

DISKUSSIONSPAPIER

01/2025

Zirkuläres Wirtschaften als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in unsicheren Zeiten

Ein Diskussionsbeitrag aus dem UBA

von:

Jan Kosmol, Wiebke Jander, Jens Günther, Kerstin Döscher, Philip Nuss, Andreas Kahrl, Christian Kitazume, Markus Taubert

Unter Mitarbeit von:

Michael Golde, Maximilian Hofmeier, Alexander Janz, Janine Kleemann, Matthias Koller, Martin Lange, Michael Marty, Felix Müller, Christian Pade, Diana Sorg, Laura Spengler, Lena Vierke

Herausgeber:

Umweltbundesamt

Vorwort

Unsere Welt befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel. Globale Krisen – vom Klimawandel über den Verlust der biologischen Vielfalt bis hin zu geopolitischen Spannungen und Ressourcenknappheiten – fordern uns heraus. Gerade in turbulenten Zeiten müssen wir unsere gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Leitbilder kritisch hinterfragen, strategisch anpassen und zukunftsorientiert ausrichten. Zirkuläres Wirtschaften versteht sich dabei als ein Schlüsselansatz der Transformation zur Nachhaltigkeit, der darauf abzielt, Stoffkreisläufe weitestgehend zu schließen und den Ressourcenverbrauch absolut zu reduzieren. So können wir nicht nur einen wirksamen Beitrag für den Klimaschutz, den Erhalt der biologischen Vielfalt und die Sicherung unserer natürlichen Lebensgrundlagen leisten, sondern auch die strategische Souveränität Europas und die Innovationskraft unserer Wirtschaft stärken.

Aus diesen Gründen setzte die EU in ihrem European Green Deal und nun dem Clean Industrial Deal sowie dem angekündigten Circular Economy Act auf Zirkuläres Wirtschaften als zentralem Baustein. Auf nationaler Ebene ist die Ende 2024 durch das Kabinett beschlossene Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie der Startpunkt für ein konzertiertes Handeln der Politik. Daran anknüpfend sieht der neue Koalitionsvertrag die Umsetzung der Strategie mit ihren Maßnahmen vor. Das UBA möchte mit dieser Studie einen Diskussionsbeitrag beisteuern, um zu zeigen, mit welchen großen Hebeln Veränderungen in Richtung zirkulären Wirtschaftens möglich sind. Die systemische Betrachtung vereint dabei Perspektiven, in denen wir im UBA über besondere Expertise verfügen: zu Rohstoffen und Materialströmen, zur industriellen Produktion, zur Produktpolitik sowie zu Konsum und Bedürfnisfeldern. Es zeichnen sich empfehlenswerte Handlungsansätze ab, die nicht an Ressortgrenzen halt machen und so substantiell zur Bewältigung gegenwärtiger ökologischer und sozioökonomischer Herausforderungen beitragen können.

Unsere Botschaft ist klar: Zirkuläres Wirtschaften ist kein Nischenthema, sondern ein zentraler Baustein für eine zukunftsfähige Gesellschaft – besonders in Zeiten multipler Krisen. Ich lade Sie herzlich ein, sich mit den Impulsen dieses Papiers auseinanderzusetzen, sie weiterzudenken und gemeinsam mit uns an einer nachhaltigen Transformation zu arbeiten.

Prof. Dr. Dirk Messner, Präsident des Umweltbundesamtes

Zirkuläres Wirtschaften als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in unsicheren Zeiten

Ein Diskussionsbeitrag aus dem UBA

von

Jan Kosmol, Wiebke Jander, Jens Günther, Kerstin Döscher,
Philip Nuss, Andreas Kahrl, Christian Kitazume, Markus
Taubert

Unter Mitarbeit von: Michael Golde, Maximilian
Hofmeier, Alexander Janz, Janine Kleemann, Matthias
Koller, Martin Lange, Michael Marty, Felix Müller,
Christian Pade, Diana Sorg, Laura Spengler, Lena Vierke

Wissenschaftliche Mitarbeitende im Umweltbundesamt,
Dessau-Roßlau

Dieses Papier fasst aus Sicht der Autorinnen*Autoren die
aktuellen Erkenntnisse zusammen.

Dank an: Frederike Balzer, Mathias Bornschein, Björn
Bünger, Tim Hermann, Annette Hillebrandt, Anne Klatt,
Regina Kohlmeyer, Martin Lambrecht, Thomas
Lützkendorf, Ines Oehme, Almut Reichel, Daniel Sättler,
Liselotte Schebek, Mario Schmidt, Sylke Schönburg,
Kristine Sperlich, Johanna Sydow, Sabine Thalheim, Lars
Tietjen, Julia Vogel

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

Abschlussdatum:

August 2025

Redaktion:

I 1.2/Wiebke Jander, III 1.5/Kerstin Döscher,
III 2.2/Jan Kosmol

Kurzlebensläufe der Autorinnen und Autoren:

Jan Kosmol ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet III 2.2 „Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie“. Er arbeitet zu globalen Metall-Lieferketten, kritischen Rohstoffen und Konzepten Zirkulären Wirtschaftens.

Wiebke Jander ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet I 1.2 „Capacity building, Ressourcenschonung, Sicherheit“. Sie arbeitet zu Themen an der Schnittstelle von Kreislaufwirtschaft zirkulärem Wirtschaften und Bioökonomie.

Jens Günther ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet I 1.2 „Capacity building, Ressourcenschonung, Sicherheit“. Er arbeitet zu den Wechselwirkungen der Ressourcenschonung mit anderen Politikfeldern und zur nachhaltigen Bioökonomie.

Kerstin Döscher ist wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet III 1.5 „Abfallwirtschaft, grenzüberschreitende Abfallverbringung“. Sie arbeitet zu übergreifenden Fragen Zirkulären Wirtschaftens und koordiniert die Politikberatung zur NKWS.

Philip Nuss ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet I 1.2 „Capacity building, Ressourcenschonung, Sicherheit“. Er arbeitet zu Daten, Indikatoren und Szenarien, die den Fortschritt in Richtung Ressourcenschonung und Circular Economy messbar machen.

Andreas Kahrl ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet III 2.2 „Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie“. Er arbeitet zu Themenstellungen der Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung in der Metallindustrie.

Christian Kitazume ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet III 1.2 „Produktverantwortung – Elektrogeräte, Fahrzeuge und Batterien“. Er arbeitet zur Kreislaufwirtschaft von Elektrogeräten mit dem Schwerpunkt Kunststoffrecycling.

Markus Taubert ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet III 1.4 „Stoffbezogene Produktfragen“. Er arbeitet zum nachhaltigen Bauen mit Schwerpunkten im zirkulären Bauen und der Ökobilanzierung von Bauprodukten.

Unter Mitarbeit von:

Michael Golde, Fachgebiet I 1.4 „Wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Umweltfragen, sozial-ökologischer Strukturwandel, nachhaltiger Konsum“

Maximilian Hofmeier, Fachgebiet II 2.2 „Landwirtschaft“

Alexander Janz, Abteilungsleitung III 1 „Nachhaltige Produkte und nachhaltiger Konsum, Kreislaufwirtschaft“

Janine Kleemann, Fachgebietsleitung III 2.8 „Dekarbonisierung in der Industrie“

Matthias Koller, Abteilungsleitung I 1 „Nachhaltigkeitstransformation in Gesellschaft und Wirtschaft, Umweltdaten“

Martin Lange, Fachgebietsleitung I 2.2 „Schadstoffminderung und Energieeinsparung im Verkehr“

Michael Marty, Abteilungsleitung III 2 „Nachhaltige Produktion, Ressourcenschonung und Stoffkreisläufe“

Felix Müller, Fachgebiet III 2.2 „Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie“

Christian Pade, Fachgebiet III 1.3 „Ökodesign, Umweltkennzeichnung, Umweltfreundliche Beschaffung“

Diana Sorg, Fachgebiet II 2.2 „Landwirtschaft“

Laura Spengler, Fachgebietsleitung III 1.1 „Übergreifende Aspekte des produktbezogenen Umweltschutzes, Nachhaltige Konsumstrukturen, Innovationsprogramm“

Lena Vierke, Fachgebiet IV 2.3 „Chemikalien“

DOI:

<https://doi.org/10.60810/openumwelt-7883>

Dessau-Roßlau, August 2025

Kurzbeschreibung: Zirkuläres Wirtschaften als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung in unsicheren Zeiten – ein Diskussionsbeitrag aus dem UBA

Ziel dieses Diskussionspapiers ist es, große Linien für eine Nachhaltigkeitstransformation mittels Zirkulären Wirtschaftens aufzuzeigen. Ausgangspunkte sind aktuelle gesellschaftliche Herausforderungen, die zum Teil durch lineares Wirtschaften hervorgerufen, verstärkt oder begünstigt werden. Im Gegenzug hat Zirkuläres Wirtschaften das Potential, zur Erreichung gesellschaftlicher Ziele einen wesentlichen Beitrag zu leisten, indem Materialien in Produkten, Gebäuden, Anlagen und Infrastrukturen erhalten bleiben und gleichzeitig Materialverluste in die Umwelt in Form von Abfällen und Emissionen vermieden werden.

Doch – welche Wirkung soll Zirkuläres Wirtschaften überhaupt entfalten? Welche Strategien wirken sich wie auf Ziele aus? Und nicht zuletzt: Was sind die großen Hebel Zirkulären Wirtschaftens, die unter Zuhilfenahme mehrerer Strategien wesentlich zur Erreichung von Zielen beitragen und deshalb prioritär umgelegt werden sollten? Wichtig ist dabei ein Fokus auf tatsächliche Wirkungen der Materialnutzung. Deshalb leitet das Papier systematisch 15 wirkungsvolle Hebel her – von der Auswahl von Zielen über Anwendung von Strategien bis hin zur Beschreibung von Hebeln aus vier Perspektiven (Material, Produktion, Produkt, Bedürfnisfeld). Diesen „Kompass“, der unterschiedlichen Akteursgruppen langfristige Orientierung zur Schwerpunktsetzung in einem komplexen Transformationsfeld geben kann, stellen wir hier zur Diskussion.

Zusätzlich schlagen wir in einer Zusammenschau der Hebel prioritäre Instrumentenbündel (Policy Mixe) beispielhaft für die Politikfelder „Ernährung und Landwirtschaft“, „Bauen und Wohnen“ und „Mobilität von Personen und Fahrzeugproduktion“ vor, die zirkuläre Ansätze sowohl auf der Angebotsseite, als auch bei den Nutzenden befördern können.

Damit soll dieses Papier die Fortentwicklung politischer Prozesse, insbesondere der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) sowie des Clean Industrial Deal (CID) mit dem darin angekündigten Circular Economy Act der Europäischen Kommission, bei der Setzung von Prioritäten, der Auswahl und Ausgestaltung von Zielen, Indikatoren und Maßnahmen unterstützen. Wenngleich das Ziel eines guten Lebens für alle innerhalb planetarer Grenzen und die Transformation unserer Wirtschaftsweise aus sozioökonomischer Perspektive höchst relevant ist, kommt Umweltfragestellungen als Kernkompetenz des UBA in diesem Papier ein besonderer Stellenwert zu.

Abstract: Circular economy as a contribution to sustainable development in uncertain times – a discussion paper from the Federal Environment Agency

The aim of this discussion paper is to outline a sustainability transformation by means of circular economy. The starting points are current societal challenges, some of which are caused, exacerbated or facilitated by linear economic activities. In turn, circular economy has the potential to make a significant contribution to the achievement of societal goals by preserving materials in products, buildings, facilities and infrastructures while avoiding material losses to the environment in the form of waste and emissions.

But – what effect should circular economy actually have? Which strategies have effect on which goals? And last but not least: What are the major levers of circular economy that, with the help of several strategies, contribute significantly to the achievement of goals and should therefore be implemented as a priority? It is important to focus on the actual impacts of material use. This is why the paper systematically derives 15 effective levers – from the selection of goals to the application of strategies to the description of levers from four perspectives (material, production, product, area of need). We are presenting this “compass,” which can provide different stakeholder groups with long-term guidance on setting priorities in a complex field of transformation, for discussion here.

In addition, we propose, in a review of the levers, priority policy mixes for the policy areas ‘nutrition and agriculture’, ‘construction and housing’ and ‘personal mobility and vehicle production’, which can promote circular approaches both on the supply side and among users.

This paper is intended to support the further development of political processes, in particular the National Circular Economy Strategy (NKWS) and the Clean Industrial Deal (CID) with the announced Circular Economy Act of the European Commission, in setting priorities, selecting and designing targets, indicators and measures. Although the goal of a good life for all within planetary boundaries and the transformation of our economic system is highly relevant from a socio-economic perspective, environmental issues, as the core competence of the UBA, are given special importance in this paper.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	2
Abbildungsverzeichnis.....	11
Abkürzungsverzeichnis	12
1 Einleitung.....	14
1.1 Wo kommen wir her? Kurze Ideengeschichte Zirkulären Wirtschaftens	14
1.2 Wo wollen wir hin? Ziele des Papiers und Vorgehen	17
2 Gesellschaftliche Herausforderungen im Kontext von Rohstoffnutzung.....	18
2.1 Dreifache planetare Krise.....	18
2.2 Soziale Krisenherde.....	20
2.3 Neue geopolitische Realitäten	22
2.4 Lineares Wirtschaften ist Kern vieler Probleme	23
3 Zirkuläres Wirtschaften als Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen	26
3.1 Was verstehen wir unter Zirkulärem Wirtschaften?	26
3.2 Beiträge zu Nachhaltigkeitszielen	27
3.3 Beiträge zu Sicherheit und Resilienz	29
3.4 Zwischenfazit: Zirkuläres Wirtschaften als horizontales Politikfeld	30
4 Vorgehen zur Identifizierung großer Hebel Zirkulären Wirtschaftens.....	33
4.1 Was ist ein Hebel? Zusammenspiel von Zielen, Strategien und Handlungen.....	33
4.2 Große Hebel aus vier Perspektiven.....	34
5 Ziele – im Spannungsfeld zwischen Nachhaltigkeit, Sicherheit und Resilienz	37
5.1 Ein gutes Leben für alle innerhalb planetarer Grenzen	37
5.2 Auswahl der Ziele	38
5.3 Umweltpolitische Ziele.....	40
5.3.1 Klimaschutz	40
5.3.2 Biodiversitätsschutz	40
5.3.3 Saubere Umwelt	41
5.3.4 Wasserverfügbarkeit.....	41
5.4 Sozial- und entwicklungspolitische Ziele.....	41
5.4.1 Einhaltung von Menschenrechten.....	41
5.4.2 Entwicklungschancen.....	42
5.4.3 Gerechter Wandel.....	42
5.5 Wirtschafts- und sicherheitspolitische Ziele	43
5.5.1 Sicherheit und Resilienz	43

6	Strategien – Wesen Zirkulären Wirtschaftens	44
6.1	Auswahl und Zusammenspiel der Strategien	44
6.2	Close (Schließen): Ströme zu Kreisläufen schließen	45
6.3	Slow (Verlangsamen): Nutzung verlängern und intensivieren	46
6.4	Narrow (Verengen): Weniger ist mehr	46
6.5	Substitute (Ersetzen): Materialien im Einklang mit natürlichen Kreisläufen nutzen.....	47
6.6	Secure (Sichern): Kritische Rohstoffe in Kreisläufen sichern, strategische Rohstoffe gezielter einsetzen	47
6.7	Clean (Reinigen): Kreisläufe sauber halten	48
6.8	Act responsibly (Verantwortungsvoll handeln): Kreisläufe verantwortungsvoll speisen und führen	49
7	Große Hebel Zirkulären Wirtschaftens aus vier Perspektiven – Zielbeiträge maximieren	50
7.1	Hebel aus Materialperspektive	51
7.1.1	Fossile Rohstoffe im Boden lassen.....	52
7.1.2	Bioökonomie zirkulär gestalten	53
7.1.3	Metalle verantwortungsvoll gewinnen und weiterverarbeiten	55
7.1.4	Das anthropogene Lager zur Sekundärrohstoffgewinnung bewirtschaften (Urban Mining)	56
7.1.5	Schadstoffe vermeiden	57
7.2	Hebel aus Produktionsperspektive	59
7.2.1	Höherwertig und sortenrein recyceln.....	59
7.2.2	Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe schließen	61
7.2.3	Abwärme besser nutzen	63
7.3	Hebel aus Produktperspektive	64
7.3.1	Produkte länger nutzen, reparieren und wiederverwenden	65
7.3.2	Produkte kreislauffähig gestalten	66
7.3.3	Material- und Energieeffizienz von Produkten steigern.....	67
7.4	Hebel aus Bedürfnisfeldperspektive	68
7.4.1	Energie- und ressourceneffizient wohnen.....	69
7.4.2	Mobilitätsverhalten anpassen	70
7.4.3	Stärker pflanzenbasiert ernähren	71
7.4.4	Kleidung länger tragen.....	72
7.5	Vision einer zirkulären Lebens- und Wirtschaftsweise	74
8	Empfehlungen für ausgewählte Politikfelder.....	75
8.1	Auswahl der Politikfelder	75

8.2	Ernährung und Landwirtschaft	76
8.3	Bauen und Wohnen	79
8.4	Mobilität von Personen und Fahrzeugproduktion.....	82
9	Ausblick	85
10	Quellenverzeichnis	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Überschreitung planetarer Grenzen	19
Abbildung 2:	Rohstoffinanspruchnahme, Umweltwirkungen und Abfallaufkommen für Deutschland im Zeitverlauf (2010-2022).	20
Abbildung 3:	Der durch planetare Ober- und soziale Untergrenzen definierte Doughnut.....	21
Abbildung 4:	Lineare und zirkuläre Materialflüsse in Deutschland, 2023, in Millionen Tonnen	23
Abbildung 5:	Natürliche Ressourcen, die dreifache planetare Krise und die SDGs.....	28
Abbildung 6:	SDGs strukturiert in natürliche Ressourcen, versorgende Systeme und menschliches Wohlbefinden	29
Abbildung 7:	Zirkuläres Wirtschaften als politikfeldübergreifendes Thema (exemplarische Auswahl an Politikfeldern)	32
Abbildung 8:	Darstellung des Zusammenspiels Ziele – Strategien – Handlungen/große Hebel in einem Ziel- und Indikatorensystem.....	34
Abbildung 9:	Schema Hebel aus 4 Perspektiven, die blinde Flecken wechselseitig ausleuchten.....	35
Abbildung 10:	Darstellung ausgewählter Ziele Zirkulären Wirtschaftens im Zielsystem	39
Abbildung 11:	Strategien Zirkulären Wirtschaftens.....	44
Abbildung 12:	Darstellung der Hebel Zirkulären Wirtschaftens im Zielsystem	50
Abbildung 13:	Beitrag der Rohstoffextraktion und -verarbeitung zum Umweltfußabdruck der EU-27.....	51
Abbildung 14:	Die 10 R Leiter	64
Abbildung 15:	Relevante Hebel und Instrumentenbündel für das Politikfeld Ernährung und Landwirtschaft.....	78
Abbildung 16:	Relevante Hebel und Instrumentenbündel für das Politikfeld Bauen und Wohnen.....	81
Abbildung 17:	Relevante Hebel und Instrumentenbündel für das Politikfeld Mobilität und Fahrzeugproduktion	84

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Langversion
AbfKlärV	Klärschlamm-Verordnung
AEM	Allgemeine Erklärung der Menschenrechte
BMUKN	Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUV	Bundesministerin für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BVT	Beste verfügbare Techniken
CBD	Convention on Biological Diversity
CGR	Circularity Gap Report
CID	Clean Industrial Deal
CMUR	Circular Material Use Rate
CRMA	Critical Raw Materials Act
DERec	Direct Effects of Recovery
DGE	Deutsche Gesellschaft für Ernährung
DIERec	Direct and Indirect Effects of Recovery
DMC	Domestic Material Consumption
DPP	Digitaler Produktpass
EEA	European Environment Agency
EGD	European Green Deal
EOL-RIR	End-of-life recycling input rates
EU	Europäische Union
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GFC	Global Framework on Chemicals
HBCD	Hexabromcyclododecan
ICCPR	International Covenant on Civil and Political Rights
ICER	Integral Circular Economy Reports
ICESCR	International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRP	International Resource Panel
ISO	Internationale Organisation für Normung

Kürzel	Langversion
KEA	Kumulierter Energieaufwand
Kfz	Kraftfahrzeug
KI	Künstliche Intelligenz
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LCA	Life cycle assessment
MRIO	Multi-Regional Input Output
NKWS	Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
ÖPNV	Öffentlicher Personennahverkehr
ÖPV	Öffentlicher Personenverkehr
Pkw	Personenkraftwagen
ProgRess	Deutsches Ressourceneffizienzprogramm
PtGLS	Power-to-Gas/Liquid/Solid
SDGs	Sustainable Development Goals
SUV	Sport Utility Vehicles
THG	Treibhausgase
TRL	Technology Readiness Level
UBA	Umweltbundesamt
UN	United Nations
UNCCD	United Nations Convention to Combat Desertification
UNEP	United Nations Environment Programme
WWF	World Wildlife Fund

1 Einleitung

1.1 Wo kommen wir her? Kurze Ideengeschichte Zirkulären Wirtschaftens

Von der Antike bis in die Spätmoderne

Obwohl es den Begriff „Circular Economy“ erst seit dem späten 20. Jahrhundert gibt und die aktuelle politische und wissenschaftliche Diskussion erst Mitte der 2010er Jahre begann (Chedrak et al., 2023), sind die zugrunde liegenden Ideen so alt wie die Menschheit. Im Mittelpunkt steht, das zu verwenden, was bereits vorhanden ist, weil es wertvoll ist. Es gibt Belege für die Weiterverwendung von Produktionsabfällen (Nähnadeln zu Angelhaken) aus dem Jahr 900 v. Christus, für Sekundärrohstoffmärkte (Kupferschrotte und Altglas) aus der Antike und für die Wiederverwendung von Holz im Schiffbau aus dem Mittelalter. Es gab auch mittelalterliche Gebrauchtwarenmärkte, gespeist vom überbordenden Konsum des Adels (Schwab, 2024).

Das aktuell vorherrschende „lineare Wirtschaften“, geprägt durch das Paradigma „Nehmen-Verwenden-Wegwerfen“, ist aus historischer Perspektive eine Anomalie. Schwab (2024) identifiziert zwei wesentliche Treiber für die Wende vom kreislaforientierten zum linearen Wirtschaften: Die Industrialisierung im 19. Jahrhundert und die Flutung der Märkte mit billigem Erdöl in den 1950er Jahren, dem Beginn des „Zeitalters der großen Beschleunigung“ (Head et al., 2022): Produkte wurden billiger, Arbeit teurer, es entstanden Wegwerfprodukte und wachsende Abfallberge (Schwab, 2024).

Das Überschreiten planetarer Grenzen hat uns die Notwendigkeit einer Trendwende hin zur Zirkularität vor Augen geführt. Kreislaforientiertes Wirtschaften wird heute in Industrieländern nicht mehr vorrangig durch einen Mangel an Wirtschaftsgütern getrieben, sondern wird als Modell für nachhaltigere Produktions- und Konsummuster auf einem begrenzten, sich zunehmend erhitzenden Planeten gesehen. Die Grundidee besteht darin, ein ökonomisches System zu schaffen, das die Funktionsweise von natürlichen Ökosystemen widerspiegelt (Chedrak et al., 2023). Im Lichte der jüngsten geo- und handelspolitischen Umbrüche geraten zudem Wettbewerbsfähigkeit, Sicherheit, Unabhängigkeit und Resilienz von Volkswirtschaften verstärkt als Zweckbestimmung kreislaforientierten Wirtschaftens in den Blick.

Der im deutschsprachigen Diskurs abfallwirtschaftlich geprägte Begriff „Kreislaufwirtschaft“ hat sich im Verlauf der letzten Jahre unter Einfluss der europäischen und globalen Diskussion gewandelt, hin zu einem holistischer verstandenen „Zirkulären Wirtschaften“ (engl. Circular Economy): Es weist starke Bezüge zum Konzept der nachhaltigen Entwicklung auf und wird zunehmend als integrierter Ansatz zur sozial-ökologischen Transformation des Wirtschaftssystems und zu grundlegenden Änderungen im Umgang mit natürlichen Ressourcen verstanden, inklusive der zu Grunde liegenden Werte, Gesellschaftsstrukturen und Kulturpraktiken (Chedrak et al., 2023; Koller et al., 2024; Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2024).

Von der Kreislaufwirtschaft über die Ressourceneffizienz zum Zirkulären Wirtschaften

Die in Deutschland seit den 1970er Jahren angestrebte Kreislaufwirtschaft folgt der Idee, Abfälle zu vermeiden, in Kreisläufen zu führen oder energetisch zu verwerten und nur die nicht verwertbaren Abfälle sicher zu beseitigen. Meilensteine dieser Entwicklung waren die Schadstoffeliminierung und -konzentrierung durch energetische Verwertungsverfahren, die Anwendung des Verursacherprinzips durch die erweiterte Herstellerverantwortung, die verpflichtende Erstellung und kontinuierliche Fortentwicklung eines

Abfallvermeidungsprogrammes, die Einführung von Recycling- und Verwertungsquoten und seit 2005 auch das Deponierungsverbot für nicht vorbehandelte Abfälle. Das abfallbezogene Kreislaufwirtschaftsrecht erwies sich dabei als Treiber zahlreicher umwelttechnischer Innovationen und induzierte zum Teil gut funktionierende Recyclingmärkte. Da es aber vorwiegend am Ende von Produktlebenszyklen und den Aktivitäten des Entsorgungssektors ansetzt, ist seine Wirkung auf die Senkung der gesamtwirtschaftlichen Ressourcenverbrauch begrenzt.

Deshalb wurde die Betrachtung auf die der Entsorgung vorgelagerten Phasen des Produktlebenszyklus wie Design, Rohstoffbereitstellung, Produktion, Logistik und Nutzung sowie auf die Steigerung der Ressourceneffizienz¹ entlang der gesamten Wertschöpfungskette ausgeweitet (Müller et al., 2020). Im Zentrum von Ressourceneffizienzpolitik steht neben einer synergetischen Beziehung von Ökologie und Ökonomie ein universalistischer Leitgedanke: Die globalen natürlichen Ressourcen sind begrenzt und die Nutzungsrechte für jeden einzelnen Menschen daran gleich, woraus sich für Industrieländer das Ziel der Senkung des gesamtwirtschaftlichen Ressourcenfußabdrucks auf ein global verallgemeinerbares Niveau ableitet. Dieser Ansatz spiegelt sich im Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa (EU Kommission, 2011) und den Deutschen Ressourceneffizienzprogrammen (ProgRess I-III) (BMUV, 2020) wider. Zu Grunde liegt ein weites Verständnis natürlicher Ressourcen², das in der Praxis allerdings häufig auf eine aggregierte Massenbetrachtung von Primärrohstoffen verengt wird.

Die beiden Kreislaufwirtschafts-Aktionspläne der EU (EU Kommission, 2015, 2020) und schließlich die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) (BMUV, 2024) knüpfen mit ihrer Perspektive auf die natürlichen Ressourcen, Materialflüsse und ihren Leitgedanken an die Ressourceneffizienzdebatte an und stellen das Wirtschaften nach Kreislaufprinzipien als handlungsleitendes Paradigma in den Mittelpunkt. Die NKWS verfolgt das Leitbild der Senkung des Primärrohstoffverbrauchs und drei Ziele: Stoffkreisläufe schließen, Rohstoffversorgungssicherheit und Rohstoffsoveränität erhöhen sowie Abfälle vermeiden.

Von der Umweltpolitik ins Zentrum wirtschaftspolitischer Strategien

Damit vollzog sich auch ein Wandel von einem Umweltpolitikfeld hin zu einem horizontalen Politikfeld im Zentrum übergeordneter wirtschaftspolitischer Strategien: Während ProgRess I noch an eine von sieben thematischen Strategien des 6. Umweltaktionsprogramm der EU anknüpfte, setzte der spätere „Fahrplan für ein ressourcenschonendes Europa“ eine von sieben Leitinitiativen der zentralen, ressortübergreifenden EU 2020 Strategie für „intelligentes, nachhaltiges und integratives Wachstum“ um. Zirkuläres Wirtschaften ist ein Kernansatz des Europäischen Grünen Deals, der eine von sechs Prioritäten der EU-Kommission 2019-2024 darstellte. Unter den sieben Prioritäten der neuen EU-Kommission seit 2024 findet sich „ein neuer Plan für nachhaltigen Wohlstand und Wettbewerbsfähigkeit in Europa“, der von einem „Kompass für Wettbewerbsfähigkeit“ angeleitet wird und unter anderem auf „eine stärker kreislaforientierte und krisenfestere Wirtschaft“ und einen „Deal für eine Saubere Industrie“ abzielt. Letzterer nennt „Zirkularität“ explizit als Priorität, vor allem um die begrenzten Ressourcen der EU maximal zu nutzen, Abhängigkeiten zu reduzieren und die Resilienz zu steigern, aber auch um Abfall zu reduzieren, Produktionskosten zu senken, das Klima zu schützen und so ein nachhaltigeres, wettbewerbsfähiges Industriemodell zu schaffen (EU

¹ Effizienz ist das Verhältnis eines bestimmten Nutzens oder Ergebnisses zum dafür notwendigen Aufwand. Ressourceneffizienz ist eine von mehreren Strategien zur Senkung der Ressourceninanspruchnahme durch einen geringeren Ressourcen- und Rohstoffeinsatz in der Wirtschaft (Kosmol et al., 2012).

² Als natürliche Ressource wird ein Mittel bezeichnet, das in einem Prozess genutzt wird oder genutzt werden kann und Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen Primärrohstoffe, Fläche, Wasser, Boden, Luft, strömende Ressourcen und Biodiversität (Kosmol et al., 2012).

Kommission, 2025a). Der „Kompass für Wettbewerbsfähigkeit“ stellt die Bedeutung von Ressourceneffizienz und zirkulärer Materialnutzung für Dekarbonisierung, Wettbewerbsfähigkeit und ökonomische Sicherheit heraus (EU Kommission, 2025b).

Von der Abfallhierarchie und den „3R“ zu den „10R“

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen hat vorgeschlagen, die bisherige im Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, 2012) verankerte fünfstufige Abfallhierarchie³ durch zwei höhere Ebenen, die Produktgestaltung und die Verringerung der Rohstoffnutzung zu ergänzen (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2020). Diese „Kreislaufwirtschaftshierarchie“ stärkt die bereits in der Abfallhierarchie sowie den international gebräuchlichen „3R“ (Ghisellini et al., 2016) angelegten Perspektiven auf Produkte (Vorbereitung zur Wiederverwendung, Reuse) und suffizientere Konsummuster (Abfallvermeidung, reduce - reduzieren). Mit der Erweiterung zu den „10R“ durch die niederländische Umweltagentur PBL wurde der Suffizienz⁴-Gedanke gestärkt (refuse – ablehnen), Strategien für die Wiederverwendung von Produkten spezifiziert (s. Abbildung 14), der Blick auf Geschäftsmodelle geweitet, beispielsweise ein größeres Angebot an Reparatur-Services (repair) oder Sharing (rethink) oder die Verwendung gebrauchter Bauteile in der industriellen Produktion (remanufacture) (Potting et al., 2017).

Von der Nutzung zur Wiederherstellung biologischer Kreisläufe

Die Substitution von abiotischen durch biogene Rohstoffe ist eine Konsistenz-Strategie⁵, die dem Modell der Ellen MacArthur Foundation und Cradle-to-Cradle folgend darauf abzielt, die Nutzung jener Rohstoffe zu reduzieren, die auch in sogenannten technischen Kreisläufen mit der Zeit unwiederbringlich verloren gehen, da sie nicht in sogenannten biologischen Kreisläufen geführt werden können (Ellen MacArthur Foundation, 2013). Technische Kreisläufe seien „Kreisläufe innerhalb des sozialen Systems, durch die Ressourcen genutzt, wiedergewonnen, wiederhergestellt und im Rahmen bestehender oder neuer Lösungen verwendet werden“ (ISO 59004, 2024, S. 4). Biologische Kreisläufe seien „Kreisläufe, durch die biologische Nährstoffe von lebenden Organismen genutzt und anschließend in oder innerhalb der Biosphäre auf eine Weise wiederhergestellt werden, die die Widerstandsfähigkeit des Ökosystems und das Naturkapital wiederherstellt und das Nachwachsen erneuerbarer Ressourcen ermöglicht“ (ISO 59004, 2024, S. 4). Zirkuläres Wirtschaften mit Hilfe biogener Rohstoffe ist auf die Funktionsfähigkeit von natürlichen Kreisläufen und Ökosystemen angewiesen. Daher wird eine weitere „R“-Strategie vorgeschlagen – „Regenerate“ (Circle Economy, 2023; Ellen MacArthur Foundation, 2021). Sie soll der Störung biogeochemischer Kreisläufe und dem Artenverlust durch geringere Biomasse-Entnahmeraten und Einträge von umweltschädigenden Stoffen, wie Stickstoff- und Phosphorverbindungen, entgegen wirken (Friant et al., 2023). Zusätzlich sorgen Aktivitäten zur Wiederherstellung und Verbesserung natürlicher Systeme dafür, dass Rohstoffe für die Bioökonomie langfristig zur Verfügung stehen.

Von der Circular Economy zur Circular Society

Das Konzept Circular Society bezieht sich auf das Zusammenspiel biogeochemischer, ökologischer und materieller Kreisläufe mit „sozialen Kreisläufen“, womit politische Macht, Finanzflüsse, Wissens- und Informationsflüsse sowie Fürsorge und soziale Netzwerke gemeint sind (Friant et al., 2023; Systemiq & The Club of Rome, 2020; Zwiers et al., 2020). Die soziale Dimension der Nachhaltigkeit und das Ziel der Sicherung der Lebensqualität aller Menschen

³ Vermeidung von Abfällen, Vorbereitung zur Wiederverwendung von Abfällen, Recycling von Abfällen, Sonstige Verwertung von Abfällen, Beseitigung von Abfällen. (KrWG, 2012)

⁴ Suffizienz ist eine von mehreren Strategien zur Senkung der Ressourceninanspruchnahme durch Verringerung der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen (Kosmol et al., 2012).

⁵ Konsistenz ist eine von mehreren Strategien zur Senkung der Ressourceninanspruchnahme durch Einbettung von Wirtschaftsprozessen in natürliche Stoffkreisläufe (Kosmol et al., 2012).

werden stärker betont: Das Engagement, die Beteiligung und die Circular Literacy vielfältiger Akteursgruppen sind entscheidend für den Erfolg einer Circular Economy (Jaeger-Erben et al., 2021). Einerseits werden so von Änderungen Betroffene in Diskussionen über Maßnahmen und deren akzeptable soziale und ökonomische Auswirkungen einbezogen. Andererseits können erforderliche Anstrengungen wie Reparieren und Teilen erfolgreich und in großem Maße umgesetzt werden.

„Sharing“ und „Prosuming“ (Produkte gemeinsam nutzen und selbst produzieren), ermöglichen die stärkere gesellschaftliche Integration auch von sozial benachteiligten Bevölkerungsgruppen. Die zunehmende Vernetzung, z. B. durch solidarische Landwirtschaft und lokale Nachbarschaftstreffs als Orte für nachhaltigen Konsum (H. Wolf et al., 2021), tragen dabei nicht nur zur effizienteren Nutzung von Ressourcen bei, sondern bilden Raum für soziale Interaktionen. Jenseits klassischer Verwertungslogiken können in Frei- und Experimentierräumen die Innovativität und Kreativität einer Gesellschaft gefördert und erprobt werden. Indem verschiedene Lösungen ausprobiert werden, wird nicht nur die Befähigung zum Zirkulären Wirtschaften gestärkt und Selbstwirksamkeit erfahren, sondern insbesondere die Fähigkeit erhöht, neuen Herausforderungen proaktiv begegnen zu können (Hofmann et al., 2019).

1.2 Wo wollen wir hin? Ziele des Papiers und Vorgehen

Dieser kurze Abriss der Kernideen, Modelle und Konzepte Zirkulären Wirtschaftens verdeutlicht dessen viele Facetten, dessen thematische Breite, dessen große Ambition und dessen oftmals unklare Konturen. Vor diesem Hintergrund zielt der folgende Diskussionsbeitrag aus dem Umweltbundesamt darauf ab, dieses Querschnittsthema zu reflektieren, zu strukturieren und einzuordnen, um argumentativ „große Hebel“ einer Transformation des Wirtschaftssystems in Richtung Zirkularität zu identifizieren und zu beschreiben. Mit den Hebeln will dieses Papier zum Schließen einer Lücke beitragen, die aus Sicht der Autorenschaft symptomatisch für die Debatten um Ressourceneffizienz und Zirkuläres Wirtschaften ist: Es fehlt eine systematische Verbindung zwischen ambitionierten gesamtwirtschaftlichen Zielen, etwa zur absoluten Reduktion der Primärrohstoffnutzung, und den programmatischen Handlungsansätzen. Wo, liegen die großen Potentiale zur Erreichung der Ziele durch Steigerung der Zirkularität?

In Kapitel 2 erläutern wir den Zusammenhang zwischen aktuellen ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Herausforderungen und der Linearität von Materialflüssen. Daraufhin beschreiben wir in Kapitel 3, was Zirkularität bedeutet und wie es zur Bewältigung der beschriebenen Herausforderungen beitragen kann. Dieser Einordnung folgend entwerfen wir in Kapitel 4 ein Zielsystem zur Ableitung von großen Hebeln Zirkulären Wirtschaftens, welches in den folgenden Kapiteln umgesetzt wird: In Kapitel 5 beschreiben wir mögliche Ziele, die begründen, warum Zirkuläres Wirtschaften verfolgt werden sollte. In Kapitel 6 setzen wir uns mit den unterschiedlichen Facetten Zirkulären Wirtschaftens auseinander und schlagen wesentliche Strategien vor. In Kapitel 7 stellen wir vor, wie und an welchen Stellen des Wirtschaftssystems diese Zirkularitätsstrategien angewendet werden können, um substantielle Beiträge zu den Zielen zu leisten. Diese großen Hebel werden aus vier sich ergänzenden Perspektiven (Material, Produktion, Produkt, Bedürfnisfeld) abgeleitet, um das Produktions- und Konsumsystem möglichst lückenlos zu betrachten und verschiedene Akteure*Akteurinnen entlang von Wertschöpfungsketten anzusprechen. Wie die Hebel aus einer Ressortperspektive in Bewegung gesetzt werden können, stellen wir in Kapitel 8 für die Produktions- und Konsumsysteme „Landwirtschaft und Ernährung“, „Bauen und Wohnen“ und „Fahrzeugproduktion und Mobilität von Personen“ beispielhaft dar. In Kapitel 9 geben wir einen Ausblick auf weiterführende Arbeiten des Umweltbundesamts.

2 Gesellschaftliche Herausforderungen im Kontext von Rohstoffnutzung

2.1 Dreifache planetare Krise

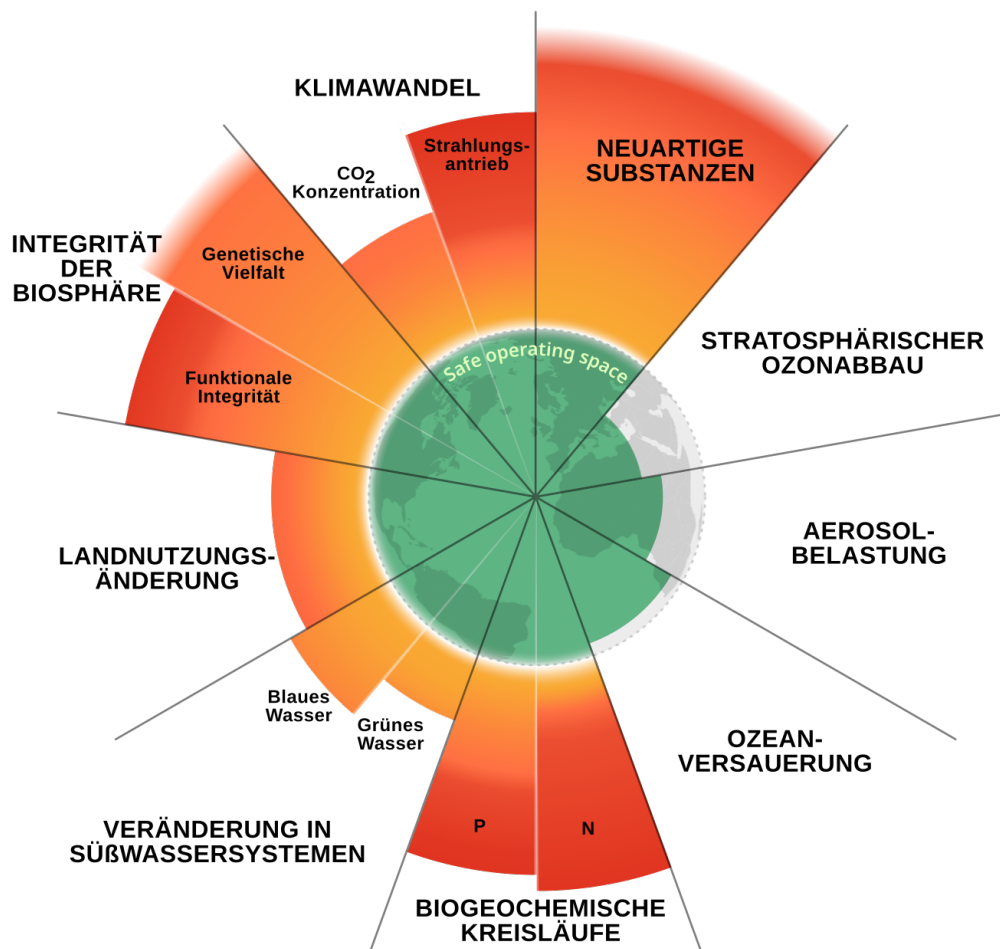
Mehr als 50 Jahre nach der ersten Konferenz der Vereinten Nationen über die menschliche Umwelt in Stockholm und der Veröffentlichung des Berichts "Die Grenzen des Wachstums" durch den Club of Rome befindet sich die Welt in einer dreifachen planetaren Krise (Club of Rome, 2000; UNEP, 2022). Die miteinander verknüpften und kaskadenartigen Auswirkungen des Klimawandels, des Verlusts der biologischen Vielfalt und der Umweltverschmutzung sind eine große Herausforderung für wirtschaftliche Entwicklung und Stabilität, Gesundheit sowie das Wohlergehen und den Wohlstand heutiger und künftiger Generationen. Abbildung 1 zeigt, dass bereits sechs der derzeit neun definierten Planetaren Grenzen überschritten sind, verbunden mit dem Risiko, abrupte und irreversible Veränderungen im Erdsystem hervorzurufen und einen sicheren Handlungsraum für die Menschheit verlassen zu haben (Richardson et al., 2023).⁶

Nahezu 75 % der Landfläche und etwa 66 % der Meeresumwelt durch menschliches Handeln erheblich verändert; die Bodendegradation hat die Produktivität der weltweiten Landfläche um 23 % verringert (IPBES, 2019).

Die vorherrschenden Konsum- und Produktionsmuster und der daraus resultierende hohe Rohstoffbedarf gefährden zunehmend die natürlichen Lebensgrundlagen. Die Entnahme und Weiterverarbeitung von Rohstoffen (Metalle, nicht-metallische Mineralien, fossile und biotische Rohstoffe) tragen mehr als 60 % zu den globalen Treibhausgasemissionen und rund 40 % zur Luftverschmutzung bei (UNEP IRP, 2024). 90 % des weltweiten Verlusts an biologischer Vielfalt und des globalen Wasserstress werden auf die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen, vor allem Biomasse aus der Land- und Forstwirtschaft, zurückgeführt (Ellen MacArthur Foundation, 2021; Kurth et al., 2021; UNEP IRP, 2024). Seit dem Zweiten Weltkrieg, dem Beginn des „Zeitalters der großen Beschleunigung“ (Head et al., 2022), ist die globale Rohstoffentnahme, wie viele andere sozioökonomische und ökologische Kennzahlen, exponentiell angewachsen. Der Pro-Kopf-Fußabdruck⁷ lag 1970 noch bei ca. 8,5 Tonnen im globalen Durchschnitt und liegt inzwischen bei 12,8 Tonnen (UNEP IRP, 2023). Szenarioberechnungen zu Folge könnte die globale Rohstoffinanspruchnahme bis 2060 von derzeit ca. 103 Milliarden Tonnen auf bis zu 190 Milliarden Tonnen pro Jahr ansteigen, wobei absehbare Effizienzsteigerungen, Recycling und technologischer Wandel schon berücksichtigt sind (OECD, 2019; UNEP IRP, 2024). Wesentlicher Treiber für die globale Zunahme der Rohstoffbedarfs war bis in die 1980er Jahre die rohstoff- und energieintensive Wohlstandsentwicklung der frühindustrialisierten Länder mit hohem Einkommen, wie z. B. Deutschland. Seit den 1990er Jahren steigt der Rohstoffbedarf durch die rasante, aufholende Entwicklung der Länder mit mittleren Einkommen, das Bevölkerungswachstum sowie zunehmende Urbanisierung (UNEP IRP, 2024).

⁶ Diese Grenzen definieren den sicheren Handlungsspielraum für die Menschheit in Bezug auf das Erdsystem. Sie sind mit den biophysikalischen und biochemischen Systemen und Prozessen verbunden, die als relevant für die Stabilität und die Resilienz der Erde als System betrachtet werden. Bei einigen Prozessen werden Kippunkte berücksichtigt, bei denen ein Überschreiten bestimmter Schwellenwerte abrupte und unumkehrbare Veränderungen hervorrufen würde. Die planetaren Grenzen sind so gezogen, dass nach derzeitigem Wissensstand nur eine sehr geringe Wahrscheinlichkeit besteht, diese Kippunkte zu überschreiten (siehe Rockström et al., 2009).

⁷ Der „Rohstofffußabdruck“ eines Landes setzt sich zusammen aus der inländischen Primärrohstoffentnahme und den Importen abzüglich der Primärrohstoffe, die für die Herstellung exportierter Güter verwendet werden. Bei globaler Betrachtung entspricht der Rohstofffußabdruck der globalen Primärrohstoffentnahme eines Jahres im Verhältnis zur Weltbevölkerung, da Handelsströme entfallen.

Abbildung 1: Überschreitung planetarer Grenzen

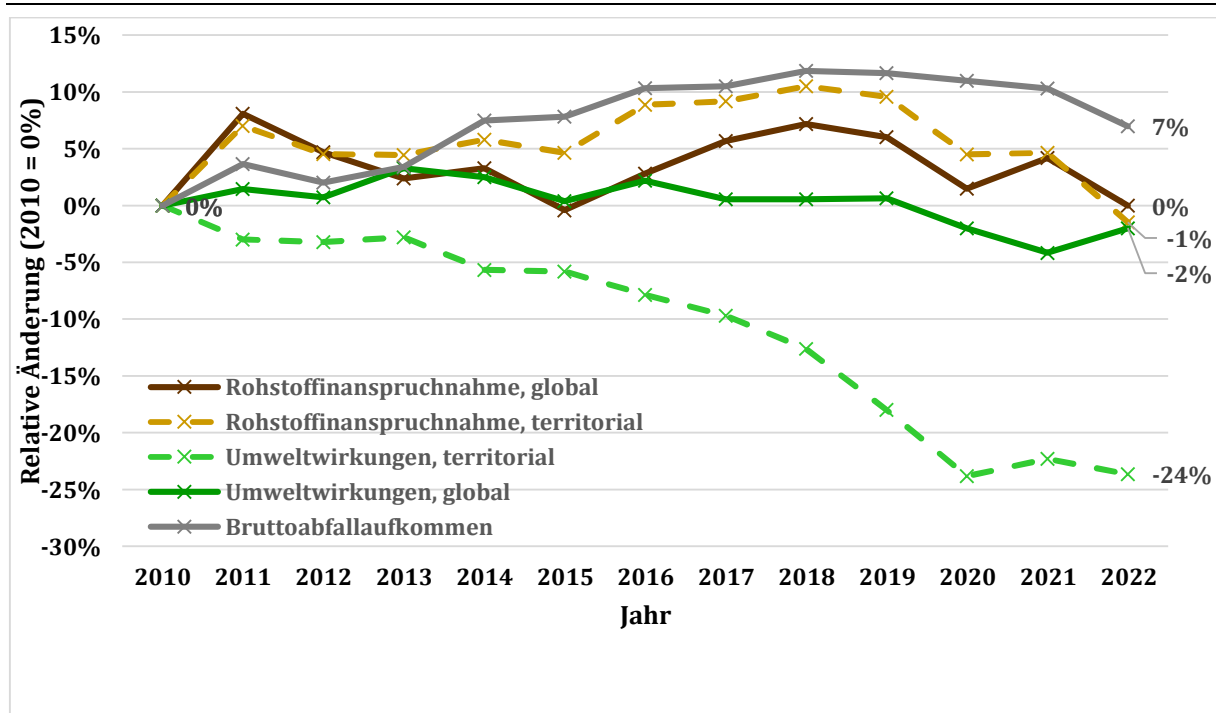
Quelle: DeWikiMan basierend auf (Richardson et al., 2023),
CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=154926410>

Deutschland ist als wirtschaftsstarkes Industrieland intensiv in den globalen Handel eingebettet. Ein beträchtlicher Teil der Umweltinanspruchnahmen von Produktion und Konsum in Deutschland findet in zunehmendem Maße im Ausland statt: Die inländische Extraktion von Rohstoffen hat seit 2010 zwar um 1 % abgenommen. Gleichzeitig stagnierte jedoch der Rohstofffußabdruck des Konsums, was auf eine Verlagerung von Primärrohstoffentnahme und -verarbeitung ins Ausland hinweist (Abbildung 2, hellbraun, dunkelbraun). Ein noch deutlicheres Bild zeigt sich bei den mit dem deutschen Konsum verbundenen Umweltwirkungen, gemessen mit dem „Consumption Footprint“⁸: Während die territorialen Umweltwirkungen seit 2010 um 24 % gesunken sind, ist der Umweltfußabdruck im gleichen Zeitraum nur um 2 % gesunken (Abbildung 2, hellgrün, dunkelgrün), was eine Verlagerung von Umweltwirkungen in andere Länder anzeigt. Gleichzeitig ist auch das Bruttoabfallaufkommen, einschließlich gefährlicher Abfälle, um ca. 7 % angestiegen (Abbildung 2, grau). Daraus folgt: Wenn wir in Deutschland unsere derzeitige Art des Produzierens und Konsumierens ändern, können wir zur Lösung der dreifachen planetaren Krise aus Klimawandel, Verlust der

⁸ Die Indikatoren des JRC aggregieren 16 Umweltwirkungen, welche auf Ökobilanzierungen basieren. Es werden insgesamt 16 Umweltwirkungen wie z. B. Klimawandel, Feinstaubbelastung, Landnutzung etc. berücksichtigt. Die Konsumintensitäten werden auf der Grundlage von Verbrauchsstatistiken berechnet. Es werden fünf Bereiche des Verbrauchs erfasst: Lebensmittel, Mobilität, Wohnen, Geräte und Gebrauchsgüter.

biologischen Vielfalt und Umweltverschmutzung und einer gerechteren Lastenverteilung beitragen.

Abbildung 2: Rohstoffinanspruchnahme, Umweltwirkungen und Abfallaufkommen für Deutschland im Zeitverlauf (2010-2022).



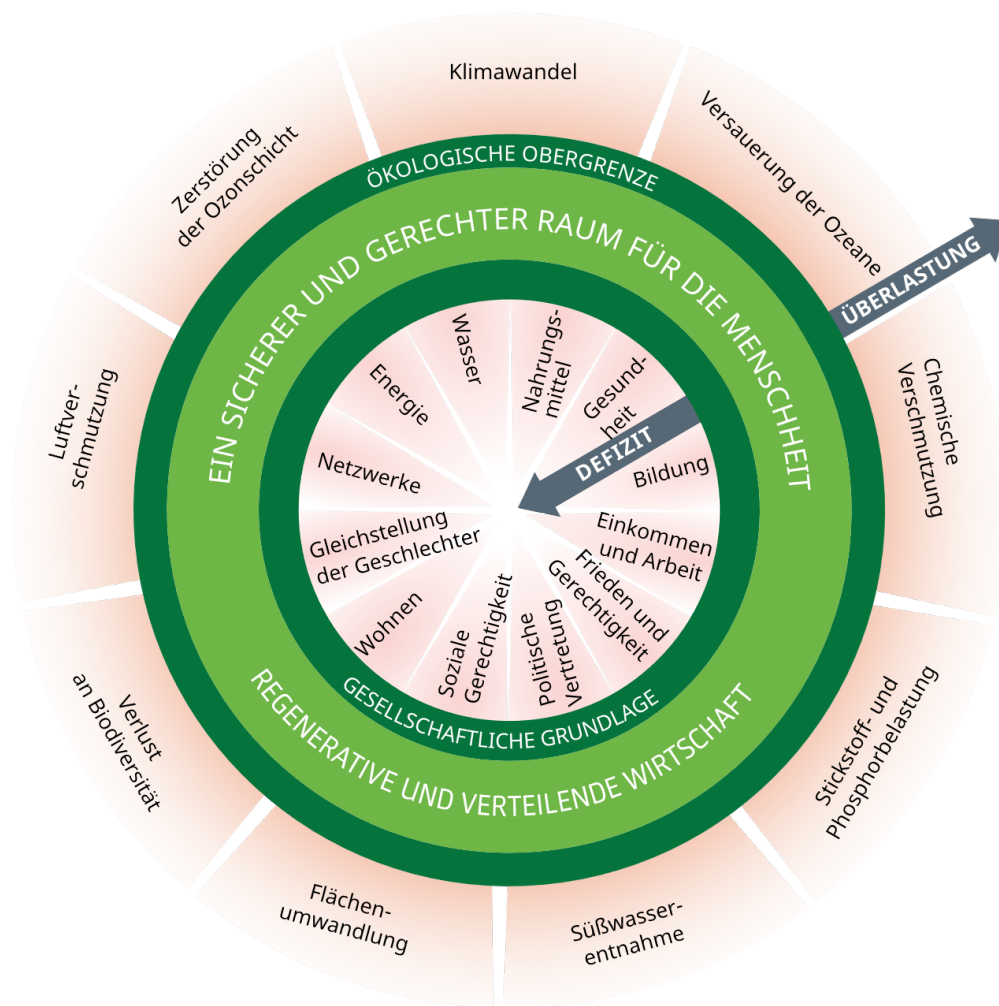
Quellen: Eigene Abbildung basierend auf (Europäische Kommission, 2024a; Eurostat, 2025b; Sanyé Mengual, E. & Sala, S., 2023; UBA, 2023a)

2.2 Soziale Krisenherde

Angesichts von schweren Konflikten, Pandemien wie COVID-19, Auswirkungen des Klimawandels und wirtschaftlicher Instabilität rückt die Erreichung der Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals, SDG) bis 2030 in immer weitere Ferne. Weniger als ein Fünftel der Ziele werden voraussichtlich erreicht. Im Jahr 2022 lebten 23 Millionen Menschen mehr in extremer Armut und über 100 Millionen mehr Menschen hungerten als noch in 2019. Die Anzahl der Menschen ohne Elektrizität stieg nach Jahren wieder. Die Einkommensschere zwischen armen und reichen Ländern wird immer größer (UN, 2024b). Das Konzept der „Doughnut-Ökonomie“ nach Raworth ergänzt das Konzept der nicht zu überschreitenden „Planetaren Grenzen“ (siehe 2.1) um sozioökonomische Untergrenzen, die für einen angemessenen Lebensstandard nicht unterschritten werden dürfen (Abbildung 3). Zwischen den Grenzen spannt sich der doughnutförmige sichere und gerechte Raum für die Menschheit auf.

Vor allem im globalen Kontext stehen neben den ökologischen Wirkungen (2.1) auch soziale Fragen von Verteilungsgerechtigkeit und Menschenrechten in engem Zusammenhang mit der Rohstoffinanspruchnahme.

Der primäre Wirtschaftssektor steht häufiger im Zusammenhang mit Menschenrechtsverletzungen als andere Wirtschaftssektoren. 74 % der verzeichneten Gerichtsverfahren gegen Unternehmen entfallen auf Unternehmen, die Metallerze, andere Mineralien und Kohle abbauen, Erdöl und Erdgas fördern, Biomasse anbauen und ernten oder entnehmen ((Business & Human Rights Resource Centre, 2025) Stand 11.6.2025).

Abbildung 3: Der durch planetare Ober- und soziale Untergrenzen definierte Doughnut.

Quelle: Wano2011, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=127173501>, basierend auf (Raworth, 2017).

Die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung trug nur etwa 25 % zur weltweiten Wertschöpfung bei, wobei ca. 50 % der weltweit Beschäftigten in der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung, insbesondere in der Landwirtschaft, tätig sind (UNEP IRP, 2024). Entlang der Wertschöpfungskette sinkt in der Regel die Umweltbelastung und steigt die Wertschöpfung, sodass Länder mit hohem Primärproduktionsanteil und wenig weiterverarbeitender Industrie größere Umweltschäden verzeichnen und dabei nur wenig Einkommen erzielen (Clift & Wright, 2000; Dorninger et al., 2021; Hickel et al., 2022). Diese ungleiche Verteilung von Nutzen und Lasten industrieller Produktion trifft auf viele Branchen in Deutschland zu, von metallverarbeitenden Industrien, Automobil-, Maschinenbau- und Elektronikindustrie über Chemieindustrie bis zur lebensmittelverarbeitenden Industrie und dem Bausektor. Die negativen Umweltwirkungen betreffen vor allem das Abfallaufkommen, die Flächeninanspruchnahme und den Wasserverbrauch (Grüning & Jungmichel, 2025; Strasser et al., 2025).

Gleichzeitig unterscheidet sich der Rohstoffbedarf im globalen Vergleich deutlich. Der Pro-Kopf-Rohstofffußabdruck ist in Ländern mit hohem Einkommen ca. 13 Mal höher als in Ländern mit geringem Einkommen (Oberle et al., 2019). In Deutschland lag er 2022 bei 15,7 Tonnen pro Kopf (Eurostat, 2025b)⁹. Bei den Niedrigeinkommensländern ist die Steigerung des Rohstoffbedarfs bis zu einem gewissen Grad eine Voraussetzung zur Armutsbekämpfung und notwendig für eine Erreichung eines angemessenen Lebensstandards (Akenji & Bengtsson, 2014; Vélez-Henao & Pauliuk, 2023).

Auch innerhalb Deutschlands ist die Rohstoffinanspruchnahme ungleich verteilt. Wohlhabende Haushalte haben einen dreimal größeren Rohstofffußabdruck als ärmere Haushalte. Demzufolge kann durch ökonomische Anreize besonders der Rohstofffußabdruck für Luxusgüter, z. B. in den Bereichen Freizeit und Individualverkehr, gesenkt werden (Pothen & Tovar Reaños, 2018). Eine höhere Belastung ärmerer Haushalte trägt hingegen weniger zur Reduktion der Rohstoffnutzung bei und kann bestehende Ungleichheiten verschärfen.

Ohne Ausgleichsinstrumente und regionalpolitische Investitionen können sich Spannungen in der Gesellschaft verstärken und das Vertrauen in demokratische Institutionen abnehmen (Denk & Siebert, 2024; Gold & Lehr, 2024). In diesem Lichte zeichnet sich, auch in Kombination mit der beschriebenen planetaren Krise, in Deutschland die Gefahr einer gesellschaftlichen Polarisierung ab: Modernisierungsbefürworter stehen Modernisierungsskeptikern zunehmend unversöhnlich gegenüber (Vehrkamp, 2025).

2.3 Neue geopolitische Realitäten

Hinzu kommen geo- und sicherheitspolitische Umbrüche. Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine, die sich verschärfende Rivalität zwischen China und den USA, die seit Anfang 2025 in Frage gestellte Sicherheitsgarantie der USA für Europa sowie die erratische Zollpolitik der Trump-Administration haben dazu geführt, dass aktuell gesellschaftliche Ziele wie Sicherheit, Wettbewerbsfähigkeit, Resilienz und wirtschaftliche Souveränität ganz oben auf der politischen Agenda stehen, die seit 2019 eher von Nachhaltigkeitsthemen dominiert wurde (Bundesregierung, 2025; EU Kommission, 2025b, 2025a).

Die liberale Demokratie wird zunehmend durch autokratische Herrschaftssysteme und libertäre, staatsfeindliche Ideen angegriffen. Multilaterale Zusammenarbeit, basierend auf gemeinsamen Werten oder zumindest gemeinsamen Interessen, wird zunehmend durch bilaterale, transaktionale Deals ersetzt. Der zwischenstaatliche Umgangston wird rauer. (WBGU, 2025) Im Lichte des verschärften globalen Wettbewerbs und der zunehmenden Dominanz Chinas steht zudem das in Deutschland über Jahrzehnte erfolgreiche Wirtschaftsmodell „Exportweltmeister“ zunehmend unter Druck, mit entsprechenden Gefahren für den Wohlstand in Deutschland (Shawkat et al., 2025).

In diesem Kontext stellt sich die Frage, wie Deutschland und Europa resilienter werden können. Resilienz ist die Fähigkeit, externe Störungen so zu verkraften, dass ihre wesentlichen Systemfunktionen erhalten bleiben (Ginzky et al., 2020). Diese Frage wird unter anderem mit einer sicheren Versorgung der Wirtschaft mit kritischen und strategischen Rohstoffen zur Sicherung der Wettbewerbsfähigkeit beantwortet. Die Debatte, die in Deutschland und der EU seit mindestens 2010 geführt wird, hat durch die Verabschiedung des EU-Gesetzes zu kritischen Rohstoffen (CRMA, 2024) nochmals enormen Auftrieb erfahren.

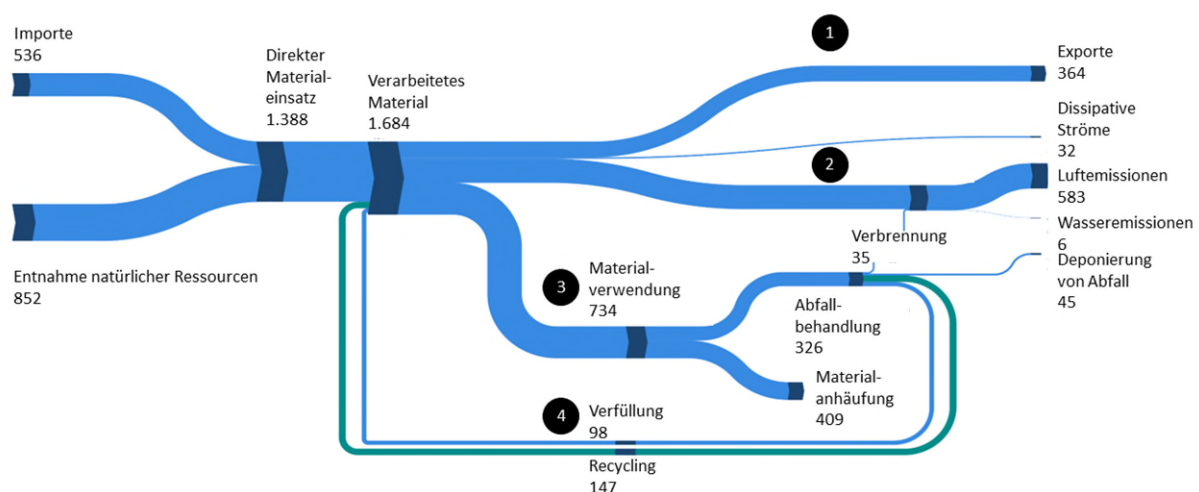
⁹ In der Literatur sind unterschiedliche Angaben zum Rohstofffußabdruck Deutschlands zu finden. Das Statistische Bundesamt gibt diesen für das Jahr 2021 mit 15,3 t pro Person an (Destatis, 2023a Tabelle 85132-13), die Datenbank des International Resource Panel nennt 19,6 t pro Person (UNEP IRP, 2023). Die Unterschiede sind methodisch begründet. Für weitere Informationen siehe (SRU, 2020, S. 116).

Bei „kritischen Rohstoffen“ sind vor allem die hohe Importabhängigkeit der EU-Wirtschaft von nur wenigen, teils politisch instabilen Produzentenländern und die daraus resultierenden Versorgungsrisiken problematisch (CRMA, 2024). Diese bezieht sich nicht nur auf Rohstoffe, sondern auch auf weiterverarbeitete Materialien und Produkte, wie z. B. Photovoltaikmodule. Als „strategische Rohstoffe“ werden Rohstoffe bezeichnet, bei denen das Angebot wahrscheinlich nicht mit der wachsenden Nachfrage durch die grüne und digitale Transformation sowie Verteidigung Schritt halten kann (JRC, 2023; CRMA, 2024). Für den Ausbau von Hochtechnologien wird in Deutschland, der EU, aber auch in anderen Ländern mit höherem Einkommen ein stark steigender Bedarf an Technologierohstoffen erwartet, der bei einigen Rohstoffen ein Vielfaches der heutigen Produktionsmengen ausmacht (Marscheider-Weidemann et al., 2021).

2.4 Lineares Wirtschaften ist Kern vieler Probleme

In den vorangegangenen Abschnitten wurde dargestellt, dass die Rohstoffnutzung mit ökologischen, sozialen und wirtschaftlichen Herausforderungen zusammenhängt. Problematisch sind dabei Materialverluste, die in großen Mengen erfolgen, umwelt- und gesundheitsschädlich und/oder wichtig für die deutsche und europäische Wirtschaft sind und die es deshalb zu vermeiden gilt. Die Autorenschaft versteht unter „Material“ ein Stoff oder Stoffgemisch, von einfacheren Stoffen wie Elementen (z. B. Kohlenstoff) und Molekülen (z. B. Kohlenstoffdioxid) bis hin zu komplexeren Stoffen wie Rohstoffen (z. B. Erdöl) und Rohmaterialien (z. B. Kunststoffe). Sie werden auf Grund ihrer Eigenschaften für Produktionsprozesse ausgewählt (Kosmol et al., 2012; UNEP IRP, 2024). Verluste können in Form von Abfällen, Emissionen und Dissipationen, wie z. B. unwiederbringliche Verluste durch Korrosion und Abrieb, auftreten. Verluste von Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid, Methan oder anderen Klimagasen tragen zum Klimawandel bei, Stickstoff- und Phosphorauswaschungen zu Versauerung und Eutrophierung und Ewigkeitschemikalien zu einer dauerhaften Verschmutzung der Umwelt.

Abbildung 4: Lineare und zirkuläre Materialflüsse in Deutschland, 2023, in Millionen Tonnen



Quelle: (Eurostat, 2025a)

Der „industrielle Metabolismus“ Deutschlands weist aktuell große Materialverluste auf, ist also größtenteils linear. Abbildung 4 zeigt auf der rechten Seite bedeutende lineare Ströme: Im Jahr 2023 sind 621 Millionen Tonnen an Materialien als Emissionen oder dissipative Verluste und 45 Millionen Tonnen als deponierte Abfälle verloren gegangen. Welche Merkmale des

Metabolismus Deutschlands sich auf Art und Menge der Rohstoffinanspruchnahme und auf lineare Materialflüsse auswirken und eng mit den beschriebenen Herausforderungen verbunden sind, wird im Folgenden dargelegt und anhand der Punkte 1-4 in Abbildung 4 veranschaulicht.

1) Die Produktion in Deutschland ist ressourcenintensiv und zu einem großen Teil für den Export bestimmt (z. B. Autos, Maschinen, Chemieprodukte). Deutschlands Metabolismus hat einen großen Materialdurchfluss und ist von hohem Außenhandelsanteil gekennzeichnet. Das wird deutlich, wenn man die in Abbildung 4 dargestellten direkten Materialflüsse um indirekte Flüsse ergänzt und in Rohstoffäquivalenten misst. Das physische Handelsvolumen vergrößert sich dann etwa um den Faktor drei. Das rührt daher, dass Deutschland eine hohe Nachfrage nach Metallen aufweist, bei deren Gewinnung im Bergbau große Mengen Erz bewegt werden (UBA, 2022). Da Produktions- und Konsumsysteme in anderen Ländern auch überwiegend linear wirtschaften, geht mit dieser Ausrichtung Verantwortung einher, sowohl für importierte Rohstoffe und Vorprodukte als auch für die Verwendung und Verwertung der Exportgüter im Ausland.

2) Große Materialverluste in Form von Luftemissionen entstehen durch die energetische Nutzung fossiler und biotischer Rohstoffe. Die Atmosphäre und die Ozeane werden gewissermaßen als Abfalldeponie für Klimagase genutzt. So gesehen ist lineares Wirtschaften eine wesentliche Ursache der Klimakrise (Circle Economy, 2025; WWF, 2023). Die Umsetzung der Klimaziele Deutschlands wird zu einer Verringerung des Verbrauchs und der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen wie Kohle und Gas führen. Dieser Rückgang wird massenmäßig voraussichtlich deutlich über dem zusätzlichen Materialbedarf für den Umbau des Energiesystems liegen (Dittrich et al., 2018). Gleiches ist in Summe für die globale Energiewende zu erwarten, trotz teils enormer, aber temporärer Bedarfszuwächse bei einigen sogenannten „Transformations-Mineralien“ (Nijmens et al., 2023). Auch die Energiewende bedarf eines effizienten und möglichst zirkulären Einsatzes von Rohstoffen.

Mengenmäßig kleinere Materialverluste, die kaum im großen Metabolismus auffallen, aber umweltschädlich sind, entstehen durch die ressourcenintensive Produktion landwirtschaftlicher Güter, sowohl im In- als auch im Ausland. Zu diesen Verlusten gehören Chemikalien (enthalten in synthetischen Mineraldüngern, Pflanzenschutzmitteln und Bioziden), Emissionen der Tierhaltung (Wirtschaftsdünger, Verdauung, Tierarzneimittel) und Kohlenstoffemissionen durch die Entwässerung von Mooren, intensive Bodenbearbeitung sowie Rodung von artenreichen Wäldern (FAO, 2020; UBA, 2024c). Außerdem geht Stickstoff verloren: So kommen 94 % des Luftschadstoffs Ammoniak (UBA, 2023b), 74 % des Treibhausgases Lachgas (UBA, 2024c) und 88 % der Nitratreinträge in das Grundwasser (Bach et al., 2020) in Deutschland aus der Landwirtschaft. Ein Drittel bis die Hälfte der Gesamteinträge von Phosphor in Oberflächengewässer entstehen durch Abschwemmung und Auswaschung von Phosphor aus landwirtschaftlichen Flächen (Arle et al., 2022).

3) Die Materialbestände Deutschlands, das „anthropogene Lager“ genannt, erfahren einen stetigen, hohen Zufluss. Ungefähr die Hälfte des jährlichen Materialeinsatzes¹⁰ fließt in die Erweiterung des volkswirtschaftlichen Materialbestands wie Bauwerke, Infrastrukturen, langlebige Konsum- und Investitionsgüter. Obgleich das Anwachsen verschiedener Lagerkompartimente zur Realisierung der transformatorischen Wenden erforderlich ist und eine Chance darin besteht, Materialien einer erneuten Verwendung zuzuführen, erfordert ein stetig anhaltender Nettobestandszuwachs immer mehr Energie und Materialien für die Instandhaltung und große Abfallströme sind im derzeitigen Wirtschaftssystem wahrscheinlich

¹⁰ DMC = Domestic Material Consumption; Indikator, der die direkt in ein ökonomisches System eingehenden Materialien, die innerhalb dieses Systems konsumiert werden mit ihrem Eigengewicht misst (siehe Kosmol et al., 2012)

(Circle Economy, 2025). Der Zufluss ist wesentlich gekennzeichnet durch inländisch entnommene Baumineralien.

Zu einem mengenmäßig kleineren Anteil wird das Lager aus langfristig genutzten Gütern gespeist. Die Entwicklung der Gebrauchsgüterausstattung deutscher Haushalte belegt dabei sehr eindrücklich, in welcher Weise und in welchem Ausmaß der Ressourcenbedarf durch Konsummuster geprägt wird: Egal ob Fahrzeuge, Unterhaltungselektronik, Informations- und Kommunikationstechnik oder elektrische Haushalts- und sonstige Geräte, überall zeigt sich über die Jahre ein teilweise erheblicher Anstieg der in den Haushalten vorhandenen Produkte, und zwar sowohl pro Haushalt als auch absolut (Destatis, 2024a). Dabei korreliert die Höhe dieser Anstiege nur teilweise mit dem Anstieg der Anzahl der Haushalte (von 36,7 Millionen in 1998 auf 40,6 Millionen in 2018). Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Anzahl vieler Gebrauchsgüter pro Haushalt angestiegen ist, obwohl die Anzahl der durchschnittlich in einem Haushalt lebenden Menschen im selben Zeitraum gesunken ist (Umweltbundesamt, 2024). Es teilen sich also immer weniger Menschen eine stetig wachsende Anzahl an Produkten. Somit werden erzielte Effizienzgewinne und Rohstoffeinsparungen durch Produktdesign teilweise zunichte gemacht.

4) Materialien werden zu einem kleinen Teil im Kreislauf geführt. Insgesamt beträgt der Anteil von Sekundärmaterialien am gesamten Materialeinsatz in Deutschland nur rund 13 % (Eurostat, 2023). Das Gesamtabfallaufkommen in Deutschland stagniert seit Jahrzehnten auf hohem Niveau bei im Mittel rund 403 Millionen Tonnen/Jahr, trotz der kontinuierlichen Fortschreibung des Abfallvermeidungsprogrammes des Bundes und der Länder und konkreter Bestrebungen zur Vermeidung verschiedener Abfallströme (Statistisches Bundesamt, 2025).

Bau- und Abbruchabfälle (inkl. Straßenaufbruch und Bodenaushub) haben dabei mit rund 216 Millionen Tonnen den größten Anteil (Statistisches Bundesamt, 2025). Allein auf Bodenaushub und Baggergut entfielen 2022 ca. 122 Millionen Tonnen, die maßgeblich im Rahmen von Erdbau- und Deponiemaßnahmen zu etwa 87 % verwertet werden, aber einer höherwertigen Verwertung wie der Gewinnung von Gesteinskörnungen für Recyclingbeton nur zu geringen Anteilen zur Verfügung stehen (Umweltbundesamt, 2025). Die Siedlungsabfallmenge stagniert seit einigen Jahren bei ca. 50 Millionen Tonnen pro Jahr (Statistisches Bundesamt, 2025). Aufgrund des Deponierungsverbots in 2005 sank die Deponierung unbehandelter Siedlungsabfälle rapide. Dies führte u. a. durch die Minderung von Methanemissionen aus Deponien insgesamt zu einer Reduktion von Treibhausgasemissionen und leistet damit einem wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz. Jedoch nahm das Recycling von Siedlungsabfällen nicht im gleichen Maße zu, sondern insbesondere die energetische Verwertung. Es existieren somit noch immer viele Materialnutzungen, an deren Ende eine energetische Verwertung steht. Somit muss der Bedarf für die ursprüngliche Nutzung weiterhin aus Primärmaterial gedeckt werden.

Auch Kunststoffabfälle werden in Deutschland nach wie vor mehr energetisch verwertet als recycelt. Der Anteil von Rezyklaten bei der Kunststoffverarbeitung lag 2021 bei 11,7 % (1,65 Millionen Tonnen) (Conversio, 2022). Damit geht Material für eine Kreislaufrückführung verloren und es werden weiterhin maßgeblich fossile Rohstoffe zur Deckung des Kunststoffbedarfes benötigt. Gründe für die Linearität von Kunststoffflüssen sind verschieden. An erster Stelle steht das Produktdesign, bei dem die Aspekte Recyclingfähigkeit und Rezyklateinsatz noch immer zu wenig Berücksichtigung finden. Insbesondere aus ökonomischen Gründen wird Primärkunststoffen der Vorzug gegeben. Der Recyclingfähigkeit stehen oftmals Stör- und Schadstoffe, der Einsatz von Verbundmaterialien oder auch die enorme Vielfalt an Kunststoffmaterialien mit unterschiedlichsten Eigenschaften entgegen (Conversio, 2022).

3 Zirkuläres Wirtschaften als Beitrag zur Bewältigung der Herausforderungen

3.1 Was verstehen wir unter Zirkulärem Wirtschaften?

Um zu verstehen, wie Zirkuläres Wirtschaften zur Bewältigung der in Kapitel 2 beschriebenen Herausforderungen beitragen kann, soll angesichts des nicht klar abgegrenzten Begriffs (vgl. Kapitel 1) und zahlreicher Definitionen in der Literatur (Kirchherr et al., 2023) zunächst geklärt werden, was von der Autorenschaft unter „Zirkulärem Wirtschaften“ verstanden wird. Wir schlagen eine Definition für „Zirkuläres Wirtschaften“ vor, die einerseits nicht auf den linearen Fluss „Abfälle“ limitiert ist und andererseits eindeutige Merkmale enthält. Ziel ist eine Definition, die weder zu eng noch zu breit ist und eine gute Basis für die Auswahl von Indikatoren und Politikempfehlungen sein kann (Moraga et al., 2019). Aus Sicht der Autorenschaft ist „Zirkuläres Wirtschaften“ durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

1) **Zirkularität.** Es ist nicht ausreichend, Zirkularität mit „Kreisläufen“ oder „zirkulären Flüssen“ zu beschreiben, da sie synonym sind und zu einem Zirkelschluss führen. Auch Strategien wie „Recycling“ oder „Wiederverwendung“ geben keine Antwort darauf, was Zirkularität im Kern ist. Zirkularität beinhaltet den „Erhalt von Werten“ innerhalb einer Volkswirtschaft (EC, 2025) und die Reduzierung der Materialentnahmen aus der Umwelt und der Energie- und Materialverluste, einschließlich Abfällen und Emissionen, in die Umwelt (Geissdoerfer et al., 2017). Somit führen Aktivitäten einzelner Wirtschaftsakteure, wie Recycling, zu Zirkularität auf einer höheren Ebene (Figge et al., 2023).

2) **Materialien.** Der Wert von Materialien soll erhalten werden. Materialien sind, wie in 2.4 beschrieben, sowohl kleinste Stoffe als auch (verarbeitete) Rohstoffe. Mit Zirkulärem Wirtschaften wird verhindert, dass Stoffe in der Umwelt verloren gehen und es wird versucht, Sekundärrohstoffe anstatt von Primärrohstoffen zu nutzen. Darüber hinaus werden auch materialnutzende Systeme wie Produkte, Infrastruktur und Gebäude erhalten. Das schließt nicht nur ihren Wert ein, sondern auch ihre Funktion. „Funktionserhalt“ zusätzlich zum „Werterhalt“ bedeutet, dass Funktionen, die Produkte derzeit für die Bedürfnisbefriedigung haben (z. B. das Auto für Mobilität), mit anderen Produkten und Systemen (z. B. ÖPV) erfüllt werden können (Circle Economy, 2025). Zirkuläres Wirtschaften bietet somit Lösungen für eine reduzierte, effiziente und effektive Nutzung von natürlichen Ressourcen (ISO 59004, 2024).

Die Autorenschaft definiert Zirkuläres Wirtschaften vor diesem Hintergrund wie folgt:

Zirkuläres Wirtschaften ist eine Wirtschafts- und Lebensweise, die Werte und Funktionen von Materialien und materialnutzenden Systemen erhält, sodass der Material- und Energieaustausch mit der natürlichen Umwelt reduziert sowie umweltverträglich gestaltet wird.

Ziele, die eine Transformation des Wirtschaftssystems im Sinne Zirkulären Wirtschaftens rechtfertigen würden, werden in einschlägigen Definitionen genannt: Nach ISO 59004 (Circular economy – Vocabulary, principles and guidance for implementation) handelt es sich um „ein Wirtschaftssystem, das einen systemischen Ansatz verfolgt, um einen zirkulären Fluss von Ressourcen aufrechtzuerhalten, indem ihr Wert wiedergewonnen, erhalten oder erhöht wird, und gleichzeitig zu einer nachhaltigen Entwicklung beiträgt“. Mit „Ressourcen“ sind sowohl Bestände als auch Flüsse von Rohstoffen und weiterverarbeiteten Materialien gemeint. Ein zirkulärer Fluss wird als „systematischer Kreislauf der Bereitstellung und Nutzung von Ressourcen innerhalb mehrerer technischer oder biologischer Kreisläufe“ definiert. Maßnahmen zur Steigerung der

Zirkularität tragen dazu bei Materialflüsse zu verringern, zu verlangsamen oder zu schließen. (ISO 59004, 2024, S. 1–2, eigene Übersetzung)

Circle Economy beschreibt Zirkuläres Wirtschaften in ihrem aktuellen Bericht als „*ein Instrumentarium von Strategien und Lösungen, mit denen wir unseren Materialverbrauch überdenken und optimieren, die Wohlbefinden für alle schaffen und gleichzeitig die Umwelt und die Ökosystemleistungen erhalten, die die Grundlage für eine funktionierende Wirtschaft bilden, einschließlich sauberer Luft, sauberen Wassers, natürlicher Räume und biologischer Vielfalt. Sie ist ein Weg, die physische Funktionsweise einer Wirtschaft neu zu gestalten: Sie reduziert den physischen Durchsatz - und damit die Umweltauswirkungen - durch die Optimierung der Umwandlung von (materiellen) Ressourcen in befriedigte gesellschaftliche Bedürfnisse, die zum menschlichen Wohlbefinden beitragen, wie Wohnen, Mobilität und Ernährung.*“ (Circle Economy, 2025, S. 19, eigene Übersetzung). Darin enthalten ist eine Gerechtigkeitskomponente, das Wohlbefinden für alle, die in dem universalistischen Leitgedanken von Ressourceneffizienz- und Kreislaufwirtschaftspolitik eines global verallgemeinerbaren Ressourcenverbrauchslevels angelegt ist (vgl. 1.10). Diese Definition spezifiziert weiterhin, was in der ISO-Definition nur kurz als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung genannt wird, indem sie natürliche Ressourcen als biophysikalische Grundlage einer funktionierenden Wirtschaft versteht, die der Befriedigung gesellschaftlicher Bedürfnisse und der Schaffung von menschlichem Wohlbefinden dient. ISO 59004 folgt diesem Verständnis weitestgehend, führt als generelles Prinzip Zirkuläres Wirtschaftens an: Das Wirtschaftssystem ist in das gesellschaftliche System eingebettet und beide sind auf das Umweltsystem angewiesen. In einer Visionsbeschreibung werden zudem das menschliche Wohlbefinden und die Erhaltung der natürlichen Umwelt als Zwecke genannt und ausgeführt, dass Zirkuläres Wirtschaften Lösungen für eine reduzierte, effiziente und effektive Nutzung materieller Ressourcen bereitstellt und bei der Befriedigung gesellschaftlicher Bedürfnisse Materialverluste, schädliche Materialabgaben und Umweltbelastungen zu vermeiden sind (ISO 59004, 2024).

Zirkuläres Wirtschaften in diesem Sinne ist ein Modell für nachhaltiges Wirtschaften, ein Ansatz zur Neujustierung des sozioökonomischen Metabolismus, des Material- und Energieaustauschs des Wirtschafts- und Gesellschaftssystems mit der natürlichen Umwelt und der Umwandlung von Energie und Material in Produktions-, Distributions- und Konsumprozessen sowie in der gebauten Umwelt (Baccini & Brunner, 2012; Pauliuk & Hertwich, 2015). Diese folgen zurzeit größtenteils einer linearen Logik des „Take-Make-Dispose“ mit hoher Primärmaterialnutzung und großen Materialverlusten in Form von Abfällen und Emissionen (2.4). Zirkuläres Wirtschaften verändert den Metabolismus so, dass er einer „Reduce-Reuse-Recycle“-Logik folgt und so die Primärmaterialinanspruchnahme sowie Abgaben an die Umwelt reduziert¹¹ und umweltverträglich gestaltet werden.

3.2 Beiträge zu Nachhaltigkeitszielen

Führende wissenschaftliche Organisationen wie die IPBES, IPCC oder UNEP kommen zu dem Schluss, dass insbesondere eine transformative Veränderung unseres Konsum- und Produktionssystems ein zentraler Pfeiler ist, um den Verlust der biologischen Vielfalt zu stoppen und umzukehren und den Klimawandel zu bekämpfen (IPBES, 2019; Pörtner et al., 2021). Dies wird u.a. in internationalen politischen Erklärungen aufgegriffen (Leader's Pledge for Nature,

¹¹ Die angestrebte Reduktion des Material- und Energieaustauschs schließt nicht aus, dass der Bedarf an einzelnen Rohstoffen, weiterverarbeiteten Materialien oder Energie temporär und in bestimmten Sektoren oder Regionen anwächst, bevor er sich langfristig auf einem global verallgemeinerbaren Niveau einpendelt.

2020; UNEP, 2022). Zirkuläres Wirtschaften kann als Kompass für die nachhaltige Entwicklung dienen.

Die 17 Nachhaltigkeitsziele der UN (Sustainable Development Goals, SDGs) mit ihren 169 Unterzielen stellen den internationalen Konsens für eine nachhaltige Entwicklung dar. Sie folgen universellen Werten wie Menschenrechten und Gerechtigkeit und stehen unteilbar miteinander in Verbindung (SDG Resolution, 2015). Der Wandel hin zu einer zirkulären Wirtschaftsweise ist direkt oder indirekt für das Erreichen der SDGs von maßgeblicher Bedeutung.

Abbildung 5: Natürliche Ressourcen, die dreifache planetare Krise und die SDGs



Quelle: (UNEP IRP, 2024)

Die komplexen Interdependenzen der SDGs erfordern eine systemische Herangehensweise. Ein zu starker Fokus auf Einzelmaterien oder -sektoren hat in der Vergangenheit dazu geführt, dass einige Ziele auf Kosten anderer erreicht und Probleme verlagert wurden. Deshalb besteht die

Herausforderung darin, konkrete Politikmaßnahmen für einen Systemwechsel zu entwerfen (UNEP IRP, 2024). Eine Antwort bietet das Konzept der „versorgenden Systeme“ (Abbildung 6), analog der zuvor in 3.1 beschriebenen Zusammenhänge: Versorgende Systeme erfüllen gesellschaftliche Bedürfnisse nach z. B. Nahrung, Energie, Mobilität und Wohnen (Abbildung 6, mittlere Ebene), nutzen dabei natürliche Ressourcen wie z.B. Rohstoffe, Land, Wasser (Abbildung 6, untere Ebene) und tragen so zum menschlichen Wohlbefinden bei, z. B. keine Armut, weniger Ungleichheit, Gesundheit (Abbildung 6, obere Ebene), haben aber auch negative

¹² keine Armut, kein Hunger, Gesundheit

¹³ Wasser & Abwasser, Energieversorgung, Arbeit & Wirtschaftswachstum, Industrie & Infrastruktur, Weniger Ungleichheiten, Städte & Gemeinden, Konsum & Produktion, Klimaschutz, Leben unter Wasser, Leben an Land

Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Zirkuläres Wirtschaften trägt durch Verringerung und qualitative Aufwertung von Rohstoffentnahme sowie der Abgabe von Emissionen und Abfällen

dazu bei, die negativen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zu reduzieren sowie menschliches Wohlbefinden zu maximieren und langfristig zu sichern.

Abbildung 6: SDGs strukturiert in natürliche Ressourcen, versorgende Systeme und menschliches Wohlbefinden



Das Konzept der versorgenden Systeme ist geeignet, um sozioökonomische und ökologische Ziele gleichermaßen zu erreichen (UNEP, 2024a). Ein eingängiges Bild und eine Quantifizierung dafür liefert der „Doughnut“ nach Raworth (2017), der insbesondere global gerechtes Wirtschaften in den Mittelpunkt stellt (vgl. Abbildung 3). Er basiert auf den SDGs und der Forschung zu planetaren Grenzen. Demnach sollten Volkswirtschaften danach streben, in einem „sicheren und gerechten Raum für die Menschheit“ (Abbildung 3) zu wirtschaften, in dem sie ökologische Obergrenzen nicht überschreiten (analog „natural resources“/„natürliche Ressourcen“ in Abbildung 6) und sozioökonomische Untergrenzen nicht unterschreiten (analog „Well-Being“/„Wohlbefinden“ in Abbildung 6). Durch das Herunterbrechen der universellen Ober- und Untergrenzen auf Volkswirtschaften lässt sich die globale Gerechtigkeitsdimension Zirkulären Wirtschaftens aufzeigen.

Quelle: (UNEP IRP, 2024)

Forschungsergebnisse weisen darauf hin, dass nach diesem Maßstab gewissermaßen alle Länder der Welt Entwicklungsländer sind: Entweder werden ökologische Obergrenzen überschritten (Hoheinkommensländer) oder sozioökonomische Untergrenzen unterschritten (Niedrigeinkommensländer). Kein Land der Welt wirtschaftet aktuell im sicheren und gerechten Raum. (Fanning et al., 2022; O'Neill et al., 2018)

Zirkuläres Wirtschaften kann durch Verringerung der Rohstoffbedarfs insbesondere dazu beitragen, dass ökologische Obergrenzen wieder unterschritten (heutige Hoheinkommensländer) bzw. in Zukunft nicht überschritten (heutige Niedrigeinkommensländer) werden. Die sozioökonomischen Untergrenzen lassen sich als Bedingungen eines Wirtschafts- und Gesellschaftssystems verstehen, das dem menschlichen Wohlbefinden dient (vgl. 3.1).

3.3 Beiträge zu Sicherheit und Resilienz

Die deutsche Volkswirtschaft ist durch ihre intensive Abhängigkeit vom Welthandel und ihre geographische Lage stark von den in 2.3 beschriebenen neuen Realitäten betroffen und muss sich im sich verschärfenden globalen Wettbewerb behaupten und gegen Gefahren von Außen

absichern. Zirkuläres Wirtschaften kann wesentlich zur Bewältigung dieser Herausforderungen beitragen. Es bietet Möglichkeiten, auf diese neuen Realitäten zu reagieren und die deutsche und europäische Wirtschaft zukunftssicher aufzustellen (Hartley et al., 2024).

Zirkuläres Wirtschaften kann die Resilienz und Wettbewerbsfähigkeit von industriellen Systemen erhöhen. Durch die Bereitstellung von Sekundärrohstoffen wird die Rohstoffversorgung diversifiziert und regionalisiert, Wiederaufbereitungsfähigkeiten erhöhen die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von produzierenden Unternehmen, die Vernetzung von vielfältigen Akteuren in industriellen Symbiosenetzwerken erhöht die Redundanz dieser Netzwerke (Kennedy & Linnenluecke, 2022; Steger et al., 2019). Zirkuläres Wirtschaften stärkt die Wettbewerbsfähigkeit von europäischen Unternehmen u.a. dadurch, dass sie unabhängiger von der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen werden, die durch den voranschreitenden Klimawandel knapper werden, z.B. Wasser und Land (Grabbe & Moffat, 2024).

Zirkuläres Wirtschaften kann substantiell dazu beitragen, die industrielle Rohstoffbasis als wesentliche Grundlage von wirtschaftlicher Souveränität zu sichern, zu erhalten und produktiver zu nutzen. Ein zirkulärer EU-Binnenmarkt würde ein schnelleres „De-Risking“ von Abhängigkeiten und wirtschaftlichem Zwang durch autoritäre Regime ermöglichen (Grabbe & Moffat, 2024).

Der CRMA fordert die EU-Mitgliedsstaaten daher dazu auf, kurzfristig Maßnahmenprogramme zur Stärkung der Kreislaufführung kritischer Rohstoffe aufzusetzen. Sie sollen den Anstieg des Verbrauchs kritischer Rohstoffe durch Ressourceneffizienz, Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Reparatur von relevanten Produkten mäßigen, das Recycling durch Steigerung von Sammlung, Sortierung und Aufbereitung von relevanten Abfällen qualitativ wie quantitativ verbessern sowie den Einsatz kritischer Sekundärrohstoffe durch finanzielle Anreize oder durch Vorgaben bei öffentlichen Vergaben anreizen.

3.4 Zwischenfazit: Zirkuläres Wirtschaften als horizontales Politikfeld

Aus den vorangegangenen Abschnitten folgt, dass Zirkuläres Wirtschaften seine Potentiale zur Bewältigung der gesellschaftlichen Herausforderungen nur erschließen kann, wenn es als horizontales, ressortübergreifendes Politikfeld verstanden wird. Bis vor wenigen Jahren wurden die globalen und regionalen ökologischen Herausforderungen und Krisen wie Klimawandel, Verlust der biologischen Vielfalt oder Umweltverschmutzung in erster Linie so behandelt, als ob es sich jeweils um separate Probleme handele. Dieser Ansatz ignorierte jedoch die Wechselwirkungen dieser Störungen und die daraus resultierenden Gesamteffekte auf den Zustand unserer natürlichen Lebensgrundlagen. Wenngleich auch heute noch überwiegend sektorale Politiken zur Anwendung kommen, zeigen jedoch Strategien wie die Agenda 2030, der European Green Deal, die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie oder das Integrierte Umweltprogramm 2030, wie durch systemische, transformative Politiken diese Wechselwirkungen adressiert werden können. Eine Politik für Zirkuläres Wirtschaften muss mit anderen Politikfeldern zusammenspielen (Abbildung 7), um ihre großen Potentiale für eine nachhaltigere Ausrichtung unsere Lebens- und Wirtschaftsweise erschließen zu können.

Klimapolitik befördert durch die Reduzierung der fossilen Materialströme einerseits Zirkularität, andererseits erfordern die Energie-, Mobilitäts- und Industriewende resiliente Lieferketten und zum Teil auch Ansiedlungen neuer Industrien im Bereich strategischer Rohstoffe und Güter in Deutschland und Europa (siehe z.B. Prognos et al., 2023). Hierfür sind entsprechende Maßnahmen der **Energie-, Verkehrs-, Bau-, Handels-, Wettbewerbs-, Industrie- und Strukturpolitik** notwendig und deren Wechselwirkungen mit den Zielen und Maßnahmen des Zirkulären Wirtschaftens zu berücksichtigen. Zirkuläres Wirtschaften ist eine

wichtige Voraussetzung dafür, dass ausreichend, vor allem metallische, Rohstoffe für Klimaschutz-Technologien langfristig zur Verfügung stehen.

Naturschutzpolitik ist zentral für die langfristige Verfügbarkeit von biogenen Rohstoffen. Die zum Schutz der Biodiversität notwendige Wiederherstellung von Ökosystemen und regenerative Landnutzungspraktiken können durch Maßnahmen des Zirkulären Wirtschaftens unterstützt werden (Günther et al., 2023), benötigen aber ebenso explizite Maßnahmen vor allem der **Agar-, Forstwirtschafts- und Ernährungspolitik sowie der Strukturpolitik**, um Zielkonflikte zu minimieren.

Da Zirkuläres Wirtschaften auch kleinste Materialströme umfasst, gibt es Wechselwirkungen mit der **Chemikalienpolitik**, z. B. dem EU Zero Pollution Action Plan. Durch die Schließung von Produkt- und Materialkreisläufen wird der Bedarf an Stoffen mit potentiell schädlicher Wirkung für Mensch und Umwelt entlang der gesamten Wertschöpfungskette reduziert. Darüber hinaus werden Schadstoffe durch ein zirkuläres Produktdesign von vornherein vermieden.

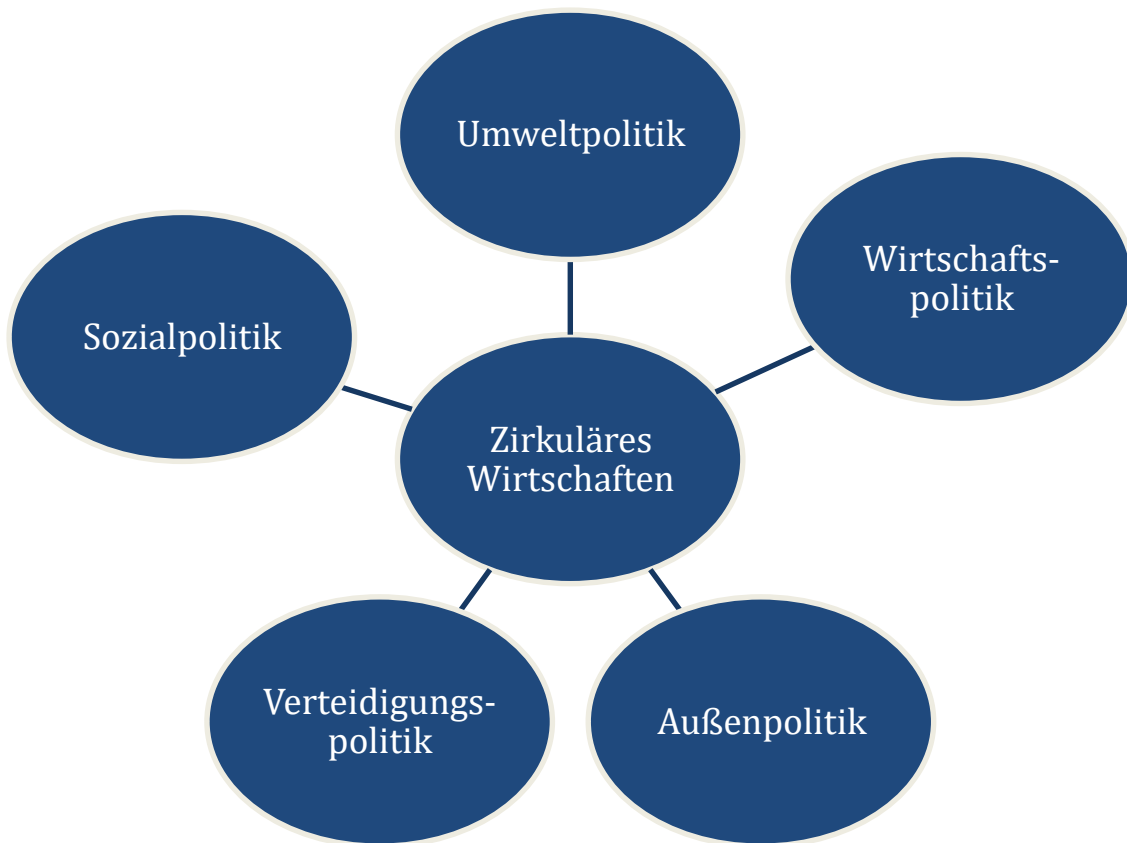
Andererseits bleibt die Ausschleusung von Schadstoffen aus Stoffkreisläufen eine wichtige Aufgabe, um sicherzustellen, dass die im Kreislauf geführten Wertstoffe sicher und ungefährlich sind. Je umfangreicher das Zirkuläre Wirtschaften umgesetzt wird, desto relevanter ist die Schadstoffausschleusung und -vermeidung, da reines Verdünnen oder großzügiges Ablagern nicht mehr möglich sind. Maßnahmen der **Forschungspolitik** sind im Hinblick auf die Substitution gefährlicher Stoffe oder der (Weiter-)Entwicklung von Aufbereitungsverfahren zur Schadstoffausschleusung notwendig, um saubere Produkt- und Materialkreisläufe zu etablieren.

Im Diskurs bisher wenig adressierte Wechselwirkungen und Zielkonflikte bestehen zur **Sozial- und Gesellschaftspolitik**. Die Transformation zum Zirkulären Wirtschaften erfordert das vielfältige Aushandeln von Lösungen zwischen zahlreichen Beteiligten und Sektoren (z. B. Umwelt, Gesundheit, Landwirtschaft oder Energie). Diese Aushandlungsprozesse werden dort auf die Probe gestellt, wo die Transformation scheinbar oder tatsächlich konfliktreich ist – wo es bei Veränderungen Begünstigte und Benachteiligte geben kann. Wenn Zirkuläres Wirtschaften als sozial gerecht empfunden wird, kann das eine ambitionierte Transformation befördern. Zirkuläres Wirtschaften wirkt sich jedoch nicht per se positiv aus. So werden beispielsweise nicht automatisch mehr Arbeitsplätze und bessere Arbeitsbedingungen geschaffen. Solche Aspekte müssen aktiv in die Maßnahmen einbezogen werden, vor allem um negative Folgen wie die Verschärfung regionaler und globaler Ungleichheiten zu minimieren. Wie generell in der Umweltpolitik muss die sozialverträgliche Ausgestaltung der Instrumente und Maßnahmen des Zirkulären Wirtschaftens stärker berücksichtigt werden.

Die Transformation zur Zirkulären Wirtschaft sollte mit Maßnahmen der **Außen-, Entwicklungs- und Handelspolitik** flankiert werden, da der „circularity divide“ (Barrie et al., 2022) zwischen Hoch- und Niedrigeinkommensländern an Bedeutung gewinnt. Hoheinkommensländer haben zumeist einen Wettbewerbsvorteil durch z. B. ein großes Lager an Sekundärrohstoffen, hohes Innovationspotential und Zugang zu Finanzierungen. Dem gegenüber stehen Niedrigeinkommensländer, die bereits durch den Klimawandel, oftmals hohe Schadstoffbelastung und den Verlust der biologischen Vielfalt gezeichnet sind, vor der Herausforderung, die Transformation unter zunehmend schwierigen Bedingungen zu gestalten. Eine stärkere multilaterale Zusammenarbeit, die Stärkung internationaler Kooperationsprogramme und die Identifizierung von Win-Win-Mechanismen sollte die Transformation zu einer globalen Zirkulären Wirtschaft speisen. Auch die Bereitstellung von Finanzmitteln für die Transformation in Niedrigeinkommensländern und die Überwindung der digitalen Qualifikationslücke sind von entscheidender Bedeutung (Denter, 2025; siehe auch EEA, 2023a, Kapitel 6).

Die Zusammenhänge Zirkulären Wirtschaftens mit anderen Politikfeldern werden in Kapitel 8 vertieft und um konkretere Instrumentenbündel ergänzt. Die Grundlagen dafür legen wir in den folgenden Kapiteln, in denen wir ein Vorgehen zur Identifizierung großer Hebel Zirkulären Wirtschaftens vorschlagen (Kapitel 4) und diese Methode anwenden (Kapitel 5 –7).

Abbildung 7: Zirkuläres Wirtschaften als politikfeldübergreifendes Thema (exemplarische Auswahl an Politikfeldern)



Quelle: Eigene Abbildung, Umweltbundesamt

4 Vorgehen zur Identifizierung großer Hebel Zirkulären Wirtschaftens

4.1 Was ist ein Hebel? Zusammenspiel von Zielen, Strategien und Handlungen

Wie in Kapitel 3 erläutert, ist Zirkuläres Wirtschaften kein Selbstzweck, sondern ein Mittel zum Erreichen gesellschaftlicher Ziele. Abbildung 8 zeigt ein System, das den Zusammenhang zwischen Handlungs-, Strategie- und Zielebene Zirkulären Wirtschaftens darstellt, welches auch mit unserer Vorgehensweise korrespondiert:

1) **Ziele**, zu denen die zirkuläre Umgestaltung des sozioökonomischen Metabolismus beitragen sollen, werden festgelegt. Ein Ziel kann auch durch Strategien anderer Politikfelder erreicht werden (vgl. 3.4). Ziele geben eine Antwort auf die Frage, warum bestimmte Strategien verfolgt werden. Wir geben eine nicht abschließende Auswahl an Zielen in Kapitel 5.

2) **Strategien**, die handlungsleitend sind und jeweils einen Aspekt Zirkulären Wirtschaftens widerspiegeln, werden ausgewählt oder entwickelt. Sie beschreiben, wie die Struktur des sozioökonomischen Metabolismus zirkulär gestaltet werden kann und machen das Wesen Zirkulären Wirtschaftens aus. Die von uns vorgeschlagenen sieben Strategien bilden eine Brücke zwischen Zielen und Handlungen, indem die quantitative und qualitative Änderung der Materialströme mit möglichen sozioökonomischen und ökologischen Wirkungen begründet wird.

3) **Handlungen** beschreiben, wie Strategien für ein bestimmtes System angewandt werden. Handlungen, die durch eine Umstellung gemäß den Strategien besonders stark zu ausgewählten Zielen beitragen können, bezeichnen wir als große **Hebel** Zirkulären Wirtschaftens. Was diese Systeme sein können, stellen wir in 4.2 vor.

Mit den Handlungen und Hebeln können mehrere Strategien und Ziele verfolgt werden. Ob Handlungen umgesetzt, Strategien erfolgreich verfolgt und Ziele erreicht werden, sollte mit einem Monitoringsystem durch entsprechende Indikatoren überprüft werden, um rationale Argumente für die Gestaltung von Maßnahmen zu liefern (EEA & ISPRA, 2020). Zielindikatoren beziehen sich auf Ziele. Durch die Verwendung von Fußabdruck- und Lebenszyklusindikatoren wird sichergestellt, dass die angestrebte Senkung von z. B. Treibhausgasemissionen aus Konsumperspektive über die Lieferkette hinweg überprüft werden kann. Diese gesamtwirtschaftlichen Indikatoren stellen tatsächliche Wirkungsbezüge dar und basieren auf unterschiedlichen Methoden, Modellen und Datenquellen wie z. B. auf der Umweltökonomischen Gesamtrechnung, ökobilanziellen Methoden und MRIO-basierten Modellen (Lutter et al., 2016; Nuss et al., 2023). Strategische Indikatoren bilden strukturelle Veränderungen des sozioökonomischen Metabolismus ab und können sich beispielsweise an Indikatoren der Materialflussrechnung orientieren (Nuss et al., 2021). Sie bilden nicht zwingend richtungssicher das Erreichen der Ziele ab, denn einzelne eindimensionale Indikatoren – wie etwa massenbezogene Verwertungsquoten – geben nur unzureichend Aufschluss über Umweltwirkungen, Sekundärmaterialqualitäten und kreislaufwirtschaftsgerechte Produkteigenschaften (Müller et al., 2020). Mit Handlungsindikatoren kann der Erfolg in Bezug auf die Umsetzung von Aktivitäten gemessen werden. Auch sie sind nur begrenzt aussagekräftig hinsichtlich der Zielerreichung (Ressourcenkommission, 2023). Eine Datengrundlage für diese Indikatorebene ist z. B. das UBA-Portal „Sekundärrohstoffwirtschaft“¹⁴ (Steger et al., 2019). Wir schlagen

¹⁴ Vgl.: UBA Portal Sekundärrohstoffwirtschaft <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/sekundaerrohstoffwirtschaft-start>

mögliche Indikatoren in den Kapiteln 5 – 7 vor und empfehlen eine Weiterentwicklung des Monitoringsystems in zukünftigen Arbeiten.

Abbildung 8: Darstellung des Zusammenspiels Ziele – Strategien – Handlungen/große Hebel in einem Ziel- und Indikatorensystem.



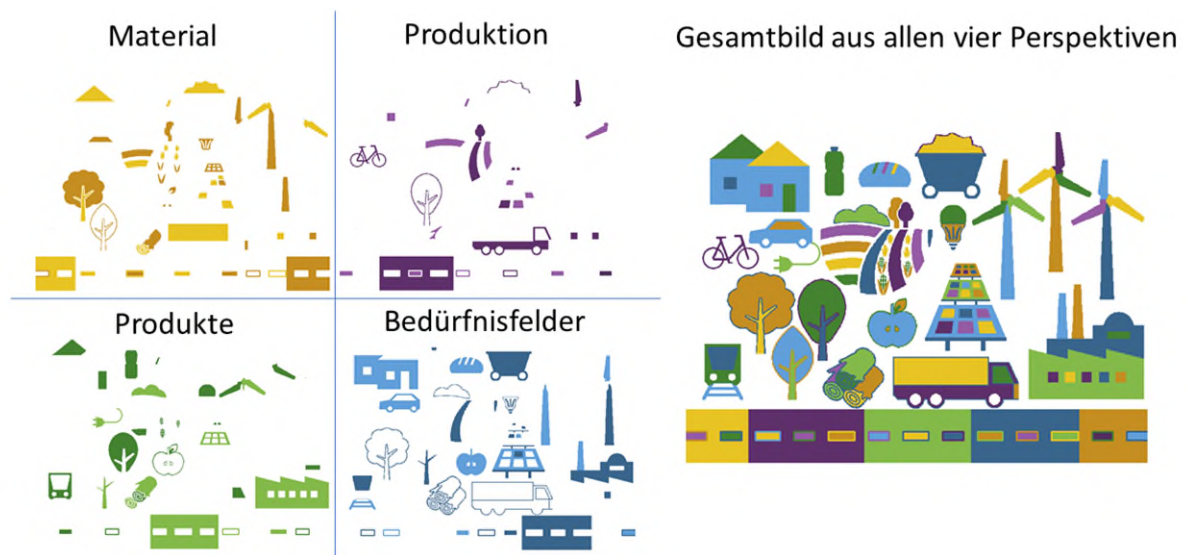
Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

4.2 Große Hebel aus vier Perspektiven

Die zirkuläre Umgestaltung des sozioökonomischen Metabolismus mit dem Zweck, Zielbeiträge zu gesellschaftlichen Zielen zu maximieren, erfordert eine fokussierte Herangehensweise. Der Fokus sollte dabei auf denjenigen Aktivitäten zur Veränderung der Wirtschafts- und Lebensweise liegen, die besonders stark zu den Zielen beitragen können und gleichzeitig charakteristisch für Zirkuläres Wirtschaften im Sinne der Strategien sind. Um in diesem komplexen sozioökonomischen und technischen System die Hebelpunkte zu identifizieren, wird es aus den vier Perspektiven „Material“, „Produktion“, „Produkt“ und „Bedürfnisfeld“ betrachtet (Abbildung 8). Diese repräsentieren unterschiedliche Stadien im Metabolismus und entsprechende Akteure. Die vier Perspektiven sind jeweils Ausgangspunkt der Analyse, ergänzen sich gegenseitig, sind ineinander verschränkt und weisen jede für sich genommen

blinde Flecken auf, die durch die Gesamtsicht wechselseitig ausgeleuchtet werden können (Abbildung 9). Aus jeder Perspektive werden besonders wirkungsvolle Handlungen beschrieben.

Abbildung 9: Schema Hebel aus 4 Perspektiven, die blinde Flecken wechselseitig ausleuchten



Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

Die **Materialperspektive** betrachtet eine gesamte Volkswirtschaft, einzelne Wirtschaftsbereiche oder andere materialnutzende Systeme und erfasst ihren Materialaustausch mit der Natur in Form von Entnahmen und Abgaben, sowie Materialflüsse innerhalb dieser Systeme und Veränderungen im Materialbestand. Eine Analyse dieser Strukturen kann Hinweise auf Potentiale für weniger Ressourcen- und Rohstoffinanspruchnahme oder für mehr Ressourcen- und Rohstoffeffizienz geben. Werden die strukturellen Informationen mit Wirkungsfaktoren verknüpft, können Zielerreichungspotentiale abgeschätzt werden. In der Zusammenschau mit den anderen Perspektiven können diese Potentiale weiter spezifiziert werden, da die Materialperspektive „blinde Flecken“ hinsichtlich der technischen Optimierung von Produktionsprozessen oder dem Produktdesign aufweist.

Die **Produktionsperspektive** betrachtet das System „Produktion in Deutschland“ mit all seinen Sektoren, ihren innerwirtschaftlichen Verflechtungen und globalen Lieferketten, von der Rohstoffgewinnung, über die Grundstoffproduktion, die Halbzeugherstellung bis zur Herstellung von Fertigwaren für den inländischen Konsum und Investitionen sowie den Export. Da nach Bedarf produziert wird und dieser Bedarf mit Marketingstrategien teils gezielt angereizt wird, ist diese Perspektive blind für andere Arten der Bedürfnisbefriedigung.

Die **Produktperspektive** betrachtet in Deutschland genutzte Waren oder Dienstleistungen unter Berücksichtigung ihres Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung, über Herstellung und Nutzung bis hin zu ihrer Entsorgung am Lebensende. Durch Aufstellung aller ein- und ausgehenden Stoffströme (Materialperspektive) und einer Abschätzung der damit zusammenhängenden Umweltwirkungen eines Produktsystems können Hebel zur Verbesserung der Ökobilanz eines Produkts durch Erhöhung seiner Zirkularität identifiziert werden, etwa der Einsatz von Sekundärrohstoffen, die Substitution eines Materials oder ein recyclingfreundliches Produktdesign. Ein blinder Fleck der Produktperspektive ist der gesamtwirtschaftliche Blick auf die wesentlichen Komponenten des Umweltfußabdrucks ganzer Volkswirtschaften, den die anderen Perspektiven leisten können.

Die **Bedürfnisfeldperspektive** geht von gesellschaftlichen und individuellen Bedürfnissen als Ressourcennachfragefaktoren aus und stellt die Frage, wie sie mit geringeren Ressourcenbedarfen gleichwertig erfüllt werden können. An dieser Schnittstelle zwischen sozialen und technischen Systemen können durch grundlegend andere Arten der Bedürfnisbefriedigung mitunter erhebliche Veränderungen angestoßen werden, die im Vergleich zu technischen Ansätzen häufig die größten Reduktionen bei Rohstoffbedarf, Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen nach sich ziehen. Diese Perspektive ist blind für die großen Materialflüsse und ihre ökologischen Rucksäcke, die nicht in den inländischen Konsum, sondern in den Export gehen. Diese werden wiederum durch die Einnahme der Produktionsperspektive erfasst.

5 Ziele – im Spannungsfeld zwischen Nachhaltigkeit, Sicherheit und Resilienz

5.1 Ein gutes Leben für alle innerhalb planetarer Grenzen

In beiden Bereichen, der Nachhaltigkeit sowie der Sicherheit und Resilienz (vgl. 3.2 und 3.3), ist die Lage ernst, der Handlungsdruck groß. Es besteht ein Spannungsfeld zwischen langfristigen Nachhaltigkeitszielen und den akuten Sachzwängen der sich abzeichnenden, neuen, multipolaren Weltordnung (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2025), das in der folgenden Herleitung von Zielen Zirkulären Wirtschaftens adressiert werden soll.

Der Idee eines sicheren und gerechten Handlungsraums für die Menschheit („Doughnut“, siehe 3.2) liegt die universalistische Prämisse zu Grunde, dass jeder Mensch ein Recht auf ein menschenwürdiges Leben und gleiche Nutzungsrechte an den begrenzten natürlichen Ressourcen des Planeten hat. Daraus folgt, dass sich die Pro-Kopf-Ressourceninanspruchnahme weltweit auf einem nachhaltigen Niveau einpendeln muss, dem sich im Sinne des Konzepts von Konvergenz und Kontraktion Hocheinkommensländer von oben und Niedrigeinkommensländer von unten nähern (Duro et al., 2018; Watari et al., 2021).

Die Ideen der Nachhaltigkeit gründen auf einer mehr als 200-jährigen Geschichte der Aufklärung. Die moderne Welt und die liberale Demokratie in Deutschland und der EU sind auf den Ideen der Aufklärung gebaut: Wissenschaftlichkeit, universelle Menschenrechte, Gewaltenteilung, Rechtsstaatlichkeit, individuelle Freiheit, Volkssouveränität. Sie werden zunehmend von autoritären Kräften angegriffen. Die universalistische Idee eines guten Lebens für alle Menschen wird zunehmend durch partikularistische Ideen verdrängt. Interessen treten an die Stelle von Werten, Stärke an die Stelle von Regeln, Besitzstände werden verteidigt. In der sich entwickelnden multipolaren Weltordnung konkurrieren Großmächte um Einflussphären, betreiben zunehmend protektionistische Handelspolitiken, sichern ihre Grenzen gegen unerwünschte Eindringlinge ab oder erweitern sie sogar mit Gewalt. Für liberale Demokratien wie Deutschland und die EU ergibt sich aus diesem zunehmend unfreundlichen bis feindseligen Umfeld ein Dilemma: Sie müssen für ihre Sicherheit und Resilienz sorgen, u.a. in dem sie ihren Zugang zu Rohstoffquellen sichern, ohne dabei die für sie konstitutionellen Ideen der Aufklärung aufzugeben.

Die sich aus den neuen Realitäten ergebenden Imperative müssen trotz des Spannungsfelds zwischen Universalismus und Partikularismus integriert betrachtet werden. Denn die Bereiche Nachhaltigkeit und Sicherheit/Resilienz sind trotz der inhärenten Unterschiede miteinander verwoben und bedingen einander, wie an folgenden Beispielen deutlich wird:

- ▶ Der globale Klimawandel erhöht die Risiken der Versorgung mit biogenen und mineralischen Rohstoffen durch zunehmenden Wasserstress, Bodendegradation und Extremwetterereignisse (Martin et al., 2018; Rüttinger et al., 2020).
- ▶ Klimaschutz erfordert eine sichere Versorgung mit Rohstoffen für klimafreundliche Technologien (IEA, 2021; Mertens et al., 2024; Passarella, 2023).
- ▶ Die Klimakrise stellt eine große sicherheitspolitische Gefahr dar (German Advisory Council on Global Change (WBGU), 2007; McDonald, 2013; Sauer et al., 2025).
- ▶ Versorgungssicherheit und Resilienz von Lieferketten können langfristig nur durch den konsequenten Schutz von Menschenrechten, Artenvielfalt, Biodiversität und des Klimas

hergestellt werden (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU), 2025).

- Menschliches Wohlergehen baut neben den sozioökonomischen Grundlagen im Inneren des Doughnuts (Abbildung 3) auch auf einer funktionierenden Wirtschaft auf, die wiederum eine sichere Rohstoffversorgung benötigt.
- Sowohl Sicherheit und Resilienz als auch Nachhaltigkeit stehen in komplexer Wechselwirkung mit strategischer Souveränität: Einerseits kann sie durch Stärkung von Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit erlangt werden und andererseits ist sie Bedingung, um Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit gewährleisten zu können (Wörner & Schmidt, 2022).

Zirkuläres Wirtschaften ist ein Querschnittsthema (vgl. 3.4) und kann bei zielgerichteter Ausgestaltung substantielle Beiträge zu gesellschaftlichen Zielen leisten, sowohl zur Nachhaltigkeit als auch zu Sicherheit und Resilienz. Orientiert an der Beschreibung Zirkulären Wirtschaftens von Circle Economy, den generellen Prinzipien und der Vision von ISO 59004 (vgl. 3.1), dem Modell der versorgenden Systeme des internationalen Ressourcenrats der UN (Abbildung 6) und dem Doughnut-Economy-Modell nach Raworth (Abbildung 3), wonach eine funktionierende Wirtschaft der Schaffung menschlichen Wohlbefindens dient und auf natürliche Ressourcen als biophysikalische Grundlage angewiesen ist, ist das Leitziel Zirkulären Wirtschaftens aus Sicht der Autorenschaft ein gutes Leben innerhalb planetarer Grenzen (Europäische Kommission, 2014). Es gilt für alle Menschen, weil den Ideen eines auf Nationen heruntergebrochenen sicheren und gerechten Handlungsraums und eines global verallgemeinerbaren Ressourcenfußabdrucks eine universalistische, egalitäre Werthaltung zu Grunde liegt, auch wenn nicht alle in Deutschland umzusetzenden zirkulären Handlungsweisen signifikante globale Effekte haben werden.

Aus der umweltpolitischen Sicht der Autoren*Autorinnen ist dabei das Einhalten der planetaren Grenzen prioritär, da es um die langfristige Sicherung der globalen, bio-physikalischen Voraussetzungen für ein menschenwürdiges Leben geht. Sie ist eng verwoben mit der Einhaltung der Menschenrechte und der Frage von sozialer und globaler Gerechtigkeit. Angesichts der neuen Realitäten sind gesellschaftliche Resilienz und Sicherheit ebenfalls prioritär, obwohl sie inhärent nicht einem universalistischen Ideal folgen. Sie sind ebenfalls Voraussetzungen eines guten Lebens, allerdings nicht zwingend für alle.

5.2 Auswahl der Ziele

Wir unterscheiden in Ziele und Strategien Zirkulären Wirtschaftens, um zu verdeutlichen, dass Zirkuläres Wirtschaften Mittel für unterschiedliche Zwecke ist (vgl. 4.1).

Die Senkung des Rohstofffußabdrucks, die Steigerung der Zirkularitätsrate und auch die Rohstoffsicherung sind aus Sicht der Autor*innen wesentliche Strategien, aber nicht Zwecke Zirkulären Wirtschaftens, weil sie strukturelle Voraussetzungen für gesamtgesellschaftliche Ziele wie Klimaschutz, Gerechtigkeit, Sicherheit und Resilienz darstellen.

Es gibt verschiedene Ansätze, das Leben und Wirtschaften innerhalb planetarer Grenzen und das global verallgemeinerbare Ressourcennutzungs-niveau zu messen (Schlesier et al., 2024) und eine planetare Grenze für Rohstoffe wurde bisher noch nicht abgeleitet (Richardson et al., 2023; Rockström et al., 2009; Thomassen et al., 2024). Dennoch werden in der wissenschaftlichen und politischen Diskussion zu Ressourceneffizienz und Zirkulärem Wirtschaften auf Basis der Evidenz, dass die Rohstoffinanspruchnahme wesentlich zum Überschreiten der planetaren,

ökologischen Obergrenzen beiträgt (vgl. 2.1) häufig vereinfachend aggregierte Massenkennzahlen als Proxys für Ressourceninanspruchnahmen verwendet. So wird etwa in der NKWS die Senkung des Pro-Kopf Rohstofffußabdrucks als Leitbild und die Steigerung der Zirkularitätsrate als Ziel formuliert (BMUV, 2024).

Allerdings weist eine Vielzahl an Forschungsergebnissen darauf hin, dass aggregierte Massenindikatoren Umweltwirkungen nicht richtungssicher abbilden (Müller et al., 2017). Eine rein massenmäßige Senkung der Rohstoffinanspruchnahme oder eine rein massenmäßige Steigerung der Zirkularitätsrate führen nicht automatisch dazu, dass die großen Potentiale Zirkulären Wirtschaftens für Klima-, Umwelt- und Biodiversitätsschutz oder die Sicherung knapper Rohstoffe erschlossen werden. Beispielsweise trägt eine Reduzierung des Materialstroms „nicht-metallische Mineralien“ stark zur Senkung des Rohstofffußabdrucks bei, jedoch im Vergleich zu den anderen Rohstoffarten weniger zur Reduzierung des Umweltfußabdrucks (Christis et al., 2023; Vercalsteren et al., 2025). Politiken für Zirkuläres Wirtschaften sollten sich angesichts des großen Handlungsdrucks daher viel stärker als bisher an wirkungsbezogenen Kenngrößen orientieren.

Die Auswahl der Ziele orientiert sich an den in Kapitel 3 vorgestellten Konzepten (vgl. Abbildung 3, Abbildung 5 und Abbildung 6). Ziele zur Nutzung natürlicher Ressourcen, bezugnehmend auf die dreifache planetare Krise und das Äußere des „Doughnut“, bezeichnen wir als „umweltpolitische Ziele“ und fassen darunter die Ziele Klimaschutz, Biodiversitätsschutz, saubere Umwelt und Wasserverfügbarkeit (Abbildung 10). Ziele zum Wohlbefinden und dem Inneren des Doughnut bezeichnen wir als „sozial- und entwicklungspolitische Ziele“ und schlagen Einhaltung von Menschenrechten, Entwicklungschancen und einen gerechten Wandel vor. Ziele mit Bezug zu versorgenden Systemen und zur Adressierung aktueller geopolitischer Entwicklungen sind „wirtschafts- und sicherheitspolitische Ziele“ und umfassen Resilienz und Sicherheit.

Abbildung 10: Darstellung ausgewählter Ziele Zirkulären Wirtschaftens im Zielsystem



Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

Wenn diese Ziele verfolgt werden, kann Zirkuläres Wirtschaftens zu einem „guten Leben für alle innerhalb planetarer Grenzen“ beitragen. Dabei bilden die hier vorgeschlagenen Ziele bei Weitem nicht alle Aspekte ab. Sie sind vielmehr als Vorschläge zu verstehen, ohne Anspruch auf vollständige Abdeckung. In der Argumentation für Hebel Zirkulären Wirtschaftens in Kapitel 7 wird auf diese Ziele Bezug genommen.

Es können Zielkonflikte auftreten. So bedeutet etwa mehr Klimaschutz durch Ausbau der erneuerbaren Energien kurz- und mittelfristig mehr Bergbau mit entsprechenden Wirkungen auf Wasserverfügbarkeit und Umweltbelastung. Bei gegenläufigen Beiträgen zu Zielen sind Abwägungen erforderlich. Dabei bietet sich der Ansatz der EU Taxonomie für nachhaltige wirtschaftliche Aktivitäten an (Taxonomie Verordnung, 2020): Maßnahmen Zirkulären Wirtschaftens sollten zu mindestens einem der Ziele substantielle positive Beiträge („substantial contribution“) leisten und gleichzeitig keinem der anderen Ziele signifikant schaden („do no significant harm“).

5.3 Umweltpolitische Ziele

5.3.1 Klimaschutz

Das Ziel des Pariser Klimaschutzübereinkommens ist es, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen und einen Anstieg von weniger als 1,5 °C anzustreben. Neben der Verbesserung der Senkenfunktion natürlicher Ressourcen (natürlicher Klimaschutz) müssen dafür Treibhausgasemissionen zügig und umfangreich reduziert werden. Diese werden hauptsächlich durch Produktion und Konsum verursacht und können daher durch Zirkuläres Wirtschaften reduziert werden. Das Ziel „Klimaschutz“ kann mit dem Zielindikator „Treibhausgas-Fußabdruck“ für Deutschland gemessen werden.

5.3.2 Biodiversitätsschutz

Wenngleich die biologische Vielfalt und die Leistungen der Ökosysteme wie Nahrung, saubere Luft und Medizin für Menschen essenziell sind, verschlechtert sich ihr Zustand dramatisch (IPBES, 2019). Die Biodiversitätskonvention (CBD) zielt darauf ab, Artenvielfalt, genetische Vielfalt und Vielfalt der Ökosysteme zu schützen, biogene Ressourcen nachhaltig zu nutzen und den Zugang zu genetischen Ressourcen sicherzustellen (UNEP, 2024b). Insbesondere die Nutzung von Biomasse und die damit verbundenen Flächeninanspruchnahmen sowie Belastung von Gewässern und Meeren z. B. durch Düngemittel sind große Treiber von Bodenerosion und Biodiversitätsverlust. Aspekte der Bodenerosion werden u. a. auch im Übereinkommen der Vereinten Nationen zur Bekämpfung der Wüstenbildung (UNCCD) adressiert (UN, 2024a). Das Ziel ist der Erhalt von Biodiversität und Bodenqualität. Die Erreichung der anderen drei umweltbezogenen Ziele wirkt sich grundsätzlich positiv auf den Erhalt der Biodiversität aus, da Schäden an Ökosystemen am Ende von Ursache-Wirkungsketten stehen (Klotz & Settele, 2017; Taelman et al., 2024). Ein weiterer Aspekt, der sich auf Ökosysteme auswirkt, aber mit diesem Papier nicht direkt adressiert wird, ist die Inanspruchnahme von Siedlungs- und Verkehrsflächen, die durch eine „Flächenkreislaufwirtschaft“ verringert werden kann (Dosch et al., 2006). Das UNEP IRP misst den Erhalt von Artenvielfalt und Bodenqualität z. B. als landbedingten Verlust an biologischer Vielfalt (durch Landnahme und Landnutzungsänderung, Landnutzungsintensität) sowie als Verlust der biologischen Vielfalt im Süßwasser durch Eutrophierung (UNEP IRP, 2024). Die dahinterliegenden Modellierungsergebnisse sind auch für Deutschland verfügbar (Cabernard, 2024).

5.3.3 Saubere Umwelt

Umweltverschmutzung entsteht durch die Freisetzung von schädlichen Substanzen wie z. B. bestimmten Chemikalien, Luftschadstoffen oder Mikroplastik in die Umweltmedien. Auch Lärm stellt eine Umweltverschmutzung dar. Die internationale Gemeinschaft bzw. die EU arbeitet momentan an mehreren Abkommen und Aktionsplänen wie z. B. der Internationalen Plastikkonvention (UNEP, 2024c) bzw. der Umsetzung des Globalen Rahmenwerks für Chemikalien (GFC) (UNEP, 2024d) oder dem EU „Null-Schadstoff-Aktionsplan“ (Europäische Kommission, 2024b). Übergreifendes Ziel muss es sein, dass Schadstoffe in allen Umweltmedien soweit reduziert werden, dass sie keine Gefahr für die menschliche Gesundheit und die natürlichen Ökosysteme darstellen. Menschliche Aktivitäten sind ein wesentlicher Treiber für die Produktion und Freisetzung von Schadstoffen. Um das Ziel „Saubere Umwelt“ messen zu können, bedarf es einer Reihe von Zielindikatoren, die Umweltverschmutzung und die Auswirkungen auf Menschen und Umwelt in ihrer Bandbreite und aus einer Fußabdruckperspektive abbilden. Beispiele dafür sind Indikatoren zur Feinstaubbelastung oder Humantoxizität (s. z. B. den EU Consumption Footprint (Europäische Kommission, 2024a)). Auch das EU Indicator Framework for Chemicals und das Zero Pollution Monitoring Assessment (EEA, 2024) beinhalten relevante Indikatoren.

5.3.4 Wasserverfügbarkeit

Im Jahr 2010 hat die Generalversammlung der Vereinten Nationen mit der Resolution 64/292 das Recht auf Wasser als Menschenrecht anerkannt. Allein in der EU sind bereits 30 % der Bevölkerung vom Wasserstress betroffen und diese Situation wird sich vor dem Hintergrund des Klimawandels noch weiter verschärfen (EEA, 2021). Deutschlands Wasserverbrauch findet zudem in Vorketten größtenteils im Ausland statt (Bunsen et al., 2022)¹⁵ und kann damit auch zu Wasserknappheiten in anderen Ländern führen. Das Ziel ist daher, den durch Produktion und Konsum bewirkten Wasserstress so gering wie möglich zu halten und so die Wasserverfügbarkeit zu gewährleisten. Wasser hat eine besondere Bedeutung in einer Zirkulären Wirtschaft, da es Ressource, Produktionsmittel, Produkt und Service zugleich ist (Morsetto et al., 2022). Das vielschichtige Thema „Wasserkreisläufe“ wird hier nicht weiter betrachtet, sollte aber zukünftig mehr Aufmerksamkeit erfahren. Eine Verbesserung durch Zirkuläres Wirtschaften kann mit dem Indikator „Wasserfußabdruck“ für Deutschland abgebildet werden. Dieser misst den Wasserverbrauch, der durch den Konsum in Deutschland verursacht wird, und charakterisiert ihn hinsichtlich der Übernutzung in Einzugsgebieten (Bunsen et al., 2022; Hoekstra, 2017; Jeswani & Azapagic, 2011).

5.4 Sozial- und entwicklungspolitische Ziele

5.4.1 Einhaltung von Menschenrechten

Die internationale Menschenrechtscharta, bestehend aus der Allgemeinen Erklärung der Menschenrechte (AEM), dem Internationalen Pakt über bürgerliche und politische Rechte (Zivilpakt/ICCPR) und dem Internationalen Pakt über wirtschaftliche, soziale und kulturelle Rechte (Sozialpakt/ICESCR) sowie den dazugehörigen Protokollen, definiert die Bedingungen für ein menschenwürdiges Leben. Die Menschenrechte haben universelle Gültigkeit, für jeden einzelnen Menschen weltweit. Sie können gerade auch im Lichte der dreifachen planetaren Krise eine gemeinsame Richtung für die Menschheit vorgeben (Muggentaler, 2023). Viele Menschenrechte, so etwa das Recht auf das individuell erreichbare Höchstmaß körperlicher und

¹⁵ Nur 14 % des konsuminduzierten Wasserverbrauchs Deutschlands stammt aus dem Inland, wohingegen 86 % aus dem Ausland stammen (Wasserfußabdruck).

geistiger Gesundheit (Art. 25 AEMR & Art. 12 ICESCR), stehen in engem Zusammenhang mit dem Umweltschutz. In diesem Sinne hat die Generalversammlung der Vereinten Nationen 2022 das Menschenrecht auf eine saubere Umwelt anerkannt (The Human Right to a Clean, Healthy and Sustainable Environment, 2022). Staaten stehen in der Pflicht, die Menschenrechte zu schützen und Wirtschaftsunternehmen tragen Verantwortung, die Menschenrechte zu achten, insbesondere dort, wo der staatliche Schutz nicht gewährleistet ist, auch entlang ihrer globalen Lieferketten. Staaten müssen darüber hinaus Betroffenen den Zugang zu wirksamer Abhilfe gewähren (United Nations, 2011). Das Deutsche Institut für Menschenrechte¹⁶ und andere Nichtregierungsorganisationen wie amnesty international¹⁷ berichten jährlich zur Entwicklung der Menschenrechtssituation in Deutschland und weiteren Staaten (Territorialperspektive). Indikatoren aus Fußabdruckperspektive sind unseres Wissens noch nicht verfügbar.

5.4.2 Entwicklungschancen

Menschen und Gesellschaften benötigen Zugang zu Ressourcen, um sich nachhaltig entwickeln zu können. Dazu gehören neben den natürlichen Ressourcen unter anderem auch finanzielle Ressourcen, Bildung, Gesundheit und soziale Vernetzung. Der Zugang zu diesen Ressourcen ist sowohl innerhalb Deutschlands als auch im internationalen Vergleich ungleich verteilt. Die zunehmende Überschreitung planetarer Grenzen und die damit verbundene Gefahr irreversibler Veränderungen der natürlichen Lebensbedingungen schränkt zudem die Entwicklungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen ein. Zirkuläres Wirtschaften kann vor allem im Bereich natürlicher Ressourcen, aber teilweise auch bei anderen Ressourcen wie der sozialen Vernetzung zu einer Reduktion dieser Ungleichverteilung beitragen.

Während Hoheinkommensländer unter anderem zur Erreichung ihrer Klimaziele zunehmend miteinander um Ressourcen wie Technologiemetalle konkurrieren und Versorgungsengpässe befürchten, stehen vielen Menschen in ärmeren Weltregionen die zur Befriedigung von Bedürfnissen notwendigen natürlichen Ressourcen wie Wasser oder Ackerland nicht in hinreichender Menge und Qualität zur Verfügung. Zirkuläres Wirtschaften kann zur Ressourcengerechtigkeit beitragen und so zur Verbesserung der Entwicklungschancen heutiger und zukünftiger Generationen beitragen. Darüber hinaus kann Zirkuläres Wirtschaften durch Kooperation von Unternehmen und Staaten entlang globaler Wertschöpfungsketten die Ausgangsbedingungen für die individuelle und gesellschaftliche Entwicklung verbessern. Das Ziel ist, dass Menschen in anderen Weltregionen und künftigen Generationen die Ressourcenbasis für nachhaltige Entwicklungsoptionen zur Verfügung steht. Der Indikator „Materialfußabdruck“ kann in Kombination mit wirkungsbezogenen Fußabdruckindikatoren (z.B. Wasserfußabdruck) Hinweise auf bestehende Ungleichheiten geben.

5.4.3 Gerechter Wandel

Zirkuläres Wirtschaften darf nicht zu einer weiteren Verschärfung von Ungleichheiten führen. Diese Gefahr besteht, falls Auswirkungen von Maßnahmen auf schon jetzt sozial benachteiligte Gruppen nicht berücksichtigt werden. Chancen, Risiken, Nutzen und Kosten der Umstellung müssen durch politische Rahmensetzung im Sinne inter- und intragenerationeller Gerechtigkeit und des Verursacherprinzips gerecht verteilt werden (Denter, 2025; EEA, 2023a; Gözet et al., 2025). Das trifft sowohl auf Ungleichheiten innerhalb Deutschlands als auch auf die noch gravierenderen Ungleichheiten zwischen Ländern und Weltregionen zu. Zirkuläres Wirtschaften in Deutschland darf nicht auf Kosten von Menschen und Natur in anderen Weltregionen

¹⁶ Menschenrechtsbericht | Institut für Menschenrechte ([institut-fuer-menschenrechte.de](https://www.institut-fuer-menschenrechte.de))

¹⁷ <https://www.amnesty.org/en/location/europe-and-central-asia/western-central-and-south-eastern-europe/germany/report-germany/>

realisiert werden. Positive Auswirkungen müssen gezielt herbeigeführt werden. Mögliche negative Auswirkungen müssen frühzeitig erkannt, vermieden und, falls bereits eingetreten, reduziert oder als letzte Möglichkeit kompensiert werden. Indikatoren wie der „Leave-no-one-behind“ Index für die EU (Lafortune, Guillaume et al., 2024) weisen eine grobe Richtung, können aber Effekte von Zirkulärem Wirtschaften nicht gut abbilden, da sie durch viele weitere Faktoren beeinflusst werden. Auf EU-Ebene gibt es ein Indikatoren-Set für den EGD und den Aspekt der „green and just transition“, welches zurzeit noch sehr wenige Aspekte abbildet. Weil das Thema „Just Transition“ so vielschichtig ist, sollte ein Indikatorenset genutzt werden (Heyen, Dirk Arne, 2021).

5.5 Wirtschafts- und sicherheitspolitische Ziele

5.5.1 Sicherheit und Resilienz

Die Bundesregierung verfolgt in ihrer nationalen Sicherheitsstrategie einen integrierten Sicherheitsbegriff, der Wehrhaftigkeit, Resilienz und Nachhaltigkeit umfasst (Bundesregierung, 2023b). Andere Konzepte verstehen Sicherheit, Nachhaltigkeit (vgl. 3.2) und Resilienz (vgl. 3.3) als sich überlappende, in Wechselwirkung zueinander stehende Zieldimensionen von strategischer Souveränität (Wörner & Schmidt, 2022). Sicherheit umfasst dabei die äußere Sicherheit (defence), die innere Sicherheit (security), die Betriebssicherheit (safety) und die Versorgungssicherheit (Lieferketten, insbesondere Rohstoffe, Energie, Lebensmittel, etc.).

Aufgrund dieser systemischen Wechselbeziehungen und unklaren Abgrenzungen betrachten wir Sicherheit und Resilienz integriert als wirtschafts- und sicherheitspolitische Zieldimension Zirkulären Wirtschaftens. Nachhaltigkeitsaspekte werden in den umwelt-, sozial- und entwicklungspolitischen Zielen adressiert.

Die zirkuläre Nutzung von (kritischen) Rohstoffen und Produkten, die sie enthalten, trägt zur Versorgungssicherheit bei und stärkt durch Diversifizierung von Bezugsquellen die Resilienz der Wirtschaft und mittelbar der Gesellschaft (vgl. 3.1 und 5.1). Zirkuläres Wirtschaften kann zur Wehrhaftigkeit und äußeren Sicherheit beitragen, indem strategische Rohstoffe für die Verteidigung weitestmöglich zurückgewonnen werden.

Sicherheit, wirtschaftliche und gesellschaftliche Resilienz sowie strategische Souveränität sind Voraussetzungen für ein gutes Leben in Freiheit. Im Unterschied zu den anderen Zielen ist diese Zieldimension nicht zwingend universalistisch, da es um die Sicherheit von Menschen in Deutschland und der EU, nicht allen Menschen geht. Daher ist insbesondere hier der „do-no significant-harm“ Ansatz zum Umgang mit Zielkonflikten (vgl. 5.2) zu beachten.

6 Strategien – Wesen Zirkulären Wirtschaftens

6.1 Auswahl und Zusammenspiel der Strategien

Die folgenden Strategien beschreiben Vorgehensweisen, um durch den Erhalt von Wert und Funktion von Materialien und materialnutzenden Systemen zur Erreichung von Zielen beizutragen. Sie orientieren sich an anerkannten Prinzipien und Strategien Zirkulären Wirtschaftens: *Narrow, Slow, Cycle* und *Regenerate* aus den *Circularity Gap Reports* (CGR) (Circle Economy, 2022, 2023, 2025) und *Narrowing the loop, Slowing the loop, Closing the loop* und *Substitution* aus den *Integral Circular Economy Reports* (ICER) der niederländischen Umweltagentur PBL (Hanemaaijer et al., 2023) sowie *Schadstoffvermeidung/-reduzierung* und *verantwortungsvolles Handeln* aus den „Leitsätzen einer Kreislaufwirtschaft“ des Umweltbundesamts (Müller et al., 2020).

Abbildung 11: Strategien Zirkulären Wirtschaftens



Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

Die Strategien ergänzen sich und tragen zu einer langfristigen, gesamtwirtschaftlichen und quantitativen Reduzierung der Materialflüsse sowie zu einer qualitativen Aufwertung der Materialkreisläufe bei. In die Wirtschaft eingebrachte Materialien werden kreislauffähig entworfen und durchlaufen mehrere, möglichst hochwertige Nutzungszyklen, wodurch Materialverluste in Form von Abfällen, Emissionen und dissipativen Verlusten (vgl. Abbildung 4) vermieden werden (close). Produkte werden länger und intensiver genutzt (slow), bevor sie der Abfallwirtschaft zugeführt werden. Produkte werden mit einem geringeren Material- und Energieaufwand hergestellt (narrow). Materialien werden durch alternative Materialien ersetzt (substitute), die sich im Vergleich weniger störend auf natürliche Kreisläufe auswirken und besser verfügbar sind. Materialien, die nur schwer substituiert werden können, eingeschränkt verfügbar sind und aufgrund ihrer Systemrelevanz und funktionalen Eigenschaften unverzichtbar sind, sind von besonderem Interesse: Diese kritischen oder strategischen

Materialien werden gesichert (secure). Materialkreisläufe sind möglichst rein und unvermischt sowie arm an Stör- und Schadstoffen (clean) und werden verantwortungsvoll unter Einhaltung sozialer und ökologischer Mindeststandards geführt (act responsibly).

Die Strategien sind nicht hierarchisch angeordnet, und sie können im Einzelfall gegenläufig zueinanderstehen. So kann etwa das Schließen von Materialkreisläufen (close) im Konflikt mit dem Ausschleusen von Schadstoffen (clean) stehen. Sie sind daher fallspezifisch hinsichtlich ihres Beitrags zu den Zielen gegeneinander abzuwägen (Müller et al., 2020).

6.2 Close (Schließen): Ströme zu Kreisläufen schließen

Materialien werden kreislauffähig entworfen und durchlaufen möglichst viele und hochwertige Nutzungszyklen. Damit werden Materialverluste weitestgehend vermieden.

Materialkreisläufe sind ineinander verschachtelt und miteinander verkettet: Sie können bereits in der Produktion geschlossen werden (pre-consumer Recycling), bis sie am Lebensende von Produkten als Abfälle zur Wiederverwendung vorbereitet, recycelt oder als letztmögliche Nutzung sonstig verwertet werden, z. B. durch energetische Verwertung oder Verfüllung. Diese Materialkreisläufe werden in Abgrenzung zu Produktkreisläufen auch als äußere Kreisläufe bezeichnet.

Die Substitution von Primärmaterialien durch Sekundärmaterialien, also die Kreislaufschließung, kann den Material- und Energiebedarf reduzieren und Materialverluste vermeiden, geht in der Regel mit geringeren Belastungen für Mensch und Umwelt einher und kann so zu den umweltpolitischen Zielen, den Entwicklungschancen anderer Weltregionen und der Resilienz der Wirtschaft beitragen. Da Materialien unterschiedlich kreislauffähig sind, nicht ewig im Kreislauf geführt werden können, dissipative Verluste und Durchmischungen unvermeidlich sind und wachsende Systeme auf Primärrohstoffe angewiesen sind, wird der Einsatz von Primärmaterialien immer erforderlich sein.

Downcycling wird vermieden, um Materialien langfristig über möglichst viele Zyklen im Kreislauf halten zu können. Der dafür notwendige Energie- und Stoffeinsatz (z. B. für Trenntechnik und weitere Aufbereitungsschritte) darf dabei ein ökologisch sinnvolles Maß nicht überschreiten.

Indikatoren: Auf gesamtwirtschaftlicher Ebene berichtet Eurostat jährlich für Deutschland die „Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe“ (engl. Circular Material Use Rate, CMUR). Die CMUR stellt den Anteil des recycelten und wieder in die Wirtschaft eingespeisten Material im gesamten Materialeinsatz dar und sollte möglichst hoch sein. Die EU strebt eine Verdopplung der CMUR von 2020 bis 2030 an (EEA, 2023b). Die NKWS schließt sich diesem Ziel an. Die „Recycling-Rate am Ende des Lebens (EOL-RIR)“ wird auf EU-Ebene für einzelne (kritische) Rohstoffe berichtet. Mithilfe der Indikatoren DERec (Direct Effects of Recovery) und DIERec (Direct and Indirect Effects of Recovery) werden in UBA-Forschungsprojekten die tatsächlichen Verwertungs- und Rückführungsqualitäten von Sekundärrohstoffen sowie die dadurch eingesparten Rohstoffe in der Primärproduktion abgeschätzt (Steger et al., 2019). Analog dazu werden Primärenergieeinsparungen mithilfe des Kumulierten Energieaufwands (KEA-Saldo) ausgewiesen und aktuelle Forschungsprojekte befassen sich mit den durch Recycling verbundenen Einsparungen an Treibhausgasemissionen (direkter Bezug zum Ziel Klimaschutz).

6.3 Slow (Verlangsamen): Nutzung verlängern und intensivieren

Produkte, ihre Komponenten, Infrastrukturen und Gebäude werden deutlich länger und intensiver wert- und funktionserhaltend genutzt.

Den Nutzungszyklus eines Produkts zu verlängern, trägt stärker zur Verlangsamung bei als die Schließung innerer Kreisläufe durch Wiederverwendung (mehrfache Produktnutzungszyklen), die wiederum Vorrang vor der äußeren Kreislaufschließung durch Recycling (mehrfache Materialnutzungszyklen s. 6.2) hat. Eine Grundvoraussetzung für eine längere und intensivere Nutzung von Produkten ist, dass bereits in der Design-Phase auf Langlebigkeit und Reparierbarkeit sowie auch auf die Verfügbarkeit von Ersatzteilen geachtet wird. Die Nachfrage nach Materialien sinkt in der Folge über die Zeit, sodass der gesamtwirtschaftliche Bedarf an Energie, Rohstoffen, Grundstoffen und Halb- und Fertigwaren reduziert wird. Beiträge zu den umweltpolitischen Zielen werden realisiert, wenn die notwendigen Erhaltungsmaßnahmen in Summe nicht mit höheren negativen Umweltauswirkungen einhergehen.

Indikatoren: Die jährliche Zunahme des anthropogenen Lagers gibt eine erste Indikation inwieweit die physische Volkswirtschaft wächst. Dieser Indikator („material stock growth“) wird jährlich von der EEA anhand von Eurostat-Statistiken abgeschätzt und ist auch für Deutschland verfügbar. Ein größeres anthropogenes Lager ist generell auch mit mehr Energie- und Rohstoffbedarfen zur Instandhaltung verbunden und industrialisierte Länder wie Deutschland sollten mittelfristig auf ein Netto-Null Wachstum des anthropogenen Lagers abzielen. Indikatoren für Reparatur, Abfallvermeidung und zur Wiederverwendung von Produkten (Gsell et al., 2024; Ritthoff et al., 2022; Wilts et al., 2019) können tiefere Einblicke geben, ob und wie erfolgreich die Strategie „slow“ verfolgt wird.

6.4 Narrow (Verengen): Weniger ist mehr

Durch einen effizienteren und vor allem genügsameren Umgang mit verfügbaren Primär- und Sekundärmaterialien wird langfristig die Gesamtheit der Material- und Energieflüsse in der Wirtschaft absolut reduziert.

Diese Reduktion wird erreicht, wenn material- und energieintensive Produkte und Bauwerke aufgrund von suffizienteren Lebensstilen und veränderten Geschäftsmodellen gar nicht erst produziert bzw. gebaut oder material- und energieeffizienter hergestellt, genutzt oder betrieben werden.

Durch ein „Weniger“ sinken nicht nur die Primärrohstoffentnahme und der damit verbundene Eingriff in die natürliche Umwelt, sondern auch die (energetischen) Aufwendungen für die Weiterverarbeitung zu Halbwaren, für Herstellung, Transport, Nutzung und Entsorgung von Fertigwaren sowie für die Errichtung und den Betrieb von Bauwerken. Abgaben an die Umwelt in Form von Abfällen und Emissionen werden so gleichfalls reduziert. Dadurch können Beiträge zu den umweltpolitischen Zielen geleistet werden, auch zu den Entwicklungschancen aktueller und zukünftiger Generationen weltweit. Darüber hinaus kann die Wirtschaft durch Reduktion der Abhängigkeit von Rohstoffimporten resilienter gemacht werden.

Indikatoren: Die Größe des sozioökonomischen Metabolismus insgesamt kann anhand des Eurostat Indikators „Processed Materials“ abgeschätzt werden. Der Indikator beinhaltet sowohl Primär- als auch Sekundärmaterialbedarfe und ist jährlich verfügbar. Der Gesamtmaterialdurchsatz sollte möglichst klein gehalten werden.

6.5 Substitute (Ersetzen): Materialien im Einklang mit natürlichen Kreisläufen nutzen

Materialien werden auf eine Art ersetzt, die die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen und ihre Fähigkeit zur Regeneration und Aufnahme von Emissionen erhöht.

Die Funktion eines Produkts oder Systems bleibt durch Substitution erhalten und Bedürfnisse werden somit weiterhin erfüllt. Systeme, Prozesse und Produkte werden so umgestaltet, dass sie auch mit dem Einsatz von alternativen Materialien funktionieren und insgesamt weniger negative Wirkungen auf Mensch und Umwelt aufweisen. Dies erfordert bei Produkten eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus. Substitution beschränkt sich dabei nicht auf Materialien und Produkte (z. B. Natrium- anstatt Lithium-Ionen-Batterie), es werden auch Technologien und Prozesse (Elektro- anstatt Verbrennermotor) und Systeme (Zug- anstatt Autofahren) ersetzt.

Dieses Verständnis geht darüber hinaus, dass abiotische Rohstoffe generell durch biotische ersetzt werden sollten, denn letztere haben nicht zwangsläufig eine bessere Umweltbilanz, sind nicht unbedingt recyclingfähig, können ihrerseits zur Erschöpfung begrenzt verfügbarer Ressourcen (Land, Boden, Wasser) beitragen und besitzen zudem häufig nicht die erforderlichen Materialeigenschaften, zum Beispiel für die Substitution von Metallen.

Bio-basierte Produkte sollten aber nur dann in biologische Kreisläufe zurückgeführt werden, wenn es keine weiteren (materiellen und energetischen) Verwendungen für sie gibt, sie nicht mit Schadstoffen belastet sind und sie ohne negative Umweltwirkungen aufgenommen werden können (UBA, 2023a). Technische Kreisläufe bio-basierter Produkte gilt es also in biologische Kreisläufe einzubetten, z. B. durch Verhinderung von Vermischung und eine schadstoff-minimierte Produktgestaltung.

Indikatoren: Passende Indikatoren liegen nicht direkt aus den amtlichen Statistiken vor. Das UBA erstellt jährlich die Emissionsbilanz für erneuerbare Energieträger, die ausweist wie viel Treibhausgasemissionen durch den Einsatz von Erneuerbaren in den Sektoren Strom, Wärme und Verkehr vermieden wurden (Lauf et al., 2023). Vereinzelt wurden in der wissenschaftlichen Literatur Indikatoren entwickelt, die aber auf Grund mangelnder Daten und Kapazitäten nicht regelmäßig erhoben werden, wie der „Substitution Share Indicator, SSI“ (Jander & Grundmann, 2019). Um die Auswirkungen von Substitution auf die Ziele abzuschätzen, bedarf es oftmals aufwendiger, komparativer Input-Output- und LCA-Modellierungen.

6.6 Secure (Sichern): Kritische Rohstoffe in Kreisläufen sichern, strategische Rohstoffe gezielter einsetzen

Kritische Rohstoffe werden durch Optimierung von Materialkreisläufen gesichert. Strategische Rohstoffe werden bevorzugt für strategische Anwendungen verwendet.

Kritische Rohstoffe im Sinne des EU Critical Raw Material Act (CRMA, 2024) sind Rohstoffe von hoher Bedeutung für die EU-Wirtschaft und erhöhtem Risiko für Versorgungsunterbrechungen. Dies betrifft aktuell 34 Rohstoffe, von Aluminium, über Cobalt und Seltene Erden bis Vanadium. Strategische Rohstoffe im Sinne des CRMA weisen eine stark steigende Nachfrage für die grüne und digitale Transformation sowie für Verteidigungs- und Luftfahrtanwendungen auf. Jedoch ist unsicher, ob ihr Angebot im erforderlichen Maße ausgeweitet werden kann. Diese sollten bevorzugt für strategische und weniger für nicht-strategische Anwendungen, z. B. Einwegverpackungen, verwendet werden. Bis auf Kupfer und Nickel werden alle 17 durch den CRMA als strategisch eingestuft Rohstoffe aktuell auch als kritisch eingestuft. Bis 2030 sollen 25 % des europäischen Bedarfs an strategischen Rohstoffen durch europäische

Recyclingkapazitäten gedeckt werden können (CRMA, 2024). Mit der NKWS schließt sich Deutschland diesem Ziel an.

Die Kreislaufführung kritischer Rohstoffe innerhalb der EU sichert zunächst die Materialbasis für Wertschöpfung in der EU und trägt somit zur Resilienz der EU-Wirtschaft bei. In der längeren Perspektive kann der funktionale Erhalt von Technologierohstoffen als physische Basis moderner Industriegesellschaften auch die Entwicklungschancen in anderen Erdregionen stärken, wenn etwa Bedarfe in der EU demografisch bedingt sinken und Teile des anthropogenen Lagers in Weltregionen mit steigendem Bedarf exportiert werden.

Wenn strategische Rohstoffe für die grüne Transformation eingesetzt werden, trägt dies mittelbar auch zu den umweltpolitischen Zielen, vor allem dem Klimaschutz bei. Ihr Einsatz für andere strategische Anwendungen im Bereich Digitalisierung oder Verteidigung kann sich positiv auf die Sicherheit auswirken.

Indikatoren: Der jährlich berichtete Eurostat Indikator „Material import dependency“ betrachtet, inwieweit Deutschland von Rohstoffimporten insgesamt abhängig ist. Dabei wird allerdings keine Gewichtung bzgl. der Kritikalität bzw. Relevanz der Rohstoffe für Zukunftstechnologien unternommen (u.a. aufgrund der aggregierten Rohstoffkategorien im Indikator). Daten zur Kritikalität einzelner Rohstoffe können z.B. aus EU Kritikalitäts- und Foresight-Studien stammen. Weiterer Forschungsbedarf ist jedoch gegeben, um passende Indikatoren für Deutschland auszuwählen.

6.7 Clean (Reinigen): Kreisläufe sauber halten

Das Einbringen von Schad- und Störstoffen wird vermieden, ihr unvermeidlicher Einsatz dokumentiert und sie werden ausgeschleust.

In einer Zirkulären Wirtschaft enthalten Materialien und materialnutzende Systeme wesentlich weniger Schad- und Störstoffe, da sie Mensch und Umwelt schädigen und/oder eine Kreislaufführung erschweren oder verhindern können. Die Ausschleusung von Schadstoffen aus Stoffkreisläufen bleibt eine wichtige Aufgabe, um sicherzustellen, dass die im Kreislauf geführten Wertstoffe sicher und ungefährlich sind. Aber nicht nur Schadstoffe, sondern auch störende Fremdstoffe und Materialien müssen dem Kreislauf zur Erhaltung einer hohen Materialqualität entzogen bzw. deren Einbringung vermieden werden. Beispielsweise beeinflussen Farbstoffe in Glas oder Kunststoffen deren weitere Verwendbarkeit. Unvermeidbare Verwendungen solcher Stoffe müssen dokumentiert werden und entsprechende Informationen für alle Akteure im Materialkreislauf nachvollziehbar sein. In Materialkreisläufe eingebrachte Schad- und Störstoffe werden im Zuge der Aufbereitungsprozesse idealerweise zerstört oder durch Ablagerung in sichere Senken ausgeschleust. Je zirkulärer die Wirtschaft wird, desto relevanter ist die Schad- und Störstoffausschleusung und -vermeidung, da reines Verdünnen oder großzügiges Ablagern nicht mehr möglich sind.

Ein solches Vorgehen trägt dazu bei, dass es zukünftig keine schädlichen Wirkungen für Mensch und Umwelt durch Schadstoffe mehr gibt und eine saubere Umwelt entsteht.

Indikatoren: Im Monitoringbericht für Chemikalien der EEA (EEA, 2024) finden sich 7 Indikatoren für den Bereich „Safe and sustainable chemicals“, 12 für „Minimise and control the risks“ und 16 für „Eliminate and remediate chemical pollutant“. Weiterer Forschungsbedarf besteht darin, passende Indikatoren für Zirkuläres Wirtschaften in Deutschland auszuwählen.

6.8 Act responsibly (Verantwortungsvoll handeln): Kreisläufe verantwortungsvoll speisen und führen

Akteure übernehmen Verantwortung für die Materialien, die sie nutzen, und für die direkten und indirekten Auswirkungen ihres Handelns auf Menschen und ihre Umwelt. Sie kooperieren entlang von globalen Wertschöpfungs- und Lieferketten, um dafür zu sorgen, dass die Materialien und Produkte, die in den Kreislauf eingehen, unter Einhaltung international anerkannter sozialer und ökologischer Mindeststandards gewonnen oder hergestellt und dass Material- und Produktkreisläufe verantwortungsvoll geführt werden.

Wirtschaftsakteure nehmen ihre Materialverantwortung wahr und tragen so zur Erreichung der Ziele einer Zirkulären Wirtschaft bei. Das heißt, sie verstehen die lebenszyklusweiten Auswirkungen ihrer Materialien auf Mensch und Umwelt, bauen Beziehungen zu anderen Akteuren entlang des Materiallebenswegs auf und werden im eigenen Einflussbereich aktiv, um negative Auswirkungen zu minimieren und positive zu maximieren (Nickless & Yakovleva, 2022). Das Konzept der Materialverantwortung ergänzt die von Produktlebenszyklen ausgehende erweiterte Herstellerverantwortung um eine Materiallebenszyklusperspektive (Wilts et al., 2011).

Wirtschaftsakteure können darüber hinaus zu den umweltbezogenen Zielen sowie der Achtung der Menschenrechte beitragen, wenn sie ihr Handeln an den *UN Leitprinzipien für Wirtschaft und Menschenrechte* (United Nations, 2011) und den *OECD Leitsätzen zu verantwortungsvollem unternehmerischem Handeln* (OECD, 2023) mit den damit verbundenen Leitfäden und Handbüchern ausrichten, insbesondere wenn sie dabei neben ihren menschenrechtlichen Sorgfaltspflichten auch ihren umweltbezogenen Sorgfaltspflichten (OECD, 2024; Scherf et al., 2020) nachkommen. Staaten sollten dieses verantwortungsvolle Handeln durch Regeln und Beratung unterstützen.

Indikatoren: Mögliche Indikatoren sollten abbilden, wie sich die Anzahl der Unternehmen in Deutschland, die Sorgfaltspflichtsysteme betreiben, die bis zur Materialbeschaffung reichen, entwickelt. Derartige Erhebungen wurden im Rahmen des Monitorings zum Aktionsplan Wirtschaft und Menschenrechte durchgeführt. Die schwachen Ergebnisse waren der Anlass zur Entwicklung des Lieferkettensorgfaltspflichtengesetzes. Um auch die Wirksamkeit der Sorgfaltspflichtsysteme zu überwachen, könnten in einem weiteren Indikator die im Rahmen der deutschen und europäischen Lieferkettengesetze gemeldeten Beschwerdefälle erfasst werden. Dem Kerngedanken der Sorgfaltspflichten einer kontinuierlichen und kooperativen Verbesserung folgend sollte hier das Verhältnis der Beschwerdefälle, die im Einvernehmen der Betroffenen gelöst werden konnten zur Gesamtanzahl der registrierten Beschwerdefälle erfasst werden.

Indikatoren zu möglichen Missständen in Rohstofflieferketten lassen sich aus Handelsstatistiken (wieviel importiert Deutschland aus welchen Ländern) in Verknüpfung mit Governance- bzw. Risk-Metriken auf Länderebene herleiten. Daten sind z.B. gut verfügbar für den World Governance Indicator Politische Stabilität und Abwesenheit von Gewalt/Terrorismus), INFORM Index (Risiko von humanitären Krisen und Katastrophen, die die nationalen Reaktionskapazitäten überfordern könnten) und Sicherheit am Arbeitsplatz (engl. Occupational Safety) (s. z.B. (ETC CE, 2022) für eine Übersicht verfügbarer Daten auf Länderebene). Derartige Screening-Tools können eine Einzelfallanalyse nicht ersetzen: Unbedenkliche Wert können gravierende Einzelfälle kaschieren, schlechte Ergebnisse können zur Meidung ganzer Regionen führen, was dem Sorgfaltspflichten Prinzip „Engagement vor Rückzug“ zuwiderläuft.

7 Große Hebel Zirkulären Wirtschaftens aus vier Perspektiven – Zielbeiträge maximieren

Abbildung 12: Darstellung der Hebel Zirkulären Wirtschaftens im Zielsystem



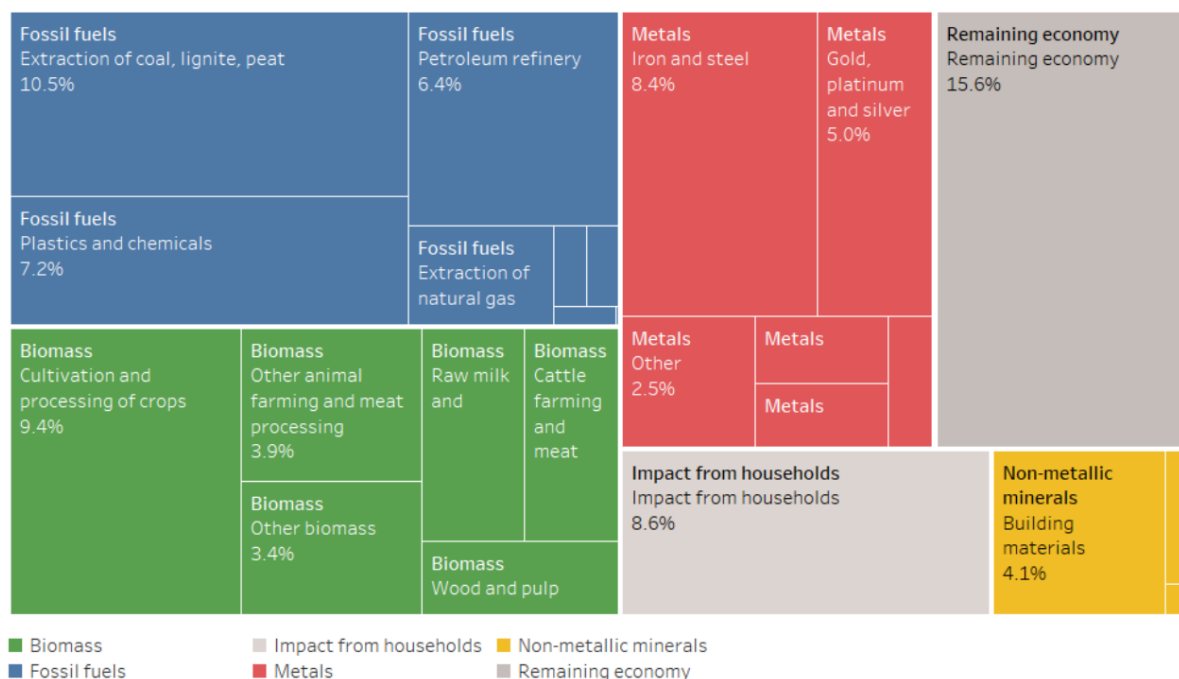
Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

7.1 Hebel aus Materialperspektive

Eine der vier hier eingenommenen Perspektiven zur Identifizierung großer Hebel (4.2) ist die Materialperspektive. Materialien werden auf Basis ihrer Herkunft und Eigenschaften in vier Kategorien unterteilt: Fossile Rohstoffe, biotische Rohstoffe, Metallerze und nicht-metallische Mineralien. Jede Kategorie erfordert andere Strategien und Handlungen. Bezogen auf die Umweltbelastungen sowie Menschenrechtsverletzungen (vgl. 2.2) bei der *Materialentnahme* aus der Natur und der ersten Verarbeitung sind fossile Rohstoffe, Biomasse und Metallerze von großer Bedeutung. Abbildung 13 zeigt, dass sie einen Anteil von ca. 75 % am Umweltfußabdruck der EU 27 ausmachen, während der größte Massenstrom, nicht-metallische Mineralien, einen wesentlich geringeren Fußabdruck aufweist. Mit Blick auf die umweltpolitischen Ziele ist daher die absolute Reduzierung der Entnahme fossiler Rohstoffe (Hebel 01), eine kreislauforientierte Produktion und Nutzung von Biomasse (Hebel 02) und eine verantwortungsvolle Gewinnung und Verarbeitung von Metallen (Hebel 03) sowie die Wiedergewinnung insbesondere auch nicht-metallischer Mineralien aus einem bisher stetig wachsenden anthropogenen Lager (Hebel 04) grundsätzliche Ansatzpunkte für die Transformation aus Materialperspektive. Obwohl nicht-metallische Mineralien einen geringeren Umweltfußabdruck als die anderen Materialien aufweisen, werden sie in Hebel 04 thematisiert, weil sie nicht in gleichbleibender Qualität zur Verfügung stehen (Downcycling), ein hohes Abfallvolumen verursachen können und möglicherweise nicht alle Umweltwirkungen in der Berechnung berücksichtigt wurden.

Bezogen auf die *Materialabgaben* an die Natur spielen neben Treibhausgasemissionen und Luftschadstoffen, hauptsächlich generiert durch die energetische Nutzung fossiler und biotischer Rohstoffe (Hebel 01, 02), jene Materialien eine entscheidende Rolle, die eine schädliche Wirkung auf Mensch und Umwelt haben, weil sie kaum bis gar nicht in sicheren Kreisläufen geführt werden können (Hebel 05). Dazu zählen unter anderem synthetisch hergestellte Materialien wie Pflanzenschutzmittel, Bautenschutzmittel, Biozide oder Schwermetalle.

Abbildung 13: Beitrag der Rohstoffextraktion und -verarbeitung zum Umweltfußabdruck der EU-27



Quelle: Christis et al., 2023, CC BY 4.0

7.1.1 Fossile Rohstoffe im Boden lassen

Hebel 01: Fossile Rohstoffe im Boden lassen

Verbleiben fossile Rohstoffe im Boden, so gehen die positiven Effekte über die Einsparung der THG-Emissionen und folglich den Klimaschutz hinaus. Die damit einhergehende Reduzierung von Feinstaubemissionen und Versauerung hätte zusätzlich positive Wirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Biodiversität (Steinmann et al., 2017). In der EU tragen allein die durch den Konsum verursachte Extraktion fossiler Rohstoffe und deren erste Verarbeitung (Raffinerie, Herstellung von Chemikalien) erheblich zum Klimawandel (20 %), zur Nutzung anderer abiotischer Rohstoffe (14 %) und zu Feinstaubemissionen (9 %) bei (Christis et al., 2023).

In einer Zirkulären Wirtschaft wird der volkswirtschaftlich gesehen massenmäßig größte und schnellste Verlust an Material, nämlich der in Kohle, Erdöl und Erdgas enthaltene Kohlenstoff, vermieden (narrow). Die Verbrennung fossiler Rohstoffe sowie fossil-basierter Materialien und Produkte steht dem Ziel zirkulär zu wirtschaften entgegen. Eine bessere Kreislaufführung fossil-basierter Materialien wie Kunststoffe (close) würde zwar zu einer längeren Verweildauer des Kohlenstoffs führen, Abfälle und Emissionen würden aber nur zeitlich verzögert anfallen. Eine Wiedernutzung fossilen Kohlenstoffs (close) und damit eine Nichtentlassung in die oder Entfernung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre, ist u.a. mit Technologien wie „Carbon Capture and Utilization“ möglich. Die natürliche Kreislaufführung von Kohlenstoff mit Hilfe natürlicher Senken wie Wäldern, Böden und Meeren sollte nicht vermeidbaren Emissionen vorbehalten werden.

Mit knapp 50 % stellt das Handlungsfeld Energieversorgung¹⁸ den mit Abstand größten Hebel Zirkulären Wirtschaftens für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen in Deutschland dar (Kadner et al., 2021)¹⁹. Wirkungsvolle Veränderungen, die den fossilen Rohstoffbedarf absolut senken (narrow), setzen beim Konsum an: Energieeffizienz und Bedarfsreduktionen spielen eine „Schlüsselrolle im Transformationspfad hin zu einer treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Energieversorgung“ (Purr, Günther, et al., 2021). Diese werden in zwei weiteren Hebeln zum Wohnen (12, s. 7.4.1) und Mobilitätsverhalten (13, s. 7.4.2) thematisiert.

Um auch weiterhin ein gutes Leben zu ermöglichen, muss Energie aus alternativen Quellen bereitgestellt werden. Der Ausbau der erneuerbaren Energien (substitute) und eine damit einhergehende Defossilisierung der Versorgung mit Strom, Wärme, Kraftstoffen und chemischen Grundstoffen in Deutschland schreitet voran. Eine weltweite ambitionierte Energiewende²⁰ würde die durch den globalen Energiebedarf bedingten Treibhausgasemissionen bis 2050 gegenüber 2020 um 97 % senken, bei gleichzeitig reduziertem abiotischen Rohstoffbedarf um 77 % und einer Verminderung der Versauerung, Eutrophierung und Feinstaubbelastung (Dittrich et al., in Veröffentlichung). Die Nutzung vorhandener Potentiale, z. B. der Abwärmennutzung (Hebel 08, s. 7.2.3), und die effiziente Integration von Sektorkopplungstechnologien (u.a. Power-to-X) müsste wesentlich stärker als bisher vorangetrieben werden (Purr et al., 2016), um auch sektorspezifische Ziele für Verkehr und Gebäude (Schultz et al., 2024) und eine Rohstoffwende in der chemischen Industrie erreichen zu können (siehe auch Hebel 07, s. 7.2.2).

Die Substitution fossiler Energieträger mit Erneuerbare-Energien-Technologien resultiert zwar durch die Einsparung fossiler Energieträger insgesamt in einem Rückgang des Rohstoffbedarfs (Nijns et al., 2023), aber auch in einem Mehrbedarf an Metallen. Deshalb sind ein

¹⁸ Ohne Verkehr

¹⁹ Basierend auf Purr et al. (2021)

²⁰ Vergleichbar zu Purr et al. (2021)

verantwortungsvoller Bezug (Hebel 03, s. 7.1.3), höherwertiges und sortenreines Recycling (Hebel 06, s. 7.2.1) und eine längere Nutzung (Hebel 09, s. 7.3.1) erforderlich.

Zugleich würde eine Substitution von fossilem mit biogenem Kohlenstoff Nutzungskonkurrenzen (auch um biogene Abfall- und Reststoffe) verschärfen und die natürlichen Ressourcen Boden, Luft und Wasser noch stärker beanspruchen (Dittrich et al., in Veröffentlichung). Um Problemverlagerungen zu vermeiden, ist also die Umsetzung einer zirkulären Bioökonomie erforderlich.

7.1.2 Bioökonomie zirkulär gestalten

Hebel 02: Bioökonomie zirkulär gestalten

In der Bioökonomie werden biotische Rohstoffe angebaut, geerntet oder entnommen, verarbeitet und gehandelt, um Nahrungsmittel, bio-basierte Materialien und Produkte sowie Bioenergie bereitzustellen. Die Bioökonomie in Deutschland nutzt zu 75 % Rohstoffe aus der Landwirtschaft und zu 25 % aus der Forstwirtschaft. Diese werden verwendet als Futtermittel (45 %), zur Energiegewinnung (25 %), zur stofflichen Nutzung (20 %) und als Nahrungsmittel (10 %) (Bringezu et al., 2020). Der Rohstoffeinsatz in Deutschland speist sich zu großen Teilen aus Importen forstwirtschaftlicher (59 %) und landwirtschaftlicher (44 %) Biomasse (Lutter et al., 2022).

Die aktuelle Wirtschaftsweise verursacht erhebliche Umweltbelastungen: Die Bereitstellung von biotischen Rohstoffen für die EU-Bioökonomie trägt, verglichen mit der Bereitstellung anderer Rohstoffe, erheblich zur Wassernutzung (76 %), Landnutzung (72 %), zu Eutrophierung (61 %) und Versauerung (50 %), Feinstaubemissionen (23 %) und Klimawandel (21 %) bei (Christis et al., 2023). Natürliche Lebensräume werden durch Landnutzungsänderungen und eine intensive Landbewirtschaftung zerstört. Die Landnutzung steht daher in engem Zusammenhang mit dem Verlust an Biodiversität (Steinmann et al., 2017).

In einer zirkulären Bioökonomie werden Biomasse und darin enthaltene Stoffe von Wirtschaftssektoren aufeinanderfolgend genutzt, sodass ein dynamisches Gleichgewicht entsteht zwischen Bioökonomie und Umwelt, in der Stoffe weder aufgebraucht noch akkumuliert werden (Jander et al., in Veröffentlichung). Materialverluste können zum einen durch mindestens eine weitere Nutzung von bio-basierten Produkten, organischen Abfall- und Reststoffen und Komponenten vermieden werden (close, slow). Zum anderen trägt ein geringerer Einsatz natürlicher Ressourcen durch veränderte Produktions- und Konsummuster zu geringeren Emissionen bei (narrow). Voraussetzung für die Kreislaufrückführung von Biomasse ist zudem deren langfristige Verfügbarkeit, welche nur gegeben ist, wenn Ökosysteme intakt sind und natürliche Kreisläufe nicht weiter gestört werden. Der nachhaltige Anbau von Biomasse sollte gefördert werden, z. B. indem natürliche Stoffkreisläufe und Ökosystemfunktionen erhalten und wiederhergestellt werden und gesunde Arbeitsbedingungen sichergestellt werden (substitute, clean, act responsibly).

Eine Transformation des weltweiten Ernährungssystems hin zu einer stärker pflanzenbasierten Ernährungsweise hätte von allen vorgeschlagenen Zirkularitätsmaßnahmen die größte Wirkung auf die planetaren Grenzen zu Stickstoff, Phosphor im Boden und Landnutzung (Circle Economy, 2023; Purr, Günther, et al., 2021; WWF, 2023). Auch die Schließung von (regionalen) Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufen in landwirtschaftlichen Betrieben und der sorgsame Umgang mit bio-basierter Kleidung sind große Hebel (siehe Hebel 07 (s. 7.2.2), 14 (s. 7.4.3) und 15 (s. 7.4.4)).

Daneben ist eine integrierte Betrachtung von unterschiedlichen biotischen Rohstoffen und Nutzungsarten wichtig, um Nutzungskonkurrenzen zu erkennen. In einer zirkulären Bioökonomie wird der Wert biotischer Rohstoffe so lange wie möglich erhalten, indem sie in mehrstufigen Kaskaden²¹ genutzt werden (EEA, 2018). Das setzt voraus, dass die erste stoffliche Nutzung auf einer hochwertigen Ebene erfolgt und eine Kompostierung möglich ist, weil Produkte keine unkompostierbaren Bestandteile enthalten (Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt, 2024). Die energetische Nutzung von Anbaubiomasse und Primärholz ist demnach nicht vereinbar mit der Idee Zirkulären Wirtschaftens, weil enthaltene Kohlen- und Nährstoffe nach nur kurzer Nutzungsdauer und ohne Kreislaufführung als Emission verloren gehen. Auch wenn Kohlenstoff über das Wachstum von Pflanzen teilweise wieder in Wirtschaftskreisläufe eingebracht wird, stellt die energetische Nutzung angesichts der Nutzungskonkurrenzen um biogene Ressourcen als Grundlage für Nahrungsmittel und Produkte und als Kohlenstoffsenke keine nachhaltige Option dar. Deshalb sollte eine direkte Holzverbrennung - wenn überhaupt - nur noch in effizienten, dezentralen Biomassekraftwerken erfolgen. Von der Nutzung von Anbaubiomasse in Biogasanlagen und für Biokraftstoffe sollte schnellstmöglich abgesehen werden²² (clean). Hier stehen effizientere und umweltverträglichere erneuerbare Energieträger zur Verfügung – insbesondere die direkte Nutzung von erneuerbar erzeugtem Strom in Wärmepumpen und Elektrofahrzeugen.

Die Holznutzung müsste viel stärker von der aktuellen energetischen Nutzung in langfristige, stoffliche Anwendungen umgelenkt werden (slow), wie Konstruktionsholz, Holzwerkstoffe für Möbel und Dämmung oder andere innovative Holzprodukte (siehe z.B. Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe, 2022). Die Öffnung der Holzverarbeitenden Industrie für Laubholz hilft zudem, den Waldumbau zugunsten von Biodiversität und Klimaresilienz zu unterstützen. Mit der im Juni 2023 veröffentlichten Holzbauinitiative adressiert die deutsche Bundesregierung diesen Handlungsbedarf ebenso wie einzelne Bundesländer mit eigenen Programmen und Strategien (Bundesregierung, 2023a).

Eine stoffliche Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen am Ende einer kaskadierten Nutzung ist eine Option zur Deckung des Kohlenstoffbedarfs der Chemieindustrie. Die Verwendung von Anbaubiomasse kann für hochwertige, langlebige und recyclingfähige Produkte und nur in begrenzten Fällen (wie Syntheseverleistung der Natur für Feinchemikalienherstellung, schnellwachsende Hölzer für chemie-basierte Materialien auf Basis von Zellulose oder Lignin) eine ökologisch sinnvolle Option darstellen.

²¹ Dabei wird Primärbiomasse zu einem Endprodukt verarbeitet und dieses mindestens ein weiteres Mal stofflich genutzt (Fehrenbach, Horst et al., 2017).

²² Die energetische Nutzung von biogenen Abfall- und Reststoffen sollte als letzte Option von mehrstufigen Kaskaden stehen. Beispielsweise liefert die Vergärung von Gülle nicht nur Energie, sondern auch bodenverträglichen Dünger. Insgesamt sind die Potentiale für Energie aus biogenen Abfall- und Reststoffen aber eher gering und möglicherweise wiederum mit Nutzungskonkurrenzen verbunden (Fehrenbach et al., 2019; Scholwin et al., 2019).

7.1.3 Metalle verantwortungsvoll gewinnen und weiterverarbeiten

Hebel 03: Metalle verantwortungsvoll gewinnen und weiterverarbeiten

Industrielle Wertschöpfung in Deutschland beruht zu einem wesentlichen Anteil auf der Weiterverarbeitung von Metallen. Die Energiewende (Hebel 01 (s. 7.1.1/ close) erzeugt zudem temporär einen Mehrbedarf an Metallen. Sie werden vollständig importiert, teils direkt als Erze, Erzkonzentrate oder Rohmetall, aber teils auch indirekt als Halbzeug. Ein großer Teil geht nicht in Konsum und Investitionen in Deutschland, sondern wird in Form von hochverarbeiteten Gütern wie Fahrzeugen, Maschinen oder Waffen wieder exportiert. Mit ca. 39 % der Importe und auch ca. 39 % der Exporte stellen Metalle im Vergleich zu den anderen drei Materialkategorien den größten Massenstrom²³ im deutschen Außenhandel (2019) dar und machen in der Zusammenschau mit der vergleichsweise hohen Umweltrelevanz ihrer Gewinnung (vgl. Abbildung 13) einen großen Teil des Umweltfußabdrucks der Produktion aus (Lutter et al., 2022).

Unternehmen, die metallische Mineralien und Metalle verwenden, können signifikant zur Reduzierung ihres Umweltfußabdrucks und zur Verbesserung der Lebensbedingungen von Menschen beitragen, indem sie ihren menschenrechts- und umweltbezogenen Sorgfaltspflichten nachkommen (act responsibly). Das bedeutet, dass sie in einem kontinuierlichen Verbesserungsprozess mögliche negative Auswirkungen auf Mensch und Umwelt in ihren Lieferketten ermitteln und ihre Verbindung dazu feststellen. Diese Analyse kann Unternehmen auch dabei helfen, potentielle Versorgungsengpässe zu erkennen so die Resilienz ihrer Lieferketten zu erhöhen. Darauf aufbauend ergreifen sie in Kooperation mit ihren Lieferanten – beginnend mit den schwerwiegendsten und wahrscheinlichsten Fällen – geeignete Maßnahmen zur Vermeidung, Reduktion und als letzte Option Entschädigung (United Nations, 2011). Dabei kommen auch Maßnahmen zur Schließung (close), Verlangsamung (slow) und Einengung (narrow) von Stoffkreisläufen in Betracht. Zudem verfolgen sie die Umsetzung und Ergebnisse ihrer Aktivitäten nach und kommunizieren öffentlich darüber (OECD, 2011, 2018, 2023, 2024).

Die Gewinnung von metallischen Erzen im Bergbau und die anschließende Verhüttung geht mit großen Umweltbelastungspotentialen einher (Dehoust et al., 2020). Häufig sind davon auch Menschenrechte betroffen, etwa das Recht auf Zugang zu sauberem Wasser. Zudem dringt der Bergbau angesichts des weltweit steigenden Metallbedarfs zunehmend in unerschlossene Gebiete mit häufig hohem Biodiversitätswert vor, macht diese durch Infrastrukturentwicklung zugänglich, zieht so weitere, oftmals weitaus flächenintensivere Aktivitäten (Land- und Weidewirtschaft, Siedlungsentwicklung, artisanaler und Kleinbergbau) nach sich und treibt so insbesondere in Tropengebieten die Entwaldung voran (Giljum et al., 2022). Der Bergbau gilt als Hochrisikosektor für Menschenrechtsverletzungen und schwerwiegende Umweltschäden: Mit Abstand die meisten aller umweltbezogenen Beschwerdefälle (39 %) im Rahmen der *OECD Leitsätze für multinationale Unternehmen* beziehen sich auf den Bergbausektor (OECD, 2021).

Für einige Technologiemetalle, aber auch Massenmetalle wie Kupfer, wird in den nächsten Jahrzehnten ein stark steigender Bedarf für die grüne Transformation erwartet (Lèbre et al., 2020; Marscheider-Weidemann et al., 2021). Durch die Einbindung in eine wachsende Weltwirtschaft und diesen zusätzlichen Bedarf wird die deutsche Volkswirtschaft in den nächsten Dekaden weiterhin zu einem relevanten Teil durch Metalle aus dem Bergbau gespeist werden, auch wenn sie zunehmend zirkulär gestaltet und durch Sekundärrohstoffe versorgt wird. Daher ist es zum Erreichen der Ziele unabdingbar, dass metallverwendende Unternehmen in Deutschland, z.B. aus den Sektoren Fahrzeug- und Maschinenbau, dafür Sorge tragen, dass

²³ Gemessen in Rohstoffäquivalenten: „Alle Güter werden in den Rohstoffen ausgedrückt, die für ihre Produktion über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg im In- und Ausland benötigt wurden.“ (Destatis, 2023b)

sich die Menschenrechts- und Umweltsituation in ihren vorgelagerten globalen Lieferketten bis hin zum Rohstoffabbau sukzessive verbessert. Hierfür ist eine adäquate Regelsetzung des Staates ein wichtiges Instrument zur Zielerreichung, um menschenrechts- und umweltkonformes Handeln zu fördern.

7.1.4 Das anthropogene Lager zur Sekundärrohstoffgewinnung bewirtschaften (Urban Mining)

Hebel 04: Das anthropogene Lager zur Sekundärrohstoffgewinnung bewirtschaften (Urban Mining)

Das anthropogene Lager wächst hierzulande jährlich um bis zu 7,5 Tonnen pro Einwohner und Jahr an (Destatis, 2024b). Der Gesamtumfang des anthropogenen Lagers Deutschlands ließ sich 2022 auf ca. 60 Milliarden Tonnen und damit etwa dem 60fachen der jährlichen inländischen Primärrohstoffentnahme Deutschlands bemessen²⁴. Anthropogene Lager enthalten enorme Mengen an wertvollen Stoffen, die inländisch nicht oder nicht mehr aus geologischen Reserven gewinnbar sind. Zwar werden weiterhin neue geologische Vorkommen erschlossen, doch deren Qualität nimmt in der Tendenz ab, bei steigendem Aufwand zur Gewinnung.

Urban Mining zielt auf eine systematische Erschließung des anthropogenen Lagers zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen aus langlebigen Produkten, Gebäuden, Infrastrukturen und Ablagerungen wie Deponien und Halden (close). Es setzt dann an, wenn höhere R-Strategien zur Länger- und Weiternutzung ausgeschöpft sind. Als langlebig werden all jene Güter bezeichnet, die durchschnittlich ein Jahr oder länger im anthropogenen Lager verbleiben. Urban Mining umfasst sowohl Prospektion (Aufsuchen), Exploration (Erkundung), Erschließung und Ausbeutung anthropogener Lagerstätten, die Aufbereitung der gewonnenen Sekundärrohstoffe sowie deren Wiedereinbringen in das produzierende Gewerbe. Dieser verantwortungsvolle Umgang mit Materialien (act responsibly) trägt entscheidend dazu, bei Materialkreisläufen zu schließen (close) und dadurch natürliche Ressourcen zu schonen (umweltbezogene Ziele). Zudem trägt es zu einer diversifizierten Rohstoffversorgung bei und erhöht so die Versorgungssicherheit (secure).

Der Vorlauf beim weiteren Aufbau des anthropogenen Lagers – insbesondere für Infrastrukturen der Energiewende und Güter der Elektromobilität – soll genutzt werden, um dieses hinsichtlich der erwarteten Aufkommensmengen und Qualitäten zu charakterisieren und entsprechende logistische, technologische, wirtschaftliche und rechtliche Rahmenbedingungen für die Rückgewinnung definierter Sekundärrohstoffqualitäten zu schaffen. Dies gilt neben den großen mineralischen Stoffströmen an Baumineralien und Basismetallen mit ihren jeweiligen Downcycling-Problematiken für kritische und strategische Rohstoffe. Dazu zählen Seltenerd-magnetmaterialien – u. a. in Fahrzeugmotoren und Generatoren –, deren Aufkommen in Abfällen sich zwischen 2020 und 2040 voraussichtlich um 350 % steigern wird (Buchert et al., 2022), und Lithium, Kobalt, Mangan und Nickel aus Akkumulatoren (Buchert et al., 2023)

Von zentraler Bedeutung für das Urban Mining sind die Kommunikation und Kooperation in Entsorgungs- und Wertschöpfungsketten. Anzustreben ist deren vertikale Integration vom Aufkommen bis zum Wiedereinsatz sowie verbindliche Qualitätsdefinitionen und die Gütesicherung der Sekundärrohstoffe, die mitunter deutlich verbesserte Technologien (neue Sortier- und Trenntechniken) und eine optimierte Logistik bedingen. Zur Erschließung und Ausbeutung anthropogener Lager können digitale Produktpässe (DPP) zukünftig eine robuste Datenquelle darstellen, wenn diese standardisiert und verbindlich etabliert werden. Ihre

²⁴ Eigene Berechnung / Extrapolation auf Basis von (Schiller et al., 2015)

Informationen sollen aber zuvor auch der Erkundung (Prospektion) und Kartierung des anthropogenen Lagers dienen, indem diese in Typologien, Materialkataster und Datenbanken mit Szenarioanalysen einfließen. Mit Blick auf Bauwerke ist die Integration von Materialinventaren sowie Rückbau- und Recyclingkonzepten in digitale Ressourcenpässe als Teil von digitalen Gebäudepässen erforderlich (Schiller et al., 2022); ebenfalls mit dem Ziel der Erarbeitung von regionalen Materialkatastern, die ein synergistisches Bindeglied zwischen Rohstoffsicherung, Raum- und Regionalplanung, Entsorgungswirtschaft und Bauindustrie schaffen.

Wachstumsdynamiken und lange Verweilzeiten der Güter, deren kreislauf- und insbesondere recyclinggerechtes Design, insbesondere im Bauwesen (Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt, 2024), sind neben Explorations- und Aufbereitungstechnologien die maßgeblichen Determinanten dafür, in welchem Umfang die Materialbedarfe zukünftig aus dem Bestand heraus in Form von Sekundärmaterial bereitgestellt werden können. Die derzeit am Umweltbundesamt vorbereitete nationale Urban Mining Strategie soll nicht nur einen temporären Strategieprozess initiieren, sondern einen integrativen und langfristig verbindlichen Strategierahmen zur Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers bilden.

7.1.5 Schadstoffe vermeiden

Hebel 05: Schadstoffe vermeiden

Zirkuläres Wirtschaften vermeidet vor allem solche linearen Materialflüsse, die nur schwer zu Kreisläufen geschlossen werden können und schädlich für Mensch und Umwelt sind oder sein könnten. So schaden beispielsweise Pflanzenschutzmittel, in Düngemitteln enthaltene Schwermetalle und Tierarzneimittelrückstände, in Bauprodukten enthaltene Lösemittel, Biozide und Weichmacher und Mikroplastik nachweislich dem Menschen und den Ökosystemen an Land und im Wasser (Balzer et al., 2015; Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt, 2016). Der Einsatz von Stoffen, welche Mensch und Umwelt schädigen können (Schadstoffe), wird soweit technisch möglich vermieden (clean). Der Einsatz von Schadstoffen sollte sich auf essenzielle Verwendungen im Sinne der Mitteilung der EU-Kommission über wesentliche Verwendungen²⁵ fokussieren (narrow). Dort, wo Verzicht nicht möglich ist, unter anderem in Abwägung mit anderen Zirkularitätsstrategien, werden Maßnahmen zur Vermeidung bzw. Verminderung der Exposition von Mensch und Umwelt getroffen. Dabei ist zu beachten, dass auch wenn ein Material im geschlossenen Wertstoffkreislauf geführt werden kann, die darin enthaltenen Schadstoffe trotzdem in die Umwelt freigesetzt werden können. Die eventuell in der ersten Lebenszyklusphase noch sicherzustellende Expositionsminderung ist beim Recycling und in weiteren Lebenszyklen kaum noch zu gewährleisten. Bereits enthaltene Schadstoffe werden aus Materialkreisläufen ausgeschleust oder in abgetrennten Kreisläufen verwendet (close). Dafür werden Informationen zu den Inhaltstoffen entlang von Wertschöpfungsketten im notwendigen Umfang verfügbar gemacht.

Mit Blick in die Zukunft ist der größte Hebel von vornherein auf gefährliche Stoffe zu verzichten und nur noch sichere und nachhaltige Chemikalien auf dem Markt zu haben (Europäische Kommission, 2022). Beispielsweise ist es aufgrund der langen Nutzungsphasen noch heute ein Problem, dass Dämmstoffe in der Vergangenheit mit einem Schadstoff, dem Flammschutzmittel HBCD, hergestellt wurden (Bolland et al., 2017). Schon bei der Entwicklung von Materialien und nachfolgend bei der Entwicklung von Produkten, wo die Festlegung der technischen Anforderungen an das einzusetzende Material erfolgt, muss deren weitere Verwendung mitgedacht

²⁵ Mitteilung der EU-Kommission — Leitkriterien und Grundsätze für das Konzept der wesentlichen Verwendung in EU-Rechtsvorschriften, die Chemikalien betreffen (OJ C, C/2024/2894, 26.04.2024, ELI: <http://data.europa.eu/eli/C/2024/2894/oj>)

werden (Hebel 10, s. 7.3.2). Zusätzlich ist ein koordiniertes Zusammenwirken der bisherigen Instrumente des Chemikalien-, Produkt- und Abfallrechts im Sinne eines übergreifend gedachten Stoffflussmanagements Voraussetzung für den bewussten Umgang mit Schadstoffen. Die einzelnen Regelungen adressieren dabei jeweils nur Teile des Lebenszyklus. Aus der Perspektive des Chemikalienrechts wäre es ggf. hinreichend, wenn das schadstoffbelastete Produkt nicht recycelt wird, sondern der Abfallverbrennung zugeführt wird.

Aufgrund der ständigen Weiterentwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse zu den Eigenschaften und Wirkungen von Chemikalien auf Mensch und Umwelt werden auch zukünftig Substanzen neu als Schadstoffe identifiziert werden. Um neben der Förderung sicherer und nachhaltiger Chemikalien dieses Problem zu adressieren ist es erforderlich, die Komplexität der Materialzusammensetzung zu reduzieren.

Angesichts immenser Stoff- und Produktvielfalt mit erheblichen historischen Stoffstromkontaminationen bedarf es des vorausschauenden, auch arbeitsschutzbedachten Umgangs mit enthaltenen Schadstoffen, darunter karzinogene künstliche Mineralfasern, Schwermetalle, asbesthaltige Baustoffe oder HBCD. Es müssten Aufbereitungsverfahren weiterentwickelt werden, die Schadstoffe während des Recyclingprozesses aus dem Trägermaterial ausschleusen können. Für die Bereitstellung und Weitergabe von Information zu Inhaltstoffen entlang von Wertschöpfungsketten kann der im Rahmen der EU-Ökodesignverordnung vorgesehene digitale Produktpass helfen (Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt, 2024). Bei der Ausgestaltung der Informationsweitergabe entlang der Wertschöpfungskette sind grundsätzlich auch Produkte, auch solche die importiert werden, zu berücksichtigen.

Verabschiedet sich die Gesellschaft schrittweise von bestimmten Materialien z. B. Blei oder Cadmium (clean), für die etablierte Recyclingkreisläufe existieren, ist auf einen geordneten Phase-Out zu achten. Die ökonomischen Treiber für das Recycling, z. B. von Blei-Säure-Batterien, werden mit abnehmender Nachfrage verloren gehen. Dies macht eine ordnungsgemäße Erfassung unwirtschaftlich, die ordnungsgemäße Behandlung (= bisher: Recycling) ist aufgrund fehlender Abnahme in Frage gestellt. Somit sind Vorkehrungen für eine ordnungsgemäße Ausschleusung aus dem Wirtschaftskreislauf und eine systematische Endlagerung - siehe das Beispiel Quecksilber- zu treffen, damit die nicht mehr benötigten Materialien nicht unkontrolliert die Umwelt belasten.

7.2 Hebel aus Produktionsperspektive

Die Gewinnung von Metallen und fossilen Rohstoffen hat einen besonders hohen Umweltfußabdruck und mindestens 35 % des Rohstoffeinsatzes in die Wirtschaft geht in die Fertigung von Produkten aus Metallen und fossilen Rohstoffen (Christis et al., 2023; UBA, 2022), weshalb ein besseres Recycling von Metallen und Kunststoffen eine große Entlastungswirkung haben kann (Hebel 06, s. 7.2.1). Veränderte Materialflüsse in der landwirtschaftlichen Produktion können ebenfalls wesentlich zu den umweltpolitischen Zielen beitragen (Campbell et al., 2017) (Hebel 07, s. 7.2.2). Erhebliche Potentiale zur Steigerung der Zirkularität bestehen sektorübergreifend bezüglich der Nutzung von Abwärme (Hebel 08, s. 7.2.3). Die einzelnen Hebel werden dabei beispielhaft anhand von Branchen mit besonders großen Potentialen dargestellt.

7.2.1 Höherwertig und sortenrein recyceln

Hebel 06: Höherwertig und sortenrein recyceln

Der Bedarf einer Gewinnung von fossilen und metallischen Primärmaterialien kann durch höherwertiges sortenreines Recycling verringert werden. Beispielsweise entspricht im Bereich der Metallindustrie das maximale theoretische Einsparpotential im Vergleich zu Gewinnung und Einsatz von Primärmaterial einer Reduktion des kumulierten Energieaufwands um rund 475 PJ, wovon mit derzeit bereits breit verfügbaren Technologien ca. 25 % gehoben werden könnte (Raatz et al., 2021).

Durch höherwertiges, sortenreines Recycling wird ermöglicht, Materialien und Rohstoffe möglichst lange funktions- und werterhaltend im Kreislauf zu führen und Downcycling zu minimieren (close). So können durch Substitution von Primärrohstoffen Umweltbelastungen erheblich reduziert und durch Diversifizierung von Rohstoffquellen ein bedeutender Beitrag zur Versorgungssicherheit (secure) und Resilienz der Wirtschaft geleistet werden. Hierfür ist im Sinne der Materialverantwortung (act responsibly) eine Getrennterfassung der Stoffströme beziehungsweise eine Aufbereitung von gemischten Stoffströmen durch geeignete Analyse-, Sortier-, Vorbehandlungs- und Aufbereitungsverfahren notwendig. Gleichzeitig kann durch eine möglichst saubere Trennung vermieden werden, dass Materialien in den falschen Stoffstrom geraten und dort zu Störstoffen werden (clean).

Weltweit sind etwa 100.000 Chemikalien auf dem Markt erhältlich (UBA - Chemikalien, 2024). Mehrere tausend Stoffe davon werden in Europa in größeren Mengen verwendet. Entsprechend groß ist die Komplexität bezüglich der Produktion von Grund- und Feinchemikalien. Daher ist, um Erfolge beim Zirkulären Wirtschaften zu erzielen, eine enge Kooperation der chemischen Industrie mit der Produktentwicklung der Kundenbranchen notwendig. Geschäftsmodelle wie Chemical Leasing, die zum Ziel haben, den Verbrauch an Chemikalien durch Aufbereitung und Wiederverwendung zu optimieren, sind ein Ansatz. Für eine Erhöhung der Recyclingquote sind Kooperationen und Datenflüsse entlang der gesamten Wertschöpfungskette nötig. Hier kann u. a. Digitalisierung einen Beitrag leisten. Gleichzeitig sollte die chemische Industrie Chemikalien anbieten, die keine Probleme beim Recycling verursachen. Für die Chemikalienproduktion können über BVT-Merkblätter Anforderungen an die Rückgewinnung von Stoffen bzw. die Erhöhung der Ressourceneffizienz gestellt werden (siehe z. B. BVT 8, 15 und 16 in den LVOC-BVT-Schlussfolgerungen (Durchführungsbeschluss(EU) 2017/2117 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die die Herstellung von organischen Grundchemikalien, 2017)).

Voraussetzungen für das Kunststoffrecycling sind eine getrennte Erfassung, die Zuführung in die geeigneten Verwertungswege sowie eine gut ausgebaute Sortier- und Recyclinginfrastruktur. Zu viele Kunststoffabfälle werden noch im Restmüll oder gemischt mit anderen Materialabfällen entsorgt und gehen den direkten Weg in die energetische Verwertung. Potentiale gibt es auch in der Sortierung. Eine Sortierung nach Farben, der Einsatz von Markierungssystemen wie z. B. digitale Wasserzeichen oder Fluoreszenzmarker, Einsatz von KI beispielsweise zur Objekterkennung sowie Produktpässe können eine verbesserte Sortierung ermöglichen, indem Materialien mit Recyclingunverträglichkeiten oder Schadstoffen erkannt und ausgeschleust werden oder die Kunststoffabfälle spezifischer nach ihrer Zusammensetzung und ihren Eigenschaften sortiert werden. Bessere Sortierqualitäten wirken sich wiederum positiv auf die erzielbaren Rezyklatqualitäten aus.

Bei den Recyclingverfahren schneidet aus ökologischer Sicht das werkstoffliche Recycling am besten ab und sollte daher unbedingt bevorzugt umgesetzt werden. Chemisches Recycling kann ebenfalls einen Beitrag zum Zirkulären Wirtschaften leisten, ist aber deutlich aufwendiger und energieintensiver als werkstoffliche Recyclingverfahren. Es sollte daher auch nur für solche Kunststoffabfälle angewendet werden, die sich nicht für ein werkstoffliches Verfahren eignen. Potentiale beim mechanischen Recycling bestehen – neben einem generellen Ausbau – insbesondere in der qualitativen Verbesserung der Rezyklateigenschaften. Dafür ist eine Vernetzung zwischen Rezyklat herstellender und Rezyklat anwendender Industrie wichtig.

Das Recycling von Altprodukten (End-of-Life-Recycling, EOL-Recycling) zur Rückgewinnung von Metallen ist etablierte Praxis. Entwickelte Recyclingindustrien erreichen EOL-Recyclingquoten zwischen 30 und 60 %. Allerdings werden bei weitem nicht alle Metalle in ausreichendem Maße recycelt. So liegt zum einen insbesondere bei Technologiemetallen die EOL-Recyclingquote oftmals bei < 1 % (Gregoir, 2022). Weiterhin kann durch höherwertiges Recycling der EOL-Schrotte ein Downcycling, bei dem funktionale Materialeigenschaften und Legierungselemente verloren gehen, verringert werden. So können auch hochwertig legierte Metalle durch Sekundärrohstoffe bereitgestellt werden (Helbig et al., 2022). Dies gilt beispielsweise auch für das Altfahrzeugrecycling (s. Hebel 13, s. 7.4.2 und Kapitel 8.4). Die Weiterentwicklung der Recyclingsysteme in Richtung einer hohen Recyclingrate am Ende des Lebenszyklus (EOL-RR) und qualitativ hochwertiger Sekundärmaterialien (funktionelles Recycling) erfordert jedoch technische Optimierungen (Raatz et al., 2021):

- ▶ den möglichst frühzeitigen Einsatz geeigneter Trenn- und Sortiertechnologien in der Recyclingkette,
- ▶ die Kombination moderner Detektionsverfahren wie XRF und LIBS zur mehrkanaligen Sortierung nach Materialqualitäten (Legierungen) und
- ▶ die grundlegende Prüfung der geeigneten Behandlungsmethode (z. B. Schreddern und Sortieren gegenüber tiefgreifender Demontage/manueller Zerlegung).

Lücken in der Kreislaufwirtschaft der Metalle entstehen, wenn EOL-Produkte nicht den richtigen Verwertungswegen zugeführt werden. Insbesondere für Produkte mit kritischen/strategischen Metallen sollte eine verpflichtende Getrennterfassung in Betracht gezogen und gegebenenfalls die Zwischenlagerung (Stockpiling) gefördert werden.

Ein weiteres Hemmnis einer Kreislaufwirtschaft der Metalle ist die unzureichende Verfügbarkeit von Informationen und Daten über Metallstoffströme und deren chemische Zusammensetzung (siehe Hebel 04, s. 7.1.4).

7.2.2 Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe schließen

Hebel 07: Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufe schließen

Die Potentiale für eine Reduktion des Umweltfußabdrucks durch Schließung von Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufen sind besonders groß in der landwirtschaftlichen Produktion und der chemischen Industrie. Erstere hatte alleine für den Anbau und die Verarbeitung von pflanzlichen und tierischen Produkten einen Anteil von 25 % am gesamten Umweltfußabdruck der EU-27 im Jahr 2019 (Christis et al., 2023). Auf die gesamte Wertschöpfungskette von Kunststoffen, organischer Chemie und Erdölprodukten entfallen weitere 14 %.

Mit diesem Hebel wird das Umweltschonungspotential einer verstärkten Kreislaufführung (close) von Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor sowie eines gezielteren (narrow) Düngemittleinsatzes in der landwirtschaftlichen Produktion adressiert. Bei Kohlenstoff geht es vor allem um eine Vermeidung von Methan-Emissionen (clean), bei Stickstoff und Phosphor um einen bedarfsgerechten Einsatz (narrow) und geringere Einträge in die Umwelt (clean). Phosphor sollte zusätzlich wegen seiner Eigenschaft als endlicher Rohstoff und seiner Kritikalität wiedergewonnen werden (secure). Dadurch werden auch schädliche Nährstoffemissionen in die Umweltmedien reduziert (clean). Des Weiteren werden die Möglichkeiten, die aus der notwendigen Abkehr von fossilen Kohlenstoffquellen (Hebel 01, s. 7.1.1) entstehen, durch eine Bewirtschaftung atmosphärischen Kohlenstoffs adressiert (close).

Verluste in Stoffkreisläufen der Landwirtschaft stellen lineare Flüsse dar, die erhebliche Umweltbelastungen verursachen. Ein bedeutender Verlust sind durch die Landwirtschaft verursachte, energiebedingte CO₂-Emissionen (Betrieb von Maschinen, Heizungsanlagen, Herstellung von Düngemitteln), die durch Umlegen von Hebel 01 (s. 7.1.1) wesentlich reduziert werden und auch kaum von der Landwirtschaft beeinflusst werden können. Daher liegt der Fokus der folgenden Ausführungen auf der Schaffung von Kohlenstoff-, Stickstoff- und Phosphorkreisläufen in der Landwirtschaft.

Kreisläufe in der Landwirtschaft können nicht vollständig geschlossen werden, da die Produktion in einem offenen System stattfindet. Nährstoff- und Kohlenstoffemissionen in die Umwelt sind unvermeidbar, können aber durch geeignete Anbaupraktiken und Managementmaßnahmen auf ein aus Umwelt- und Klimasicht akzeptables Niveau reduziert werden. Die Landwirtschaft beeinflusst den Kohlenstoffkreislauf, in dem durch die angebauten Kulturpflanzen und das Grünland Kohlendioxid aus der Luft entnommen und mittels Photosynthese in Zucker und weitergehende Verbindungen umgewandelt wird. Der so organisch gebundene Kohlenstoff wird von Menschen, Tieren und Mikroorganismen aufgenommen, umgewandelt und zuletzt in Form von Kohlendioxid wieder in die Atmosphäre entlassen. Ein Teil des Kohlenstoffes kann durch Humusaufbau langfristig im Boden gespeichert werden. Ein Teil des organisch gebundenen Kohlenstoffs wird von spezialisierten Mikroorganismen hauptsächlich im Verdauungstrakt von Wiederkäuern in Methan umgewandelt und von den Tieren emittiert. Alle technischen und management-bezogenen Maßnahmen, die zu einer geringeren Methan-Emission pro Einheit Produkt (Milch, Fleisch) führen, können hier einen Beitrag leisten (clean). Solche Maßnahmen werden alleine voraussichtlich jedoch nicht ausreichen, daher muss auch der Gesamtbestand der Rinder in Deutschland sinken (Sorg et al., 2021) (narrow). Um Leakage-Effekte durch vermehrte Importe zu vermeiden, müsste die Ernährung dementsprechend stärker pflanzenbasiert ausgerichtet sein (Hebel 14, s. 7.4.3).

Die landwirtschaftliche Produktion beeinflusst Stickstoffkreisläufe, weil Stickstoff als Pflanzennährstoff benötigt wird. Dieser stammt aus der Atmosphäre und wird der Landwirtschaft hauptsächlich über industriell hergestelltem Mineraldünger und zu einem geringeren Teil durch

den Anbau von Leguminosen (u.a. Hülsenfrüchte, Klee), die den Luftstickstoff durch die Symbiose mit Knöllchenbakterien biologisch fixieren können, zugeführt. Ungefähr die Hälfte des aufgenommenen Stickstoffs wird in Form von Agrarprodukten dem Stickstoffkreislauf entnommen (BMEL, 2023). Die andere Hälfte gelangt über Futtermittel in die Nutztiere, die ungefähr ein Drittel des Stickstoffs einbauen, der dann über tierische Marktprodukte den Kreislauf verlässt. Der restliche Stickstoff wird von den Tieren ausgeschieden und entweder direkt im Wirtschaftsdünger wieder auf landwirtschaftliche Flächen aufgebracht oder er gelangt nach Verwertung in einer Biogasanlage als Gärrest zurück auf das Feld (close). Um Stickstoffverluste zu verringern, braucht es einen effizienteren Umgang mit organischen wie auch mineralischen Düngemitteln (narrow), angepasste Anbausysteme, emissionsarme Stallsysteme, Lagerung von Wirtschaftsdüngern und Ausbringungstechnik (clean) sowie eine bedarfsangepasste Fütterung (substitute).

Der natürliche Phosphorkreislauf wird durch die Landbewirtschaftung erheblich gestört, da zusätzliche Phosphate durch die Düngung in den Kreislauf gelangen und es hierdurch zu einer übermäßigen Nährstoffanreicherung kommt. Der Phosphorbedarf der Landwirtschaft wird ungefähr zu einem Viertel aus industriell hergestellten Mineraldüngern, zu zwei Drittel aus Wirtschaftsdüngern und der Rest aus Schlachtnebenprodukten und Klärschlämmen gedeckt (Kratz et al., 2014). Phosphor wird durch die Pflanzen aus dem Boden aufgenommen und gelangt über die Ernährung in den Menschen und über Futtermittel in die Tiere. Ein Teil des Phosphors wird für den Körperaufbau und für wichtige biologische Prozesse benötigt, der Rest wird wieder ausgeschieden und findet sich in Wirtschaftsdüngern und über das Abwasser in Klärschlämmen wieder. Der in Wirtschaftsdüngern enthaltene Phosphor gelangt wieder direkt auf landwirtschaftliche Flächen (close), der in Klärschlämmen enthaltene Phosphor wird zum größten Teil durch die thermische Verwertung der Klärschlämme und anschließende Deponierung der Aschen dem Kreislauf entzogen. Um den Phosphor verstärkt im Kreislauf zu halten, kann er aus Klärschlammaschen zurückgewonnen werden (close, secure). Es besteht ein Rückgewinnungspotential von ca. 50 kt Phosphor pro Jahr. Damit könnten ungefähr 40 % des Bedarfs an mineralischen Phosphordüngern ersetzt werden. Wegen der hohen Bedeutung des kritischen Rohstoffs Phosphor sind nach der Klärschlamm-Verordnung (AbfKlärV) mittlere und große Kläranlagen ab 2029 dazu verpflichtet, eine Phosphor-Rückgewinnung durchzuführen. Phosphorverluste durch Abschwemmung und Auswaschung von landwirtschaftlichen Flächen können verringert werden, indem Phosphor insbesondere auf hoch versorgten Böden deutlich weniger gedüngt wird (VDLUFA, 2018) und umfangreiche Erosionsschutzmaßnahmen umgesetzt werden (Holsten et al., 2016).

Die chemische Industrie in Deutschland wird auch als Teil eines zirkulären Wirtschaftssystems ohne Nutzung fossiler Kohlenstoffträger (Hebel 01, s. 7.1.1), sehr begrenzter Verfügbarkeit biogenen Kohlenstoffs (Hebel 02, s. 7.1.2), Kunststoff-Recycling (Hebel 06) und mit grundlegend geänderten Konsummustern (Hebel 13, s. 7.4.2) Kohlenstoff etwa für die Herstellung von Kunststoffen und für Schwerlast und Flugverkehr erforderliche Kraftstoffe (PtGLS), benötigen (Purr & Garvens, 2021). Dazu müssen mit entsprechenden Produktionsverfahren und Investitionen in neue Anlagentechnik kreislauffähige Kohlenstoffströme geschaffen werden.

Zusammen mit grünem Wasserstoff stellen aus Kohlendioxid erzeugtes Methanol, Methan oder Fischer-Tropsch-Produkte die Ausgangsbasis für erneuerbare strombasierte Kohlenstoffprodukte dar. „Carbon Capture and Utilization“ ist allerdings so lange nicht treibhausgasneutral möglich, wie die sehr energieintensiven Prozesse mit fossiler Energie betrieben werden (Purr & Garvens, 2021).

Notwendig sind neue Anlagen für die Nutzung von CO₂ und notwendige Transportinfrastruktur für die alternativen Rohstoffe und Produktionsmittel (CO₂, Biomasse, Strom, Wasserstoff und

Wasserstoffderivate). Szenarien für eine Transformation der chemischen Industrie hin zur Klimaneutralität bis 2045 in Deutschland wurden von einer großen Stakeholdergruppe (Chemistry4Climate, 2023) untersucht.

7.2.3 Abwärme besser nutzen

Hebel 08: Abwärme besser nutzen

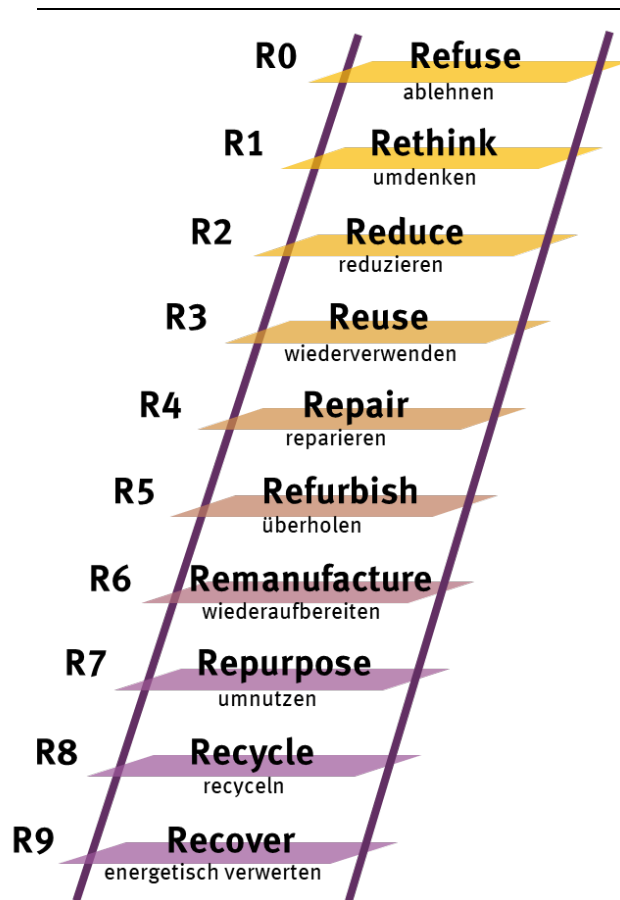
Dieser Hebel trägt, insbesondere solange fossile Energieträger genutzt werden, aber auch danach, vor allem zu den Zielen Klimaschutz und Erhalt der Biodiversität bei. Wenn weniger Energie benötigt wird, werden Flächen und auch weniger Rohstoffe (Öl, Gas, Kupfer, Edel- und Sondermetalle, Eisen, etc.) für deren Erzeugung benötigt, deren Abbau und Verarbeitung mit teils massiven Umwelt- und Ökosystemschäden einhergeht und mit Menschenrechtsverletzungen verbunden ist (Hebel 03).

Im Rahmen der verbesserten Abwärmenutzung wird angestrebt, die in der Produktion eingesetzte Energie so lange wie möglich einer sinnvollen Verwendung zukommen zu lassen, d.h. ihre Verweildauer in der Technosphäre zu verlängern (close). Das Abwärmepotential in Deutschland wird zwischen 218 PJ und 566 PJ (Brückner, 2016; Pehnt et al., 2010; Persson et al., 2014) geschätzt. Durch eine verbesserte inner- und überbetriebliche Abwärmenutzung sowie eine Einspeisung in lokale Wärmenetze können zwischen 6 und 13 % des Energieverbrauchs in der Industrie (3562 PJ (Destatis, 2023d)) einer weiteren Verwendung zugeführt werden. Im Rahmen der Umstellung auf eine CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung wird das verfügbare Abwärmepotential zwar generell geringer ausfallen (Fleiter et al., 2023), das Heben der verbleibenden Abwärmepotentiale bleibt allerdings weiterhin sinnvoll. Insbesondere durch Hoch- und Höchsttemperaturwärmepumpen ist es möglich, Niedertemperaturabwärme auf höhere Temperaturniveaus anzuheben und als Prozesswärme zu nutzen.

Durch die Nutzung von Wärmepumpen zur Erzeugung von Prozesswärme bis 100 °C können aus technischer Sicht 23,3 % (311 PJ) (S. Wolf, 2017) des Nutzwärmebedarfs in der Industrie gedeckt werden. Diese Wärmepumpen sollten reparatur- (Hebel 09, s. 7.3.1) und recyclingfreundlich sein (Hebel 10, s. 7.3.2) und die enthaltenen Metalle und Kältemittel sollten am Ende der Lebenszeit sortenrein zurückgewonnen werden (Hebel 06, s. 7.2.1). Durch die Nutzung von Abwärme auf einem niedrigen Temperaturniveau als Wärmequelle für Wärmepumpen kann der Wirkungsgrad erhöht sowie die benötigte elektrische Energie maßgeblich reduziert werden. Das zukünftige Potential wird allerdings noch größer geschätzt, da sich durch die Entwicklung von Hochtemperaturwärmepumpen die erzeugbaren Temperaturniveaus erhöhen, was zu einer Erweiterung der potentiellen Anwendungsbereiche führt. Für chemische Reaktionen werden oft hohe Temperaturen benötigt (der Prozesswärmeanteil >400°C liegt bei über 50 %); mit Hochtemperaturwärmepumpen kann Abwärme demnächst (TRL 7-8) nur auf ein Temperaturniveau bis ca. 165°C gehoben werden, mit natürlichen Kältemitteln nur bis ca. 120 °C (Fleiter et al., 2023). Das begrenzt das zusätzlich erschließbare Potential für weitere Abwärmenutzung. Abwärmeströme, deren Energiegehalt nicht unternehmensintern sowie -übergreifend zur Prozesswärme und -kälteerzeugung in Industrie und Produktion benötigt werden, können vergleichsweise einfach zur Speisung von Fernwärmenetzen genutzt werden. Weitere Möglichkeiten der Abwärmenutzung könnten ggf. durch Kooperationen über das Unternehmen bzw. den Standort hinaus erschlossen werden, z. B. über Effizienznetzwerke. Synergien können sich zukünftig z. B. bei der Nutzung von Abwärme für die Hochtemperaturwasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus Wasser ergeben.

7.3 Hebel aus Produktperspektive

Abbildung 14: Die 10 R Leiter



Bei der Betrachtung von Produkten im Kontext Zirkulären Wirtschaftens ist die R-Leiter ein etabliertes Werkzeug zur Priorisierung verschiedener Optionen. Aus den ursprünglich nur drei R-Strategien (reduce, reuse, recycle) haben sich seit den Ursprüngen im asiatischen Raum in den 1990er Jahren (Ghisellini et al., 2016) zahlreiche R-Leitern entwickelt (Zhang et al., 2022). In der europäischen Debatte um das Zirkuläre Wirtschaften hat sich zuletzt die 10-stufige R-Leiter etabliert (Potting et al., 2017).

Die R-Leiter ist eine Heuristik: In der Regel – aber nicht in jedem Fall – weisen "höhere" R-Strategien, angefangen von R0, ein höheres Ressourceneinspar- und Umweltentlastungspotential auf als „niedrigere“ R-Strategien in Richtung R9. Der Grad der Zirkularität und auch der Grad der Suffizienz (Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU), 2024) nimmt nach unten Richtung R9 ab.

Quelle: eigene Abbildung nach (Potting et al., 2017)

Sie ist, anders als ihr fünfstufiges abfallwirtschaftliches Pendant, die Abfallhierarchie, nicht nur auf Abfälle (R8-R9), sondern auf Produkte (R1, R3-R7) und auch auf Lebensstile (R0-R4) und Geschäftsmodelle (R1, R3-R7) anwendbar.

Die konsequente Anwendung von R0-R4 hat die Reduzierung der Menge der insgesamt konsumierten Produkte zur Folge und führt zu einer absoluten Reduktion der Material- und Energieverbräuche und der damit verbundenen negativen Umweltwirkungen. Trotz Effizienzgewinnen konnte bisher die durch den Konsum von Produkten bedingte gesamte Ressourcennutzung nicht signifikant gesenkt werden (2.4) (UBA, 2022).

Die Produktperspektive beleuchtet das Zirkuläre Wirtschaften mit Fokus auf das Design und die Nutzung von Produkten. Die wichtigsten Hebel wurden dabei entsprechend der Szenarien von WWF (2023) und Daten des Circularity Gap Reports (Circle Economy, 2022) und der EU-Kommission (Directorate-General for Energy (European Commission) & Van Holsteijn en Kemna (VHK), 2022) ausgewählt. Nach WWF (2023) können durch eine zirkuläre Bewirtschaftung von Haushaltsgeräten und Informationstechnologie die konsumbasierten Treibhausgasemissionen gegenüber eines Weiter-So Szenarios um 40 % gesenkt werden.

7.3.1 Produkte länger nutzen, reparieren und wiederverwenden

Hebel 09: Produkte länger nutzen, reparieren und wiederverwenden

Durch die längere Nutzung von Elektrogeräten und Textilien in Deutschland können insgesamt 16 Megatonnen CO₂-Äquivalente an THG-Emissionen und der Materialverbrauch um 17 Megatonnen reduziert werden (WWF, 2023). Durch die längere Nutzung von Wohngebäuden ließen sich global 2,2 Gigatonnen CO₂-Äquivalente an THG-Emissionen und 5,3 Gigatonnen Material einsparen (Circle Economy, 2022). Die längere Nutzung trägt also vor allem zum Klimaschutz bei, aber auch zu allen mit der Gewinnung der genutzten Rohstoffe verbundenen Zielen (Saubere Umwelt, Wasserverfügbarkeit, Resilienz, Menschenrechte, Entwicklungschancen).

Wird ein Produkt länger genutzt, kann die Herstellung eines neuen Produkts hinausgezögert (slow) und so der Rohstoffeinsatz reduziert werden (narrow).

Um zu verhindern, dass Geräte vorzeitig durch einen Defekt das Lebensende erreichen, können Hersteller Produkte langlebiger gestalten (act responsibly). Versagt ein Gerät die Funktion, hat ein Endnutzer alternativ zum Neukauf die Möglichkeit, den Schaden zu lokalisieren und zu reparieren. Falls noch gebrauchstaugliche Produkte nicht mehr genutzt werden, kann die Nutzungsdauer verlängert werden, indem diese Produkte, für die es eine Nachfrage gibt, anderen Nutzenden zur Verfügung gestellt werden im Sinne eines aktiven Gebrauchtwarenmarkts. Das kann auch eine andersartige, ggf. minderwertigere Nutzung oder die Nutzung einzelner Komponenten einschließen.

Ein großes Potential zur Umsetzung des Hebels liegt in der Stärkung von Second-Hand- bzw. Gebrauchtwarenmärkten, sodass ungenutzte Gegenstände einer weiteren Verwendung zugeführt werden. Umfragen eines Gebrauchtwarenportals haben ergeben, dass 51 % der Befragten ungenutzte Dinge aus ihrem Haushalt im Abfall entsorgen (Schwelling et al., 2022). Diese Dinge einer weiteren Verwendung zuzuführen ist aktuell mit hohem persönlichem Aufwand (z. B. Flohmarktstand, Anzeige erstellen) verbunden, der häufig nicht im Verhältnis zum Restwert steht. Eine unkomplizierte Lösung bieten Verschenke-Läden oder verschließbare Verschenke-Schränke. Bei werthaltigen Geräten können Dienstleister die Qualität der Gebrauchtgeräte sichern und Kunden* Kundinnen eine Garantie gewähren.

Weiteres Potential bietet die Stärkung der Reparatur defekter Produkte. Die Verfügbarkeit günstiger Produkte macht die Reparatur defekter Produkte unwirtschaftlich. Gleichzeitig sind diese meist schlechter reparierbar und weniger langlebig und untergraben das Ziel der Langlebigkeit somit auf zweierlei Art. Ausschlaggebend für eine Entscheidung zur Reparatur ist der Vergleich der Reparaturkosten mit dem ursprünglichen Kaufpreis des Produkts bzw. dem Kaufpreis eines Ersatzprodukts sowie die erwartete Lebensdauer nach der Reparatur. Allein im Bereich der Elektronikprodukte könnten durch eine Erhöhung der Reparaturquote von aktuell 22,5 % auf 75 % etwa zwei Drittel des Elektroaltgeräteaufkommens – und damit auch der Herstellungsaufwand für neue Geräte – reduziert werden (Tiemann & Wallbott, 2021). Auf EU-Ebene sind verschiedene Maßnahmen geplant bzw. teilweise bereits erlassen und in nationales Recht umgesetzt, welche lange Lebensdauern von Produkten stützen.

Neben finanziellen Aspekten ist die Erreichbarkeit eines Reparaturservices eine zentrale Barriere für Reparatur. Daher sollte die durch die Right-to-Repair-Richtlinie vorgesehene nationale Reparaturplattform zur Vermittlung von Reparaturen möglichst viele Betriebe listen und wirksam beworben werden. Dem Nachwuchsmangel im Reparatursektor muss mit Ausbildungsprogrammen und Anreizen begegnet werden. Parallel sollte die Kooperation des kommerziellen und nicht-kommerziellen Reparaturmarktes (Repair Cafés) gestärkt werden. Um langfristig eine Kultur der Reparatur zu etablieren, sollten Reparaturkompetenzen in den

Curricula verschiedener Bildungsinstitutionen fest verankert werden. Um die Reparierbarkeit von Produkten bereits während der Konsumententscheidung transparent zu machen, wurde der Repair-Score entwickelt. Diese in Frankreich entwickelte Methode bewertet Mobiltelefone nach Aspekten der Reparierbarkeit mit Buchstaben von A bis E. Eine Übertragung auf viele weitere Produkte ist für eine Hebelwirkung der Kennzeichnung unabdingbar.

7.3.2 Produkte kreislauffähig gestalten

Hebel 10: Produkte kreislauffähig gestalten

Damit Produkte länger genutzt (Hebel 09) und als Abfall sortenrein recycelt werden können (Hebel 06), muss bereits bei der Gestaltung die Kreislauffähigkeit berücksichtigt werden. Auch die Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers (Hebel 04) und die Vermeidung von Schadstoffen (Hebel 05) werden durch die kreislauffähige Gestaltung unterstützt. Der Beitrag dieses Hebels zu den sozialen und ökologischen Zielen wird daher indirekt durch diese Hebel geleistet, für deren Umsetzung die kreislauffähige Produktgestaltung Voraussetzung ist.

Um das Potential der Kreislaufführung von Produkten zur Erreichung der Ziele zu erreichen, müssen die bestehenden Hürden zur Wiederverwendung und Reparatur von Produkten (slow) und zum Zurückgewinnen von hochwertigen Sekundärmaterialien gesenkt werden (close). Oftmals ist eine zerstörungsfreie Demontage zur Reparatur nicht möglich oder erforderliche Ersatzteile sind nicht verfügbar. Die Aufarbeitung und Wiederverwendung werden verhindert, da Schadstoffe in Produkten diese verbieten oder das Vorkommen beschränkter Stoffe nicht oder nur mit hohem Aufwand ausgeschlossen werden kann (clean). Informationen über enthaltene Schad- und Wertstoffe müssen daher bereitgestellt werden. Die kreislauffähige Produktgestaltung umfasst Maßnahmen, die solche Herausforderungen in Verantwortung für die verwendeten Materialien (act responsibly) antizipieren, ihnen im Designprozess proaktiv entgegenwirken und Zielkonflikte mit anderen Schutzzielen wie Sicherheit oder Energieeffizienz ganzheitlich abwägen. Sie trägt dazu bei, Kreisläufe zu schließen (close), indem sie den Aufwand für Materialkreisläufe und zur Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers auf ein wirtschaftlich darstellbares Maß senkt.

Das Entwerfen kreislauffähiger Produkte umfasst stets die Auseinandersetzung mit Zielkonflikten. So sind die gewünschten Eigenschaften eingesetzter Materialien oder Stoffe mit dem Umgang zum Lebensende abzuwägen. Etwa kann mit Leichtbau im Fahrzeugbau der Energiebedarf von Fahrzeugen reduziert werden, eingesetzte Hochleistungswerkstoffe aus Verbundmaterialien (z. B. carbonfaserverstärkte Kunststoffe) lassen sich jedoch nur schwer wieder trennen und recyceln. Die Berücksichtigung ökologischer Aspekte muss bei diesen Einzelfallentscheidungen durch lebenszyklusweite Ökobilanzen gestärkt werden.

Zum Einsatz von Sekundärmaterialien sind teilweise Anpassungen am Produktdesign notwendig, da verfügbare Rezyklate andere Materialeigenschaften haben können. Mit geeigneten Instrumenten kann die Nachfrage nach Sekundärmaterialien in ausgewählten Produktgruppen initiiert oder gelenkt werden, indem Mindestgehalte an Rezyklat oder eine Begrenzung der Primärrohstoffinanspruchnahme vorgeschrieben werden. Allerdings lassen sich auch nicht alle Werkstoffe rezyklieren, für Leiterplatten z.B. ist das technologisch heute nicht möglich. Bei der Ausgestaltung ist jedoch die Marktsituation zu berücksichtigen, um eine bloße Verlagerung des Sekundärmaterialeinsatzes von Anwendungen ohne derartige Vorgaben zu verhindern.

Weiterhin ermöglichen die Standardisierung und Modularisierung von Produktkomponenten und ihren Schnittstellen rationelle Produktionsweisen. Das langfristige Vorhalten von Ersatzteilen wird erleichtert, wenn eine breite Produktpalette auf die gleichen Baugruppen

zurückgreift. Eine Einschränkung der Produktvielfalt oder der Innovationskraft ist nicht zu befürchten, da weiterhin unterschiedliche Preis- und Qualitätsniveaus möglich sind und die standardisierten Baugruppen frei zu individuell gestalteten Produkten zusammengestellt werden können.

Stoffe mit gefährlichen Eigenschaften sind bei der Konstruktion vollständig zu ersetzen (Hebel 05, s. 7.1.5). Von manchen Stoffen geht zwar keine Gefahr für Mensch und Umwelt aus, sie lassen sich jedoch im Recyclingprozess schlecht abtrennen oder stören diesen, was zu Qualitätseinbußen bei Rezyklaten führt. Diese sollten vermieden oder, wenn in der Abwägung die Vorteile des Einsatzes überwiegen, ihre Verwendung transparent dokumentiert und nachvollzogen werden. Produktpässe, die z. B. Angaben zur stofflichen Zusammensetzung und Ökobilanzdaten enthalten, können hier helfen und auch der Ausschleusung während der Nutzungsdauer identifizierter Schadstoffe dienen. Zudem können Produktinformationen Konsumententscheidungen erleichtern und somit Anreize zum kreislauffähigen Design schaffen. Ein digitaler Gebäudepass kann Planungsunterlagen wie die Gebäudestatik und ein Demontage- und Rückbaukonzept, aber auch die Produktpässe der verbauten Bauprodukte dokumentieren und so die technische Lebensdauer des Gebäudes verlängern, in dem Instandhaltung und Modernisierung erleichtert werden.

7.3.3 Material- und Energieeffizienz von Produkten steigern

Hebel 11: Material- und Energieeffizienz von Produkten steigern

Mit Hilfe von Ökodesign und Energieverbrauchskennzeichnung konnte die Energieeffizienz insbesondere von Elektro- und Elektronikgeräten erheblich gesteigert werden. Durch die europäischen Regelungen und deren Weiterentwicklung sollen im Jahr 2030 160 Megatonnen CO₂-Äquivalente an THG-Emissionen eingespart werden. Durch Effizienz im Bausektor ließen sich weltweit 3,5 Gigatonnen CO₂-Äquivalente und 4,1 Gigatonnen Material einsparen. Effizienzsteigerungen können auch auf andere Bereiche übertragen werden. So legt die neue EU-Verpackungsverordnung fest, dass der Anfall an Verpackungsabfällen bis 2040 um 15 % reduziert werden muss.

Material- und Energieeffizienz sollte sowohl für einzelne Produkte, aber auch im Zusammenspiel verschiedener Geräte betrachtet werden. Wo nicht die tatsächliche Zahl der genutzten Produkte und Gebäude reduziert wird, sollten sich Ausstattung, Funktionalität und Materialeinsatz auf das zur Bedürfnisbefriedigung notwendige Maß beschränken. Auf diese Weise werden Material- und Energieaufwand bei der Herstellung und Abfallanfall am Lebensende des Produktes reduziert (narrow). Auch die Reduktion des Energieverbrauchs von Produkten und Gebäuden während der Nutzungsphase stellt ein erhebliches Potential für das Zirkuläre Wirtschaften dar (narrow). Die mit der Energiegewinnung verbundenen Umweltwirkungen werden reduziert.

Mit Hilfe der europäischen Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) konnte die Energieeffizienz insbesondere von Elektro- und Elektronikgeräten erheblich gesteigert werden (Fleiter et al., 2015). Die konsequente Weiterentwicklung der Ökodesign-Anforderungen und Energiekennzeichnung könnte weitere 2 bis 4 Megatonnen CO₂-Äquivalente Treibhausgasemissionen vermeiden (Fischer et al., 2022). Weitere Potentiale liegen etwa bei der Nutzung digitaler Infrastruktur. So können durch die ressourceneffiziente Nutzung von Rechenzentren bis zum Jahr 2045 rund 15 Megatonnen CO₂-Äquivalente vermindert werden (WWF, 2023). Für die IKT-Nutzung ist dies, neben der Verlängerung der Nutzungsdauer, das größte Umweltentlastungspotential.

In Deutschland steigt die Zahl der zugelassenen Pkw seit Jahren stetig auf zuletzt 49 Millionen Fahrzeuge am 31.12.2023 (KBA, 2024). Neben der Verlagerung des Individualverkehrs auf umweltfreundlichere Verkehrsträger (Hebel 13, s. 7.4.2) birgt der Umstieg auf Elektroantriebe ein erhebliches Potential bezüglich Klimawirkung und Energieeffizienz: Die Herstellung eines Elektro- statt eines Benzinfahrzeugs 2020 kann über den Lebenszyklus eine Reduktion der Klimawirkung um 41 % (Biemann et al., 2024) und des Primärenergiebedarfs um rund 70 % (Held & Schücking, 2019) bewirken – auch bei Berücksichtigung der höheren Gesamtmasse und Ressourceninanspruchnahme für die Produktion der Batterien. Weil die Umweltwirkungen bei der Herstellung der Antriebsbatterien mit der Batteriegröße bzw. Kapazität skalieren, sind sowohl der Energieverbrauch der Fahrzeuge, als auch die bedarfsgerechte Auswahl der Fahrzeugbatterie, relevante Einflussgrößen. Durch einen geringeren Fahrzeugverbrauch bzw. energieeffiziente Fahrzeuge können kleinere und leichtere Batterien eingesetzt werden (Rückkopplungseffekte), die wiederum zur Einsparung von Batterierohstoffen und erneuerbarer Energie in der Nutzungsphase führen. Parallel zur generellen Reduktion der Rohstoff- und Energienutzung bleibt auch die weitere technologische Entwicklung neuer Batterie-Zellchemien entscheidend, um gerade den Einsatz von umwelt- und versorgungskritischen Rohstoffen (z. B. Cobalt und Mangan) zu reduzieren.

7.4 Hebel aus Bedürfnisfeldperspektive

Die Forschung zu den Umweltwirkungen des Konsums teilt menschliche Bedürfnisse üblicherweise in Bedürfnisfelder ein, für die umweltrelevante Aspekte wie beispielsweise der Treibhausgasausstoß quantifiziert werden. Die für den Treibhausgasausstoß, aber auch mit Blick auf die anderen umweltbezogenen Ziele wichtigsten Bedürfnisfelder sind in den meisten Studien die Felder Wohnen (einschl. Gebäude und Energie-/Wassernutzung), Mobilität und Ernährung (Antony et al., 2020) (Hebel 12 (s. 7.4.1), 13 (s. 7.4.2), 14 (s. 7.4.3)). Die Benennung und Abgrenzung weiterer Bedürfnisfelder ist weniger einheitlich, hier werden unter anderem Bereiche wie Bekleidung, Kommunikation (inkl. Nutzung von Geräten), Haushaltsgeräte und Dienstleistungen genannt. Da Produkte übergreifend bereits in der Produktperspektive im Detail betrachtet werden, konzentriert sich die Bedürfnisfeldperspektive hier auf die drei genannten, umweltrelevantesten Bedürfnisfelder und entsprechende Hebel. Zusätzlich wird hier aufgrund der großen Verbrauchernähe des Themas und hoher Relevanz für die Themen Schadstoffemissionen und Verantwortung in der Lieferkette der Bereich Bekleidung/Textilien aufgenommen (Hebel 15, s. 7.4.4).

Bei allen Hebeln in der Bedürfnisfeldperspektive ist es von entscheidender Bedeutung, sozioökonomische Auswirkungen, aber auch die Akzeptanz der anstehenden Veränderungen, soweit möglich vorausszusehen und die Maßnahmen sozialverträglich zu gestalten sowie in geeigneter Weise zu kommunizieren. Es sollten sowohl Konflikte mit sozialen Zielen frühzeitig erkannt und vermieden werden, als auch Synergien genutzt und an diese kommunikativ angeknüpft werden.

7.4.1 Energie- und ressourceneffizient wohnen

Hebel 12: Energie- und ressourceneffizient wohnen

Auf das Bedürfnisfeld Wohnen, einschließlich der Bauproduktenherstellung, Errichtung, Instandhaltung, Modernisierung und Wärmeversorgung von Wohngebäuden sowie der Nutzung von Strom und (Warm-)Wasser im Haushalt, entfallen etwa 29 % des CO₂-Fußabdrucks einer in Deutschland lebenden Person (UBA, 2024a). Darin enthalten sind 6 % des CO₂-Fußabdrucks, die durch den Stromverbrauch im Haushalt verursacht werden. Der größere Teil des Energieverbrauchs im Gebäudebetrieb entsteht jedoch durch das Heizen und die Warmwasserbereitung, die zum größten Teil noch auf fossilen Energieträgern basieren (UBA, 2024b). Beim Bauen, Instandhalten und Modernisieren von Wohnraum werden in Deutschland jedes Jahr ca. 40 Millionen Tonnen CO₂ ausgestoßen, also knapp eine halbe Tonne Treibhausgas pro Person und damit fast 5 % des durchschnittlichen CO₂-Fußabdrucks einer Person in Deutschland.

Wohnen in Einklang mit Zirkulärem Wirtschaften erfordert, die Energie- und Wohnflächeneffizienz von Gebäuden zu steigern (narrow), die Stromversorgung und Beheizung vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen (substitute), das Modernisieren, Umnutzen oder Aufstocken von Bestandsgebäuden wann immer möglich dem Neubau vorzuziehen (slow) und Kreisläufe von Bauteilen und Baustoffen zu schaffen (close).

Die Sanierungsrate von Gebäuden stagniert insgesamt in Deutschland bei etwa 1 % pro Jahr (Cischinsky & Diefenbach, 2018). Die Wärmeversorgung von Wohnräumen hat mit 67 % den mit Abstand größten Anteil am Endenergieverbrauch privater Haushalte. Pro Jahr wurden dabei im Durchschnitt 125 kWh Wärmeenergie pro Quadratmeter benötigt (UBA, 2024b). Durch Verbesserung der Energieeffizienz von Wohngebäuden ließen sich rund 40 % der Heizenergie einsparen (BMWi, 2015). Aber auch der Einsatz energieeffizienter Produkte im Wohnbereich kann erhebliche Energieeinsparungen bewirken (Hebel 11, s. 7.3.3). Ein Sparduschkopf etwa senkt den Energieverbrauch des Duschens um bis zu 50 % (Verbraucherzentrale, 2024).

Seit Jahrzehnten nimmt in Deutschland die Pro-Kopf-Wohnfläche zu und liegt inzwischen bei über 47 m², wobei es bedingt durch den Zuzug vieler Menschen nach Deutschland im Jahr 2022 einen leichten Rückgang gab (UBA, 2024b). Nicht immer ist eine große Wohnfläche erwünscht, beispielsweise wenn Eltern nach dem Auszug der Kinder in den Familienwohnungen oder -häusern wohnen bleiben. Diese stehen dann jungen Familien nicht zur Verfügung. Es ist daher sinnvoll, Menschen bei der Verkleinerung ihrer Wohnfläche zu unterstützen (z. B. durch ein „Recht auf Wohnungstausch“) und Leerstand in Eigenheimen zu reduzieren, damit die freiwerdende Wohnfläche durch größere Haushalte genutzt werden kann und sich der Bedarf an zusätzlicher Wohnfläche verringert. Das Potential zur Einsparung von Treibhausgasemissionen wird auf 0,4-0,9 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente geschätzt (Fischer et al., 2022).

Außer durch eine höhere Energie- und Flächeneffizienz können die Treibhausgasemissionen von Wohngebäuden durch eine vollständige Umstellung der Energieversorgung auf erneuerbare Energien gesenkt werden, unter anderem durch erneuerbaren Strom und die Nutzung von Wärmepumpen oder von Abwärme (Hebel 01 (s. 7.1.1), 08 (s. 7.2.3)).

In Gebäuden sind zudem in erheblichem Umfang Rohstoffe und sogenannte Graue Energie gebunden (Hebel 04, s. 7.1.4), also Energie, die für die Errichtung aufgewendet wurde. Das Bauen ist in Deutschland verantwortlich für 90 % des mineralischen Rohstoffabbaus und 54 % des gesamten Abfallaufkommens (Destatis, 2023c). Der große Rohstoffstrom verursacht aber nur einen verhältnismäßig kleinen Anteil der Umweltauswirkungen des gesamten Rohstoffbedarfs über alle Rohstoffkategorien (vgl. Abbildung 13). Auch die Masse des

anfallenden Abfalls sagt kaum etwas über die Umweltwirkungen ihrer Entsorgung aus. Die Reduzierung von Rohstoffanspruchnahme und Abfallaufkommen (narrow) sind im Sinne des oben beschriebenen Zielsystems Zirkulären Wirtschaftens daher kein Selbstzweck. Maßgeblich sind hingegen die 7,2 % der nationalen Treibhausgasemissionen (65 Millionen Tonnen), die 2014 mit der Baustoffindustrie und dem Bauen von Wohn- und Nichtwohngebäuden einhergehen; weitere 35 Millionen Tonnen Treibhausgase werden in Vorketten im Ausland emittiert (Ramseier & Frischknecht, 2020). Das Bauen im Bestand erhält durch Sanierung, Modernisierung, Umnutzung und Aufstockungen den Wert und die Funktion der verbauten Materialien und reduziert durch vermiedene Ersatzneubauten den Energie- und Rohstoffbedarf (slow).

Auch eine verstärkte Kreislaufführung von Bauteilen und Baustoffen ist notwendig. Dies erfordert unter anderem lös- und trennbare Verbindungen, ein standardisiertes Informationsmanagement über in Gebäuden enthaltene Materialien, Bauteile, technische Systeme wie einen digitalen Ressourcenpasses als Teil eines Gebäudepasses, den Abbau kreislaufbehindernder Subventionen und Regulierungen sowie eine Verbesserung des öffentlichen Bewusstseins für dieses Thema (Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt, 2024), vgl. auch (Umwelt und Klima schützen – Wohnraum schaffen – Lebensqualität verbessern. Empfehlungen von UBA und KNBau für einen nachhaltigen Wohnungs- und Städtebau, 2023)).

7.4.2 Mobilitätsverhalten anpassen

Hebel 13: Mobilitätsverhalten anpassen

Die persönliche Mobilität (ohne Güterverkehr) verursacht durchschnittlich ca. 21 % des CO₂-Fußabdrucks einer in Deutschland lebenden Person. Diese entstehen hauptsächlich durch mit Pkw zurückgelegte Strecken, die noch immer zum größten Teil auf fossilen Energieträgern basieren, durch Flüge und die Produktion von Pkw (UBA, 2024a).

Wesentliche Hebel für eine Zirkuläre Wirtschaft im Bereich Mobilität sind daher die Reduktion des Einsatzes fossiler Energieträger, eine Reduktion der Flüge und eine Reduktion der Anzahl der Fahrzeuge im Bestand, die zukünftig wieder kleiner statt größer werden (narrow). Wichtige Strategien hierfür sind eine Verkehrswende und eine Energiewende im Verkehr. Im Sinne der Verkehrswende ist eine Verlagerung auf alternative, umweltfreundlichere Verkehrsmittel erforderlich, um den Ressourcen- und Flächenbedarf für das Mobilitätssystem insgesamt zu verringern. Wichtiger Bestandteil beider Strategien sind eine höhere Effizienz und der Umstieg auf elektrische Antriebe bzw. der Einsatz postfossiler Kraftstoffe – insbesondere in Bereichen, in denen die E-Mobilität nicht umgesetzt werden kann (v. a. internationaler Luft- und Seeverkehr).

Für eine Verlagerung auf umweltfreundlichere Verkehrsmittel gibt es zahlreiche Vorschläge für politische Instrumente, die prinzipiell auch seit vielen Jahren diskutiert, aber zu wenig umgesetzt werden (Hendzlik et al., 2024). Zu nennen sind hier insbesondere der Abbau klimaschädlicher Subventionen unter anderem im Luftverkehr, eine verursachergerechte Bepreisung, der Ausbau des Schienenverkehrs sowie die Stärkung des Umweltverbunds einschließlich ÖPNV, Rad- und Fußverkehr sowie digitale Lösungen bzw. geteilt genutzte Angebote. Diese Instrumente unterstützen teilweise zugleich eine höhere Effizienz und den Umstieg auf Elektrofahrzeuge und postfossile Kraftstoffe. In der Summe können konsequente Maßnahmen für eine Verkehrsverlagerung bis 2030 zu erheblichen Treibhausgaseinsparungen im Verkehrssektor führen, die die durch eine reine Antriebswende möglichen Einsparungen noch weit übersteigen würden (Hendzlik et al., 2024). Neben Treibhausgasen könnten auf diese Weise auch Rohstoffe

für die Herstellung von Batterien und die Fahrzeuge insgesamt sowie kostbare Fläche in den Städten eingespart werden, wenn weniger Fahrzeuge benötigt werden (mehr öffentlicher Verkehr und aktive Mobilität) und der Pkw-Besitz und -bestand zurückgeht.

Neben den eher technischen Ansätzen der höheren Effizienz und Antriebswende im Kraftfahrzeug-, Luft- und Seeverkehrsbereich (Hebel 11 (s. 7.3.3), 07 (s. 7.2.2)) bedarf es auch der Akzeptanz der Verbraucher*innen gegenüber den damit einhergehenden Änderungen. Reine Elektro-Pkw haben zwar im Jahr 2023 bei den Neuzulassungen einen Marktanteil von gut 18 % erreicht, der sich damit gegenüber dem Jahr 2019 verzehnfacht hat (Kraftfahrtbundesamt, 2024). Jedoch bedeutet dies noch immer einen Anteil von über 80 % fossil und hybrid angetriebenen Fahrzeugen. Vor allem eine Reform der Kfz-Steuer für Pkw-Neuzulassungen zur Förderung der Elektromobilität oder eine nationale E-Quote ergänzend zu EU-weiten Vorgaben zur Effizienz bzw. Elektrifizierung von neuen Pkw (Flottenzielwerte) würden hier den Trend zu klimafreundlicheren, in der Größe und Ausstattung an die Nutzung angepassten Pkws unterstützen. Eine konsequente Umsetzung von Vorschlägen für die Effizienz und Elektrifizierung für Pkw und auch leichte Nutzfahrzeuge können die Treibhausgasemissionen des Verkehrs im Jahr 2030 um rund 12 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente senken (Hendzlik et al., 2024). Konkrete Instrumente zur Förderung kleinerer und effizienterer Fahrzeuge fehlen national und für den EU-Binnenmarkt – auch für Elektrofahrzeuge – bisher im Allgemeinen noch, sodass der Anteil von Kleinwagen und Pkw in der Kompaktklasse an den Neuzulassungen in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen sind und SUV und Geländewagen immer stärker gekauft werden (Kraftfahrtbundesamt, 2024). Der Trend geht also derzeit in die falsche Richtung.

Maßnahmen in der Mobilität, die auf Verhaltensänderungen abzielen oder eine Akzeptanz technischer Neuerungen voraussetzen, bedürfen erfolgreicher Kommunikationsansätze und Umsetzungsstrategien.

7.4.3 Stärker pflanzenbasiert ernähren

Hebel 14: Stärker pflanzenbasiert ernähren

Auf die Ernährung entfallen durchschnittlich ca. 15 % der Treibhausgase des CO₂-Fußabdrucks einer in Deutschland lebenden Person (UBA, 2024a) und sie verursacht die größten Belastungen in den Bereichen Biodiversitätsverlust, Nährstoffüberschüsse, Landnutzung und Süßwasserentnahme (Campbell et al., 2017).

Die wichtigste Maßnahme für eine Verringerung der Umweltwirkungen der Ernährung ist die Reduzierung des Konsums tierischer Lebensmittel und somit ein Umstieg auf eine stärker pflanzenbasierte Ernährung (narrow, substitute). Die Produktion von tierischem Protein als Lebensmittel ist gegenüber der Produktion von pflanzlichen Lebensmitteln mit deutlich höheren Verlusten verbunden. So landen im globalen Durchschnitt nur 4 % (Rindfleisch) bis 25 % (Eier) des Proteins im Futter als essbares Protein im verzehrbaren Produkt (Alexander et al., 2016).

Weitere wichtige Ansätze sind vor allem der Kauf von Lebensmitteln aus ökologischer und gerechter Produktion (siehe dazu Hebel 07, s. 7.2.2) und die Vermeidung von Lebensmittelabfällen (narrow). Für die Bedürfnisfeldperspektive wird nur die stärker pflanzenbasierte Ernährung im Folgenden detaillierter betrachtet. Durch eine vegetarische Ernährung lassen sich etwa 35 % der THG-Emissionen der Ernährung gegenüber dem Durchschnitt einsparen, durch eine vegane Ernährung etwa 59 % (UBA, 2024a). Mit einer flexitarischen Ernährung mit geringen Mengen tierischer Lebensmittel gemäß der neuen DGE

Empfehlungen oder der Planetary Health Diet der Eat-Lancet-Kommission können die ernährungsbedingten THG-Emissionen halbiert werden (Klatt et al., 2024).

Auch die Flächenbelegung für die Produktion von Lebensmitteln ist wegen des hohen Flächenbedarfs für die Futtermittelproduktion stark durch tierische Lebensmittel getrieben. Auf etwa 61 % der für die Ernährung eines*einer Deutschen benötigten Fläche werden Futtermittel angebaut (Stand: 2016; (Jungmichel, Nill, et al., 2021)). Eine stärker pflanzenbasierte Ernährung unterstützt daher nicht nur den Klimaschutz, sondern stellt auch Flächen für andere Zwecke Zirkulären Wirtschaftens zur Verfügung, wie beispielsweise die Produktion von Biomasse zur stofflichen Nutzung, mehr ökologischen Landbau oder die Wiedervernässung von Moorböden (Klatt et al., 2024).

Politische Instrumente, die den u.a. im seit einigen Jahren sinkenden Konsum von Fleisch und Milchprodukten sichtbar gewordenen Wandel unterstützen würden, sind neben agrarpolitischen Leitplanken und Förderinstrumenten für eine artgerechte Tierhaltung vor allem eine Förderung von Alternativprodukten (alternative Proteinquellen), ökologischere Ausgestaltung der Preise u.a. über die Mehrwertsteuer und eine Förderung des Angebots stärker pflanzenbasierter Mahlzeiten in der Gemeinschaftsverpflegung (z. B. über verpflichtende Umsetzung der DGE-Qualitätsstandards wie in der Ernährungsstrategie der Bundesregierung (BMEL, 2024) vorgesehen).

7.4.4 Kleidung länger tragen

Hebel 15: Kleidung länger tragen

Der Textilsektor ist nicht nur für über 1 % der weltweiten Treibhausgasemissionen verantwortlich, sondern auch für den Einsatz von 5 % der weltweit produzierten Chemikalien und benötigt große Mengen an Wasser für den Anbau von Baumwolle und Produktionsprozesse, die in wichtigen Herstellungsländern für massive Wasserverschmutzung sorgen (Jungmichel, Wick, et al., 2021). In der Textilherstellung ist darüber hinaus das Risiko einer Verletzung von Arbeitsschutzstandards und Menschenrechten besonders hoch.

Die weltweite Textilproduktion hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen und der Verbrauch in wohlhabenden Ländern ist auf hohem Niveau. Für die EU wird davon ausgegangen, dass pro Person im Jahr 15 Kilogramm Textilien, inkl. Heimtextilien und Schuhe, nachgefragt werden (EEA, 2023c). Bekleidung macht in der EU mit 81 % den größten Anteil des Textilverbrauchs aus (JRC, 2021).

Ein zentraler und insbesondere aus der Bedürfnisfeldperspektive wichtiger Ansatz zur Verminderung der negativen Umweltauswirkungen von Bekleidung ist daher die Abkehr von „Fast Fashion“, also eine höhere Langlebigkeit sowie längere Nutzungsdauer von Bekleidung und anderen Textilien (slow, narrow) (Gimkiewicz, 2022).

Weniger Neukäufe und die Verbreitung von Nutzungsmustern, die Reparaturen, den Kauf von Gebrauchtkleidung, Verleihangebote, Tauschbörsen und Leasing einschließen, haben eine wesentlich größere umweltentlastende Wirkung als das Textilrecycling. Der WWF schätzt das Potential, Treibhausgasemissionen, den Rohstoffverbrauch und die Landnutzung durch Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen zu reduzieren bei Textilien auf jeweils 35-37 %. Bei der Landnutzung haben Maßnahmen im Textilbereich von allen Zirkularitätsmaßnahmen die drittgrößte positive Wirkung nach Lebensmitteln und Fahrzeugen/Batterien (WWF, 2023). Das liegt vor allem daran, dass in der Textilproduktion große Mengen an Baumwolle verarbeitet werden. Hinzu kommt, dass diese häufig konventionell in Regionen mit Wasserstress (Bringe zu

et al., 2021; Bruckner et al., 2019) und unter hohem Einsatz von Chemikalien (Jungmichel, Wick, et al., 2021) angebaut wird.

Im Rahmen der EU-Textilstrategie sind diverse Maßnahmen geplant, die in Richtung langlebiger und insgesamt kreislauffähigeren Textilien wirken sollen. Unter anderem sind Ökodesign-Anforderungen auch für die Haltbarkeit vorgesehen (EU-Kommission, 2022).

Weitere wichtige Ansätze zur Verminderung der negativen Auswirkungen des Textilsektors sind unter anderem eine bessere Recyclingfähigkeit, ein hochwertiges Recycling (close), der Einsatz weniger schädlicher Materialien (z. B. kontrolliert biologischer Baumwolle, substitute), eine Verringerung des Einsatzes gefährlicher Stoffe in der Produktion (clean) sowie die Einhaltung von Arbeitsschutzstandards und Menschenrechten (act responsibly).

7.5 Vision einer zirkulären Lebens- und Wirtschaftsweise

In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts lebt jeder Mensch auf der Welt in Wohlergehen und Sicherheit und befriedigt seine Bedürfnisse, jedoch ohne die planetaren Grenzen zu überschreiten und nicht zu Lasten künftiger Generationen. Für angemessenes Wohnen, gesunde Ernährung und passgenaue Mobilität steht eine breite Palette an energie- und materialeffizienten Konsumgütern, Dienstleistungen und Infrastrukturen zur Verfügung. Deren Preise bilden die ökologische und soziale Wahrheit ab; die Kosten, die der Allgemeinheit durch Umweltbelastungen bei der Produktion entstehen, werden vollständig vom Verursacher getragen. Zudem werden angemessene Erzeugerpreise gezahlt, um allen Produzierenden eine ausreichende Lebensgrundlage zu garantieren. Bisherige Geschäftsmodelle, deren Erfolg überwiegend auf Kostenexternalisierung beruht, sind nicht mehr rentabel und werden deshalb nicht mehr verfolgt. Gemeinwohlverträgliche Geschäftsmodelle, die bislang im Wettbewerb nicht bestehen konnten sind nun lukrativ – es entstehen neue Märkte. Tausch-, Miet- und Sharingangebote, die von der Bevölkerung sehr gut angenommen werden, sind im Alltag unkompliziert verfügbar. Jede und jeder verfügt so stets über eine situativ passende Ausstattung, ohne selbst alle Produkte zur Befriedigung der eigenen Bedürfnisse besitzen und sich um deren Unterhalt kümmern zu müssen. Dadurch wird die Nutzungsdauer und -intensität von Produkten gesteigert. Die gemeinschaftliche Nutzung vernetzt Menschen, das Miteinander trägt zur Befriedigung der Grundbedürfnisse nach Anerkennung und sozialer Zugehörigkeit bei.

Industrie und Gewerbe folgen den geänderten gesellschaftlichen Lebensweisen und gestalten diese mit. Erfolgsfaktoren sind neben einem effizienten Einsatz von Material und Energie entlang der gesamten Produktlebensdauer und hochwertigem Recycling regionale Industriesymbiosen und eine ausgeprägte Dienstleistungsorientierung. Der Verkauf von Produkten als Geschäftsmodell ist partiell ersetzt durch Mietmodelle, bei denen Kunden* Kundinnen für die Nutzung bezahlen, die Wartung und Reparatur der Produkte aber den Unternehmen obliegt. Für die Unternehmen lohnt es sich deshalb, in langlebige und robuste Produkte zu investieren.

Das Produktdesign ist für eine solch lange und intensive Nutzung optimiert. Produkte werden ressourceneffizient, für eine lange Lebensdauer, recyclingfähig und ohne schädliche Wirkung für Mensch und Umwelt gestaltet. Komponenten können ausgetauscht, Softwareupdates aufgespielt werden. Nach Ende einer Nutzungsphase werden Komponenten weitergenutzt oder Materialien einem hochwertigen Recycling zugeführt. Energetische und sonstige Verwertung sowie Beseitigung spielen eine quantitativ kleine Rolle. Der Abfallwirtschaft kommt bei der sicheren Entsorgung und Ausschleusung von Schadstoffen eine verantwortungsvolle Rolle zu.

Materialien werden weitestgehend in menschengemachten Kreisläufen geführt, die umweltverträglich in natürliche Kreisläufe eingebettet sind. Ein Material durchläuft dabei entlang seines Lebenswegs wenn möglich mehrere Produktlebenszyklen, kann auch in andere Materialien umgewandelt werden, bis es schließlich an die Umwelt abgegeben wird. Recyclingsysteme tragen in hohem Maß zur Sicherheit der Rohstoffversorgung bei. Sekundärmaterialien sind in allen erforderlichen Qualitäten sowie zu wirtschaftlichen Preisen verfügbar und als Alternative für Primärrohstoffe gut nachgefragt. Das führt dazu, dass für ein gutes Leben deutlich weniger Rohstoffe aus der Natur entnommen werden müssen als zuvor. Die Entstehung von Abfällen und die Emission von Schadstoffen (einschl. klimaschädlicher Stoffe) wird sowohl bei der Kreislaufführung von Materialien als auch bei der unvermeidbaren Rohstoffentnahme aus der Natur minimiert.

Eine zirkuläre Wirtschafts- und Lebensweise trägt so wesentlich zur Bewältigung der planetaren Dreifachkrise bei und stärkt zugleich wirtschaftliche Resilienz, gesellschaftlichen Zusammenhalt sowie strategische Souveränität.

8 Empfehlungen für ausgewählte Politikfelder

8.1 Auswahl der Politikfelder

Ausgehend von einer übergreifenden Vision, wie Zirkuläres Wirtschaften unsere Lebenswelten ab Mitte des Jahrhunderts ändern könnte, erfolgt hier ein Zoom-in in ausgewählte Politikfelder. Für die Bereiche „Ernährung und Landwirtschaft“, „Bauen und Wohnen“ und „Mobilität von Personen und Fahrzeugproduktion“ werden durch die Anwendung großer Hebel aus den verschiedenen Perspektiven (Kapitel 7) Handlungsansätze abgeleitet. Diese Handlungsansätze haben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern akzentuieren dort, wo sich aus der multiperspektivischen Betrachtung erfolgversprechende Interventionsansätze, Synergien zwischen unterschiedlichen Betrachtungswinkeln oder blinde Flecken herauskristallisiert haben. Die Handlungsempfehlungen an politische Entscheidungsträger*innen zur Setzung des erforderlichen politischen, rechtlichen und institutionellen Rahmens beinhalten Instrumente, die verschiedene gesellschaftliche Akteure*Akteurinnen zur Mitgestaltung anregen sollen. Für die Ausgestaltung zirkulärer Wirtschafts- und Lebensweisen braucht es zusätzlich zu geänderten unternehmerischen Praktiken und Infrastrukturen geänderte Lebensstile und Alltagsroutinen der Bürger*innen. Es gilt daher, nicht nur die Angebotsseite zukunftsfähig weiterzuentwickeln, sondern auch die Nachfrageseite in den Blick zu nehmen und das Verhalten der Nutzenden gezielt in Richtung Suffizienz zu leiten.

Die Zusammenschau der Hebel aus den vier Perspektiven ergab besonders hohes Änderungspotential *durch Ansätze Zirkulären Wirtschaftens* in den genannten Politikfeldern. Diese Themen stehen auch in verschiedenen Studien zu Klima- und Ressourcenschonung, u.a. der UBA-RESCUE-Studie (Purr, Günther, et al., 2021), im Fokus und zeichnen sich durch sehr hohe Alltagsrelevanz für Bürger*innen aus. Für die künftige Energieversorgung gehen wir davon aus, dass die per Klimaschutzgesetz beschlossene Fortentwicklung Deutschlands zu einer treibhausgasneutralen Gesellschaft bis 2045 vollzogen wird. Hiermit korrespondiert u. a. der Hebel 01 „Fossile Rohstoffe im Boden lassen“.

Die folgenden Ausführungen zu den drei oben genannten Politikfeldern beinhalten eine Kurzbeschreibung des angestrebten zirkulären Systems (Vision), die Benennung der für dieses System relevanten Hebel und schließlich eine Auswahl von für die Umsetzung besonders erfolgversprechenden Instrumentenbündeln. Dabei wurden ökonomische und ordnungsrechtliche Instrumente in allen drei Beispielsystemen unabhängig voneinander priorisiert. Um breite gesellschaftliche Akzeptanz für den erforderlichen Wandel zu schaffen und Innovationen an geeigneten Stellen anzureizen, müssen diese jedoch flankiert werden durch vertrauensbildende Beteiligungsformate, Informations- und Bildungsangebote sowie forschungs- und strukturfördernde Programme für vom Wandel besonders betroffene Branchen und Regionen. Es braucht Instrumentenbündel für verschiedene Politikfelder und mutige Investitionen auch aus öffentlichen Mitteln, um die im Folgenden skizzierten Wirtschafts- und Lebensweisen künftig für die Breite der Bevölkerung attraktiv und möglich zu machen.

8.2 Ernährung und Landwirtschaft

Vision eines zirkulär ausgerichteten Agrar- und Ernährungssystems:

Wir ernähren uns gesund, umwelt- und klimaverträglich und überwiegend pflanzenbasiert. Produkte der Landwirtschaft werden unter Einhaltung der planetaren Grenzen hergestellt.

Auch wenn die Nutzung von Nahrungsmitteln naturgemäß einer linearen Logik folgt – Nahrungsmittel können weder länger noch mehrmals verwendet werden – sind Landwirtschaft und Ernährungsweisen zukünftig an Zirkularitätsstrategien ausgerichtet.

Die Landwirtschaft ergreift alle technisch möglichen Maßnahmen für die Reduktion der Emissionen (Methan, Ammoniak) aus Stall, Wirtschaftsdüngerlager und -ausbringung (Hebel 07) und nutzt keine biodiversitäts- und gesundheitsschädigenden Chemikalien für den Pflanzenschutz mehr (Hebel 05). Die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor werden in der Pflanzenproduktion so eingesetzt, dass Nährstoffeinträge in Gewässer und Atmosphäre stark reduziert sind (Hebel 05). Nährstoffquellen sind regional verfügbarer, organischer Dünger, biologische Stickstofffixierung (Leguminosen) und synthetisch hergestelltes Struvit²⁶ (Hebel 07). Dafür wird der in Abwässern und Klärschlämmen enthaltene Phosphor so gut wie technisch möglich wiedergewonnen. Durch diese Praktiken, vergleichbar mit dem ökologischen Pflanzenbau, sinkt zwar die Flächenproduktivität, der zusätzliche Flächenbedarf wird jedoch durch freiwerdende Flächen auf Grund einer verringerten Produktion von Agrarrohstoffen für Bioenergie und Futtermittel gedeckt (Hebel 02, 14). Diese werden genutzt, um mehr Pflanzen für die menschliche Ernährung und (Faser-)Pflanzen für die stoffliche Nutzung naturverträglich anzubauen, nicht-bio-basierte erneuerbare Energien auszubauen sowie Naturschutz und natürlichen Klimaschutz zu betreiben. Hier eröffnen sich alternative Einkommensquellen für Landwirte*Landwirtinnen, neue Anforderungen an die Aufbereitung von Reststoffen aus dem Pflanzenbau und Chancen für Industrien, die hochwertige und kreislauffähige bio-basierte Produkte, unter anderem mit Substitutionseffekten, herstellen (Hebel 02).

In Deutschland werden weniger Tiere für die Produktion von Fleisch, Eiern und Milch gehalten, wodurch Methan- und Ammoniakemissionen sowie Nährstoffeinträge in Gewässer weiter sinken (Hebel 05). Verbleibende Bestände werden vorwiegend mit lokal verfügbaren Reststoffen und Aufwuchs von Dauergrünland gefüttert (Hebel 07), um den Import nicht nachhaltig produzierter Futtermittel zu vermeiden. Wo eine Fütterung mit Agrarrohstoffen erforderlich ist, wird ausschließlich mit einheimischen oder zertifiziert entwaldungsfreien Pflanzen (zu)gefüttert. Lokale Nährstoffüberschüsse werden durch eine stärker flächengebundene Tierhaltung vermieden, bei der nur so viele Tiere gehalten werden und Wirtschaftsdünger entstehen, wie die vor Ort zur Verfügung stehende landwirtschaftliche Fläche versorgen bzw. aufnehmen kann (Hebel 07).

Im Einklang mit einer reduzierten Tierhaltung und Fleisch- und Milchproduktion entscheiden sich Konsumenten*Konsumentinnen zunehmend für eine pflanzenbasierte Ernährungsweise (Hebel 14). Öffentliche Kantinen und Betreuungs-/Versorgungseinrichtungen bieten vollwertige, stärker pflanzenbasierte Kost an und vegetarische und vegane Gerichte werden das neue Normal. Der Import pflanzlicher Nahrungsmittel orientiert sich an ökologischen Kriterien, u. a. dem Wasserverbrauch in Regionen mit Wasserstress, und sozialen Standards in der Lieferkette, die sich auch in höheren und entlang der Wertschöpfungskette fair verteilten Preisen für landwirtschaftliche Erzeugnisse widerspiegeln (Internalisierung externer Kosten).

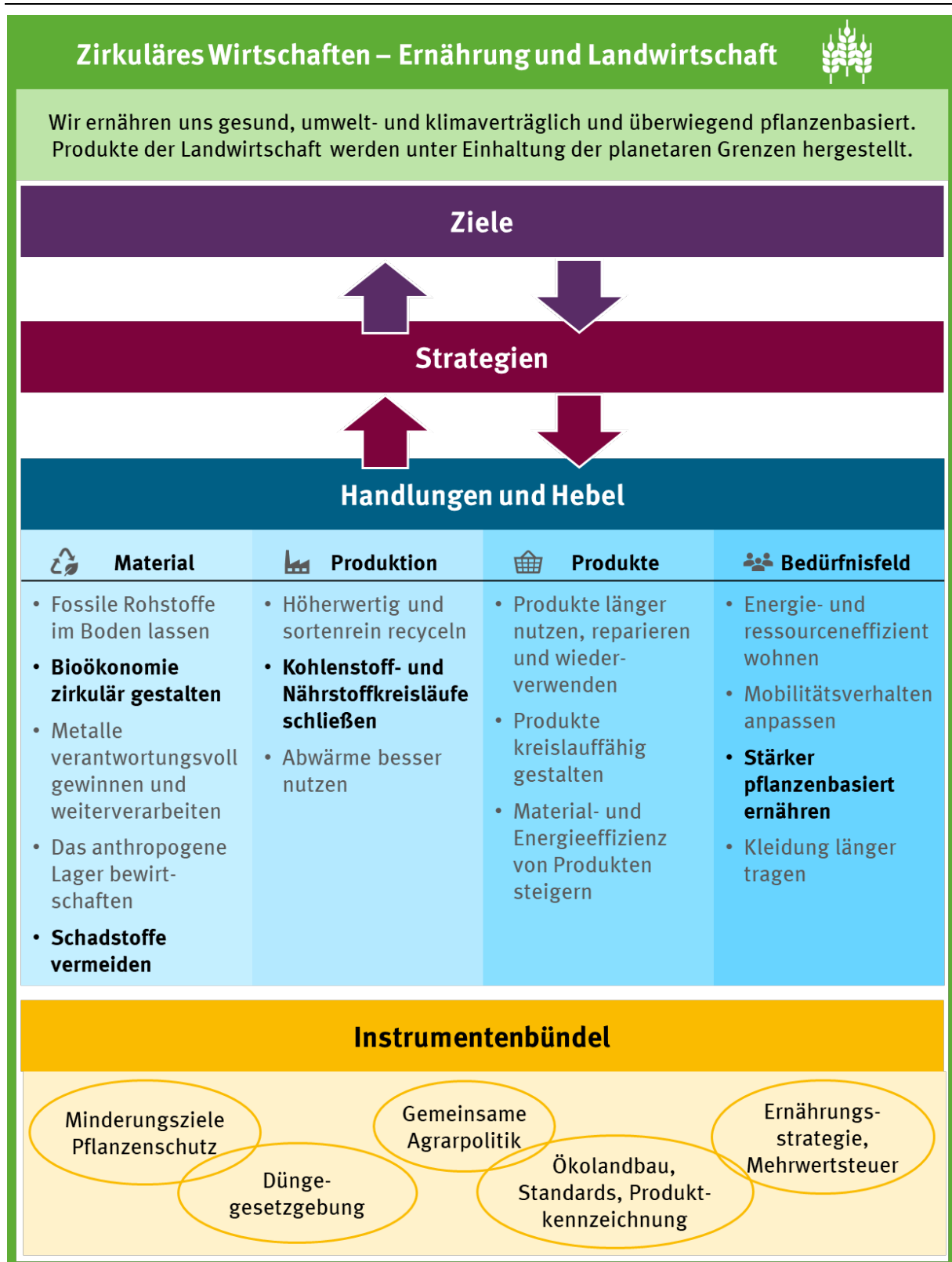
²⁶ Struvit wird aus kommunalen Kläranlagen gewonnen und enthält vor allem Phosphor, aber auch Stickstoff. Es darf im Ökolandbau verwendet werden. https://www.naturland.de/images/01_naturland/documents/relacs_struvit_081222.pdf

Die Nachfrage nach und der schonende Umgang mit nachhaltig produzierten, langlebigen bio-basierten Produkten steigt (Hebel 02).

Wichtigste Instrumentenbündel zur Förderung eines zirkulären Ernährungssystems:

- ▶ Förderung der landwirtschaftlichen Produktion im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) stärker an Umwelt- und Klimaschutz ausrichten (Köder, 2021; Krämer, 2017; Scheffler et al., 2022; UBA und BfN, 2024), beispielsweise eine kraftfutterreduzierte Milchviehhaltung fördern sowie Weideprämie und Heumilchprogramm ausweiten (Jürgens et al., 2023)
- ▶ Rechtlich bindende Minderungsziele für Pflanzenschutzmittel auf EU-Ebene festlegen (Frische et al., 2016)
- ▶ Düngegesetzgebung konsequent umsetzen und es bei der anstehenden Überarbeitung zielorientierter, verursachergerechter und integrierter ausgestalten
- ▶ Ökolandbau und die Weiterentwicklung von Standards für die ökologische Erzeugung von Lebensmitteln und von Produktkennzeichnungen fördern (Bunsen et al., 2022; Haller et al., 2020)
- ▶ Konsum pflanzenbasierter Nahrungsmittel durch konsequente und zeitnahe Umsetzung der Ernährungsstrategie und Anpassung des Mehrwertsteuersatzes auf pflanzliche Nahrungsmittel nach unten und auf tierische Nahrungsmittel nach oben stärken (Förster et al., 2023; Gerolf et al., 2023; Postpischil et al., 2022)

Abbildung 15: Relevante Hebel und Instrumentenbündel für das Politikfeld Ernährung und Landwirtschaft



Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

8.3 Bauen und Wohnen

Vision einer zirkulären Bau- und Wohnungswirtschaft:

Das zirkuläre Bauwesen bewirtschaftet das anthropogene Materiallager verantwortungsvoll und weitsichtig und ergänzt es mit nachwachsenden Baustoffen. Der Umbau, die Modernisierung und die Umnutzung des Gebäudebestands im Einklang mit der Anpassung an lokale Folgen des Klimawandels haben Vorrang vor Neubau. Wohnungen werden zudem flexibel, bedarfsgerecht und effizient genutzt.

In einem breit angelegten Diskurs wie dem Neuen Europäischen Bauhaus wird die Wertschätzung für Gebrautes in das Verständnis von Ästhetik eingewoben. Das Entwerfen von Generationen überdauernden Bauwerken erfordert zeitlose Lösungen, um den Umbaubedarf zu begrenzen. Das gilt sowohl für die ästhetische Qualität, als auch für die Anpassbarkeit hinsichtlich sich ändernder Nutzungen. Erreicht wird das durch die Flexibilisierung von Grundrissen und flächeneffizientes Wohnen. Der Ein- und Zweifamilienhausbestand wird nicht mehr als Alters-, sondern als Lebensabschnittswohnsitz verstanden. Die Reduktion der durchschnittlichen Wohnfläche pro Kopf gelingt durch freiwillige Angebote zum Wechsel in bedarfsgerechte Kleinwohnformen am Wohnort. Familien finden so attraktiven Wohnraum, ohne durch Neubau zusätzliche Flächen in Anspruch zu nehmen (Hebel 12).

Planende prüfen daher kritisch, ob der formulierte Bedarf dem tatsächlichen entspricht und ob für dessen Befriedigung tatsächlich Neubau erforderlich ist (Hebel 11, 12). Zunächst werden bestehende Bauwerke im Kontext der regionalen Baukultur energetisch modernisiert und weiter- oder umgenutzt. Ausgangspunkt der Planungen für den verbleibenden Baubedarf sind regional verfügbare Sekundärbauteile und Recyclingbaustoffe (Hebel 04). Ergänzend kommen nachhaltig produzierte nachwachsende Baustoffe zum Einsatz, welche ihrerseits unter Wahrung hochwertiger stofflicher Nutzungsoptionen im Kreislauf geführt werden (Hebel 02). Bei der Dimensionierung von Bauteilen müssen Planende verantwortungsvoll Zielkonflikte zwischen der Vermeidung von Umweltauswirkungen, z. B. den THG-Emissionen des Zementbrennens, und der Dauerhaftigkeit von Bauwerken abwägen (Hebel 10, 11).

Das Bauen wird nicht länger als Verbrauchen von Baustoffen verstanden, sondern als deren Einlagerung im Bauwerk als Materialspeicher (Hebel 04). Um diese Rohstoffreserven später in hoher Qualität erschließen zu können, lenkt die Bauproduktenindustrie ihre Innovationskraft auf demontierbare und sortenrein trennbare Verbindungstechnologien. Schadstoffe schließen eine Nachnutzung aus und werden daher weder eingebracht noch in nachfolgende Kreisläufe verschleppt, sondern aus Rückbaumaterialien möglichst ausgeschleust und unter human- und ökotoxikologisch unbedenklichen Konzentrationen gehalten (Hebel 04, 05, 10).

Die Ausführenden tragen Verantwortung im unmittelbaren Umgang mit Ressourcen. Eine hohe Ausführungsqualität verringert das Abfallaufkommen des Baugewerbes und ist die Grundlage für lange technische Bauwerkslebensdauern.

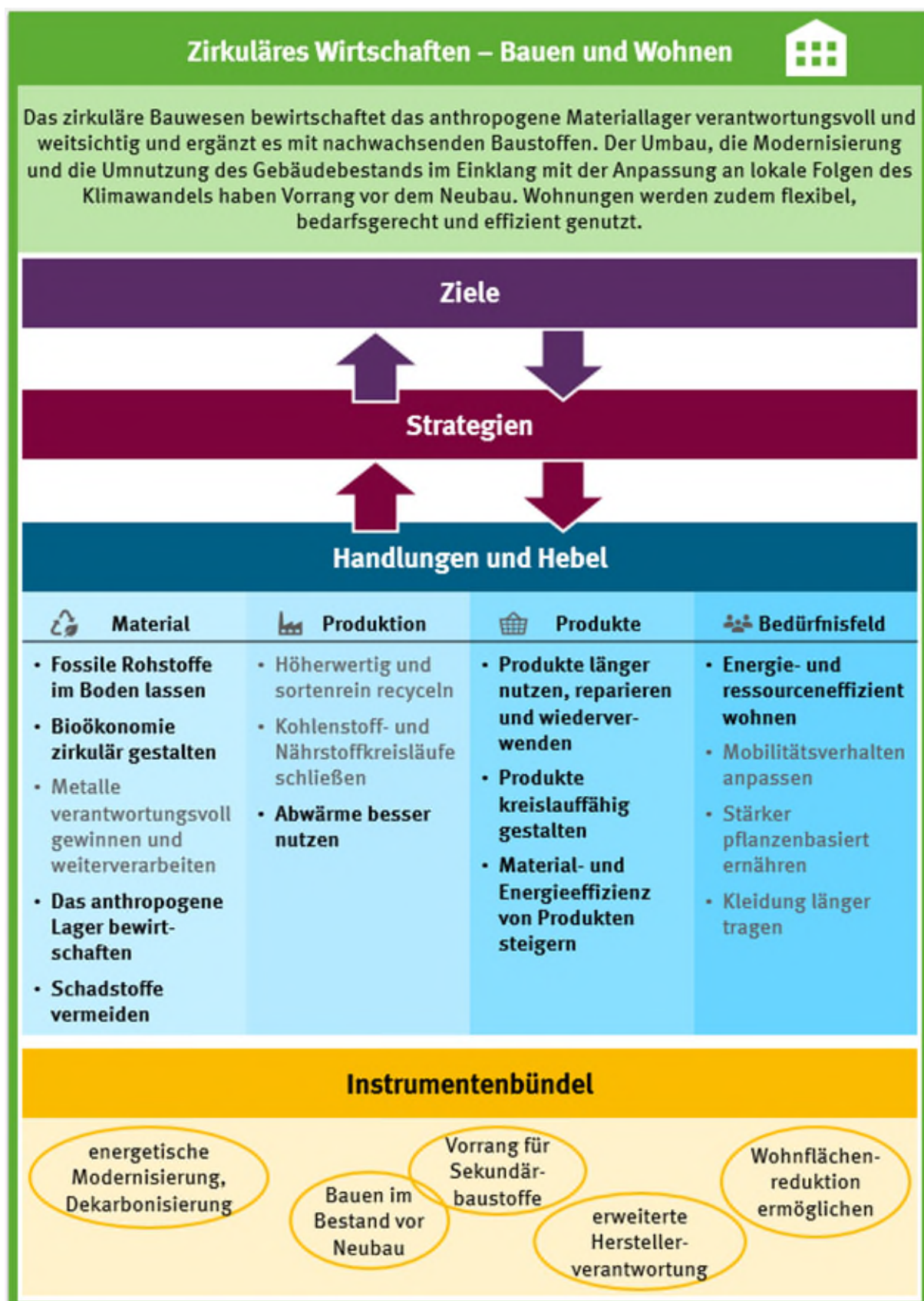
Letztlich liegt es in der Verantwortung und im Interesse der Bauherrenschaft und der Eigentümer*innen mittels Reparatur-, Instandsetzungs- und Modernisierungsarbeiten den Funktionserhalt der Bauwerke und der darin verbauten Materialien zu gewährleisten. Sie betreiben Gebäude energieeffizient und mit erneuerbaren Energien sowie Abwärme, die weitestgehend nähräumig auf oder am Gebäude gewonnen werden (Hebel 01, 08, 11, 12). Durch die Pflege von digitalen Gebäude- oder Bauwerkspässen tragen Bestandshalter entscheidend zu einer verlässlichen Datengrundlage bei, die es wiederum den planenden Berufen ermöglicht, im Bestand zu bauen oder Sekundärrohstoffe aus dem anthropogenen Lager zu heben (Hebel 04, 05, 10).

Moderne Regelwerke schaffen die notwendige Rechtssicherheit, z. B. hinsichtlich der Produktgewährleistung für Sekundärbauteile und Recyclingbaustoffe (Hebel 04). An anderer Stelle eröffnen sie Möglichkeiten für die bedarfsgerechte Anpassung und freiwillige Verkleinerung von Wohnfläche mindestens zu den bisherigen Miet- oder Eigentumskonditionen, wodurch sich der regionale Wohnraumangel ohne Baumaßnahmen entspannt (Hebel 12).

Wichtigste Instrumentenbündel zur Förderung einer zirkulären Bauwirtschaft:

- ▶ Die Wärme- und Energiewende wird rasch durch flächendeckende energetische Modernisierung, Dekarbonisierung der Energieversorgung und bauwerksnaher Gewinnung erneuerbarer Energie umgesetzt – zur Schonung fossiler Energieträger (Cludius et al, 2024).
- ▶ Das Mietrecht wird so weiterentwickelt, dass individuelle Wohnflächenreduktionen nicht durch finanzielle Nachteile verhindert werden – denn Anreize für freiwillige Suffizienz-Maßnahmen helfen, den Wohnraumbedarf zu senken (Kenkmann et al., 2019).
- ▶ Bauen im Bestand wird Grundsatz des Baurechts: Material, Baukultur und graue Energie werden rechtssicher erhalten, indem mit zurückgewonnenen und auf Schadstoffe geprüften Bauteilen und Baustoffen in Bestandsbauwerken gebaut wird (Bundesarchitektenkammer, 2023).
- ▶ Gebäudebestand und Sekundärbaustoffe werden erforderlichenfalls mit nachhaltig erzeugten nachwachsenden Baustoffen ergänzt – Gebäude werden somit zu Kohlenstoffsenke weiterentwickelt.
- ▶ Es gilt die erweiterte Herstellerverantwortung für Bauprodukte – dies initiiert die Transformation zum schadstofffreien, trennbaren Produktdesign, das vom Kreislaufschluss aus denkt (Hillebrandt et al., 2024).

Abbildung 16: Relevante Hebel und Instrumentenbündel für das Politikfeld Bauen und Wohnen



Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

8.4 Mobilität von Personen und Fahrzeugproduktion

Vision eine zirkulären Mobilitätssystems:

Verkehrswende und Antriebswende ermöglichen gemeinsam ein leistungsfähiges, alltagstaugliches sowie umwelt- und ressourcenschonendes Mobilitätsangebot im Personenverkehr. Sie bieten gerade der europäischen Fahrzeugindustrie eine neue Zukunftsperspektive.

Dank integrierter Planung im Sinne einer „Stadt und Region der kurzen Wege“ und mobilen Arbeitsformen sind weniger Personenkilometer für die täglichen Wege nötig. Attraktive und leistungsfähige öffentliche Verkehre mit guter Anbindung ländlicher Regionen, digitale Lösungen (Mobility as a Service) und eine sichere Fuß- und Radinfrastruktur ermöglichen den Umstieg großer Bevölkerungsteile auf den Umweltverbund²⁷ (Hebel 13). Zusammen mit einer verursachergerechten Bepreisung und dem Ab- bzw. Umbau von klimaschädlichen Subventionen hat das zu einer Reduzierung des Bestands an Pkw und auch des Flugverkehrs geführt. Auch die Nachfrage nach dem Automobil hat im Lichte globaler Klimaschutzpolitik spürbar nachgelassen. Besonders dort, wo der öffentliche Verkehr mit Bus und Bahn an seine Grenzen stößt, werden über Ride- oder Car-Sharing-Angebote Pkw weiterhin – bezogen auf die Fahrleistung pro Fahrzeug deutlich intensiver als heute – „geteilt“ genutzt (Hebel 9). Fahrzeuge im Bestand sind wieder kleiner und in Ausstattung und Materialeinsatz auf das zum Transport notwendige Maß beschränkt (Hebel 11); Pkw werden nicht mehr als Statussymbol wahrgenommen. Auf diese geänderten Rahmenbedingungen und Werthaltungen hat die Automobilindustrie reagiert und sich zu einer Mobilitätsindustrie weiterentwickelt. Zum Portfolio gehören neben der Fahrzeugentwicklung und -produktion Mobilitätsdienstleistungen, die den Nutzenden neben Ride- oder Car-Sharing-Angeboten intermodale Mobilitätsangebote vermitteln. Nach diesem Strukturwandel ist die Branche weiterhin ein sehr wichtiger Wirtschaftszweig in Deutschland und Europa.

Elektrische Pkw und Busse haben sich – nicht zuletzt dank guter Ladeinfrastruktur und gestiegener Energiedichten der Batterien – gegenüber Verbrennern durchgesetzt. Der Straßen- und Schienenverkehr ist weitestgehend elektrifiziert und in der Nutzungsphase treibhausgasneutral (Hebel 01 und 11). Da durch Verkehrswende und Energiewende im Verkehr insgesamt weniger Kraftstoffe benötigt werden, wird der Ausstieg aus der energetischen Nutzung von Anbaubiomasse im Straßen- und Schienenverkehr möglich (Hebel 02). Durch den Wechsel von Verbrennern auf Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben und Traktionsbatterien steigt der Rohstoffbedarf für einzelne bislang nur in geringem Umfang industriell genutzte Metalle wie bspw. Lithium in der Transformationsphase zunächst stark an. Diese Technologiemetalle werden wie alle anderen benötigten Rohstoffe verantwortungsvoll beschafft, so auch die weiterhin in großem und teils auch signifikant wachsendem Umfang benötigten Basismetalle wie Stahl, Kupfer, Aluminium oder Zink (Hebel 03). Dank digitalem Produktpass und ausgebauter Remanufacturing-Infrastruktur werden in Pkw oder Bussen ausgediente Akkus einer hochwertigen Zweitnutzung im Energiesystem zugeführt (Hebel 09 und 10). Wenn Batterien, weitere Fahrzeugkomponenten oder das gesamte Fahrzeug nach vielen Jahren das Lebensende erreichen, erfolgt ein hochwertiges und sortenreines Recycling. Auf diese Weise verringert sich die Abhängigkeit von kritischen Rohstoffimporten durch den steigenden Einsatz von Sekundärmaterialien (Hebel 04 und 06). Der Metall- und Kunststoffindustrie gelingt es zusammen mit der Fahrzeugindustrie und den Entsorgern bzw. Recyclern dank technologischer Weiterentwicklungen und entsprechendem Produktdesign, die Rohstoffe bzw. Materialien

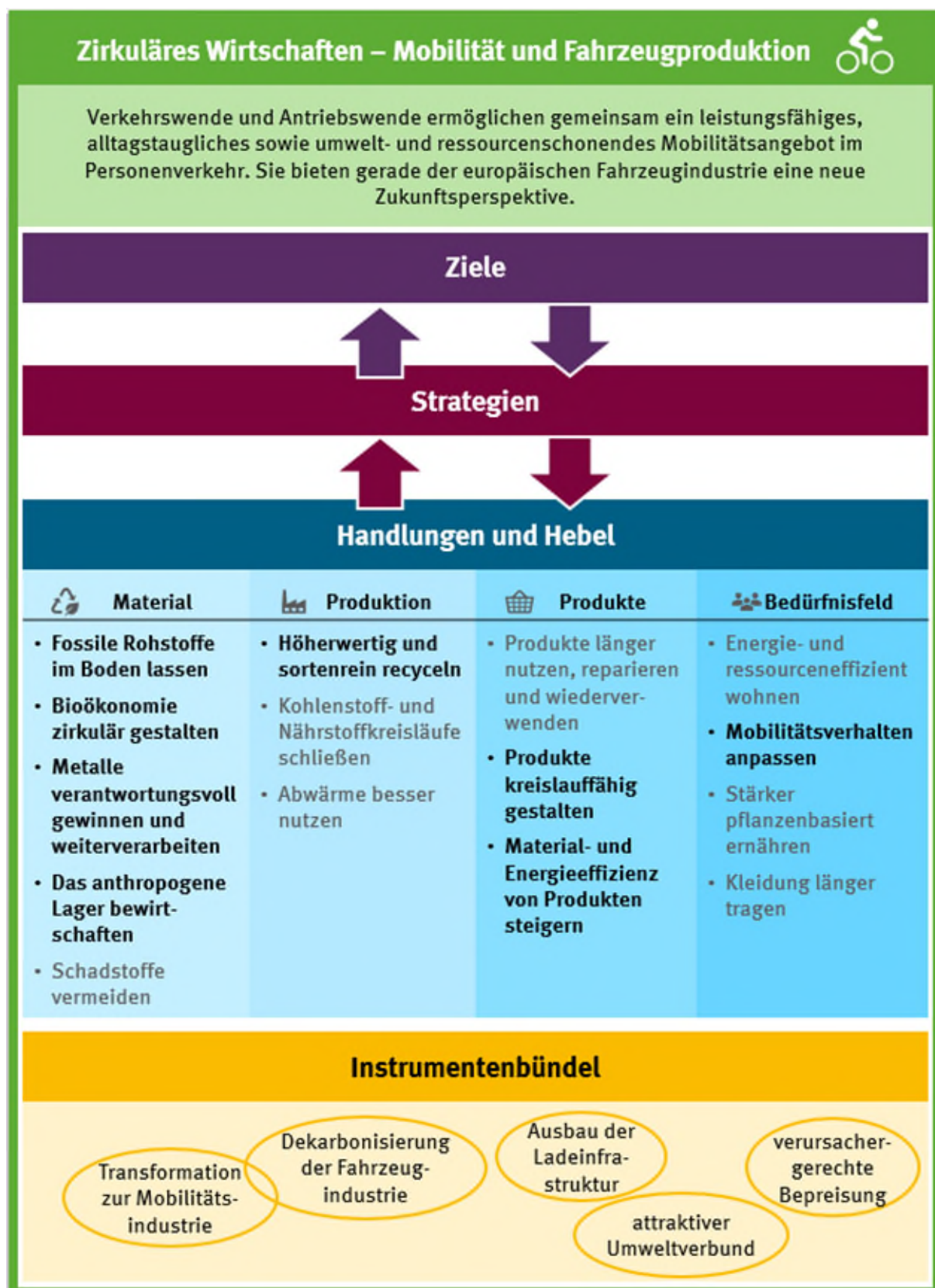
²⁷ Der Umweltverbund beinhaltet neben Fuß- und Radverkehr sowie ÖP(N)V auch Car-Sharing.

langfristig mit hoher Qualität im Kreislauf zu halten (Hebel 06 und 10). Die Herstellung der Fahrzeuge erfolgt treibhausgasneutral auf allen Lieferkettenstufen (Hebel 01 und 03).

Wichtigste Instrumentenbündel zur Förderung eines zirkulären Mobilitätssystems:

- ▶ Der Umweltverbund wird durch ein flächendeckendes, zuverlässiges und qualitativ hochwertiges Angebot, Infrastrukturausbau und attraktive Preise gestärkt. (Burger & Bretschneider, 2021; Frey et al., 2020; Hendzlik et al., 2024; Kreye et al., 2024)
- ▶ Ergänzend wird eine verursachergerechte Bepreisung eingeführt und umweltschädliche Subventionen abgebaut. Konkret soll ein Zuschlag für Pkw mit hohen CO₂-Emissionen eingeführt werden, der so den Kauf besonders klimaschädlicher Pkw verteuert („Malus“) (Purr, Wehnemann, et al., 2021; Verse & Douglas, 2023)
- ▶ Die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge wird schnell, bedarfsorientiert, flächendeckend und ressourcenschonend ausgebaut. Der Aufbau orientiert sich an zukünftigen Bedarfen.
- ▶ Die Dekarbonisierung der Fahrzeugproduktion wird forciert, z. B. durch Regulierung und Begrenzung des Product Carbon Footprint für Fahrzeuge. Dekarbonisierung als Hebel für Rezyklateinsatz erzeugt zudem eine Nachfrage nach hochwertigem Recycling, das wiederum Design for Circularity befördert. Ergänzend stellen Rezyklateinsatzquoten und Recyclinganforderungen den zügigen Ausbau der dafür erforderlichen Infrastruktur und Märkte sicher (Biemann et al., 2024; Potrykus et al., 2024; Sander et al., 2020).
- ▶ Die Transformation der Fahrzeugindustrie zu einer Mobilitätsindustrie wird sozial flankiert, etwa durch Umschulungsmaßnahmen zur Absicherung von Beschäftigten (Breisig et al., 2022; Sievers & Grimm, 2024).

Abbildung 17: Relevante Hebel und Instrumentenbündel für das Politikfeld Mobilität und Fahrzeugproduktion



Quelle: eigene Abbildung, Umweltbundesamt

9 Ausblick

Lineare Wirtschaftsweisen führen aus Umwelt- und Nachhaltigkeitssicht und in neuen geopolitischen Realitäten zunehmend in eine Sackgasse. Daher muss lineares Wirtschaften zukünftig durch Zirkuläres Wirtschaften abgelöst werden. Zirkuläres Wirtschaften ist jedoch kein Selbstzweck, sondern Mittel zum Zweck. Es kann einen wesentlichen Beitrag zu einem übergeordneten Ziel leisten: Ein gutes Leben für alle innerhalb planetarer Grenzen. Allerdings erreichen Maßnahmen zur Förderung Zirkulären Wirtschaftens dieses Ziel nicht automatisch. Nur wenn Prioritäten gesetzt und sie auf den Umweltschutz und die Bedürfnisse der Menschen ausgerichtet werden, kann das volle Potential Zirkulären Wirtschaftens ausgeschöpft werden.

Mit der am 4.12.2024 durch das Kabinett verabschiedeten Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) erkennt die Bundesregierung den Handlungsbedarf an und liefert einen wesentlichen Meilenstein. Die neue Bundesregierung hat sich im Koalitionsvertrag dazu bekannt, diesen Weg weiter zu gehen. Politisches Agieren im Kontext der im Papier skizzierten komplexen Wechselwirkungen ist anspruchsvoll und erfordert ressortübergreifende Kohärenz und Weitblick. Mit dem vorliegenden Diskussionspapier möchte das UBA auf Grundlage der NKWS weiterdenken und die Realisierung der NKWS-Ziele unterstützen. Mit seinem Zielsystem und den systematisch abgeleiteten Hebeln bietet das Papier einen Kompass an, der für eine Priorisierung und Konkretisierung von Handlungsansätzen in Umsetzung und – perspektivisch – Weiterentwicklung der NKWS genutzt werden kann.

Darüber hinaus braucht es einen engen Schulterschluss mit europäischen Partnern zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Resilienz der EU-Wirtschaft bei gleichzeitiger Dekarbonisierung, erklärte Ziele des Deals für eine saubere Industrie und des Kompasses für Wettbewerbsfähigkeit der EU Kommission. Für die Fortschreibung der Bioökonomie-Strategie und die Ausgestaltung des angekündigten Circular Economy Acts können aus dem Papier Impulse für besonders wirkungsvolle Politikinterventionen abgeleitet werden.

Die Arbeiten am Diskussionspapier und die aktuellen Debatten im politischen und gesellschaftlichen Kontext zeigen dem UBA auch Weiterentwicklungsbedarfe seiner wissenschaftlichen Grundlagen auf, um das Fundament praxistauglicher Politikberatung für die kommenden Jahre zu sichern. Zu den vertiefungswürdigen Aspekten zählen eine Quantifizierung der ökologischen und sozioökonomischen Effekte durch Zirkuläres Wirtschaften (z. B. Klima- und Biodiversitätsschutz, Beschäftigung), die Entwicklung eines Indikatorensets für das Monitoring von Zielen Zirkulären Wirtschaftens, die Untersuchung globaler Auswirkungen Zirkulären Wirtschaftens, insbesondere auf Länder des Globalen Südens, die sozialverträgliche Ausgestaltung wirksamer Instrumentenmixe oder die Rolle einer zunehmenden Digitalisierung bei der Ausgestaltung Zirkulären Wirtschaftens.

Wenngleich einzelne Fragen hier noch nicht abschließend beantwortet wurden, ist unsere Botschaft klar: Zirkuläres Wirtschaften ist kein Nischenthema, sondern ein zentraler Baustein für eine zukunftsfähige Gesellschaft – besonders in Zeiten multipler Krisen.

10 Quellenverzeichnis

- Akenji, L., & Bengtsson, M. (2014). Making Sustainable Consumption and Production the Core of Sustainable Development Goals. *Sustainability*, 6(2), 513–529. <https://doi.org/10.3390/su6020513>
- Alexander, P., Brown, C., Arneth, A., Finnigan, J., & Rounsevell, M. D. A. (2016). Human appropriation of land for food: The role of diet. *Global Environmental Change*, 41, 88–98. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.09.005>
- Antony, F., Fischer, C., Kenkmann, T., Moch, K., Prakash, S., Quack, D., & Weber, M. (2020). *Big Points des ressourcenschonenden Konsums als Thema für die Verbraucherberatung – mehr als Energieeffizienz und Klimaschutz*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/big-points-des-ressourcenschonenden-konsums-als>
- Arle, J., Baumgarten, C., Blondzik, K., Frauenstein, J., Hilliges, F., Hofmeier, M., Krakau, M., Mohaupt, V., Naumann, S., Mönnich, J., Osiek, D., Rechenberg, J., Richter, N., Schnäckel, A., Schulte, C., Völker, J., & Ullrich, A. (2022). *Die Wasserrahmenrichtlinie* (S. 1 Onlineresource (121 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-2356>
- Bach, M., Häußermann, U., Klement, L., Knoll, L., Breuer, L., Weber, T., Fuchs, S., Heldstab, J., Reutimann, J., & Schächli, B. (2020). *Reaktive Stickstoffflüsse in Deutschland 2010–2014 (DESTINO Teilbericht 2). Im Auftrag des Umweltbundesamtes*.
- Balzer, F., Schulz, D., Wechsung, G., Madrenes, H., & Matezki, S. (2015). *Umweltbelastende Stoffeinträge aus der Landwirtschaft*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbelastende-stoffeintraege-aus-der>
- Barrie, J., Anantharaman, M., Oyinlola, M., & Schröder, P. (2022). The circularity divide: What is it? And how do we avoid it? *Resources, Conservation and Recycling*, 180, 106208. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106208>
- Biemann, K., Helms, H., Münter, D., Liebich, A., Pelzeter, J., Kämper, C., & Müller, J. (2024). *Analyse der Umweltbilanz von Kraftfahrzeugen mit alternativen Antrieben oder Kraftstoffen auf dem Weg zu einem treibhausgasneutralen Verkehr*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/analyse-der-umweltbilanz-von-kraftfahrzeugen>
- BMEL. (2023). *Statistischer Monatsbericht des BMEL Kapitel A. Landwirtschaft*. BMEL-Statistik. <https://www.bmel-statistik.de/landwirtschaft/statistischer-monatsbericht-des-bmel-kapitel-a-landwirtschaft>
- BMEL. (2024). *Gutes Essen für Deutschland. Ernährungsstrategie der Bundesregierung*. <https://www.bmel.de/DE/themen/ernaehrung/ernaehrungsstrategie.html>
- BMUV. (2020). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023*. bmuv.de. <https://www.bmuv.de/PU686>
- BMUV. (2024). *Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)*. https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nationale_kreislaufwirtschaftsstrategie_bf.pdf
- BMWi (Hrsg.). (2015). *Energieeffizienzstrategie Gebäude: Wege zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand Kurzfassung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/energieeffizienzstrategie-gebäude-kurzfassung.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- Bolland, T., Keßler, H., Kosmol, J., Lehmann, C., & Müller, F. (2017). *Urban Mining* (S. 1 Onlineresource (68 Seiten)) [Online resource]. openUMWELT. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-4321>

- Breisig, V., Hess, B., & Rath, L. (2022). *Ökonomische Bewertung von Klimaschutzmaßnahmen im Verkehr*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekonomische-bewertung-von-klimaschutzmassnahmen-im>
- Bringezu, S., Banse, M., Ahmann, L., Bezama, A., Billig, E., Bischof, R., Blanke, C., Brosowski, A., Brüning, S., Borchers, M., Budzinski, M., Cyffka, K.-F., Distelkamp, M., Egenolf, V., Flaute, M., Geng, N., Gieseke, L., Graß, R., Hennenberg, K., ... Zeug, W. (2020). *Pilotbericht zum Monitoring der deutschen Bioökonomie*. <https://doi.org/10.17170/kobra-202005131255>
- Brückner, S. (2016). *Industrielle Abwärme in Deutschland*. Technische Universität München.
- Buchert, M., Bleher, D., & Bulach, W. (2022). *Kartierung des anthropogenen Lagers III (KartAL III)* (S. 1 Onlineresource (294 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-6780>
- Buchert, M., Göckeler, K., Merz, C., Schön-Blume, N., Steinbach, I., Götz, W., Eckert, D., & Betz, J. (2023). *Bedarf strategischer Rohstoffe für den Pkw- und Lkw-Sektor in Deutschland bis 2040*. Öko-Institut. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Rohstoffbedarf-PKW-LKW-Szenarien-D.pdf>
- Bundesregierung. (2023a). *Kabinett beschließt Holzbauinitiative | Bundesregierung*. Die Bundesregierung informiert | Startseite. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/tipps-fuer-verbraucher/holzbauinitiative-2197224>
- Bundesregierung. (2023b, Juni). *Nationale Sicherheitsstrategie: Wehrhaft. Resilient. Nachhaltig. Integrierte Sicherheit für Deutschland*. <https://www.nationalesicherheitsstrategie.de/>
- Bundesregierung. (2025). *Verantwortung für Deutschland—Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD - 21. Legislaturperiode*. <https://www.koalitionsvertrag2025.de/>
- Bunsen, J., Berger, M., & Finkbeiner, M. (2022). *Konzeptionelle Weiterentwicklung des Wasserfußabdrucks*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/konzeptionelle-weiterentwicklung-des>
- Burger, A., & Bretschneider, W. (2021). *Umweltschädliche Subventionen in Deutschland*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltschaedliche-subventionen-in-deutschland-0>
- Business & Human Rights Resource Centre. (2025). *Library of curated information relating to the field of business and human rights* [Dataset]. https://www.bhrrc.org/en/latest-news/?&content_types=lawsuits&language=en
- Cabernard, L. (2024). *Environmental Footprint Data Visualizer for GRO 2024—Profile*. Tableau Public. <https://public.tableau.com/app/profile/livia.cabernard>
- Campbell, B., Beare, D., Bennett, E., Hall-Spencer, J., Ingram, J., Jaramillo, F., Ortiz, R., Ramankutty, N., Sayer, J., & Shindell, D. (2017). Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society*, 22(4). <https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408>
- Chedrak, C., Paulin, G., & Rajaonson, J. (2023). “A fine wine, better with age”: Circular economy historical roots and influential publications: A bibliometric analysis using Reference Publication Year Spectroscopy (RPYS). *Journal of Industrial Ecology*, 27(6), 1593–1612. <https://doi.org/10.1111/jiec.13441>
- Chemistry4Climate. (2023). *Chemistry4Climate—Wie die Transformation der Chemie gelingen kann*. <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/broschueren-und-faltblaetter/final-c4c-broschure-langfassung.pdf>
- Christis, M., Nuss, P., Marra Campanale, R., & Steger, S. (2023). *Analysis of the circular material use rate and the doubling target* (ETC CE Report No. 2023/6). European Environment Agency.
- Circle Economy. (2022). *The Circularity Gap Report 2022* (S. 64). Circle Economy. <https://www.circularity-gap.world/>

- Circle Economy. (2023). *The Circularity Gap Report 2023*. Circle Economy. <https://www.circularity-gap.world/>
- Circle Economy. (2025). *The circularity gap report 2025*. Circle Economy. <https://global.circularity-gap.world/>
- Cischinsky, H., & Diefenbach, N. (2018, April 17). *Datenerhebung Wohngebäudebestand 2016: Datenerhebung zu den energetischen Merkmalen und Modernisierungsraten im deutschen und hessischen Wohngebäudebestand*.
https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebaeudebestand/prj/2018_IWU_CischinskyEtDiefenbach_Datenerhebung-Wohngeb%C3%A4udebestand-2016.pdf
- Clift, R., & Wright, L. (2000). Relationships Between Environmental Impacts and Added Value Along the Supply Chain. *Technological Forecasting and Social Change*, 65(3), 281–295. [https://doi.org/10.1016/s0040-1625\(99\)00055-4](https://doi.org/10.1016/s0040-1625(99)00055-4)
- Club of Rome. (2000). *Die Grenzen des Wachstums: Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit* (D. L. Meadows, D. H. Meadows, J. Randers, & W. B. Behrens, Hrsg.; 17. Aufl.). Dt. Verl.-Anst.
- Conversio. (2022). *Stoffstrombild Kunststoffe in Deutschland 2021: Zahlen und Fakten zum Lebensweg von Kunststoffen*. https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/01-Nachrichten/03-Kunststoff/2022/Kurzfassung_Stoffstrombild_2021_13102022_1_.pdf
- Dehoust, G., Manhart, A., & Dolega, P. (with Kosmol, J.). (2020). *Environmental criticality of raw materials: An assessment of environmental hazard potentials of raw materials from mining and recommendations for an ecological raw materials policy* (S. 1 Onlineresource (254 pages)). Deutschland. Umweltbundesamt.
- Denk, A., & Siebert, J. (2024). „Grüne Eliten gegen den Volkswillen“: Populistische Narrative im Bereich der Umweltpolitik (S. 17). Umweltbundesamt. <https://openumwelt.de/handle/123456789/9721>
- Denter, L. (2025). *Global Circular Economy – Reflections for a Just Transition* (No. 29; Publication Series Economic + Social Issues). Heinrich-Böll-Stiftung. https://www.boell.de/sites/default/files/2025-03/global-circular-economy_reflections-for-a-just-transition_2.pdf
- Destatis. (2023a). *Statistischer Bericht Rohstoffäquivalente Berichtszeitraum 2000-2021* (No. 85132) [Dataset]. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/statistischer-bericht-rohstoffaequivalente-5853101217005.xlsx?__blob=publicationFile
- Destatis. (2023b). *Statistischer Bericht—Rohstoffäquivalente—Berichtszeitraum 2000—2021*. Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/statistischer-bericht-rohstoffaequivalente-5853101217005.html>
- Destatis. (2023c). *Weniger Abriss: 2022 fielen so wenige Wohnungen aus dem Bestand wie noch nie seit 1992. Pressemitteilung Nr. N050 vom 7. September 2023*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/09/PD23_N050_311.html
- Destatis. (2023d, November 10). *Energieverbrauch der Industrie 2022 um 9,1 % gegenüber dem Vorjahr gesunken* [Pressemitteilung]. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/11/PD23_432_435.html
- Destatis. (2024a). *Ausstattung mit Gebrauchsgütern*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/_inhalt.html
- Destatis. (2024b). *Statistischer Bericht—Umweltökonomische Gesamtrechnungen—Gesamtwirtschaftliches Materialkonto—Berichtszeitraum 1994—2022* [Dataset]. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft->

Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publicationen/Downloads/statistischer-bericht-gesamtwirtschaftliches-materialkonto-5851315227005.html

Directorate-General for Energy (European Commission) & Van Holsteijn en Kemna (VHK). (2022). *Ecodesign impact accounting annual report 2021: Overview and status report*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2833/38763>

Dittrich, M., Liebich, A., Vogt, R., Münter, D., Wingenbach, C., Ludmann, S., Rosental, M., Fröhlich, T., Petri, F., Ewers, B., Doppelmayr, A., Limberger, S., Müller, J., Loibl, A., Marscheider-Weidemann, F., Rostek, L., Brauer, C., & Schoer, K. (in Veröffentlichung). *REFINE: Betrachtung von Rohstoffaufwendungen und Umweltwirkungen für die Energiewende in einem ressourcenschonenden und treibhausgasneutralen Deutschland—Teilbericht Umweltwirkungen* (UBA Texte, S. 262).

Dorninger, C., Hornborg, A., Abson, D. J., von Wehrden, H., Schaffartzik, A., Giljum, S., Engler, J.-O., Feller, R. L., Hubacek, K., & Wieland, H. (2021). Global patterns of ecologically unequal exchange: Implications for sustainability in the 21st century. *Ecological Economics*, 179, 106824. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2020.106824>

Dosch, F., Bergmann, E., & Jakubowski, P. (2006). *Perspektive Flächenkreislaufwirtschaft Kreislaufwirtschaft in der städtischen/stadtregionalen Flächennutzung – Fläche im Kreis*. BBR. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/ministerien/bmvbs/sonderveroeffentlichungen/2006/flaechenkreislaufwirtschaft.html>

Durchführungsbeschluss(EU) 2017/2117 über Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT) gemäß der Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates in Bezug auf die die Herstellung von organischen Grundchemikalien, No. C(2017) 7469 (2017). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017D2117>

Duro, J. A., Schaffartzik, A., & Krausmann, F. (2018). Metabolic Inequality and Its Impact on Efficient Contraction and Convergence of International Material Resource Use. *Ecological Economics*, 145, 430–440. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.029>

EC. (2025). *Circular economy—European Commission*. https://environment.ec.europa.eu/topics/circular-economy_en

EEA. (2018). *The circular economy and the bioeconomy: Partners in sustainability*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/02937>

EEA. (2021). *Water resources across Europe: Confronting water stress: an updated assessment*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/320975>

EEA. (2023a). *Accelerating the circular economy in Europe—State and outlook 2024*. Publications Office of the European Union. <https://www.eea.europa.eu/publications/accelerating-the-circular-economy>

EEA. (2023b). *How far is Europe from reaching its ambition to double the circular use of materials?* Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/599752>

EEA. (2023c). *Textiles and the environment: The role of design in Europe’s circular economy*. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/textiles-and-the-environment-the>

EEA. (2024). *EU indicator framework for chemicals*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2800/10922>

EEA & ISPRA. (2020). *Bellagio Declaration Circular Economy Monitoring Principles*. <https://epanet.eea.europa.eu/reports-letters/reports-and-letters/bellagio-declaration.pdf>

- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the circular economy: Economic and business rationale for an accelerated transition*. Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-the-circular-economy-vol-1-an-economic-and-business-rationale-for-an>
- Ellen MacArthur Foundation. (2021). *The Nature Imperative: How the circular economy tackles biodiversity loss*. <https://emf.thirdlight.com/link/bqgxl2mlprld-v7i2m6/@/preview/1?o>
- ETC CE. (2022). *Towards more sustainable management of material resources in Europe* [JRC Technical report]. European Topic Centre on Circular Economy and Resource Use (ETC CE). <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-products/jrc-technical-report-towards-more-sustainable-management-of-material-resources-in-europe>
- EU Kommission. (2011). *Roadmap to a Resource Efficient Europe*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52011DC0571>
- EU Kommission. (2015). *Closing the loop—An EU action plan for the Circular Economy*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52015DC0614>
- EU Kommission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>
- EU Kommission. (2025a). *Der Deal für eine saubere Industrie: Ein gemeinsamer Fahrplan für Wettbewerbsfähigkeit und Dekarbonisierung*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=COM:2025:85:FIN>
- EU Kommission. (2025b). *Kompass für Wettbewerbsfähigkeit* (No. COM(2025) 30 final). EU Kommission. https://commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/competitiveness-compass_de
- EU-Kommission. (2022, März 30). *EU-Strategie für nachhaltige und kreislauffähige Textilien (COM(2022) 141)*.
- Europäische Kommission. (2014). *Gut leben innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen unseres Planeten :das 7. UAP – ein allgemeines Umweltaktionsprogramm der Union für die Zeit bis 2020*. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2779/55949>
- Europäische Kommission. (2022). Commission Recommendation (EU) 2022/2510 of 8 December 2022 establishing a European assessment framework for ‘safe and sustainable by design’ chemicals and materials. In *OJ L* (Bd. 325). <http://data.europa.eu/eli/reco/2022/2510/oj/eng>
- Europäische Kommission. (2024a). *Consumption Footprint Platform | EPLCA*. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/ConsumptionFootprintPlatform.html>
- Europäische Kommission. (2024b). *Zero Pollution Action Plan—European Commission*. https://environment.ec.europa.eu/strategy/zero-pollution-action-plan_en
- Eurostat. (2023). *Circular material use rate (env_ac_cur)*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_cur/default/table?lang=en
- Eurostat. (2025a). *Circular economy flow diagrams*. Eurostat. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/sankey/circular_economy/sankey.html
- Eurostat. (2025b). *Material footprints—Main indicators (env_ac_rme)*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_rme/default/table?lang=en
- Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe. (2022). *Holz kann das—Smarte Produkte aus Holz*. https://www.charta-fuer-holz.de/fileadmin/charta-fuer-holz/dateien/service/mediathek/Flyer_HolzKannDas_240122.pdf
- Fanning, A. L., O’Neill, D. W., Hickel, J., & Roux, N. (2022). The social shortfall and ecological overshoot of nations. *Nature Sustainability*, 5(1), 26–36. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00799-z>

FAO. (2020). *Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018* (No. 18; FAOSTAT Analytical Brief Series).

Fehrenbach, H., Giegrich, J., Köppen, S., Wern, B., Pertagnol, J., Baur, F., Hünecke, K., Dehoust, G., Bulach, Winfried, & Wiegmann, Kirsten. (2019). *BioRest: Verfügbarkeit und Nutzungsoptionen biogener Abfall- und Reststoffe im Energiesystem (Strom-, Wärme- und Verkehrssektor)*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/bioreest-verfuegbarkeit-nutzungsoptionen-biogener>

Fehrenbach, Horst, Köppen, Susanne, Kauertz, Benedikt, Detzel, Andreas, Wellenreuther, Frank, Breitmayer, Elke, Essel, Roland, Carus, Michael, Bienge, Katrin, & von Geibler, Justus. (2017). *Biomassekaskaden: Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis*.

Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biomassekaskaden-mehr-ressourceneffizienz-durch>

Figge, F., Thorpe, A. S., & Gutberlet, M. (2023). Definitions of the circular economy: Circularity matters. *Ecological Economics*, 208, 107823. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2023.107823>

Fischer, C., Antony, F., Blanck, R., Braungardt, S., Bürger, V., Jakob, M., Kenkmann, T., Köhler, B., Kreye, K., & Stuber-Rousselle, K. (2022). *Abschätzung von THG-Einsparungen von Maßnahmen und Instrumenten zu nachhaltigem Konsum* (No. 48/2022; UBA Texte).

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_48-2022_abschaetzung_von_thg-einsparungen_von_massnahmen_und_instrumenten_zu_nachhaltigem_konsum.pdf

Fleiter, T., Braungardt, S., Sohaib, T., Schlomann, B., Eichhammer, W., Elsland, R., Kranzl, L., & Jakob, M. (2015). *Assessing the impact of the EU Ecodesign Directive on a member state level*.

Fleiter, T., Rehfeld, M., Hirzel, S., Neusel, L., Aydemir, A., Schwortzer, C., Kaiser, F., Gondorf, C., Hauch, J., Hof, J., Sankowski, L., & Langhorst, M. (2023). *CO₂-neutrale Prozesswärmeerzeugung* (No. 161/2023; UBA Texte).

Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/co2-neutrale-prozesswaermeerzeugung>

Förster, H., Hünecke, Katja, & Richter, Beate. (2023). *Ernährungsprofile deutscher Haushalte und Verteilungswirkungen einer Mehrwertsteuerreform im Bedürfnisfeld Ernährung*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ernaehrungsprofile-deutscher-haushalte>

Frey, K., Burger, A., Dziekan, K., Bunge, C., & Lünenburger, B. (2020). *Verkehrswende für ALLE*.

Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/verkehrswende-fuer-alle>

Friant, M. C., Vermeulen, W. J. V., & Salomone, R. (2023). Transition to a Sustainable Circular Society: More than Just Resource Efficiency. *Circular Economy and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00272-3>

Frische, T., Egerer, S., Matezki, S., Pickl, C., & Wogram, J. (2016). *5-Punkte-Programm für einen nachhaltigen Pflanzenschutz*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/5-punkte-programm-fuer-einen-nachhaltigen-0>

Garcia-Saravia Ortiz-de-Montellano, C., Samani, P., & van der Meer, Y. (2023). How can the circular economy support the advancement of the Sustainable Development Goals (SDGs)? A comprehensive analysis.

Sustainable Production and Consumption, 40, 352–362. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.003>

Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, 757–768.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>

German Advisory Council on Global Change (WBGU). (2007). *Climate Change As a Security Risk*. Taylor & Francis Group.

- Gerolf, H., Quack, Dietlinde, Wolff, Franziska, Brunn, Christoph, Jägle, Julia, Meier, Johanna, Janzszky, Babett, & von Mering, Friedhelm. (2023). *Bausteine für die Transformation zu einem nachhaltigen Ernährungssystem*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/2023-10-18_stern-ap6_broschuere_final_bf.pdf
- Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, BGBl. 2012 Teil I Nr. 10, S. 212 KrWG (2012).
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- Giljum, S., Maus, V., Kuschig, N., Luckeneder, S., Tost, M., Sonter, L. J., & Bebbington, A. J. (2022). A pantropical assessment of deforestation caused by industrial mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(38), e2118273119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2118273119>
- Gimkiewicz, J. (2022). *Die Rolle der Langlebigkeit und der Nutzungsdauer für einen nachhaltigen Umgang mit Bekleidung. Eine Studie zum aktuellen Forschungsstand*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-rolle-der-langlebigkeit-der-nutzungsdauer-fuer>
- Ginzky, H., Kosmol, J., & Schwirn, K. (2020). *Internationale Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik während und nach der Covid-19 Pandemie* (S. 1 Onlineressource (23 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-3607>
- Gold, R., & Lehr, J. (2024). *Paying off Populism: EU-Regionalpolitik verringert Unterstützung populistischer Parteien* (Kiel Policy Brief No. 172). Kiel Institut für Weltwirtschaft. https://www.ifw-kiel.de/fileadmin/Dateiverwaltung/IfW-Publications/fis-import/f16df84e-a721-422e-a087-de3d56c8473e-KPB_172_dt_0804_V3.pdf
- Gözet, B., Van Opstal, W., Sebis, G., Günther, J., & Old, R. (2025). *A Just Transition to Circular Economy—Exploring current and potential social implications exemplary for the value chains batteries, plastics, and textiles (ETC CE Report 8/2025)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.15494624>
- Grabbe, H., & Moffat, L. L. (2024). *A European circular single market for economic security and competitiveness* [Policy Brief]. <https://www.bruegel.org/policy-brief/european-circular-single-market-economic-security-and-competitiveness>
- Gregoir, L. (2022). *Metals for Clean Energy: Pathways to solving Europe’s raw materials challenge*. Eurometeaux.
- Grüning, C., & Jungmichel, N. (2025). *Innovative Werkzeuge für das Umwelt- und Nachhaltigkeitsmanagement in der Wertschöpfungskette* (S. 23). Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7637>
- Gsell, M., Fischer, S., & Müller, A. (2024). *Erarbeitung einer Messmethodik zum Umfang der Wiederverwendung von Produkten in Deutschland* (S. 1 Onlineressource (311 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-6774>
- Günther, J., Manshoven, S., & Paleari, S. (2023). *Circular Economy and Biodiversity* (No. 2023/07; ETC/CE Report, S. 1 Online-Resource (72 pages)). <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-report-2023-7-circular-economy-and-biodiversity>
- Haller, L., Moakes, Simon, Niggli, Urs, Riedel, Judith, Stolze, Matthias, & Thompson, Michael. (2020). *Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/entwicklungsperspektiven-der-oekologischen>
- Hanemaaijer, A., Kishna, M., Koch, J., Lucas, P., Rood, T., Schotten, K., & van Sluisveld, M. (2023). *Integral Circular Economy Report 2023 Assessment for the Netherlands*. PBL.

https://www.pbl.nl/uploads/default/downloads/2023-pbl_integral-circular-economy-report-2023-assessment-for-the-netherlands_5109_0.pdf

Hartley, K., Baldassarre, B., & Kirchherr, J. (2024). Circular economy as crisis response: A primer. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140140. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140140>

Head, M. J., Steffen, W., Fagerlind, D., Waters, C. N., Poirier, C., Syvitski, J., Zalasiewicz, J. A., Barnosky, A. D., Cearreta, A., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Rose, N. L., Summerhayes, C., Wagemann, M., & Zinke, J. (2022). The Great Acceleration is real and provides a quantitative basis for the proposed Anthropocene Series/Epoch. *Episodes*, 45(4), 359–376. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2021/021031>

Helbig, C., Huether, J., Joachimsthaler, C., Lehmann, C., Raatz, S., Thorenz, A., Faulstich, M., & Tuma, A. (2022). A terminology for downcycling. *Journal of Industrial Ecology*, 26(4), 1164–1174. <https://doi.org/10.1111/jiec.13289>

Held, M., & Schücking, M. (2019). Utilization effects on battery electric vehicle life-cycle assessment: A case-driven analysis of two commercial mobility applications. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 75, 87–105. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.005>

Hendzlik, M., Lange, M., Hölting, P., Lambrecht, M., Frey, K., Calvet, W., Schmied, M., Dziekan, K., & Dross, M. (2024, April 30). *Bausteine für einen klimagerechten Verkehr*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/uebersicht-bausteine-klimavertraeglicher-verkehr>

Heyen, Dirk Arne. (2021). *Measuring a Just Transition in the EU in the context of the 8th Environment Action Programme*. Oeko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/JustTransition-Indicator-Paper.pdf>

Hickel, J., Dorninger, C., Wieland, H., & Suwandi, I. (2022). Imperialist appropriation in the world economy: Drain from the global South through unequal exchange, 1990–2015. *Global Environmental Change*, 73, 102467. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102467>

Hoekstra, A. Y. (2017). Water Footprint Assessment: Evolvement of a New Research Field. *Water Resources Management*, 31(10), 3061–3081. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>

Hofmann, F., Zwiers, J., Jaeger-Erben, M., & Marwede, M. (2019). Circular Economy als Gegenstand einer sozialökologischen Transformation? In *Im Brennpunkt: Zukunft des nachhaltigen Wirtschaftens in der digitalen Welt*. Metropolis Verlag.

Holsten, B., Pfannerstill, M., & Trepel, M. (2016). *Phosphor in der Landschaft – Management eines begrenzt verfügbaren Nährstoffes*. CAU Kiel.

IEA. (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions* (World Energy Outlook Special Report). <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

IPBES. (2019). *The global assessment report on biodiversity and ecosystem services*. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://www.ipbes.net/global-assessment-report-biodiversity-ecosystem-services>

ISO 59004:2024—Circular economy—Vocabulary, principles and guidance for implementation (No. 59004:2024). (2024). <https://www.iso.org/standard/80648.html>

Jaeger-Erben, M., Jensen, C., Hofmann, F., & Zwiers, J. (2021). There is no sustainable circular economy without a circular society. *Resources, Conservation and Recycling*, 168, 105476. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105476>

Jander, W., & Grundmann, P. (2019). Monitoring the transition towards a bioeconomy: A general framework and a specific indicator. *Journal of Cleaner Production*, 236, 117564. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.039>

Jander, W., Günther, J., & Prochnow, A. (in Veröffentlichung). *What is this thing called Circular Bioeconomy? Integrating the concepts of circular agri-food and industrial systems.*

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=5220623

Jeswani, H. K., & Azapagic, A. (2011). Water footprint: Methodologies and a case study for assessing the impacts of water use. *Journal of Cleaner Production*, 19(12), 1288–1299.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.04.003>

JRC. (2021). *Circular Economy Perspectives in the EU Textile sector*. Joint Research Centre.

<https://circulareconomy.europa.eu/platform/en/news-and-events/all-news/circular-economy-perspectives-eu-textile-sector>

JRC. (2023). *Supply chain analysis and material demand forecast in strategic technologies and sectors in the EU: A foresight study*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/386650>

Jungmichel, N., Nill, M., & Wick, K. (2021). *Von der Welt auf den Teller. Kurzstudie zur globalen Umweltinanspruchnahme unseres Lebensmittelkonsums*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/von-der-welt-auf-den-teller>

Jungmichel, N., Wick, K., & Nill, M. (2021). *Kleider mit Haken. Fallstudie zur globalen Umweltinanspruchnahme durch die Herstellung unserer Kleidung*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kleider-haken>

Jürgens, K., Bettin, K., Isselstein, J., Thomas, F., & Poppinga, O. (2023). *Verbesserung der Grünlandbiodiversität durch kraftfutterreduzierte Milcherzeugung*. Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.19217/skr670>

Kadner, S., Kobus, J., Hansen, E. G., Akinci, S., Elsner, P., Hagelüken, C., Jaeger-Erben, M., Kick, M., Kwade, A., Müller-Kirschbaum, T., Kühl, C., Obeth, D., Schweitzer, K., Stuchtey, M., Vahle, T., Weber, T., Wiedemann, P., Wiltz, H., & von Wittken, R. (2021). *Circular Economy Roadmap für Deutschland*. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. <https://www.acatech.de/publikation/circular-economy-roadmap-fuer-deutschland/>

KBA. (2024, März 22). *Bestand*. Kraftfahrt-Bundesamt - Bestand.

https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html

Kennedy, S., & Linnenluecke, M. K. (2022). Circular economy and resilience: A research agenda. *Business Strategy and the Environment*, 31(6), 2754–2765. <https://doi.org/10.1002/bse.3004>

Klatt, A., Grehl, C., Eberle, U., & Quandt, J. (2024). *Nachhaltige Ernährung konkret: Mit den neuen Empfehlungen der DGE auch für die „planetare Gesundheit“ sorgen*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/nachhaltige-ernaehrung-konkret-den-neuen>

Klotz, S., & Settele, J. (2017). Biodiversität. In G. P. Brasseur, D. Jacob, & S. Schuck-Zöller (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* (S. 151–160). Springer.

https://doi.org/10.1007/978-3-662-50397-3_15

Köder, L. (2021). *Eco-Schemes sinnvoll in die Grüne Architektur integrieren* (S. 1 Onlineresource (50 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-3585>

Koller, M., Jander, W., Kosmol, J., Nuss, P., & Günther, J. (2024). Konturen einer transformativen Ressourcenpolitik und zirkulären Wirtschaft. *Politikum, Ressourcenpolitik*(Heft 1), 12–20.

<https://doi.org/10.46499/2339>

Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt. (2016). *Stoffeinträge in die lokale Umwelt aus Gebäuden und Bauprodukten*. Umweltbundesamt.

<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/stoffeintraege-in-die-lokale-umwelt-aus-gebaeuden>

- Kommission Nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt. (2024). *Transformation zu einer zirkulären Bauwirtschaft als Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung* (S. 48). Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7493>
- Kosmol, J., Kanthak, J., Herrmann, F., Golde, M., Alsleben, C., Penn-Bressel, G., Schmitz, S., & Gromke, U. (2012). *Glossar zum Ressourcenschutz*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/glossar-ressourcenschutz>
- Kraftfahrtbundesamt. (2024). *Jahresbilanz Neuzulassungen*. https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Jahresbilanz_Neuzulassungen/jahresbilanz_node.html
- Krämer, C. (2017). *Umsetzung der EU-GAP-Reform (2014-2020) in den EU-Nachbarstaaten* (S. 1 Onlineressource (48 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7182>
- Kratz, S., Schick, J., Shwiekh, R., & Schnug, E. (2014). Abschätzung des Potentials erneuerbarer P-haltiger Rohstoffe in Deutschland zur Substitution rohphosphathaltiger Düngemittel. *Journal für Kulturpflanzen*, 66, 261–275.
- Kreye, K., Kasten, P., Appenfeller, D., Steinbach, I., Zimmermann, M., Greinus, A., & Peter, M. (2024). *Verkehrssektor auf Kurs bringen: Szenarien zur Treibhausgasneutralität 2045*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/verkehrssektor-auf-kurs-bringen-szenarien-zur>
- Kurth, T., Wübbels, G., Portafaix, A., Meyer zum Felde, A., & Zielcke, S. (2021). *The Biodiversity Crisis Is a Business Crisis*. <https://web-assets.bcg.com/fb/5e/74af5531468e9c1d4dd5c9fc0bd7/bcg-the-biodiversity-crisis-is-a-business-crisis-mar-2021-rr.pdf>
- Lafortune, Guillaume, Fuller, Grayson, Kloke-Lesch, Adolf, Koundouri, Phoebe, & Riccaboni, Angelo. (2024). *Europe Sustainable Development Report 2023/24*. Dublin University Press. <https://s3.amazonaws.com/sustainabledevelopment.report/2024/europe-sustainable-development-report-2023-24.pdf>
- Lauf, T., Memmler, Michael, & Schneider, Sven. (2023). *Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2022*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/emissionsbilanz-erneuerbarer-energietraeger-2022>
- Lèbre, É., Stringer, M., Svobodova, K., Owen, J. R., Kemp, D., Côte, C., Arratia-Solar, A., & Valenta, R. K. (2020). The social and environmental complexities of extracting energy transition metals. *Nature Communications*, 11(1), 4823. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18661-9>
- Lutter, S., Giljum, S., & Bruckner, M. (2016). A review and comparative assessment of existing approaches to calculate material footprints. *Ecological Economics*, 127, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.03.012>
- Lutter, S., Kreimel, J., Giljum, S., & Manstein, C. (2022). *Die Nutzung natürlicher Ressourcen* (S. 1 Onlineressource (59 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-2408>
- Marscheider-Weidemann, F., Langkau, S., Eberling, E., Erdmann, L., Haendel, M., Krail, M., Loibl, A., Neef, C., Neuwirth, M., & Rostek, L. (2021). *Rohstoffe für Zukunftstechnologien* (Deutsche Rohstoffagentur in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hrsg.; Bd. 50).
- Martin, P., Guyer, M., & Füssler, J. (2018). *Wie der Klimawandel den deutschen Außenhandel trifft* (S. 1 Onlineressource (24 Seiten)) [Online resource]. My University. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-2393>
- McDonald, M. (2013). Discourses of climate security. *Political Geography*, 33, 42–51. <https://doi.org/10.1016/j.polgeo.2013.01.002>
- Mertens, J., Dewulf, J., Breyer, C., Belmans, R., Gendron, C., Geoffron, P., Goossens, L., Fischer, C., Du Fornel, E., Hayhoe, K., Hirose, K., Le Cadre-Loret, E., Lester, R., Maigné, F., Maitournam, H., de Miranda, P. E. V., Verwee,

- P., Sala, O., Webber, M., & Debackere, K. (2024). From emissions to resources: Mitigating the critical raw material supply chain vulnerability of renewable energy technologies. *Mineral Economics*, 37(3), 669–676. <https://doi.org/10.1007/s13563-024-00425-2>
- Moraga, G., Huysveld, S., Mathieux, F., Blengini, G. A., Alaerts, L., Van Acker, K., de Meester, S., & Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 452–461. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.03.045>
- Morseletto, P., Mooren, C. E., & Munaretto, S. (2022). Circular Economy of Water: Definition, Strategies and Challenges. *Circular Economy and Sustainability*, 2(4), 1463–1477. <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00165-x>
- Muggentaler, F. (2023). In schwerer See—75 Jahre Allgemeine Erklärung der Menschenrechte. *Blätter für deutsche und internationale Politik*, 2023(12), 8.
- Müller, F., Kohlmeyer, R., Krüger, F., Kosmol, J., Krause, S., Dorer, C., Röhreich, M., Fabian, M., Kummer, S., Bischoff, B., Ebert, T., & Keßler, H. (2020). *Leitsätze einer Kreislaufwirtschaft*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/leitsaetze-einer-kreislaufwirtschaft>
- Müller, F., Kosmol, J., Keßler, H., Angrick, M., & Rechenberg, B. (2017). Dematerialization—A Disputable Strategy for Resource Conservation Put under Scrutiny. *Resources*, 6(4). <https://doi.org/10.3390/resources6040068>
- Nickless, E., & Yakovleva, N. (2022). Resourcing Future Generations Requires a New Approach to Material Stewardship. *Resources*, 11(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/resources11080078>
- Nijnsens, J., Behrens, P., Kraan, O., Sprecher, B., & Kleijn, R. (2023). Energy transition will require substantially less mining than the current fossil system. *Joule*, 7(11), 2408–2413. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.10.005>
- Nuss, P., Günther, J., Kosmol, J., Golde, M., Müller, F., & Frerk, M. (2021). Monitoring framework for the use of natural resources in Germany. *Resources, Conservation and Recycling*, 175, 105858. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105858>
- Nuss, P., Sanyé-Mengual, E., & Sala, S. (2023). Monitoring the consumption footprint of countries to support policy-making: An assessment of data availability in Germany. *Journal of Industrial Ecology*, 27(5), 1354–1369. <https://doi.org/10.1111/jiec.13412>
- Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H., & Clement, J. (2019). *Global resources outlook: 2019*. International Resource Panel, United Nations Enviro, Paris, France.
- OECD. (2011). *OECD Due Diligence Guidance for Responsible Supply Chains of Minerals from Conflict-Affected and High-Risk Areas*. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264111110-en>
- OECD (Hrsg.). (2018). *OECD Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct*. <https://www.oecd.org/investment/due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct.htm>
- OECD. (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060*. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264307452-en>
- OECD (Hrsg.). (2021). *The role of OECD instruments on responsible business conduct in progressing environmental objectives*. <https://web-archive.oecd.org/2021-12-17/619929-The-role-of-OECD-instruments-on-responsible-business-conduct-in-progressing-environmental-objectives.pdf>
- OECD. (2023). *OECD-Leitsätze für multinationale Unternehmen zu verantwortungsvollem unternehmerischem Handeln*. <https://doi.org/10.1787/abd4d37b-de>
- OECD. (2024). *OECD-Handbuch für umweltbezogene Sorgfaltspflichten in mineralischen Rohstofflieferketten*. <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/5dc13640-de>

- O'Neill, D. W., Fanning, A. L., Lamb, W. F., & Steinberger, J. K. (2018). A good life for all within planetary boundaries. *Nature Sustainability*, 1(2), 88–95. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0021-4>
- Panchal, R., Singh, A., & Diwan, H. (2021). Does circular economy performance lead to sustainable development? – A systematic literature review. *Journal of Environmental Management*, 293, 112811. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112811>
- Passarella, M. (2023). Investigating the Relation Between Raw Materials and Climate Change in the Literature. In J. A. Benítez-Andrades, P. García-Llamas, Á. Taboada, L. Estévez-Mauriz, & R. Baelo (Hrsg.), *Global Challenges for a Sustainable Society* (S. 536–545). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25840-4_62
- Pehnt et al., M. (2010). *Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung* [Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“ FKZ 03KSW016A und B].
- Persson, U., Möller, B., & Werner, S. (2014). Heat Roadmap Europe: Identifying strategic heat synergy regions. *Energy Policy*, 74, 663–681. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.015>
- Postpischil, R., Jacob, Klaus, Bär, Holger, Beermann, Ann-Cathrin, Siemons, Anne, Schumacher, Katja, & Keimeyer, Friedhelm. (2022). *Ökologische Finanzreform: Produktbezogene Anreize als Treiber umweltfreundlicher Produktions- und Konsumweisen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-finanzreform-produktbezogene-anreize>
- Pothen, F., & Tovar Reaños, M. A. (2018). The Distribution of Material Footprints in Germany. *Ecological Economics*, 153, 237–251. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.06.001>
- Potrykus, A., Berlinghof, T., Burgstaller, M., Schramm, B., Kühnl, M., Castellani, F., Haberstock, T., Schlummer, M., & Arends, D. (2024). *Stärkung des Recyclings technischer Kunststoffe vor dem Hintergrund steigender stoffrechtlicher Anforderungen am Beispiel Elektroaltgeräte und Altfahrzeuge—KUREA*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/staerkung-des-recyclings-technischer-kunststoffe>
- Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular economy: Measuring innovation in the product chain*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf>
- Prognos, Öko-Institut, & Wuppertal Institut. (2023). *Souveränität Deutschlands sichern—Resiliente Lieferketten für die Transformation zur Klimaneutralität 2045—Kurzfassung* (S. 26). Stiftung Klimaneutralität.
- Purr, K., & Garvens, H.-J. (2021). *Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/diskussionsbeitrag-zur-bewertung-von-carbon-capture>
- Purr, K., Günther, J., & Lehmann, H. (2021). *Pathways to resource-saving greenhouse gas neutrality RESCUE study Long version 2 ed* (Nos. 1862–4359; S. 443). http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:52076012
- Purr, K., Osiek, Dirk, Lange, Martin, & Adlunger, Kirsten. (2016). *Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/integration-von-power-to-gaspower-to-liquid-in-den>
- Purr, K., Wehnemann, K., Balzer, F., Erxleben, F., Hendzlik, M., Kahrl, A., Lange, M., Lünenburger, B., Steinbrenner, J., & Weyland, M. (2021). *Treibhausgasminderung um 70 Prozent bis 2030: So kann es gehen!* Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgasminderung-um-70-prozent-bis-2030>

- Raatz, Seidel, Tuma, Thorenz, Helbig, Reller, Faulstich, Joachimsthaler, Steger, Hagedorn, Bickel, & Liedtke. (2021). *OptiMet—Ressourceneffizienzsteigerung in der Metallindustrie—Substitution von Primärrohstoffen durch optimiertes legierungsspezifisches Recycling* (No. 81/2022; UBA Texte). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optimet>
- Ramseier, L., & Frischknecht, R. (2020). *Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland* (No. 17/2020; BBSR-Online-Publikation). Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR).
- Raworth, K. (2017). A Doughnut for the Anthropocene: Humanity's compass in the 21st century. *The Lancet Planetary Health*, 1(2), e48–e49. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(17\)30028-1](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(17)30028-1)
- Ressourcenkommission. (2023). *Chancen und Grenzen des Recyclings im Kontext der Circular Economy*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chancen-grenzen-des-recyclings-im-kontext-der>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., Drüke, M., Fetzer, I., Bala, G., von Bloh, W., Feulner, G., Fiedler, S., Gerten, D., Gleeson, T., Hofmann, M., Huiskamp, W., Kummu, M., Mohan, C., Nogués-Bravo, D., ... Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science Advances*, 9(37). <https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458>
- Ritthoff, M., Müller, A., & Hopfensack, L. (2022). *Methoden und Normen zur Bewertung der Reparierbarkeit von Elektro- und Elektronikgeräten* (S. 1 Onlineresource (216 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-6916>
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature*, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rodríguez-Antón, J. M., Rubio-Andrada, L., Celemín-Pedroche, M. S., & Ruíz-Peñalver, S. M. (2022). From the circular economy to the sustainable development goals in the European Union: An empirical comparison. *International Environmental Agreements: Politics, Law and Economics*, 22(1), 67–95. <https://doi.org/10.1007/s10784-021-09553-4>
- Rüttinger, L., Ackern, P. V., Lepold, T., Vogt, R., & Auberger, A. (2020). *Impacts of climate change on mining, related environmental risks and raw material supply* (S. 1 Onlineresource (80 Seiten9)). <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-6052>
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU). (2020). Kreislaufwirtschaft: Von der Rhetorik zur Praxis. In *Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa, Umweltgutachten 2020* (S. 194). Geschäftsstelle des Sachverständigenrates für Umweltfragen (SRU). https://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_2020/2020_Umweltgutachten_Kap_03_Kreislaufwirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (Hrsg.). (2024). *Suffizienz als „Strategie des Genug“: Eine Einladung zur Diskussion*. Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU).
- Sander, K., Rödiger, L., Wagner, L., Jepsen, D., Holzhauer, R., Baberg, L., Spiecker, T., Zwisele, B., & Winterstein, M. (2020). *Evaluierung und Fortschreibung der Methodik zur Ermittlung der Altfahrzeug-verwertungsquoten durch Schredderversuche unter der EG-Altfahrzeugrichtlinie 2000/53/EG*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/altfahrzeuge-monitoring>
- Sauer, F., BND, Gomolka, J., Pohl, B., Thornton, F., & Tsetsos, K. (2025). *Nationale Interdisziplinäre Klimarisiko-Einschätzung*. Konsortium Nationale Interdisziplinäre Klimarisiko-Einschätzung (Metis, adelphi, BND, PIK). <https://metis.unibw.de/de/nike/>

- Scheffler, M., Wiegmann, K., & Lakner, S. (2022). *Wieviel Klimaschutz steckt in der 1. Säule der GAP? - Analyse und politische Empfehlungen* (S. 1 Onlineressource (28 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-3203>
- Scherf, C.-S., Kampffmeyer, N., Gailhofer, P., Krebs, D., Hartmann, Constantin, & Klinger, R. (2020). *Umweltbezogene und menschenrechtliche Sorgfaltspflichten als Ansatz zur Stärkung einer nachhaltigen Unternehmensführung* (No. 138/2020; UBA Texte). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/sorgfaltspflichten-nachhaltige-unternehmensfuehrung>
- Schiller, G., Lehmann, I., & Gruhler, K. (2022). *Kartierung des anthropogenen Lagers IV: Erarbeitung eines Gebäudepass- und Gebäudekatasterkonzepts zur regionalisierten Erfassung des Materialhaushaltes mit dem Ziel der Optimierung des Recyclings* (S. 1 Onlineressource (443 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-6909>
- Schiller, G., Ortlepp, R., & Krauß, N. (2015). *Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft* (S. 1 Onlineressource (315 Seiten)) [Online resource]. My University. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-5735>
- Schlesier, H., Schäfer, M., & Desing, H. (2024). Measuring the Doughnut: A good life for all is possible within planetary boundaries. *Journal of Cleaner Production*, 448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141447>
- Scholwin, F., Grope, J., Clinkscales, A., Daniel-Gromke, J., Rensberg, N., Denysenko, V., Stinner, W., Richter, F., Raussen, T., Kern, M., Turk, T., & Reinhold, G. (2019). *Aktuelle Entwicklung und Perspektiven der Biogasproduktion aus Bioabfall und Gülle*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/aktuelle-entwicklung-perspektiven-der>
- Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The Relevance of Circular Economy Practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>
- Schultz, K., Wehmann, Kai, op de Hipt, Kirsten, & Purr, Katja. (2024). *Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/treibhausgas-projektionen-2024-ergebnisse-kompakt>
- Schwab, D. (2024, September 10). *A brief history of the circular economy*. Swiss National Museum - Swiss History Blog. <https://blog.nationalmuseum.ch/en/2024/09/a-brief-history-of-the-circular-economy/>
- Shawkat, A., Meyer zu Schwabedissen, O., & Lejeune, Dr. J. (2025). *Klimaneutraler Wirtschaftsstandort 2045* (Analyse). Agora Industrie, Bertelsmann Stiftung, ifok GmbH. <https://www.agora-industrie.de/publikationen/klimaneutraler-wirtschaftsstandort-2045>
- Sievers, L., & Grimm, A. (2024). *Beschäftigung durch energieeffiziente Mobilität*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/beschaeftigung-durch-energieeffiziente-mobilitaet>
- Sorg, D., Klatt, A., Plambeck, N. O., & Köder, L. (2021). *Perspektiven für eine umweltverträgliche Nutztierrhaltung in Deutschland* (S. 1 Onlineressource (152 Seiten)) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7044>
- Statistisches Bundesamt. (2025, Juni 3). *Kurzübersicht Abfallbilanz—Zeitreihe*. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Tabellen/liste-abfallbilanz-kurzuebersicht.html>
- Steger, S., Ritthoff, M., Bulach, W., Schüler, D., Kosinska, I., Degreif, S., Dehoust, G., Bergmann, T., Krause, P., & Oetjen-Dehne, R. (2019). *Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/stoffstromorientierte-ermittlung-des-beitrags-der>

- Steinmann, Z. J. N., Schipper, A. M., Hauck, M., Giljum, S., Wernet, G., & Huijbregts, M. A. J. (2017). Resource Footprints are Good Proxies of Environmental Damage. *Environmental Science & Technology*, 51(11), 6360–6366. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00698>
- Strasser, J., Grüning, C., Martin, K., Tran, C., & Jüde, J. (2025). *Cost allocation and incentive mechanisms for environmental, climate protection and resource conservation along global supply chains—Recommendations for selected incentive mechanisms* (S. 104). German Environment Agency. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-7752>
- Systemiq, & The Club of Rome. (2020). *A System Change Compass: Implementing the European Green Deal in a time of recovery*. <https://www.clubofrome.org/publication/a-system-change-compass-implementing-the-european-green-deal-in-a-time-of-recovery/>
- Taelman, S. E., De Luca Peña, L. V., Prétat, N., Bachmann, T. M., Van der Biest, K., Maes, J., & Dewulf, J. (2024). Integrating ecosystem services and life cycle assessment: A framework accounting for local and global (socio-)environmental impacts. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 29(1), 99–115. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02216-3>
- The Human Right to a Clean, Healthy and Sustainable Environment: Resolution (2022). <https://digitallibrary.un.org/record/3983329>
- Thomassen, G., Eswaran, A., Van Passel, S., & Dewulf, J. (2024). A Planetary Boundary for Mineral, Metal, and Fossil Resource Extraction Rates: How Much Primary Materials Can a Circular Economy Extract? *Environmental Science & Technology*, 58(46), 20345–20351. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c08688>
- Tiemann, N., & Wallbott, T. (2021). *Reparieren statt Wegwerfen* (S. 20). Wertgarantie SE. https://reparieren-statt-wegwerfen.de/rsw_studie_2020.pdf
- Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, Pub. L. No. A/RES/70/1 (2015). https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
- UBA. (2022). *Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Ressourcenbericht für Deutschland 2022*. Umweltbundesamt. www.umweltbundesamt.de/ressourcenbericht2022
- UBA. (2023a). *Fragen und Antworten zu Cradle to Cradle* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcenschonung-in-produktion-konsum/fragen-antworten-zu-cradle-to-cradle>
- UBA. (2023b). *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen (Luftschadstoffe), 1990 bis 2022 (EU-Submission 03/2023)*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_04_04_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_luft_v1.0.xlsx
- UBA. (2024a). *CO2-Rechner des Umweltbundesamtes*. https://uba.co2-rechner.de/de_DE/
- UBA. (2024b). *Daten zur Umwelt* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten>
- UBA. (2024c). *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen, 1990 bis 2022 (EU-Submission 01/2024)*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/361/dokumente/2022_04_04_em_entwicklung_in_d_trendtabelle_luft_v1.0.xlsx
- UBA - Chemikalien. (2024, März 25). <https://www.umweltbundesamt.de/daten/chemikalien#strap1>
- UBA und BfN. (2024). *For a green and just transition in Europe* (S. 58). Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-3795>

- Umwelt und Klima schützen – Wohnraum schaffen – Lebensqualität verbessern. Empfehlungen von UBA und KNBau für einen nachhaltigen Wohnungs- und Städtebau* (No. Mai 2023; UBA Position). (2023). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023_uba_pos_wohnraum_schaffung_bf_2auflage.pdf
- Umweltbundesamt. (2024, Juli 15). *Bevölkerungsentwicklung und Struktur privater Haushalte* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/strukturdaten-privater-haushalte/bevoelkerungsentwicklung-struktur-privater>
- Umweltbundesamt. (2025, Juli 22). *Bauabfälle* [Text]. Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle>
- UN. (2024a). *Home*. UNCCD. <https://www.unccd.int/home>
- UN. (2024b). *Sustainable Development Goals Report 2024*. United Nations.
- UNEP. (2022). *Stockholm 50+ Presidents' Final Remarks to Plenary Key recommendations for accelerating action towards a healthy planet for the prosperity of all*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/40110/Key%20Messages%20and%20Recommendations%20-%20Formatted.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- UNEP (Hrsg.). (2024a). *Global resources outlook: 2024*. International Resource Panel. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/44902>
- UNEP. (2024b). *Home*. Convention on Biological Diversity. <https://www.cbd.int/>
- UNEP. (2024c). *Intergovernmental Negotiating Committee on Plastic Pollution | UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unep.org/inc-plastic-pollution>
- UNEP. (2024d). *Welcome! | GFC*. <https://www.chemicalsframework.org/>
- UNEP IRP. (2023). *Global Material Flows Database* (No. World Materialfootprint) [Dataset]. <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>
- UNEP IRP. (2024). *Global Resources Outlook 2024: Bend the trend—Pathways to a liveable planet as resource use spikes*. UNEP International Resource Panel. <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook-2024>
- United Nations (Hrsg.). (2011). *UN Guiding Principles on Business and Human Rights*. https://www.ohchr.org/sites/default/files/documents/publications/guidingprinciplesbusinesshr_en.pdf
- VDLUFA. (2018). *Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf—Standpunkt*. https://www.vdlufa.de/Dokumente/Veroeffentlichungen/Standpunkte/2018_Standpunkt_P-Duengung.pdf
- Vehrkamp, Prof. Dr. R. (2025). *Selbstbeschädigung der Mitte* (No. 01/2025; EINWURF). Bertelsmann Stiftung. <https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/publikationen/publikation/did/einwurf-012025-selbstbeschadigung-der-mitte>
- Vélez-Henao, J. A., & Pauliuk, S. (2023). Material Requirements of Decent Living Standards. *Environmental Science & Technology*, 57(38), 14206–14217. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c03957>
- Verbraucherzentrale. (2024, Februar 28). *Warmwasser im Alltag sparen: So geht's*. <https://www.verbraucherzentrale.de/wissen/energie/heizen-und-warmwasser/warmwasser-im-alltag-sparen-so-gehts-17752>
- Vercalsteren, M., Christis, K., Nuss, P., Günter, J., & Marra Campanale, R. (2025). *Measuring environmental benefits of Circular Economy – Public report* (ETC CE Report No. 2025/3). European Environment Agency.

<https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-ce/products/etc-ce-report-2025-3-measuring-environmental-benefits-of-circular-economy>

Verordnung der europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020, Pub. L. No. EU 2024/1252, CRMA (2024). <http://data.europa.eu/eli/reg/2024/1252/oj/deu>

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 (Text von Bedeutung für den EWR), Pub. L. No. EU 2020/852, 198 OJ L (2020). <http://data.europa.eu/eli/reg/2020/852/oj/deu>

Verse, B., & Douglas, M. (2023). *Reformhebel für eine klima- und umweltschutz-orientierte Bundesverkehrswegeplanung nach 2030*.

https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/366/dokumente/uba_kurzpapier_bvwp_kliv.pdf

Watari, T., Nansai, K., & Nakajima, K. (2021). Contraction and convergence of in-use metal stocks to meet climate goals. *Global Environmental Change*, 69, 102284. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102284>

Wilts, H., Bringezu, S., Bleischwitz, R., Lucas, R., & Wittmer, D. (2011). Challenges of metal recycling and an international covenant as possible instrument of a globally extended producer responsibility. *Waste Management & Research*, 29(9), 902–910. <https://doi.org/10.1177/0734242X11415311>

Wilts, H., Galinski, L., & Von Gries, N. (2019). *Geeignete Maßstäbe und Indikatoren zur Erfolgskontrolle von Abfallvermeidungsmaßnahmen* (S. 1 Onlineressource (196 Seiten), 4,68 MB) [Online resource]. Umweltbundesamt. <https://doi.org/10.60810/OPENUMWELT-6544>

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU). (2025). *Sicherheit: Worüber wir jetzt reden müssen* (No. Impulspapier Nr. 3). <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/ip03-2025>

Wolf, H., Höpfner, L., & Dost, S. (2021). *Case Study 01—Orte zirkulärer Praxis*. Hans Sauer Stiftung. https://socialdesign.de/wp-content/uploads/2021/07/OZP_CaseStudy_digital.pdf

Wolf, S. (2017). *Integration von Wärmepumpen in industrielle Produktionssysteme – Potenziale und Instrumente zur Potenzialerschließung*. Stuttgart.

Wörner, J.-D., & Schmidt, C. M. (2022). *Sicherheit, Resilienz und Nachhaltigkeit* (acatech IMPULS). acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. <https://www.acatech.de/publikation/sicherheit-resilienz-und-nachhaltigkeit/>

WWF. (2023). *Modell Deutschland Circular Economy: Eine umfassende Circular Economy für Deutschland 2045 zum Schutz von Klima und Biodiversität*. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/WWF-Modell-Deutschland-Circular-Economy-Broschuere.pdf>

Zhang, C., Hu, M., Di Maio, F., Sprecher, B., Yang, X., & Tukker, A. (2022). An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of the Total Environment*, 803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149892>

Zwiers, J., Jaeger-Erben, M., & Hofmann, F. (2020). Circular literacy. A knowledge-based approach to the circular economy. *Culture and Organization*, 26(2), 121–141. <https://doi.org/10.1080/14759551.2019.1709065>