



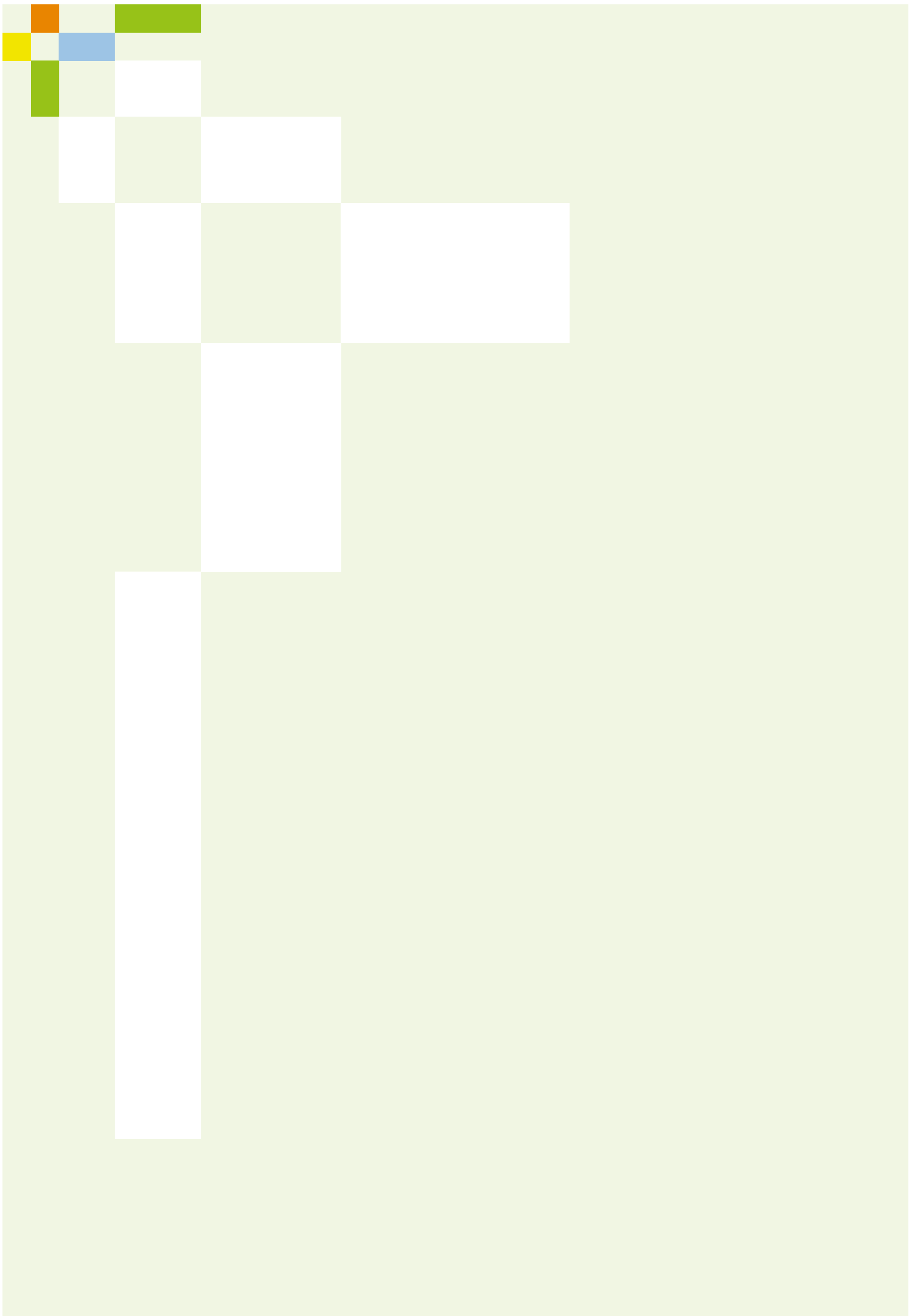
acatech STUDIE

Digitale Enabler der Kreislaufwirtschaft

Christoph M. Schmidt, Thomas Weber (Hrsg.)

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech STUDIE

Digitale Enabler der Kreislaufwirtschaft

Christoph M. Schmidt, Thomas Weber (Hrsg.)



Die Reihe acatech STUDIE

In dieser Reihe erscheinen Ergebnisberichte von Projekten der Akademie. STUDIEN vertiefen die Politik- und Gesellschaftsberatung zu technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Sie liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgebenden sowie Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter www.acatech.de/publikationen zur Verfügung.

Inhalt

Vorwort	5
Zusammenfassung	7
Projekt	9
1 Ausgangslage und Vorgehensweise	11
1.1 Aufkeimende Kreislaufwirtschaft und verbleibende Erkenntnisdefizite	11
1.2 Dreistufiges Konzept zur Ableitung von Gestaltungsoptionen	14
2 Konzeptionelle Grundlagen: R-Strategien, Geschäftsmodelle, Technologien	16
2.1 Grundlegende Strategien der Kreislaufwirtschaft	16
2.2 Geschäftsmodelle in der Kreislaufwirtschaft	19
2.3 Digitale Technologien für die Kreislaufwirtschaft	21
3 Gebäude- und Bausektor	23
3.1 Hoher Materialbedarf des Gebäude- und Bausektors	23
3.2 Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft im Gebäude- und Bausektor	25
3.3 Anwendungsbeispiel: Einfamilienhaus im Gebäudebestand	26
3.4 Hürden und sektorspezifische Gestaltungsoptionen	33
4 Elektroniksektor	37
4.1 Kritische Abfallmenge im Elektroniksektor	37
4.2 Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft im Elektroniksektor	38
4.3 Anwendungsbeispiel: Waschmaschine	39
4.4 Hürden und sektorspezifische Gestaltungsoptionen	45
5 Textilsektor	48
5.1 Herausforderung „Fast Fashion“ im Textilsektor	48
5.2 Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft im Textilsektor	49
5.3 Anwendungsbeispiel: Baumwoll-T-Shirt	50
5.4 Hürden und sektorspezifische Gestaltungsoptionen	55



6 Sektorübergreifende Gestaltungsoptionen	59
6.1 Umweltkosten sichtbar machen	60
6.2 Normierung, Zulassung und Zertifizierung	60
6.3 Anreize auf bestehenden und Design von neuen Märkten	62
6.4 Transferorientierte, interdisziplinäre Förderstrategie	63
6.5 Gesellschaft einbinden	64
Fazit und Ausblick	65
Anhang	67
Abkürzungsverzeichnis	67
Glossar	68
Literatur	70

Vorwort

Es ist eine der großen gesellschaftlichen und politischen Gestaltungsaufgaben dieses Jahrhunderts, allen Menschen weltweit, auch den Menschen im sogenannten globalen Süden, materielle Prosperität sowie langfristig ein menschenwürdiges Leben ohne Not oder Elend und mit einem fairen Zugang zu allen wichtigen Ressourcen zu ermöglichen. Zugleich müssen die planetaren Grenzen eingehalten werden. Die übermäßige Gewinnung von Rohstoffen und deren Verbrauch im Industriezeitalter haben an vielen Stellen der Erde tiefe Narben hinterlassen sowie lokale Ökosysteme zerstört, die weltweit produzierte Abfallmenge ist in einem schier überwältigenden Maße angewachsen. Und ein Ende dieses Anstiegs ist nicht in Sicht. Es bestehen kaum Zweifel daran, dass die Menschheit im Begriff ist, die Grenzen der ökologischen Tragfähigkeit des Planeten in vielfacher Hinsicht zu überschreiten.

Daher muss ein Weg gefunden werden, um das anspruchsvolle Ziel einer planetar verträglichen materiellen Prosperität zu erreichen. Diesen in Fortschritts- und Wachstumsverzicht und einer reinen Umverteilung des Bestehenden zu suchen, kann bestenfalls in realitätsfernen Utopien, aber nicht in der Lebenswirklichkeit funktionieren. Stattdessen muss es uns künftig gelingen, vorhandene Ressourcen effizienter zu nutzen und das weltweite Wirtschaftswachstum auf diese Weise wirksam vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln.

Für diese Entkopplung braucht es einen Wandel des globalen Wirtschaftssystems und der Rohstoffnutzung, vergleichbar mit den bereits laufenden Anstrengungen für eine Energiewende, weg von der Nutzung fossiler Energieträger hin zu erneuerbaren Energiequellen. Eine systemisch, also umfassend gestaltete Kreislaufwirtschaft liefert ein überzeugendes Zielbild, um diesen Paradigmenwechsel zu gestalten: Im Gegensatz zur bisher vorherrschenden „linearen“ Wirtschaftsweise werden bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich und im Hinblick auf Qualität und Energieaufwand sinnvoll im Wirtschaftskreislauf gehalten. Rohstoffeinsatz und Abfall werden dadurch minimiert, während gleichzeitig globales Wohlstandswachstum nach wie vor möglich bleibt. Aus nationaler Sicht führt eine Transformation zur Kreislaufwirtschaft zudem zu mehr Resilienz und Souveränität in der Rohstoffversorgung, da die Abhängigkeit von Rohstoffimporten langfristig reduziert wird.

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft bietet für eine nachhaltige Wirtschaftsweise zwar die notwendige theoretische Grundlage, es kann aber nur erfolgreich in die Praxis umgesetzt werden, wenn Technik und Betriebe den vielfältigen Anforderungen der Transformation gewachsen sind und die rechtlichen, wie ökonomischen Rahmenbedingungen den Aufbau einer zirkulären Wirtschaftsweise tragen. So müssen die Kosten der Umweltnutzung künftig stärker in private Konsumententscheidungen und betriebswirtschaftliche Planungen miteinbezogen werden. Dafür müssen die entsprechenden Rahmenbedingungen, vor allem marktbasierter Mechanismen, allerdings erst einmal geschaffen werden. Nur dann kann die Kreislaufwirtschaft im Vergleich zur bislang dominanten linearen Wirtschaftsweise ökonomisch überhaupt konkurrenzfähig werden.

Ein unverzichtbares Werkzeug, um Kreislaufwirtschaftsansätze umzusetzen, sind digitale Technologien: Der Aufbau einer umfassenden Kreislaufwirtschaft erfordert eine gewaltige Menge an präzisen und zeitnah verfügbaren Informationen, die zwischen den zahlreichen Akteuren zirkulärer Wertschöpfungsketten geteilt werden müssen. Mithilfe digitaler Technologien lassen sich die Akteure vernetzen und neue, zirkuläre Geschäftsmodelle entwickeln und skalieren. Auch schaffen die Technologien die notwendige Transparenz innerhalb der Wertschöpfungsnetzwerke und senken die Kosten kreislaufwirtschaftlicher Produktionsweisen.

Trotz ähnlicher Herausforderungen in den verschiedenen Industriebranchen unterscheiden sich doch die Anforderungen an sogenannte digitale Enabler. Auch die zirkulären Ansätze variieren von Produkt zu Produkt. Daher müssen konkrete Anwendungsfälle und die jeweils vorherrschenden Rahmenbedingungen stets genau betrachtet werden. Zudem ist der Einsatz digitaler Technologien keine Garantie für eine nachhaltigere Wirtschaft; vielmehr ist immer wieder individuell abzuwägen und zu schauen, in welchem Verhältnis der Nutzen einer digitaltechnologischen Anwendung zu deren Energieverbrauch und Umweltauswirkungen der digitalen Technologien selbst steht.

An diesem Punkt setzt die vorliegende STUDIE an: Anhand von Beispielprodukten aus den drei Wirtschaftssektoren Bau, Elektronik und Textilien werden die digitalen Möglichkeiten für entsprechende Kreislaufwirtschaftsansätze analysiert und mit dem jeweiligen Status quo verglichen. Die Analyse bildet wiederum die Grundlage, um sektorspezifische und übergeordnete Gestaltungsoptionen zu identifizieren, die für den Auf- und Ausbau



einer Kreislaufwirtschaft geeignet sind, und um die Rolle digitaler Technologien näher zu bestimmen. Die vorliegende STUDIE leistet somit einen Beitrag zur Förderung einer ganzheitlichen und chancenorientierten Sicht auf das Transformationsprojekt der Kreislaufwirtschaft. Die positiven Effekte im Sinne der Nachhaltigkeit werden umso größer sein, je systematischer das Konzept der Kreislaufwirtschaft umgesetzt wird; die Umsetzung

wiederum basiert in jedem einzelnen Anwendungsfall auf einer ganz spezifischen Kombination von zirkulärökonomischem Wissen zu Kreislaufwirtschaft, digitalen Technologien sowie sektor- und produktspezifischen Anforderungen und Prozessen.

Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph M. Schmidt
acatech Vizepräsident

Zusammenfassung

Die Kreislaufwirtschaft stellt einen der zentralen Hebel dar, um die klima- und umweltpolitischen Ziele auf nationaler und europäischer Ebene zu erreichen. Zugleich ist sie unverzichtbar für die strategische Souveränität der europäischen Rohstoffversorgung. Der Umbau des Wirtschaftssystems hin zu einer Kreislaufwirtschaft (englisch: Circular Economy) geht dabei Hand in Hand mit der digitalen Transformation, denn digitale Technologien sind zentrale Enabler einer erfolgreichen Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien.

Die vorliegende acatech STUDIE analysiert angesichts dieser sogenannten Zwillings-Transformation (Twin Transformation) die Rolle digitaler Technologien in der Kreislaufwirtschaft. Dazu wurden bedarfsbezogene Produktbeispiele aus Wirtschaftszweigen ausgewählt, die entweder einen besonders belastenden ökologischen Fußabdruck (Gebäudesektor) oder ein enorm hohes Abfallaufkommen (Elektronik- und Textilsektor) aufweisen und deren nachhaltige und zirkuläre Transformation mit besonders komplexen Herausforderungen einhergeht. Konkret werden drei Produkte aus drei Sektoren untersucht – das Einfamilienhaus, die Waschmaschine und das T-Shirt –, sodann Ansätze einer idealtypischen zirkulären Wertschöpfung entwickelt und schließlich die digitalen Technologien identifiziert, die für die erfolgreiche Etablierung einer Kreislaufwirtschaft entscheidend sind. Die Beispiele unterscheiden sich stark in der Lebensdauer der Produkte und in den jeweils verwendeten Materialien, sodass die Analyse ein breites Spektrum an zirkulären Strategien und digitalen Enablern abdeckt.

Die Analyse der drei Bedarfsbeispiele zeigt, dass in allen drei betrachteten Wirtschaftssektoren große Potenziale bestehen, um Wertschöpfungsketten künftig zirkulär zu gestalten. Um diese Potenziale auszuschöpfen, sind allerdings noch zahlreiche Hürden zu überwinden – sowohl sektorübergreifend als auch sektor- und produktspezifisch. Im Gebäudesektor sollte zur Förderung der Kreislaufwirtschaft beispielsweise der Einsatz von recycelten und nachhaltigen Materialien regulatorisch vereinfacht werden. Im Elektroniksektor bräuchte es hingegen insbesondere Anreize, um das Gerätedesign auf Langlebigkeit hin auszurichten. Vielsprechende Ansätze im Textilsektor wiederum fokussieren sich auf die Nutzungsintensität und -dauer bei Bekleidungsprodukten sowie bessere Strukturen für die Sammlung, Sortierung und das Recycling textiler Materialien.

Die vorliegende STUDIE identifiziert vier grundlegende Funktionen digitaler Technologien bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsansätzen: 1) die Datengenerierung und -sammlung, um eine umfassende und stabile Informationsbasis zu schaffen; 2) die Vernetzung verschiedener Akteure, um komplexe Wertschöpfungsnetzwerke aufzubauen; 3) die Modellierung, zum Beispiel für das Design zirkulärer Produkte; sowie 4) die Automatisierung von digitalen oder physischen Prozessen zur Steigerung deren Effizienz.

Zudem zeigt die Analyse, dass digitale Technologien nicht nur bei der Etablierung zirkulärer Wertschöpfungsketten eine entscheidende Rolle spielen, sondern auch bei der Überwindung sektorspezifischer Hürden. Denn verglichen mit der linearen Wirtschaft benötigt die Kreislaufwirtschaft einen intensiveren Informationsaustausch zwischen allen Akteuren einer Wertschöpfungskette. Einen solchen Austausch ermöglicht für alle drei Bedarfsbeispiele der digitale Produktpass, der die Grundlage für eine durchgängige und transparente Datenteilung entlang der gesamten Wertschöpfungskette bildet. Ebenfalls bedeutsam sind zudem Onlineplattformen und Datenräume, die die Akteure im Rahmen servicebasierter Geschäftsmodelle oder beim Handel mit gebrauchten Produkten, Bauteilen und Materialien vernetzen können.

Der für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft notwendige digitale Werkzeugkasten ist größtenteils bereits vorhanden. Um digitale Technologien und Anwendungen nutzbringend einzusetzen, müssen jedoch einerseits die zugrunde liegenden digitalen Infrastrukturen zur Verfügung stehen und andererseits die verschiedenen Anwendungen (zum Beispiel Produktpässe und Datenräume) aufeinander abgestimmt sein. Weitere entscheidende Voraussetzungen sind eine gute Datenverfügbarkeit und -qualität sowie kompatible Schnittstellen und Datenformate für den Datenaustausch. Wichtiger als die (Weiter-)Entwicklung einzelner Technologien ist es daher, Datenökosysteme für zirkuläre Wertschöpfungsnetzwerke aufzubauen. Darin gilt es, das enorme Synergiepotenzial zu heben, die diese Verschränkung der digitalen Enabler, etwa digitale Zwillinge, Produktpässe, Datenräume und KI, und ihrer Communities birgt.

Digitale Technologien werden ihre vollen Potenziale künftig aber nur dann entfalten können, wenn die Rahmenbedingungen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft insgesamt verbessert werden. Für eine erfolgreiche Transformation zur Circular Economy müssen somit Umweltkosten sichtbar gemacht und angemessen bepreist, recycelte Produkte, Bauteile und Materialien zugelassen und kreislaufgerechte Normen und Zertifikate eingeführt



werden. Außerdem braucht es funktionsfähige Märkte für zirkuläre Produkte und entsprechende Dienstleistungen, die zu Beginn und zeitlich begrenzt gegebenenfalls durch Anreizsysteme zu stützen sind, sodass sich deren Wettbewerbsfähigkeit alsbald herausbilden kann. Um den Einstieg in die Kreislaufwirtschaft und deren Skalierung zu erleichtern, sollten schließlich

Förderinitiativen für transferorientierte und wertschöpfungskettenübergreifende Projekte etabliert werden. Letztendlich kann der Übergang zu einer umfassenden Kreislaufwirtschaft aber nur gelingen, wenn der Wandel von der Gesellschaft mitgetragen und mitgestaltet wird.

Projekt

Projektleitung

- Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph M. Schmidt, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung/acatech Vizepräsident
- Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, acatech Präsident

Expertinnen und Experten

- Martin Benfer, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Prof. Dr.-Ing. Mesut Cetin, Technische Hochschule Augsburg
- Prof. Dr.-Ing. Hanaa Dahy, Universität Stuttgart
- Prof. Dr. Christina Dornack, Technische Universität Dresden
- Prof. Moritz Dörstelmann, Karlsruher Institut für Technologie
- Christian Dworak, BSH Hausgeräte GmbH
- Christian Eckert, ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie
- Max Eschenbach, Technische Universität Darmstadt
- Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner, Technische Universität München/acatech
- Rafael Gramm, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
- Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries, RWTH Aachen University/acatech
- Uwe Gottschalk, Vaude Sport GmbH & Co. KG
- Susanne Mira Heinz, Circular Thinking Innovationsnetzwerk
- Dr. Susanne Kadner, UnternehmerTUM GmbH
- Prof. Dr. Sami Kara, University of New South Wales Sydney/acatech
- Prof. Dr.-Ing. Kerstin Kuchta, Technische Universität Hamburg
- Prof. Dr.-Ing. Werner Lang, Technische Universität München
- Prof. Frank Lattke, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
- Prof. Dr.-Ing. Anica Meins-Becker, Bergische Universität Wuppertal
- Anja Merker, Gesamtverband textil+mode
- Kai Nebel, Texoversum Hochschule Reutlingen
- Prof. Dr.-Ing. Stephan Ramesohl, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie
- Bernhard Roth, Miele & Cie. KG
- Dr. Frieder Rubik, Institut für ökologische Wirtschaftsforschung (IÖW)
- André Rückert, ECOLOGICON GmbH
- Dr.-Ing. Georg Schiller, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR)
- Heinrich Schimmel, Bad & Heizung Schimmel GmbH/Gaia-X Domäne Planen Bauen Betreiben
- Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, Technische Universität Berlin/acatech
- Dr. Sibyl Steuer, BPIE – Buildings Performance Institute Europe
- Jonas Stracke, Gesamtverband textil+mode
- Prof. Dr.-Ing. Oliver Tessmann, Technische Universität Darmstadt
- Prof. Dr. Steffen Warmbold, Verband Beratender Ingenieure (VBI)
- Christoph Wendker, Miele & Cie. KG
- Prof. Dr.-Ing. Katja Windt, SMS Group GmbH

Projektkoordination

- Dr. Mareike Berger, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Anna Frey, acatech Geschäftsstelle

Autorenteam

- Dr. Mareike Berger, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Berit Erlach, acatech Geschäftsstelle
- Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph M. Schmidt, RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung/acatech Vizepräsident
- Dr. Johannes Simböck, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Thomas Steiner, acatech Geschäftsstelle



Mit Unterstützung von

- Jan Fischer, acatech Geschäftsstelle
- Maximilian Heiser, acatech Geschäftsstelle
- Felix Kappert, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Lisa Risch, acatech Geschäftsstelle
- Theresa Scheule, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Joachim Sedlmeir, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Karl Wienand, acatech Geschäftsstelle
- Clemens Wolf, acatech Geschäftsstelle

Projektlaufzeit

05/2024-09/2024

Förderung

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

1 Ausgangslage und Vorgehensweise

1.1 Aufkeimende Kreislaufwirtschaft und verbleibende Erkenntnisdefizite

Die globale Gewinnung und Nutzung natürlicher Ressourcen hat sich in den vergangenen 50 Jahren verdreifacht, und dieser Wachstumstrend, der sich auf organische und anorganische Rohstoffe bezieht, hält weiter an.¹ Die Entwicklung hat allerdings nicht nur das weltweite Wirtschaftswachstum gestützt, sondern auch stetig zunehmende Abfallströme mit sich gebracht: In den USA beispielsweise stieg die Menge kommunaler Feststoffabfälle von 1970 bis 2018 um den Faktor 2,4,² in den europäischen Ländern der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-Operation and Development – OECD) hat sich die Abfallmenge seit 1985 sogar um den Faktor 2,85 erhöht – trotz zunehmender Bemühungen um ein nachhaltiges Ressourcenmanagement.³ Die Zahlen unterstreichen die Dringlichkeit eines ökonomischen Paradigmenwechsels: weg von einer linearen Wirtschaft, in der Produkte hergestellt, genutzt und schließlich entsorgt werden, hin zu einer Kreislaufwirtschaft (Circular Economy – CE), die Produkte und Produktbestandteile nach der Erstnutzung weiter im Umlauf hält.⁴

Die Kreislaufwirtschaft ist also ein System der Produktion und des Verbrauchs, bei dem bestehende Materialien und Produkte so lange wie möglich geteilt, geleast, wiederverwendet,

repariert, aufgearbeitet und recycelt werden, um Ressourcen nachhaltig zu nutzen und Abfälle massiv zu vermindern (siehe auch Kapitel 2).⁵ Allerdings besteht beim Aufbau einer echten Kreislaufwirtschaft hierzulande nach wie vor großer Handlungsbedarf, werden doch in Deutschland bisher für nur rund 13 Prozent und global nur etwa 7 Prozent der Wirtschaftsaktivitäten Sekundärrohstoffe genutzt.^{6, 7}

Wie notwendig die Transformation hin zur Kreislaufwirtschaft ist, verdeutlichen die Umweltauswirkungen der aktuellen Wirtschaftsweise und die Importabhängigkeit der Europäischen Union (EU) bei diversen Rohstoffen: Laut dem Ressourcenrat der Vereinten Nationen führen die Extraktion und die Weiterverarbeitung von Rohstoffen⁸ aktuell zu etwa 55 Prozent der globalen Treibhausgasemissionen.⁹ Im Rahmen einer EU-Verordnung legte die Europäische Kommission (EU-Kommission) im Jahr 2024 Maßnahmen zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen fest.¹⁰ Mit Blick auf einen zukunftssicheren Zugang zu Rohstoffen veröffentlicht die EU-Kommission zudem seit dem Jahr 2011 eine regelmäßig aktualisierte Liste der kritischen Rohstoffe für die EU. Diese Liste enthält aktuell 30 Materialien und wird stetig erweitert; die dort aufgeführten Materialien sind für alle Industriebereiche sowie zur Umsetzung moderner technologischer Lösungen essenziell, und die EU ist bei ihrer Beschaffung stark von wenigen Ländern abhängig.¹¹ Eine Studie der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) bestätigt diesen Abhängigkeitsbefund für Bergwerks-, Raffinade- und Handelsprodukte von insgesamt 63 Metallen und Industriemineralen. Demnach bestehen bei 46 Prozent der untersuchten Produkte erhöhte Beschaffungsrisiken. Die DERA empfiehlt deutschen Unternehmen daher, bei potenziell kritischen Rohstoffen ihre Beschaffungsstrategien entlang der Lieferkette zu überprüfen und gegebenenfalls Ausweichstrategien zu entwickeln.¹²

1 | Vgl. Rechlin et al. 2023.

2 | Vgl. United States Environmental Protection Agency 2023.

3 | Vgl. Europäische Umweltagentur 2020.

4 | Die Begriffe „Kreislaufwirtschaft“ und „Circular Economy“ (CE) werden im Folgenden synonym verwendet.

5 | Vgl. Europäisches Parlament 2018.

6 | Vgl. Eurostat 2023.

7 | Vgl. Circle Economy Foundation 2024.

8 | Dies bezieht sich auf Anbau und Ernte von Biomasse, die Gewinnung von mineralischen und fossilen Rohstoffen sowie die Verarbeitung von Materialien, Brennstoffen und Lebensmitteln. Die Analyse basiert auf der Kombination von Zeitreihen zur genutzten Menge der jeweiligen Ressource mit Input-Output-Tabellen der Exiobase3-Datenbank zu 163 Industriesektoren.

9 | Vgl. Umweltprogramm der Vereinten Nationen 2024a.

10 | Vgl. Verordnung (EU) 2024/1252.

11 | Vgl. Europäische Kommission 2020a.

12 | Vgl. Deutsche Rohstoffagentur 2023.

Angesichts solcher Befunde ist die Kreislaufwirtschaft ein entscheidendes Werkzeug, um die ambitionierten Klima- und Umweltpolitischen Ziele der EU zu erreichen und um die strategische Souveränität Europas in der Rohstoffversorgung zu stärken. Diese Einschätzung findet sich bereits in verschiedenen politischen Leitlinien: So hat die EU-Kommission im März 2020 den *Neuen Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft (New Circular Economy Action Plan)* als wichtigen Bestandteil des *European Green Deal* veröffentlicht.¹³ Ein wichtiger Baustein für die konkrete Umsetzung des Aktionsplans ist die 2024 in Kraft getretene *Ökodesign-Verordnung für Nachhaltige Produkte (ESPR)*.¹⁴ Auf nationaler Ebene wurde zudem bereits 2021 im Rahmen der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten *Circular Economy Initiative Deutschland (CEID)* die erste Roadmap zur gesamtgesellschaftlichen Etablierung einer Kreislaufwirtschaft hierzulande veröffentlicht.¹⁵ Des Weiteren hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) im April 2024 den Entwurf für eine Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) vorgelegt.¹⁶ Als Rahmenstrategie konzipiert definiert der NKWS-Entwurf Kreislaufwirtschaft als Querschnittsthema und berücksichtigt Überschneidungen mit zahlreichen weiteren Strategien und Gesetzgebungsiniciativen auf deutscher und europäischer Ebene. Die *Deutsche Normungsroadmap Circular Economy*¹⁷ von 2023 weist in diesem Zusammenhang wiederum auf den hohen Bedarf an Normung und Standardisierung hin und identifiziert unter anderem konkrete Bedarfe in den Sektoren Elektronik, Bauwerke und Kommunen und Textil, die in der vorliegenden STUDIE noch näher zu betrachten sind.

Der Umbau des globalen Wirtschaftssystems hin zur Kreislaufwirtschaft vollzieht sich dabei im Rahmen der sogenannten *Twin Transformation* – also der „doppelten Transformation“; er geht also Hand in Hand mit der digitalen Transformation, denn digitale Technologien sind entscheidende Ermöglichungsfaktoren für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien – sogenannte *Enabler*.¹⁸ Beispiele für solche *Enabler* sind der digitale Produktpass als Grundlage einer durchgängigen und transparenten

Datenteilung entlang der Wertschöpfungskette oder auch Onlineplattformen und Datenräume zur Vernetzung von Akteuren bei servicebasierten Geschäftsmodellen.¹⁹ Die Weiter- und Neuentwicklung digitaler Technologien oder Anwendungen (zum Beispiel Künstliche Intelligenz oder Datenräume) weist gegenwärtig eine starke Dynamik auf und ermöglicht so auch immer größere Spielräume zur Umsetzung nachhaltiger Lösungen in Produktions- und Dienstleistungsbranchen.

Vor diesem Hintergrund hat eine Vielzahl von Studien Anwendungsmöglichkeiten und Auswirkungen digitaler Technologien im Kontext der Kreislaufwirtschaft untersucht. Im Fokus standen dabei einerseits eine Diskussion möglicher Anwendungen digitaler Technologien in der Kreislaufwirtschaft, andererseits die Analyse bestehender technologischer Anwendungsfälle (Use Cases) in einem bestimmten Sektor.^{20, 21, 22, 23}

Um die Potenziale, die digitale Technologien mit Blick auf die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft haben, realistisch einschätzen zu können, braucht es vor allem konkrete Anwendungsanalysen. Solche Analysen erlauben es nämlich festzustellen, welche Technologieelemente erfolgskritisch – also entscheidend für die Herstellung eines funktionierenden Produkt- oder Materialkreislaufs sind – und wo noch Defizite existieren. Je nach Wirtschaftssektor können Anwendungen digitaler Technologien unterschiedlich gestaltet sein, da die Produkte in den verschiedenen Sektoren sehr unterschiedliche Eigenschaften (zum Beispiel in der Materialzusammensetzung, der Lebensdauer oder beim Nutzungsprofil) aufweisen. Bislang mangelt es jedoch in den meisten Wirtschaftssektoren noch an konkreten Beispielen für eine digitalbasierte und vollumfängliche Umsetzung des Kreislaufkonzepts.

Die vorliegende acatech STUDIE widmet sich diesem Aspekt und ergänzt die bisherige Studienlage, indem die Rolle digitaler Technologien in der Kreislaufwirtschaft an Anwendungsbeispielen aus drei für die Transformation zentralen Wirtschaftssektoren analysiert wird: Für jeweils ein konkretes Produkt pro Sektor werden im Folgenden idealtypische zirkuläre

13 | Vgl. Europäische Kommission 2020b.

14 | Vgl. Verordnung (EU) 2024/1781.

15 | Vgl. Circular Economy Initiative Deutschland 2021 a.

16 | Vgl. BMUV 2024.

17 | Vgl. DIN et al. 2023.

18 | Vgl. Chauhan et al. 2022.

19 | Vgl. Barteková/Börkey 2022.

20 | Vgl. Chi et al. 2023.

21 | Vgl. Berndorfer et al. 2023.

22 | Vgl. Ramesohl et al. 2022.

23 | Vgl. Han et al. 2023.

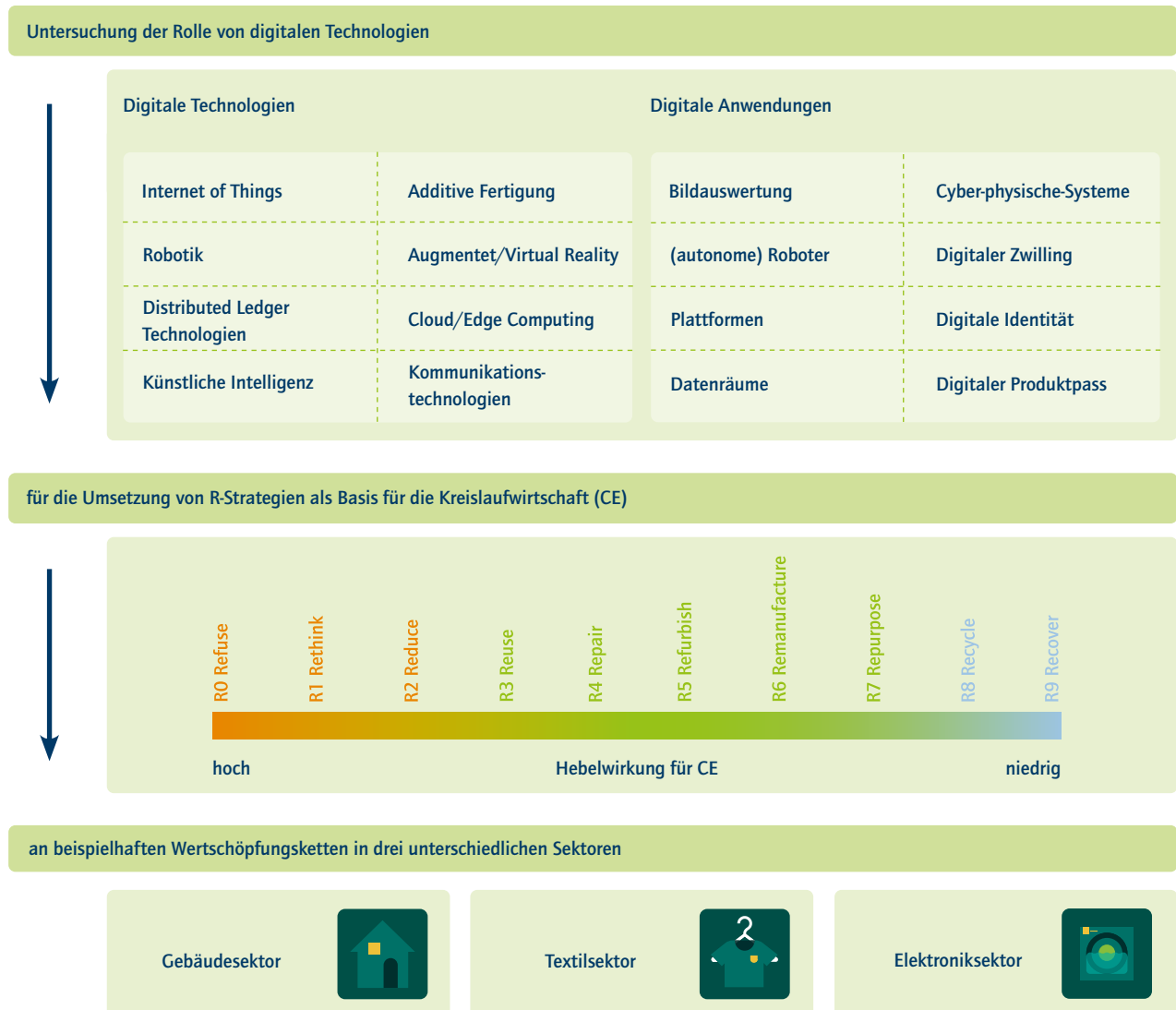


Abbildung 1: Untersuchungsrahmen der vorliegenden acatech STUDIE (Quelle: eigene Darstellung)

Wertschöpfungskreisläufe²⁴ entwickelt und die mögliche Rolle digitaler Technologien als Enabler²⁵ wird untersucht (siehe Abbildung 1).²⁶ Die drei Produkte – Einfamilienhaus, Waschmaschine und T-Shirt – unterscheiden sich unter anderem in der Lebensdauer und der Materialzusammensetzung, sodass ein breites Spektrum zirkulärer Strategien und digitaler Enabler

abgedeckt ist. Ein Abgleich der Anwendungsbeispiele mit dem technologischen und rechtlichen Status quo vor allem bezogen auf Deutschland und Europa ermöglicht schließlich die Skizzierung technologie- und wirtschaftspolitischer Gestaltungsoptionen zur Entwicklung einer stabilen und nachhaltigen Kreislaufwirtschaft.

24 | Die zirkulären Wertschöpfungskreisläufe basieren auf der Anwendung sogenannter R-Strategien, siehe Kapitel 2.1.

25 | Der Begriff „digitale Enabler“ – auch digitale Treiber genannt – bezeichnet in der vorliegenden STUDIE digitale Technologien, die die digitale Transformation und den Umbau des Wirtschaftssystems hin zur Kreislaufwirtschaft ermöglichen.

26 | Die in Abbildung 1 dargestellten R-Strategien werden in Kapitel 2.1 erläutert, der Unterschied zwischen „digitalen Technologien“ und „digitalen Anwendungen“ wird in Kapitel 2.3 erklärt.

1.2 Dreistufiges Konzept zur Ableitung von Gestaltungsoptionen

Die Ergebnisse der vorliegenden STUDIE wurden in drei Schritten erarbeitet (siehe Abbildung 2): Im ersten Schritt wurden **Anwendungsbeispiele** in drei als relevant eingestuften Wirtschaftssektoren ausgewählt. Zudem wurden digitale Technologien, die den Umbau der Wertschöpfungskette im Sinne des Kreislaufs ermöglichen sollen, identifiziert. Im zweiten Schritt wurde analysiert, welche digitalen Technologien bei den jeweiligen **Anwendungsbeispielen** besonders relevant sind. Anschließend wurde der Status quo und bestehenden Hürden bei der Umsetzung der jeweiligen Kreislaufkonzepte herausgearbeitet. Der dritte Schritt schließlich widmete sich der **Ableitung von Gestaltungsoptionen**. Hierzu wurden Unterschiede zwischen dem Status quo und den exemplarisch herausgearbeiteten technologischen, politischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Potenzialen ausgewertet.

Identifizierung der Anwendungsbeispiele

Bei der **Auswahl der Wirtschaftssektoren**, in denen die Anwendungsbeispiele angesiedelt sein sollten, waren die folgenden Kriterien zu bedenken:

- starke angesichts der im jeweiligen Sektor produzierten Massenströme zu erwartende Hebelwirkung bezogen auf Nachhaltigkeit durch die Einführung der Kreislaufwirtschaft
- großes Spektrum an Lebens- oder Nutzungszeiten, Nutzungsprofilen und Nutzungsintensitäten der sektorspezifischen Produkte
- großes Materialgruppenspektrum bei sektorspezifischen Produkten
- vorhandene Analysen im jeweiligen Sektor, die Ansatzpunkte für den Einsatz digitaler Technologien beschreiben

Ausgehend von den genannten Kriterien werden in dieser STUDIE die drei Wirtschaftssektoren Gebäude, Textil sowie Elektronik betrachtet. Die genannten Sektoren wurden im *EU-Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft* ebenfalls als transformationsrelevant bewertet; und sie unterscheiden sich deutlich, was die Lebensdauer der jeweiligen sektorspezifischen Produkte (Gebäude: durchschnittlich 50 Jahre, Elektronik: durchschnittlich 8 Jahre, Textil: durchschnittlich 5 Jahre) und die verwendeten Materialien betrifft. Bei der **Auswahl der Produkte** war zudem darauf zu achten, dass es sich um gängige Produkte handelt, bei denen möglichst viele unterschiedliche Kreislaufwirtschaftsstrategien (siehe Kapitel 2.1, R-Strategien) Anwendung finden können und die eine große Hebelwirkung für die kreislaufwirtschaftliche Transformation haben. Wie die einzelnen Produkte genau

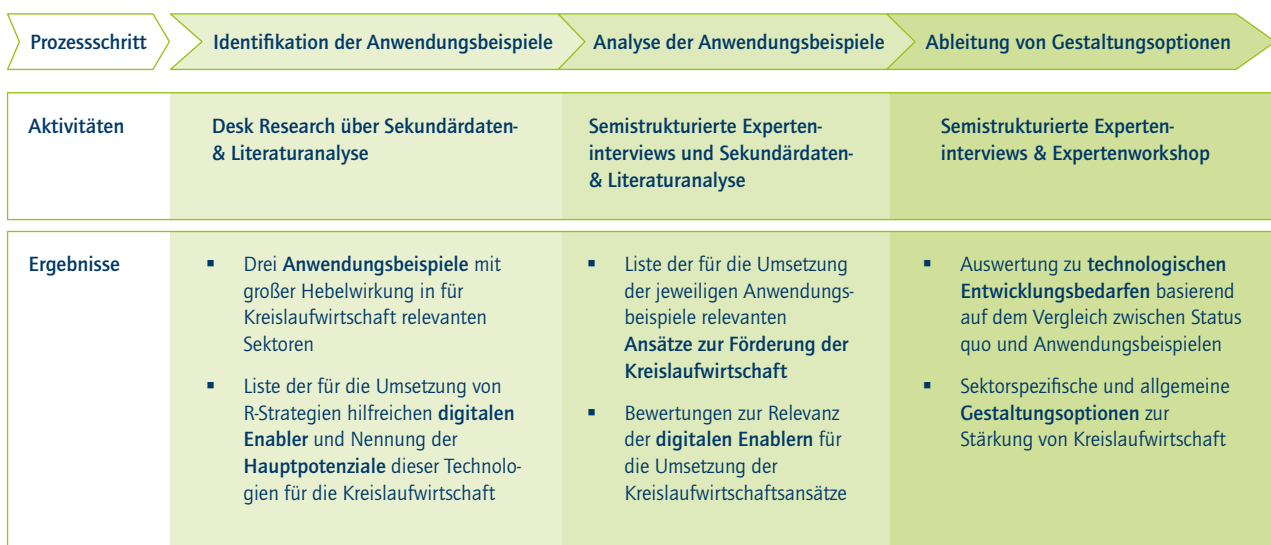


Abbildung 2: Vorgehensweise bei der Erstellung der vorliegenden acatech STUDIE (Quelle: eigene Darstellung)

ausgewählt wurden, wird in den nachfolgenden Kapiteln noch ausführlicher beschrieben.

Um die Potenziale, die digitale Technologien für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft haben, systematisch zu erfassen, wurden durch Analyse der einschlägigen Primär- und Sekundärliteratur zunächst solche digitalen Technologien identifiziert, die in der Forschung bereits als kreislaufwirtschaftsrelevant eingestuft worden sind oder die gegenwärtig schon in Wertschöpfungskreisläufen eingesetzt werden.^{27, 28, 29, 30, 31} Die entsprechende Kandidatenliste wurde anschließend und nach einem Abgleich mit dem *Technologie- und Trendradar 2022* des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)³² sowie nach Gesprächen mit Expertinnen und Experten noch einmal erweitert. Details und konkrete Ergebnisse dieses Auswahlprozesses werden im folgenden Kapitel zu schildern sein.

Analyse der Anwendungsbeispiele

Kernbestandteil der exemplarischen Analysen der Anwendungsbeispiele waren **semistrukturierte Interviews** mit Expertinnen und Experten für Kreislaufwirtschaft, für digitale Technologien und für die ausgewählten Wirtschaftssektoren. Im Rahmen dieser Interviews wurde im ersten Schritt das Konzept der Studie diskutiert und validiert. Im zweiten Schritt wurden die bereits bestehende und die potenzielle Relevanz der

Kreislaufwirtschaftsstrategien im jeweiligen Anwendungskontext erörtert. Zudem wurde diskutiert, welche Rolle digitale Technologien und digitale Anwendungen bei der Umsetzung dieser Strategien sowie der Entwicklung neuer kreislaufbasierter Geschäftsmodelle haben könnten und welche Herausforderungen die verschiedenen Akteure im deutschen und europäischen Wirtschaftssystem beim Aufbau einer erfolgreichen, digital unterstützten Kreislaufwirtschaft zu bewältigen haben.

Ableitung von Gestaltungsoptionen

Im letzten Schritt wurden mithilfe der Experteninterviews und im Rahmen eines Expertenworkshops sodann sektorspezifische und sektorübergreifende **Hemmnisse** identifiziert, die dem Aufbau digitalgestützter Wertschöpfungskreisläufe und somit auch der Etablierung einer umspannenden Kreislaufwirtschaft in Deutschland aktuell entgegenstehen. Auf dieser Grundlage wurden zudem jeweils sektorspezifische und sektorübergreifende **Gestaltungsoptionen** diskutiert, die dazu beitragen könnten, die identifizierten Hemmnisse zu überwinden und das Konzept der Kreislaufwirtschaft in reale Produktionsprozesse zu übersetzen. Die im Kontext der Anwendungsbeispiele vorgestellten Gestaltungsoptionen führen somit die Ergebnisse der Literatur- und Datenanalyse des Studienprojekts mit der qualitativen Einschätzung der Expertinnen und Experten zusammen.

27 | Vgl. Barteková/Börkey 2022.

28 | Vgl. Berndorfer et al. 2023.

29 | Vgl. Han et al. 2023.

30 | Vgl. Ranta et al. 2021.

31 | Vgl. Plattform Lernende Systeme 2024.

32 | Vgl. Stich et al. 2022.



2 Konzeptionelle Grundlagen: R-Strategien, Geschäftsmodelle, Technologien

2.1 Grundlegende Strategien der Kreislaufwirtschaft

Der Begriff „Kreislaufwirtschaft“ wird in der öffentlichen Diskussion häufig auf den Aspekt des Recyclings verengt. Das Konzept einer zirkulären Wirtschaft oder Circular Economy – kurz: Kreislaufwirtschaft – geht aber weit darüber hinaus. Es umfasst nämlich ein ganzes Bündel von Ansätzen, die darauf abzielen, **Stoff- und Produktkreisläufe zu schließen, den Verbrauch an Primärrohstoffen³³ zu reduzieren und Abfälle zu vermeiden**. Hier wird also der gesamte Lebenszyklus eines Produkts vom Design über die Nutzung bis hin zur Entsorgung oder zur Rückführung von Produktbestandteilen in den Materialkreislauf in den Blick genommen. Eine solch umfassende Perspektive liegt auch dem aktuellen BMUV-Entwurf für eine *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie* zugrunde, der eine „grundsätzliche Neuausrichtung vom Linearen zum Zirkulären, angefangen beim zirkulären Produktdesign, über ressourceneffiziente Produktion und zirkuläre Geschäftsmodelle bis zu nachhaltigem Konsum“³⁴ als Ziel formuliert.

Durch den Umbau der deutschen und der europäischen Wirtschaft zu einer Circular Economy könnten **Treibhausgasemissionen** und andere Umweltfolgen, die mit der Gewinnung und Verarbeitung von Primärrohstoffen und der Entsorgung von Abfällen einhergehen, erheblich reduziert werden. Da viele Primärrohstoffe (zum Beispiel Lithium, Kobalt, seltene Erden, Platingruppenelemente

und viele weitere Metalle)³⁵ großenteils aus Drittstaaten in die EU importiert werden, könnte eine Verminderung des entsprechenden Rohstoffbedarfs die Abhängigkeit von den bisweilen wenigen Lieferländern entscheidend verringern – und damit zur **Rohstoffversorgungssicherheit und zu strategischer Souveränität** hierzulande und in Europa beitragen.

Systematisch zusammenfassen lassen sich die verschiedenen Kreislaufwirtschaftsstrategien, die sich auf einen stilisierten Produktlebenszyklus beziehen, als sogenannte **R-Strategien**. Anzahl und Inhalte der R-Strategien sind in der Fachliteratur nicht einheitlich definiert, wir beziehen uns auf ein 10-R-Modell³⁶ (siehe Tabelle 1). Das Modell ist breit etabliert und wird in ähnlicher Form unter anderem vom Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP)³⁷, in Veröffentlichungen der Europäischen Kommission³⁸ und durch das Deutsche Institut für Normung (DIN)³⁹ verwendet, wobei allerdings die durch „R9 – Recover“ abgebildete Strategie der energetischen Verwertung häufig nicht als Teil der Kreislaufwirtschaft betrachtet wird. Die jüngst vorgeschlagene Reinvent-Strategie, die eine vollständige Entkopplung von Ressourcenverbrauch und Wirtschaftswachstum anstrebt und darauf abzielt, verschiedene physische Produkte durch neue Geschäftsmodelle überflüssig zu machen, wird hier unter „R0 – Refuse“ subsumiert.⁴⁰ Die R-Strategien lassen sich wiederum hinsichtlich ihrer jeweiligen Auswirkungen auf Material- und Produktströme nach drei Kategorien ordnen: **Narrow, Slow und Close** (siehe Tabelle 1).

Häufig werden die **R-Strategien in einer Rangfolge** dargestellt, in der den Strategien der Kategorie „Narrow“ (R0 – Refuse, R1 – Rethink, R2 – Reduce) der größte potenzielle Beitrag zur Verminderung der Umweltauswirkungen und deshalb auch der größte Innovationsbedarf zugeschrieben wird.⁴¹ Höher eingestufte R-Strategien können in der Regel die Umweltauswirkungen stärker reduzieren als niedriger eingestufte R-Strategien. So ist beispielsweise der Energieverbrauch für eine Produktreparatur häufig niedriger als der für die Herstellung eines neuen Produkts aus Recyclingrohstoffen.

33 | Primärrohstoffe sind Stoffe, die aus der Natur gewonnen werden (beispielsweise Metallerze, Sand und Holz).

34 | BMUV 2024, S. 20.

35 | Vgl. Europäische Kommission 2023a.

36 | Vgl. Mast et al. 2022. Da die Nummerierung der R-Strategien bei „R0“ beginnt, wird es häufig auch als 9-R-Modell bezeichnet.

37 | Vgl. Umweltprogramm der Vereinten Nationen 2024b

38 | Vgl. Europäische Kommission 2020c.

39 | Vgl. DIN 2024.

40 | Vgl. Kara et al. 2022.

41 | Vgl. Stich et al. 2022.

Narrow Bedarf an Produkten oder Materialien durch effizientere Nutzung oder Produktion reduzieren	R0	Refuse	Produkt überflüssig machen, Funktion anders bereitstellen
	R1	Rethink	Nutzung des Produkts intensivieren (z. B. durch Sharing)
	R2	Reduce	Materialeinsatz reduzieren (z. B. durch materialsparende Produktionsprozesse)
Slow Lebensdauer von Produkten oder deren Komponenten verlängern	R3	Reuse	Produkt in gleicher Funktion durch einen anderen Nutzer wiederverwenden
	R4	Repair	Originalfunktion eines Produkts durch Reparatur und Wartung wiederherstellen
	R5	Refurbish	Alte Produkte aufarbeiten, restaurieren oder updaten
	R6	Remanufacture	Teile aus einem alten Produkt in ein neues Produkt mit der gleichen Funktion einbauen
	R7	Repurpose	Teile aus einem alten Produkt in ein neues Produkt mit einer anderen Funktion einbauen
Close Stoffkreisläufe durch Wiederverwendung von Materialien schließen	R8	Recycle	Materialien wiedergewinnen und als Rohstoffe neu verarbeiten
	R9	Recover	Materialien energetisch verwerten (durch Verbrennung und Wärmenutzung)

Tabelle 1: Ansätze der Kreislaufwirtschaft (basierend auf Mast et al. 2022 und Deutsche Energie-Agentur 2023)

Als **Phasen im Produktlebenszyklus** werden in der vorliegenden STUDIE **Produktdesign, Produktion, Nutzung** und **Lebensende** unterschieden. Abbildung 3 stellt die mit den jeweiligen R-Strategien verbundenen Auswirkungen auf Materialströme dar und ordnet sie den Phasen des Produktlebenszyklus zu. Die Zuordnung der R-Strategien zu den vier Lebenszyklusphasen verläuft dabei nicht immer trennscharf; beispielsweise werden viele zirkuläre Maßnahmen während der Produktion oder Nutzung erst durch ein entsprechendes Produktdesign ermöglicht, sodass sie sich sowohl der Designphase als auch der Produktions- oder Nutzungsphase zuordnen lassen.

Der Umbau des derzeitigen Wirtschaftssystems zu einer funktionsfähigen Kreislaufwirtschaft ist kein Selbstzweck, sondern ein umfassender sozioökonomischer Wandel, der darauf abzielt, Produkte und Dienstleistungen so bereitzustellen, dass die **planetaren Belastungsgrenzen** nicht überschritten werden.⁴² Dieses übergeordnete Ziel erfordert eine starke Minderung insbesondere von Treibhausgas-, aber auch von Schadstoffemissionen und eine deutliche Verringerung des Ressourcenverbrauchs. So

wird im Entwurf der NKWS das Ziel formuliert, den „Rohstofffußabdruck“ von heute 15,3 Tonnen pro Kopf bis 2045 auf 8 Tonnen pro Kopf nahezu zu halbieren. Um das zentrale klimapolitische **Ziel der Treibhausgasneutralität** (bis 2045 in Deutschland,⁴³ bis 2050 in der EU⁴⁴) zu erreichen, muss zudem die Nutzung fossiler Rohstoffe beendet werden. Dies erfordert grundlegend andere Produktionsprozesse und gegebenenfalls auch andere Produkte und Produktbestandteile – beispielsweise müssen Kunststoffe zukünftig aus Biomasse oder CO₂ hergestellt werden anstatt aus Erdöl, oder sie müssen durch alternative Materialien ersetzt werden. Neben Strategien, die an der Produktion ansetzen, sind zirkuläre Geschäftsmodelle und eine Änderung des Konsumverhaltens erforderlich, um den Bedarf an Produkten und die damit verbundenen Materialströme zu reduzieren.⁴⁵ Eine lediglich graduelle Verbesserung klimaschädlicher Produktions- und Nutzungsprozesse im Rahmen einer weiterhin linear geprägten Wirtschaft ohne sozioökonomischen Systemwandel würde nach aktuellem Erkenntnisstand jedenfalls nicht genügen, um eine wirklich nachhaltige Lebensweise zu etablieren.⁴⁶

42 | Vgl. Richardson et al. 2023.

43 | Vgl. Bundes-Klimaschutzgesetz 2021.

44 | Vgl. Europäische Kommission 2021.

45 | Vgl. Sachverständigenrat für Umweltfragen 2024.

46 | Vgl. Kara et al. 2022.

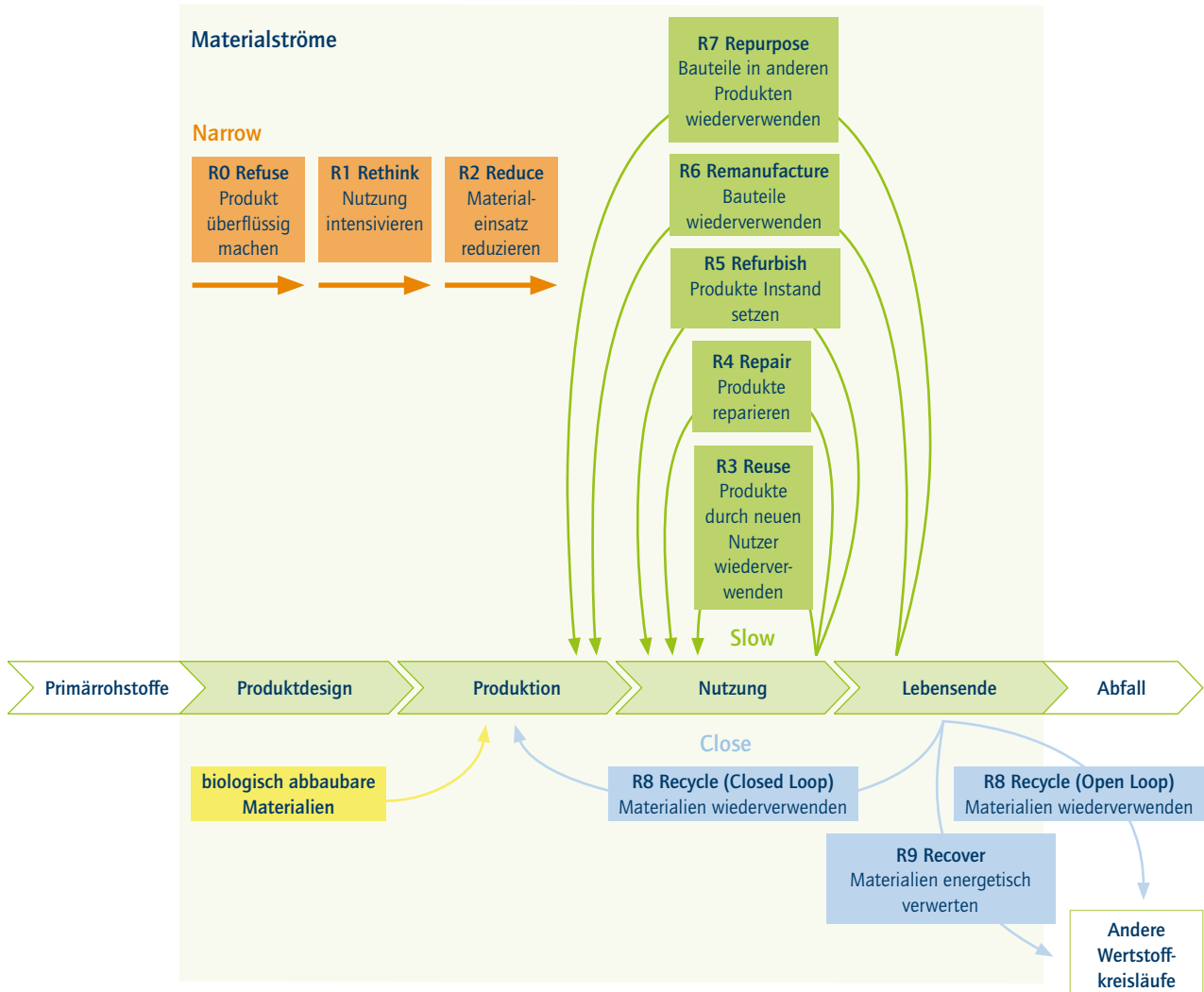


Abbildung 3: Auswirkungen der R-Strategien auf den vierphasigen Produktlebenszyklus (grün unterlegt). Die R-Strategien der Konzeptkategorie „Narrow“ beziehen sich auf alle Produktlebenszyklusphasen (Quelle: eigene Darstellung).

Strategien zum Aufbau einer Kreislaufwirtschaft sollten nicht nur auf eine Schließung der Materialkreisläufe abzielen, sondern auch auf eine Verringerung der hierfür benötigten Energie und der entsprechenden Treibhausgasemissionen (zum Beispiel bei der Aufbereitung von Recyclingrohstoffen oder beim Transport von Materialien). Dabei ist der **gesamte Lebenszyklus** eines Produkts inklusive der sogenannten Vorkette (zum Beispiel Emissionen und Umweltfolgen beim Abbau von Erzen, Energieträgern und anderen Primärrohstoffen oder beim Holzeinschlag) zu betrachten. Und auch solche Umweltauswirkungen, die durch Herstellung, Betrieb und Entsorgung beim

Einsatz digitaler Technologien entstehen, müssen konzeptuell miteinbezogen werden.

Die **Umweltauswirkungen** pro Stück oder pro Tonne eines Produkts können in vielen Fällen durch effizientere Herstellungsweisen und Recycling reduziert werden. So sind bei der Verarbeitung von Sekundärrohstoffen häufig (allerdings nicht immer) Energiebedarf, Treibhausgasemissionen und Wasserverbrauch deutlich geringer als bei der Gewinnung von Primärressourcen.⁴⁷ Letztendlich müssen Kreislaufwirtschaftsansätze aber daran gemessen werden, inwieweit sie zu einer **absoluten Reduktion der**

47 | Vgl. Angerer et al. 2016.

Umweltauswirkungen (zum Beispiel weniger Tonnen emittiertes CO₂) beitragen. Dafür ist neben den Umweltauswirkungen pro Stück oder pro Tonne des Produkts die Menge des hergestellten und konsumierten Produkts ausschlaggebend. Werden beispielsweise die Emissionen pro Tonne eines Produktes durch effizientere Produktionsverfahren halbiert, der Bedarf an dem Produkt vervierfacht sich aber gleichzeitig, so steigen die absoluten Emissionen auf das Doppelte. Die steigende globale Nachfrage nach Rohstoffen wie Stahl kann daher die durch umweltfreundlichere Produktionsprozesse erzielte Emissionseinsparung konterkarieren. Angebots- und nachfrageseitige Klimaschutzmaßnahmen sollten daher möglichst gemeinsam umgesetzt werden, um eine absolute Reduktion von Umweltauswirkungen zu erreichen.⁴⁸

Auf der Nachfrageseite sind dabei die sogenannten **Reboundeffekte** zu berücksichtigen, die womöglich durch Anpassungsverhalten bei Nutzerinnen und Nutzern entstehen, und der beabsichtigten Verminderung der absoluten Emissionen entgegenwirken.⁴⁹ Werden die spezifischen Umweltauswirkungen pro Stück eines bestimmten Produkts nämlich reduziert, kann das zur Kosten- und infolgedessen zur Preissenkung führen, sodass Konsumentinnen und Konsumenten womöglich mehr von dem jeweiligen Produkt konsumieren oder mit dem eingesparten Geld andere umweltschädliche Produkte erwerben. Auf diese Weise können sich im schlimmsten Fall die absoluten Umweltauswirkungen sogar verstärken. Werden beispielsweise Pkw-Motoren effizienter, sinken die Kosten des Benzinverbrauchs; Konsumentinnen und Konsumenten reagieren darauf gegebenenfalls mit dem Kauf eines stärker motorisierten Fahrzeugs, mit dem Fahren weiterer Strecken oder indem sie das eingesparte Geld für Flugreisen ausgeben.⁵⁰ Reboundeffekte müssen daher bei der Bewertung von Kreislaufwirtschaftsstrategien immer mitberücksichtigt werden.

In einer umfassenden Kreislaufwirtschaft sollte der Bedarf an Primärrohstoffen so weit wie möglich vermieden werden. Dazu müssen Primärrohstoffe in allen Produktionsverfahren durch Sekundärrohstoffe ersetzt werden. Recycling sollte daher darauf abzielen, **Materialien ohne Qualitätsverlust zurückzugewinnen**, sodass sie in der gleichen Funktion eingesetzt werden können wie Primärrohstoffe. Sogenanntes **Downcycling** – also eine

Verwendung von Sekundärmaterialien in geringerwertigen Funktionen (zum Beispiel bei der Herstellung von Putzlappen aus Altkleidung), trägt zwar zur Abfallvermeidung bei, führt aber nicht zur Schließung von Stoffkreisläufen, da der Bedarf an Primärrohstoffen für das ursprüngliche Produkt nicht reduziert wird. Für eine umfassende Wiederverwendung recycelter Produktbestandteile und Materialien zur Herstellung eines gleichwertigen Produkts braucht es aber bereits ein entsprechend nachhaltig konzipiertes Produktdesign (zirkuläres Design). Insbesondere bei langlebigen Produkten ist es allerdings ebenso wichtig, den aktuellen **Produktbestand**, der noch ohne jeden Zirkularitätsbezug gestaltet und hergestellt worden ist, so gut wie möglich in eine Kreislaufwirtschaft zu integrieren.

2.2 Geschäftsmodelle in der Kreislaufwirtschaft

Für den Umbau des Wirtschaftssystems mit seinen bislang überwiegend linearen Wertschöpfungsketten hin zu einem System mit geschlossenen, funktionsfähigen Wertschöpfungskreisläufen müssen die **Prozessabläufe** im Lebenszyklus der betreffenden Produkte teilweise komplett umgestellt werden. Das beginnt bereits bei der Produktgestaltung, die künftig zirkuläre Prinzipien zu berücksichtigen hat, und erfordert sodann eine konsistente Neuausrichtung auch aller nachgelagerten Wirtschaftsprozesse, also der Herstellung, des Vertriebs, der Wartung und der Rückgabe des Produkts. Bereits heute versuchen sektorspezifisch einige Unternehmen mit Rücknahmeprogrammen und internen Recyclingprozessen (Bsp. MUDJeans für Denim-Produkte) möglichst alle Bauteile und Produkte in einem eigenen Kreislauf zu halten. Doch um nachhaltige Wertschöpfungskreisläufe für komplexe Produkte zu schaffen, reicht die Unternehmensperspektive letztlich nicht aus – hierfür braucht es **zirkuläre Ökosysteme**.

Die Circular Economy weist gegenüber dem linearen Wertschöpfungs-system eine stärkere Vernetzung der Wirtschaftsakteure auf, deren wertschöpfende Tätigkeiten sich zudem stärker gegenseitig ergänzen. Beispielsweise muss der Hersteller eines Elektrogeräts in einem zirkulären Wirtschaftssystem eng mit Händlern, Reparateuren, Verwertern sowie Nutzerinnen und

48 | Vgl. Wang et al. 2021.

49 | Vgl. Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung 2019.

50 | Dies ist einer der Gründe, warum in der Ökonomik CO₂-Preise als klimapolitische Maßnahme eine so hohe Fürsprache erhalten. Denn bei der mit ihnen einhergehenden Verteuerung klimaschädlichen Verhaltens entstehen kontraproduktive Einkommenseffekte gerade nicht; in Verbindung mit einer pauschalen (!) – also nicht mit der Intensität des Einsatzes fossiler Energieträger verknüpften – finanziellen Kompensation (wie beispielsweise das sogenannte Klimageld) sind CO₂-Preise daher anders als beispielsweise Emissionsstandards ein wirkmächtiges und sozial ausgewogenes klimapolitisches Instrument.

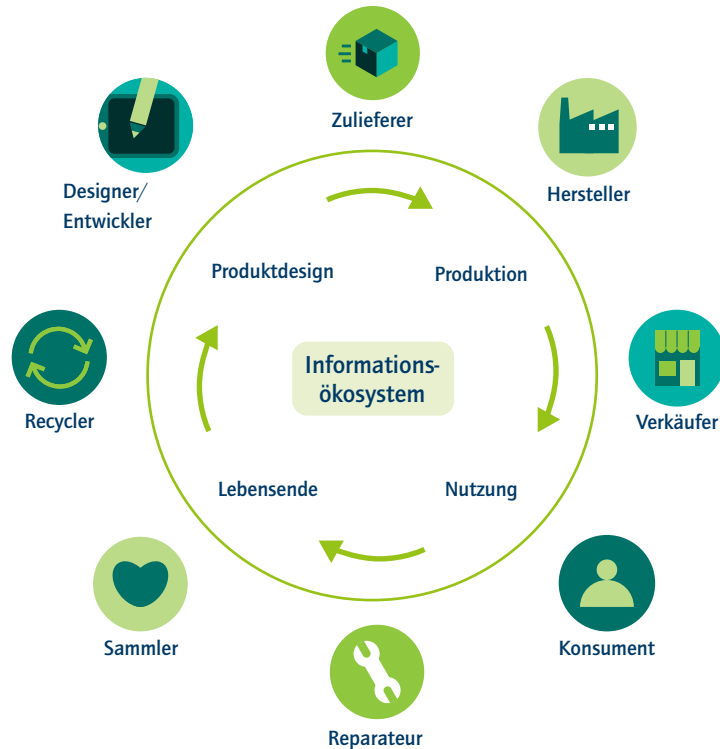


Abbildung 4: Zirkuläre Wertschöpfungskette mit Informationsökosystem (Quelle: eigene Darstellung)

Nutzern zusammenarbeiten, um die Lebensdauer des Geräts zu verlängern und dessen Rückführung und Verwertung nach dem Lebensende zu ermöglichen (siehe Abbildung 3). Erforderlich ist hierfür eine **zirkuläre Vision**, die alle Akteure teilen. Eine besondere Herausforderung besteht daher darin, dass **Kosten und Nutzen** so verteilt sein müssen, dass sich alle beteiligten Akteure auch langfristig im Ökosystem engagieren wollen.

Um eine funktionsfähige Circular Economy zu etablieren, müssen die Geschäftsmodelle bestehender Unternehmen künftig auf Zirkularität und Nachhaltigkeit hin ausgerichtet und neue Geschäftsmodelle erprobt werden, die den Anforderungen einer Kreislaufwirtschaft genügen. Vor diesem Hintergrund hat die *Circular Economy Initiative Deutschland* eine ausführliche **Typologie mit 22 Geschäftsmodellen** für Business to Business (B2B) und Business to Consumer (B2C) entwickelt, die eine zirkuläre Wirtschaftsweise befördern können.⁵¹

Ein zentraler Ansatz ist dabei der Wechsel von produktbasierten zu dienstleistungsbasierten Geschäftsmodellen nach dem Prinzip **„Product as a Service“ (PaaS)**. Statt ein Produkt, beispielsweise einen Drucker, einmalig zu verkaufen, zahlt der Kunde für die Nutzung des Produkts und nicht für dessen Erwerb. Der Anbieter liefert zahlreiche Services wie Wartung, Reparatur und Recycling des Druckers mit und bietet dem Kunden so einen Mehrwert. Da der Drucker in diesem Fall im Eigentum des Anbieters verbleibt, hat dieser zudem ein intrinsisches Interesse an einem hochwertigen Produkt mit langer Lebensdauer. Allerdings führen PaaS-Modelle nicht immer zu mehr Nachhaltigkeit und zu langlebigeren Produkten. Beispielsweise sind servicebasierte E-Scooter-Mobilitätslösungen häufig noch wenig zirkulär ausgerichtet, und sie ersetzen womöglich nur selten den emissionsintensiven Pkw-Verkehr, stattdessen aber vermutlich den ressourcenschonenderen öffentlichen Nahverkehr oder das Fahrrad.⁵² Daher brauchen wirklich zukunftsfähige PaaS-Modelle als Fundament eine zirkuläre Vision.

51 | Vgl. Circular Economy Initiative Deutschland 2021b.

52 | Vgl. Umweltbundesamt 2023a.

Es steht außer Zweifel, dass digitale Technologien und Anwendungen künftig eine zentrale Rolle bei der Etablierung zirkulärer Geschäftsmodelle spielen werden. Denn sie ermöglichen es, produkt- und dienstleistungsrelevante Daten zu erheben und diese mit Partnern und Stakeholdern im Wertschöpfungskreislauf auszutauschen. Ein solches digitales Werkzeug ist der sogenannte digitale Produktpass, der Produktinformationen entlang der gesamten Wertschöpfungskette zur Verfügung stellt und auf diese Weise neue Geschäftsmodelle im Bereich Wartung/Reparatur, Wiederverwendung, Wiederaufbereitung und Recycling ermöglicht. Dank sensorisch-digitaler Überwachung können Hersteller dann einzelne Bauteile nach entsprechender Abnutzung austauschen und so die Funktionalität des Produkts wahren. Der Einsatz derartiger digitaler Technologien ermöglicht es, dass das Wiederproduzieren (Remanufacturing)⁵³ und die Wiederaufarbeitung (Refurbishing) sowohl technisch möglich als auch ökonomisch rentabel werden. Digitale Technologien können somit ein **Informationsökosystem** (siehe Abbildung 4) erschaffen, das zirkuläre Geschäftsmodelle ermöglicht und befördert. Zudem lassen sich mithilfe digitaler Technologien entsprechende Geschäftsmodelle ohne erheblichen Aufwand simulieren und auf ihre Umsetzbarkeit hin erproben, wengleich solche Ex-ante-Simulationen den Praxistest nie vollständig werden ersetzen können.

2.3 Digitale Technologien für die Kreislaufwirtschaft

Um die Potenziale digitaler Technologien für die Kreislaufwirtschaft und gegenwärtige Hemmnisse für ihre effektive Nutzung systematisch zu analysieren, wurden insgesamt 16 technologische Konzepte identifiziert.^{54, 55, 56, 57, 58} Dabei handelt es sich sowohl um eigenständige Grundlagentechnologien als auch um digitale Anwendungen, die aus der Kombination mehrerer Grundlagentechnologien entstehen. Im Folgenden wird der Einfachheit halber verkürzt der Begriff „Digitale Technologien“ verwendet, digitale Anwendungen sind also eingeschlossen.⁵⁹

Diese digitalen Technologien und digitalen Anwendungen sind (siehe Abbildung 5):

- **Digitale Technologien:** Internet of Things (IoT), Robotik, Distributed-Ledger-Technologie (DLT), Künstliche Intelligenz (KI), additive Fertigung (3D-Druck)⁶⁰, Simulation, Cloud Computing/Edge Computing und Kommunikationstechnologien,
- **Digitale Anwendungen:** Bildauswertung, autonome Roboter, Onlineplattformen, Datenräume, Cyber-physisches System (CPS), digitaler Zwilling, digitale Identitäten sowie digitaler Produktpass.

Digitale Technologien ermöglichen eine Umsetzung der verschiedenen Kreislaufstrategien und zirkulärer Geschäftsmodelle im realen Wirtschaftsleben, weshalb sie einen immensen ökologischen und ökonomischen Mehrwert generieren können. Eine quantitative Bewertung des tatsächlichen Umwelt- und Wirtschaftsnutzens erfordert allerdings eine kritische Einzelfallanalyse mithilfe des Life Cycle Assessment (LCA) oder anderer geeigneter Tools, die berücksichtigen, dass Herstellung, Nutzung und Entsorgung digitaler Technologielösungen nicht selten viele Ressourcen verbrauchen.

Doch wengleich der ökologische und ökonomische Mehrwert digitaler Technologien jeweils nur im Einzelfall exakt zu beziffern ist, lassen sich vier grundlegende Funktionen digitaler Technologien identifizieren, die eine Transformation zur Kreislaufwirtschaft befördern können und als Indikator bei der Beurteilung des kreislaufwirtschaftlichen Nutzens digitaler Technologien fungieren (siehe Kapitel 3, 4 und 5):

- Durch **Datengenerierung und -sammlung** schaffen digitale Technologien die Informationsbasis, um komplexe Wertschöpfungsketten nachvollziehen und direkt wiederverwendbare oder wiederaufzuarbeitende Bauteile und Materialien identifizieren zu können.

53 | Für das englischsprachige Konzept des „Remanufacturing“ gibt es bisher keine Entsprechung im Deutschen. Vgl. hierzu S. 9.

54 | Vgl. Stich et al. 2022.

55 | Vgl. Barteková/Börkey 2022.

56 | Vgl. Berndorfer et al. 2023.

57 | Vgl. Han et al. 2023.

58 | Vgl. Neri et al. 2023.

59 | Erklärungen zu den einzelnen digitalen Technologien und Anwendungen finden sich im Glossar.

60 | Additive Fertigung und Robotik sind dabei nicht nur digitale Technologien, sondern umfassen auch physikalische Maschinentchnik

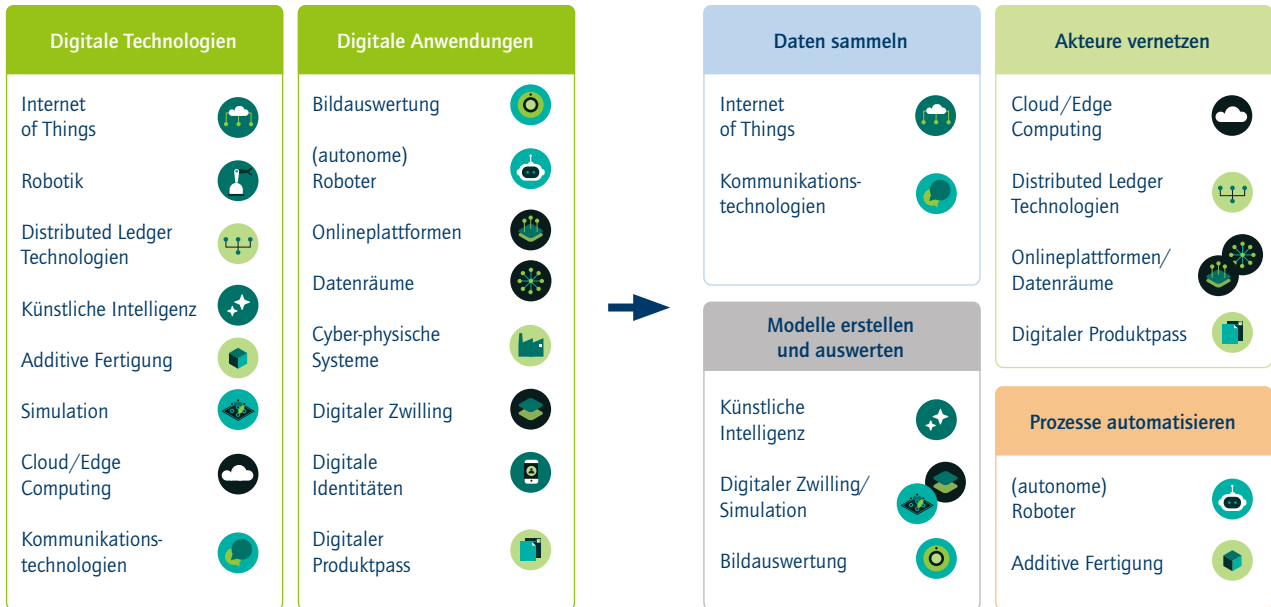


Abbildung 5: Digitale Technologielösungen in der Kreislaufwirtschaft und ihre Funktionen (Quelle: eigene Darstellung)

- Digitale Technologien erlauben eine stärkere **Vernetzung** der verschiedenen Stakeholder und eine lückenlose Datenverfügbarkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette, wodurch Angebot und Nachfrage für zirkuläre Güter und Dienstleistungen aufeinander abgestimmt werden können. Zudem ermöglichen sie eine **niederschwellige Kommunikation** zwischen allen Akteuren in der Wertschöpfungskette.
 - Durch digitale **Modellierung** können sowohl die Umsetzung von R-Strategien als auch zirkuläre Produkte und Geschäftsmodelle am Modell geplant, getestet und bewertet werden. Zudem lassen sich durch die Kombination von Datenerhebung und Modellierung Umweltkosten transparent machen, indem Umweltauswirkungen von Wertschöpfungsketten simuliert und vorhergesagt werden können.
 - Durch eine verstärkte, digital getriebene **Automatisierung** digitaler oder physischer Prozesse können R-Strategien und zirkuläre Geschäftsmodelle skaliert und so wirtschaftlich tragfähig gestaltet werden.
 - Die im ersten Auswahlschritt identifizierten digitalen Technologien und Anwendungen lassen sich in einem zweiten Schritt diesen vier grundlegenden Funktionen zuordnen (siehe Abbildung 5). Technologien mit ähnlicher technologischer Basis haben wir dabei zusammengefasst (Onlineplattformen⁶¹ und Datenräume, Robotik und autonome Roboter, Simulation und digitaler Zwilling) und Technologien mit eingeschränkter eigenständiger Wirksamkeit bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft gestrichen (digitale Identitäten) oder unter anderen Technologien subsumiert (Cyber-physische Systeme unter Internet of Things subsumiert).
- Im Folgenden wird anhand dreier idealtypischer Wertschöpfungsketten aus drei verschiedenen Wirtschaftssektoren zu zeigen sein, wie diese vier Funktionen durch Einsatz der entsprechenden digitalen Technologielösungen realisiert werden können, welche Hemmnisse bei der Umsetzung bislang noch bestehen und welche Gestaltungsoptionen sich daraus ergeben.

61 | Wie im Glossar beschrieben, werden Onlineplattformen in dieser Publikation als digitale Plattformen definiert, die den Datenaustausch zwischen verschiedenen Akteuren ermöglichen.

3 Gebäude- und Bausektor

3.1 Hoher Materialbedarf des Gebäude- und Bausektors

Der Bausektor,⁶² der sich neben Gebäuden auch dem Tiefbau zuzurechnenden Infrastrukturen wie Straßen, Wasserstraßen und Kanalisation widmet, verschlingt erhebliche Mengen an Ressourcen: Etwa 50 Prozent der in der EU gewonnenen Rohstoffe – hauptsächlich nichtmetallische Minerale – werden im Bausektor eingesetzt.⁶³ Der Bau von Gebäuden beansprucht 65 Prozent des EU-weit eingesetzten Zements, 33 Prozent des Stahls, 25 Prozent des Aluminiums und 20 Prozent der Kunststoffe.⁶⁴ Damit sind Bauprodukte nach Verpackungen der zweitgrößte Anwendungsbereich für Kunststoffe.⁶⁵ Durch zirkuläre Wirtschaftsstrategien könnten Schätzungen des Beratungsunternehmens Material Economics und der Ellen MacArthur Foundation zufolge die durch Verwendung von Zement, Stahl, Kunststoffen und Aluminium im Bausektor verursachten Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um über 30 Prozent gesenkt werden.⁶⁶

Ebenfalls sehr hoch ist der Anteil des Baubereichs am Abfallaufkommen: In der EU ist der Bausektor nämlich für 35 Prozent des Aufkommens verantwortlich,⁶⁷ und in Deutschland entfallen sogar 55 Prozent der Gesamtabfallmenge auf Bau- und

Abbruchabfälle.⁶⁸ Hiervon ist wiederum knapp die Hälfte auf Steine und Erden durch Bodenaushub für Bauvorhaben zurückzuführen. Mit 2,5 Tonnen fällt jährlich pro Kopf hierzulande zudem etwa zehnmal so viel Bauabfall wie Hausmüll an.⁶⁹ Zwar werden 83 Prozent der Bau- und Abbruchabfälle aus abgerissenen und abgebauten Gebäuden in der EU heute bereits recycelt, überwiegend handelt es sich dabei allerdings um weniger nachhaltiges Downcycling – ein Großteil des Materials wird zur Verfüllung im Straßenbau verwendet. Und nur 19 Prozent der Baumaterialien für neue Gebäude stammen aus Recycling oder nachwachsenden Rohstoffen.⁷⁰

Aufgrund des hohen Ressourcenverbrauchs und der entsprechend vielen Emissionen bei der Herstellung der Baumaterialien ist eine Sanierung des Baubestands generell nachhaltiger als Abriss und anschließender Neubau.⁷¹ Dennoch war im Jahr 2022 ein geplanter Ersatzneubau an selber Stelle der häufigste Grund für den Abriss von Wohngebäuden in Deutschland.⁷² Sowohl bei Wohngebäuden als auch bei Nichtwohngebäuden ist die Zahl der Abrisse in den vergangenen 20 Jahren allerdings tendenziell rückläufig gewesen und gegenüber der Zahl von Neubauten relativ gering.⁷³ Im Jahr 2022 stand dem Abriss von 4.900 Wohngebäuden die Neuerrichtung von mehr als 100.000 Wohngebäuden gegenüber.

Bei heutigen Bestandsgebäuden fällt der größte Teil der Treibhausgasemissionen während des Betriebs an, wobei die Bereitstellung von Heizenergie, Kühlung und Strom für den überwiegenden Teil des Ausstoßes verantwortlich ist. Insgesamt 36 Prozent der CO₂-Emissionen in der EU entfallen so auf die

62 | In verschiedenen Statistiken werden Sektoren unterschiedlich definiert und voneinander abgegrenzt, wobei der Bau- und Gebäudebereich über seinen gesamten Lebenszyklus üblicherweise auf mehrere Sektoren verteilt abgebildet wird. So umfasst der Gebäudesektor in der Definition des Bundes-Klimaschutzgesetzes nur diejenigen Emissionen, die physisch innerhalb von Gebäuden durch Verbrennung fossiler Energieträger entstehen (vor allem durch Gas- und Ölheizungen), während Emissionen für bezogenen Strom und Fernwärme dem Energiesektor und Emissionen aus der Herstellung von Bauprodukten dem Industriesektor zugerechnet werden. Gemäß der Definition der Wirtschaftszweige nach amtlicher Statistik ist die Errichtung von Gebäuden dem Baugewerbe zugerechnet, während für den Betrieb der Gebäude unter anderem die Wirtschaftszweige Energieversorgung sowie Grundstücks- und Wohnungswesen eine Rolle spielen. Die Begriffe werden nicht immer trennscharf verwendet.

63 | Vgl. Europäische Kommission 2020b.

64 | Vgl. Küstner et al. 2022.

65 | Vgl. Umweltbundesamt 2023b.

66 | Vgl. Deutsche Energie-Agentur 2023.

67 | Vgl. Europäische Kommission 2020b.

68 | Vgl. Umweltbundesamt 2023b.

69 | Vgl. Deutschlandfunk 2022.

70 | Vgl. Circle Economy/BAIN & Company 2022.

71 | Vgl. Steger et al. 2022.

72 | Vgl. Deutsche Energie-Agentur 2024.

73 | Vgl. ebd.



Nutzungsphase von Gebäuden.⁷⁴ In Deutschland verursacht zudem die Wärmeerzeugung 90 Prozent der CO₂-Emissionen im Gebäudebetrieb der privaten Haushalte, zu großen Teilen – etwa 75 Prozent – durch die Verbrennung von Heizöl und Erdgas.⁷⁵

Rund 60 Prozent aller Wohngebäude in Deutschland wurden vor Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung im Jahr 1977 errichtet. Solche Altbauten mit einem Baujahr bis einschließlich 1976 verantworten etwa drei Viertel des Endenergieverbrauchs von Wohngebäuden hierzulande. Zur Einhaltung der Klimaziele muss daher ein Großteil der Bestandsgebäude energetisch saniert werden. Szenariostudien, die Wege zu einem klimaneutralen Deutschland bis 2045 aufzeigen, kommen zu dem Ergebnis, dass die Sanierungsrate von circa 1 Prozent pro Jahr (Stand 2021) bis 2030 auf etwa 1,3 bis 2,5 Prozent pro Jahr steigen muss, um die Reduktionsziele zu erreichen.^{76, 77} Bis 2050 gehen einige Szenarien sogar von mittleren Sanierungsraten von bis zu 3,9 Prozent aus.⁷⁸ Die Realität zeigt hingegen einen anderen Trend: Tatsächlich ist die Sanierungsrate von 2021 bis 2023 auf 0,7 Prozent gesunken.⁷⁹ Für die gesamte Union hat die EU-Kommission im Rahmen der Strategie *Eine Renovierungswelle für Europa*⁸⁰ das Ziel ausgerufen, die jährliche Sanierungsrate zu verdoppeln, was bis 2030 eine Sanierung von 35 Millionen Gebäuden erfordern würde.⁸¹

Mit steigender Energieeffizienz der Gebäude und wachsendem Anteil erneuerbarer Energien bei der Energiebereitstellung verschieben sich die Anteile der Treibhausgasemissionen zunehmend von den energiebedingten Emissionen aus dem Gebäudebetrieb hin zu den sogenannten grauen Emissionen, die bei der Herstellung und dem Transport von Baumaterialien sowie bei der Errichtung und Entsorgung von Gebäuden anfallen. Ein

Vergleich zwischen einem Neubau nach gesetzlich vorgeschriebenem energetischem Mindeststandard mit energieeffizienteren Gebäuden zeigt, dass der Treibhausgasausstoß für die Errichtung von Gebäuden mit zunehmend energieeffizienter Bauweise steigt, während jedoch die Gesamtemissionen sinken.⁸² Zukünftig werden die grauen Emissionen daher immer mehr zum dominierenden Emissionsfaktor im Lebenszyklus von Gebäuden werden.

Da Wohnen ein Grundbedürfnis darstellt, sind bei der Gestaltung des Gebäude- und Bausektors soziale Aspekte von großer Bedeutung. Die ausreichende Bereitstellung von bezahlbarem Wohnraum ist daher ein zentrales politisches Ziel der Bundesregierung.⁸³ Lösungsansätze dafür werden beispielsweise im Rahmen des BMBF-geförderten acatech Projekts *Bauen & Wohnen: Plattform für Vernetzung, Synthese und Transfer* erarbeitet.⁸⁴ Die Aufgabe, ausreichend Wohnraum bereitzustellen und gleichzeitig Ressourcen und Umwelt zu schonen, ist im Zeitverlauf allerdings keineswegs leichter geworden, denn die durchschnittliche Wohnfläche pro Kopf hat sich in Deutschland zwischen 1965 und 2020 von 22,3 Quadratmetern auf 47,7 Quadratmeter mehr als verdoppelt.⁸⁵ Die damit einhergehende Versiegelung von zuvor meist landwirtschaftlich genutzten Flächen führt wiederum zur Fragmentierung von Ökosystemen und zu einer Beeinträchtigung der ökologischen Funktion von Böden und des Wasserhaushalts.⁸⁶ Zudem führt die steigende Wohnfläche zu einem Mehrverbrauch an Energie, der den Einsparungen durch Steigerung der Energieeffizienz entgegenwirkt.⁸⁷

Und nicht zuletzt ist bei der Planung von Gebäuden auch die Anpassung an die zunehmenden Folgen des Klimawandels mitzudenken: Schutz vor Hitze, Starkregen und Überflutungen.

74 | Vgl. Schmatzberger et al. 2022.

75 | Vgl. Umweltbundesamt 2019a.

76 | Vgl. Stiftung Klimaneutralität et al. 2022.

77 | Vgl. Umweltbundesamt 2019b.

78 | Vgl. ebd.

79 | Vgl. BuVEG 2024.

80 | Vgl. Europäische Kommission 2020d.

81 | Vgl. Deutsche Energie-Agentur 2023.

82 | Vgl. Schlegl et al. 2019.

83 | Vgl. BMWBS 2023.

84 | Vgl. acatech 2024.

85 | Vgl. Umweltbundesamt 2023b.

86 | Vgl. Circular Economy Initiative Deutschland 2021b.

87 | Vgl. Bierwirth 2023.

3.2 Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft im Gebäude- und Bausektor

Gebäude sind komplexe, extrem langlebige Unikatprodukte. Die unterschiedliche Lebensspanne der Baukonstruktion (mehrere Jahrzehnte) und der Gebäudetechnik (15 bis 20 Jahre) führt dazu, dass während der Betriebsdauer eines Gebäudes die Gebäudetechnik mehrfach nachgerüstet werden muss. R-Strategien können daher sowohl auf Ebene des Gesamtgebäudes als auch auf Bauteilebene (einschließlich Gebäudetechnik und Innenausstattung) zur Anwendung kommen.

Bis vor einigen Jahren lag der Fokus der deutschen Umweltpolitik im Gebäudebereich auf dem Ziel, durch eine Erhöhung der Energieeffizienz und den Einsatz von erneuerbaren Energien zur Wärmebereitstellung die CO₂-Emissionen während der Nutzungsphase zu senken. Wie oben bereits erwähnt (siehe Kapitel 3.1), wurde in jüngerer Zeit jedoch die Bedeutung der grauen Emissionen, die bei der Errichtung eines Gebäudes entstehen, als wichtiger Faktor für die Umweltbilanz von Gebäuden identifiziert, sodass diese grauen Emissionen zunehmend Gegenstand politischer Maßnahmen sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene werden.⁸⁸

In zentralen deutschen und europäischen Strategiedokumenten zur Kreislaufwirtschaft wie dem *Entwurf der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie*⁸⁹ aus dem Bundesumweltministerium und dem *Aktionsplan Kreislaufwirtschaft*⁹⁰ der EU-Kommission wird der Bausektor als prioritäres Handlungsfeld definiert. Die oben bereits angesprochene Rahmenstrategie *Renovierungswelle*⁹¹ der EU-Kommission von 2020 zielt zudem darauf ab, durch eine Verdopplung der Sanierungsquote bis 2030 die Energieeffizienz des europäischen Gebäudebestands zu verbessern. Dabei benennt sie die Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes und das Prinzip der Kreislaufwirtschaft als

zentrale Grundsätze für die Gebäuderenovierung. Die Strategie führt zahlreiche konkrete Maßnahmen mit Bezug zur Kreislaufwirtschaft und zur Digitalisierung auf, unter anderem eine Überarbeitung der EU-Bauproduktenverordnung, den Ausbau von Wiederverwendungs- und Recyclingplattformen zur Förderung eines Binnenmarkts für Sekundärrohstoffe, die Einführung von digitalen Gebäudelogbüchern⁹² sowie die Förderung der Digitalisierung im Bausektor. Die Umsetzung der verschiedenen Vorhaben ist zum jetzigen Zeitpunkt unterschiedlich weit vorangeschritten.

Die im April 2024 verabschiedete Novelle der EU-Richtlinie zur Gesamteffizienz von Gebäuden (kurz: Gebäuderichtlinie),⁹³ die bis Mai 2026 in nationales Recht umgesetzt werden muss, fordert eine schrittweise Berücksichtigung der Lebenszyklusemissionen, beginnend bei Neubauten und Renovierungen. Für neue Gebäude müssen die Lebenszyklusemissionen ab 2028 oder 2030 (je nach Größe des Gebäudes) im Energieausweis des Gebäudes dokumentiert werden. Die Mitgliedstaaten sind angehalten, bei Grenzwerten für die Energieeffizienz neuer Gebäude ab 2030 den gesamten Lebenszyklus zu berücksichtigen. Eine standardisierte Vorgehensweise für die Berechnung der Lebenszyklusemissionen von Gebäuden findet sich in den Normen DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044 und DIN EN 15978, im freiwilligen europäischen Berichtsrahmen *Level(s)*⁹⁴ ist zudem eine Zertifizierungsmethode definiert. Im deutschen Gebäudeenergiegesetz⁹⁵ werden graue Emissionen bislang jedoch nicht berücksichtigt.

Gemäß EU-Gebäuderichtlinie muss jeder Mitgliedstaat darüber hinaus einen Gebäuderenovierungsplan erstellen, der als Bestandteil eine nationale Datenbank enthält, in der die Energieausweise der Gebäude hochzuladen sind. Die Datenbank soll mit den (freiwilligen) digitalen Gebäudelogbüchern interoperabel sein. In Deutschland werden solche digitalen Gebäudelogbücher allerdings bislang noch nicht eingesetzt. Laut Koalitionsvertrag⁹⁶ ist aber bereits die Einführung eines digitalen

88 | Vgl. Schmatzberger et al. 2022.

89 | Vgl. BMUV 2023.

90 | Vgl. Europäische Kommission 2020b.

91 | Vgl. Europäische Kommission 2020d.

92 | In einem digitalen Gebäudelogbuch werden Daten zu einem Gebäude über den gesamten Lebenszyklus zusammengeführt, beispielsweise Angaben zu verbauten Materialien und Energieeffizienz. Durch Aktualisierungen während der Betriebsphase (z. B. Angaben zu Umbauten und Eigentümerwechseln) werden die Daten stets auf dem aktuellen Stand gehalten.

93 | Vgl. Richtlinie (EU) 2024/1275.

94 | Vgl. Europäische Kommission 2023b.

95 | Vgl. Gebäudeenergiegesetz 2023.

96 | Vgl. SPD/DIE GRÜNEN/FDP 2021.



Gebäuderessourcenpasses⁹⁷ geplant. In Schweden, Frankreich und Belgien kommen bereits digitale Gebäudelogbücher zum Einsatz.⁹⁸

In der Bauproduktenverordnung werden des Weiteren EU-weit einheitliche Produkt- und Prüfstandards für Bauprodukte definiert. Die im April 2024 vom Europäischen Parlament verabschiedete Novelle⁹⁹ verpflichtet Hersteller, für ihre Produkte Angaben zu festgelegten Umweltindikatoren zu machen. Die Anwendung der neuen Regelung, die für die Mitgliedstaaten verbindlich sein wird, erfolgt schrittweise, um diesen Zeit zu geben, ihre nationale Gesetzgebung anzupassen.¹⁰⁰ Die Einrichtung eines digitalen Produktpasssystems für Bauprodukte soll dabei durch delegierte Rechtsakte geregelt werden. Um den Markt für gebrauchte Bauprodukte anzukurbeln, sieht die Verordnung außerdem die Möglichkeit vor, harmonisierte technische Spezifikationen für gebrauchte Bauprodukte zu entwickeln.

Auch der Ausbau des Recyclings von Baumaterialien ist ein Ziel der EU, kodifiziert in der Europäischen Abfallrahmenrichtlinie.¹⁰¹ Die unverbindliche Leitlinie *Protokoll über die Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen*¹⁰² und die *Leitlinien für Abbruch- und Umbauarbeiten an Gebäuden vorgeschaltete Abfallaudits*¹⁰³ sowie der noch in Entwicklung befindliche Leitfaden DIN SPEC 91484 für die Erstellung von Pre-Demolition Audits dienen zudem dem Zweck, eine bessere Bewirtschaftung von Abbruchabfällen zu ermöglichen und das Vertrauen in recycelte Baustoffe zu erhöhen. In Deutschland soll darüber hinaus die geplante Abfallende-Verordnung¹⁰⁴ die 2023 in Kraft getretene Ersatzbaustoffverordnung¹⁰⁵ ergänzen und die Verwendung mineralischer Ersatzbaustoffe als hochwertige Recyclingprodukte unter anderem im Hochbau erleichtern.

Bei Abbau und Sanierung von Gebäuden sowie der Rückgewinnung von Baustoffen ist der sachgemäße Umgang mit Schadstoffen – insbesondere Asbest – zu beachten, um Menschen und Umwelt nicht zu gefährden. Der Umgang mit Schadstoffen ist in der Gefahrstoffverordnung¹⁰⁶ geregelt. Die im August 2024 vom Bundeskabinett beschlossene Änderung der Gefahrstoffverordnung wird von mehreren Verbänden der Baubranche für die fehlende Erkundungspflicht im Hinblick auf Asbest im Vorfeld von Baumaßnahmen kritisiert.¹⁰⁷

Für Gebäude als Investitionsgüter ist nicht zuletzt die EU-Taxonomieverordnung¹⁰⁸ relevant, die zum Ziel hat, Investitionen in klimafreundliche Vorhaben zu lenken. Der Übergang zur Kreislaufwirtschaft ist in der Taxonomie als Nachhaltigkeitskriterium definiert. Ebenfalls von Bedeutung ist die im Januar 2023 in Kraft getretene EU-Richtlinie zur Unternehmens-Nachhaltigkeitsberichterstattung (Corporate Sustainability Reporting Directive – CSRD),¹⁰⁹ die Unternehmen ab einer bestimmten Größe zur Abgabe eines jährlichen Nachhaltigkeitsberichts unter Verwendung einheitlicher europäischer Standards – der sogenannten European Sustainability Reporting Standards (ESRS) – verpflichtet.

3.3 Anwendungsbeispiel: Einfamilienhaus im Gebäudebestand

Mit etwa 13 Millionen Gebäuden stellen Einfamilienhäuser¹¹⁰ etwa zwei Drittel aller Wohngebäude in Deutschland.¹¹¹ Viele davon haben einen schlechten energetischen Standard und müssen in den nächsten 20 Jahren saniert werden, um einen

97 | Ein Gebäuderessourcenpass enthält Angaben zu den verbauten Materialien, sowie ihrer Kreislauffähigkeit und Ökobilanz.

98 | Vgl. Gebäudeforum Klimaneutral 2023.

99 | Vgl. Europäisches Parlament 2024.

100 | Vgl. Handwerksblatt 2024.

101 | Vgl. Richtlinie 2008/98/EG.

102 | Vgl. Europäische Kommission 2016.

103 | Vgl. Europäische Kommission 2018.

104 | Vgl. BMUV 2023.

105 | Vgl. Ersatzbaustoffverordnung 2023.

106 | Vgl. Gefahrstoffverordnung 2024.

107 | Vgl. Bundesvereinigung Bauwirtschaft et al. 2024.

108 | Vgl. Verordnung (EU) 2020/852.

109 | Vgl. Richtlinie (EU) 2022/2464.

110 | Der genannte Wert umfasst nur Einfamilienhäuser im engeren Sinne, das heißt Gebäude mit einer Wohneinheit. In einigen Statistiken werden die 3 Millionen Häuser mit zwei Wohneinheiten in die Zahl der Einfamilienhäuser eingerechnet.

111 | Vgl. Deutsche Energie-Agentur 2024.

klimaneutralen Gebäudebetrieb zu ermöglichen. Neben einer besseren Wärmedämmung ist hierfür Studien zufolge die Umstellung der Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien ausschlaggebend, wofür Wärmepumpen und eine Ausweitung der netzgebundenen Wärmeversorgung (Nah- und Fernwärme) eine zentrale Rolle spielen.¹¹²

Aus Umweltsicht stellen Einfamilienhäuser eine eher ungünstige Form der Wohnbebauung dar. Gegenüber kompakten Bauformen wie Mehrfamilienhäusern sind der Heiz- und Kühlbedarf sowie die Treibhausgasemissionen und der Ressourcenaufwand über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes hinweg bei Ein- oder auch Zweifamilienhäusern höher.¹¹³ Die niedrige Einwohnerdichte in Einfamilienhausgebieten führt zudem tendenziell zu mehr Pkw-Mobilität, da eine gute Anbindung an den öffentlichen Personenverkehr dort nicht selten fehlt und Ziele (zum Beispiel Arbeitsplatz, Einkaufsgelegenheiten, Orte für Freizeitaktivitäten) nicht fußläufig zu erreichen sind. Um den großen Bestand an Einfamilienhäusern künftig auf möglichst nachhaltige Weise nutzen zu können, sind daher Konzepte gefragt, die diese Faktoren mitberücksichtigen.

Während der Einsatz digitaler Arbeitsweisen im Neubau heute bereits Standard ist, werden digitale Technologien bei der Sanierung bestehender Gebäude trotz ihres unbestreitbaren Nutzens nach wie vor weit weniger verwendet.¹¹⁴ Da Hochbauunternehmen fast 70 Prozent ihrer Umsätze im Bestandsbau erwirtschaften,¹¹⁵ existiert also noch großes Wachstumspotenzial für den Einsatz digitaler Technologien und Anwendungen, die auf Sanierungsprojekte zugeschnitten sind.

Als Anwendungsbeispiel für das Potenzial solcher digitalen Enabler im Gebäudebereich wird daher der Umbau oder die Sanierung eines bestehenden Einfamilienhauses analysiert. Viele der im Folgenden aufgeführten Ansätze sind aber ebenso für die Errichtung von Neubauten relevant. Die für die vier Phasen des Lebenszyklus identifizierten zirkularwirtschaftlichen Ansätze werden in Abbildung 6 zusammengefasst und den verschiedenen R-Strategien zugeordnet. Zusätzlich ist dargestellt, welche der in Kapitel 2.3 identifizierten digitalen Technologiefunktionen für

die Umsetzung der zirkulären Ansätze relevant sind. Maßnahmen, die sich auf das Design des Umbaus oder der Sanierung beziehen, sind in Abbildung 6 der Phase „Produktdesign“ zugeordnet. Zusätzlich wird die Sanierung als Ganzes in der Phase „Nutzung“ aufgeführt.

Die folgende Analyse konzentriert sich auf den Einsatz der hier relevanten R-Strategien zur Verminderung von Rohstoffmenge und Abfallaufkommen. Maßnahmen zur Einsparung von Energie während der Nutzungsphase (zum Beispiel durch optimiertes Lüftungsverhalten oder die effiziente Einstellung der Heizung) werden hier nicht im Detail betrachtet. Sie stellen aber zweifellos ein weiteres, vielschichtiges Handlungsfeld dar, in dem digitale Technologien und Anwendungen – vor allem im Rahmen der Gebäudeautomation – eine klima- und umweltpolitisch wichtige Rolle spielen können.¹¹⁶

Produktdesign

Wie auch bei anderen Produkten legt das Produktdesign bei Gebäuden die Grundlage dafür, dass diese lange und effizient genutzt und am Ende der Lebenszeit Bauteile und Materialien wiedergewonnen werden können. Aufgrund der sehr langen technischen Lebensdauer von Gebäuden ist eine adaptive Gestaltung vorteilhaft, sodass deren spätere Anpassung an eine andere Nutzungsart und andere Anforderungen möglich ist. Modulare Einheiten, die zu einem späteren Zeitpunkt an einem anderen Ort wiederverwendet werden können, erhöhen ebenfalls die Flexibilität. Um Bauteile und Materialien wiederverwenden zu können, sollten zudem Verbindungsmethoden gewählt werden, die eine spätere Demontage erleichtern (zum Beispiel Schraubverbindungen).¹¹⁷ Detaillierte Strategien für sogenannte reversible Gebäude, die sowohl solche Nutzungsänderungen als auch die Demontage ermöglichen, wurden im europäischen Projekt *Buildings as Material Banks* (BAMB) bereits erarbeitet.¹¹⁸ Ein wichtiger Aspekt für das nachhaltige Design eines Gebäudes ist die regionale Verfügbarkeit von wiedergewonnenen oder natürlichen Materialien, die sich von Fall zu Fall unterscheidet.

Nachhaltigen Wohnraum schaffen im Bestand: Aufgrund der hohen grauen Emissionen bei der Errichtung eines neuen

112 | Vgl. Ragwitz et al. 2023.

113 | Vgl. Umweltbundesamt 2023b.

114 | Vgl. Mittelstand-Digital 2020.

115 | Vgl. ebd.

116 | Vgl. bitkom 2021.

117 | Gegenwärtig wird zudem an lösbarem Putz und reversiblen Klebverbindungen wird geforscht.

118 | Vgl. Durmisevic 2019.



Phasen des Produktlebenszyklus	Ansätze der Kreislaufwirtschaft	R-Strategie	Technologiefunktionen			
			Daten-sammlung	Ver-netzung	Model-lierung	Automa-tisierung
Produkt-design ↓	Nachhaltigen Wohnraum schaffen im Bestand	refurbish	●	●	●	
	Kooperativ planen mit Building Information Modeling	alle		●	●	
	3D-Modell des Gebäudes erstellen	refurbish	●		●	
	Ökobilanzen in Planungssoftware integrieren	reduce			●	
	Konstruktion mit zirkulären Materialien	reuse			●	
	Digitale Assistenten einsetzen	alle		●	●	
	Bauteile aus naturbasierten Materialien herstellen	reuse	●		●	●
Produktion ↓	Ganze Bauteile wiederverwenden	remanufacture	●		●	●
	Modular bauen mittels Vorfertigung	reduce			●	●
	Digitale Benchmarkprojekte etablieren	alle		●	●	
Nutzung ↓	Gebäude durch neue Wohnkonzepte flexibel nutzen	rethink	●	●		
	Gebäude (seriell) sanieren	refurbish	●		●	●
	Zustand von Gebäuden und Bauteilen in Echtzeit überwachen	repair	●		●	●
	Digitale Zwillinge von Quartieren erstellen	rethink	●	●	●	
	Materialbörsen und Materialkataster etablieren	reuse		●		
Lebensende ↓	Mit Produktpässen für Gebäude und Bauteile Informationen teilen	reuse	●	●		
	Zustand von Bauteilen bewerten und zertifizieren	reuse	●		●	
	Rücknahmesysteme für Bauteile etablieren	reuse		●		
	Gebäude rückbauen statt abreißen	remanufacture	●	●		

Relevanz der Technologiefunktionen zur Umsetzung der Ansätze:

- sehr hoch
- hoch

Abbildung 6: Digital gestützte Kreislaufwirtschafts-Ansätze bei Umbau oder Modernisierung eines Einfamilienhauses im Gebäudebestand (Quelle: eigene Darstellung)

Gebäudes sollte wann immer möglich der Gebäudebestand genutzt und gegebenenfalls an eine neue Verwendung angepasst werden. Bei Einfamilienhäusern kann der Umbau zu einem Haus mit mehreren Wohneinheiten durch Aufstockung dazu beitragen, mehr Wohnraum auf der gleichen Grundfläche zu schaffen und so weiterer Flächenversiegelung entgegenzuwirken. Eine Geschosstrennung wiederum ermöglicht die Aufteilung der bestehenden Wohnfläche in kleinere Wohneinheiten und infolgedessen eine effizientere Nutzung. Für eine effiziente Nutzung des Gebäudebestands und die nachhaltige Gestaltung von Quartieren braucht es allerdings eine gute Datenbasis. Digitale Planungstools befinden sich bereits auf dem Markt; so hat das Start-up Urbanistic ein digitales Stadtplanungstool für Stadtplanerinnen und -planer, Architektinnen und Architekten, Projektentwickelnde und Kommunen gestaltet, um insbesondere die frühe architektonische Planungsphase bei entsprechenden Bauprojekten zu verkürzen.¹¹⁹

Kooperativ planen mit Building Information Modeling: Bauherrin oder Bauherr, Architektin oder Architekt, Bau- und Prüfingenieurinnen oder -ingenieure sowie die umsetzenden Gewerke – in einem Bauprojekt müssen viele Beteiligte möglichst effizient zusammenarbeiten. Building Information Modeling (BIM) ist eine digitale Anwendung zur 3D-Gebäudeplanung, die es allen Projektpartnern ermöglicht, an einem gemeinsamen digitalen Datenmodell zu arbeiten und Änderungen direkt im sogenannten Koordinationsmodell nachzuvollziehen. Eine objektbasierte Kommunikation und die Integration mehrerer Fachmodelle zu einem gemeinsamen BIM-Modell unterstützen eine effiziente Planungsweise. Entscheidend für den effizienten Datenaustausch zwischen den Akteuren sind allerdings verbindliche, offene Standards, die bisher nicht existieren. Bei der zirkulären Planung ist ein verknüpftes Datenmodell noch wichtiger als bei der linearen Planung, um auf die Verfügbarkeit und die spezifischen Eigenschaften recycelter Bauteile und Materialien reagieren zu können. Interessant ist auch die Verknüpfung von BIM-Modellen mit Simulationssoftware, um die Planung mit Wirkungsabschätzungen (zum Beispiel Energiebedarf, Lebenszyklusanalyse, Innenraumqualität, Akustik) zu verbinden. Während die Planung mittels BIM bei mehrgeschossigen Bauten bereits vergleichsweise weitverbreitet ist, wird sie im Einfamilienhausbau aus Kostengründen bisher selten eingesetzt. Die Möglichkeit zur Visualisierung von Planungsständen bietet aber gerade in diesem Segment Chancen, die Vorteile zirkulärer Ansätze an

Bauherrinnen und Bauherren zu vermitteln. Denn die privaten Gebäudeeigentümerinnen und -eigentümer von Einfamilienhäusern, die ihre Immobilie meist selbst nutzen, sind mit den Möglichkeiten gebrauchter Materialien und Bauteile häufig bislang wenig vertraut. Die Veranschaulichung zirkulärer Designs im Modell kann die Akzeptanz einer solchen Bauweise erhöhen. Für den Umbau von Bestandsbauten muss dabei zunächst ein 3D-Modell des betreffenden Gebäudes erstellt und in das BIM-System eingepflegt werden.

3D-Modell des Gebäudes erstellen: Eine wichtige Grundlage für Sanierungs- und Umbaumaßnahmen mittels BIM ist ein präzises Computer-aided Design – ein sogenanntes CAD-Modell –, das heißt ein gezeichnetes 3D-Konstruktionsmodell des Bestandsgebäudes. Hierfür wird mithilfe eines Laserscans zunächst eine Punktwolke (Punkte der gescannten Oberfläche) erstellt. Die folgende Erstellung eines Oberflächenmodells aus der Punktwolke – eine Art digitales Abbild des Gebäudes – ist ein arbeitsintensiver Schritt, der nur von erfahrenen Fachleuten durchgeführt werden kann. Eine (Teil-)Automatisierung dieses Schritts mittels KI könnte künftig helfen, die Kosten für die Erstellung eines CAD-Modells zu senken und dieses Werkzeug so perspektivisch auch für Sanierungs- und Umbaumaßnahmen von Einfamilienhäusern wirtschaftlich attraktiv zu machen.

Ökobilanzen in Planungssoftware integrieren: Da ein Gebäude aus vielen verschiedenen Bauteilen und Materialien besteht, ist die Ermittlung der Umweltauswirkungen komplex. Nicht zuletzt sind neben der Herstellung der Bauteile die zu erwartenden Treibhausgasemissionen während der Nutzungsphase zu berücksichtigen. So kann sich beispielsweise die Frage stellen, ob es klimafreundlicher ist, durch den Einsatz gebrauchter Fenster graue Emissionen einzusparen oder neue Fenster mit niedrigerem Wärmeverlust einzusetzen. Eine Lebenszyklusanalyse gibt Antworten auf solche Fragen und ermöglicht es, verschiedene Planungsvarianten im Hinblick auf ihre voraussichtlichen Umweltauswirkungen zu vergleichen. Einige Tools befinden sich bereits auf dem Markt. So bietet das Unternehmen Madaster einen CO₂-Rechner an, der basierend auf Daten aus einem BIM-Modell und maschinell auslesbaren Umwelt-Produktdeklarationen (Environmental Product Declarations, EPD) sowie Ökobilanzdaten der Onlinedatenbank ÖKOBAUDAT des Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) die Lebenszyklusemissionen eines Gebäudes berechnet.¹²⁰ Je besser die

119 | Vgl. Tischer 2021.

120 | Vgl. Madaster 2022.



Daten sind, die zu konkreten Produkten spezifischer Anbieter zur Verfügung stehen, desto genauer lassen sich die Umweltauswirkungen einschätzen. Die Planungssoftware sollte daher immer wieder an den Stand neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse angepasst und weiterentwickelt werden. Langfristig könnten geeignete Schnittstellen der Planungssoftware zu Bauteil- und Materialbörsen sogar ermöglichen, dass die Software auf verfügbare Angebote reagiert und Vorschläge macht, wie die Umweltauswirkungen weiter reduziert werden könnten.

Konstruieren mit zirkulären Materialien: Naturbasierte Materialien (zum Beispiel Stroh, Lehm, verschiedene Holzarten) haben teilweise andere Eigenschaften als herkömmliche Baumaterialien, die bei der Geometrie von Bauteilen und Gebäuden berücksichtigt werden müssen. Bei der Verwendung recycelter Bauteile muss zudem gegebenenfalls der Entwurf an diese angepasst werden. Hierfür sind entsprechende digitale Konstruktionstools erforderlich. Da auch zirkuläre Materialien nur begrenzt verfügbar sind, ist ein möglichst sparsamer Materialeinsatz (zum Beispiel durch Leichtbau) anzustreben.

Digitale Assistenten einsetzen: Eine Gebäudesanierung oder gar einen größeren Umbau zu planen und umzusetzen ist ein komplexes Projekt. Architektinnen und Architekten, verschiedene Fachplanerinnen und -planer sowie Handwerksbetriebe und Finanzdienstleister müssen koordiniert werden, Genehmigungen sind einzuholen, zahlreiche gesetzliche Vorschriften und Normen sind zu berücksichtigen. Für Bauherinnen und Bauherren ist es schwer, den Überblick zu behalten. Insbesondere Privatpersonen, wie Einfamilienhausbesitzer sind dann schnell überfordert und schrecken vor der eigentlich notwendigen Modernisierung ihres Hauses womöglich zurück – auch weil es ihnen an Wissen über Finanzierungs- und Fördermöglichkeiten fehlt oder sie Zirkularitäts- und Nachhaltigkeitspotenziale übersehen. KI-basierte digitale Assistenten wie Chatbots oder Avatare können Hauseigentümer hier unterstützen, indem sie Fachwissen auswerten, zielgruppengerecht aufbereiten und die Abstimmung zwischen den Beteiligten koordinieren. Eine Voraussetzung dafür sind maschinenlesbare Unterlagen zu jedem Prozessschritt.

Produktion

Im Bausektor ist neben materialsparender Fertigung (zum Beispiel 3D-Druck) sowie der Wiederverwendung von Bauteilen und recycelten Materialien der Ersatz klimaschädlicher Rohstoffe wie Stahl und Beton durch nachhaltige Naturrohstoffe ein

wesentlicher zirkulärer Ansatz. Die Kreislaufführung von Materialien benötigt dabei eine gänzlich andere Logistik als die Verarbeitung von Primärrohstoffen. Dies bietet Potenziale für neue Geschäftsmodelle, birgt aber auch Hemmnisse, unter anderem bei Lagerung und durchgehenden Lieferketten.

Bauteile aus naturbasierten Materialien herstellen: Bisher besteht umfangreiche Erfahrung mit dem Einsatz von Nadelholz als Baumaterial (zu Rahmenbedingungen und Gestaltungsoptionen für den Holzbau siehe auch acatech POSITION *Holzbauierte Bioökonomie. Nachhaltig, zirkulär, klimaresilient*¹²¹). Aufgrund des Klimawandels (steigende Temperaturen, trockenere Witterungsperioden und heftigere Stürme) wird der Anbau von Nadelhölzern, insbesondere der baulich bislang vielfach genutzten Fichte, aber zunehmend schwieriger. Daher sollte der Fokus künftig auf andere natürliche Rohstoffe gelegt werden, die voraussichtlich besser verfügbar sein werden und auch im Hinblick auf die Umweltauswirkungen während ihres Anbaus vorteilhafter sind. Dazu gehören Laubhölzer und Pflanzen wie Weiden oder Röhricht, die an wiedervernässten Moorstandorten angebaut werden können. Auch die Verwendung von Reststoffen wie Stroh oder Kleinholzstücken ist aus ökologischer Sicht attraktiv. Für die Verarbeitung solcher Materialien in einer modernen Bauwirtschaft müssen allerdings noch geeignete Verfahren entwickelt werden. Digitale Technologiekonzepte wie Robotik und Tailored Fibre Placement können helfen, die Verarbeitung der meist relativ inhomogenen Stoffe zu maßgeschneiderten oder standardisierten Bauteilen zu automatisieren – was eine Skalierung der Produktion sowie eine Senkung der Kosten ermöglichen würde.

Ganze Bauteile wiederverwenden: Remanufacturing und anschließende Wiederverwendung ganzer Bauteile spart gegenüber der Herstellung neuer Bauteile – selbst wenn diese aus recycelten Materialien hergestellt werden – Energie und Emissionen. Ein prägnantes Beispiel hierfür sind Betonbauteile. Problematisch ist bei der Betonherstellung insbesondere der Zementbedarf, denn die Zementproduktion ist sehr klimaschädlich und wird auch zukünftig schwer zu dekarbonisieren sein, da unvermeidbare Prozessemissionen anfallen. Durch die Nutzung von Recyclingbeton lassen sich diese Emissionen nicht vermeiden, da auch die Herstellung von Recyclingbeton Zement benötigt. Durch die Wiederverwendung ganzer Betonbauteile hingegen kann der Zementbedarf reduziert werden. Digitale Technologien können dabei helfen, die wiedergewonnenen Bauteile zu prüfen, aufzubereiten (zum Beispiel durch Zuschneiden oder Schaffen

121 | Vgl. acatech 2022.

neuer Verbindungen) und – mittels additiver Fertigung – zu reparieren.

Modular bauen mittels Vorfertigung: Eine Vorfertigung ganzer Gebäudeteile statt einzelner Bauprodukte ermöglicht einen sparsameren Materialeinsatz aufgrund des geringeren Materialverschnitts auf der Baustelle. Sie kann zudem dazu beitragen, die Produktivität in der Bauwirtschaft zu erhöhen. Für die Fertigung von Bauteilen in Produktionsstraßen sind digitale Enabler im Bereich der Automatisierung relevant. So hat das Startup Triqbriq¹²² ein modulares Holzbausystem entwickelt, bei dem Holzbausteine auf der Baustelle aufeinander gesteckt und miteinander verdübelt werden. Beim Abbau eines entsprechend gestalteten Gebäudes können die Bausteine also ausgebaut und anschließend wiederverwendet werden.

Digitale Benchmarkprojekte etablieren: Digitale Benchmarkprojekte, die die verschiedenen Schritte eines zirkulären Planungs- und Bauvorhabens abbilden, könnten für verschiedene Gebäudekategorien erarbeitet und den relevanten Akteuren zur Verfügung gestellt werden. Projektteams könnten diese dann als Basis für ihr Planungs- und Bauprojekt verwenden und individuell anpassen. Durch die Umsetzung der entsprechend vorgeplanten, typisierten Arbeitsabläufe könnten so Zeit und Kosten gespart werden. Als digitale Infrastruktur für die Entwicklung und Bereitstellung solcher Benchmarkprojekte bietet sich die von der Domäne Planen/Bauen/Betreiben¹²³ für den Bausektor entwickelte Gaia-X-Struktur an (siehe dazu Abschnitt „Nutzung“, „digitaler Zwilling von Quartieren“).

Nutzung

Einfamilienhäuser sind meist Eigentum von Privatpersonen und werden oft über viele Jahrzehnte von diesen selbst bewohnt; auch bei Änderungen der Lebenssituation (zum Beispiel Auszug der Kinder) ist die Hürde für einen Umzug hoch. Bei älteren Gebäuden mit einem schlechten energetischen Standard ist wegen der hohen energiebedingten Emissionen für die Beheizung eine Verlängerung der Lebensdauer des Gebäudes im Istzustand keine umweltfreundliche Option, eine energetische Sanierung daher dringend geboten.

Gebäude durch neue Wohnkonzepte flexibel nutzen: Eine flexiblere Nutzung des Wohnungsbestands könnte dazu beitragen, die Nutzung von Wohnfläche zu intensivieren und dadurch dem

aus ökologischer Sicht problematischen Wachstumstrend der Pro-Kopf-Wohnfläche hierzulande entgegenzuwirken. Mögliche Intensivierungskonzepte umfassen Wohnungstausch, gemeinschaftliche Wohnformen wie das Konzept des Mehrgenerationenhauses und Gemeinschaftsflächen. Leichter umzusetzen sind solche Konzepte dann, wenn bereits das Design des Gebäudes die Anpassbarkeit an sich ändernde Anforderungen vorsieht, zum Beispiel baulich leicht teilbare Wohnungen. Hierfür ist unter anderem erforderlich, die Verfügbarkeit von Wasser- und Abwasseranschlüssen durch mehrere Leitungsstränge sicherzustellen. Digitale Technologien können in diesem Zusammenhang eingesetzt werden, um Informationen adressatengerecht bereitzustellen und um Akteure zu vernetzen (zum Beispiel über digitale Wohnungstauschbörsen).

Gebäude (seriell) sanieren: Durch eine energetische Sanierung kann der Energiebedarf eines Gebäudes erheblich reduziert werden. Die Installation von Anlagen zur Gewinnung erneuerbarer Energien (zum Beispiel Photovoltaik, Erdwärme) kann die Treibhausgasemissionen während der Nutzung weiter senken. Bei der seriellen Sanierung werden zudem maßgeschneiderte Bauteile für das zu sanierende Gebäude bereits in der Fabrik vorgefertigt, sodass sie anschließend innerhalb kurzer Zeit montiert werden können. Durch die passgenaue Herstellung werden Bauabfälle vermieden. Ein weiterer Vorteil ist, dass sich die Baustellenzeit verkürzt. Wichtige Voraussetzung hierbei ist ein 3D-Gebäudemodell mit sehr genauen Maßangaben (Zur Erstellung solcher Modelle siehe Abschnitt „Produktdesign“). Bisher wird serielle Sanierung in Deutschland fast ausschließlich bei Mehrfamilienhäusern eingesetzt. Bestimmte Aspekte wie die Vorfertigung von Bauteilen und damit einhergehende Verkürzung der Baustellenzeit erscheinen aber auch für den Einfamilienhausbereich attraktiv. Eine interessante Schnittstelle ergibt sich außerdem zwischen serieller Sanierung und Remanufacturing, wenn im Rahmen der Umarbeitung wiedergewonnener Bauteile Austausch Elemente für die serielle Sanierung vorgefertigt werden können.

Zustand von Gebäuden und Bauteilen in Echtzeit überwachen: Mittels Sensorik und Auswertung der erfassten Daten lässt sich der Zustand von Gebäuden und Bauteilen in Echtzeit überwachen, sodass eine bedarfsgerechte Wartung und Reparatur möglich ist (Predictive Maintenance). Dadurch können Kosten gespart und die Lebensdauer von Gebäuden oder Bauteilen verlängert werden. Daten zur Nutzung des Gebäudes können für

122 | Vgl. Triqbriq 2024.

123 | Vgl. Gaia-X Hub im Erscheinen.



eine intelligente Steuerung der Gebäudetechnik (beispielsweise vorausschauende, automatisierte Steuerung der Heizung/Kühlung) verwendet werden. Eine Kopplung des BIM-Modells mit dem Facility-Management-Modell kann dabei Potenziale zur Einsparung von Energie erschließen.

Digitale Zwillinge von Quartieren erstellen: Für die zukünftige Stadtplanung energieeffizienter Quartiere und für die kommunale Wärmeplanung wäre es hilfreich, Daten aus den BIM-Modellen einzelner Gebäude zu verknüpfen, sodass mit der Zeit digitale Zwillinge ganzer Quartiere entstehen. Für Gebäude, für die noch keine BIM-Modelle oder digitale Gebäuderessourcenpässe vorliegen, könnten die Daten zunächst auf Basis vergleichbarer, bereits besser dokumentierter Gebäude abgeschätzt werden. Dies erfordert übergreifende Datenökosysteme mit standardisierten Schnittstellen und Formaten für den Datenaustausch, auch in Zusammenhang mit Materialbörsen und Materialkatastern (siehe Abschnitt „Lebensende“). Das Projekt *Gaia-X* hat zum Ziel, die Grundlagen für eine souveräne und vertrauensvolle Datennutzung zu definieren und so die Basis für den Aufbau eines Ökosystems von europäischen Datenräumen zu schaffen.¹²⁴ Die Domäne Planen/Bauen/Betreiben des deutschen *Gaia-X*-Hubs arbeitet die Anforderungen des Bausektors an *Gaia-X* zurzeit heraus. In der Bauwirtschaft wird *Gaia-X* allerdings bisher nur wenig genutzt; hier sind also unterstützende Angebote erforderlich, um insbesondere mittelständischen Unternehmen den Zugang künftig zu erleichtern.

Lebensende

Für eine optimale Nutzung von Bauteilen oder Baustoffen aus Abbruchgebäuden (auch als „urbane Mine“ oder „anthropogenes Rohstofflager“ bezeichnet) ist wichtig zu wissen, wann wo welche Gebäude, Bauteile und Materialien für eine Wiederverwendung verfügbar sind. Dazu müssen Daten zum Gebäudebestand generiert und für Akteure einer zirkulären Bauwirtschaft zugänglich gemacht werden.

Materialbörsen und Materialkataster etablieren: Materialbörsen können Anbieter und Nachfrager wiederverwendbarer Materialien und Bauteile zusammenbringen, dabei die Transportdistanzen minimieren und im besten Fall eine Zwischenlagerung vermeiden. Relevant sind in diesem Zusammenhang auch Geschäftsmodelle zur Haftungsübernahme. Einige Start-ups sind

bereits auf diesem Gebiet aktiv. So betreibt das 2020 gegründete Start-up Concular eine Bauteil- und Produktdatenbank und eine Matchmaking-Plattform.¹²⁵ Eine digitale Verknüpfung solcher Materialbörsen mit Planungstools könnte es Planerinnen und Planern oder Architekturbüros ermöglichen, beim Entwurf das regional verfügbare Angebot an zirkulären Materialien im Designprozess von vornherein zu berücksichtigen. Materialkataster für Bauwerksbestände von Städten und Regionen könnten wiederum Transaktionskosten für die Informationsbeschaffung senken, indem sie räumlich differenzierte Informationen über Materialien im Gebäudebestand und dessen Dynamik liefern und somit Informationsgrundlagen zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle und für rohstoffpolitische Strategien bereitstellen. Für den Aufbau entsprechender Materialkataster können die Informationen aus Produktpässen künftig hilfreich sein. Da diese allerdings in der Regel nur für Neubauten erstellt werden, müssen die Materialarten und -mengen (älterer) Bestandsgebäude basierend auf Art und Baujahr geschätzt werden.

Mit Produktpässen für Gebäude und Bauteile Informationen teilen: Im Gebäudebereich werden Produktpässe, die ein Materialinventar beinhalten, meist als „Materialpass“, „Gebäuderessourcenpass“ oder „(materieller) Gebäudepass“ bezeichnet.¹²⁶ Daneben gibt es die bereits etablierten Energieausweise, die sich ausschließlich auf den Energieverbrauch während der Nutzungsphase eines Gebäudes beziehen. Ein digitaler Gebäuderessourcenpass dokumentiert die Umweltauswirkungen und die Kreislauffähigkeit eines Gebäudes in zusammengefasster Form in einem vorgegebenen Format. Die hier enthaltenen Informationen über verbaute Materialien und mögliche Schadstoffe erleichtern es, den Wert des Gebäudes, von Bauteilen und Materialien abzuschätzen sowie kreislaufgerechte Entscheidungen für eine Sanierung oder die Wiedergewinnung von Bauteilen und Materialien zu treffen. Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) hat ein frei erhältliches Format für den Gebäuderessourcenpass entwickelt, dessen inhaltliche Anforderungen bereits in einige am Markt verfügbare Gebäudedokumentationstools (unter anderem der Unternehmen Concular und Madaster) integriert werden.¹²⁷ Ist ein BIM-Modell des Gebäudes vorhanden, können die für den Gebäuderessourcenpass erforderlichen Daten häufig aus diesem Modell extrahiert werden. Die Passdaten können wiederum dazu beitragen, regionale Materialkataster aufzubauen und dadurch typologiebasierte

124 | Vgl. *Gaia-X* Hub 2024.

125 | Vgl. KfW 2022.

126 | Vgl. Schiller et al. 2022.

127 | Vgl. DGNB 2023.

Informationen schrittweise zu spezifizieren. Voraussetzung hierfür ist, dass das Zugriffsrecht auf die Daten geregelt ist. Digitale Gebäuderessourcenpässe können neben anderen Dokumenten wie Sanierungsfahrplänen schließlich auch in sogenannte digitale Gebäudeloggbücher integriert werden, die als eine Art dynamischer Gebäudepass von der Planung über alle Nutzungsphasen des betreffenden Gebäudes hinweg bis zum Lebensende Informationen verwalten und bereitstellen. Produktpässe für einzelne Bauteile können darüber hinaus verhindern, dass die für eine Wiederverwendung relevanten Informationen beim Ausbau aus dem Gebäude verloren gehen. Für die Kompatibilität der verschiedenen Instrumente – Gebäuderessourcenpass, Gebäudeloggbuch, Bauteilproduktpässe, Herstellerinformationen wie EPD, BIM und Materialkataster – sind standardisierte Formate und Datenschnittstellen unabdingbar. Da die Daten vor allem am Ende der Lebensdauer eines Gebäudes, also 50 bis 80 Jahre nach dessen Errichtung, wertvoll sind, ist besonderes Augenmerk auf eine entsprechend permanente, zuverlässige Aufbewahrung und Zugänglichkeit der Daten für die relevanten Akteure zu legen. Dafür ist unter anderem zu klären, bei welcher Institution die Daten aufbewahrt werden sollen.

Zustand von Bauteilen bewerten und zertifizieren: Sicherheit und Qualität der Bauteile müssen geprüft und zertifiziert werden. Um die Zulassung von Recyclingbaustoffen für einen breiteren Einsatz zu ermöglichen, müssen entsprechende Verfahren und Vorschriften entwickelt werden. Eine darüber hinausgehende Zertifizierung von Qualitätseigenschaften könnte zudem das Nutzervertrauen in wiedergewonnene Bauteile erhöhen. In-situ-Bewertungen sind in jedem Fall eine zentrale Voraussetzung für die wirtschaftliche Wiederverwendung von Bauteilen. Zur Prüfung der Materialqualität können verschiedene digitale Technologien wie Bilderkennung und Computertomografie eingesetzt werden.

Rücknahmesysteme für Bauteile etablieren: Die abnehmende Verfügbarkeit bestimmter Rohstoffe kann Unternehmen Anreize liefern, von ihnen verbaute Bauteile oder Materialien am Ende der Lebensdauer betreffender Gebäude zurückzugewinnen. Die regionale Verfügbarkeit kann durchaus auch bei Rohstoffen wie Sand, die geologisch eigentlich ausreichend verfügbar sind, eingeschränkt sein, da der Abbau natürlicher Sandvorkommen durch Naturschutzvorgaben und gesellschaftlichen Widerstand gegen den Abbau häufig eingeschränkt ist. Überregionaler Transport dieser Rohstoffe ist aufgrund der hohen Kosten

wirtschaftlich unattraktiv. Und auch Gips, der heute überwiegend als Nebenprodukt aus der Rauchgasentschwefelung von Kohlekraftwerken stammt, könnte im Zuge der Dekarbonisierung des Energiesektors zukünftig knapp werden. Der flächendeckende Aufbau von Rücknahmesystemen kann Herstellern künftig ermöglichen, ihre Bauteile wiederzugewinnen und so Primärrohstoffe einzusparen. Bereits heute bietet beispielsweise die Firma Lindner SE die Rücknahme gebrauchter Doppelbodenplatten aus Gipsfaser und Holzwerkstoffen an.¹²⁸ Aufgrund der langen Lebensdauer von Gebäuden und der vielen Beteiligten im Bauprozess wissen allerdings häufig weder Hersteller noch Gebäudeeigentümer, wo welche Produkte wie verbaut sind. Digitale Technologien können helfen, die erforderlichen Informationen zu sammeln, langfristig zu speichern und die Rücknahmeangebote bekannter zu machen. Eine interessante Alternative zum Konzept des Rücknahmesystems bieten in diesem Zusammenhang außerdem Leasingmodelle für Bauteile.

Gebäude rückbauen statt abreißen: Durch einen kontrollierten Rückbau kann sichergestellt werden, dass wiederverwendbare Bauteile unbeschädigt ausgebaut und Materialien so weit wie möglich sortenrein rückgewonnen werden. Dafür sollte das betreffende Gebäude zunächst systematisch untersucht werden, um wiederverwendbare Bauteile und Materialien sowie mögliche Schadstoffe zu identifizieren (Vor-Abriss-Prüfung/Pre-Demolition-Audit; Schadstofferkundung). Wichtig ist dabei eine optimierte Baustellenlogistik beim Rückbau, um Zeit- und Kostennachteile gegenüber einem Abriss des Gebäudes möglichst gering zu halten. Um diesen Prozess in Zukunft zu vereinfachen, sind demontierbare Konstruktionen und trennbare Bauteilaufbauten gefragt.

3.4 Hürden und sektorspezifische Gestaltungsoptionen

Die im Folgenden diskutierten Handlungsfelder (siehe Abbildung 7) zur Förderung der Kreislaufwirtschaft sind für den gesamten Gebäude- und Bausektor relevant. Die Sanierung eines Einfamilienhauses ist allerdings besonders herausfordernd, da die Wirtschaftlichkeit entsprechender Maßnahmen im Vergleich zu größeren Gebäuden aufgrund des geringeren Gebäudewerts und der geringeren verbauten Materialmengen häufig schwieriger zu erreichen ist. Auch werden bei solchen

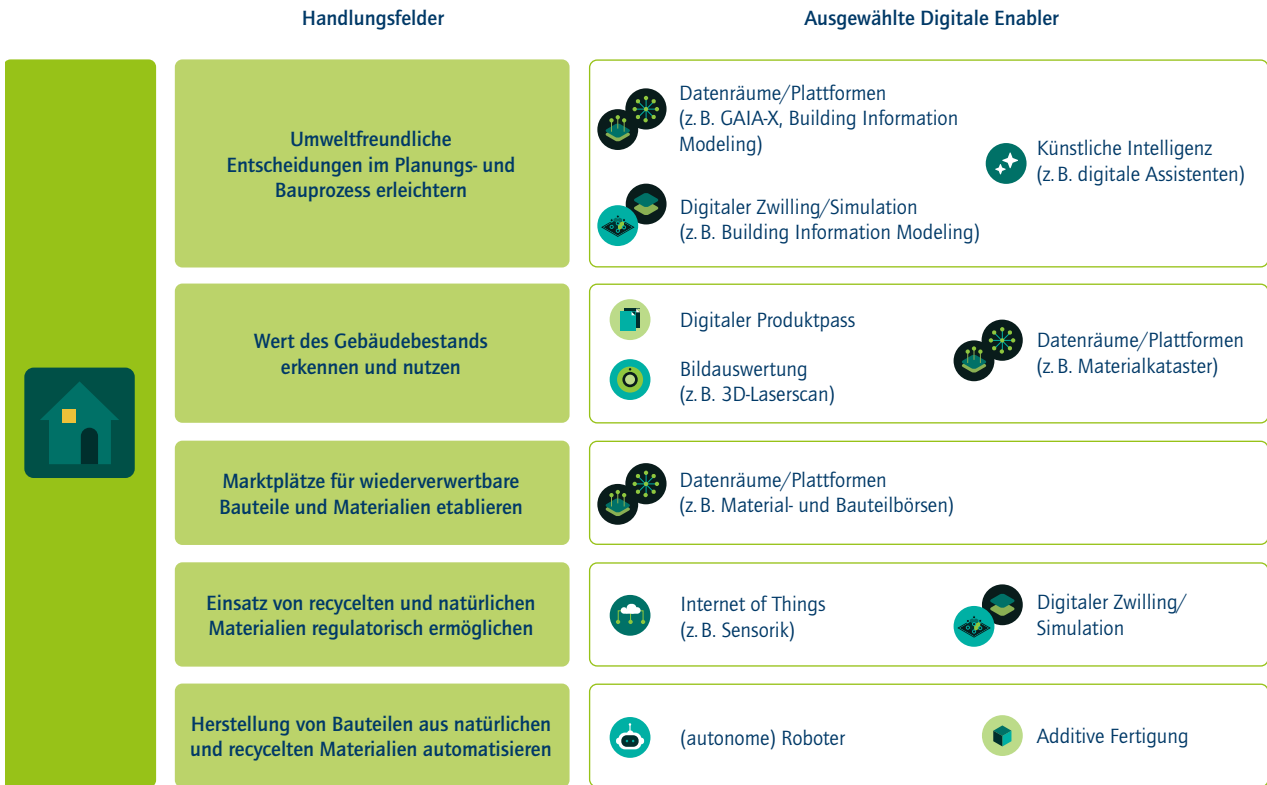


Abbildung 7: Zentrale Handlungsfelder für das Anwendungsbeispiel Einfamilienhaus (Quelle: eigene Darstellung)

Sanierungsprojekten digitale Tools bislang noch nicht so umfassend eingesetzt wie im Neubau oder bei der Sanierung von Mehrfamilienhäusern, Gewerbe-/Büro- und öffentlichen Gebäuden. Beispiele für digitale Enabler, die hier gleichwohl wirksam werden können, sind in Abbildung 7 aufgeführt.

Umweltfreundliche Entscheidungen im Planungs- und Bauprozess erleichtern

Bei Bauprojekten arbeiten sehr viele Akteure mit unterschiedlich ausgeprägtem und unvollständigem Wissen über zirkuläre Ansätze in wechselnden Konstellationen zusammen. Digitale Tools wie BIM-fähige Software für den kooperativen Planungsprozess sind zwar bereits vorhanden, oftmals fehlt es aber noch an verbindlichen, offenen Standards, die eine effiziente Datenweitergabe und -nutzung durch die verschiedenen Akteure und deren Softwaresysteme ermöglichen. Aufgrund der vielen verschiedenen Bauteile und Materialien ist die Berechnung der Umweltauswirkungen eines Bauprojekts zudem sehr komplex. Da Gebäude Unikatprodukte sind und sinnvolle Kreislaufansätze unter anderem von der regionalen Verfügbarkeit wiedergewonnener

Bauteile und Materialien abhängen, kann es zudem keine One-Size-fits-All-Standardlösung geben – es müssen also immer wieder neue, kreative Lösungen erarbeitet werden. Daher braucht es trotz der wünschenswerten Standardisierung in vielen Bereichen nach wie vor Gestaltungsspielräume für architektonische Innovationen.

Wie können digitale Enabler helfen? Digitale Anwendungen können helfen, verschiedene Planungsvarianten unter Berücksichtigung der jeweiligen Ökobilanz miteinander zu vergleichen. Neben Software für Fachleute wie BIM-fähige Systemlösungen, Konstruktionstools und digitalen Bauprojektzwillingen für verschiedene Gebäudekategorien, können digitale Assistenten wie Chatbots zum Einsatz kommen, die Informationen in leicht verständlicher Form zum Beispiel für Bauherrin oder Bauherr bereitstellen.

Wie kann die Politik unterstützen? Für die Berechnung der Umweltauswirkungen eines Bauprojekts braucht es Daten zu zahlreichen Materialien und Bauteilen. Gesetzliche Verpflichtungen

zur Bereitstellung solcher Daten in standardisierter Form (zum Beispiel Gebäuderessourcenpässe, Environmental Product Declarations) können dazu beitragen, die Informationsgrundlage für eine umweltfreundliche, zirkuläre Gebäudeplanung zu schaffen. Finanzielle Förderung wiederum könnte helfen, Hürden bei der Etablierung digitaler Tools im Bausektor zu überwinden und digitale Ökosysteme – unter anderem auf Gaia-X-Basis – in der Praxis weiterzuentwickeln. Beispielsweise könnten Initiativen zur Entwicklung digitaler, zirkulärer Benchmarkprojekte gefördert werden, die als Basis für zukünftige Bauvorhaben zur Verfügung gestellt werden. Um die Vernetzung der Akteure zu fördern, könnte die Politik schließlich regionale Netzwerke unterstützen, die digital dokumentierte Lösungen regional anbieten und realisieren.

Wert des Gebäudebestands erkennen und nutzen

Für viele ältere Gebäude sind Baugeschichte, Materialbestand und weitere sanierungsrelevante Informationen kaum ausreichend dokumentiert; und wenn doch, ist die entsprechende Dokumentation in der Regel nicht digital verfügbar. Potenziale zur Weiter- oder Umnutzung von Gebäuden und für die Wiedergewinnung von Bauteilen und Materialien, die eine wichtige Grundlage für nachhaltige Stadtentwicklungs- und Rohstoffstrategien darstellen, sind noch immer zu wenig bekannt und werden daher bislang zu wenig genutzt.

Wie können digitale Enabler helfen? Basierend auf einem 3D-Laserscan lässt sich das digitale 3D-Modell eines Bestandsgebäudes erstellen, zum Beispiel als Grundlage für eine (serielle) Sanierung oder einen Umbau. Zudem können zentrale Informationen zu verbauten Materialien in einem digitalen Gebäuderessourcenpass gespeichert werden. Perspektivisch können des Weiteren BIM-Modelle für Einzelgebäude zu einem digitalen Zwilling für ein ganzes Quartier zusammengefügt werden – nützlich etwa für die kommunale Wärmeplanung nach dem Gebäudeenergiegesetz (GEG).¹²⁹ Typenbasierte Gebäudedaten und deren Anwendung auf 3D Geobasisdaten können als Grundlage für die Erstellung regionaler Materialkataster dienen und damit die Potenziale an wiedergewinnbaren Rohstoffen sichtbar machen.

Wie kann die Politik unterstützen? Vor-Abriss-Prüfungen – auch Pre-Demolition Audits genannt – ermöglichen die frühzeitige Ermittlung des Werts von Bauteilen und Materialien sowie die Identifizierung und fachgerechte Entsorgung möglicher

Schadstoffe im Baubestand. Ob eine gesetzliche Verpflichtung zu solchen Audits sinnvoll ist oder ob sie eher durch finanzielle Unterstützung angereizt werden sollten, hängt vom Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen aus Bauherrensicht ab, weshalb entsprechende politische Maßnahmen für die unterschiedlichen Gebäudetypen differenziert abgewogen werden sollten. Vorgaben zur Dokumentation von Gebäude-, Bauteil- und Materialeigenschaften in standardisierten digitalen Formaten (zum Beispiel digitale 3D-Baupläne, Gebäuderessourcenpass) hingegen ermöglichen in jedem Fall das Zusammenspiel verschiedener Tools und sorgen so für eine leichtere Handhabung der Daten durch unterschiedliche Akteure und somit auch in der Breite für eine intensivere Nutzung. Die Unterstützung der flächendeckenden Erstellung digitaler Materialkataster hilft außerdem dabei, eine breite, öffentlich zugängliche Datenbasis für anthropogene Rohstofflager vorzuhalten und Transaktionskosten, die durch Datenbeschaffung entstehen, zu senken.

Marktplätze für wiederverwertbare Bauteile und Materialien etablieren

Um Kosten und Transportaufwand zu reduzieren, sollten gebrauchte Bauteile und Materialien möglichst regional und ohne Zwischenlagerung wiederverwendet werden. Hierfür braucht es allerdings zunächst die entsprechenden Marktplätze, die dem Handel mit Recyclingprodukten im Bausektor als Plattform dienen. Die bislang unzureichende Standardisierung zirkulärer Bauprodukte führt zudem zu viel Unsicherheit, was die Qualität des konkret verfügbaren Materials betrifft. Die Kreislaufwirtschaft erfordert komplexe Wertschöpfungsketten und neue Geschäftsmodelle. Bei der Entwicklung von Geschäftsmodellen sind auch neue Akteure einzubeziehen; so könnten Zwischenhändler, die Materialien prüfen und die Gewährleistung von Bauteil- oder Materialqualität und -funktionalität übernehmen und so das Vertrauen in gebrauchte Bauprodukte erhöhen.

Wie können digitale Enabler helfen? Für die Vernetzung der vielen erforderlichen Akteure und die Entwicklung von zirkulären Geschäftsmodellen sind Datenökosysteme mit standardisierten Schnittstellen und Formaten für den Datenaustausch essenziell. Unter anderem können hierbei digitale Gebäuderessourcenpässe eine wichtige Rolle spielen.

Wie kann die Politik unterstützen? Anwendungsbezogene Forschungs- und Entwicklungsprojekte (FuE-Projekte), die mittelständische Unternehmen einbeziehen, können dazu beitragen,

129 | Vgl. Gebäudeenergiegesetz 2023.



geeignete Dateninfrastrukturen zu entwickeln und diese in die Nutzung im Bausektor zu überführen. Die Politik kann die hierbei erforderliche Entwicklung von Standards zum Beispiel für digitale Gebäuderessourcenpässe, Bauproduktpässe und die Zertifizierung von Bauteilen durch regulatorische Vorgaben unterstützen. Wichtig sind in diesem Zusammenhang zudem Fragen der Garantie und der Haftung über die lange Lebensdauer von Gebäuden und verbauten Bauteilen hinweg, die ebenfalls regulatorisch geklärt werden müssen.

Einsatz von recycelten und naturbasierten Materialien regulatorisch ermöglichen

Eine restriktive Regulierung und stark beschränkende Normen im Bereich des Brandschutzes und der Statik sowie sehr strenge Vorgaben zum Maximalgehalt verschiedener Schadstoffe erschweren und verhindern bisweilen den Einsatz innovativer recycelter und naturbasierter Materialien.

Wie können digitale Enabler helfen? Digitale Sensorik und Modellierung können dazu beitragen, die Eigenschaften innovativer Materialien und Bauformen zu beurteilen und deren Sicherheit nachzuweisen. Auf diese Weise ließe sich der Einsatz solcher Materialien und Designs ermöglichen, ohne Abstriche bei den Sicherheitsstandards machen zu müssen.

Wie kann die Politik unterstützen? Bei der Überarbeitung gesetzlicher Vorschriften und verbindlicher Normen sollten geeignete innovative Verfahren zur Prüfung und Gewährleistung der Qualität recycelter und natürlicher Materialien stärker berücksichtigt werden.

Herstellung von Bauteilen aus naturbasierten und recycelten Materialien automatisieren

Recycelte und naturbasierte Ausgangsmaterialien sind häufig inhomogen, sodass eine maschinelle Verarbeitung dieser Stoffe bislang noch schwierig ist.

Wie können digitale Enabler helfen? Mittels Robotik können die Herstellung standardisierter oder maßgeschneiderter Bauteile aus inhomogenen Ausgangsstoffen automatisiert und die Kosten somit gesenkt werden. Additive Fertigungstechnologien wie 3D-Druck und Tailored Fibre Placement ermöglichen eine materialsparende Herstellung von Bauteilen aus verschiedenen Ausgangsstoffen, unter anderem aus naturbasierten Fasern.

Wie kann die Politik unterstützen? Die finanzielle Förderung von FuE-Projekten im Bereich der digital-maschinellen Verarbeitung von Recyclingmaterialien und naturbasierten Rohstoffen kann helfen, innovative Verfahren für die Herstellung von Baumaterialien zu entwickeln.

4 Elektroniksektor

4.1 Kritische Abfallmenge im Elektroniksektor

Die Notwendigkeit zum Ausbau kreislaufwirtschaftlicher Ansätze in den Wertschöpfungsketten des Elektronikbereichs leitet sich vor allem aus zwei Beobachtungen ab: Erstens steigt die produzierte und in den Markt gebrachte Menge an Elektro- und Elektronikgeräten seit Jahren kontinuierlich an, und zwar von 62 Millionen Tonnen im Jahr 2010 auf 92 Millionen Tonnen im Jahr 2022. Und zweitens wächst die Menge an Elektroschrott parallel ebenfalls stetig (2022: 62 Millionen Tonnen), laut Vorhersagen bis zum Jahr 2030 prozentual sogar deutlich stärker als die Gesamtabfallmenge.^{130, 131, 132}

Die Gründe für die steigende Abfallmenge im Elektroniksektor sind vielfältig: Die sinkende Nutzungs- und Lebensdauer der Geräte entsteht unter anderem im Zuge neuer technologischer Trends vor allem bei Elektronikkleingeräten, aufgrund von Konsumentenwünschen nach einem neuen Gerät oder wegen der Obsoleszenz vieler Geräte durch inkompatible oder nicht mehr unterstützte Software (Mobiltelefone, Tablets, Notebooks etc.). Im Fall von Defekten ist eine Reparatur häufig zudem entweder aufgrund des Produktdesigns oder wegen fehlender Ersatzteile nicht möglich oder aber infolge der Marktbedingungen einer linearen Wirtschaft preislich nicht konkurrenzfähig. Für die Sammlung von Altgeräten am Lebensende existieren zwar etablierte Strukturen und gesetzliche Vorgaben; allerdings liegen die tatsächlichen Sammelquoten im Bereich der Elektronikgeräte deutlich unter den gesetzlichen Vorgaben hierzulande (Vorgabe für 2021: 65 Prozent, real: 38,6 Prozent).¹³³

Speziell für langlebige Geräte wie Waschmaschinen sind diese Zahlen allerdings nur bedingt belastbar. Denn während sich die gesetzlichen Vorgaben zur Berechnung der Sammelmengen auf den Durchschnitt der in den vergangenen 3 Jahren auf

den Markt gebrachten Mengen beziehen, hängt die tatsächliche Sammlungsquote im Fall von Waschmaschinen von denjenigen Mengen ab, die vor 10 oder 15 Jahren auf den Markt gebracht worden sind. Zudem werden Waschmaschinen nach der Erstnutzung häufig im Zweitmarkt auf Plattformen wie eBay gehandelt. Die Nutzungsdauer einer Waschmaschine liegt dadurch schätzungsweise sogar über den 10 bis 15 Jahren der Erstnutzungsdauer, wobei es hierzu keine verlässlichen Zahlen gibt. In wachsenden Märkten und bei Geräten mit einer Lebensdauer von mehr als 3 Jahren kann daher die berechnete 3-Jahres-Durchschnittsmenge deutlich höher sein als die tatsächlich vor 10 oder 15 Jahren in Verkehr gebrachten Mengen, weshalb die errechnete Quote dann wiederum einen zu niedrigen Wert ausweisen würde.

Unabhängig vom konkreten Vorgehen bei der Berechnung der Sammelquote ist im Vergleich etwa zur Papier- und Kunststoffverwertung in der Bevölkerung aber auch ein deutlich geringeres Bewusstsein für die Sammlungsmöglichkeiten im Elektroniksektor vorhanden. Am Beispiel des Produkts Waschmaschine zeigt etwa eine Befragung mit 1.000 Verbraucherinnen und Verbrauchern, dass unter den Befragten pro Haushalt durchschnittlich 0,6 defekte/ungenutzte Geräte – sogenannte Hibernating Devices – im Haushalt vorhanden waren, die dem Wirtschaftskreislauf somit entzogen sind.¹³⁴

Die Wiederverwertung von Altgeräten erfordert aufgrund der aktuellen Bestimmungen des hierzulande geltenden Abfallrechts eine Zertifizierung als Entsorgungsfachbetrieb und ist daher sowie aufgrund der notwendigen logistischen und betrieblichen Aufwände für die Hersteller selbst wenig rentabel. Beim Recycling von Elektrogeräten liegt der Fokus aktuell vor allem auf der Rückgewinnung von Massenmetallen (Beispiel: Stahl, Eisenmetalle), während weniger als ein Prozent der seltenen Erden recycelt werden.¹³⁵ Dies ist zum Teil auf die technischen Herausforderungen beim Recycling und damit auf die hohen Investitionskosten für die Betreiber von Recyclinganlagen zur Gewinnung seltener Erden zurückzuführen; diese sind in Geräten meist nur in geringen Mengen verbaut und können ohne eine vollständige manuelle Zerlegung der Geräte nur schwer abgetrennt werden.

130 | Vgl. Unitar 2024.

131 | Vgl. Kaza et al. 2019.

132 | Prognosen: 68 Prozent Zuwachs bei Elektroschrott von 2016 bis 2030, 23 Prozent Zuwachs bei der Gesamtabfallmenge von 2016 bis 2030.

133 | Vgl. Umweltbundesamt 2023c.

134 | Vgl. Oliver Wyman 2023.

135 | Vgl. BMUV 2023.



Zusätzlich zu den genannten Herausforderungen bei der Sammlung von Altgeräten entstehen durch deren vielfach gesetzwidrige Entsorgung nach wie vor hohe Verluste bei Rohstoffen wie Kupfer, Lithium oder eben seltenen Erden. Im Kontext der Rohstoffverfügbarkeit und Resilienz lokaler Lieferketten ist darüber hinaus zu beachten, dass Deutschland bei diesen Ressourcen aktuell größtenteils oder komplett von Importen aus nur wenigen Anbieterländern abhängig ist.^{136, 137}

Häufig werden zudem Geräte-, Rohstoff- und Informationskreisläufe nicht geschlossen, weil eine direkte Rückkopplung zwischen den beteiligten Akteuren fehlt. Das betrifft beispielsweise die fehlende Vernetzung zwischen Herstellern sowie Konsumentinnen und Konsumenten im B2C-Bereich als Grundlage einer servicebasierten Nutzung langlebigerer Geräte, da die Geräte nicht direkt durch die Hersteller, sondern durch den Handel vertrieben werden. Ebenso werden Altgeräte typischerweise nicht vom Hersteller gesammelt, sondern von kommunalen Anbietern und Handel. Und schließlich ist auch der Informationsaustausch zum Recycling oder zum Produktdesign zwischen Herstellern und Verwertern nach wie vor ausbaufähig.

Aufgrund der hier beschriebenen Herausforderungen und des hohen Rohstoff- wie Energiebedarfs über den gesamten Lebenszyklus von Elektronikgeräten hinweg wurden im Elektroniksektor bereits diverse Rahmenbedingungen geschaffen oder geplant, um mehr Nachhaltigkeit zu erreichen. Diese werden im folgenden Abschnitt kurz vorgestellt, insbesondere mit Blick auf ihren Beitrag zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Elektroniksektor.

4.2 Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft im Elektroniksektor

Der Großteil des Ressourcenbedarfs für Elektro- und Elektronikgeräte¹³⁸ entsteht in der Nutzungsphase durch den Verbrauch von Energie und teilweise auch Wasser.^{139, 140} Daher wurde dieser

Aspekt im Zuge der gesetzlichen Regulierung zur Senkung des Ressourcenbedarfs und zur Förderung der Nachhaltigkeit im Elektroniksektor neben der Erfassung und Sammlung von Altgeräten bisher mit Vorrang behandelt.

Hinsichtlich der Energieeffizienz verfolgt die EU-Verordnung zur Energieverbrauchskennzeichnung aus dem Jahr 2017 in ihrer aktuellen Fassung von 2021 inklusive der für einzelne Produktgruppen anhängigen delegierten Verordnung das Ziel, Verbraucherinnen und Verbraucher bei der Auswahl energieeffizienter Produkte zu unterstützen und für Hersteller einen Anreiz für die Entwicklung energieeffizienterer Produkte zu schaffen.¹⁴¹ Im April 2023 wurde darüber hinaus die EU-Verordnung zur Senkung des Energieverbrauchs von Elektrogeräten im Standby-Modus verabschiedet.¹⁴²

Das für Deutschland geltende Elektro- und Elektronikgerätegesetz (letzte Änderung 2022) enthält des Weiteren Vorgaben zur Entsorgung, Sammlung und zum Recycling von Altgeräten, wobei darin auch Inhalte der EU-Richtlinie 2012/19 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE-Richtlinie) umgesetzt worden sind. Dadurch soll einerseits die ungeplante und unzulässige Freisetzung von schädlichen Substanzen verhindert, andererseits die ordnungsgemäße Rücknahme von Altgeräten zur Förderung der Wiederverwendung organisiert werden. Hersteller werden in diesem Zusammenhang unter anderem dazu verpflichtet, ihre Geräte im Sinne der Nachverfolgbarkeit zu registrieren, die Finanzierung der Altgeräteentsorgung sicherzustellen sowie Kundinnen und Kunden über Möglichkeiten zur Rückgabe von Altgeräten zu informieren. Diese Pflichten können – je nach Konstellation – auch auf den Vertreiber übergehen. Zur Organisation und Förderung der Rückführung von Altgeräten wurden kommunale Sammelstellen eingerichtet, die mittlerweile europaweit vorhanden sind; zudem wurde mit Geltung ab 2019 eine Mindestsammelquote von 65 Prozent eingeführt.

Jüngst eingeführte Regulierungsmaßnahmen haben darüber hinaus vor allem die Verringerung des Rohstoffeinsatzes im Elektroniksektor zum Ziel. Den Kern der rechtlichen

136 | Vgl. BGR 2023.

137 | Vgl. IW Consult/Fraunhofer ISI 2024.

138 | Elektrogeräte bezeichnen allgemein Geräte, die mit Strom betrieben werden. Elektronikgeräte enthalten zusätzlich noch mindestens ein aktives Bauelement zum Beispiel zur Steuerung des Stromflusses.

139 | Vgl. Yuan et al. 2016.

140 | Vgl. Roy 2016.

141 | Vgl. Verordnung (EU) 2017/1369.

142 | Vgl. Verordnung (EU) 2023/826.

Rahmenbedingungen bildete hier bislang die Ökodesign-Richtlinie der EU, die im Juli 2024 von der zugehörigen EU-Verordnung zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte ersetzt wurde. Im Zentrum der Regelung stehen die Etablierung von Mindestanforderungen für die Umsetzung von Ökodesign-Prinzipien, die Einführung des digitalen Produktpasses im Rahmen der erweiterten Informationspflichten von Wirtschaftsteilnehmern sowie die Verhinderung der Vernichtung unverkaufter Verbraucherprodukte im Textilbereich. Bei der Erstellung des Arbeitsplans zur Umsetzung der Verordnung soll unter anderem auch die Produktgruppe Elektronikgeräte vorrangig behandelt werden.

Bereits im Mai 2024 wurde außerdem eine neue EU-Richtlinie zur Förderung der Reparatur („Right to repair“) beschädigter oder fehlerhafter Waren beschlossen. Die Richtlinie gilt für verschiedene Warenklassen, darunter auch große Elektrogeräte und Verbraucherelektronik. Die Richtlinie enthält unter anderem eine Verpflichtung für Hersteller zur Reparatur innerhalb der Garantiezeit, wenn diese technisch möglich ist, die Verfügbarkeit eines freiwilligen Reparaturformulars mit klaren Informationen über die Reparatur (Fristen, Preise etc.) sowie die geplante Einrichtung einer EU-Onlineplattform, über die Verbraucherinnen und Verbraucher Reparaturdienste leicht auffinden können.¹⁴³

Neben den genannten Rechtsnormen existieren außerdem noch Initiativen aus Wirtschaft und Gesellschaft zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Elektroniksektor. Der Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI) hat 2021 die Initiative *Circular Economy* gestartet, die die Kreislaufwirtschaft ganzheitlich fördern will; unter den 60 beteiligten Akteuren sind auch mehrere Unternehmen aus dem Elektronikbereich.¹⁴⁴ Zudem haben das Deutsche Institut für Normung (DIN), der Verein Deutscher Ingenieure (VDE) und die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE 2023 die *Deutsche Normungsroadmap Circular Economy* veröffentlicht. Für den Elektronik- und IKT-Sektor wurden darin 43 Normungsbedarfe zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft identifiziert.¹⁴⁵

Und schließlich bietet die vom europäischen Hausgeräteherstellerverband APPLiA und dem internationalen Verband der Organisationen für die Verantwortung der Hersteller von Elektronikschrott (WEEE-Forum) gemeinsam betriebene *I4R-Plattform* den Betreibern von Behandlungs- und Recyclinganlagen sowie Anlagen zur Vorbereitung der Wiederverwendung Zugang zu Informationen über das Recycling von Elektro- und Elektronikgeräten gemäß den Anforderungen der Richtlinie 2012/19/EU (WEEE-Richtlinie).

4.3 Anwendungsbeispiel: Waschmaschine

Gründe für die Wahl des Produkttyps Waschmaschine im Rahmen dieser Analyse sind einerseits das große Nachhaltigkeitspotenzial, das aus den erheblichen Mengen in Verkehr gebrachter Waschmaschinen erwächst, andererseits die diversen Einsatzmöglichkeiten digitaler Enabler bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsansätzen in diesem Bereich. Waschmaschinen sind für etwa ein Fünftel der Umweltauswirkungen beim Einsatz von Haushaltselektronik verantwortlich.¹⁴⁶ Das liegt vor allem an der großen Anzahl vorhandener Maschinen: Etwa 96 Prozent der privaten Haushalte in Deutschland besaßen im Jahr 2021 eine eigene Waschmaschine.¹⁴⁷ Das entspricht über 36 Millionen Geräten, wobei diese durchschnittlich nur während 4 Prozent der verfügbaren Zeit genutzt werden.¹⁴⁸

Bezüglich des Ressourcenverbrauchs (Energie, Wasser) in der Nutzung sind Waschmaschinen aufgrund technischer Innovation und der bereits erwähnten Gesetzesvorgaben mittlerweile so weit optimiert, dass eine weitere Effizienzsteigerung in diesem Bereich möglicherweise andere negative Umweltauswirkungen hätte: Ausgehend vom sogenannten Sinnerschen Kreis¹⁴⁹ zur konzeptionellen Organisation von Reinigungsabläufen würde beispielsweise eine weitere Absenkung der Waschtemperatur bei gleichzeitiger Erhaltung des Waschergebnisses mehr Waschmittel oder eine deutlich längere Einwirkzeit erfordern; in der

143 | Vgl. Richtlinie (EU) 2024/1799.

144 | Vgl. BDI 2021.

145 | Vgl. DIN et al. 2023.

146 | Vgl. Hischier et al. 2020.

147 | Vgl. Statistisches Bundesamt 2022.

148 | Vgl. Bressanelli et al. 2017.

149 | Vgl. Rust 2004.



Phasen des Produktlebenszyklus	Ansätze der Kreislaufwirtschaft	R-Strategie	Technologiefunktionen			
			Daten-sammlung	Ver-netzung	Model-lierung	Automa-tisierung
Produkt-design ↓	Produkteigenschaften virtuell testen	reduce	●		●	●
	Produkteile additiv fertigen	rethink	●		●	●
	Modularer und langlebig designen	rethink			●	●
Produktion ↓	Altbauteile aufbereiten	remanufacture	●	●	●	●
	Vorausschauend warten	repair	●	●	●	
	Personalisiert bei der Reparatur unterstützen	repair	●	●		
Nutzung ↓	Geräte gemeinschaftlich nutzen	rethink	●	●		
	Servicebasierte Geschäftsmodelle etablieren	rethink	●	●		
	Waschverhalten ändern	rethink	●			
Lebensende ↓	Geräte am Lebensende wiederaufbereiten	refurbish	●	●	●	●
	Bauteile weiterverwenden	repurpose	●	●	●	●
	Werkstoffe recyceln	recycle	●	●	●	●

Relevanz der Technologiefunktionen zur Umsetzung der Ansätze:

- sehr hoch
- hoch

Abbildung 8: Digital gestützte Kreislaufwirtschafts-Ansätze zum verlängerten, intensivierten und nachhaltigeren Einsatz von Waschmaschinen (Quelle: eigene Darstellung)

Folge würden dann allerdings der Austrag von Mikroplastik aus der Kleidung oder die Belastung für textile Fasern im Waschgang steigen. Dementsprechend konzentrieren sich die im Folgenden vorgestellten Kreislaufwirtschaftsansätze darauf, die Nutzung der Geräte zu intensivieren und diese insgesamt länger im Gebrauch zu halten. Die kreislaufwirtschaftlichen Ansätze für die Wertschöpfungskette einer Waschmaschine sind in Abbildung 8 dargestellt.

Produkt-design

In der Phase des Produktdesigns liegt ein großer Hebel für die verstärkte Kreislaufführung von Waschmaschinen, da hier die Grundlagen für langlebige, einfach zu reparierende und in

unterschiedlichen Geschäftsmodellen nutzbare Produkte gelegt werden.

Modular und langlebig designen, Produkteigenschaften virtuell testen: Aktuell erfordert die Entwicklung neuer Waschmaschinentypen aufwendige Tests mit realen Prototypen, um beispielsweise die Abnutzung während einer Verwendungsdauer von mindestens zehn Jahren adäquat abbilden zu können; teilweise werden hier auch schon Simulationen durchgeführt, aber der Schwerpunkt liegt aufgrund der gesetzlichen Vorgaben zur Gewährleistung nach wie vor auf Realtests. Eine vollständige oder zumindest intensiviert Virtualisierung der Produkttests mittels Simulation und digitaler Zwillinge würde gleichzeitig

die parallele Erprobung verschiedener neuer Produktdesigns mit deutlich geringerem Aufwand erlauben. Dadurch könnten beispielsweise neue modulare Bauweisen erprobt werden, die Reparatur und Wiederverwertung des entsprechenden Gerätetyps erleichtern würden.

Solche Ansätze zur Umsetzung der Rethink-Strategie stellen für Hersteller aktuell noch eine große Herausforderung dar. Die Änderungen in der Konstruktionsweise des Produkts zur Steigerung der Langlebigkeit und Modularität im Sinne einer einfacheren Zerlegbarkeit sowie der Updatefähigkeit der Hardware sind konstruktionstechnisch bereits möglich; beispielsweise werden Maschinen heute schon modularer entwickelt, um die Montage und die Reparatur zu beschleunigen. Erhöhte Lebensdauer und bessere Zerlegbarkeit erfordern allerdings hohe Entwicklungskosten, die sich gegenwärtig noch nicht in einem entsprechenden Marktvorteil niederschlagen. Die Nutzung von Open-Source-Lösungen zur Sicherstellung der Updatefähigkeit der Software ist für Waschmaschinen, wenn überhaupt, zudem nur eingeschränkt umzusetzen. Der Hersteller ist für die Sicherheit der Maschine im Betrieb verantwortlich und muss diese daher auch bezogen auf die jeweils genutzte Software gewährleisten. Das betrifft etwa Software zur Motorensteuerung im Rahmen der Unwuchtkontrolle; treten hier Fehler auf, kann die betreffende Maschine beschädigt oder sogar unbrauchbar werden, was dem Ziel eines verlängerten Lebenszyklus naturgemäß entgegensteht. Softwareupdates werden daher auch in Zukunft vermutlich ausschließlich vom Hersteller vorgenommen. Open-Source-Lösungen, die allgemein als Möglichkeit zur Steigerung der Kreislauffähigkeit von Produkt angesehen werden, bieten hier daher schätzungsweise keinen Mehrwert.

Produktteile additiv fertigen: Sieht das Produktdesign eine stärkere Verwendung 3D-druckbarer Teile vor, können Ersatzteile im Fall einer Reparatur flexibler und nicht nur vom Hersteller selbst bezogen werden. Dies muss allerdings im Rahmen der entsprechenden Lizenzbedingungen auch rechtlich ermöglicht werden, und die Anwendung bleibt schätzungsweise auf Bauteile beschränkt, die keine tragende Funktion in der Konstruktion haben. 3D-gedruckte Teile sind in der Regel nämlich mechanisch schwächer als konventionell (zum Beispiel subtraktiv) hergestellte Bauteile und bei hoher Stückzahl zudem unwirtschaftlicher zu produzieren. Manche Bauteiltypen wie Kugellager oder Elektronikrelais werden voraussichtlich auch in Zukunft nicht additiv zu fertigen sein.

Im Rahmen der geschilderten Möglichkeiten aber könnten – auf Basis von Betriebsschadeninformationen und digitaler Modellierung – verschiedene Bauteile einer Waschmaschine künftig

gezielt als 3D-druckbare Elemente ausgelegt werden. Grundlage für die Modellierung dieser Elemente ist allerdings die ausreichende Verfügbarkeit hochwertiger Daten. Entsprechende Daten existieren infolge der derzeit noch gängigen Realtests auch bereits, und die Datenbasis könnte durch den Ausbau der Sensorik in bestehenden Geräten künftig noch vergrößert werden.

Produktion

Die Produktion von neuen Waschmaschinen ist bereits stark optimiert durch die Nutzung von technologischen Ansätzen im Kontext von Industrie 4.0. Durch die Kreislaufwirtschaft entstehen hier allerdings neue Herausforderungen; die Produktion muss flexibler gestaltet werden zum Beispiel für die Miteinbeziehung von Altbauteilen oder zusätzliche Abläufe für die Wiederaufbereitung von Altgeräten.

Altbauteile aufbereiten: In der Produktion ermöglichen digitale Technologien, unabhängig vom Typ der produzierten Waschmaschine, die effiziente Wiederverwertung von Bauteilen aus alten oder defekten Geräten. Technologien zur Vernetzung zwischen Hersteller und Verbraucherhaushalt oder zwischen Hersteller und Verwertungseinrichtung können die Rückgewinnung von Altgeräten und Bauteilen koordinieren. Nach der Rückführung zum Hersteller erlauben digitale Schnittstellen eines Bauteils die Auslesung von Daten zur bisherigen Nutzung und somit Rückschlüsse auf dessen Restlebensdauer; diese Daten können zusätzlich Hinweise für notwendige Schritte zur Wiederaufbereitung, wie zum Beispiel Demontagemöglichkeiten, enthalten. Der in der aktuellen EU-Ökodesign-Verordnung skizzierte digitale Produktpass sieht eine Speicherung individueller Gerätenutzungsdaten allerdings noch nicht vor und müsste also entsprechend erweitert werden.

Ausgehend davon könnte die Datenauswertung, ähnlich wie im Fall der oben beschriebenen Produktdesign-Ansätze, durch Modellierung unterstützt werden. Technologien wie die Künstliche Intelligenz sind in diesem Zusammenhang ebenfalls relevant, da sie den Einsatz der rückgewonnenen Bauteile mit der laufenden Produktion koordinieren. Automatisierungstechnologien wie die Robotik bilden außerdem die Grundlage dafür, dass Anwendungen im Bereich der reversen Logistik auch wirtschaftlich tragfähig werden, wobei hier auch die Bündelung von Massenströmen in der Rückführung notwendig ist. Hierzu können wiederum vernetzende Digitaltechnologien beitragen, indem sich sowohl Hersteller als auch Verwertungseinrichtungen in Datenräumen zusammenschließen, um die Planbarkeit in der Wiederverwertung zu steigern.



Nutzung

Die Nutzungsphase bildet für das Produkt Waschmaschine den größten Hebel zur Förderung der Kreislaufwirtschaft. Aufgrund der mittlerweile realisierten Effizienz beim Energie- und Wasserverbrauch sollte die Verweildauer der Geräte am Endverbrauchermarkt ausgebaut werden. Reparaturdienstleistungen sind bei den Herstellern bereits etabliert, auch aufgrund der gesetzlichen Verpflichtung, Ersatzteile und Reparaturanleitungen für professionelle Reparatoren und für Privatpersonen bereitzustellen. Eine im Jahr 2024 vom europäischen Hausgeräteverband APPLiA durchgeführte Umfrage hat ergeben, dass die beim Hersteller eingegangenen Reparaturaufträge zu 94 Prozent erfolgreich waren. Laut einer Verbraucherumfrage des Marktforschungsinstituts GfK ziehen Verbraucherinnen und Verbraucher allerdings in 75 Prozent der Fälle einen Ersatz des defekten Geräts dessen Reparatur vor. Gründe dafür waren vor allem der Wunsch nach einem neuen Gerät und niedrigere Kosten für den Ersatz.¹⁵⁰

Vorausschauend warten, personalisiert bei der Reparatur unterstützen: Digitale Technologien bilden die Voraussetzung für eine vorausschauende Wartung. Mithilfe einer erweiterten Zustandsdatensammlung für das einzelne Gerät sowie Modellierungen zur Wartung oder Reparatur lassen sich entsprechende Arbeiten besser planen und Schäden frühzeitig verhindern, die zum Ausfall des Geräts führen würden. Zudem ergeben sich auf diese Weise für Hersteller – unter der Voraussetzung eines entsprechenden Produktdesigns – die Möglichkeit, Nutzerinnen und Nutzer aktiv in die Reparatur miteinzubeziehen. Durch digitale Vernetzung und aktive Kommunikation mit dem Verbrauchershaushalt sowie eine intelligente, personalisierte Unterstützung bei Reparatur und Wartung können Nutzerinnen und Nutzer in verschiedenen Fällen zur eigenständigen Reparatur ermächtigt werden. Reparaturbedingte Kosten, Warte- und Ausfallzeiten könnten so erheblich gesenkt werden. Der Hauptkostentreiber für Reparatur und Wartung sind aktuell nämlich die Personalkosten für entsprechende Servicekräfte; eine Reduzierung dieser Kosten, unter anderem durch den Wegfall zahlreicher Kundenbesuche, würde unmittelbar die wirtschaftliche Attraktivität von Reparaturangeboten im Vergleich zum Neukauf steigern.

Servicebasierte Geschäftsmodelle etablieren: Product-as-a-Service-Geschäftsmodelle basieren kundenseitig auf Gerätenutzungs- statt Eigentumsrechten, der Hersteller bleibt also Eigentümer des Produkts und bietet gegen Nutzungs- und

Serviceentgelt zusätzlich Serviceleistungen wie Wartung und Reparatur oder sogar ein vollumfängliches Leistungsversprechen; dadurch entsteht ein überlegenes Nutzenversprechen im Gegensatz zu den aktuell vorherrschenden Geschäftsmodellen. Je länger ein Produkt in Nutzung bleibt, desto profitabler werden solche Geschäftsmodelle, was durch leichtere Reparierbarkeit und längere Lebensdauer von Materialien und Bauteilen naturgemäß begünstigt wird. Nach Ende der Mietzeit geht das Gerät dann direkt an den Hersteller zurück, wodurch der Wertverlust im Vergleich zur Verwertung im Gesamtabfallstrom reduziert werden kann. Der Hersteller hat hier dann nämlich die Möglichkeit, den Mehrwert durch Verwendung hochwertiger Bauteile und Materialien im eigenen Produktionskreislauf abzuschöpfen.

Digitale Technologien zur Nutzungsdatensammlung und zur Vernetzung von Hersteller und Nutzer bilden die Basis für eine effiziente Abwicklung solcher Geschäftsmodelle aufgrund der im Vergleich zum klassischen Verkaufsmodell aufwändigeren Vertragsabwicklung, da hier jeder Nutzungsvorgang einzeln abgewickelt werden muss. Solche PaaS-Modelle können darüber hinaus auch mit anderen Kreislaufwirtschaftsansätzen kombiniert werden. Beispielsweise können sowohl neue als auch wiederaufbereitete Geräte zu unterschiedlichen Mietpreisen angeboten werden.

PaaS-Lösungen für Waschmaschinen sind im B2B-Bereich (zum Beispiel Hotels) bereits seit längerem etabliert, da sowohl Hersteller als auch Nutzer im direkten Austausch miteinander stehen und beide Seiten eine langfristige Gerätenutzung anstreben. Im B2C-Bereich sind diese Modelle außerhalb von Waschalons für Privatpersonen hingegen noch wenig verbreitet; einerseits deshalb, weil Hersteller sowie Kundinnen und Kunden sich angesichts der Vertriebsfunktion des Handels schwer vernetzen lassen, andererseits wegen des unklaren ökologischen und ökonomischen Mehrwerts von PaaS-Modellen in diesem Kontext.

Gleichwohl werden solche Geschäftsmodelle aber bereits seit mehreren Jahren von unterschiedlichen Herstellern im Markt erprobt. In einem von der EU-Kommission geförderten Projekt wurden in Kooperation der Königlichen Technischen Hochschule in Schweden und des Haushaltsgeräteherstellers Gorenje d. o. o. nutzungsorientierte Geschäftsmodelle für Waschmaschinen in der Praxis getestet. Dabei wurde das Mietmodell in unterschiedlichen Preiskategorien angeboten – je nachdem, ob die Haushalte eine neuwertige oder wiederaufbereitete Maschine erhielten.

150 | Vgl. ZVEI 2024.

Als Vorteile wurden der verbesserte Service für Kundinnen und Kunden sowie die erhöhte Flexibilität (z. B. Wechsel der Maschinengröße bei Änderung der Haushaltsgröße) identifiziert; dem stand allerdings ein erhöhter Preis im Vergleich zum Neukauf gegenüber bezogen auf die durchschnittliche Lebensdauer einer Waschmaschine.¹⁵¹

Die BSH Hausgeräte GmbH bietet unter der Marke „BlueMovement“ gegenwärtig Mietmodelle für Waschmaschinen mit einer Vertragslaufzeit ab einem Jahr an. Im sogenannten *Papillon*-Projekt testet das Unternehmen ein Leasingmodell mit längeren Laufzeiten im Bereich von zehn Jahren bei gleichzeitig niedrigeren monatlichen Beiträgen. Das Projekt läuft in Zusammenarbeit mit einem belgischen Sozialunternehmen, um explizit bedürftige Familien mit dem entsprechenden Service zu unterstützen. Neben den Erfahrungen mit der Organisation alternativer Geschäftsmodelle liefern Projekte wie *Papillon* auch wertvolle Daten zum Verhalten und zu möglichen Fehlern oder Mängeln des Geräts nach der Herstellergarantiefrist. Bislang haben Hersteller nur innerhalb der Herstellergarantie im Rahmen des Kundendienstes Zugriff auf das Gerät. Diese während der Nutzung zusätzlich erfassten und durch das Leasing-Modell für den Hersteller auch verfügbaren Daten können wiederum genutzt werden, um das Design bestehender Grundkonstruktionen mit Blick auf Langlebigkeit oder Reparierbarkeit für alle Waschmaschinenmodelle zu optimieren. In beiden Fällen bilden PaaS-Lösungen im Vergleich zum Verkaufsgeschäft allerdings immer noch einen sehr geringen Teil des Umsatzes.

Geräte gemeinschaftlich nutzen: Eine weiteres alternatives Nutzungsmodell für Waschmaschinen ist die gemeinschaftliche Gerätenutzung durch mehrere Haushalte. Dieses Geschäftsmodell ist beispielsweise in Waschsalongen oder bisweilen auch in Mietshäusern bereits etabliert, könnte aber durch digitale Technologien weiter ausgebaut werden. Auch bei gesteigerter Vernetzung müssen allerdings die Grenzen der räumlichen Vernetzbarkeit für eine gemeinschaftlichen Gerätenutzung sowie potenziell unterschiedliche Nutzereinstellungen bezüglich Hygiene und Sauberkeit miteinbezogen werden.

Bieten Waschmaschinen entsprechende Sensorik und eine Anbindung an die geeignete Onlineplattform, lassen sich sogar Haushalte in verschiedenen Mietshäusern miteinander vernetzen. Auf diese Weise können dann lokale Angebote und Bedarfe zusammengeführt werden, wodurch die Nutzungsintensität

einzelner Maschinen gesteigert und die Gesamtzahl betriebener Maschinen reduziert werden könnte. Zustand und Verfügbarkeit entsprechender Maschinen wären für Nutzerinnen und Nutzer online einsehbar, und die Abrechnung könnte automatisiert über sogenannte Smart Contracts, also automatisierte Abrechnungsvorgänge im Rahmen einer Blockchain, abgewickelt werden.

Die WeWash GmbH bietet für die Ausstattung von Waschräumen bereits eine Lösung an, um unabhängig vom Gerätetyp die Verfügbarkeit einer Waschmaschine digital abzubilden und sowohl Buchung als auch Bezahlung per App zu bewerkstelligen. Alle Geräte verbleiben während der Nutzungsdauer im Eigentum der WeWash GmbH. Aktuelle Waschmaschinenmodelle verfügen typischerweise bereits über eine App-Schnittstelle zur digitalen Fernsteuerung; entsprechend besteht hier zudem die technologische Grundlage für die Anbindung an eine Onlineplattform.

Waschverhalten ändern: Durch eine zu geringe oder zu hohe Beladung der Waschmaschine im Waschgang wird entweder der jeweilige Waschzyklus nicht optimal genutzt, oder es tritt bei reduzierter Waschleistung ein erhöhter Verschleiß an der Maschine auf. Ein alternatives Waschverhalten kann daher im Sinne der Kreislaufwirtschaft zur Ressourcenschonung beitragen, indem sich einerseits die Nutzungszeit der Maschinen verlängert, andererseits die Ressourcennutzung im Betrieb reduziert wird. Heutige Waschmaschinen verfügen über eine Beladungserkennung und passen den Wasser- und Energieverbrauch entsprechend an. Zwar ist die Effizienz bei höherer Beladung besser, doch diese scheitert potenziell an der Anzahl Textilien, die man besitzt und damit der tatsächlich vorhandenen Wäschemenge pro Haushalt.

Digitale Technologien, eine entsprechende Gerätesensorik und Schnittstellen für die Nutzerkommunikation können heute dazu beitragen, die Nutzung einer Waschmaschine zu optimieren. Aktuelle Geräte bieten bereits WLAN-Schnittstellen zur Fernsteuerung oder Abfrage des Maschinenstatus an. Ergänzt werden sollten sie durch die Bereitstellung kreislaufwirtschaftlicher Gebrauchsinformationen zur optimalen Beladung und zum Waschmitteleinsatz. Entsprechende Anforderungen sind bereits Teil der aktuellen Ökodesign-Verordnung; zudem existieren heute schon Geräte mit einer automatischen Dosierungsfunktion. Zukünftig könnte außerdem auch der Energieverbrauch beim Waschgang noch stärker im Sinne der Nachhaltigkeit digital einbezogen werden; so könnte durch Kopplung der Waschmaschine

151 | Vgl. Europäische Kommission 2023c.



an Smart-Meter-Geräte der einzelne Haushalt energieintensive Waschvorgänge an der Verfügbarkeit im Stromnetz ausrichten und somit einen Beitrag zur punktuellen Entlastung der Stromproduktion und zur Verminderung der Stromproduktion aus klimaschädlichen Energiequellen beitragen.

Lebensende

Ein kreislaufwirtschaftlicher Umgang mit Waschmaschinen am Lebensende bedeutet im Sinne der Werterhaltung idealerweise Wiederverwertung auf Geräte- und Bauteil- statt Materialienebene. Hier finden sich verschiedene Ansatzpunkte für digitale Technologien, um eine solche Werterhaltung am Lebensende zu fördern und sie durch Skalierung und Automatisierung auch wirtschaftlich tragfähig zu machen.

Geräte am Lebensende wiederaufbereiten: Im Sinne der Kreislaufwirtschaft werden Waschmaschinen am Ende der Erstdutzungsdauer bei bestehender Funktionsfähigkeit entweder schnell weitergegeben oder bei entsprechendem Erfordernis zur Weiternutzung zunächst aufbereitet. Digitale Technologien unterstützen hier auf vielfältige Weise; digitale Sensorik im Gerät liefert Informationen über den Zustand der Maschine sowie einzelner Bauteile und erlaubt dadurch eine Beurteilung des Wiederaufbereitungsbedarfs. Zudem vernetzen Onlineplattformen Haushalte, um Angebot und Nachfrage von Gebrauchtgeräten zusammenzuführen. In der Wiederaufbereitung ermöglichen digitale Anwendungen wie der digitale Zwilling die Planung der notwendigen Schritte und verkürzen somit potenziell die notwendigen Tests zur Gewährleistung der Produktsicherheit.

Der Secondhand-Markt ist für Waschmaschinen bereits länger etabliert, wobei die Transaktionen bislang entweder auf individueller Basis zwischen einzelnen Haushalten stattfinden oder aber lokale Akteure das Angebot bündeln, die typischerweise auf dem zweiten Arbeitsmarkt einer subventionierten Arbeit nachgehen. Ein solches Geschäftsmodell ist allerdings nur deswegen rentabel, weil die Anbieter weniger Garantien und Serviceleistungen anbieten als ein wiederaufbereitender Hersteller. Daher braucht es künftig noch eine systematischere und effizientere Wiederaufbereitung und die Fokussierung auf eine möglichst lange Zweit- und Drittnutzung. Die Miele & Cie. KG führt aktuell in den Niederlanden ein Pilotprojekt zur Erprobung eines neuen Geschäftsmodells mit Refurbished-Geräten durch. Dabei sinkt der Preis für die Geräte proportional zur Anzahl der Wiederaufbereitungszyklen, wobei diese vergleichbare Prüfstandards wie Neugeräte erfüllen. Das entsprechende Geschäftsmodell adressiert einen neuen Kundenkreis, der sich teure Neugeräte nicht

leisten kann oder will, so aber Zugang zu qualitativ vergleichbaren Geräten erhält. Zusätzlich werden in diesem Projekt Bauteile aus irreparablen Maschinen entnommen und zum Verkauf angeboten. Ähnlich wie Pilotprojekte zu PaaS-Lösungen liefern Projekte wie das der Miele & Cie KG wertvolle Daten zur Rentabilität kreislaufwirtschaftlicher Geschäftsmodelle, zum Anpassungsbedarf in der Gerätekonstruktion und zu möglichen Kundengruppen im Markt für wiederaufbereitete Maschinen.

Bauteile weiterverwenden: Die Wiederverwertung von Gerätebauteilen erfordert eine intelligente Vorsortierung. Trotz bereits recht weit entwickelter Sammellösungen ist eine komplette Ausdifferenzierung hin zu einem Container pro Produktart nicht umsetzbar. Hier können digitale Technologien – zum Beispiel durch intelligente Bildauswertung und den Einsatz von Robotern – zur Vorklassifizierung im Recyclingprozess beitragen. Im ersten Schritt könnten so komplette Geräte automatisiert anhand von Kamerabildern danach bewertet werden, ob sie für die Wiederaufbereitung geeignet sind oder ob sie ins Recycling überführt werden sollten und eine Auftrennung auf Bauteilebene angezeigt ist. Im Fall des Recyclings auf Bauteilebene könnten eine Datenbankabfrage allgemeiner Merkmale von Produkt- und Materialeigenschaften (zum Beispiel Hinweise auf verbaute Akkumulatoren) und ein Informationsaustausch zwischen Herstellern und Verwertern dazu beitragen, einen möglichst großen Teil der betreffenden Maschinen aufwandsarm zu recyceln.

Werkstoffe recyceln: Falls eine Wiederaufbereitung ganzer Geräte oder Bauteile nicht mehr möglich ist, sollte eine Vorsortierung auf Bauteilebene die Wiederverwertung der verwendeten Materialien einleiten, um sortenreine Bauteile oder solche, die hochwertige Materialien beinhalten, zu identifizieren und der weiteren Verarbeitung zuzuführen. Die sortenreine Sortierung bildet so die Basis eines sektorspezifischen Markts für qualitativ hochwertige Sekundärmaterialien. Dabei sollten idealerweise herstellerunabhängige Informationen zum allgemeinen Aufbau der betreffenden Waschmaschine und zu den verwendeten Materialien bereits ausreichen, um einen Großteil der Geräte im Rahmen der Sortierung effizient einzuordnen. Die hierfür notwendige Kommunikation im Wertschöpfungsnetzwerk basiert dabei genauso wie die Technik der Sortierungsanlagen wiederum auf digitalen Vernetzungs- beziehungsweise Automatisierungstechnologien.

Bei Stahl ist die Rezyklatnutzung bereits seit längerem etabliert, und recycelter Stahl bildet heute einen signifikanten Teil der Gesamtmenge am Markt – etwa 46 Prozent des insgesamt



Abbildung 9: Übersicht der sektorspezifischen Handlungsfelder zur Förderung von Kreislaufwirtschaft für den Elektroniksektor (Quelle: eigene Darstellung)

verwendeten Rohstahls (2022).¹⁵² Bei Kunststoff ist dieser Anteil mit einer Wiedereinsatzquote von 11 Prozent deutlich geringer.¹⁵³ Die entsprechenden Rezyklate erreichen oft nicht die notwendige Qualität, sind nicht in ausreichender Menge verfügbar und aufgrund der aufwendigen Aufbereitung teilweise teurer als Primärrohstoffe.

4.4 Hürden und sektorspezifische Gestaltungsoptionen

Die im Folgenden diskutierten vier Handlungsfelder zur Förderung von Kreislaufwirtschaftsansätzen lassen sich zwar aus der Bedarfsanalyse des Produktbeispiels Waschmaschine ableiten, sie sind aber für den gesamten Elektroniksektor relevant. Geräte in diesem Sektor bieten ausgehend von einem nachhaltigen Produktdesign das Potenzial für eine langfristige Nutzung in unterschiedlichen Geschäftsmodellen. Die Hebung dieser Potenziale erfordert allerdings Änderungen in den Rahmenbedingungen (siehe Abbildung 9).

Handlungsfeld: Planungssicherheit bei der Materialnutzung fördern

Bei Waschmaschinen sind lange Produktlebenszeiten von bis zu 20 Jahren und mehr eine besondere Herausforderung für Design und Nutzung im Sinne der Kreislaufwirtschaft. Die heute in der Planung verwendeten Rohstoffe müssen nämlich auch am Ende des Lebenszyklus noch verwertbar sein. Dies betrifft einerseits die notwendige Materialqualität, aber auch den regulatorischen Rahmen, der eine solche Wiederverwertung zulassen muss. Beispielsweise könnte die derzeit in Planung befindliche EU-Regulierung zum Einsatz von Per- und polyfluorierten Alkylverbindungen (PFAS) künftig dazu führen, dass der Großteil der Kunststoffe, die in aktuell marktgängigen Waschmaschinen verarbeitet sind, am Ende des Produktlebenszyklus nur noch einer energetischen Verwertung zugeführt werden darf. Zudem führt die Nutzung von Rezyklaten im Produktionsprozess zu Gewährleistungsproblemen, da sie ähnlichen regulatorischen Anforderungen wie Neumaterial genügen müssen, was von Verwerterseite aber nur schwer zu garantieren ist.

152 | Vgl. BGR 2023.

153 | Vgl. Conversio 2020.



Wie können digitale Enabler helfen? Digitale Technologien können dazu beitragen, den Informationsfluss entlang der Wertschöpfungskette zu verbessern, um die Aufbereitung im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu optimieren und die Rechtskonformität der entsprechenden Verwertungsprozesse transparent zu machen. Zu diesem Zweck müssen allerdings alle notwendigen Informationen zu Rohstoffquellen, zur Rohstoffverarbeitung und zu Materialbelastungen während der Nutzung vorhanden sein. Bezüglich der Nutzung recycelter Materialien für langfristige Produktdesigns können digitale Technologien außerdem durch Modellierung und Simulation potenzieller Belastungen während des Lebenszyklus die Produktentwicklung beschleunigen.

Wie kann die Politik unterstützen? Die gesetzlichen Rahmenbedingungen sollten hier einen Korridor schaffen, indem kreislauffähiges Design möglich und aus Sicht einer langfristigen Entwicklungsplanung für Waschmaschinen und andere langlebige Elektronikgeräte auch ökonomisch sinnvoll ist. Entsprechend sind hier eine sorgfältige Abwägung von Regulierungsmaßnahmen auf Materialebene und deren Abstimmung mit den Zielen der Kreislaufwirtschaft notwendig, um die langfristige und planbare Nutzung von Rohstoffen im Elektroniksektor zu ermöglichen.

Handlungsfeld: Reparatur und PaaS-Geschäftsmodelle ausbauen

PaaS-Geschäftsmodelle sind für Hersteller aufgrund der komplexeren Vertragsabwicklung, der zusätzlichen Aufwände (Service, regelmäßige Testung etc.) in der Umsetzung deutlich aufwendiger als bisherige, lineare Modelle. Durch die zusätzlichen Transportwege, unter anderem wegen der regelmäßigen Aufbereitung der Maschine, steigt zudem der Umweltfußabdruck von PaaS-Geschäftsmodellen und für Haushalte sind sie wegen der fehlenden Rentabilität im Vergleich zum Neukauf aktuell nicht attraktiv. Ein erweitertes Reparaturrecht für Neugeräte könnte diesen Preisdruck gegenüber Neugeräten potenziell noch erhöhen, da Haushalte dann bei diesen über den bisher geltenden Garantiezeitraum hinaus eine zu PaaS-Modellen vergleichbare Servicequalität erhalten würden. Reparaturangebote werden aktuell ebenfalls aufgrund der fehlenden Rentabilität im Vergleich zum Neukauf noch in zu geringem Ausmaß genutzt. Offen bleibt schließlich, ob die Konsumentinnen und Konsumenten bereit sind, eine veraltete Optik der Maschinen zu akzeptieren.

Wie können digitale Enabler helfen? Digitale Technologien können durch Automatisierung (zum Beispiel Smart Contracts auf Basis von Digital Ledger Technologien dazu beitragen, die Transaktionskosten bei PaaS-Modellen zu senken. Durch eine

bessere, digitale Vernetzung zwischen Herstellern und lokalen Dienstleistern können zudem Transportwege reduziert werden. Eine intensivere Vernetzung zwischen Herstellern und Kundenschaft, zum Beispiel über den digitalen Produktpass, könnte schließlich Reparaturmöglichkeiten stärker ins Verbraucherbewusstsein rücken und auch darüber hinaus Nutzerinnen und Nutzer stärker in den Produktionskreislauf einbeziehen.

Wie kann die Politik unterstützen? Neben der Incentivierung der Bevölkerung zur Nutzung kreislauffähiger Produkte ist die Sicherstellung der Marktüberwachung ein zentraler Hebel, um kreislauffähige Produkte wirtschaftlich konkurrenzfähig zu machen. Das betrifft beispielsweise die effektive Durchsetzung bestehender und zukünftiger Regeln zum Ökodesign auch für außereuropäische Importprodukte. Hierfür braucht es allerdings Prüfkriterien, deren Einhaltung tatsächlich kontrollierbar ist, gleichwohl ohne insbesondere kleinere Hersteller durch zu weit gefasste Dokumentationspflichten zu überfordern. Ein geeignetes, regulatorisch definiertes Werkzeug wäre in diesem Zusammenhang der digitale Produktpass. Dafür muss allerdings die Richtigkeit der hinterlegten Angaben gewährleistet sein und über die bestehenden Vorgaben in der Ökodesign-Verordnung hinaus zukünftig auch eine dynamische Aktualisierung während der Nutzung des Produkts ermöglicht werden.

Handlungsfeld: Werterhaltung und langlebige Designs fokussieren

Ein langlebiges Design von Waschmaschinen ist technisch bereits möglich, aktuell aber nicht attraktiv für die Hersteller, da es keine direkten Marktvorteile hervorbringt. Langlebigkeit und Kreislauffähigkeit spielen bei der Kaufentscheidung im Vergleich zum Preis nämlich immer noch eine untergeordnete Rolle, und bei Verbraucherinnen und Verbrauchern besteht latent die Befürchtung, dass am Ende doch ein Schaden eintritt und die hohen Anschaffungskosten sich dann nicht auszahlen. Bezogen auf den bereits diskutierten Punkt zur langfristigen Materialnutzung besteht aktuell zu wenig Planungssicherheit. Für Hersteller gibt es aktuell nur wenig Anreiz, langlebigere und damit höherwertige Produkte in den Markt zu bringen, da sie diese nur sehr eingeschränkt über bestehende Sammlungsangebote zurückerhalten können.

Wie können digitale Enabler helfen? Digitale Technologien und Anwendungen – hier speziell der digitale Produktpass – können dazu beitragen, den vom Hersteller ursprünglich in den Markt eingebrachten Wert eines Geräts bezogen auf die Material- und Fertigungsqualität besser bewertbar und nachverfolgbar zu machen. Damit bilden digitale Technologien die Basis für Anreize zur Herstellung und zum Vertrieb hochwertiger Maschinen.

Wie kann die Politik unterstützen? Die Gesetzgebung könnte den Wert der Rohstoffe im Produkt stärker betonen. Der digitale Produktpass ist hierbei ein guter Hebel, um Transparenz und Nachvollziehbarkeit zu schaffen. Die offene Informationsteilung entlang der Wertschöpfungskette darf aber wiederum nicht dazu führen, dass andere Marktteilnehmer die herstellereigenen Wertströme ohne Absprache frei nutzen können, geistiges Eigentum und Entwicklungsleistung sind also zu schützen. Zudem wäre eine proaktive bevölkerungsorientierte Kommunikationsstrategie hilfreich, da kreislauffähige Waschmaschinen auf Basis europäischer Vorgaben zu Design und Fertigung teurer sind als Waschmaschinen im linearen System. Die ökologischen und ökonomischen Vorteile solcher langlebigen, nachhaltigen Produkte sollten daher explizit betont werden, damit diese Vorteile idealerweise in der Kaufentscheidung stärker berücksichtigt werden.

Handlungsfeld: Nachhaltigen Umgang mit Alt- und Bestandsgeräten fördern

Die bestehende Menge an Waschmaschinen sollte im Sinne der Kreislaufwirtschaft so vollständig und effektiv wie möglich verwertet werden. Die durch Reparatur und Aufbereitung verlängerte Nutzungsdauer ist aufgrund der höheren Verbräuche bei Strom und Wasser bei einem Teil der Geräte aus ökologischer Sicht allerdings fragwürdig. Aufbereitete Geräte würden im Fall einer Neuklassifizierung der Energieeffizienz größtenteils nämlich in der Label-Klasse für die geringste Effizienz eingestuft werden. Neben erhöhten Verbräuchen ist die Nutzung von Alt- oder wiederaufbereiteten Geräten für Kundinnen und Kunden aktuell

aber auch aus preislicher Sicht unattraktiv im Vergleich zum Neukauf. Um Altgeräte im Sinne der Kreislaufwirtschaft zu verwerten, müssten diese vollständig gesammelt werden, was derzeit noch nicht geschieht.

Wie können digitale Enabler helfen? Digitale Technologien können Reparatur und Aufbereitung bestehender Geräte effizienter gestalten und zu deren Skalierung beitragen. Das betrifft auch nachträgliche Leistungsverbesserungen, die softwarebasiert als Over-the-Air-Updates durchgeführt werden können, soweit das der einzelne Maschinentyp zulässt. Zudem erlauben digitale Modellierungen eine Vorhersage der erwartbaren Umweltauswirkungen bei Weiternutzung bestehender Geräte, womit sie eine nachhaltige Entscheidung über Weiternutzung oder Wiederverwertung ermöglichen. Und schließlich liefern Onlineplattformen die digitale Infrastruktur für eine verstärkte lokale Vernetzung zwischen Verbraucherhaushalten und Verwertern, wodurch Sammlungsaktivitäten optimiert und Informationen bereitgestellt werden können.

Wie kann die Politik unterstützen? Aufbauend auf den bestehenden Sammlungsangeboten kann die Regierung in Bund und Ländern durch entsprechende Informationskampagnen deren Bekanntheit steigern. Die wirtschaftliche Attraktivität der Nutzung von wiederaufbereiteten Geräten und die generelle Akzeptanz dafür auf Seiten der Konsumenten ließe sich zudem durch gezielte Maßnahmen erhöhen, beispielsweise durch die Etablierung von Prüfsiegeln zur Vertrauensbildung.



5 Textilsektor

5.1 Herausforderung „Fast Fashion“ im Textilsektor

Der Textilsektor spielt bei der kreislaufwirtschaftlichen Transformation des Wirtschaftssystems in der EU und in Deutschland eine entscheidende Rolle. Denn Textilien sind ein wesentlicher Bestandteil des täglichen Lebens. Sie werden nicht nur für Bekleidung, sondern auch für Heimtextilien, Möbel und technische Produkte wie medizinisches Equipment oder Schutzausrüstung, für Gebäude und Fahrzeuge verwendet.¹⁵⁴ Andererseits ist der Textilsektor ein wichtiger Zweig der europäischen und deutschen Wirtschaft.¹⁵⁵ In Deutschland werden rund 61 Prozent der produzierten Fasern zu technischen Textilien, 26 Prozent zu Heimtextilien und 13 Prozent zu Bekleidung verarbeitet.^{156, 157}

In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat sich die weltweite Textilfaserproduktion von 58 Millionen Tonnen im Jahr 2000 auf 109 Millionen Tonnen im Jahr 2020 nahezu verdoppelt, und sie wird bis 2030 voraussichtlich bis auf 145 Millionen Tonnen ansteigen.¹⁵⁸ Dieser enorme Anstieg geht mit der zunehmenden Verbreitung von sogenannter Fast Fashion einher, die jedes Jahr eine steigende Anzahl von Kollektionen zu sehr niedrigen Preisen und mit immer kürzerer Nutzungsdauer herausbringt. Die Qualität der Bekleidung hat dabei stark abgenommen. Während der Coronapandemie hat sich die Entwicklung mit der sogenannten Ultra Fast Fashion (UFF), die durch Hersteller außerhalb von Deutschland begründet wurde, sogar noch verschärft. Indem qualitativ minderwertige Kleidung direkt auf Onlineplattformen gehandelt wird, werden Produktions- und Vertriebszeiten noch weiter verkürzt. Der chinesische Modeanbieter Shein bringt

so beispielsweise nach eigenen Angaben schätzungsweise 700 bis 1.000 neue Modelle täglich heraus.^{159, 160}

Deutsche Verbraucherinnen und Verbraucher erwerben im Schnitt 60 Kleidungsstücke pro Jahr, wovon 40 Prozent selten bis fast nie getragen werden.¹⁶¹ Viele Kleidungsstücke werden schließlich unverkauft entsorgt, da der Stil den sich rasch verändernden Kundenwünschen nicht mehr entspricht.¹⁶² Einige Unternehmen entsorgen zudem ungetragene, zurückgegebene Kleidungsstücke, wenn deren Geschäftsmodell den Weiterverkauf von Retouren nicht vorsieht.¹⁶³

Durch die überwiegend linearen Wertschöpfungsketten im Textilsektor werden also große Mengen an Abfall produziert. Jedes Jahr finden sich in Deutschland zwischen 1 und 1,2 Millionen Tonnen Altkleider und Heimtextilien in entsprechenden Sammelanlagen, 370.000 bis 420.000 Tonnen werden hierzulande zudem über den Restmüll entsorgt.¹⁶⁴ Zusammen entspricht das circa 18 Kilogramm pro Person pro Jahr. 60 Prozent der gesammelten Altkleider und Heimtextilien werden im kreislaufwirtschaftlichen Sinne anschließend tatsächlich wiederverwendet, 27 Prozent werden stofflich zu geringerwertigen Produkten wie Putzlappen oder Dämmmaterial recycelt, und etwa 11,5 Prozent werden thermisch verwertet.¹⁶⁵ Und jede Sekunde wird irgendwo auf der Erde eine Lastwagenladung Textilien auf Deponien abgelagert oder verbrannt; nur weniger als 1 Prozent der weltweit vertriebenen Kleidungsstücke wird im Faser-zu-Faser-Recycling am Ende zu neuer Kleidung verarbeitet.¹⁶⁶ Der noch sehr geringe Anteil von Recyclingfasern in der Kleidungsproduktion wird außerdem überwiegend aus anderen Produktströmen wie recycelten Fischernetzen oder PET-Flaschen gewonnen.

Aber auch in anderer Hinsicht sind die ökologischen Auswirkungen einer linearen Textilwirtschaft enorm: Für die Herstellung von Bekleidung werden weltweit große Wassermengen sowie

154 | Vgl. Europäische Kommission 2022.

155 | Vgl. Ellen Macarthur Foundation/Circular Fibres Initiative 2017.

156 | Vgl. Forschungskuratorium Textil 2022.

157 | Vgl. Umweltbundesamt 2019c.

158 | Vgl. Textile Exchange 2021.

159 | Vgl. de Ferrer 2022.

160 | Vgl. Boston Consulting Group 2024.

161 | Vgl. Greenpeace 2022a.

162 | Vgl. Greenpeace 2022b.

163 | Vgl. Redelfs/Jansen 2022.

164 | Vgl. bifa Umweltinstitut 2023.

165 | Vgl. ebd.

166 | Vgl. Ellen Macarthur Foundation/Circular Fibres Initiative 2017.

Flächen zum Anbau von Baumwolle benötigt. In der EU steht der Textilsektor bei der Inanspruchnahme von Primärrohstoffen und Wasser an vierter und als Verursacher von Treibhausgasemissionen an fünfter Stelle.¹⁶⁷ Zudem werden große Mengen teilweise giftiger Chemikalien für die Färbung der Stoffe und die Pestizidbekämpfung beim Baumwollanbau eingesetzt.

Um dem großen Preisdruck der Fast-Fashion-Konkurrenz standzuhalten, produziert ein Großteil der in Deutschland und der EU vertreibenden Bekleidungsunternehmen in Entwicklungs- und Schwellenländern. Dort werden allerdings Menschenrechte häufig nicht anerkannt und internationale Umwelt- und Sozialstandards nicht eingehalten.¹⁶⁸ Der hohe Globalisierungsgrad des Bekleidungssektors führt zudem dazu, dass die Produktion über verschiedene Länder verteilt ist und Lieferantennetzwerke komplex, dynamisch und unübersichtlich strukturiert sind.

Angesichts solcher Marktbedingungen sind zirkuläre Ansätze bislang kaum wettbewerbsfähig, die Kreislaufwirtschaft in der Bekleidungsbranche steckt daher wenig überraschend noch immer in den Kinderschuhen. Gleichwohl bestehen enorme ökologische und ökonomische Potenziale für den Wandel hin zu einem zirkulären Bekleidungssektor.¹⁶⁹ Der weltweite Markt für Secondhand-Kleidung, -Schuhe und -Accessoires wurde im Jahr 2022 auf 100 bis 120 Milliarden US-Dollar geschätzt (dreimal höher als 2019), und es wurde ein jährliches Wachstum um 20 bis 30 Prozent vorhergesagt.¹⁷⁰ Eine aktuelle Studie von Greenpeace zeigt außerdem, dass Verbraucherinnen und Verbraucher beim Kauf von Kleidung mittlerweile mehr auf Nachhaltigkeit achten, stärker auf Secondhand-Angebote zurückgreifen und alte Kleidung vermehrt weiterverkaufen.¹⁷¹

Neben Kleidung gibt es weitere textile Abfallströme, die aufgrund ihrer Menge großes Potenzial für die Kreislaufwirtschaft im Textilsektor haben: In Deutschland werden über den Sperrmüll beispielsweise 225.000 Tonnen Matratzen und 225.000 Tonnen textile Bodenbeläge separat erfasst.¹⁷² Zudem fallen große Mengen technischer Textilabfälle, gebrauchte Hygieneprodukte

und textilen Baustellenabfälle an. Damit eine Kreislaufwirtschaft im Textilsektor tatsächlich zustande kommt, müssen diese Stoffströme jedoch gebündelt genutzt werden. Hierfür sollten die Akteure aus dem Abfallsektor mit der textilen Herstellerindustrie künftig enger zusammenarbeiten.

5.2 Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft im Textilsektor

Die Nachhaltigkeitstransformation des Textilsektors ist erst vor wenigen Jahren in den Fokus der politischen Akteure in Deutschland und der EU gerückt. Mit dem European Green Deal und der europäischen Kreislaufwirtschaftsstrategie treibt die EU den zirkulären Wandel in der Textilindustrie voran.¹⁷³ Der *Neue Aktionsplan Kreislaufwirtschaft der EU (2020)*, der das zentrale Element der europäischen Strategie darstellt, hebt die Textilindustrie als einen der zentralen Sektoren für eine kreislaufwirtschaftliche Transformation der europäischen Wirtschaft hervor.¹⁷⁴ In ihrer *Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien (2022)* beschreibt die EU Kommission zudem einen Rahmen und eine Vision für den Wandel hin zu einem nachhaltigen und zirkulär wirtschaftenden Textilsektor bis zum Jahr 2030.¹⁷⁵ Produkte sollen demnach so konzipiert werden, dass sie langlebiger, leichter wiederzuverwenden und zu reparieren, recyclingfähig und außerdem energieeffizient hergestellt sind.

Gemäß EU-Ökodesign-Verordnung sind Textilien als eine der ersten Produktgruppen für eine produktgruppenspezifische Regulierung vorgesehen,¹⁷⁶ womit unter anderem die Einführung eines Produktpasses für Textilien verbunden ist. Außerdem sollen verbindliche produktspezifische Ökodesign-Anforderungen festgelegt werden, um mehr Haltbarkeit, umfängliche Wiederverwendbarkeit und Reparierbarkeit sowie eine bessere Faser-zu-Faser-Recyclingfähigkeit zu erzielen, aber auch um toxische Stoffe zu begrenzen und diese identifizieren zu können. Schließlich

167 | Vgl. Europäische Umweltagentur 2019.

168 | Vgl. CSR 2023.

169 | Vgl. Pricewaterhouse Coopers 2023.

170 | Vgl. Boston Consulting Group/Vestiaire Collective 2022.

171 | Vgl. Greenpeace 2022b.

172 | Vgl. bifa Umweltinstitut 2023.

173 | Vgl. Europäische Kommission 2024.

174 | Vgl. Europäische Kommission 2020b.

175 | Vgl. Europäische Kommission 2022.

176 | Vgl. Verordnung (EU) 2024/1781.



enthält die Verordnung auch ein Verbot der Zerstörung unverkaufter Textilien (Artikel 25/Annex VII).

Die novellierte EU-Abfallrahmenrichtlinie (EU) 851/2018 mit ihrem übergeordneten Ziel, Abfall zu vermeiden und als Ressource wiederzuverwenden, verpflichtet EU-Mitgliedstaaten außerdem zur getrennten Sammlung ihrer Textilabfälle ab 2025.¹⁷⁷ Die überarbeitete Fassung der Abfallrahmenrichtlinie umfasst darüber hinaus eine erweiterte Herstellerverantwortung für Haushaltstextilien und Schuhe. Die Vorgaben zur Kennzeichnung von Textilien, insbesondere zur Faserzusammensetzung, werden dabei voraussichtlich Ende 2024 durch eine bereits angekündigte Novelle der Textilkennzeichnungsverordnung (EU) 1007/2011 verschärft.¹⁷⁸ Ziel ist es, relevante Informationen für die Kreislaufwirtschaft entlang der gesamten Wertschöpfungskette zugänglich zu machen. Durch die neue Verordnung (EU) 2024/1157 über die Verbringung (Export, Import und Transit) von Abfällen werden zudem die Regelungen zur Beseitigung von Textilabfällen durch Export verschärft, um die Verwertung von Abfällen im Einklang mit der sogenannten Abfallhierarchie¹⁷⁹ zu fördern.¹⁸⁰

Auch auf nationaler Ebene wurde die Textilindustrie bereits als prioritäres Handlungsfeld der kreislaufwirtschaftlichen Transformation hervorgehoben, und zwar im *Entwurf der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz* (BMUV).¹⁸¹ Zu den konkreten Zielen dieser Strategie im Textilsektor gehören die Erhöhung der Zahl von Secondhandhändlern und Reparaturbetrieben sowie die Erfassung und Steigerung des Umsatzes mit langlebiger Kleidung in zirkulären Geschäftsmodellen.

5.3 Anwendungsbeispiel: Baumwoll-T-Shirt

Obwohl nur noch sehr wenig Bekleidung in Deutschland und der EU hergestellt wird, macht sie mit 81 Prozent den größten Anteil des Textilverbrauchs in der EU aus (die übrigen 19 Prozent sind

Haushaltstextilien); somit hat Bekleidung eine große Hebelwirkung für die Transformation der Textilindustrie weg von linearen Wertschöpfungsketten hin zu langlebigen und geschlossenen Kreisläufen.¹⁸² Kurzärmelige Oberteile sind die am weitesten verbreitete Art von Kleidungsstücken und haben nach Schuhen die kürzeste durchschnittliche Lebensdauer: 42 Prozent werden weniger als drei Jahre getragen, bevor sie ausgemustert werden.¹⁸³ Dies liegt unter anderem daran, dass sowohl T-Shirts als auch Schuhe oft genutzt werden und in allen Jahreszeiten getragen werden können. Aber nicht nur der rasche Verbrauch von T-Shirts, auch ihre Herstellung ist ökologisch problematisch: Denn für die Produktion eines einzelnen Baumwoll-T-Shirts werden bislang circa 2.700 Liter Süßwasser verbraucht, was in etwa derjenigen Menge entspricht, die eine Person in zweieinhalb Jahren trinkt.¹⁸⁴ Andererseits ist das T-Shirt als Produkt prinzipiell kreislauffähig, denn es lassen sich nachhaltige Materialien wie recycelte Baumwolle oder andere biologisch abbaubare Fasern in die Produktion integrieren. Und schließlich kann das T-Shirt sowohl im B2C-Markt als auch im B2B-Bereich vertrieben werden, womit zwei sehr unterschiedliche aber gleichermaßen wichtige Marktsegmente angesprochen werden können.

Als Anwendungsbeispiel aus dem Textilsektor wurde für die vorliegende acatech STUDIE daher das Produkt Baumwoll-T-Shirt gewählt. Ein einfaches Baumwoll-T-Shirt deckt zwar nicht das gesamte Produktportfolio des Bekleidungssektors ab, seine Herstellung ist jedoch verhältnismäßig einfach und zudem relativ gut dokumentiert, sodass für diesen Produkttyp der gesamte Lebenszyklus – von der Materialbeschaffung über die Produktion bis hin zum Recycling – gut nachzuvollziehen ist. Zudem zeigt sich hier das für die Bekleidungsindustrie auch insgesamt charakteristische Problem intransparenter globaler Lieferketten.

Am Beispiel des Baumwoll-T-Shirts wird im Folgenden dargestellt, wie mithilfe digitaler Technologien relevante R-Strategien im Textilsektor umgesetzt werden können, um ein langlebiges und kreislauffähiges Textilprodukt herzustellen. Ein Überblick über die kreislaufwirtschaftlichen Zusammenhänge in der Wertschöpfungskette T-Shirt findet sich in Abbildung 10.

177 | Vgl. Richtlinie (EU) 2018/851.

178 | Vgl. Verordnung (EU) 1007/2011.

179 | Die Abfallhierarchie ist ein Priorisierungssystem der Abfallwirtschaft, das in absteigender Folge die Prinzipien der Vermeidung, der Wiederverwendung, des Recyclings sowie der energetischen Verwertung und Entsorgung von Abfällen umfasst, um Umweltauswirkungen zu minimieren.

180 | Vgl. Verordnung (EU) 2024/1157.

181 | Vgl. BMUV 2024.

182 | Vgl. Köhler et al. 2021.

183 | Vgl. Greenpeace 2022b.

184 | Vgl. Van Woensel 2020.

Phasen des Produktlebenszyklus	Ansätze der Kreislaufwirtschaft	R-Strategie	Technologiefunktionen			
			Daten-sammlung	Ver-netzung	Model-lierung	Automa-tisierung
Produktdesign ↓	Kreislaufwirtschaftlich designen	rethink	●	●	●	
	Designprozess digitalisieren	reduce	●		●	
	Mit Zero-Waste-Techniken produzieren	reduce	●		●	●
Produktion ↓	Wertschöpfungsketten enger verknüpfen	reduce	●	●	●	●
	Digitale Anprobe anbieten	reduce	●		●	
	Über Wert der Kleidung und ihre Pflege aufklären	rethink	●	●	●	
Nutzung ↓	Online-Secondhand-Plattformen etablieren	reuse	●	●		●
	Leasingmodelle ausweiten	rethink	●	●	●	●
	Online-Reparatur-Plattformen stärken	repair		●		
	Smarte Sammlungslösungen etablieren	recycle	●	●	●	
Lebensende ↓	Sortieranlagen (teil-)automatisieren	recycle	●	●	●	●
	Materialströme erfassen und einheitliche Materialien bündeln	recycle	●	●	●	●

Relevanz der Technologiefunktionen zur Umsetzung der Ansätze:

- sehr hoch
- hoch

Abbildung 10: Digital gestützte Kreislaufwirtschafts-Ansätze für die Herstellung eines langlebigen und recyclingfähigen Baumwoll-T-Shirts (Quelle: eigene Darstellung)

Produktdesign

Dem Produktdesign kommt bei der kreislaufwirtschaftlichen Transformation im Textilsektor genau wie in anderen Wirtschaftssektoren große Bedeutung zu, denn nur wenn das T-Shirt nach zirkulären Designprinzipien entworfen wurde, kann es auch langlebig sein, gut repariert und am Lebensende dem Faser-zu-Faser-Recycling zugeführt werden.

Kreislaufwirtschaftlich designen: Die Anforderungen, die ein kreislauffähiges T-Shirt erfüllen muss, sind komplex und hängen

von vielen Faktoren ab. Je nach Materialkomposition kommen unterschiedliche Recyclingverfahren infrage: Beispielsweise kann ein reines Baumwoll-T-Shirt mittels chemischen Zellulose-recyclings zu künstlichen Zellulose regeneratfasern wie Viskose, Modal oder Lyocell weiterverarbeitet werden.¹⁸⁵ Alternativ kann es mechanisch unter Qualitätsverlust der Fasern in kleinere Stücke und einzelne Fasern gerissen werden, die anschließend in einem Verhältnis von derzeit circa 20 bis 50 Prozent zu Fasern aus Rohmaterialien beigemischt werden. Zudem können T-Shirts auch aus ressourcenschonenden, biologisch abbaubaren

185 | Vgl. Fraunhofer IAP 2020.



Materialien wie Holz, Hanf oder Leinen hergestellt werden, was wiederum beim Recycling zu berücksichtigen ist. Die Farbstoffe, mit denen die Fasern gefärbt werden, müssen sorgfältig ausgewählt werden, um ein Faser-zu-Faser-Recycling zu ermöglichen. Außerdem hat jeder Recyclingbetrieb eigene Anforderungen an die zu verarbeitenden Materialien, weshalb diese bereits beim Design beachtet werden müssen. Zirkuläre Designlösungen müssen daher immer zusammen mit der entsprechenden Sortier- und Recyclingtechnik entwickelt werden, damit Produkte auch wirklich im Kreislauf geführt werden können. Das Einnähen von sogenannten Radio-frequency Identification Tags (kurz: RFID-Tags) ist beispielsweise nur dann sinnvoll, wenn diese von den Sortierbetrieben auch ausgelesen werden können. Unternehmen wie die circular.fashion GmbH vernetzen relevante Akteure (Hersteller, Reparatoren, Sammler, Recyclingunternehmen) miteinander und sammeln die spezifischen Anforderungen für die verschiedenen Produktions- und Verwertungsschritte in digitalen Materialbibliotheken. Mittels Modellierungstechniken, Künstlicher Intelligenz und niederschwelliger Kommunikation können die gesammelten Informationen dann in Softwarelösungen und Programme eingebaut werden, die Designerinnen und Designer gezielt beim zirkulären Design unterstützen. Die Designerin beziehungsweise der Designer kann sich beispielsweise für einen sogenannten Mono-Cycle-Ansatz entscheiden, bei dem alle Bestandteile des T-Shirts wie Stoff, Fäden und – falls vorhanden – Knöpfe aus dem gleichen Material sind und somit zusammen recycelt werden können. Alternativ gibt es auch den sogenannten Design-for-Disassembly-Ansatz, bei dem Reißverschlüsse und Knöpfe im Verwertungsprozess oder gegebenenfalls durch die Kundin oder den Kunden vor der Entsorgung einfach getrennt werden können. So kann jede Designerin oder jeder Designer auch ohne spezifisches Wissen digital unterstützt zirkuläre Kleidungsstücke entwerfen.

Designprozess digitalisieren: Ein digitaler Designprozess, bei dem 3D-Modelle genutzt werden, reduziert die Anzahl der Entwicklungszyklen erheblich. Dadurch kann der Ressourcenverbrauch, der durch die Gewinnung von Rohmaterialien und die Logistik im Herstellungsprozess entsteht, reduziert werden. Zudem ermöglichen 3D-Modelle eine kooperative textile Produktentwicklung, indem Kunden und Kundinnen bereits vor der Produktion integriert werden und deren Feedback frühzeitig berücksichtigt wird. So kann die Produktion wenig marktgängiger Kleidung reduziert werden. Dennoch ist wichtig hervorzuheben, dass ein digitaler Designprozess nicht per se die Nachhaltigkeit erhöht, da die Technologie einen hohen Durchsatz an Kollektionen ermöglicht und somit auch entscheidend dazu beigetragen

hat, den ökologisch höchst problematischen Fast-Fashion-Trend zu befördern.

Produktion

Bei der Produktion und im Vertrieb von Textilien werden digitale Technologien vor allem eingesetzt, um Ressourcen einzusparen, die Effizienz zu steigern und Retouren zu reduzieren. Zudem können die global verteilten Lieferketten im Textilsektor durch digitale Technologien übersichtlicher gestaltet und optimiert werden.

Mit Zero-Waste-Techniken produzieren: In der Produktion von Textilien werden große Mengen an Wasser, Energie und Chemikalien eingesetzt. Durch Anwendungen wie das Internet of Things können die Ressourcenströme während der Produktion digital erfasst werden; Modellierungsanwendungen wie der digitale Zwilling und Technologien wie Künstliche Intelligenz können Prozesse anschließend auf Basis der so erfassten Daten optimieren und Ressourcen einsparen. Außerdem lässt sich die Menge textiler Abschnitte und Überreste durch optimierte Schnittmuster reduzieren, und nicht vermeidbare Textilreste können aus den Produktionsstätten direkt ins Recycling überführt werden. Zudem ermöglicht der Einsatz neuer Technologien massive Ressourceneinsparungen. Die 140Fahrenheit GmbH setzt beispielsweise Laser-, Wasch- und Wasserrecyclingtechnologien ein, um den Wasserverbrauch des ressourcenintensiven Veredelungsprozesses bei der Jeansherstellung drastisch zu reduzieren. Durch die Automatisierung solcher ressourcensparender Fertigungsschritte lassen sich schließlich die Effizienz steigern und die Wirtschaftlichkeit des Geschäftsmodells erreichen. Da derzeit der Großteil der hierzulande vertriebenen Bekleidung im Ausland produziert wird, ist die Ressourceneinsparung, die durch optimierte Produktionsmethoden in Deutschland erreicht werden kann, jedoch gering.

Wertschöpfungsketten enger knüpfen: Um in größerem Umfang Ressourcen bei der Produktion und im Vertrieb einzusparen, sollten Wertschöpfungsketten enger geknüpft und stärker lokal verankert werden. Eine verstärkte Digitalisierung über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg und digitale Anwendungen wie der digitale Produktpass können entscheidend dazu beitragen, die Transparenz in der globalen Wertschöpfungskette zu erhöhen. Anschließend können globale Logistikketten mittels Simulationen und digitaler Zwillinge so optimiert werden, dass Ressourcen auf langen Transportwegen eingespart werden. Aufgrund hoher Lohnkosten muss der Automatisierungsgrad in Hochlohnländern wie Deutschland zudem dramatisch erhöht

werden, um die Produktionsstandorte konkurrenzfähig zu halten.

Digitale Anprobe anbieten: Durch neue Technologien wird es zunehmend möglich, Kleidung beim Onlinekauf digital anzuprobieren. Hierfür werden Bildauswertung und Künstliche Intelligenz kombiniert, um ein Foto oder Video der Kundin oder des Kunden mit dem Kleidungsstück zu erzeugen. Eine solche Technologielösung hat das Potenzial, Fehlkäufe und somit auch Rücksendungen sowie den Anteil gekaufter, aber wenig getragener Kleidung zu verringern. Um die digitale Anprobe möglichst realistisch zu gestalten, sind momentan jedoch noch weitere technologische Fortschritte notwendig. Zudem kann die digitale Technologie auf absehbare Zeit weder Haptik noch Stoffqualität abbilden, die bei der Kaufentscheidung aber ebenfalls eine große Rolle spielen.

Nutzung

Die Ausdehnung der Nutzungsintensität bei Kleidung ist ein entscheidender Hebel hin zu einem nachhaltigeren Textilsektor. Hierfür muss einerseits das Nutzungs- und Konsumverhalten von Kundinnen und Kunden nachhaltiger werden; andererseits können aber auch Geschäftsmodelle, die den Kleidungsverleih oder den Weiterverkauf bereits getragener Kleidung vorsehen, die Nutzung qualitativ hochwertiger Kleidung intensivieren und so die Nutzungsphase verlängern.

Über Wert der Kleidung und ihre Pflege aufklären: Ein großes Hindernis auf dem Weg zur Kreislaufwirtschaft im Textilsektor ist, dass der Produktgruppe Kleidung heutzutage nur ein geringer Wert zugemessen und sie als Wegwerfware konzipiert und behandelt wird. Um diesem Trend entgegenzuwirken, bedarf es dringend intensiverer und besserer Aufklärung über das Herstellungsverfahren. Wo und unter welchen Arbeitsbedingungen wurde das T-Shirt in der Auslage einer Boutique hergestellt? Und welche Ressourcen wurden dabei verwendet? Die EU-Kommission hat mit der Ökodesign-Verordnung die Einführung eines EU-weiten Produktpasses für Textilien angestoßen, der voraussichtlich ab dem Jahr 2027 verpflichtend sein wird. Im Produktpass können relevante Informationen gespeichert, modifiziert und ausgelesen sowie für diverse Zwecke genutzt werden. Hierzu müssen die verschiedenen Akteure der komplexen Lieferkette miteinander kooperieren und Daten untereinander austauschen. Einheitliche Datenformate und -standards sind hierfür eine unabdingbare Voraussetzung. Die circular.fashion GmbH hat

beispielsweise mit der sogenannten circularity.ID® einen Open Data Standard^{186, 187} für den Produktpass im Textilsektor entwickelt. Zum Einpflegen und Auslesen der Informationen können wahlweise Near Field Communication Tags (NFC-Tags), Quick Response Codes (QR-Codes) oder RFID-Fäden und Chips genutzt werden. Die Informationen werden dann durch den jeweiligen Inverkehrbringer auf einem dezentralen Server abgespeichert und zugänglich gemacht. Die gesammelten Daten können genutzt werden, um Zertifikate wie OEKO-TEX oder Global Organic Textile Standard (GOTS) oder auch Siegel wie Der Blaue Engel oder der Grüne Knopf um kreislaufwirtschaftlich relevante Informationen zur Lebensdauer oder zur Recyclingfähigkeit des betreffenden Produkts zu ergänzen. Durch niederschwellige Kommunikation über transparente und verlässliche Qualitätssiegel kann sogenanntes Greenwashing – also die Vortäuschung nachhaltiger Produktions- und Vertriebsweisen – verhindert werden; Kundinnen und Kunden können ihre Kaufentscheidung dann nach fundierten Kriterien treffen.

Online-Secondhand-Plattformen etablieren: Neben klassischen Secondhand-Plattformen wie Flohmärkten oder Kleidertausch unter Freunden, Verwandten und Bekannten hat der Kauf und Verkauf auf digitalen Online-Secondhand-Plattformen wie Vinted, Sellpy oder Kleinanzeigen stark zugenommen. Momentan werden in diesem Segment verschiedene Geschäftsmodelle erprobt, die auf digitale Technologien angewiesen sind. So kann die Kleidung entweder durch den Einzelhändler, der sie nach der Nutzung von Kundenseite wieder einsammelt, durch Kundinnen und Kunden selbst oder durch gemeinnützige Sammlungs- und Sortierbetriebe auf Onlineplattformen zum Wiederverkauf angeboten werden. Wenn Verbraucherinnen und Verbraucher durch smarte und leicht umsetzbare Lösungen befähigt werden, ihre Kleidung selbst zu verkaufen, verändert dies das Verbraucherverhalten positiv und führt dazu, dass weniger noch gut erhaltene Kleidung in Sammelcontainern landet. Die digitale Prozessautomatisierung spielt dabei vor allem für die gemeinnützigen Sortierer eine große Rolle, weil sie den zeit- und arbeitsintensiven Prozess der Qualitätsbewertung und der Preisbestimmung effizienter macht. Durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz können beispielsweise automatisch zum Produkt passende Beschreibungstexte generiert werden, sodass die Kleidung mit geringem Aufwand auf Verkaufsplattformen hochgeladen werden kann.

Leasingmodelle ausweiten: Ein noch wenig verbreiteter, aber vielversprechender Kreislaufwirtschaftsansatz betrifft

186 | Vgl. circular.fashion/Scirt 2020.

187 | Vgl. circular.fashion 2020.



digitalbasierte Geschäftsmodelle zum Kleidungsverleih. Im B2B-Sektor gibt es bereits erfolgreiche Pilotprojekte wie beispielsweise DiTex, in dessen Rahmen möglichst langlebig und komfortabel designte Arbeitskleidung vermietet wird. Der Anbieter übernimmt hierbei die korrekte Pflege, mögliche Reparaturen und schließlich das Recycling der Kleidung. Um die Anzahl der Waschgänge zu verfolgen und Reparaturbedarf frühzeitig zu antizipieren, kommen sogenannte Identifier wie RFID-Tags zum Einsatz, die vom Anbieter regelmäßig ausgelesen werden. Die Nutzungsinformationen werden dann in einem Produktpass gespeichert; durch den Einsatz eines digitalen Zwillinges können schließlich etwaiger Reparaturbedarf oder der optimale Zeitpunkt für eine Überführung ins Recycling prognostiziert werden.

Auch im B2C-Sektor gibt es bereits erste Unternehmen, die nach dem Verleihprinzip wirtschaften, wie die Mudjeans International B. V., einen Jeans-Anbieter, der seine Produkte mit Leasingmodellen vertreibt. Dennoch ist eine flächendeckende Einführung von Leasingmodellen im B2C-Sektor schwierig, da üblicherweise eine große Anzahl von Kollektionen in kurzem zeitlichen Abstand an Einzelkundinnen und -kunden verkauft wird. Auf dem Verleihprinzip basierende Geschäftsmodelle können aber noch vor ihrer Einführung mittels zuvor gesammelter Daten und entsprechender Modellierung auf ihre Tragfähigkeit hin getestet werden, um die Risiken für Unternehmen bei der Markteinführung zu verringern. Zudem kann die Einführung von Leasingmodellen im B2B-Sektor neue Textilmärkte eröffnen und zur Erprobung relevanter digitaler Technologien und Anwendungen beitragen, die genauso auch im B2C-Bereich genutzt werden können.

Online-Reparatur-Plattformen stärken: Der Wiederaufbau einer lokalen Infrastruktur, die die Reparatur von Kleidung auch in der Breite ermöglicht, wäre ein entscheidender Schritt auf dem Weg zu einem zirkulären Textilsektor. Online-Serviceangebote für die Reparatur schadhafter Kleidung, wie sie beispielsweise die Repair Rebels GmbH anbietet, können der fehlenden lokalen Infrastruktur aber in gewissem Maße immerhin entgegenwirken. Auch die verbliebene lokale Infrastruktur mit ihren Änderungsschneidereien könnte durch die Einführung digitaler Services gestärkt werden. Weitere Konzepte betreffen die Mitlieferung von Reparatur Kits und die Bereitstellung entsprechender Online-Tutorials durch den Hersteller, die es Kundinnen und Kunden ermöglichen, Reparaturen selbstständig vorzunehmen. Ein zusätzlicher Reparaturdienst des Herstellers wird bislang vor allem für den Outdoorbereich im Rahmen eines Produkt-Service-Pakets erprobt und könnte als integraler Bestandteil eines zirkulären Geschäftsmodell künftig noch stärker ausgebaut werden.

Lebensende

Das Lebensende eines textilen Produkts teilt sich in drei Schritte auf. Zuerst muss die Kleidung gesammelt, dann nach Zustand und Materialzusammensetzung sortiert werden. Schließlich werden die entsprechend getrennten Textilien abhängig von Zustand und Zusammensetzung entweder weiterverkauft, repariert, recycelt oder energetisch verwertet.

Smarte Sammlungslösungen etablieren: Aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht ist unbedingt zu verhindern, dass Kleidungs-textilien im Restmüll landen und somit zwangsläufig für die Weiternutzung oder das Recycling verloren gehen. Um die von der EU bereits geplante Verpflichtung zur getrennten Sammlung von Textilien künftig umzusetzen, kommen verschiedene smarte Sammellösungen infrage. Beispielsweise können Informationen über die korrekte Sammlung und Entsorgung im digitalen Produktpass enthalten sein und diese mittels kleidungsintegrierter QR-Codes von Kundinnen und Kunden ausgelesen werden. Sammelcontainer können zudem mit Sensoren ausgestattet werden, die über den Füllstand und die Materialzusammensetzung der eingeworfenen Kleidung Auskunft geben. Auch Rücknahmeangebote durch die Verkäufer, bei denen Kleidung beispielsweise gegen einen Gutschein zurückgegeben werden kann, können eine Möglichkeit sein, hohe Rückgabequoten zu erreichen. Darüber hinaus lassen sich innovative Geschäftsmodelle entwickeln, bei denen vielfrequentierte Standorte wie Drogeriemärkte, Supermärkte oder Apotheken zusätzlich Kleidung sammeln und diese an Sortierbetriebe oder direkt an die Recycler weitergeben.

Sortieranlagen (teil-)automatisieren: Derzeit werden Alttextilien, die getrennt gesammelt worden sind, noch größtenteils händisch sortiert. Dieses Vorgehen führt zu einem großen Kostenaufwand und Personalbedarf, der in Zeiten des Arbeitskräftemangels einen kritischen Faktor darstellt. Da bei der Sortierung eine hohe Geschwindigkeit nötig ist, damit sich der Prozess auch wirtschaftlich lohnt, müssen digitale Technologien eingesetzt werden, die Textilien vollautomatisch sortieren können. Das händische Einlesen eines eingenähten QR-Codes wäre beispielsweise zu langsam. Außerdem besteht das Risiko eines Verlusts des QR-Codes während der Nutzungsphase. Durch in die Kleidung eingenähte RFID-Fäden, die von Nutzerin oder Nutzer nicht entfernt werden können, ließen sich Materialeigenschaften und Herstellerinformationen mit hoher Geschwindigkeit hingegen automatisch auslesen. Bei Textilien, die nicht mit einem RFID-Faden ausgestattet worden sind, könnte die Materialzusammensetzung durch eine Kombination von Bildgebung, speziellen KI-Algorithmen und Spektroskopie ermittelt werden. Ultrakompakte Nahinfrarot-Spektrometer eignen sich für die Analyse und



Abbildung 11: Übersicht der sektorspezifischen Handlungsfelder zur Förderung von Kreislaufwirtschaft für den Textilsektor (Quelle: eigene Darstellung)

Bestimmung von Textilien und können Monomaterialien zuverlässig erkennen.¹⁸⁸ Bei Mischgewebe ist die eindeutige Bestimmung technisch jedoch sehr herausfordernd, weshalb hier noch Entwicklungsbedarf besteht. Die Kleidung muss zudem nach ihrer Qualität, ihrem Zustand und der Attraktivität des Stils bewertet werden, um entscheiden zu können, ob und wie sie wiederzuverwenden ist. Hierfür braucht es gegenwärtig noch das menschliche Beurteilungsvermögen, zumal auch haptische sowie geruchliche Faktoren eine Rolle spielen.

Materialströme erfassen und einheitliche Materialien bündeln: Um die für eine wirtschaftliche Skalierung nötige Materialmenge zu erreichen, müssen möglichst alle im textilen Sektors auftretenden Materialströme digital erfasst werden. Die digitalen Informationen müssen zudem mittels kompatibler Schnittstellen von mehreren Akteuren gebündelt werden. Zur digitalen Erfassung könnte der digitale Produktpass genutzt werden. Allerdings müssten hierzu alle gesammelten Textilien mit einem digitalen Produktpass ausgestattet sein. Alternativ könnten die zur Sortierung eingesetzten Technologien genutzt werden, um die Materialströme digital zu erfassen. In einem zweiten

Schritt könnten die Daten dann durch Sammlungs- und Recyclingbetriebe in entsprechenden Datenräumen digital zugänglich gemacht werden, sodass ausreichend große Mengen an gleichförmigen Textilien erfasst und gesammelt werden können und sich etwaige Investitionen in die Entwicklung einer geeigneten Faser-zu-Faser-Recycling-Technik wirtschaftlich lohnen.

5.4 Hürden und sektorspezifische Gestaltungsoptionen

Im Folgenden werden Handlungsfelder für den Textilsektor diskutiert, die aus der Gap-Analyse zwischen dem Status quo im Vergleich zum Anwendungsbeispiel abgeleitet wurden. Die Analyse macht deutlich, dass bei der Transformation zur Kreislaufwirtschaft im Textilsektor noch viel Handlungsbedarf besteht. Besondere Herausforderungen stellen hierbei die starke Globalisierung des Sektors und die hohe Konsumrate für Billigprodukte in Europa dar, für die es einer internationalen Regulierung bedarf. Zudem ist die Veränderung des Konsumverhaltens eine

188 | Vgl. Fraunhofer 2023.



schwer überwindbare Hürde, bei der digitale Technologien nur bedingt helfen. Insbesondere bei der Einführung digitaler Produktpässe und der Entwicklung einer lokalen Infrastruktur zur Sammlung, Sortierung und Wiederaufbereitung von Textilien könnten digitale Technologien aber erheblich dazu beitragen, die notwendige Transparenz zu schaffen und die Vernetzung der Akteure zu fördern.

Circular Design etablieren

Die Anforderungen für textiles Recycling sind sehr spezifisch und müssen bereits beim Produktdesign berücksichtigt werden. Einerseits fehlt es im Produktdesignbereich nach wie vor an Wissen über zirkuläres Design und die speziellen Anforderungen an das Recycling; andererseits bestehen bislang noch zu wenig Anreize, um ein T-Shirt oder andere Kleidungsprodukte zirkulär zu designen, da dies mit einem großen Mehraufwand einhergeht und derzeit wenig Vorteile für die Hersteller bringt.

Wie können digitale Enabler helfen? In Datenräumen und Materialbibliotheken können Recyclinganforderungen digital gespeichert und zugänglich gemacht werden. Hierauf aufbauende Softwarelösungen können Designerinnen und Designer dabei unterstützen, kreislauffähige Kleidung zu entwerfen. Über Onlineplattformen können sich die verschiedenen Akteure zudem vernetzen und miteinander abstimmen. Mit digitalen Produktpässen können relevante Informationen dann über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg weitergegeben werden.

Wie kann die Politik unterstützen? Zirkuläres Design könnten in den einschlägigen deutschen Studiengängen stärker verankert werden. Zudem könnten einheitliche Softwarelösungen, die zirkuläres Design unterstützen, in Förderprogrammen vorangetrieben werden. Damit sich zirkuläres Design für die Hersteller lohnt, muss darüber hinaus zunächst eine Infrastruktur für die Rückführung von Textilien aufgebaut werden, sodass bereits verwendete Materialien wieder als Sekundärrohstoffe genutzt werden können. Eine Rückführung erfordert die Sortierung und das Recycling der gesammelten Textilien, was aufgrund hoher Kosten und geringer Mengen an Textilien mit einheitlicher Materialzusammensetzung derzeit nicht wirtschaftlich ist. Die Politik könnte daher den Ausbau der Sekundärrohstoffgewinnung im Textilsektor durch gezielte Förderprogramme unterstützen. Damit das Recycling im Textilsektor wirtschaftlich gestaltet wird, sollte der Fokus dabei auf einer stärkeren Vernetzung der Akteure in der Sortier- und Recyclingtechnik über Onlineplattformen

und in Datenräumen sowie auf der Bündelung von Materialströmen liegen.

Einführung digitaler Produktpässe im Textilsektor

Relevante Informationen zur richtigen Pflege und zum Recycling eines T-Shirts oder eines anderen Bekleidungsprodukts müssen über komplexe Lieferketten hinweg weitergegeben werden, um Verbraucherinnen und Verbraucher zu erreichen. Gleiches gilt für Informationen zur Bewertung der Material- und Produktnachhaltigkeit und deren Zertifizierung. Digitale Produktpässe sind hierfür prinzipiell zwar ein geeignetes Mittel, werden bislang jedoch selbst in ambitionierten Unternehmen noch selten eingesetzt, da über die gesamte Lieferkette hinweg eine Vielzahl nicht selten inkompatibler Softwarelösungen und Datenformate genutzt wird.

Wie können digitale Enabler helfen? Informationen zum Produktionsprozess und zum verwendeten Material eines Textilprodukts können über die Lieferkette hinweg, wie bereits erwähnt, in einen digitalen Produktpass aufgenommen werden. Mittels aufgedruckter QR-Codes, die sich nicht abwaschen oder auslösen, dafür aber auslesen lassen, können zudem Pflege- und Reparaturhinweise für Nutzerinnen und Nutzer zur Verfügung gestellt werden. Mittels RFID-Tags oder -Fäden, die schwer zu entfernen sind, ließen sich künftig schließlich auch schnell auslesbare, detaillierte Informationen über die Materialzusammensetzung für Sammlungs- und Sortierungsbetriebe einnähen.

Wie kann die Politik unterstützen? Welche Datenformate und Schnittstellen genutzt werden und welche Parameter und Werte in den Produktpässen enthalten sein müssen, sollte regulatorisch vereinheitlicht werden. Fortgeschrittene Initiativen zum digitalen Produktpass in anderen Sektoren wie der *Battery Pass*,¹⁸⁹ können hier Orientierung bieten und als Vorlage für den Textilsektor dienen. Dabei müssen sektorspezifische Eigenheiten wie beispielsweise die viel geringere Komplexität eines T-Shirts im Vergleich zu einer Batterie beim Design des Produktpasses berücksichtigt werden. Angesichts des hohen Globalisierungsgrads im Textilsektor ist zudem zu klären, wie der Informationsfluss und die Richtigkeit der Angaben im Produktpass über die komplexe Lieferkette hinweg sichergestellt werden können. Bei der Ausgestaltung des digitalen Produktpasses sollte daher eng mit bereits existierenden Initiativen wie der *Accelerating Circularity* zusammengearbeitet werden, um schnelle Fortschritte zu erzielen und die Entstehung verschiedener, inkompatibler Standards

189 | Vgl. Battery Pass 2024.

zu verhindern. Zudem ist politisch zunächst zu klären, welche Funktionen der digitale Produktpass im Textilsektor konkret erfüllen soll – ob hier die Verbrauchertransparenz, die Sichtbarmachung und Bepreisung von Umweltauswirkungen oder die Weitergabe recyclingrelevanter Daten im Vordergrund steht, weil damit verschiedene Anforderungen an eine technologische Lösung und den Informationsgehalt einhergehen.

Aufbau geeigneter Strukturen im Textilsektor

Infolge der starken Globalisierung des Textilsektors fehlt es hierzulande an Infrastruktur für die Produktion, die Reparatur und das Recycling von Textilien und für die Weiterverarbeitung entsprechender Rezyklate. Auch finden Konfektion und Zuschnitt meist woanders als der Recycling- und Spinnprozess statt. Somit können Textilüberreste aus der Produktion nicht ohne großen logistischen Aufwand dem Recycling zugeführt werden. Das Recyceln von Textilien ist zudem technisch schwierig und wird durch eine große Vielfalt von Fasermischungen erschwert; zumal sich die Stoffmischungen, die in Bekleidungsprodukten verwendet werden, permanent ändern. Darüber hinaus ist das Textilrecycling im Vergleich zu anderen Recyclingbranchen (zum Beispiel Kunststoffrecycling) noch wenig digitalisiert und automatisiert. Angesichts der schwankenden Qualität von zu recycelnden Fasern werden die Maschinen größtenteils noch manuell und mit viel Erfahrungswissen eingestellt, um entsprechende Eigenschaften zu erzielen. Die Qualitäten der Fasern, die durch mechanisches Recycling erzeugt werden, unterscheiden sich gleichwohl deutlich gegenüber Primärmaterialien und sind bisher nicht einheitlich charakterisiert. Es fehlen beispielsweise Angaben zur Farbe und zur Qualität der recycelten Fasern. Diese werden aber für die Weiterverarbeitung und den Weiterverkauf dringend benötigt. Außerdem sind bislang alle etablierten Technologien zur Verarbeitung von Fasern entlang der Prozesskette (Auflösen oder Reißen der Fasern, Spinnereivorbereitung, Garnherstellung und Herstellung textiler Flächen) für konstante Faserqualitäten ausgelegt, die gegenwärtig betriebene Recyclinganlagen aber nicht zu gewährleisten imstande sind. Und schließlich kommen bei der Sammlung von Alttextilien kaum genug Mengen einer Stoffmischung zusammen, dass es sich für Recycler lohnen würde, ihre Maschinen entsprechend umzurüsten.

Wie können digitale Enabler helfen? Digitalisierte Maschinen, eine Automatisierung des Verfahrens und KI-Modelle zur Prozessoptimierung können die Rentabilität zirkulärer Geschäftsmodelle im Textilsektor steigern. Beispielsweise ließe sich die Qualität von Rezyklaten durch eine automatisierte Qualitätsmessung besser und effizienter charakterisieren. Die hier erhobenen Daten können dann in digitalen Datenräumen und auf

Onlineplattformen für den Rohstoffhandel zur Verfügung gestellt werden, um Angebot und Nachfrage der Materialien aufeinander abzustimmen.

Wie kann die Politik unterstützen? Um die Qualität von Alttextilien besser zu charakterisieren, deren Sortierung zu erleichtern und recycelte Bekleidungsprodukte zu standardisieren, braucht es entlang der textilen Wertschöpfungskette dringend Normen zur Angabe von Produkt- und Materialqualität. Politische Akteure könnten die Erarbeitung solcher Normen durch nationale und internationale Normungsorganisationen unter Einbeziehung relevanter Industrie- und Umweltverbände und Vertretern aus der Wissenschaft anstoßen. Anschließend könnten die genormten Qualitätsdaten mittels digitaler Anwendungen wie Datenräumen oder digitaler Produktpässe zwischen den Akteuren der Wertschöpfungskette weitergegeben werden. Es muss dabei geklärt werden, ob der digitale Produktpass hauptsächlich als Werkzeug zur Bewertung des ökologischen Produktfußabdrucks (Identität und Herkunft, Zusammensetzung, Eigenschaften und Umweltauswirkungen des Produkts) genutzt werden soll oder auch als klar reguliertes Werkzeug zur Weitergabe von Qualitätsdaten in der textilen Prozesskette. Vor allem kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) könnten bei der teilweise aufwändigen Einführung der entsprechenden Technologien durch staatliche Förderinitiativen unterstützt werden. Wie bereits im ersten Handlungsfeld beschrieben, braucht es außerdem eine verstärkte Vernetzung der Textilverarbeiter, um größere Ströme gleichartiger Stoffmischungen zu erzeugen. Konsortien, die unter Berücksichtigung des Kartellrechts zum Ziel haben, „aus Wettbewerbern Partner zu machen“ sollten daher vermehrt gefördert werden.

Veränderung des Konsumverhaltens

Kleidung hat einen starken emotionalen und symbolischen Wert, durch den Menschen Status, Lebenseinstellung und Identität zum Ausdruck bringen. Secondhand- oder geliehene Kleidung sind in diesem Zusammenhang noch nicht allgemein akzeptiert. Zudem wird viel Greenwashing betrieben, was es Kundinnen und Kunden erschwert, nachhaltige Produkte zu erkennen und Nachhaltigkeitskriterien in die Kaufentscheidung miteinzubeziehen.

Wie können digitale Enabler helfen? Vertrauenswürdige Zertifikate und Siegel können Konsumentinnen und Konsumenten über digitale Produktpässe zugänglich gemacht werden und diese ermutigen, nachhaltige und kreislauffähige Kleidung zu kaufen. Mittels digitaler Plattformen, die die Qualität von gebrauchter Kleidung sicherstellen, ließe sich zudem die Bereitschaft steigern, gebrauchte Kleidung zu kaufen. Und schließlich



können digitale Technologien genutzt werden, um Anreizsysteme für ein nachhaltiges Kauf- und Konsumverhalten zu schaffen. Beispielsweise könnten Unternehmen spielerische Apps und Social Media Challenges einsetzen, um nachhaltiges Kaufverhalten oder die Reparatur von Kleidung stärker zu bewerben und durch Rabatte bei zukünftigen Käufen belohnen.

Wie kann die Politik unterstützen? Die Vergabe von Siegeln und Zertifikaten geht für Mittelständler mit einem bürokratischen und kostenintensiven Prozess einher. Aus Effizienz- und

Kostengründen sollten daher möglichst keine neuen Qualitätsausweisformate geschaffen werden, sondern etablierte Siegel und Zertifikate (zum Beispiel aus den Bereichen der Corporate Social Responsibility und der Umweltverträglichkeit) lediglich um kreislaufwirtschaftliche Anforderungen ergänzt werden. Die entsprechenden Informationen sollten der Bevölkerung außerdem in niederschwelliger Form zur Verfügung gestellt werden. Des Weiteren könnte die Bevölkerung über digitale Informationskampagnen noch stärker über die negativen Umweltauswirkungen von Fast Fashion und Ultra Fast Fashion informiert werden.

6 Sektorübergreifende Gestaltungsoptionen

Die Analyse der Anwendungsbeispiele zeigt, dass in allen drei repräsentierten Wirtschaftssektoren große Potenziale bestehen, um Wertschöpfungsketten zirkulär zu gestalten. Zudem wurde deutlich, dass digitale Technologien und Anwendungen bei der Etablierung zirkulärer Wertschöpfungsketten eine entscheidende Rolle spielen. Denn anders als die lineare Wirtschaft benötigt die Kreislaufwirtschaft einen **intensiven Informationsaustausch zwischen allen Akteuren der Wertschöpfungskette**: Eigenschaften und Zustände von Produkten, Bauteilen und Materialien müssen erfasst und teilweise über lange Zeiträume aktuell gehalten werden, um sie künftigen Nutzern, Reparateuren, Händlern und Recyclern zur Verfügung stellen zu können. Die hierfür erforderliche Informationsermittlung, -weitergabe und -nutzung lässt sich nur mithilfe digitaler Technologien effizient und kostengünstig realisieren.

Der **digitale Werkzeugkasten**, den es zu diesem Zweck braucht, ist größtenteils bereits vorhanden. Simulationen und digitale Zwillinge können komplexe physische Produkte aus diversen Materialien digital abbilden, Künstliche Intelligenz wiederum erlaubt Vorhersagen über deren Zustand und die mögliche Weiternutzung. Digitale Produktpässe und Datenräume ermöglichen schließlich den sicheren und effizienten Austausch von Daten zwischen verschiedenen Akteuren entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Um diese digitalen Enabler für den Ausbau der Kreislaufwirtschaft nutzen zu können, braucht es jedoch entsprechende digitale Infrastrukturen und außerdem standardisierte, kompatible Anwendungen (zum Beispiel digitale Produktpässe und Datenräume).

Zwar haben die deutsche und die europäische Politik den dringenden Handlungsbedarf zur Einführung einer umfassenden Kreislaufwirtschaft in den drei hier betrachteten Sektoren erkannt und wichtige Maßnahmen bereits in Gang gesetzt; gegenwärtig liegt der **Fokus konkreter Maßnahmen aber noch zu stark auf dem Recycling**, um eine tatsächlich umfassende Transformation des Wirtschaftssystems zu bewerkstelligen. Die Potenziale höher zu bewertender R-Strategien,¹⁹⁰ die nur mittels digitaler Technologien erschlossen werden können und darauf abzielen, die Gesamtproduktmenge zu reduzieren (zum

Beispiel durch eine längere und intensivere Nutzung von Produkten und durch Servicemodelle), werden bisher noch zu wenig ausgeschöpft. Geringe Wirtschaftlichkeit, mangelnde Datenverfügbarkeit und -qualität sowie fehlende Interoperabilität infolge inkompatibler Schnittstellen und Datenformate stehen einer großflächigen Anwendung digitaler Werkzeuge im Sinne der Kreislaufwirtschaft also bislang noch im Wege.

Weniger als die (Weiter-)Entwicklung einzelner Technologien sollte daher jetzt der Aufbau von Datenökosystemen für zirkuläre Wertschöpfungsnetzwerke im politischen Fokus stehen. Die *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie*, die voraussichtlich im Herbst 2024 verabschiedet werden soll und bislang als Entwurf vorliegt, beschreibt zwar ebenfalls digitale Enabler als notwendigen Baustein einer Transformation zur Kreislaufwirtschaft; die Enabler werden ihr volles Potenzial aber nur entfalten können, wenn die **Rahmenbedingungen für die Kreislaufwirtschaft** insgesamt so verbessert werden, dass digitale Technologien tatsächlich auch einen **ökologischen und einen ökonomischen Mehrwert** erzielen. Dabei sind nicht zuletzt der teilweise hohe Energiebedarf der Technologien und ein Reboundeffekt¹⁹¹ zu berücksichtigen, die den Mehrwert erheblich schmälern können. Der nutzenbringende Einsatz digitaler Enabler für die Kreislaufwirtschaft erfordert daher ein tiefgreifendes Verständnis der konkreten Prozesse. Dafür sind die in Abbildung 12 dargestellten Handlungsfelder sektorübergreifend besonders bedeutsam.

Zunächst müssen die Voraussetzungen für die erfolgreiche Einführung der Kreislaufwirtschaft geschaffen werden, indem **Umweltkosten sichtbar gemacht werden**, der Einsatz von recycelten Produkten, Bauteilen und Materialien ermöglicht wird sowie geeignete **Normen und Zertifizierungen** eingeführt werden. Neben diesen Voraussetzungen braucht es funktionsfähige **Märkte für zirkuläre Produkte und Dienstleistungen**, die durch entsprechende **Anreizsysteme** – unter anderem eine angemessene Bepreisung von Umweltkosten – gestützt werden, sodass sich die Wettbewerbsfähigkeit von kreislauffähigen Produkten und Dienstleistungen erhöht. Um den Einstieg in die Circular Economy und deren Skalierung zu erleichtern, ist darüber hinaus eine **transferorientierte Förderung** mit einem Fokus auf Initiativen zur Verknüpfung unterschiedlicher Wertschöpfungsketten notwendig. Letztendlich kann der Übergang zu einer umfassenden Kreislaufwirtschaft aber nur gelingen, wenn der Wandel von der **Gesellschaft** mitgetragen und aktiv gestaltet wird. Diese fünf Handlungsfelder werden im Folgenden genauer erläutert.

190 | Als höher zu bewertende R-Strategien werden im 10-R-Modell jene Strategien bezeichnet, die Produkte einsparen, deren Nutzung intensivieren und die Lebenszeit von Produkten erhöhen.

191 | Führen die digitalen Technologien zu einem Mehrkonsum an Produkten, relativiert das die transformationsbedingte Ressourceneinsparung bei Produktion, Logistik und Vertrieb.



Abbildung 12: Sektorübergreifende Handlungsfelder für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft (Quelle: eigene Darstellung)

6.1 Umweltkosten sichtbar machen

Fehlende wirtschaftliche Rentabilität gegenüber linearen Geschäftsmodellen ist eines der wichtigsten Hemmnisse für die Kreislaufwirtschaft. Das zugrunde liegende Problem ist, dass **Umweltkosten sich grobenteils nicht in den Produkt- und Rohstoffkosten widerspiegeln**. Sie sind für den Endkonsumenten, aber auch für Akteure innerhalb der Wertschöpfungskette weitgehend unsichtbar. Auch wenn unter Einbeziehung der externen Kosten die Kreislaufwirtschaft volkswirtschaftlich sinnvoll wäre, sind zirkulär gestaltete Dienstleistungen und Produkte aktuell teurer als lineare – es liegt eine Marktverzerrung zuungunsten zirkulärer Wirtschaftsweisen und Produkte vor. Die Umweltkosten werden grobenteils von der Allgemeinheit getragen, wobei erschwerend hinzukommt, dass sie häufig grenzüberschreitend anfallen.¹⁹²

Digitale Lösungen können zwar dazu beitragen, die Kosten zirkulärer Dienstleistungen und Produkte zu senken; die Benachteiligung der Kreislaufwirtschaft durch die fehlende Berücksichtigung von Umweltkosten können sie aber in der Regel nicht ausgleichen. Um Umweltkosten zu bepreisen, aber auch um sie als Auswahlkriterium in öffentlichen Vergaben oder (freiwillig) bei Kauf- und Investitionsentscheidungen zu berücksichtigen, müssen sie zunächst ermittelt und transparent gemacht werden. Hierfür ist eine für Prüfstellen und Unternehmen umsetzbare Indikatorik erforderlich, wobei zwischen Genauigkeit,

Vollständigkeit und Aufwand der Datenermittlung sorgfältig abzuwägen ist.

Digitale Technologien spielen für die Ermittlung von Umweltkosten eine wichtige Rolle: Beispielsweise ermöglicht eine Planungssoftware mit digitalem Zwilling, die Ökobilanz und Kreislauffähigkeit verschiedener Produktdesignalternativen zu vergleichen. Distributed-Ledger-Technologien und digitale Produktpässe erlauben wiederum, Angaben zu Umweltkosten entlang der gesamten Wertschöpfungskette nachzuverfolgen, und erleichtern zudem die Marktüberwachung. Gesetzliche Verpflichtungen, Umweltkosten in standardisierten Formaten darzustellen, machen diese Informationen für verschiedene Akteure transparent und leichter zugänglich. Die 2024 in Kraft getretene EU-Ökodesign-Verordnung bietet mit der Einführung des digitalen Produktpasses ab voraussichtlich 2027 für viele Produkte einen entsprechenden Rahmen. Die konkrete Umsetzung wird derzeit ausgearbeitet und erprobt.

6.2 Normierung, Zulassung und Zertifizierung

Um den Austausch von Produktinformationen zu erleichtern und den Aufbau eines Datenökosystems zu ermöglichen, müssen Entwicklung und Einsatz **standardisierter und interoperabler**

192 | Vgl. Ockenfels/Schmidt 2019.

Datenformate und Schnittstellen vorangetrieben werden. Entsprechende Maßnahmen bilden die Grundlage für einen durchgängigen und effizienten Informationsfluss entlang der gesamten Wertschöpfungskette, der für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft zwingend erforderlich ist. Die Schaffung von Interoperabilität bei Datenformaten und Schnittstellen wird von verschiedenen Initiativen bereits vorangetrieben und ist zum Teil bereits Gegenstand der Normung. Die Normungsarbeit sollte dabei besonders auf europäischer Ebene weiter vorangetrieben werden, um zirkuläre Ökosysteme über den gesamten europäischen Binnenraum hinweg aufzubauen. Auch die globale Anschlussfähigkeit der entsprechenden Normen sowie die Akzeptanz durch die relevanten Akteure ist von großer Bedeutung, damit diese bereit sind, ihre Daten zu teilen.

Auf Basis von Normung und Standardisierung bieten digitale Anwendungen wie der digitale Produktpass und Datenräume die erforderlichen Werkzeuge zur Etablierung zirkulärer Wertschöpfungs-systeme. Derzeit werden beispielsweise die Normen für die technische Ausgestaltung des digitalen Produktpass im Auftrag der EU durch die europäischen Normierungsorganisationen CEN und CENELEC¹⁹³ entwickelt. Entscheidend ist in diesem Zusammenhang, dass die Organisationen eng mit aktiven Industrieinitiativen, die Standards und interoperable Schnittstellen für ihren entsprechenden Sektor entwickeln, zusammenarbeiten, um sektorspezifische Anforderungen zu identifizieren und entsprechende Spezifikationen interoperabel in den digitalen Produktpass aufnehmen zu können.

Darüber hinaus können auch Initiativen für Datenräume, im Mobilitätsbereich beispielsweise der *Mobility Data Space* (MDS), im Automobilssektor *Catena-X* und im Kontext von Industrie 4.0 der *Datenraum Industrie 4.0/Manufacturing-X*, die Entwicklung standardisierter Datenformate und interoperabler Schnittstellen vorantreiben. Das *Gaia-X*-Ökosystem baut zudem bereits eine Dateninfrastruktur auf, die auf der digitalen Souveränität der Dateneinhaber, auf Interoperabilität und auf dem Open-Source-Gedanken basiert. Darauf aufbauend können Datenräume für verschiedene Sektoren entwickelt werden. Die Weiterentwicklung der technischen Komponenten von *Gaia-X* ist dabei ebenso wichtig wie die Entwicklung konkreter Anwendungsfälle, die den Nutzen von Datenräumen in den jeweiligen Sektoren demonstrieren und so zur Entstehung und zum Wachstum von Datenökosystemen beitragen können.

Ein weiteres wesentliches Hemmnis für die Entwicklung zirkulärer Wertschöpfungsmodelle in Deutschland und der EU ist

eine Produkt- und Abfallregulierung, die nach wie vor größtenteils noch auf eine lineare Wirtschaft hin ausgerichtet ist. Der Einsatz von Recyclingprodukten wird so gegenwärtig noch erschwert und sollte vereinfacht werden. Beispielsweise kann Abfall, also ein Produkt am Ende seines Lebenszyklus, bislang nur durch zugelassene Verwerter verarbeitet werden. Produzierende Unternehmen müssen unter erheblichem zeitlichem und finanziellem Aufwand eine eigene Lizenz als Verwerter erwerben, um Zugang zu den entsprechenden Produktströmen zu erhalten. Daher sollte eine überarbeitete, kreislaufbezogene Abfalldefinition in der Regulierung Wertstoffströme für mehr Marktteilnehmer und einfacher zugänglich machen.

Zudem sollten künftig die **Eigenschaften von recyceltem Material bei der Zulassung** zur Produktion stärker berücksichtigt werden. Recycelte Materialien müssen für die Zulassung zur Verwendung bislang vergleichbare Kriterien wie neuwertige Materialien erfüllen, unabhängig davon, ob diese im Aufbereitungsprozess realisierbar oder für den Verwendungszweck überhaupt erforderlich sind. Materialregulierung und die Regulierung zur Förderung der Kreislaufwirtschaft müssen daher aufeinander abgestimmt werden, um die langfristige Kreislaufführung von Materialien durch Unternehmen zu ermöglichen. Digitale Technologien können hier die notwendigen Informationen zur Charakterisierung der Materialien zur Verfügung stellen, beispielsweise durch KI-gestützte Auswertung von Bilddaten. Datenräume und Onlineplattformen bieten zudem die Möglichkeit zur Vernetzung aller Akteure und zum Handel mit recycelten Materialien zwischen Anbieter und Abnehmer.

Die 2024 erlassene EU-Ökodesign-Verordnung für Nachhaltige Produkte besagt, dass Produkte langlebig, einfach zerlegbar und wiederverwertbar sein sollen. Die entsprechenden Produktinformationen müssen in digitalen Produktpässen künftig verfügbar gemacht werden und ermöglichen in Kombination mit digitalen Technologien zur Identifikation (zum Beispiel RFID-Tag, QR-Code) so dann die eindeutige Zuordnung der Informationen zum physischen Produkt. Die Informationen sollten darüber hinaus genutzt werden, um für die Kreislaufwirtschaft relevante Aspekte wie Wiederverwertbarkeit oder Langlebigkeit durch (bestehende) Siegel und Zertifikate für Materialien und Produkte gegenüber dem Endkunden besonders hervorzuheben. Auf diese Weise entsteht eine Datenbasis für die Bepreisung von Umweltkosten, die der bisherigen Marktverzerrung entgegenwirken würde. Zudem könnten derartige Siegel als Grundlage für die erweiterte Informationsvermittlung und für Vertrauensbildung innerhalb eines Wertschöpfungsnetzwerks und in der Bevölkerung dienen.

193 | CEN: Europäisches Komitee für Normung, CENELEC: Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung.



6.3 Anreize auf bestehenden und Design von neuen Märkten

Eine weitere notwendige Voraussetzung für den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft sind die Etablierung und die Skalierung von Märkten für zirkuläre Produkte und entsprechende Dienstleistungen. Im Zentrum möglicher Maßnahmen sollten dabei Anreizsysteme stehen, die Zirkularität begünstigen. Des Weiteren sind Matching-Plattformen zu schaffen oder zu verbessern, die Akteure zusammenbringen und den Abschluss von Transaktionen unterstützen. Eine Kreislaufwirtschaft entspricht nicht der Logik der heutigen Märkte, und geopolitische Trends reichen nicht aus, um Veränderungen zu erzeugen. Deswegen braucht es Anreizsysteme und Unterstützung für den Aufbau zirkulärer Märkte. Der regulatorische Rahmen sollte hier allerdings einen Ausgleich zwischen verpflichtenden Vorgaben und Freiräumen für die unternehmerische Gestaltung der Transformation darstellen, um Kreativität und Innovation zu fördern.

Umweltkosten sollten ausgehend von Sichtbarmachung (siehe Kapitel 6.1) im nächsten Schritt als Anreiz zur Entwicklung zirkulärer Produkte auch **aktiv bepreist werden**. Mit der CO₂-Bepreisung beim europäischen Emissionshandel wird ein Teil entstehender Treibhausgasemissionen bereits als Kostenfaktor berücksichtigt, die oft deutlich emissionsärmeren Kreislaufwirtschaftsprodukte und -dienstleistungen werden auf diese Weise in gewissem Maße unterstützt. Um aber tatsächlich gleiche Wettbewerbsbedingungen für zirkuläre und lineare Produkte oder entsprechende Dienstleistungen zu schaffen, müssten aber noch weitere Umweltkosten – etwa die Auswirkungen von Rohstoffabbau und Abfallentsorgung auf Böden, Gewässer und Ökosysteme – in die Bepreisung miteinbezogen werden. Um Anreize für die Verlängerung der Produktlebensdauer und die Verwendung recycelter sowie nachhaltiger Rohstoffe zu schaffen, sollte dabei der gesamte Lebenszyklus eines Produkts inklusive Produktion, Nutzungsphase und Entsorgung betrachtet werden. Eine grundlegende Herausforderung ist in diesem Zusammenhang die Implementierung geeigneter Mechanismen für außereuropäische Importe und Exporte, um europäische Produzenten durch die Bepreisung nicht zu benachteiligen. Durch die Einführung des Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) bis 2026, der Importe bestimmter Produkte auf Basis ihres CO₂-Fußabdrucks bepreist, wird dies zumindest bereits beabsichtigt.

Ein erfolgreicher Auf- und Ausbau zirkulärer Märkte beruht neben den erläuterten Anreizsystemen vor allem auch auf einer **verstärkten Vernetzung zwischen den Marktakteuren**, etwa in der Wieder- und Weiterverwertung sowie bei der Etablierung neuer Geschäftsmodelle. Eine bessere Vernetzung von Marktakteuren zum Beispiel durch die im NKWS-Entwurf bereits skizzierte Bereitstellung öffentlicher Informationsplattformen und Datenräume oder durch industrie-eigene Initiativen dient der Bündelung von Material- und Produktströmen am Produktlebensende. Auf diese Weise können wirtschaftlich tragfähige und planbare Märkte für Sekundärrohstoffe und die Bauteilwiederverwertung etabliert werden. Industrie-eigene Initiativen und Kooperationen könnten eine solche Vernetzung fördern, wobei entsprechende Möglichkeiten derzeit noch durch das Wettbewerbsrecht und speziell durch das Kartellrecht stark eingeschränkt sind. Aktuelle zirkuläre Geschäftsmodelle beschränken sich daher größtenteils auf kleine Wertschöpfungsnetzwerke mit geringen Materialströmen, wodurch ihre wirtschaftliche Tragfähigkeit leidet.

Im Sinne einer zukunftsfähigen Kreislaufwirtschaft sollten Material- und Produktströme in der Wiederverwertung und Kreislauf-führung außerdem logistisch koordiniert und damit gebündelt werden. So können neue Geschäftsmodelle entstehen und die sortenreine Wiederverwertung forciert werden. Auf Basis dadurch begünstigter Skalierungseffekte kann auch die Wiederverwertung von Abfallströmen aus Produkten/Materialien mit geringem Wert oder Volumen wirtschaftlich tragfähig umgesetzt werden. Wenn aktuell bereits Sekundärrohstoffe in der Produktion genutzt werden, geschieht das größtenteils im Rahmen sogenannter Open-Loop-Ansätze wie bei der Nutzung von Sekundärrohstoffen aus dem Verpackungssektor für rezyklatbasierte Textilien. Bezüglich der Art der Wiederverwertung muss zwischen Open- und Closed-Loop-Ansätzen im Einzelfall abgewogen werden.¹⁹⁴

Eine Vernetzung auf Basis digitaler Technologien, zum Beispiel über entsprechende Matchmaking-Plattformen, bildet auch hier wieder die Grundlage für eine gemeinschaftliche Wiederverwertung und die Bündelung von Stoffströmen innerhalb eines Sektors oder herstellerübergreifend für eine Produktklasse. Digitale Technologien zur Automatisierung der Abwicklung und Aufbereitung sowie zur Gestaltung der Rückführungslogistik verbessern die Wirtschaftlichkeit in zirkulär orientierten Märkten, zum Beispiel durch Reduktion der Transaktionskosten und durch eine bessere Skalierbarkeit von Wiederaufbereitungs- oder

194 | Closed-Loop-Ansätze minimieren die Abhängigkeit von Sektoren untereinander, da keine Stoffströme aus anderen Bereichen „kannibalisiert“ werden. Open-Loop-Ansätze können wiederum dazu beitragen, neue Wertschöpfungsnetzwerke aufzubauen; zusätzlich bieten sie im Vergleich auch erweiterte Möglichkeiten zum Upcycling und reduzieren das Risiko für Downcycling.

Recyclingprozessen. Besonders in einem Hochlohnland wie Deutschland sollten Wiederverwertungsprozesse so weit wie möglich automatisiert werden, um einerseits die Kosten zu minimieren und andererseits eine Skalierung in der Wiederverwertung zu ermöglichen, die aufgrund manueller Verfahrensschritte derzeit begrenzt ist.

Ausgehend von einer verstärkten Vernetzung der Marktteilnehmer ermöglichen digitale Technologien durch Modellierung zudem Vorhersagen über das komplexe Verhältnis von Angebot und Nachfrage für Sekundärrohstoffe und damit Planbarkeit sowie zur Rentabilität neuer Geschäftsmodelle. Des Weiteren befördert eine stärkere Vernetzung der Marktteilnehmer auch Anreize für die Entwicklung kreislauffähiger Produkte im Sinne einer einfacheren Wiederverwertung von Produkten und Materialien, sofern diese in einem größeren Ökosystem verwertbar sind.

6.4 Transferorientierte, interdisziplinäre Förderstrategie

Auf dem Weg zu einer umfassenden Kreislaufwirtschaft verbleiben jedoch einige Hürden, die nicht durch rechtliche Rahmenbedingungen und wirtschaftliche Anreizsysteme allein überwunden werden können. So sind vielfach signifikante Investitionen erforderlich, bevor sich kreislaufwirtschaftliche Strategien für Unternehmen lohnen. Zudem braucht es für die Entwicklung kreislauffähiger Produkte und zirkulärer Geschäftsmodelle eine dreifache Kompetenz, die sowohl ein tiefes Verständnis der Kreislaufwirtschaft und digitaler Technologien als auch deren sektor- und produktspezifische Anwendung einschließt. Notwendig ist daher eine interdisziplinär orientierte Förderstrategie, die darauf ausgerichtet ist, Kreislaufstrategien und die entsprechenden digitalen Technologien in die Anwendung zu bringen.

Um die Bepreisung von Umweltkosten als Treiber einer Kreislaufwirtschaft zu erproben, könnten diese in einem ersten Schritt als Auswahlkriterium bei öffentlichen Vergaben stärker berücksichtigt werden. Die hierbei entstehenden Wertschöpfungsketten, Geschäftsmodelle und Erfahrungen könnten schließlich für den privaten Sektor wertvoll sein und sowohl zum Ausbau als auch zur wirtschaftlichen Tragfähigkeit zirkulärer Ansätze und Geschäftsmodelle beitragen.

Derzeit gibt es noch zu wenige Good-Practice-Beispiele für erfolgreich umgesetzte zirkuläre Geschäftsmodelle. Die finanzielle Förderung von transferorientierten Leuchtturmprojekten, die als

Vorbild in der jeweiligen Branche dienen und durch Vernetzung von Akteuren und Stärkung von zirkulären Geschäftsmodellen maßgeblich zum Aufbau einer Kreislaufwirtschaft beitragen. Die Projekte sollten einen starken Multi-Stakeholder-Fokus haben und sowohl Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus verschiedenen Forschungsbereichen als auch die Akteure der jeweiligen Wertschöpfungskette miteinbeziehen. Durch die hier entstehenden Branchenprojekte könnten neue Technologien und Geschäftsmodelle erprobt werden. Teilweise bislang noch abstrakte Konzepte wie digitale Datenräume könnten so in konkrete Unternehmensrollen und Geschäftsmodelle übersetzt werden. Insbesondere solche Projekte, die auf die Entstehung von Wertschöpfungsnetzwerken und darauf basierenden zirkulären Geschäftsmodellen abzielen, könnten nach dem Ende der Förderperiode wirtschaftlich tragfähig sein.

Neben der Entwicklung von Leuchtturmprojekten ist auch die Förderung von Projekten mit einem hohen Technologiereifegrad entscheidend. Die Umsetzbarkeit von Kreislaufwirtschaftsstrategien und zirkulären Geschäftsmodellen sollte dabei in einer betrieblichen Umgebung unter Einbezug von (globalen) Wertschöpfungsketten getestet und nachgewiesen werden. Reallabore bieten ein geeignetes Format für solche Testumgebungen, in denen die innovative Umsetzung von R-Strategien möglich ist und Lösungen für regulatorische Hemmnisse erprobt werden. Beispielsweise könnten recycelte Baustoffe in Reallaboren im Bausektor regional begrenzt erprobt werden, wenn keine Bedenken in Bezug auf Schadstoffe und Sicherheit bestehen, die Baustoffe derzeit aber gesetzlich noch nicht zugelassen sind.

Solche Reallabore sind in der Umsetzung sehr aufwendig, da für die Schaffung einer geeigneten Testumgebung viele Akteure wie unterschiedliche Behörden und Abfallwirtschaftsbetriebe miteinbezogen werden müssen. Bei Projekten mit starker internationaler Verflechtung übersteigt die Komplexität der Umsetzungsprozesse häufig zudem die Möglichkeiten eines Reallabors. In solchen Fällen könnte ein digitaler Zwilling eines Reallabors ein vielversprechender Ansatz sein. Beispielsweise könnten zirkuläre Wertschöpfungsnetzwerke in einem solchen virtuellen Reallabor simuliert und die Effekte verschiedener internationaler Gesetzgebungen und multinationaler Marktanreize getestet werden. Auch für die Kreislaufwirtschaft wichtige Datendefinitionen und -infrastrukturen ließen sich in solchen virtuellen Reallaboren branchenspezifisch erproben.

Die vom BMWK geförderte Initiative der deutschen Qualitätsinfrastruktur *QI-Digital* ist ein gutes Beispiel für ein solch sektorübergreifendes, stark transferorientiertes Förderprojekt. Die durch das



Deutsches Institut für Normung (DIN), die Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE), die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS), die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) getragene Initiative bringt relevante Akteure aus Politik, Wirtschaft und öffentlicher Verwaltung zusammen und hat das Ziel, die Prozesse der Qualitätsinfrastruktur (QI) zu digitalisieren. Digitale Lösungen zur Qualitätssicherung sind beispielsweise für die Entwicklung von Produktpässen, die ein entscheidendes Werkzeug für den Aufbau einer Kreislaufwirtschaft darstellen, unerlässlich. Konkrete Lösungen für neue Methoden, Verfahren und Werkzeuge zur digitalen Qualitätssicherung werden wiederum in Reallaboren erarbeitet. Begleitet werden die Prozesse in den Laboren schließlich durch Studien über die notwendigen Rahmenbedingungen und Transfermaßnahmen.

6.5 Gesellschaft einbinden

Da die zirkuläre Transformation weitreichende wirtschaftliche und gesellschaftliche Veränderungen erfordert, sollte die Bevölkerung in die Gestaltung des Prozesses unbedingt miteinbezogen werden. Die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft bedingt angesichts notwendiger Rahmenbedingungen und der Rolle der Konsumenten neben der technischen und wirtschaftlichen auch die Diskussion in der politischen und soziokulturellen Dimension. Um das volle Potenzial der Kreislaufwirtschaft auszuschöpfen, braucht es einen **ganzheitlichen Systemansatz**, der darauf abzielt, als Gesellschaft innerhalb der planetarischen Grenzen zu leben und zu wirtschaften.¹⁹⁵ Dafür aber ist eine Entwicklung neuer kultureller Praktiken und Narrative erforderlich.

Der Kenntnisstand der deutschen Gesellschaft zum Thema Kreislaufwirtschaft ist derzeit noch sehr niedrig. Ein tieferes Verständnis ist jedoch eine wichtige Voraussetzung für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft, und maßgebliche politische Entscheidungen wie die Bepreisung von Umweltkosten müssen von der Gesellschaft mitgetragen werden. Zudem müssen Menschen dazu befähigt werden, in ihrem derzeitigen oder zukünftigen Beruf zirkuläre Ansätze umzusetzen und voranzutreiben. Daher sollte der gesellschaftliche Diskurs über dieses komplexe Thema auf verschiedenen Ebenen – unter anderem in der Schule, in der Ausbildung und an der Universität – gefördert werden.

Um die Kreislaufwirtschaft stärker in der Gesellschaft zu verankern, sollten zudem kommunale Initiativen gefördert werden, bei denen Bürgerinnen und Bürger aktiv in Entscheidungen über die Gestaltung ihres eigenen Lebensumfelds eingebunden werden. Etwa im Umgang mit Abfall und bei der gemeinschaftlichen Nutzung von Produkten kann die Bevölkerung durch ein verändertes Verhalten entscheidend zum Erfolg von Kreislaufansätzen beitragen. Auch Upskilling¹⁹⁶ – zum Beispiel durch die Förderung von Repair-Cafés – befähigt die Menschen, bei der Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien mitzuwirken; zudem schafft es auf praktische Weise ein besseres Verständnis von Kreislaufkonzepten.

Auch im Konsum können Bürgerinnen und Bürger entscheidend dazu beitragen, die Kreislaufwirtschaft zu befördern. Daher ist eine transparente Kommunikation wichtig: Informationen zu Nachhaltigkeit und Kreislauffähigkeit von Produkten müssen der Bevölkerung zielgruppengerecht bereitgestellt werden. Digitale Produktpässe können hier als Format dienen, um Produktinformationen zu speichern und beispielsweise über QR-Codes zugänglich zu machen. Darauf aufbauend können nachvollziehbar konzipierte Prüfsiegel und Zertifikate Vertrauen schaffen und eine informierte Konsumententscheidung unterstützen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass nicht zu viele Siegel zu Verwirrung auf Konsumentenseite führen. Des Weiteren sollte Greenwashing durch klare Richtlinien zur Produktwerbung und -beschreibung und durch eine konsequente Kontrolle verhindert werden. Eine aktuell EU-Richtlinie zur Reduzierung von Greenwashing bei Verbraucherprodukten behandelt diese Punkte bereits teilweise, indem Verbraucher und Verbraucherinnen durch bessere Informationen in einem nachhaltigeren Konsumverhalten unterstützt werden sollen.¹⁹⁷

Digitale Anwendungen können helfen, solche Informationen leichter zugänglich zu machen; außerdem ermöglichen sie den Herstellern attraktive Produkt-Service-Angebote bereitzustellen. Und schließlich können digitale Technologien genutzt werden, um Anreizsysteme für ein nachhaltiges Konsumverhalten zu schaffen. Beispielsweise kann Gamification, also die Übertragung von spieltypischen Konzepten in spielfremde Zusammenhänge, Inhalte auf unterhaltsame Weise vermitteln und dazu beitragen, etablierte Verhaltensmuster im Konsumzusammenhang zu verändern.

195 | Vgl. Kara et al. 2022.

196 | Upskilling bezeichnet den Prozess des Erlernens neuer Fertigkeiten oder die Vermittlung neuer Fertigkeiten an Arbeitnehmende.

197 | Vgl. Richtlinie (EU) 2024/825.

Fazit und Ausblick

Die vorliegende acatech STUDIE zeigt eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten für digitale Technologien im Kontext der Kreislaufwirtschaft und unterstreicht die zentrale Rolle dieser Technologien für die Transformation hin zu zirkulärer Wirtschaften. Die Analyse der drei Anwendungsbeispiele zeigt zudem, dass eine Kreislaufwirtschaft im Vergleich zur linearen Wirtschaft deutlich mehr Informationsaustausch zwischen allen beteiligten Akteuren erfordert. Digitale Technologien und Anwendungen wie der digitale Produktpass und Datenräume, die standardisierte Informationen über Produkte und Materialien speichern und weitergeben können, unterstützen als Werkzeug sektorübergreifend die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft.

Die zentrale Bedeutung der Digitalisierung für den Auf- und Ausbau einer Kreislaufwirtschaft wird daher von der Bundesregierung im vorliegenden Entwurf der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) und auf EU-Ebene bei der neuen Ökodesign-Verordnung berücksichtigt. Aus der vorliegenden STUDIE ergibt sich gerade in diesem Kontext allerdings eine Reihe von Aspekten, die bei der künftigen Förderung digitaler Technologien in der Kreislaufwirtschaft bedacht werden sollten:

1. Eine Vernetzung der Akteure innerhalb der Wertschöpfungskette sowie sektorübergreifend durch digitale Werkzeuge ist besonders wichtig, damit zirkuläre Wertschöpfungsmodelle Fuß fassen und sektorübergreifende Rahmenbedingungen das häufig noch verankerte Silodenken in Branchen ablösen können. Das zeigen auch die in Kapitel 6 beschriebenen sektorübergreifenden Gestaltungsoptionen für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft.
2. Genauso bedeutend ist es, die Digitalisierung integrativ zu gestalten. Denn mit einer stärkeren Verflechtung von Technologien und Anwendungen wie Künstlicher Intelligenz, digitalen Zwillingen, Automatisierung, Datenräumen und Produktpässen werden auch mehr Synergien geschaffen: So kann etwa

die KI-gestützte Auswertung von Daten aus dem digitalen Produktpass oder aus Datenräumen maßgeblich dazu beitragen, Materialien und Produkte effizienter und automatisierter wieder zu nutzen, aufzubereiten oder zu recyceln.

3. Digitale Lösungen müssen auf den jeweiligen Einsatzzweck und die sektor- oder produktspezifischen Gegebenheiten zugeschnitten werden. Das zeigen die unterschiedlichen Rollen verschiedener R-Strategien je Sektor, die spezifische Eignung digitaler Technologien sowie die daraus abgeleiteten Gestaltungsoptionen (siehe Kapitel 3-5). Dabei gilt es etwa Unterschiede bei den Lebensdauern von Produkten und bei den verwendeten Materialien sowie der Strukturierung, Komplexität und geografischen Verteilung der jeweiligen Wertschöpfungsketten zu berücksichtigen.
4. Projekte zu digitalen Enablern der Kreislaufwirtschaft sollten dabei einen interdisziplinären Ansatz verfolgen und internationale Partner in die Wertschöpfungsketten einbinden. Diese Aspekte sind oft bereits Randbedingungen bei Fördermaßnahmen, der Aspekt Internationalisierung sollte aber für die zielführende Umsetzung der Kreislaufwirtschaft generell vertieft werden.
5. Schließlich sollte sich der Fokus zukünftig auch darauf richten, die Nachhaltigkeitsaspekte beim Einsatz von digitalen Technologien für die Kreislaufwirtschaft differenziert zu analysieren. Insgesamt sollten digitale Technologien und Anwendungen so ausgestaltet werden, dass nicht nur ökonomische, sondern auch ökologische und gesellschaftliche Aspekte berücksichtigt werden.

All die hier genannten Herausforderungen lassen sich jedoch nur wirksam angehen, wenn die Umsetzung bestehender und künftiger Initiativen entsprechend politisch begleitet ist und finanzielle Ressourcen zur Anstoßförderung zur Verfügung stehen. Dies gilt gerade für kleine und mittelständische Unternehmen als wichtige Tragsäule der Transformation. Sie stehen mit Blick auf die Digitalisierung und dem Ziel der Nachhaltigkeit vor großen Aufgaben, die ihre vorhandenen Kapazitäten oft überfordern; zugleich sind sie für den Erfolg des gesamten Transformationsprojekts entscheidend.



Beispiele für besonders relevante digitale Technologien und Anwendungen

Besonders bedeutsam für eine erfolgreiche Umsetzung der Kreislaufwirtschaft sind der vorliegenden STUDIE zufolge der digitale Produktpass und Datenräume. Daher werden diese beiden digitalen Enabler nachfolgend kurz im Kontext relevanter Förderprojekte beleuchtet.

Digitaler Produktpass

Die Analyse der Anwendungsbeispiele hat sektorübergreifend zutage gefördert, dass die umfassende Teilung von Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette im Format des digitalen Produktpasses Vorteile bietet. Die Bundesregierung hat den entsprechenden Bedarf bereits erkannt und will bis zum Jahr 2028 acht einschlägige Leuchtturmprojekte für die Bereiche Kunststoffe, Textilien, Elektronik, Lebensmittel, Wasser und Nährstoffe, Verpackungen, Batterien und Fahrzeuge, Bauwirtschaft und Gebäude fördern – im Rahmen der gemeinsam vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) getragenen Initiative *Digitaler Produktpass*.

Das Projekt *Battery Pass* zeigt am Beispiel Batterie die Komplexität auf (Datendefinitionen, Analyse technischer Standards, Haftungsübergang, Auditierbarkeit etc.), die sich bei der Umsetzung des digitalen Produktpass für eine spezifische Produktgruppe ergibt. Es demonstriert so die Notwendigkeit und Herausforderungen einer konkreten Ausgestaltung, die den Mehrwert der digitalen Technologien zur Förderung von Kreislaufwirtschaft erst realisierbar macht. Das von der EU geförderte Projekt *Cirpass2* analysiert die Anwendungsfälle des digitalen Produktpasses für eine Reihe weiterer Produkte und Wertschöpfungsketten, etwa aus dem Textil- und Elektroniksektor.

Datenräume

Für alle drei beispielhaft betrachteten Wirtschaftssektoren wurden digitale Datenräume als wichtige Technologie erkannt. Datenräume ermöglichen es, Akteure einer Wertschöpfungskette miteinander zu vernetzen und Daten sicher, vertrauensvoll und unter Wahrung der Souveränität der Akteure zu nutzen. Beispielsweise können Datenräume dazu dienen, Informationen zur Verfügbarkeit von Materialien und Produkten auf digitalen Marktplätzen auszutauschen, oder sie können den Informationsfluss in komplexen (Bau-)Projekten zwischen einer Vielzahl von Akteuren erleichtern. Der Entwurf für eine *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie* berücksichtigt die Relevanz von Datenräumen schon und sieht strategische Pilotprojekte im Rahmen der Initiative *Manufacturing-X* – sogenannte *Circular Economy Use Cases* – in exemplarischen Branchen und Wertschöpfungsnetzwerken vor, um Strukturen für eine gemeinsame Datennutzung zu entwickeln und zu erproben.

Die europäische Initiative *Gaia-X*, auf deren Referenzarchitektur auch der *Datenraum Industrie 4.0* basiert, bietet zudem die Möglichkeit, mehrere Datenräume über kompatible Schnittstellen miteinander zu verknüpfen, und befördert so den sektorübergreifenden Austausch, der für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft von Bedeutung ist. Um die Nutzung von Datenräumen in der Breite zu etablieren, benötigen viele Unternehmen und Branchen noch Unterstützung bei der Einführung. Dies sollte über geeignete Förderprojekte geschehen.

Anhang

Abkürzungsverzeichnis

B2B	Business to Business
B2C	Business to Consumer
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
BIM	Building Information Model
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism
CE	Circular Economy
CEID	Circular Economy Initiative Deutschland
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CPS	Cyber-physisches System
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
DAkKS	Deutsche Akkreditierungsstelle
DERA	Deutsche Rohstoffagentur
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DLT	Distributed-Ledger-Technologie
DPP	Digitaler Produktpass
ESRS	European Sustainability Reporting Standards
EU	Europäische Union
GOTS	Global Organic Textile Standards
IoT	Internet of Things
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittelständische Unternehmen
NFC	Near Field Communication
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
RFID	Radio-frequency Identification



Glossar

Dieses Glossar soll den Leserinnen und Lesern Orientierung geben. Es ist der Versuch, die in den Experteninterviews genannten digitalen Technologien und Anwendungen zu verdeutlichen. Das Glossar wurde unter anderem auf Basis des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) herausgegebenen *Technologie- und Trendradars 2022*¹⁹⁸ sowie des *Gabler Wirtschaftslexikons*¹⁹⁹ erstellt. Es erhebt keinen Anspruch auf Allgemeingültigkeit und Vollständigkeit der Definitionen.

Digitale Technologien

3D-Druck

3D-Druck, auch als Additive Fertigung bekannt, ist ein Verfahren, bei dem Material Schicht für Schicht aufgetragen wird, um ein dreidimensionales Objekt zu erzeugen. 3D-Druck wird in vielen Bereichen eingesetzt, darunter in der Industrie, in der Medizin, im Bauwesen oder im Kunsthandwerk. Er ermöglicht die Produktion komplexer, maßgeschneiderter Teile. Typische Materialien für den 3D-Druck sind Kunststoffe, Metalle, Keramiken und bestimmte biologische Materialien.

Cloud Computing/Edge Computing

Cloud Computing und Edge Computing sind Ansätze zur Datenverarbeitung und -speicherung. Während beim Cloud Computing Daten in zentralisierten Rechenzentren gespeichert und verarbeitet werden, ermöglicht Edge Computing die Datenverarbeitung näher am Ort der Datenerzeugung, zum Beispiel auf Geräten oder lokalen Servern. Beide Technologien ermöglichen skalierbare, flexible IT-Infrastrukturen und sind essenziell für das Internet der Dinge (Internet of Things – IoT) sowie datenintensive Anwendungen. Cloud Computing und Edge Computing werden unter anderem in der Industrie zur Optimierung von Produktionsprozessen, im Gesundheitswesen für eine schnelle Diagnostik, in der Automobilbranche zur Unterstützung autonomer Fahrzeuge und in der Telekommunikation für 5G-Anwendungen eingesetzt.

Distributed-Ledger-Technologie (DLT)

Distributed-Ledger-Technologie wird oft synonym mit der Blockchain verwendet, wobei die Blockchain nur das bekannteste Beispiel für DLT ist. DLT ist eine dezentrale Datenbanktechnologie, die Transaktionen sicher, transparent und unveränderlich dokumentiert. Jede Transaktion wird in einem Netzwerk von Computern (Nodes) gespeichert und durch Konsensmechanismen

validiert. DLT findet Anwendung bei Kryptowährungen, im Supply-Chain-Management und bei digitalen Identitäten.

Internet of Things (IoT)

Das Internet der Dinge oder auch Internet of Things (IoT) bezieht sich auf ein Netzwerk von physischen Objekten, die mit Sensoren, Software und anderen Technologien ausgestattet sind, um Daten zu sammeln und auszutauschen. Diese sogenannten smarten Geräte kommunizieren miteinander und mit zentralen Systemen, um Prozesse zu automatisieren, Effizienz zu steigern und neue Dienste zu ermöglichen. Die Technologie findet unter anderem Anwendung bei vernetzten Haushaltsgeräten, bei autonomen Fahrzeugen und bei industriellen Maschinen.

Kommunikationstechnologien

Kommunikationstechnologien umfassen Systeme und Verfahren, die den Austausch von Informationen ermöglichen. Dazu zählen Technologien für mobile Internetdienste wie EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution), aber auch Funk- und Satellitentechnik. Die neuesten Mobilfunkgenerationen 5G und 6G ermöglichen höhere Datenraten, niedrigere Latenzzeiten und die Vernetzung einer größeren Anzahl von Geräten. 5G ist bereits weitverbreitet und unterstützt Anwendungen wie IoT oder autonomes Fahren. 6G befindet sich in der Entwicklung und wird voraussichtlich noch höhere Geschwindigkeiten und innovative Anwendungen wie holografische Kommunikation ermöglichen.

Künstliche Intelligenz (KI)

Künstliche Intelligenz ist der Bereich der Informatik, der sich mit der Entwicklung von Systemen beschäftigt, die Aufgaben ausführen können, die normalerweise menschliche Intelligenz erfordern. Die Intelligenz kann zum Beispiel auf festgelegten Programmabläufen basieren oder durch maschinelles Lernen entwickelt werden. KI wird in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt, von Sprachassistenten über medizinische Diagnostiktools bis hin zu autonomen Fahrzeugen.

Simulation

Simulation bezeichnet die Virtualisierung eines Vorgangs oder eines Produkts zur Erstellung eines digitalen Modells auf Basis definierter Charakteristika des realen Vorgangs oder Produkts. Die Veränderungen des Modells können in der Simulation unter definierten Bedingungen vorhergesagt werden. Auf diese Weise

198 | Vgl. Stich et al. 2022.

199 | Vgl. Gabler Wirtschaftslexikon 2024.

können Änderungen im Prozess oder am Produkt in der virtuellen Welt getestet und optimiert werden. Die Simulation liefert dabei verlässliche Vorhersagen unter reproduzierbaren Bedingungen.

Digitale Anwendungen

Autonome Roboter

Autonome Roboter sind Maschinen, die in der Lage sind, Aufgaben ohne menschliches Eingreifen auszuführen. Sie nutzen Sensoren, Kameras und Algorithmen, um ihre Umgebung wahrzunehmen, Entscheidungen zu treffen und sich anzupassen. Diese Roboter werden in verschiedenen Bereichen eingesetzt, darunter in der Logistik, in der Landwirtschaft und in der Fertigung, um Prozesse zu automatisieren und die Effizienz zu steigern.

Bildauswertung

Die Bildauswertung mithilfe von Künstlicher Intelligenz ermöglicht es Computern, Bilder und Videos zu analysieren und daraus relevante Informationen zu extrahieren. Sie wird in vielen Anwendungen genutzt, wie zum Beispiel in der medizinischen Diagnostik, bei der Objekterkennung in der Industrie oder in der Überwachungstechnik. Der Begriff umfasst auch Scanning-Technologien, die zur Erzeugung der Bilder genutzt werden.

Cyber-physisches System (CPS)

In einem Cyber-physischen System sind physische Prozesse mit digitalen Netzwerken und Rechenleistungen verknüpft. Diese Integration ermöglicht eine Echtzeitüberwachung und -steuerung von physischen Systemen wie in der Industrie 4.0 oder in intelligenten Verkehrssystemen.

Datenräume

Datenräume sind digitale Infrastrukturen, die den sicheren Austausch und die gemeinsame Nutzung von Daten zwischen verschiedenen Akteuren ermöglichen. Sie bieten ein strukturiertes Umfeld, in dem Datenanbieter und -nutzer einander vertrauen und unter Wahrung der Datensouveränität zusammenarbeiten können. Datenräume spielen eine Schlüsselrolle in datengetriebenen Geschäftsmodellen und bei der Vernetzung von Unternehmen in der digitalen Wirtschaft. Daher sind sie eine Schlüsseltechnologie der *Europäischen Digitalen Strategie*.

Digitale Identität

Die digitale Identität ist die Darstellung einer Person oder eines Objekts in der digitalen Welt. Sie ermöglicht den Zugang zu digitalen Diensten und die Durchführung von Onlinetransaktionen. Digitale Identitäten sind essenziell für die Sicherheit und den Datenschutz im Internet und spielen eine zentrale Rolle bei der Authentifizierung und Autorisierung in verschiedensten digitalen Anwendungen.

Digitaler Produktpass (DPP)

Eine strukturierte Sammlung produktbezogener Daten mit vordefiniertem Umfang und differenzierten Dateneigentums- und Zugriffsrechten, die durch eine eindeutige Kennung übermittelt werden. Daten werden dabei dezentral gespeichert und souverän durch den Inverkehrbringer des Produkts mit anderen Akteuren geteilt. Produktpässe werden in der Europäischen Union durch die neue Ökodesign-Verordnung und andere Verordnungen für eine Vielzahl verschiedener Produkte eingeführt. Sie enthalten unter anderem Angaben zum CO₂-Fußabdruck, Due Diligence und technische Parameter des Produkts wie Leistungsfähigkeit, Haltbarkeit und chemische Zusammensetzung.

Digitaler Zwilling

Digitaler Zwilling oder auch Digital Twin ist die virtuelle Nachbildung eines physischen Objekts, Systems oder Prozesses in einer einzigen oder über mehrere Lebenszyklusphasen hinweg. Digitale Zwillinge ermöglichen eine Echtzeitüberwachung und -analyse sowie die Simulation von Szenarien, um die Leistung zu optimieren und vorausschauende Wartungen durchzuführen. Digitale Zwillinge finden Anwendung in der Fertigung, im Bauwesen, in der Stadtplanung und im Gesundheitswesen.

Onlineplattformen

Onlineplattformen sind digitale Umgebungen, die es verschiedenen Akteuren ermöglichen, miteinander zu interagieren, Daten auszutauschen und gemeinsame Geschäftsprozesse zu implementieren. Sie bieten eine Grundlage für die Entwicklung und Bereitstellung von Software, Dienstleistungen und Produkten. Plattformen sind die Basis für unterschiedliche digitale Geschäftsmodelle.



Literatur

acatech 2022

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Holzbauierte Bioökonomie. Nachhaltig, zirkulär, klimaresilient* (acatech POSITION), München 2022. DOI: https://doi.org/10.48669/aca_2022-4

acatech 2024

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (Hrsg.): *Bauen & Wohnen. Plattform für Vernetzung, Synthese und Transfer*, 2024. URL: <https://www.acatech.de/projekt/bauen-und-wohnen/> [Stand: 09.09.2024].

Angerer et al. 2016

Angerer, G./Buchholz, P./Gutzmer, J./Hagelüken, C./Herzig, P./Littke, R./Thauer, R. K./Wellmer, F.-W.: *Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft. Geologie, Märkte, Umwelteinflüsse* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München 2016.

Barteková/Börkey 2022

Barteková, E./Börkey, P.: *Digitalisation for the Transition to a Resource Efficient and Circular Economy* (OECD Environment Working Papers, Nr. 192). Paris: OECD Publishing 2022. DOI: <https://doi.org/10.1787/6f6d18e7-en>

Battery Pass 2024

Battery Pass: *Advancing the Implementation of the Battery Passport in Europe and Beyond. Towards a Truly Sustainable and Circular Battery Life through Digital Value Chains*. URL: <https://thebatteryypass.eu/> [Stand: 28.08.2024].

BBA 2022

Bau – Beratung – Architektur (BBA): *Doppelbodenplatten: Kreislauffähig ohne Abfall*, 2022. URL: <https://www.bba-online.de/boden/bodenbelaege/wiederverwendung-kreislauffaehig-ohne-abfall-doppelbodenplatten/> [Stand: 09.09.2024].

BDI 2024

Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI): *Circular Economy*. URL: <https://bdi.eu/umwelt-und-nachhaltigkeit/circular-economy> [Stand: 22.08.2024].

Berndorfer et al. 2023

Berndorfer, J./Kurz, A./Pecksteiner, C./Klinglmayr, J.: *Digitale Schlüsseltechnologien für eine kreislaufbasierte Produktion. DigiTech4CE* (Berichte aus Energie- und Umweltforschung, 28/2023), Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2023. URL: <https://fti-ressourcenwende.at/resources/pdf/schriftenreihe-2023-28-DigiTech4CE.pdf> [Stand: 28.09.2024].

BGR 2023

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: *Deutschland. Rohstoffsituation 2022*, Hannover 2023.

Bierwirth 2023

Bierwirth, A.: *Klimaneutrale Gebäude. Mehr als „nur“ Null-Emissionen*, 2023. URL: <https://www.bpb.de/themen/klimawandel/dossier-klimawandel/515959/klimaneutrale-gebaeude/> [Stand: 28.09.2024].

bifa Umweltinstitut 2023

bifa Umweltinstitut: *Ökonomische Potenziale des Textilrecyclings und der Wasserstoffherzeugung aus Textilabfällen in Bayern* (bifa-Text, Nr. 73), Augsburg 2023.

bitkom 2021

bitkom: *Klimaschutz und Energieeffizienz durch digitale Gebäudetechnologien* (Studie), Berlin 2021.

BMUV 2023

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: *Eckpunktepapier zur Abfallende-Verordnung für bestimmte mineralische Ersatzbaustoffe*, 2023. URL: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Glaeserne_Gesetze/20._Lp/meb_eckpunktepapier/Entwurf/meb_eckpunktepapier_bf.pdf [Stand: 28.09.2024].

BMUV 2024

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: *Entwurf einer Nationalen Kreislaufstrategie (NKWS)*, 2024. URL: <https://www.bmuv.de/download/entwurf-einer-nationalen-kreislaufwirtschaftsstrategie-nkws> [Stand 18.06.2024].

BMWSB 2023

Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen: *Maßnahmen der Bundesregierung für zusätzliche Investitionen in den Bau von bezahlbarem und klimagerechtem Wohnraum und zur wirtschaftlichen Stabilisierung der Bau- und*

Immobilienwirtschaft, 2023. URL: https://www.bmwsb.bund.de/SharedDocs/downloads/Webs/BMWSB/DE/veroeffentlichungen/pm-kurzmeldung/massnahmenpaket_bezahlbarer_wohnräum.html [Stand: 28.09.2024].

Boston Consulting Group 2024

Boston Consulting Group: *Fast-Moving Tech. Fast-Paced Fashion*, 2024. URL: <https://www.bcg.com/publications/2024/fast-moving-tech-fast-paced-fashion-weaving-the-fabric-of-the-future> [Stand: 28.09.2024].

Boston Consulting Group/Vestiaire Collective 2022

Boston Consulting Group/Vestiaire Collective: *What an Accelerating Secondhand Market Means for Fashion Brands and Retailers*, 2022. URL: <https://web-assets.bcg.com/c4/7c/a90b27584eecabcf9672cee51d10/what-an-accelerating-secondhand-market-means-for-fashion-brands-and-retailers-oct-22.pdf.pdf> [Stand: 28.09.2024].

Bressanelli et al. 2017

Bressanelli, G./Perona, M./Saccani, N.: „Reshaping the Washing Machine Industry through Circular Economy and Product-Service System Business Models“. In: *Procedia CIRP*, 64, 2017, S. 43–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.065>

Bundes-Klimaschutzgesetz 2021

Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) 2019, zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 18.8.2021.

BuVEG 2024

Bundesverband energieeffiziente Gebäudehülle (BuVEG): „Sanierungsquote im Sinkflug. Prognose für 2024. Weiter schwach“ (Pressemitteilung vom 09.04.2024). URL: <https://buveg.de/pressemitteilungen/sanierungsquote-im-sinkflug-prognose-2024-schwach/> [Stand: 09.09.2024].

Bundesvereinigung Bauwirtschaft et al. 2024

Bundesvereinigung Bauwirtschaft, Zentralverband Deutsches Baugewerbe e.V., Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. et al.: „*Verordnung zur Änderung der Gefahrstoffverordnung und anderer Arbeitsschutzverordnungen – Normierung der Erkundungspflichten des Veranlassers. Bundesrats-Drucksache 403/24*“ (Offener Brief an Bundesrat und Ausschüsse, 06.09.2024). URL: https://www.bde.de/documents/707/2024-09-06_Gemeinsame_Stellungnahme_an_BR_Aussch%C3%BCse.pdf [Stand: 15.10.2024].

Chauhan et al. 2022

Chauhan, C./Parida, V./Dhir, A.: „Linking Circular Economy and Digitalisation Technologies. A Systematic Literature Review of Past Achievements and Future Promises“. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 177, 2022, Artikel 121508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121508>

Chi et al. 2023

Chi, Z./Liu, Z./Wang, F./Osmani, M.: „Driving Circular Economy through Digital Technologies. Current Research Status and Future Directions“. In: *Sustainability*, 15: 24, 2023, Artikel 16608. DOI: <https://doi.org/10.3390/su152416608>

Circle Economy Foundation 2024

Circle Economy Foundation: *The Circularity Gap Report 2024. A Circular Economy to Live within the Safe Limits of the Planet*, 2024. <https://www.circularity-gap.world/2024> [Stand 14.10.2024].

Circle Economy/BAIN & Company 2022

Circle Economy/BAIN & Company: *A Circular Future for the European Construction Sector. Light Commercial and Residential Buildings*, 2022. URL: <https://www.circle-economy.com/resources/a-circular-future-for-the-european-construction-sector-light-commercial-and-residential-buildings> [Stand 21.11.2022].

Circular Economy Initiative Deutschland 2021a

Kadner, S./Kobus, J./Hansen, E./Akinci, S./Elsner, P./Hagelücken, C./Jaeger-Erben, M./Kick, M./Kwade, A./Kühl, C./Müller-Kirschbaum, T./Obeth, D./Schweitzer, K./Stuchtey, M./Vahle, T./Weber, T./Wiedemann, P./Wilts, H./Wittken, R. v.: *Circular Economy Roadmap für Deutschland*, München: acatech, Circular Economy Initiative Deutschland, SYSTEMIQ, 2021.

Circular Economy Initiative Deutschland 2021b

Hansen, E./Wiedemann, P./Fichter, K./Lüdeke-Freund, F./Jaeger-Erben, M./Schomerus, T./Alcayaga, A./Blomsma, F./Tischner, U./Ahle, U./Büchle, D./Denker, A.-K./Fiolka, K./Froehling, M./Haegel, A./Hoffmann, V./Kohl, H./Nitz, T./Schiller, C./Kadner, S.: *Zirkuläre Geschäftsmodelle. Barrieren überwinden, Potenziale freisetzen*, München: acatech/Circular Economy Initiative Deutschland/SYSTEMIQ, 2021.

circular.fashion 2020

circular.fashion: *circularity.id*, 2020. URL: <https://circularity.id/> [Stand 14.10.2024].



circular.fashion/Scirt 2020

circular.fashion/Scirt: *Guideline for Fashion Brands. How to Make the Crucial Product Data Available to Enable Intelligent Steering and Evaluation of Products in the Circular Economy*, 2020. URL: https://circularity.id/static/circular.fashion_DPP_Guideline.pdf. [Stand 14.10.2024].

Conversio 2020

Conversio Market & Strategy: *Global Plastics Flow 2018*, 2020. URL: https://www.carboliq.com/pdf/19_conversio_global_plastics_flow_2018_summary.pdf [Stand 14.10.2024].

CSR 2023

Referat CSR: *Textil- und Bekleidungsindustrie*, 2023. URL: <https://www.csr-in-deutschland.de/DE/CSR-Allgemein/CSR-in-der-Praxis/Branchen/Textil-Bekleidungs-Industrie/textil-bekleidungs-industrie.html> [Stand: 01.09.2024].

Deutsche Energie-Agentur 2023

Deutsche Energie-Agentur: *Geschäftsmodelle für zirkuläres Bauen und Sanieren. Die Rolle innovativer Geschäftsmodelle in der Transformation des Bausektors*, 2023. URL: <https://www.dena.de/infocenter/geschaeftsmodelle-fuer-zirkulaeres-bauen-und-sanieren/> [Stand 14.10.2024].

Deutsche Energie-Agentur 2024

Deutsche Energie-Agentur: *dena-Gebäudereport 2024. Zahlen, Daten, Fakten zum Klimaschutz im Gebäudebestand*, 2024. <https://www.dena.de/infocenter/dena-gebaeudereport-2024/> [Stand 14.10.2024].

Deutsche Rohstoffagentur 2023

Deutsche Rohstoffagentur: *DERA-Rohstoffliste 2023. Angebotskonzentration bei mineralischen Rohstoffen und Zwischenprodukten. Potenzielle Preis- und Lieferrisiken*, Berlin 2023.

Deutschlandfunk 2022

Deutschlandfunk: „Mit grauer Energie gegen den Klimawandel. Sanieren statt neu bauen“ (Radiobeitrag vom 03.08.2022). URL: <https://www.deutschlandfunk.de/hintergrund-nachhaltiges-bauen-energie-klimawandel-100.html> [Stand: 29.09.2024].

DGNB 2023

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB): „DGNB veröffentlicht finalisierte Fassung des Gebäuderessourcenpasses“ (Pressemitteilung vom 14.02.2023). URL: <https://www.dgnb.de/de/dgnb-richtig-nutzen/newsroom/presse/artikel/dgnb-veroeffentlicht-finalisierte-fassung-des-gebaeuderessourcenpasses> [Stand: 02.09.2024].

DIN 2024

Deutsches Institut für Normung (DIN): *R-Strategien as a Framework for the Circular Economy*, 2024. URL: <https://www.din.de/en/innovation-and-research/circular-economy/standards-research-on-the-circular-economy/r-strategy-framework> [Stand: 02.09.2024].

DIN et al. 2023

Deutsches Institut für Normung (DIN)/Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (DKE)/Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *Deutsche Normungsroadmap Circular Economy*, Berlin 2023.

Durmisevic 2019

Durmisevic, E.: *Circular Economy in Construction. Design Strategies for Reversible Buildings*. URL: <https://www.bamb2020.eu/wp-content/uploads/2019/05/Reversible-Building-Design-Strategies.pdf> [Stand 14.10.2024].

Ellen Macarthur Foundation/Circular Fibres Initiative 2017

Ellen Macarthur Foundation/Circular Fibres Initiative: *A New Textiles Economy. Redesigning Fashion's Future*, 2017. URL: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/a-new-textiles-economy> [Stand 14.10.2024].

Ersatzbaustoffverordnung 2023

Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV) 2021; zuletzt geändert durch Art. 1 V v. 13.7.2023.

Europäische Kommission 2016

European Commission: *EU-Protokoll über die Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen*, 2016. URL: https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/eu-construction-and-demolition-waste-protocol-2018-09-18_en [Stand 18.09.2018].

Europäische Kommission 2018

European Commission: *Leitlinien für Abbruch- und Umbauarbeiten an Gebäuden vorgeschaltete Abfallaudits. Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen in der EU*, Brüssel 2018. URL: <https://ec.europa.eu/docsroom/documents/31524?locale=en> [Stand 13.09.2018].

Europäische Kommission 2020a

Europäische Kommission: *Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen. Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken* (Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen

Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen vom 03.09.2020). Brüssel 2020.

Europäische Kommission 2020b

Europäische Kommission: *Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa* (Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen vom 11.03.2020), Brüssel 2020.

Europäische Kommission 2020c

European Commission: *Categorisation System for the Circular Economy*, 2020. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/172128> [Stand 14.10.2024].

Europäische Kommission 2020d

Europäische Kommission: *Eine Renovierungswelle für Europa. Umweltfreundlichere Gebäude, mehr Arbeitsplätze und bessere Lebensbedingungen* (Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen vom 14.10.2020), Brüssel 2020.

Europäische Kommission 2021

European Commission: *European Climate Law*, 2021. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-climate-law_en [Stand: 09.09.2024].

Europäische Kommission 2022

Europäische Kommission: *EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien* (Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen vom 30.03.2022). Brüssel 2022.

Europäische Kommission 2023a

European Commission: *Factsheet on European Critical Raw Material Act*, 2023. URL: https://ec.europa.eu/commission/press-corner/detail/en/fs_23_1663 [Stand: 09.09.2024].

Europäische Kommission 2023b

European Commission: *Level(s). European Framework for Sustainable Buildings*, 2023. URL: [https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en#:~:text=Level\(s\)%20uses%20core%20sustainability,proofing%20your%20project%20or%20portfolio.](https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy/levels_en#:~:text=Level(s)%20uses%20core%20sustainability,proofing%20your%20project%20or%20portfolio.) [Stand 14.10.2024].

Europäische Kommission 2023c

Europäische Kommission: *Wie Waschmaschinen mit Bezahlfunktion die verarbeitende Industrie bereinigen könnten*, 2023. URL: <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/de/projects/success-stories/all/wie-waschmaschinen-mit-bezahlfunktion-die-verarbeitende-industrie-bereinigen-koennten> [Stand 06.07.2023].

Europäische Kommission 2024

Europäische Kommission: *Der europäische Grüne Deal. Erster klimaneutraler Kontinent werden*, 2024. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de [Stand: 23.08.2024].

Europäisches Parlament 2018

Europäisches Parlament: *Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile*, 2018. URL: <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile> [Stand 14.10.2024].

Europäisches Parlament 2024

European Parliament: „New Regulation on Construction Products“ (Pressemitteilung vom 10.04.2024). URL: https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2024/4/press_release/20240408IPR20303/20240408IPR20303_en.pdf [Stand 10.04.2024].

Europäische Umweltagentur 2019

European Environment Agency: „Textiles in Europe’s Circular Economy“ (Pressemitteilung vom 19.11.2019). URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-in-europes-circular-economy/textiles-in-europes-circular-economy> [Stand: 27.08.2024].

Europäische Umweltagentur 2020

European Environment Agency: *Waste Production and Management*, 2020. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/92-826-5409-5/page036new.html> [Stand 23.11.2020].

Eurostat 2023

Eurostat – Statistische Amt der Europäischen Union: *Circular Material Use Rate*, 2023. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur/default/table?lang=en [Stand 14.11.2023].

de Ferrer 2022

de Ferrer, M: „How Are Shein Hauls Making our Planet Unlivable?“, 2022. URL: <https://www.euronews.com/green/2022/10/17/how-are-shein-hauls-making-our-planet-unlivable> [Stand 17.10.2022].



Forschungskuratorium Textil 2022

Forschungskuratorium Textil: *Kreislaufwirtschaft*, 2022. URL: https://textil-mode.de/de/documents/1643/Kreislaufstudie_20x24_Ansicht_220527.pdf [Stand 14.10.2024].

Fraunhofer 2023

Fraunhofer-Gesellschaft: „Kleider-Check mit Smartphone, KI und Infrarot-Spektroskopie“ (Pressemitteilung vom 04.10.2023). URL: <https://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2023/oktober-2023/kleider-check-mit-smartphone-ki-und-infrarot-spektroskopie.html> [Stand: 28.08.2024].

Fraunhofer IAP 2020

Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP): „Neues T-Shirt aus alter Jeans“ (Pressemitteilung vom 03.08.2020). URL: <https://www.iap.fraunhofer.de/de/Pressemitteilung/2020/neues-t-shirt-aus-alter-jeans.html> [Stand: 28.08.2024].

Gabler Wirtschaftslexikon 2024

Gabler Wirtschaftslexikon: *Gabler Wirtschaftslexikon. Das Wissen der Experten*, 2024 URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/> [Stand: 29.09.2024].

Gaia-X Hub 2024

Gaia-X Hub: *Gaia-X auf einen Blick*, 2024. URL: <https://gaia-x-hub.de/wp-content/uploads/2023/08/Factsheet-Gaia-X-Hub-Germany.pdf>

Gaia-X Hub im Erscheinen.

Gaia-X Hub: *Planen-Bauen-Betreiben*, Positionspapier, 2024. URL: <https://gaia-x-hub.de/domaene-planen-bauen-betreiben/> [Stand: 11.10.2024].

Gebäudeenergiegesetz 2023

Gesetz zur Einsparung von Energie und zur Nutzung erneuerbarer Energien zur Wärme- und Kälteerzeugung in Gebäuden (Gebäudeenergiegesetz) 2020; zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 16.10.2023.

Gebäudeforum Klimaneutral 2023

Gebäudeforum Klimaneutral: *Digitales Gebäudelogbuch*, 2023. URL: <https://www.gebaeudeforum.de/wissen/digitale-methoden-und-tools/digitales-gebaeudelogbuch/> [Stand: 19.08.2024].

Gefahrstoffverordnung 2024

Verordnung zur Änderung der Gefahrstoffverordnung und anderer Arbeitsschutzverordnungen (Gefahrstoffverordnung) 2024; Regierungsentwurf, Bundesrat Drucksache 403/24 vom 21.08.2024.

Greenpeace 2022a

Greenpeace: *Hintergrund Überproduktion und Warenvernichtung*, Wien 2022.

Greenpeace 2022b

Greenpeace: *Nachhaltigkeit ist tragbar*, Berlin 2022.

Han et al. 2023

Han, Y./Shevchenko, T./Yannou, B./Ranjbari, M./Shams Esfandabadi, Z./Saidani, M./Bouillass, G./Bliumska-Danko, K./Li, G.: „Exploring How Digital Technologies Enable a Circular Economy of Products“. In: *Sustainability*, 15: 3, 2023, Artikel 2067.

Handwerksblatt 2024

Handwerksblatt: *Bauprodukte. Neue Verordnung ist in den Startlöchern*, 2024. URL: <https://www.handwerksblatt.de/betriebsfuehrung/bauprodukte-neue-verordnung-ist-in-den-startloechern> [Stand: 09.09.2024].

Hischier et al. 2020

Hischier, R./Reale, F./Castellani, V./Sala, S.: „*Environmental Impacts of Household Appliances in Europe and Scenarios for their Impact Reduction*“. In: *Journal of Cleaner Production*, 267, 2020, Artikel 121952.

IW Consult/Fraunhofer ISI 2024

IW Consult/Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI): *Kritisch für die Wertschöpfung. Rohstoffabhängigkeit der deutschen Wirtschaft*, Köln 2024.

Kara et al. 2022

Kara, S./Hauschild, M./Sutherland, J./McAloone, T.: „*Closed-Loop Systems to Circular Economy. A Pathway to Environmental Sustainability?*“. In: *CIRP Annals*, 71: 2, 2022, S. 505-528.

Kaza et al. 2019

Kaza, S./Yao, L./Bhada-Tata, P./van Woerden, F./Ionkova, K.: *What a Waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, Washington, D. C: World Bank Group 2019.

KfW 2022

Kreditanstalt für Wiederaufbau (KfW): *Zirkuläres Bauen*, 2022. URL: <https://www.kfw.de/stories/wirtschaft/gruenden/concular/> [Stand: 19.08.2024].

Köhler et al. 2021

Köhler, A./Watson, D./Trzepacz, S./Löw, C./Liu, R./Danneck, J./Konstantas, A./Donatello, S./Faraca, G.: *Circular Economy Perspectives in the EU Textile Sector*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021.

Küstner et al. 2022

Küstner, S./Tauer, R./Breer, S.: „Zirkuläre Maßnahmen im Bestand und Neubau zum Schutz von Klima- und Ökosystemen ergreifen“. In: Berlin: WWF Deutschland, 2022.

Madaster 2022

Madaster: „Madaster ermöglicht CO₂-Berechnung auf Knopfdruck“ (Pressemitteilung vom 15.03.2022). URL: https://madaster.de/neuigkeiten/pressemitteilung_12/ [Stand: 02.09.2024].

Mast et al. 2022

Mast, J./Unruh, F. v./Irrek, W.: *R-Strategien als Leitlinien der Circular Economy* (RETHINK – Impulse zur zirkulären Wertschöpfung/Enabling the Circular Economy), Bottrop 2022. URL: https://prosperkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2022/05/rethink_22-03_r-strategien.pdf [Stand: 29.09.2024].

Mittelstand-Digital 2020

Mittelstand-Digital: *Digitalisierung im Bestandsbau. Technischer Bericht*, 2020. URL: <https://www.digitalzentrumbau.de/kos/WNetz?art=News.show&id=656> [Stand 23.04.2020].

Neri et al. 2023

Neri, A./Negri, M./Cagno, E./Kumar, V./Garza-Reyes, J. A.: „What Digital-Enabled Dynamic Capabilities Support the Circular Economy? A Multiple Case Study Approach“. In: *Business Strategy and the Environment*, 32: 7, 2023, S. 5083–5101.

Ockenfels/Schmidt 2019

Ockenfels, A./Schmidt, C. M.: „Die Mutter aller Kooperationsprobleme“. In: *Zeitschrift für Wirtschaftspolitik* 68: 2, 2019, S. 122–130.

Oliver Wyman 2023

Oliver Wyman: *Consumer Electronics. Die Quadratur der Kreislaufwirtschaft*, 2023. URL: <https://www.oliverwyman.de/unsere-expertise/publikationen/2023/jul/die-quadratur-der-kreislaufwirtschaft.html> [Stand 14.10.2024]

Plattform Lernende Systeme 2024

Plattform Lernende Systeme: *Effektive Kreislaufwirtschaft. Roboter für eine bessere Trennung von Wertstoffen*, 2024. URL: <https://www.plattform-lernende-systeme.de/robotik.html> [Stand 14.10.2024].

Pricewaterhouse Coopers 2023

Pricewaterhouse Coopers: „Secondhand auf Wachstumspfad“ (Pressemitteilung vom 07.09.2023. URL: <https://www.pwc.de/>

[de/pressemitteilungen/2023/secondhand-mode-im-aufwind-umsatz-steigt-bis-2025-auf-bis-zu-6-milliarden-euro.html](https://www.pwc.de/pressemitteilungen/2023/secondhand-mode-im-aufwind-umsatz-steigt-bis-2025-auf-bis-zu-6-milliarden-euro.html) [Stand 07.09.2023].

Ragwitz et al. 2023

Ragwitz, M./Weidlich, A./Biermann, D./Brandes, J./Brown, T./Burghardt, C./Dütschke, E./Erlach, B./Fischedick, M./Fuss, S.: *Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement* (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft), München: acatech 2023.

Ramesohl et al. 2022

Ramesohl, I. S./Berg, H./Wirtz, J.: *Circular Economy und Digitalisierung-Strategien für die digital-ökologische Industrietransformation* (Studie), Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2022.

Ranta et al. 2021

Ranta, V./Aarikka-Stenroos, L./Väisänen, J.-M.: „Digital Technologies Catalyzing Business Model Innovation for Circular Economy. Multiple Case Study“. In: *Resources, Conservation & Recycling*, 164, 2021, Artikel 105155.

Rechlin et al. 2023

Rechlin, A./Langsdorf, S./Heni, Y./Araujo, A./Hinzmann, M./Fuchs, G./Landgrebe-Trinkunaite, R./Bohusenko, A./Meyer, M./Distelkamp, M.: *Ressourceneffizienz und natürliche Ressourcen im internationalen Kontext. Entwicklungslinien der Ressourcenpolitik mit Schwerpunkt auf Ressourcenschonung und Ressourceneffizienz* (Abschlussbericht), Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt 2023.

Redelfs/Jansen 2022

Redelfs, M./Jansen, N.: *Produktvernichtung bei Amazon geht trotz Verbot weiter*, 2022. URL: <https://www.greenpeace.de/ueber-uns/leitbild/investigative-recherche/produktvernichtung-amazon-geht-weiter-verbot> [Stand: 03.09.2024].

Richardson et al. 2023

Richardson, K./Steffen, W./Lucht, W./Bendtsen, J./Cornell, S. E./Donges, J. F./Drüke, M./Fetzer, I./Bala, G./Bloh, W. v./Feulner, G./Fiedler, S./Gerten, D./Gleeson, T./Hofmann, M./Huiskamp, W./Kummu, M./Mohan, C./Nogués-Bravo, D./Petri, S./Porkka, M./Rahmstorf, S./Schaphoff, S./Thonicke, K./Tobian, A./Virkki, V./Wang-Erlandsson, L./Weber, L./Rockström, J.: „Earth Beyond Six of Nine Planetary Boundaries“. In: *Science Advances*, 9: 37, 2023, Artikel eadh2458.



Richtlinie 2008/98/EG

Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und Aufhebung bestimmter Richtlinien, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) Nr. L 312 vom 22.11.2008.

Richtlinie (EU) 2018/851

Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L 150 vom 14.6.2018.

Richtlinie (EU) 2022/2464

Richtlinie (EU) 2022/2464 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 14. Dezember 2022 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L 322 vom 16.12.2022.

Richtlinie (EU) 2024/825

Richtlinie (EU) 2024/825 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 28. Februar 2024 zur Änderung der Richtlinien 2005/29/EG und 2011/83/EU hinsichtlich der Stärkung der Verbraucher für den ökologischen Wandel durch besseren Schutz gegen unlautere Praktiken und durch bessere Informationen, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L, 2024/825, 6.3.2024.

Richtlinie (EU) 2024/1275

Richtlinie (EU) 2024/1275 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. April 2024 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L, 2024/1275, 8.5.2024.

Richtlinie (EU) 2024/1799

Richtlinie (EU) 2024/1799 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 über gemeinsame Vorschriften zur Förderung der Reparatur von Waren und zur Änderung der Verordnung (EU) 2017/2394 und der Richtlinien (EU) 2019/771 und (EU) 2020/1828, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L, 2024/1799, 10.7.2024.

Roy 2016

Roy, R.: „Consumer Product Design and Innovation: Past, Present and Future“. URL: <https://dl.designresearchsociety.org/cgi/viewcontent.cgi?article=1263&context=drs-conference-papers> [Stand 14.10.2024].

Rust 2004

Rust, U.: *Der Sinner'sche Kreis. Basis einer erfolgreichen Reinigung und Desinfektion*, 2004. URL: https://fzarchiv.sachon.de/Zeitschriftenarchiv/Getraenke-Fachzeitschriften/Getraenke-industrie/2004/11_04/GI_11-04_Der_Sinner'sche_Kreis.pdf#all_thumb [Stand: 09.09.2024].

Sachverständigenrat für Umweltfragen 2024

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) 2024: *Suffizienz als „Strategie des Genug“: Eine Einladung zur Diskussion*. Berlin 2024.

Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung 2019

Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung: *Aufbruch zu einer neuen Klimapolitik* (Sondergutachten), Wiesbaden 2019.

Schiller et al. 2022

Schiller, G./Lehmann, I./Gruhler, K./Hennersdorf, J./Lützkendorf, T./Mörmann, K./Knappe, F./Muchow, N./Reinhardt, J.: *Kartierung des anthropogenen Lagers IV. Erarbeitung eines Gebäudepass- und Gebäudekatasterkonzepts zur regionalisierten Erfassung des Materialhaushaltes mit dem Ziel der Optimierung des Recyclings. Konzepte für Materialinventare und kataster* (Texte, 05/2022), Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt 2022.

Schlegl et al. 2019

Schlegl, F./Gantner, J./Traunspurger, R./Albrecht, S./Leistner, P.: „LCA of Buildings in Germany: Proposal for a Future Benchmark Based on Existing Databases“. In: *Energy and Buildings*, 194, 2019, S. 342–350.

Schmatzberger et al. 2022

Schmatzberger, S./Boll, J. R./Broer, R.: *Eine Lebenszyklusperspektive für Gebäude. Der Europäische Rechtsrahmen und gute Beispiele aus den Mitgliedstaaten*, Brüssel: Buildings Performance Institute Europe 2022.

SPD/DIE GRÜNEN/FDP 2021

Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD)/Bündnis 90/DIE GRÜNEN/Freie Demokraten (FDP): *Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Koalitionsvertrag 2021–2025, 2021. URL: <https://www.spd.de/koalitionsvertrag2021> [Stand: 28.09.2024].

Statistisches Bundesamt 2022

Statistisches Bundesamt: *Ausstattung privater Haushalte mit elektrischen Haushalts- und sonstigen Geräten*. Deutschland, 2022. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/liste-haushaltsgeraete-d.html#115474> [Stand: 03.09.2024].

Steger et al. 2022

Steger, S./Wilts, H./Bergs, L./Bergmann, L.: *Energetische Sanierung von Bestandsgebäuden oder Neubau. Ökologische Bewertung hinsichtlich Materialbedarf, Primärenergieverbrauch und damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen* (Endbericht), Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie 2022.

Stich et al. 2022

Stich, V./Stroh, M.-F./Abbas, M./Frings, K./Kremer, S.: *Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland. Technologie- und Trendradar 2022* (Studie), Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz 2022.

Stiftung Klimaneutralität et al. 2022

Stiftung Klimaneutralität/ Agora Verkehrswende/ Agora Energie-wende/ Bundesverband der Deutschen Industrie (BDI)/ Deutsche Energie-Agentur (dena)/ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)/ Kopernikus-Projekte: *Vergleich der „Big 5“ Klimaneutralitätsszenarien*, 2022. URL: <https://www.prognos.com/de/projekt/vergleich-der-big-5-klimaneutralitaetsszenarien> [Stand 14.10.2024].

Textile Exchange 2021

Textile Exchange: *Preferred Fiber & Materials*, 2021. URL: <https://textileexchange.org/about-materials-matrix/> [Stand 14.10.2024].

Tischer 2021

Tischer, S.: Urbanistic. *Digitale Stadtplanung*, 2021. URL: <https://www.munich-startup.de/69717/urbanistic-digitale-stadtplanung/> [Stand: 03.09.2024].

Triqbriq 2024

Triqbriq: *Die kreislauffähige Alternative zum Ziegelstein*, 2024. URL: <https://triqbriq.de/> [Stand: 09.09.2024].

Van Woensel 2020

Van Woensel, L.: *What If Fashion Were Good for the Planet?* 2020. URL: [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA\(2020\)656296](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_ATA(2020)656296) [Stand 10.09.2020].

Verordnung (EU) 1007/2011

Europäisches Parlament: Verordnung (EU) 1007/2011 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27. September 2011 über die Bezeichnungen von Textilfasern und die damit zusammenhängende Etikettierung und Kennzeichnung der Faserzusammensetzung von Textilerzeugnissen und zur Aufhebung der Richtlinie 73/44/EWG des Rates und der Richtlinien 96/73/EG und 2008/121/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L 322 vom 16.12.2022.

Verordnung (EU) 2017/1369

Verordnung (EU) 2017/1369 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2017 zur Festlegung eines Rahmens für die Energieverbrauchskennzeichnung und zur Aufhebung der Richtlinie 2010/30/EU, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L 198 vom 28.7.2017.

Verordnung (EU) 2020/852

Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Juni 2020 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/2088, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L 198 vom 22.6.2022.

Verordnung (EU) 2023/826

Verordnung (EU) 2023/826 der Kommission vom 17. April 2023 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an den Energieverbrauch elektrischer und elektronischer Haushalts- und Bürogeräte im Aus-Zustand, im Bereitschaftszustand und im vernetzten Bereitschaftsbetrieb gemäß der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 1275/2008 und (EG) Nr. 107/2009 der Kommission, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L 103 vom 18.4.2023.

Verordnung (EU) 2024/1157

Verordnung (EU) 2024/1157 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 über die Verbringung von Abfällen, zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 1257/2013 und (EU) 2020/1056 und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 1013/2006, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L 2024/1157, 30.4.2024.

Verordnung (EU) 2024/1252

Verordnung (EU) 2024/1252 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. April 2024 zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen



(EU) 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020. 03.05.2024, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L, 2024/1252, 3.5.2024.

Verordnung (EU) 2024/1781

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, Amtsblatt der Europäischen Union (ABl.) L, 2024/1781, 28.6.2024.

Umweltbundesamt 2019a

Umweltbundesamt: *Wohnen und Sanieren*, Dessau-Roßlau 2019.

Umweltbundesamt 2019b

Umweltbundesamt: *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität*, Dessau-Roßlau 2019.

Umweltbundesamt 2019c

Umweltbundesamt: *Textilindustrie*, 2019. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebranchen/textilindustrie#die-textilindustrie-in-deutschland> [Stand: 20.08.2024].

Umweltbundesamt 2023a

Umweltbundesamt: *E-Scooter momentan kein Beitrag zur Verkehrswende*, 2023. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/e-scooter-momentan-kein-beitrag-zur-verkehrswende#aktuelles-fazit-des-uba> [Stand: 15.10.2024].

Umweltbundesamt 2023b

Umweltbundesamt: *Umwelt und Klima schützen, Wohnraum schaffen, Lebensqualität verbessern. Empfehlungen von UBA und KNBau für einen nachhaltigen Wohnungs- und Städtebau* (Position, 05/2023), Dessau-Roßlau 2023.

Umweltbundesamt 2023c

Umweltbundesamt: *Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy. Rahmenbedingungen, Anforderungen und Handlungsempfehlungen* (Position der Ressourcenkommission am Umweltbundesamt, 06/2023), Dessau-Roßlau 2023.

Unitar 2024

Unitar: *The Global E-Waste Monitor 2024*, 2024. URL: <https://unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling> [Stand: 09.09.2024].

Umweltprogramm der Vereinten Nationen 2024a

United Nations Environment Programme: *Bend the Trend. Pathways to a Liveable Planet as Resource Use Spikes*, Nairobi 2024.

Umweltprogramm der Vereinten Nationen 2024b

United Nations Environment Programme: *Circularity*, 2024. URL: <https://www.unep.org/circularity> [Stand: 09.09.2024].

United States Environmental Protection Agency 2023

United States Environmental Protection Agency: *National Overview. Facts and Figures on Materials, Wastes and Recycling*, 2023. URL: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials> [Stand 14.10.2024].

Wang et al. 2021

Wang, P./Ryberg, M./Yang, Y./Feng, K./Kara, S./Hauschild, M./Chen, W.-Q.: „Efficiency Stagnation in Global Steel Production Urges Joint Supply- and Demand-Side Mitigation Efforts“. In: *Nature Communications*, 12, 2021, Artikel 2066.

Yuan et al. 2016

Yuan, Z./Zhang, Y./Liu, X.: „Life Cycle Assessment of Horizontal-Axis Washing Machines in China“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21: 1, 2016, S. 15-28.

ZVEI 2024

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie: *„Recht auf Reparatur“ sinnvoll ausgestalten*, 2024. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2024/Februar/ZVEI-Seiter__Recht_auf_Reparatur/ZVEI-Seiter_Recht_auf_Reparatur.pdf [Stand: 03.08.2024].



Über acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de



Herausgeber:

Prof. Dr. Dr. h. c. Christoph M. Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

Geschäftsstelle

Karolinenplatz 4

80333 München

Reihenherausgeber:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2024

Geschäftsstelle

Karolinenplatz 4

80333 München

T +49 (0)89/52 03 09-0

F +49 (0)89/52 03 09-900

Hauptstadtbüro

Georgenstraße 25

10117 Berlin

T +49 (0)30/2 06 30 96-0

F +49 (0)30/2 06 30 96-11

Brüssel-Büro

Rue d'Egmont/Egmontstraat 13

1000 Brüssel | Belgien

T +32 (0)2/2 13 81-80

F +32 (0)2/2 13 81-89

info@acatech.de

www.acatech.de

Präsidenten und VizepräsidentInnen: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber,
Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather, Dr. Stefan Oschmann, Prof. Dr. Christoph M. Schmidt

Registergericht AG München, VR 20 20 21

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Wolfgang Siegel

Empfohlene Zitierweise:

Schmidt, Ch. M./Weber, Th. (Hrsg.): *Digitale Enabler der Kreislaufwirtschaft* (acatech STUDIE), München 2024.

DOI: https://doi.org/10.48669/aca_2024-15

ISSN 2192-6174/ISBN 978-3-96834-036-4

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2024

Koordination: Dr. Anna Frey, Dr. Mareike Berger

Redaktion: Alrun Straudi

Lektorat: Jürgen Schreiber, Textkuss. Werkstatt für Sprache und Struktur, Halle (Saale)

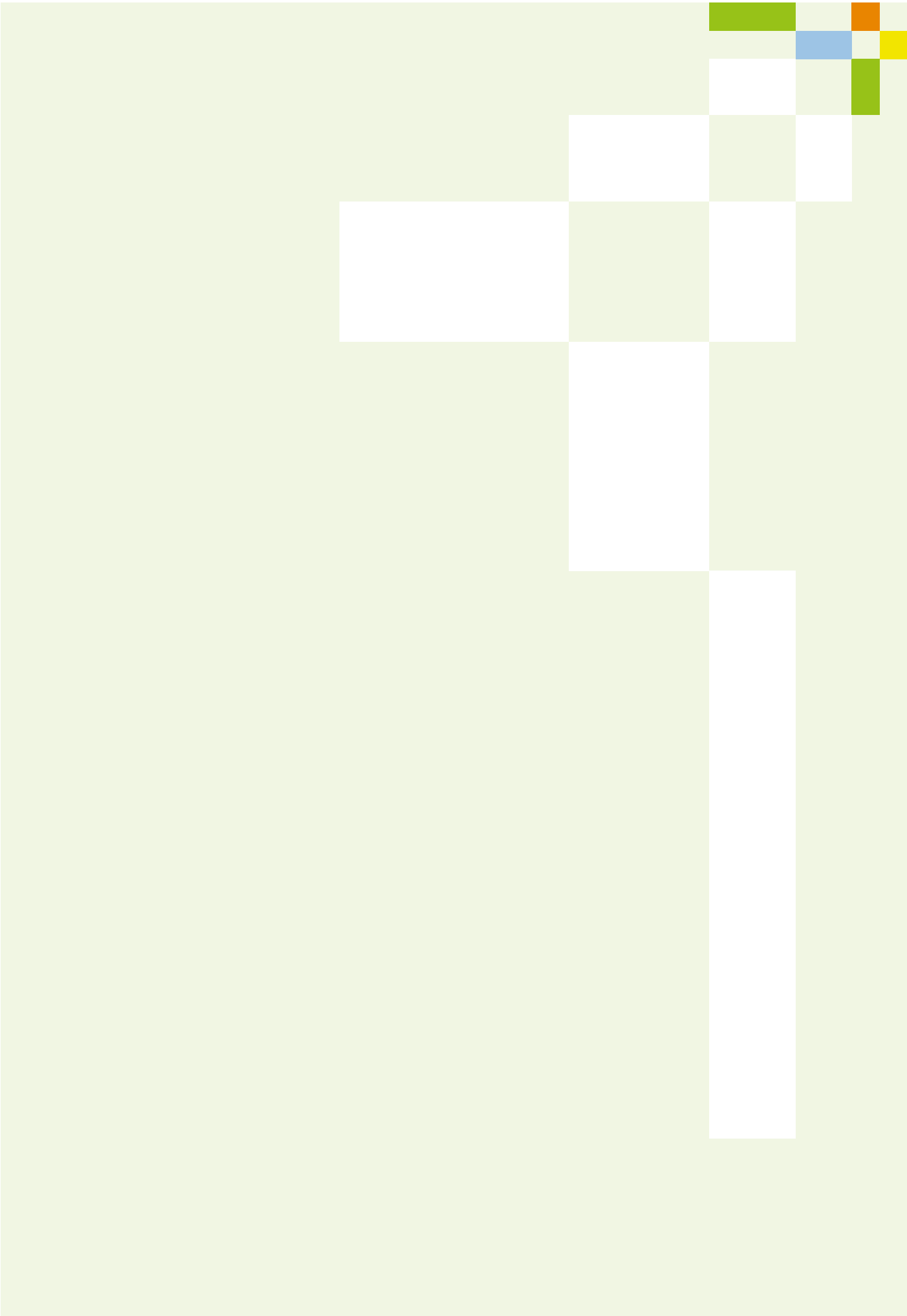
Layoutkonzeption, Konvertierung und Satz: GROOTHUIS. Gesellschaft der Ideen und Passionen mbH für Kommunikation und Medien, Marketing und Gestaltung, groothuis.de

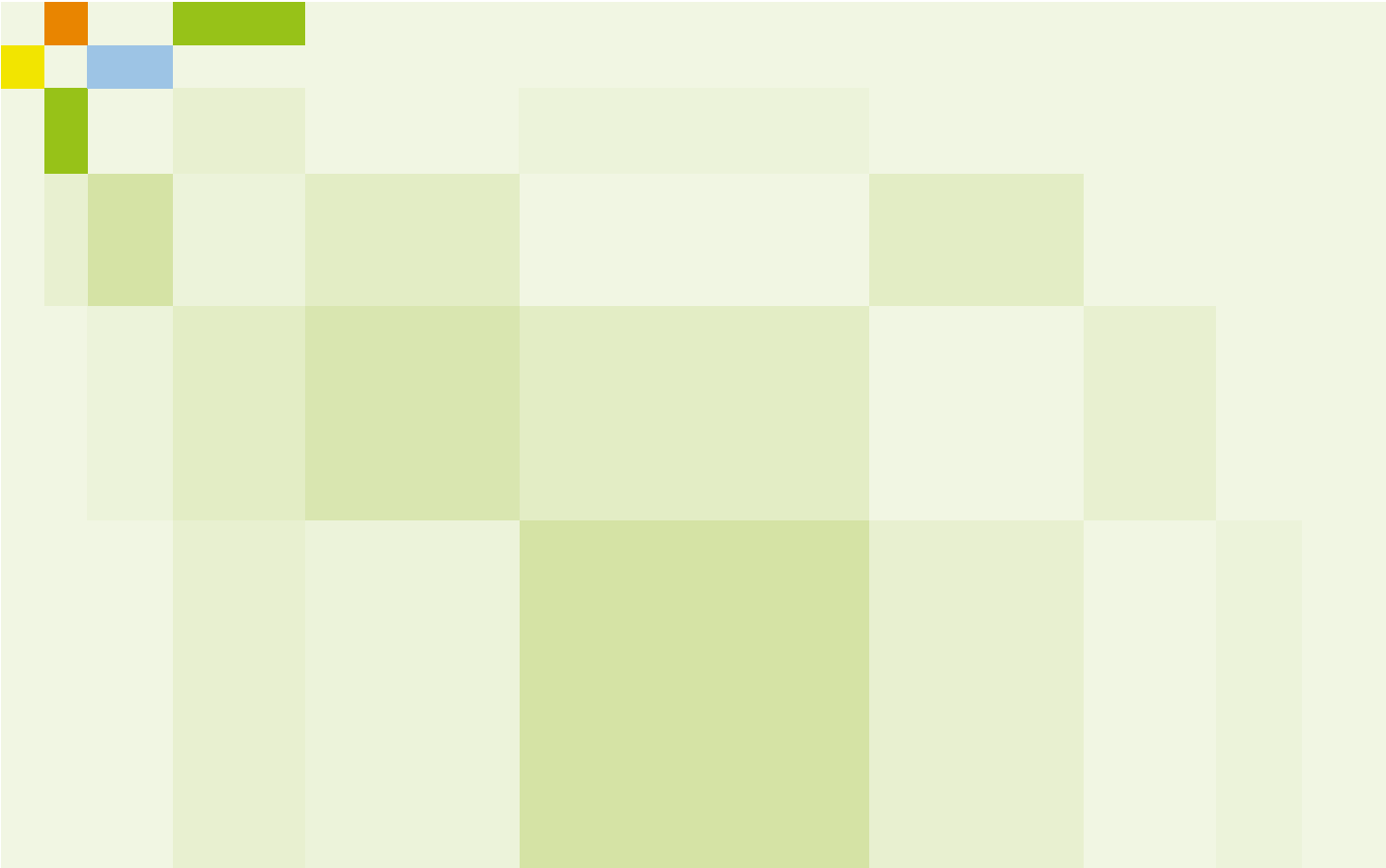
Titelbild und Illustrationen: Maria-Inès Chevallier, Diane Bergmann

Druck: Druckerei Joh. Walch GmbH & Co KG, Augsburg

Printed in EC

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.acatech.de.





Der im Sinne der Nachhaltigkeit notwendige Umbau des Wirtschaftssystems hin zu einer Kreislaufwirtschaft geht Hand in Hand mit der digitalen Transformation, denn digitale Technologien bergen große Potenziale als Enabler einer erfolgreichen Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsstrategien.

Die vorliegende acatech STUDIE analysiert die Rolle digitaler Technologien in der Kreislaufwirtschaft anhand von Anwendungsbeispielen aus drei unterschiedlichen Wirtschaftssektoren und zeigt: Der für die Etablierung einer Kreislaufwirtschaft notwendige digitale Werkzeugkasten ist größtenteils bereits vorhanden. Digitale Technologien werden ihre vollen Potenziale künftig aber nur dann entfalten können, wenn sowohl sektorspezifische als auch sektorübergreifende Rahmenbedingungen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft verbessert werden.