS beruhen, dürfte deutlich schwieriger als beim herkömmlichen Recycling sein (ΔEcY), da Kundenbindung über das PSS institutionalisiert wird. Inwieweit über konkurrierende Plattformen Eingriffe möglich sind, lässt sich angesichts des Status der Projekte nicht belastbar einschätzen.
- ◆ Angesichts der Laufzeit der Projekte von durchschnittlich drei Jahren lassen sich Effekte auf den Stolperstein „Zeit“ (Δt) nur einschätzen, aber nicht empirisch belegen.

„Circular Economy“ kann durchaus Rebound-Effekte zur Folge haben [Zink & Geyer 2017]. Dies ist auf volkswirtschaftlicher Ebene zu beachten, damit das Ziel der Verminderung des Ressourcenverbrauchs tatsächlich

Souverän im gesamten Abfallrecht

ESV-Digital Recht der Abfall- und Kreislaufwirtschaft

Mehr Entscheidungssicherheit in der Abfall- und Kreislaufwirtschaft: umfassende und fundierte Kommentierungen in einer passgenauen Datenbank – laufend aktualisiert, jederzeit verfügbar, auf einen Klick.

- ▶ **Fachübergreifende Perspektiven** aus den Ministerien auf Bundes- und Landesebene, Anwaltschaft, Abfallunternehmen und Umweltbundesamt zum gesamten Regelwerk einschl. wichtiger EU-Regelungen, aus Umweltrecht und Wirtschaftsordnungsrecht
- ▶ **Alles Wichtige vernetzt:** Kommentare, Vorschriften, Rechtsprechung, LAGA-Mitteilungen u.a. in einer Datenbank

Ihr persönlicher Arbeitsplatz

Perfekt verlinkt und überall mobil: suchen, notieren, markieren, zitieren, exportieren – **mit automatischen Updates.**



Inhalte dieser Datenbank:

- ▶ von Lersner/Wendenburg/Kropp/Rüdiger
Recht der Abfall- und Kreislaufwirtschaft des Bundes, der Länder und der Europäischen Union
Kommentierungen der Abfallrahmenrichtlinie, des KrWG und weiterer abfallrechtlicher Gesetze und Verordnungen
- ▶ **ESV-Rechtsprechungssammlung**
- ▶ **ESV-Vorschriftensammlung**

1 Nutzer 29,- €
Einzellizenz, netto/Monat

3 Nutzer 47,85 €
ESV-Bürolizenz, netto/Monat

Printbezieher 5,80 €
Einzellizenz, netto/Monat

Gleich 4 Wochen gratis testen:

www.ESV-Digital.de/RdA



erreicht wird. Dieses Thema wurde in den ReziProK-Projekten nicht im Detail untersucht.

8. Schlussfolgerungen

Die Auswertung von Erkenntnissen aus Projekten der BMBF-Fördermaßnahme ReziProK ergibt, dass einige für die Abfallwirtschaft charakteristische „Stolpersteine“ mit zirkulären Ansätzen teilweise überwunden oder vermieden werden können. Da Geschäftsmodelle und Produktdesign Hand in Hand gehen müssen [Bocken et al. 2016], entstehen – in der linearen Wirtschaft unübliche – Verbindungen zwischen Geschäftserfolg und Materialvielfalt bzw. der Produktzusammensetzung, z.B. im Sinne einer reparatur-, verwertungs-, wartungsfreundlichen Gestaltung. Dies wird durch entsprechenden Ausbau der Ökodesign-Richtlinie [Mathieux et al. 2020] wie auch Fortschritte bei der Standardisierung [CENELEC 2022] der „R“-Strategien auf der Produktebene unterstützt.

Eine gute Informationslage zu Identität und Zustand gebrauchter Produkte bleibt für die „R“-Strategien R3 („Wieder verwenden“ bzw. „Re-use“), R4 („Reparieren“ bzw. „Repair“), R6 („Wieder aufarbeiten“ bzw. „Remanufacture“) und R8 („Stofflich verwerten“ bzw. „Recycle“) eine entscheidende Voraussetzung. Eine Verpflichtung von Herstellern, die Zusammensetzung von Produkten und/oder des Verwertungswegs zu kennzeichnen, wäre hilfreich. Die Fortschritte bei ReziProK belegen, dass die Digitalisierung nach wie vor ein Treiber der „Circular Economy“ ist [Lacy et al. 2014], wobei sich mit künstlicher Intelligenz unterstützte Systeme wie Bilderkennung oder dynamische, maschinenlesbare Etiketten in schneller Entwicklung befinden.

Neue Geschäftsmodelle entlang der Wertschöpfungskette müssen wirtschaftlich tragfähig und möglichst besser als der Wettbewerb aus dem „linearen“ Bereich sein. Erfolgversprechende Wege für Unternehmen ergaben sich bei ReziProK bei

- ◆ dem Verkauf zusätzlicher Dienstleistungen entlang des Produkt-Lebenswegs, um das Interesse von Konsumenten an „zirkulären Produkten“ zu wecken (PSS),
- ◆ der Online-Überwachung von Maschinen durch die Hersteller mit selbstlernender Diagnose-Software, um Instandhaltungskosten zu senken und die Nutzungszeit erheblich zu verlängern,
- ◆ dem Aufbau eigener, geschützter Systeme durch Hersteller für ihre Kunden, um „Trittbrettfahrer“ abzuwehren,
- ◆ wobei Beziehungen zwischen Herstellern und gewerblichen Unternehmen sich meist einfacher entwickeln lassen als mit Haushalten.

Ein Geschäftsmodell in der „Circular Economy“ muss definitionsgemäß zur Reduktion von Abfällen und dem Mindereinsatz von Ressourcen führen. Wie aus den ReziProK-Projekten erkennbar ist, müssen dazu die Interessen der beteiligten Unternehmen im Wertschöpfungsnetz im Sinne einer längerfristigen Symbiose organisiert werden und die Zielkunden ein solches Angebot dem „linearen“ Produkt vorziehen. Vor dem Start in ein solches Geschäftsmodell muss außerdem geklärt werden, welche Vertriebskanäle genutzt wer-

den können, ob die entscheidenden Ressourcen für Produktion und Service gesichert sind und wie die Kosten- und Ertragsmodelle aussehen sollen.⁵

Trotz der Verlangsamung von Stoffströmen in einer „Circular Economy“ stehen nach ggf. mehreren Nutzungszyklen Altprodukte für die Abfallbehandlung an, wobei zahlreiche Verbundmaterialien, stofflich nicht verwertbare Fasern, mit Schadstoffen belastete Produkte usw. nur noch für eine energetische Verwertung (R9) geeignet sind. R9 ist somit ein unverzichtbarer Bestandteil der „Circular Economy“. Dies wird in der aktuellen EU-Politik (siehe Fehler in der Taxonomie-Verordnung [Vogel 2022] oder dem Entwurf der European Sustainability Reporting Standards) nicht ausreichend beachtet.

Erkenntnisse aus der Fachliteratur geben zu der Hoffnung Anlass, dass Annäherungen an zirkulär ausgerichtete Produktionen und Geschäftsmodelle erfolgreicher sein werden als die herkömmlichen Strukturen [Horbach & Rammer 2020].

Danksagung

Meinen Kolleginnen bei der DECHEMA, Katja Wendler und Dr. Celine Schielke, gilt herzlicher Dank für zahlreiche Verbesserungsvorschläge. Die Verantwortlichen der hier genannten Projekte konnten die in diesem Aufsatz zu den jeweiligen Vorhaben getätigten Aussagen überprüfen. Vielen Dank für die hervorragende Zusammenarbeit im Rahmen von ReziProK!

Literatur

- Bartl A (2019):** End-of-life textiles. In „Waste A Handbook for Management“ (Hrsg.: T. Letcher, E. Vallerio) Elsevier; <https://www.elsevier.com/books/waste/letcher/978-0-12-815060-3>, aufgesucht am 15.01.2020
- Jonas Brinker, Ingo Westphal, Jan Heinrich Beinke, Barbara Gleede, Oliver Thomas:** Gestaltung kreislauffähiger Geschäftsmodelle, Einblick aus Wissenschaft und Praxis, Industrie Management. Zur Publikation eingereicht
- M. Bodenheimer, J. Schuler, T. Wilkening (2022):** Drivers and barriers to fashion rental for everyday garments: an empirical analysis of a former fashion-rental company, *Sustainability Science Practice and Policy* 18 (1), 344–356.
- NMP Bocken, I. de Pauw, C. Bakker, B. van der Grinten (2016):** Product design and business model strategies for a circular economy, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33 (5), 308–320, DOI: 10.1080/21681015.2016.1172124
- Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (2017):** Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016, <http://www.kreislaufwirtschaftbau.de/Arge/Bericht-11.pdf>, aufgerufen am 27.8.2019
- BTB – Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (2020):** Gutes Klima. Jahresbericht 2020. https://betonshop.de/media/wysiwyg/PDF/BTB_Jahresbericht_2020.pdf
- BVSE (Hrsg.) (2020):** Bedarf, Konsum, Wiederverwendung und Verwertung von Bekleidung und Textilien in Deutschland (bvse Textilstudie 2020), <https://www.bvse.de/gut-informiert-textil-recycling/studie-2020.html>, aufgesucht am 13.08.2022
- Justus Caspers, Hannah Lickert, Clemens Briese, M. Schlüter (2021):** KI für effizientere Kreislaufführung, *Industrial Production* 2/2021, 46–48.
- CENELEC:** https://www.cenelec.eu/media/CEN-CENELEC/News/Publications/standardization_circular_economy_closing_the_loop.pdf, aufgesucht am 25.07.2022
- Daehn KE, Cabrera Serrenho A, Allwood JM (2017):** How Will Copper Contamination Constrain Future Global Steel Recycling? *Environ. Sci. Technol.* 2017, 51, 6599–6606, DOI: 10.1021/acs.est.7b00997
- R. de Man, H. Friege (2016):** Circular Economy: EU Policy on Shaky Ground, *Editorial, Waste Management & Research* 34 (2), 93–95, DOI: 10.1177/0734242X15626015
- H.J. Dornbusch, L. Hannes, M. Santjer, C. Böhm, S. Wüst, B. Zwisele, M. Kern, H.J. Siepenkothen, M. Kanthak (2020):** Vergleichende Analyse von Siedlungsrestabfällen aus repräsentativen Regionen in Deutschland zur Bestim-

⁵ Eine gute Zusammenstellung bietet aus von der EU geförderte R2π-Projekt (<http://www.r2piproject.eu/>)

- mung des Anteils an Problemstoffen und verwertbaren Materialien; Hrsg.: Umweltbundesamt, Texte 113/2020, Dessau
- DRK (2022):** https://www.drk-berlin.de/fileadmin/Eigene_Bilder_und_Videos/Kilo-Shop_Kleidercontainer/Altkleider_Infoblatt.pdf, aufgesucht am 19.08.2022
- T. Duhoux, E. Maes, M. Hirschnitz-Garbers, K. Peeters, L. Asscherickx, M. Christis, B. Stubbe, P. Colignon, M. Hinzmann, A. Sachdeva (2021):** Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. Final report (Hrsg.: European Commission), Brüssel. ISBN 978-92-76-31368-7, doi: 10.2873/828412
- EMAF – Ellen MacArthur Foundation (2017):** A new textiles economy: Re-designing fashion's future; <https://emf.thirdlight.com/link/2axvc7eob8zx-za4ule/@/preview/1?o>, aufgesucht am 18.08.2022.
- EP (2013):** DECISION No 1386/2013/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet, OJ L 354/171-200
- EU (2012):** DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE) OJ L 197/38-71
- EU (2014):** Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: Towards a Circular Economy: A Zero Waste Programme for Europe, COM(2014) 398 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52014DC0398&from=EN>, aufgesucht am 12.08.2022
- EU (2018):** RICHTLINIE (EU) 2018/851 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTES UND DES RATES vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, Amtsblatt L 150/109-140 v. 14.06.2018
- EU (2020a):** COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS: A new Circular Economy Action Plan. For a cleaner and more competitive Europe, COM (2020) 98 final
- EU (2020b):** REGULATION (EU) 2020/852 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088, OJ L 198/13-43
- Fairwertung, VKU (2022):** <https://fairwertung.de/fairwertung-und-ekubegruesen-eu-textilstrategie/>, aufgesucht am 19.08.2022.
- Franke M, Reh K, Hense P (2014):** Ökoeffizienz in der Kunststoffverwertung, in Recycling und Rohstoffe Bd. 7 (Hrsg.: K.J. Thomé-Kozmiensky und D. Goldmann), 351-370; ISBN: 978-3-944310-09-1
- Friege (2012a):** Ressourcenschonung am Beispiel von Elektro- und Elektronikaltgeräten. II. Ansätze für einen effizienten Umgang mit nicht erneuerbaren Ressourcen, Müll und Abfall 44 (6), 307-317.
- Friege (2012b):** Resource recovery from used electric and electronic equipment: Alternative options for resource conservation, Waste Management & Research 30 (9), 53-516.
- H. Friege, B. Kummer, K. G. Steinhäuser, J. Wuttke, B. Zeschmar-Lahl (2019):** How should we deal with the interfaces between chemicals, product and waste legislation? Environmental Sciences Europe 31: 51 (2019); <https://doi.org/10.1186/s12302-019-0236-7>
- Friege H, Kümmerer K (2022, in press):** Practising Circular Economy: Stumbling Blocks for Circulation and Recycling. In H. Lehmann, Ch. Hinske (Ed.), The Impossibilities of the Circular Economy (Factor X, Vol. 5). Routledge. ISBN 9781032154435
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N., & Hultink, E. J. (2017):** The circular economy – A new sustainability paradigm? Journal of Cleaner Production, 143(757-768), 2017.
- M. Geissdoerfer, S. N. Morioka, M. Monteiro de Carvalho, S. Evans (2018):** Business models and supply chains for the Circular Economy, Journal of Cleaner Production 190, 712-721; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.04.159>
- M. Gopalakrishnan, Subrata Das, D. Saravanan (2021):** Hazardous, restricted, and manufacturing restricted substances in textiles and clothing supply chain, The Textile Institute Book Series 2021, 113-133
- J. Horbach, C. Rammer (2020):** Circular economy innovations, growth and employment at the firm level. Empirical evidence from Germany, Journal of Industrial Ecology 24:615-625
- C. Koop, J. Grosse Erdmann, J. Koller; F. Döpfer (2021a):** Circular Business Models for Remanufacturing in the Electric Bicycle Industry, Frontiers in Sustainability, 2021, 2. DOI: <https://doi.org/10.3389/frsus.2021.785036>
- C. Koop; J. Koller, J. Große, V. Klein (2021b):** Kreislaufwirtschaft in der Elektro-fahrradbranche: Untersuchung zur Refabrikation als Lösungsansatz für eine Kreislaufführung von Elektrofahrrädern, Müll und Abfall, 2021; p. 437-443. DOI: <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2021.08.05>
- P. Lacy, J. Keeble, R. McNamara et al. (2014):** Circular Advantage (ed.: Accenture), Dublin, https://www.accenture.com/t20150523t053139_w_/us-en/_acnmedia/accenture/conversion-assets/dotcom/documents/global/pdf/strategy_6/accenture-circular-advantage-innovative-business-models-technologies-value-growth.pdf, zuletzt aufgesucht 18.08.2022
- F. Mathieux, F. Ardenne, S. Bobba (2020):** Ten years of scientific support for integrating circular economy requirements in the EU ecodesign directive: Overview and lessons learnt, Procedia CIRP 90, 137-142
- R. Müller et al. (2021):** Zirkuläre Bettwäsche und Berufskleidung – Anforderungen und Nachhaltigkeitseffekte. <https://www.ditex-kreislaufwirtschaft.de/publikationen/>, aufgesucht am 15.12.2021
- NRDC (2021):** Engaging the Textile Industry as a Key Sector in SAICM: A Review of PFAS as a Chemical Class in the Textile Sector. <https://saicmknowledge.org/sites/default/files/publications/5.%20PFAS%20as%20a%20chemical%20class%20in%20textiles.pdf>, aufgesucht am 13.08.2022
- J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, A. Hanemaaijer (2017):** Circular Economy: Measuring Innovation in the Product Chain, Policy Report (Hrsg. PBL) The Hague
- J. Potting, A. Hanemaaijer et al. (2018):** Circular economy: what we want to know and can measure. System and baseline assessment for monitoring the progress of the circular economy in the Netherlands. (Hrsg.: PBL) The Hague <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2018-circular-economy-what-we-want-to-know-and-can-measure-3217.pdf>, aufgesucht am 19.02.2022
- S. Pimenta, S.T. Pinho (2014):** Recycling of Carbon Fibers, in: Handbook of Recycling (eds.: E. Worrell, M.A. Reuter), Chapter 19, 260-283. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-396459-5.00019-2>
- Potocnik (2013):** https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/SPEECH_13_211
- M. Regenfelder (2019):** Closed Loop Business Models, ein Geschäftsmodell-konzept für die ressourceneffiziente Produktherstellung, Siegburg; ISBN 978-3-8441-0584-1
- Reuter MA, van Schaik A, Ballester M (2018):** Limits of the Circular Economy: Fairphone Modular Design Pushing the Limits, World of Metallurgy – ERZMETALL 71 (2): 68-79
- Rudolf, S.; Blömeke, S.; Niemeyer, J.F.; Lawrenz, S.; Sharma, P.; Hemminghaus, S.; Mennenga, M.; Schmidt, K.; Rausch, A.; Spengler, T.S.; et al. (2022):** Extending the Life Cycle of EEE – Findings from a Repair Study in Germany: Repair Challenges and Recommendations for Action. Sustainability 2022, 14, 2993.
- Runder Tisch Reparatur (2022):** Der französische Reparaturindex, <https://runder-tisch-reparatur.de/reparaturindex/>, aufgesucht am 16.09.2022
- J. J. Steins, R. Volk, F. Schultmann (2021):** Modelling and predicting the generation of post-demolition autoclaved aerated concrete (AAC) volumes in Germany until 2050, Resources, Conservation and Recycling 2021, 171, 105504 – 105609
- Tubito C., Earley R., Ellams D., Goldsworthy K., Hornbuckle R., Niinimäki K., Östmark E., Sarbach V., Tantt M. (2019):** Applied DDMI: A White Paper on how Design-Driven Material Innovation Methodology was applied in the Trash-2-Cash Project. https://ualresearchonline.arts.ac.uk/id/eprint/13991/1/D_1_7-White%20Paper-MCI-web.pdf, aufgesucht am 15.08.2022
- Vogel J (2022):** Die EU Taxonomie und die Abfallwirtschaft, Müll und Abfall (6), 296-301
- UBA – Umweltbundesamt (2022):** <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehelter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete>, aufgesucht am 19.08.2022
- UNEP/ISWA (2015):** Global waste management outlook. Hrsg.: UNEP, Genf; ISBN: 978-92-807-3479-9.
- UNU – United Nations University (2020):** <https://unu.edu/media-relations/releases/global-e-waste-surgin-up-21-in-5-years.html>
- van den Berge, R. B. R., Magnier, L. B. M., & Mugge, R. (2022):** Enhancing consumers' willingness to repair electronic products: How design can nudge sustainable behaviour. In D. Lockton, S. Lenzi, P. Hekkert, A. Oak, J. Södabä, & P. Lloyd (Eds.), DRS Conference Proceedings (DRS Biennial Conference Series). <https://doi.org/10.21606/drs2022.335>
- Verbücheln, Maic; Wagner-Endres, Sandra (2019):** Hemmnisse und Potenziale zur Ressourceneffizienzsteigerung durch Optimierung regionaler und lokaler Stoffkreisläufe und Stoffströme – RegioRes. Abschlussbericht, Hrsg.: Umweltbundesamt, UBA-Texte 63/2019, Dessau.
- WBCSD – World Business Council for Sustainable Development (2010):** Vision 2050. The New Agenda for Business. Conches-Geneva
- Wolf, J., Brüning, R., Nellesen, L., Schiemann, J., 2017:** Anforderungen an die Behandlung spezifischer Elektroaltgeräte unter Ressourcen- und Schadstoffaspekten (in German, with English summary). UBA-Texte 70/2017, Dessau. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-09-05_texte_70-2017_behandlung-elektroaltgeraete_0.pdf. (Accessed 23 March 2018).
- T Zink, R Geyer (2017):** Circular Economy Rebound, J. Ind. Ecology 21 (3): 593-602

Anschrift der Autoren

Prof. Dr. Henning Friege

N³ Nachhaltigkeitsberatung Dr. Friege & Partner
Scholtenbusch 11, 46562 Voerde

Lesen Sie jetzt gratis zur Probe!

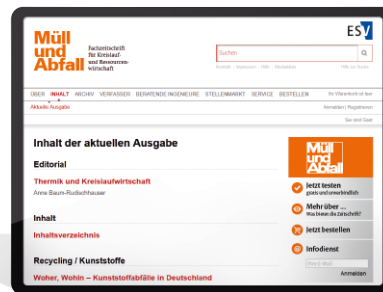
www.MUELLundABFALL.de/info/

Bestellschein

MÜLL und ABFALL

Fachzeitschrift für Kreislauf- und Ressourcenwirtschaft

Kostenloses Probe-Abonnement



- 3 Hefte kostenlos frei Haus, inkl. 4 Wochen Testzugang zum eJournal**

Bitte E-Mail-Adresse angeben.

Wenn ich **MÜLL und ABFALL** danach weiterlesen möchte, muss ich nichts weiter tun und erhalte im Kombi-Jahresabonnement 12 Ausgaben für € 224,40, inkl. MwSt. für die Printausgabe (zzgl. Versandkosten) und das eJournal, inkl. Infodienst zu neuen Beiträgen mit jeder Ausgabe.

- Ich beziehe **MÜLL und ABFALL** nach Ablauf des Testzeitraumes nur als Printausgabe im Jahresabonnement für € 187,80, inkl. MwSt., zzgl. Versandkosten. ISSN 0027-2957

Falls ich **MÜLL und ABFALL** nicht weiter beziehen möchte, teile ich Ihnen dies spätestens zwei Wochen nach Ablauf des Testzeitraumes schriftlich mit.

Für Studenten zum Sonderpreis von € 133,80 inkl. MwSt., bitte Immatrikulationsbescheinigung mitschicken. Sonderpreis für Mitglieder des ANS auf Anfrage.

- 4 Wochen Testzugang zum eJournal**

Bitte E-Mail-Adresse angeben.

Wenn ich danach weiterlesen möchte, muss ich nichts weiter tun und erhalte **MÜLL und ABFALL** im Jahresabonnement für netto € 14,10/Monat als Jahresrechnung von € 181,08, inkl. MwSt., inkl. Infodienst zu neuen Beiträgen mit jeder Ausgabe. ISSN 1863-9763

Falls ich **MÜLL und ABFALL** nicht weiter beziehen möchte, teile ich Ihnen dies spätestens zwei Wochen nach Ablauf des Testzugangs schriftlich mit.

Firma / Institution

Name / Kd.-Nr.

Funktion

Straße / Postfach

PLZ / Ort

E-Mail

Der Erich Schmidt Verlag darf mich zu Werbezwecken per E-Mail über Angebote informieren: ja nein

Datum / Unterschrift

Bestellungen bitte an den Buchhandel oder an den Erich Schmidt Verlag

Fax (030) 25 00 85-275 oder eingescannt per E-Mail an **Vertrieb@ESVmedien.de**

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG
Genthiner Straße 30 G
10785 Berlin

Widerrufsrecht: Ihre Bestellung können Sie innerhalb von zwei Wochen nach Erhalt der Ware bei Ihrer Buchhandlung oder beim Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG, Genthiner Str. 30 G, 10785 Berlin, Fax (030) 25 00 85-275, E-Mail: Vertrieb@ESVmedien.de widerrufen, Muster-Widerrufsformular auf AGB.ESV.info (rechtzeitige Absendung genügt).

Wir erheben und verarbeiten Ihre Daten zur Durchführung des Vertrages, zur Pflege der laufenden Kundenbeziehung und um Sie über Fachinformationen aus dem Verlagsprogramm zu unterrichten. Sie können der Verwendung Ihrer Daten für Werbezwecke jederzeit widersprechen. Bitte senden Sie uns dazu Ihren schriftlichen Widerspruch per Post, Fax oder mit einer E-Mail an Service@ESVmedien.de. Weitere Informationen zum Datenschutz finden Sie unter: <https://datenschutzbestimmungen.esv.info>

Erich Schmidt Verlag GmbH & Co. KG · Rechtsform: Kommanditgesellschaft, Sitz Berlin · Amtsgericht Charlottenburg HR A 21375 · Persönlich haftende Gesellschafterin: ESV Verlagsführung GmbH, Sitz Berlin · Amtsgericht Charlottenburg HR B 27197 · Geschäftsführer: Dr. Joachim Schmidt